

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARADENİZ BÖLGESİ'NDEKİ İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ
AGREGA YERİNE KULLANILABİLİRLİĞİNİN VE MADENCİLİKTE
KULLANIM ALANLARININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Maden Yük. Müh. Gökhan KÜLEKÇİ

**HAZİRAN 2018
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARADENİZ BÖLGESİ'NDEKİ İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ AGREGA YERİNE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN VE MADENCİLİKTE KULLANIM ALANLARININ
ARAŞTIRILMASI**

Gökhan KÜLEKÇİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (MADEN MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 / 05 / 2018

Tezin Savunma Tarihi : 21 / 06 / 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali OSMAN YILMAZ

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇULLU

Trabzon 2018

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalında
Gökhan KÜLEKÇİ Tarafından Hazırlanan**

**KARADENİZ BÖLGESİ'NDEKİ İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ AGREGA YERİNE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN VE MADENCİLİKTE KULLANIM ALANLARININ
ARAŞTIRILMASI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 29 /05/2018 gün ve 1755 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

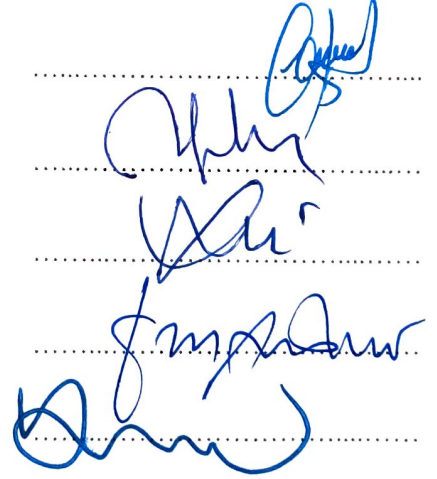
Başkan : Prof. Dr. Metin DAVRAZ

Üye : Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Üye : Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ

Üye : Prof. Dr. Kerim AYDINER

Üye : Doç. Dr. Hakan ERSOY



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Karadeniz Bölgesi`ndeki İnşaat Yıkıntı Atıklarının Agregaya Yerine Kullanılabilirliğinin ve Madencilikte Kullanım Alanlarının Araştırılması” isimli bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı`nda “doktora tezi” olarak hazırlanmıştır.

Tez konusunun belirlenmesinden çalışmaların yürütülmesi ve sonuçlandırılmasına kadar her aşamasında bilgi, deneyim, destek ve görüşlerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ ‘a sonsuz minnetlerimi bildiririm.

Çalışmalarım süresince engin bilgi ve birikimini benimle paylaşan ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi MUSTAFA ÇULLU’ya, ufkumu genişleten hocalarım Prof.Dr. Kerim AYDINER ve Doç.Dr. Hakan ERSOY’a ve savunmamda bulunan ve tezime eşsiz katkılar sunan Prof. Dr. Metin DAVRAZ ve Prof. Dr. Serkan Subasi hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve başarımın gizli kahramanı babam Serdar KÜLEKÇİ’ye, çalışmalarım boyunca yardım ve hoşgörüyü esirgemeyen Maden Mühendisliği Bölümü bütün akademisyen ve diğer çalışanlarına, tez çalışmalarım süresince değerli zamanlarını çaldığım kızlarım Gökçe ve Aybüke KÜLEKÇİ’ye, ayrıca doktora çalışmalarımı destekleyen FDK-2016-5639 kodlu BAP projesi için Karadeniz Teknik Üniversitesi ve BAP proje birimine, şükranlarımı sunarım.

Gökhan KÜLEKÇİ

Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

“Doktora Tezi” olarak sunduğum “Karadeniz Bölgesi`ndeki İnşaat Yıkıntı Atıklarının Agregaya Yerine Kullanılabilirliğinin ve Madencilikte Kullanım Alanlarının Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/06/2018

Gökhan KÜLEKÇİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Geri Kazanılmış Agregada (GKA).....	2
1.2.1. Geri Kazanımın Önemi ve Dünyada Atık Beton Kazanımı	3
1.2.2. Geri Kazanılmış Agregaların Kullanım Amacı ve Kullanım Alanları	5
1.2.3. Geri Kazanılmış Agregayla İlgili Literatür Çalışmaları	8
1.3. Püskürtme Beton.....	13
1.3.1. Püskürtme Betonun Uygulama Yöntemleri.....	15
1.3.1.1. Kuru Karışım Sistemi	15
1.3.1.2. Yaş Karışım Sistemi	16
1.3.1.3. Püskürtme Beton Uygulama Yöntemlerinin Karşılaştırılması	17
1.3.2. Püskürtme Betonda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	17
1.3.2.1. Agregada.....	18
1.3.2.2. Su.....	20
1.3.2.3. Bağlayıcı ve Mineral Katkılar (Puzolanlar).....	20
1.3.2.4. Katkı Maddeleri	22
1.3.3. Püskürtme Betonla İlgili Literatür Çalışmaları.....	24
1.4. Yeraltında Dolgu Yöntemleri	28
1.4.1. Yeraltı Yapılarında Kullanılan Dolgu Metotları.....	31
1.4.1.1. Hidrolik Dolgu.....	31
1.4.1.2. Macun Dolgu	33
1.4.1.3. Kaya Dolgusu	34
1.4.2. Yeraltı Dolgusu ile İlgili Literatür Çalışmaları.....	37

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	41
2.1.	Giriş	41
2.2.	Materyal.....	44
2.2.1.	İnşaat Yıkıntı Atıkları	44
2.2.2.	Doğal Agregal.....	49
2.2.3.	Çimento.....	50
2.2.4.	Puzolanlar (Uçucu Kül, Pişmiş Kil)	51
2.2.4.1.	Uçucu Kül.....	51
2.2.4.2.	Pişmiş Kil	54
2.2.5.	Mermer Tozu	56
2.2.6.	Sentetik Fiberler.....	58
2.2.7.	Kullanılan Kimyasallar (Priz Hızlandırıcı, Akışkanlaştırıcı)	59
2.3.	Metod.....	59
2.3.1.	Bina Molozlarından Örnek Alınması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi	63
2.3.1.1.	Karot Örneklerinin Hazırlanması	63
2.3.1.2.	Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Tayini	65
2.3.1.3.	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini	65
2.3.1.4.	Nokta Yükleme Deneyi	67
2.3.1.5.	Schmidt Çekici Deneyi	68
2.3.1.6.	Böhme Aşınma Deneyi.....	68
2.3.1.7.	Karbonatlaşma Derinliğinin Tayini	70
2.3.2.	Geri Kazanılmış Agregal Deneyleri	71
2.3.2.1.	Agregal Örneklerinin Hazırlanması.....	71
2.3.2.2.	Yoğunluk- Su Emme, Nem ve Porozite Deneyleri.....	71
2.3.2.3.	Organik Madde İçeriği (Metilen Mavisini Deneyi).....	74
2.3.2.4.	Darbe Dayanım Deneyi	75
2.3.2.5.	Yassılık İndeksi Deneyi.....	76
2.3.2.6.	Donma-Çözünme Deneyi	77
2.3.2.7.	Alkali Silika Reaksiyon Tayini.....	79
2.3.2.8.	Aşınma Tayini	86
2.3.3.	Püskürtme Beton Deneyleri.....	89
2.3.3.1.	Beton Numunelerinin Hazırlanması	89
2.3.3.2.	Çökme Testi.....	93

2.3.3.3.	Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Tayini	94
2.3.3.4.	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi	94
2.3.3.5.	Plak Deneyleri	95
2.3.3.6.	İnce Kesit	101
2.3.4.	Yeraltı Dolgu Deneyleri	103
2.3.4.1.	Çökme Testi.....	104
2.3.4.2.	Tek Eksenli Basınç Dayanım Deneyi	105
2.3.4.3.	Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Tayini Deneyi.....	106
3.	BULGULAR VE TARTIşMA	107
3.1.	Bina Molozlarının Mekanik Özellikleri.....	107
3.1.1.	Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Tayini	107
3.1.2.	Tek Eksenli Basınç Dayanımı	108
3.1.3.	Nokta Yükleme Deneyi	110
3.1.4.	Schmidt Çekici Yüzey Sertlik Deneyi.....	111
3.1.5.	Böhme Aşınma Deneyi.....	112
3.1.6.	Karbonatlaşma Derinliği.....	113
3.2.	Geri Kazanılmış Agrega Deneyleri	114
3.2.1.	Geri Kazanılmış Agregaların Yoğunluk, Porozite ve Nem İçerikleri	115
3.2.2.	Organik Madde İçeriği (Metilen Mavisı Deneyi).....	116
3.2.3.	Darbe Dayanım Deneyi	117
3.2.4.	Yassılık İndeksi	117
3.2.5.	Donma-Çözünme Deneyi	118
3.2.6.	Alkali Silika Deneyi (Kimyasal Yöntem).....	118
3.2.7.	Alkali Silika Deneyi (Hızlandırılmış Harç Çubuğu)	119
3.2.8.	Micro Deval Aşınma Deneyi.....	123
3.2.9.	Los Angeles Deneyi.....	124
3.3.	Püskürtme Beton Deneyleri.....	126
3.3.1.	Çökme Testi.....	126
3.3.2.	Ultrasonik Ses Geçiş Hızı.....	127
3.3.3.	Tek Eksenli Basınç Dayanımı	131
3.3.4.	Plak Deneyleri	135
3.3.4.1.	Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk) Tayini	136
3.3.4.2.	Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Ölçümü	141

3.3.4.3.	Plaklarda Donma-Çözünme Deneyi	145
3.3.4.4.	Birim Hacim Ağırlık Deneyi	153
3.3.5.	İnce kesit deneyleri	156
3.4.	Yeraltı Dolgu Deneyleri	157
3.4.1.	Çökme Testi.....	157
3.4.2.	Tek Eksenli Basınç Dayanım	157
3.4.3.	Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Tayini	159
3.5.	Genel Değerlendirme.....	162
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	164
5.	KAYNAKLAR.....	173
6.	EKLER.....	185
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

KARADENİZ BÖLGESİ'NDEKİ İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ AGREGA
YERİNE KULLANILABİLİRLİĞİNİN VE MADENCİLİKTE KULLANIM
ALANLARININ ARAŞTIRILMASI

Gökhan KÜLEKÇİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ
2018, 185 Sayfa, 3 Sayfa Ek

Türkiye’de Karadeniz Bölgesi’nde kentsel dönüşüm kapsamında oluşan inşaat molozlarının çevreye birçok olumsuz etkisi vardır. Bu tezin amacı, kentsel dönüşüm ve büyük depremler gibi faktörler sonucu oluşan ve çevresel açıdan problem oluşturan inşaat molozlarından geri kazanılmış agrega (GKA) elde edebilmesi ve elde edilen agregaların madencilik sektöründe püskürtme betonda (PB) ve yeraltı dolgusunda (YD) dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Çalışma dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, Karadeniz Bölgesi’nden inşaat moloz örnekleri temin edilerek fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. İkinci aşamada, inşaat molozları beton agregası boyutuna getirilerek, GKA örnekleri üzerinde mekanik, fiziksel ve kimyasal agrega deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üçüncü ve 4. aşamada ise, PB ve YD betonları üretilmiştir. GKA’ların ince doğal agrega yerine %0-25-50-75-100 oranlarında GKA kullanılarak PB örnekleri üretilmiştir. İri agrega yerine kütlece %0-25-50-100 oranlarında GKA kullanılarak YD örnekleri hazırlanmıştır. Her iki beton türü üzerinde çökme miktarı, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı deneyleri ve beton örnekler üzerinde plak testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise sonuçlar belirli bir sıra içinde kısaca özetlenmiştir. Sonuç olarak, Karadeniz Bölgesi’nden elde edilen GKA’ların püskürtme betonda ve yeraltında güvenli bir şekilde kullanılabileceği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton atıkları, Geri kazanılmış agrega, Kaya dolgu, Püskürtme beton, Yeraltı dolgu

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE UTILIZATION AREAS OF CONSTRUCTION AND
DEMOLITION WASTES IN THE BLACK SEA REGION INSTEAD OF AGGREGATE
AND THEIR AREAS OF USAGE IN THE MINING INDUSTRY

Gökhan KÜLEKÇİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr Ali Osman YILMAZ
2018, 185 Pages, 3 Pages Appendixes

Construction and demolition wastes originating from urban transformation in the Black Sea Region have many negative effects to the environment. Scope of this thesis is to obtain recovered aggregate (RA) from urban transformation and from big earthquakes which are problematic for environment and to use these RAs in shotcrete and in underground filling material in mining industry. This study was organized in four stages. At the first stage, construction waste samples from the Black Sea Region were collected and physical and mechanical properties of these samples were determined. Secondly, construction wastes were crushed into the size of concrete aggregate, physical, mechanical and chemical aggregate tests were conducted on these RAs. Finally, shotcrete and underground filling concretes were casted. RAs were utilized in shotcrete instead of natural aggregate in percentages of 0-25-50-75-100%. Additionally, RAs were used in underground rock fills in varying percentages of 0-25-50-100% instead of coarse aggregate. Both concrete types were subjected to slump, compressive strength, ultrasound transition velocity and slab tests. In the final stage of the research, the findings were briefly summarized in a particular order. As a result, it has been determined that the RAs obtained from the Black Sea Region can be safely used in shotcrete and underground.

Key Words: Concrete wastes, Recovered aggregate, Rock fill, Shotcrete, Underground fill

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Geri kazanılmış agrega (GKA) üretimi için tipik bir tesisin akış şeması (Boesman, 1985).	3
Şekil 1.2.	Depremlerde oluşmuş bina molozları, a) 2008 Siçuan depremi, b) 2017 Meksika depremi, c, d) 2010 Yushu ve 2011 Yunnan depremi sonrası.....	7
Şekil 1.3.	Kuru karışım püskürtme beton uygulaması	16
Şekil 1.4.	Yaş püskürtme beton uygulaması a) Makine kullanılarak, b) Manuel uygulama	17
Şekil 1.5.	Yeraltında kullanılan dolgu yöntemleri, a) hidrolik dolgu, b) macun dolgu, c) kaya dolgu (URL-1).	31
Şekil 1.6.	Hidrolik dolgu uygulaması, a) dolgu uygulama prosedürü, b) fiziksel görüntü (URL-2).	32
Şekil 1.7.	Yeraltı madenlerinde uygulanan macun dolgu yöntemi (Erçikdi, 2009).	33
Şekil 1.8.	Macun dolgu uygulaması, a) Macun dolgunun nakil borusundan çıkışı, b) fiziksel görüntü (URL- 3).	34
Şekil 1.9.	Kaya dolgu yöntemi (Url-4).	35
Şekil 1.10.	a) Taş ocağından sağlanan agrega ile yapılan kaya dolgu, b) Yerçekimi yardımı ile yapılan çimentolu kaya dolgusu uygulaması (Erçikdi, 2009, Hustrulid W., 2001).	36
Şekil 1.11.	Kaya dolgunun yatayda, a, b) kepçe yardımı ve c) dolgu fırlatma bandı ile yerleştirilmesi yöntemi (URL- 5, Hustrulid W., 2001).	37
Şekil 2.1.	İnşaat molozlarının temin edildiği noktalar	44
Şekil 2.2.	Tez çalışması kapsamında kullanılan a) malzeme, b) miktarları ve c) temin yeri.....	45
Şekil 2.3.	İnşaat atıklarının alınması a, b, c) Kentsel dönüşüm amaçlı binaların yıkılması ve moloz oluşumu, d, e, f) numunelerin laboratuvara getirilmesi g, h) boyut küçültme işlemine hazırlanması	46
Şekil 2.4.	Geri kazanılmış agrega için kırma eleme devresi	48
Şekil 2.5.	GKA sınıflandırılması a) Laboratuvara getirilen beton molozların b) hilti ve çeneli kırıcı yardımı ile boyutlarının küçültülmesi, c, d, e) elenerek sınıflandırılması.....	49
Şekil 2.6.	Doğal agreganın kırma eleme tesisinden taşınması, a) Kamyona yükleme, b, c, d) Paketleme ve uygun sınıf aralığına getirilme işlemi	50

Şekil 2.7.	Uçucu kül, a, b, c) Uçucu külün laboratuvarında depolanması, d) bilyeli ve çubuklu değirmen yardımı ile uygun boyuta getirilmesi	52
Şekil 2.8.	Afşin-Elbistan uçucu külün tane boyut dağılımı.....	54
Şekil 2.9.	Pişmiş kilin öğütülmesi a) bilyeli ve b) çubuklu değirmen kullanarak pişmiş kil numunesinin c) uygun boyuta getirilmesi	55
Şekil 2.10.	Pişmiş kilin tane boyut dağılımı.....	56
Şekil 2.11.	Mermer atıkları, a) tez çalışmasında kullanılan mermer atığı, b, c) bilyeli ve çubuklu değirmen ile uygun boyuta getirilmesi	57
Şekil 2.12.	Dökümlerde kullanılan sentetik lifler (a), b) Meyco F1b SP 540), c) Forta-Ferro	58
Şekil 2.13.	Yapılan çalışmanın akış şeması.....	61
Şekil 2.14.	Bina molozları, b) bina molozlarından örnek alımı, c, d) laboratuvara getirilmesi.....	63
Şekil 2.15.	Atık betonlar, a, b, c, d) Beton molozlarından karot alınması, e, f, g) alınan karotların sandıklanması ve h, ı, i, j,k) boy çap oranı ayarlanarak kesilmesi.....	64
Şekil 2.16.	(a) İnşaat molozlarında alınan karotlar (b) üzerinde yapılan UPV ölçümleri.....	65
Şekil 2.17.	İnşaat moloz karotlarının a) tek eksenli basınç dayanım deneyi ve b, c) kırılma şekilleri	66
Şekil 2.18.	İnşaat atıklarına uygulanan, a) eksenel nokta yükleme deneyi	67
Şekil 2.19.	a, b) Schmidt çekici sertlik ölçümleri.....	68
Şekil 2.20.	Böhme aşınma deneyi, a, b) deney düzeneği	69
Şekil 2.21.	Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi, a) inşaat moloz karotlarının ve b) fenelftalein hazırlanması, c, d) karbonatlaşma derinlik ölçülmesi	70
Şekil 2.22.	İnşaat molozlarının sınıflanması a). molozların boyut küçültme ve b) eleme işlemi.....	71
Şekil 2.23.	Yoğunluk deneyleri, a) Arşimet terazisi ve b, c, d, e) suda yüzdürme yöntemleri.....	73
Şekil 2.24.	Metilen mavisi deney düzeneği.....	75
Şekil 2.25.	Darbe dayanım deneyi, a,b) darbe dayanım cihazı hazne ve sayacı	76
Şekil 2.26.	Yassılık indeksi deneyi, a) deney seti, b) GKA'ların elek ile elenmesi, c) Agregaya yassılık tayin şablonundan ve d) GKA'nın çubuklu elekten geçirilmesi	77

Şekil 2.27.	Donma çözünme deney düzeneği, a, b) GKA'ların suya doygun hale getirilmesi, c) su kaybını engellemek için ağızları kapatılarak d) donma çözünme dolabına yerleştirilmeleri	79
Şekil 2.28.	Alakali silika reaksiyonu sonucu oluşan çatlaklar, a) İzmir havalimanı pistinde, b) köprü ayaklarında, c, d) karayolu yol bariyerinde gözlenen ASR çatlakları (Katayama, 2000, Andiç Çakır, 2007).....	80
Şekil 2.29.	Alkali silika reaksiyonu deneyi a, b) karışımda kullanılan malzemeler, c) ikili harç çubuğu kalıpları, d) harç çubuklarının dökülmesi	83
Şekil 2.30.	a) Hızlı harç çubuklarının kalıplardan çıkarılması, b, c) sıcak suda bekletilmesi	84
Şekil 2.31.	a) Termostat'lı kür tankı, b) solüsyon eklenmesi, c) numune yerleşimi	85
Şekil 2.32.	a) Dijital komparatörün sıfırlanması, b, c) örneklerin boy ölçümü.....	86
Şekil 2.33.	Mikro- Deval aşınma deneyi, a) deney için uygun boyutta GKA, b, d) haznelerin sökülmesi ve deney düzeneği, c, e) deney sonrası eleme işlemi	87
Şekil 2.34.	GKA ile yapılan Los Angeles deney a) öncesi ve b) sonrası	88
Şekil 2.35.	Silindir numune dökümü a) Dökümde kullanılan malzemeler, b) Mikserde karıştırma işlemi, c) kalıpların yağlanması, d, e) silindir numunelerin dökümü ve sıkıştırılması, (f) numunelerin kalıptan çıkarılarak kür tankına yerleştirilmesi.....	92
Şekil 2.36.	(a) Çökme testi deneyi, (b) kıvamı uygun ve (c) uygun olmayan döküm.....	93
Şekil 2.37.	Ultrasonik sismik hız deneyi, a) silindir numunelerin hazırlanması, b) boy ölçümü ve c) UPV ölçümleri.....	94
Şekil 2.38.	Tek eksenli basınç dayanım deneyi a, b) silindir numuneler, c) kırılmış numunelerin içerisindeki sentetik lifler.....	95
Şekil 2.39.	Plak dökümleri, a) Plak döküm kalıplarının montaj ve yağlanması, b, c) karıştırıcı ile karıştırılma, d, e) kalıba döküm işlemi, f) kalıplardan çıkarılan plakların nemli ortama konulması.....	97
Şekil 2.40.	(a, b) Tokluk tayini için plakların yerleştirilmesi, (c, d) plakların düzgün kırılma şekilleri	98
Şekil 2.41.	a, b) Plak numunelerinde Ultrasonik hız ölçümü (UPV) ölçümü	99
Şekil 2.42.	Plaklardan alınan numuneler üzerinde donma çözünme deneyi a) karotlarının donma çözünme kabına yerleştirilmesi ve b) donmuş numuneler.....	100
Şekil 2.43.	a, b) Plak numunelerinin birim hacim kütle deneyi	100
Şekil 2.44.	İnce kesit analizi a) İnce kesit laboratuvarı, b) Araştırma mikroskobu ve c), görüntü işleme, d) oluşturulan ince kesitler	102

Şekil 2.45.	Dolgu deneyleri a) Küp dökümler için karışımın karıştırılması, b) küp kalıplarının hazırlanması, c, d, e), küplerin doldurulması ve sıkılama işlemi, f) numunelerin kür havuzuna konulması.....	104
Şekil 2.46.	Çökme deneyi a) çökme hunisinin çıkarılması, b) çökme miktarının ölçülmesi	105
Şekil 2.47.	Tek eksenli basınç dayanım deneyi a, b) küp numunelerin TEB aletine yerleştirilmesi ve kırılması.....	106
Şekil 2.48.	Ultrasonik sismik hız (UPV) deneyi a) küp numunelerin ultrasonik hız ölçü deneyine hazırlanması ve b) UPV ölçümü.....	106
Şekil 3.1.	Atık beton (ATB) numunelerinin P dalga hızı.....	108
Şekil 3.2.	Atık beton bloklarının tek eksenli basınç dayanımı.....	109
Şekil 3.3.	Schmidt çekici sertlik sonuçları	111
Şekil 3.4.	Böhme aşınma değerleri.....	113
Şekil 3.5.	İnşaat molozlarından alınan karotlarda oluşan karbonatlaşma derinlikleri	114
Şekil 3.6.	GKA görünür tane yoğunluk değerleri.....	115
Şekil 3.7.	Geri kazanılmış agreganın aktif silis içeriği.....	119
Şekil 3.8.	Uçucu kül katkılı harç çubukların boy uzama değerleri	120
Şekil 3.9.	Pişmiş kil katkılı harç çubukların genleşme değerleri	122
Şekil 3.10.	Bütün katkılı ve referans harç çubukların boy uzama değerleri.....	122
Şekil 3.11.	Micro-deval deneyinde tamburlarda meydana gelen kütle kaybı	123
Şekil 3.12.	Mikro deval aşınma indeksi	124
Şekil 3.13.	Los Angeles deneyi sonucunda oluşan kütle kaybı.....	125
Şekil 3.14.	Geri kazanılmış agregaların Los Angeles aşınma indeksi	125
Şekil 3.15.	Geri kazanılmış agrega ve doğal agregalı silindir numunelerin ultrasonik ses geçiş hızı.....	129
Şekil 3.16.	Geri kazanılmış agrega oranının kısa kür süresinde UPV'ye etkisi.....	129
Şekil 3.17.	Geri kazanılmış agrega oranının uzun kür süresinde UPV'ye etkisi	130
Şekil 3.18.	Lif katkı miktarının kısa dönem UPV üzerinde etkisi.....	131
Şekil 3.19.	Lif katkı miktarının uzun dönem UPV üzerinde etkisi	131
Şekil 3.20.	Kontrol numunesi ve geri kazanılmış agrega dayanım ilişkisi	132
Şekil 3.21.	Farklı oranlardaki GKA'ların kısa kür süresinde dayanıma etkisi.....	133

Şekil 3.22.	Farklı oranlardaki GKA'ların uzun kür süresinde dayanıma etkisi	134
Şekil 3.23.	GKA'nın polyester lif ile etkileşimi.....	134
Şekil 3.24.	Plakların düzenli bir şekilde 4 parça halinde kırılması, a) lifli plaklar, b) referans plaklar	136
Şekil 3.25.	Plak numunelerinde kuvvet-sehim ilişkisi	137
Şekil 3.26.	Geri kazanılmış agrega oranı tokluk enerji ilişkisi.....	138
Şekil 3.27.	Polipropilen lif miktarı tokluk ilişkisi	138
Şekil 3.28.	Kopolimer lif tokluk ilişkisi	139
Şekil 3.29.	Geri kazanılmış agrega ve farklı liflerin tokluk üzerine etkisi.....	140
Şekil 3.30.	Plaklarda kırılma şekilleri, a, c) sentetik lif kullanımı dağılmayı engellemesi ve esnekliği artırması, b) sentetik lif kullanılmayan referans plak örneği.....	141
Şekil 3.31.	Geri kazanılmış agrega oranı ile UPV ilişkisi	142
Şekil 3.32.	Polipropilen lif oranı P dalga hızı ilişkisi	143
Şekil 3.33.	Kopolimer lif P-dalga hızı ilişkisi	144
Şekil 3.34.	Geri kazanılmış agrega ve farklı liflerin P dalga hızı üzerine etkisi	144
Şekil 3.35.	Geri kazanılmış agrega oranı ile donma çözünme ilişkisi.....	146
Şekil 3.36.	Plaklarda donma çözünme sonrası geri kazanılmış agrega oranı ile P-dalgası ilişkisi.....	147
Şekil 3.37.	GKA'larda polipropilen lif miktarı ve donma çözünme ilişkisi	148
Şekil 3.38.	Donma çözünme döngüsü sonrası plaklarda polipropilen lif miktarı ve UPV ilişkisi	150
Şekil 3.39.	Kopolimer lif miktarı ve donma çözünme ilişkisi.....	151
Şekil 3.40.	Kopolimer lif miktarı ve UPV ilişkisi	152
Şekil 3.41.	Donma çözünme deneyi (a) sonunda karot numunelerinin dağılması ve (b) dağılmayı engelleyen lif taneleri	153
Şekil 3.42.	Geri kazanılmış agrega oranı ile birim hacim kütle ilişkisi	154
Şekil 3.43.	Polimer lif miktarı birim hacim kütle ilişkisi	155
Şekil 3.44.	Kopolimer lif miktarı birim hacim kütle ilişkisi	155
Şekil 3.45.	Püskürtme betonda kullanılan GKA'ların ince kesit görüntüsü (a, b, c, d) (AG: agrega, MB: mikro boşluk, BA: bağlayıcı madde, Ç: agrega yüzeyini kaplayan eski çimento)	156

Şekil 3.46.	GKA içerikli küp numunelerin kür süresi ile basınç dayanım ilişkisi	158
Şekil 3.47.	Uçucu kül katkılı GKA tek eksenli basınç dayanımı	159
Şekil 3.48.	Kısa kür süresine bağlı GKA miktarı ile UPV ilişkisi	160
Şekil 3.49.	Uzun kür süresine bağlı GKA miktarı ile UPV ilişkisi.....	161
Şekil 3.50.	Dolgu amaçlı kullanılan UK katkılı beton numunelerinde GKA miktarı ile UPV ilişkisi	162



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	AB ülkelerinde meydana gelen inşaat moloz miktarları ve geri dönüşüm yüzdeleri (BIOIS, 2011).....	5
Tablo 1.2.	Püskürtme betonun tarihsel gelişiminin özeti (Rose, 1985; Barreth and McCreath'ten, 1995).....	15
Tablo 1.3.	Yaş ve kuru püskürtme beton yöntemlerinin karşılaştırılması (Girgin vd., 1998).....	18
Tablo 1.4.	Çeşitli standartlara göre beton agregalarının sağlaması gereken fiziksel ve mekanik özellikler (Arioğlu, 2008).....	19
Tablo 1.5.	Puzolanik katkıların çimento ile ikamesi için önerilen maksimum oranlar (Melbye and Dimmock, 2001).	22
Tablo 1.6.	Priz hızlandırıcı katkıların genel özellikleri (Arioğlu vd., 2008).....	23
Tablo 1.7.	Değişik lif tiplerine ait mekanik büyüklükler (DSİ, 1994).	24
Tablo 1.8.	Madenlerde uygulanan dolgu çeşitleri ve özellikleri (Yılmaz, 2003).....	30
Tablo 2.1.	Tez kapsamında yapılan deney listesi	42
Tablo 2.2.	Tez kapsamında yapılan çalışmalar ve alınan malzeme miktarları.....	43
Tablo 2.3.	Geri kazanılmış agregaların elek analiz değerleri	47
Tablo 2.4.	CEM I 42.5 N kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	51
Tablo 2.5.	Tez çalışması kapsamında kullanılan Afşin-Elbistan C- sınıfı uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	53
Tablo 2.6.	Pişmiş kilin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri	55
Tablo 2.7.	Mermer atıklarının kimyasal, fiziksel ve mineralojik bileşimi	57
Tablo 2.8.	Tez kapsamında kullanılan fiberlerin teknik özellikleri.....	59
Tablo 2.9.	Kimyasal katkı maddelerinin teknik özellikleri	59
Tablo 2.10.	Tez kapsamında kullanılan bütün malzeme, döküm ve örnek sayıları	62
Tablo 2.11.	Geri kazanılmış agreganın literatür yoğunlukları ve su emme oranları	72
Tablo 2.12.	Bazı kayaçların porozite değerleri.....	74
Tablo 2.13.	Donma-Çözülme döngü deneyi için gereken deney numunesi kısımlarının miktarları (TS EN 1367-1).....	77

Tablo 2.14.	Harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri için malzeme karışım oranları	81
Tablo 2.15.	Harç çubukları malzeme karışım miktarları.....	82
Tablo 2.16.	Harç çubuk döküm karışımları.....	82
Tablo 2.17.	Lifsiz püskürtme beton karışım oranları	90
Tablo 2.18.	Hazırlanan lif katkılı püskürtme beton numuneleri.....	91
Tablo 2.19.	Plak deneyi beton karışım oranı	96
Tablo 2.20.	Plak beton türü ve kodlamaları.....	96
Tablo 2.21.	Geri kazanılmış agregada dolgu betonda kullanımına yönelik deneysel tasarım	103
Tablo 3.1.	İnşaat molozlarının boyutları	107
Tablo 3.2.	Betonun UPV'ye göre sınıflandırılması (IS., 1992).....	108
Tablo 3.3.	Tek eksenli basınç dayanımına göre kaya sınıflaması (Deer ve Miller ,1966).....	109
Tablo 3.4.	İnşaat atıklarının nokta yükleme sonuçları.....	110
Tablo 3.5.	Kayaçların nokta yük dayanımlarına göre sınıflandırılması (Bieniawski, 1975).....	110
Tablo 3.6.	Kayaçların Schmidt sertlik değerlerine göre sınıflaması ve alınan örneklerin sınıfı	111
Tablo 3.7.	Böhme yüzeysel aşınma değerleri.....	112
Tablo 3.8.	Karbonatlaşma derinliği	114
Tablo 3.9.	Kayaçların Poroziteye Göre Sınıflandırılması (Tarhan 1989)	116
Tablo 3.10.	GKA'ların yoğunluk ve su emme oranlarının standartlar ile karşılaştırılması	116
Tablo 3.11.	Metilen mavisi deney sonuçları.....	117
Tablo 3.12.	Geri kazanılmış agrega darbe dayanım deney sonuçları	117
Tablo 3.13.	GKA'ların donma çözünme deney sonuçları	118
Tablo 3.14.	En yüksek donma-çözülme direnç değerlerine göre kategoriler (TS 706 EN 12620).	118
Tablo 3.15.	Harç çubukların boy değişim değerleri	120
Tablo 3.16.	En yüksek aşınmaya karşı direnç değerlerine göre kategoriler (TS 706 EN 12620, 2003)	124

Tablo 3.17. Los Angeles Katsayı değerlerine göre kategoriler (TS 706 EN 12620)	126
Tablo 3.18. Püskürtme beton okme değerleri	127
Tablo 3.19. TS EN 206-1 standarına göre kıvam sınıflaması	127
Tablo 3.20. Püskürtme betonda kr süresine bağlı ultrasonik P-dalga hız değerleri	128
Tablo 3.21. Beton sınıfları için standart değerler (TS EN 206 +A1, 2013)	135
Tablo 3.22. Plak kodlamaları.....	136
Tablo 3.23. Dolgu beton okme değerleri	157
Tablo 3.24. Tez çalışmasında yapılan tüm deneyler sonuçlar ve sınır değerleri.....	163



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Hızla gelişen dünyada ortaya çıkan problemlerin başında çevre sorunları gelmektedir. Gelişen ve büyüyen insan topluluklarının ürettiği atıklar ve hammadde ihtiyacı insanların çevreye verdiği zararları artırmaktadır. Çevre sorunlarını azaltmak için üzerinde durulan başlıca konular; atık miktarının azaltılması, atıkların düzenli planlı ve güvenli depolanması, hammadde kaynaklarının verimli kullanılmasıdır. Dünya üzerinde artan teknoloji ve nüfus nedeni ile madencilik sektöründe önemli bir sorun oluşmuştur. Hammadde ihtiyacı madenlerde üretim miktarını ve hızını artırmıştır. Üretimin artışı, yeraltı madenciliğinde üretim boşlukları, tahkimat gibi sorunlar oluşturmuştur. Ayrıca nüfus artışı ile ortaya çıkan hızlı kentleşmeler sektörlerde agrega olarak hammadde ihtiyacını artırmaktadır (Demir, 2009).

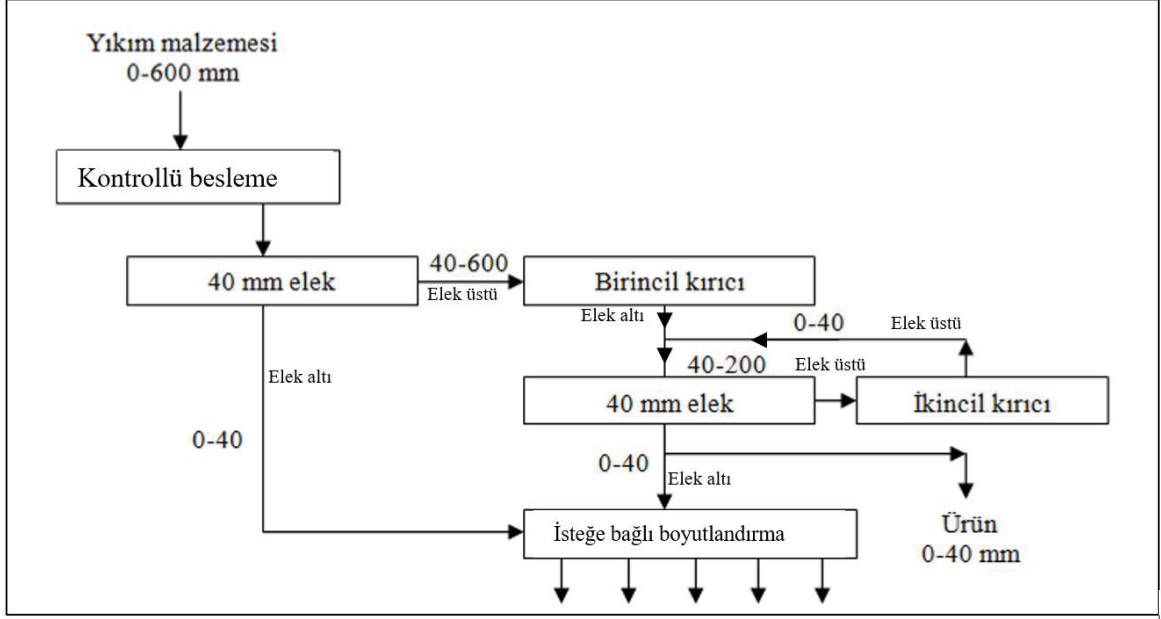
İnşaat sektörünün vazgeçilmez elemanı olan betonun büyük bir çoğunluğunu agrega oluşturmaktadır. Beton maliyeti bir metreküp beton için hesaplanacak olursa toplam maliyetin %20'sini agrega oluşturmaktadır (Arioğlu vd., 1996). Dünyada hızla gelişen inşaat sektörüne karşı betonda kullanılan malzemelere alternatifler aranmaya başlanmıştır. Betonda kullanılan bağlayıcı yerine puzolan ve kimyasallar kullanılırken agrega gibi vazgeçilmezini tam olarak yerini dolduran bir şey bulunamamıştır. İnşaatlarda ve diğer amaçlar için kullanılan betonun ana elemanı olan agrega ihtiyacının artması ve agrega kaynaklarının hızlı büyüyen şehir merkezleri ile iç içe kalması nedeni ile birçok çevresel problem oluşmuştur. Agrega ocaklarının merkezlerden uzaklaştırılması ise doğal agrega fiyatlarının artmasına neden olmaktadır. Yapılan bir araştırma 2004 yılında ABD'de 2,7 milyar ton doğal agrega kullanıldığını ortaya koymuştur (Rao vd., 2005). Bu büyüklükte bir madencilik faaliyetinin olduğu ortamda çevre kirliliği kaçınılmazdır. Yerleşim yerlerine uzaklığa bağlı olarak ses, gürültü, hava kirliliği (toz) gibi çevresel problemler artmaktadır. Bunlarla birlikte dünya üzerinde artan depremler dayanıksız ve ekonomik ömrünü doldurmuş binaların yıkılarak yenilenmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Kentsel dönüşüm adı verilen bu olay sonucu özellikle Türkiye'de oluşan inşaat atıklarının sağlıklı ve güvenli bir şekilde depolanması büyük bir sorun oluşturmaktadır (Demir, 2009).

Karadeniz bölgesi geçmiş yıllar boyunca birçok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Bu medeniyetlerin kültür özellikleri gibi inşaat ve yerleşim düzeninin de etkisi günümüzde görülmektedir. Çoğunlukla engebeli bir yapıya sahip olan bu bölgede yerleşim düzensiz ve dağınıktır. Şehirlerin hızlı büyümesi, gelişmesi sonucunda bu dağınık yerleşim yerlerine yol, su, elektrik gibi altyapı hizmetlerinin ulaştırılması zorlaşmaktadır. Gelişen dünya şartlarında Karadeniz bölgesinde kentsel dönüşüm yapılması ve şehir planlarının yeniden oluşturulması zaruri hale gelmiştir. Yapılan ve yapılacak olan kentsel dönüşüm sonrasında oluşacak inşaat atıklarının depolanması ve yeni inşaatlar için gerekli olan agrega temini büyük çevresel problemler oluşturacaktır. Bu çevresel problemlerin ortadan kaldırılması ve oluşacak atıkların değerlendirilmesi adına çalışmalar yapılmalıdır. Karadeniz bölgesinde faaliyet gösteren birçok büyük maden işletmesi mevcuttur. İnşaat atıklarının bölgedeki madenlerde değerlendirilmesi, çevresel sorunların giderilmesi adına faydalı olacaktır.

1.2. Geri Kazanılmış Agrega (GKA)

Farklı alanlarda kullanılmış malzemelerin atıkları bir dizgi işleminden geçtikten sonra tekrar kullanılabilir duruma getirilmesi olayına geri kazanım denilmektedir (Tüfekçi, 2011). Ekonomik ömrünü doldurarak, doğal afetler sonucu yıkılmış veya bozuk beton üretimi sonucu beton santrallerinden elde edilen kırılmış numune betonları ve prefabrikasyonda, üretim sırasında kesilip atılmak zorunda kalınan beton kısımlarının ayrıştırma kırma eleme gibi işlemlerden geçirilerek tekrar kazılması sonucu oluşan ürüne geri kazanılmış agrega (GKA) adı verilir (Arioğlu ve diğ., 1996).

Geri kazanma işleminin temelinde yatan mantık kullanılacak malzemenin belirli bir parçacık boyutuna indirilmesi işlemidir, aynı şekilde geri kazanılmış agrega üretimi için inşaat atık ve yikıntılarında alınan malzeme farklı tip ve boyutta kırıcılar, elekler, taşıma donanımları ve molozların içerdiği yabancı maddeleri ayırmak için ekipmanlar kullanılmaktadır (Boesman, 1985) (Şekil 1.1). GKA üretimi kullanılacak alana göre değişmekle birlikte, inşaat atıklarının ayrıştırılması ve kırma eleme devresinin tasarımı, başlangıçtaki molozun (yıkıntının) kirlilik seviyesine göre belirlenmektedir. Genel olarak GKA' lar genel dökme dolgu, kanalizasyon projelerinde temel veya dolgu, yol inşaatında temel altı veya kaplama malzemesi, yeni beton üretimi gibi temel alanlarda kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Geri kazanılmış agrega (GKA) üretimi için tipik bir tesisin akış şeması (Boesman, 1985).

1.2.1. Geri Kazanımın Önemi ve Dünya’da Atık Beton Kazanımı

Dünya üzerinde yapılmış yapıların büyük bir çoğunluğu hizmet ömrünü doldurmuştur. Artan nüfus ve depremler sonucu dünya genelinde çok fazla yıkım ve kentsel dönüşüm yapılmaktadır. Bu yıkımlar sonucunda ortaya çıkan inşaat molozları depolama alan sıkıntısı ve vergilerden dolayı ekonomik, çevresel ve ekolojik olarak sayısız problem oluşturmaktadır (Chandra, 2004).

Atıkların oluşturduğu problemlerin yanı sıra dünya üzerinde ki hızlı nüfus artışına paralel olarak artan inşaat sektörünün ihtiyaç duyduğu hammadde üretimi de sorun oluşturmaktadır. Hammadde temini genel olarak agrega ocaklarından yapılmaktadır. Bu agrega ocaklarının çoğunlukla şehir merkezlerine uzak olması ve çevreye verdikleri zarar nedeni ile ekonomikliklerini her geçen gün kaybetmektedirler. Şehir merkezine olan uzaklık arttıkça taşıma maliyeti artacak dolayısı ile doğal agreganın kullanıldığı proje maliyeti de artacaktır. Bunların yanında agrega üretim ocaklarının toz, taş savrulması, gürültü, su kaynaklarına zarar, görüntü kirliliği gibi çevreye verdiği zararlarda taş ocaklarına olan ilgiyi azaltmış ve alternatif kaynaklara bulma çabası oluşturmuştur. Dünya üzerinde her yıl 8-12 milyar ton doğal agrega tüketilmektedir. Bu tüketimin ortalama kişi başı kullanımı Avrupa’da yıllık 7 ton iken ülkemizde 4 ton mertebesindedir (Öztürk vd. 2007). Doğal

agreganın büyük bir çoğunluğu inşaat sektöründe beton yapımında kullanılmaktadır ve betonun %70-75'ini doğal agrega oluşturmaktadır. Agrega tüketimi bu hızda devam eder ve alternatif kaynaklar geliştirilemez ise hammadde kaynakların da ve çevresel açıdan ciddi bir problem oluşacağı belirtilmektedir (Tu vd. 2006). Bu kadar fazla agrega tüketiminin olduğu ve ihtiyacın her geçen gün arttığı bir sektörde geri kazanılmış agrega (GKA) kullanımı ve araştırılması zorunlu bir hal almaktadır. Kentsel dönüşüm sonucu oluşan bina atıkları yaklaşık içeriği %40 beton, %30 seramik, %10 ağaç, %5 metal, %5 plastik ve geri kalan %10 ise çeşitli malzemelerden oluşan bir yapı şeklindedir (Oikonomou, 2005). İnşaat atıklarından kazanılacak GKA sayesinde, doğal agrega temini ve kullanımı sırasında harcanan enerjinin %40'ını ve çevreye verdiği zararın %50'sinin telafi edilmesini sağlayacaktır. Ayrıca bina atıklarından elde edilecek GKA enerji tüketiminin en fazla olduğu kırma + eleme + nakliye üçlüsünün azalmasını dolayısı ile büyük ölçüde enerji tasarrufu sağlayacaktır (Arioğlu vd.1996).

Doğal agrega talebini artması ile taş ocaklarının çevreye verdiği zarar miktarının artması bunun yanında deprem ve kentsel dönüşüm sonucu yıkılan bina molozlarının depolanmasında ve saklanmasında oluşan sıkıntılar nedeni ile devletlerin yıkıntı atıklarını yeniden kullanımı ile ilgili tedbirler almaya, şehirde atıkların azaltılmasına yönelik planlar hazırlamaya zorlamaktadır. Buna bağlı olarak birçok yerel yönetim atık depolama alanlarını ücretli yapmaya ve atık depolama vergilerini artırma yoluna gitmektedir (Samton, 2003; HQ Afcee Report, 2004). Örneğin gelişmiş ülkelerden ABD, İngiltere, Hollanda, Danimarka, Almanya gibi ülkeler de yeraltı sularını kirletme riskinin olduğu düşünülerek inşaat atıklarının içme suyu kaynaklarının bulunduğu yerlere, bırakılması doldurulması, bekletilmesi yasaklanmıştır (Öztürk, 2003). Benzer şekilde vergiler artırılarak inşaat molozlarının taşıma depolama gibi maliyetler artırılarak geri kazanım teşvik edilmiştir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nin Boston şehrinde yapılan bir araştırmaya göre, ayrılmış beton atıklarının geri kazanımın maliyeti ton başına 21 dolar, karışık inşaat atıklarının geri dönüşüm maliyeti ton başına 84 dolar, depolama alanlarına atılmalarının maliyeti ise ton başına 136 dolardır (Lennon, 2005). Vergilerin ve depolama ücretlerinin bu hızla artması GKA üretiminin araştırılmasını ve geri kazanım yöntemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. 2005 verilerine göre ABD'de yılda 130 milyon ton inşaat molozu ortaya çıktığı geri dönüştürülmeden depolanmasının çok büyük çevresel kirlilik ve maliyet getireceği görülmüştür. Avrupa Birliği Komisyonununun 1999 da hazırlamış olduğu raporda, 15 üye ülkesi ortalama 180 milyon ton yıkıntı ve inşaat molozunun %28'i geri dönüştürülmüş,

%78'i ise depolanmıştır (Symonds Report,1999). AB üyesi ülkelerin bazılarında meydana gelen inşaat atık miktarı ve bunların geri kazanım oranları Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. AB ülkelerinde meydana gelen inşaat moloz miktarları ve geri dönüşüm yüzdeleri (BIOIS, 2011).

Ülke	Yapım ve Yıkım Atığı, milyon ton	Geri Dönüşüm, %
Hollanda	23,90	98
Danimarka	5,27	94
Estonya	1,51	92
Almanya	72,40	86
İrlanda	2,54	80
Birleşik Krallık	99,10	75
Litvanya	3,45	60
Slovenya	2,00	53
Letonya	2,32	46
Lüksemburg	0,67	46
Fransa	85,65	45
Polonya	38,19	28
Finlandiya	5,21	26
Macaristan	10,12	16
İspanya	31,34	14
Yunanistan	11,04	5
İtalya	46,31	*0
Türkiye	10,16	*0

*%0 ulaşılabilir veri bulunmadığı anlamında, en kötü durumun olduğu kabulüyle kullanılmıştır

1.2.2. Geri Kazanılmış Agregaların Kullanım Amacı ve Kullanım Alanları

Çevresel ve ekonomik olarak depolanmasının zor olduğu inşaat molozlarından elde edilen agregaların dünya üzerinde kullanım alanı oldukça geniştir. İnşaat atıklarından elde edilen atıklar belli bir işleme tabi tutulduktan sonra 3 farklı agrega sınıfına dahil edilerek geri kazanılmış agrega (GKA) olarak kullanılabilir (Poon, 2007; Rakshvir vd., 2006). GKA doğal agregaya göre ucuz olması, inşaat molozlarının taşıma nakliye depolama vergi ve ücretlerinin artması gibi sebeplerden ötürü GKA'ya olan ilgi artmaktadır (Rao vd., 2005; Lennon, 2005, Samton, 2003; AFCEE Report, 1996, Arıoğlu vd. 1996). Geri kazanılmış agreganın kullanılmasının diğer bir gerekçesi ise betonda kullanılan doğal agrega ihtiyacının ve maliyetinin hızlı bir şekilde artmasıdır. Artan hammadde talebini karşılayabilecek boyutta

olan GKA, belli bir boyuta getirilerek betonda kullanılabilir (Khalaf ve Devenny, 2004)

Dünya üzerinde özellikle deprem riskinin fazla olduğu ve hammadde kaynaklarının yetersiz olduğu Doğu Asya ve gelişme seviyesi yüksek olan ülkelerde GKA kullanımı ve bu konuda araştırmalar çok fazladır. 2004 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde yaklaşık olarak 2,7 milyar ton agrega tüketilmiştir, bu tüketilen agreganın sadece %14'ü geri dönüşüm merkezlerinde üretilen GKA'dır, geri kalanı doğal agrega ocaklarından temin edilmiştir. ABD'de geri kazanılmış agreganın kullanımının artırılmasına yönelik verilen birçok teşvik ve destek olmasına rağmen inşaat molozlarının büyük bir oranı dolgu malzemesi ve yapı temeli olarak kullanılmaktadır (Robinson vd., 2004).

Japonya'da ise inşaat atıklarının geri kazanılmış agrega olarak kullanılması ve bu konuya teşvik edilmesi yarım yüzyıla yakın bir süredir yapılmaktadır. 1991'de çıkarılan geri dönüşüm yasası ve yapı bakanlığı kapsamında kurdukları teşvik, destek komisyonları, yayınladıkları Geri Dönüşüm 21 (Recycling 21) gibi programlar yayınlamalarıyla GKA kullanımını artırmaları hedeflenmiştir. Bu uygulamalar ve destekler sayesinde 1990'da %48 olan geri kazanım oranı 2000 yılında %96'ları bulmuştur (Kawano, 2003).

Diğer bir büyük devlet olan Çin, geri kazanılmış agrega üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Özellikle 2008 Wenchuan, 2010 Yushu ve 2011 Yunnan yıllarında olan büyük depremlerden sonra oluşan inşaat atığının depolanma problemleri ve hammadde ihtiyacı nedeni ile GKA kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Güncel verilere göre; yıllık yaklaşık 200 milyon ton atık betonun üretildiği tahmin edilmektedir (Xiao vd., 2011) (Şekil 1.2).

Ülkemizde inşaat molozlarından geri kazanım hikayesi yakın yıllara dayanmaktadır. 1999 yılında Marmara Bölgesinde meydana gelen deprem ve sonrasında alınan kentsel dönüşüm kararları kapsamında inşaat atıklarından geri kazanımda gündeme gelmiş ve araştırmalar yapılmıştır. Genel olarak deprem sonrası oluşan inşaat atıkları çoğunlukla deniz ve yol dolgusu olarak kullanıldığı için GKA ların betonda kullanımı gelişmemiştir (Arioğlu vd, 2009). Ülkemizde yasal olarak 2004 yılında inşaat atıklarının çevreye verdiği veya verebileceği zararları engellemek için "hafriyat toprağı, inşaat ve yıkıntı atıkları yönetmeliğı" yayımlanmıştır. Bunun yanında 2009 yılında beton agregaları standardında bazı değişiklikler yaparak TS 706 EN 12620+A1 numaralı "Beton Agregaları" standardını yayınlamıştır. Bu standartta geri kazanılmış iri agreganın tanımı ve bu tip agrega bileşeninin sınıflandırılması yapılmıştır. Yapılan çalışmalara göre 2005 yılında Türkiye'de yaklaşık 38

milyon ton katı atık üretildiği ve %25'inin inşaat molozu olması durumunda, yılda yaklaşık 10 milyon tonluk bir inşaat yıkıntı atığı olduğu düşünülmektedir (Esin vd., 2007)



Şekil 1.2. Depremlerde oluşmuş bina molozları, a) 2008 Siçuan depremi, b) 2017 Meksika depremi, c, d) 2010 Yushu ve 2011 Yunnan depremi sonrası

İnşaat atıklarından elde edilen malzemenin içeriğine göre kullanım alanları belirlenmektedir. Yıkıntı sonrası oluşan atıklar genel olarak kapı, pencere, dolap gibi ahşap malzemeleri, briket, taş, beton, tuğla gibi duvar malzemeleri, betonarme, kiriş, kolon, döşeme ve diğer yapı elemanları, içermektedir. Bu içeriklerin saptanarak kullanım alanlarının belirlenmesi gerekmektedir. İnşaat atıkları genel olarak bütün ülkelerde başta geri kazanılmış agrega, yol kaplamaları, zemin iyileştirmeleri gibi çeşitli mühendislik yapılarında kullanılmaktadır (Oikonomou, 2005). Örneğin yıkılmış bina molozlarında donatı kısmı ayrıştırıldıktan ve belli bir boyuta indirildikten sonra inşaatlarda alt yapı malzemesi olarak kırılmış betonlar yürüyüş yollarında, kaldırım yapımında, drenaj sisteminde ve kanalizasyon borusu döşemede dolgu, çakıl yollarda yüzey örtücü ve açık park (garaj) alanlarında alt yapı dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca temel alt malzemesi gibi güç gerektirmeyen yerlerde kullanılmaktadır.

1.2.3. Geri Kazanılmış Agregayla İlgili Literatür Çalışmaları

Döndüren ve Şişik 2016, yapmış oldukları çalışmada inşaat molozlarından temin ettikleri betonlar üzerinde kullanım yeri ve amacına göre, granülometrik dağılımı, tane şekli, aşınma direnci, donma dayanıklılığı ve zararlı maddeler bakımından TSE'nün standartlarına uygunluğunu incelemişlerdir. Bunun yanında GKA deneyleri yaparak beton agregası olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır.

Özalp vd. 2015, çalışmalarında, bina yıkıntılarında elde edilen GKA'ların hazır beton, beton boru, parke taşı ve prefabrike ürünlerde büyük ölçekte kullanımı araştırmışlardır. Bu amaçla, İstanbul ili içerisinde bulunan inşaat molozlarından belirli özellikteki atıkları alarak belirli bir boyuta getirmişlerdir. Seçimli aldıkları betonların mekanik özelliklerini inceleyerek doğal agregalar ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak geri kazanılan agregaların su emme değerlerinin ve aşınma deneyi sonuçlarının, doğal agregalarla büyük farklılık gösterdiği, GKA da aşınmanın %43 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun dışında kum eşdeğeri, metilen mavisi, yassılık ve organik madde tayini deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda normal agregaya ile GKA'nın yakın değerlerde olduğu saptanmıştır. Ayrıca doğal agregaya ile geri kazanılmış agregaya yer değiştirilerek basınç dayanım deneyi yapılmıştır. GKA oranı arttıkça dayanımın düzenli bir şekilde düştüğü ortaya konulmuştur.

Dilbas vd. 2015 de kentsel dönüşüm sonucu ortaya çıkması tahmin edilen yıkıntı atıklarını ele almıştır. Kentsel dönüşüm ile oluşacak GKA ile silis dumanını betonda kullanımını incelemiştir. Bu amaçla %0,-%30,-%40,-%70,-%100 oranlarında GKA ve çimentonun ağırlıkça %0,-%5,-%10 oranlarında silis dumanı ekleyerek beton numune üretmişlerdir. Üretilen beton numunelerinin yoğunluk ve su emme özellikleri incelenmiş ayrıca basınç, elastisite modülü ve yarmada çekme gibi mekanik özellikleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu bulunan elastisite modülleri ile farklı kabul görmüş teorik bağıntılarla hesaplanan elastisite modülleri karşılaştırılmıştır. Yapılan dökümlerde kullanılan silis dumanı ile GKA arasında uygun karışım oranları belirlenmiştir. Sonuç olarak betonda GKA kullanımının elastisite modülü değerinin düşürdüğü bulunmuştur.

Demirel ve Şimşek 2014 çalışmalarında, inşaat molozları içerisinde bulunan belirledikleri özelliklerdeki (yaşı ve sınıfı belirli) atıklarından GKA olabirlikleri araştırılmıştır. İri ve ince olmak üzere iki grup agregaya oluşturularak doğal agregaya yerine %0, 10, 20, 30, 40, 50 oranların GKA ikame edilerek uzun dönem (90) ve kısa dönem (28) basınç dayanımlarını ve

elastisite modüllerini inceleyerek GKA'nın betonda agrega olarak kullanılabilmesini belirlemişlerdir.

Demir 2009, yaptığı çalışmada katı atıkların kazanımı ve beton atıklarının geri dönüşümünün ekonomik, teknik ve çevresel sebeplerini incelemiştir. GKA'nın teknik özelliklerinin bazılarını inceleyerek betonda kullanımının geliştirilmesine yönelik çalışmaları incelemiştir.

Köken vd. 2008 yılında yaptığı çalışmada basınç dayanımı 20 MPa olan inşaat atıklarından kazanılan GKA üzerinde mekanik ve fiziksel deneyler yapmış, farklı oranlarda karışımlar kullanılarak dökümler yapmıştır. Yaptığı dökümler üzerinde basınç dayanımı kıyaslamaları yapmış ve sonuç olarak GKA oranı ile basınç dayanımının ters orantılı olduğunu ortaya koymuştur.

Erdin 2004 yılında ki çalışmasında Avrupa ülkelerinde bulunan bazı geri dönüşüm tesislerini örnekleyerek inşaat atıklarının tekrar kullanılabilirliklerini araştırmıştır. Sonuç olarak inşaat atıklarının mobil, yarı mobil ve sabit sistemler kullanılarak kazanılabileceği bu kazanımın hammadde ihtiyacına hem de çevreye fayda sağlayacağını ortaya koymuştur.

Akbulut vd. 2003, çalışmasında mermer atıklarının agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Seçtiği Afyon bölgesindeki mermer işletmelerinden temin ettiği atık mermerlerin GKA olarak yol yapımında kullanılabilirliğini incelemiştir. Yaptığı çalışmada yol yapımında kullanılabilir agrega özellikleri ile mermerden kazandığı GKA özelliklerini karşılaştırmıştır.

Arenas vd. 2017 çalışmalarında yol gürültüsü bariyerlerinde polimer esaslı uçucu kül içerikli GKA kullanmışlardır. Yaptıkları araştırma kapsamında uçucu kül esaslı jeopolimer betonun ana fiziksel, mekanik ve akustik özelliklerini inceleyerek öğütülmüş granit ve GKA katkıları kullanmışlardır. Bu çalışmaların yanında farklı oranlarda Na_2O / SiO_2 oranının ve jeopolimer / agrega oranının jeopolimer beton özelliklerine etkisini inceleyerek porozitesi fazla olan betonlarda GKA kullanımının öğütülmüş granit kullanımı ile kıyaslandığında GKA katkılı jeopolimer betonların daha iyi mekanik ve akustik özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir.

Schepper vd. 2017, çalışmasında GKA kazanım oranını artırmak için çimento yapım aşamasında kullanılan klinker içerisine GKA katılmış ve değişimler mineralojik yöntemlerle, XRD ve SEM analizleri ile araştırılmıştır.

Lucas vd. 2016 yılında ki çalışmalarında kil içerikli GKA'ların puzolan olarak kullanımı ve sülfat direncine etkisi incelenmiştir. Dökülen beton numuneleri sodyum sülfat

çözümlenmesinde 14-56 gün bekletilmiş ve sonrasında basınç dayanımı, dış görünüşe ve gözenekliliğe bakılmıştır. Sonuç olarak kil içerikli GKA katkılı çimento ile dökülen beton numunelerinin sülfata karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

Rakshvir ve Barai 2016'da yapmış oldukları çalışmada çeşitli geri kazanılmış agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada çeşitli oranlarda doğal ve geri kazanılmış agregayı kullanarak dökümler yapmış ve tek eksenli basınç dayanımlarını ölçmüştür. Tek eksenli basınç dayanımlarında geri dönüştürülmüş beton agregalarının yüzdeleri arttıkça dayanım %10 a kadar azalmıştır. Ayrıca geri dönüştürülmüş agreganın su emme oranı doğal agregaya göre daha fazla olduğu ortaya konulmuştur.

Özalp vd. 2016'da yapmış olduğu çalışmada inşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilen geri dönüşümlü agregaların hazır betonda ve prekast betonda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışma kapsamında elde edilen inşaat ve yıkım atıkları, geri dönüşüm tesislerinde homojen bir şekilde ayrıştırılmış ve boyutları küçültülerek iri ve kaba agrega elde edilmiştir. Elde edilen agregaların fiziksel özellikleri belirlenerek normal agrega ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, bu geri dönüştürülmüş agregalar, hazır beton, beton boru, kaldırım taşı ve bordür gibi çeşitli beton ürünlerinin endüstriyel olarak üretilebileceğini araştırmışlardır. Ayrıca bu ürünlerin dayanıklılık ve geçirgenlik özelliklerini belirlemek için bazı çalışmalar yapmışlardır. Sonuç olarak bahsi geçen beton elemanlarının üretiminde geri dönüştürülmüş agregaların uygun ayırma ve sınıflandırma ile mümkün olabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, ilgili ürün standartlarında belirtilen yeterli koşulları elde etmek için daha düşük geri kazanılmış agrega ikamesi oranları uygulanmalıdır.

Fatemi ve Imaninasa 2016 da yapmış olduğu çalışmada, asfalt karışımlarını inşaat ve yıkıntı atıkları ile beraber kullanarak asfaltın performansını değerlendirmiştir. Bu araştırmada, kontrol karışımının optimum bağlayıcı içeriği (OBC) ve %10, % 20, % 30 ve % 40 inşaat ve yıkıntı atığı içeren dökümler yapıldıktan sonra, rutting performansı, dolaylı çekme, esneklik modülü testi, dinamik sürtünme testi ve tekerlek iz bırakma testi yapmışlardır. Ayrıca, ıslak / kuru nem duyarlılığı, dolaylı çekme mukavemeti belirlemiştir. Araştırmacılar, inşaat ve yıkıntı atıkları ilave edilerek yapılan testlerde yaklaşık %30 performans artışı olduğunu saptamışlardır. Ayrıca geri kazanılmış agrega oranı arttıkça nem direncinde de artış sağlamışlardır.

Adams vd. 2016'da yapmış olduğu bu çalışmada iki farklı alandan üretilmiş geri kazanılmış agrega ile doğal agrega içeren betonlardaki çatlama direncinin arttığı hipotezini incelemiştir. Üretilen betonların mekanik özellikler, büzülme ve çatlama özellikleri

incelemişlerdir. Kaba geri kazanılmış agrega içeren karışımlarda, %100 yer değiştirme seviyelerinde bile, basınç dayanımı (39.3-43.4 MPa), çekme dayanımı (3.7-4.4 MPa) ve elastisite modülü (27.2-28.3 GPa) elde edildiği, geri kazanılmış agreganın kullanımı betonun kuruma büzüşmesini önemli ölçüde arttırmadığı ve geri dönüşüm agreganın yüksek kırılma riski taşıyan bir karışımda kullanılması, "yüksek" ten "orta yüksekliğe" kadar olan beton kırma riskini önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir.

Cardoso vd. 2016 da yapmış oldukları çalışmada farklı geri kazanılmış agrega tiplerinin fiziksel özelliklerinin ve doğal agregalarla karşılaştırılmasının ve bu özelliklerin sıkıştırıldıklarında hidrolik ve mekanik davranışlarının nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. GKA'ların boyut dağılımlarının ve yoğunluklarının, tek eksenli basınç dayanımı üzerinde etkisini araştırmış ve elastisite modülü analizi yapmışlardır. Ayrıca, farklı GKA tiplerinin, Uluslararası Paslanmazlık İndeksi ve sapma değerleri açısından, doğal agrega ile yapılanlara kıyasla, bağlanmamış yol kaplama tabakalarının performansı analiz edilmiştir. Literatürden elde etikleri sonuçların, çoğu GKA'nın performansının doğal agreganınkiyle karşılaştırılabilir olduğunu ve bağlanmamış kaldırım katmanlarında veya sıkıştırma gerektiren diğer uygulamalarda kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Xuan vd. 2016 da yapmış oldukları çalışmada geri kazanılmış beton agregalarının kalitesini güçlendirmek için hızlandırılmış karbonatlaşma tekniği kullanılmıştır. Bu teknikle karbonatlanmış geri kazanılmış agregaların özellikleri ve bunların yeni betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirmişlerdir. Çalışma için eski yıkıntı atıklarından kazanılan geri dönüşüm agrega ve kendilerinin tasarladığı betondan kazanılan iki farklı geri dönüşüm agregası kullanmışlardır. Bu agregalar ilk olarak sırasıyla 0,1 bar ve 5,0 bar basınç seviyesinde %100 CO₂ konsantrasyonlu bir karbonatlaşma odasında 24 saat boyunca karbonatlanmışır. Daha sonra karbonatlaşma tedavisi adı verilen bir yöntem uygulayarak GKA'nın özelliklerinin iyileştiği ve GKA'ile hazırlanan yeni betonun performans artışı ile sonuçlandığını, özellikle %100 karbonatlı yeni GKA ile hazırlanan beton için mekanik mukavemetlerin belirgin bir artış gösterdiği ortaya konulmuştur.

Yazdanbakhsh ve Bank 2016'da yapmış oldukları çalışmada doğal kırmataş ve geri kazanılmış agrega ile yapılan kirişlerin performans etkisini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Sunulan deneysel araştırmalar sonucunda, geri kazanılmış agregalar fiber takviyeli polimer kumaşlarla güçlendirilerek dökülen kirişlerin kesme kapasitesinin, doğal agrega ile dökülmüş kontrol kirişlerinden daha yüksek olacağını göstermişlerdir.

Silva vd. 2016 da yapmış oldukları çalışmada, 1977'den 2015 tarihleri arasında geri kazanılmış agrega ile yapılmış çalışmaları incelemiştir. Çalışma sonuçlarını değerlendirerek geri kazanılmış agreganın miktarı arttıkça dayanımın düştüğünü, fakat bu dayanım düşüşünün giderilebileceğini ortaya koymuştur.

Contreras vd. 2016'da yapmış oldukları çalışmada biriket üretmek için doğal agrega yerine geri kazanılmış agrega kullanmışlardır. Bağlayıcı maddeler olarak kireç ve çimento kullanmışlardır. Tek eksenli bir hidrolik pres kullanılarak preslenen biriketler 21 günlük kür sonrasında basınç dayanımı testlerine tabi tutmuşlardır. Su emme, gözeneklilik ve yoğunluk sonuçlarını belirlemişlerdir. Sonuç olarak geri kazanılmış agregaya kireç ve çimento katarak fiziksel olarak yüksek kalitede düşük maliyetli biriket üretmeyi başarmışlardır.

Mueller vd. 2015'de yapmış oldukları çalışmada, duvar artıklarından geri kazanılmış hafif agrega üretmeyi amaçlamışlardır. Bunun için duvar molozlarının kil içerikleri ve uygunluğu ölçülmüştür. Geri kazanılmış agregalar ile üretilen yapısal hafif betonların performans olarak kil katkılı hafif betonlarla karşılaştırılabilir düzeyde olduğunu ortaya koymuşlardır.

Gesoğlu vd. 2015' de yapmış oldukları çalışmada iri, ince geri kazanılmış agrega ve doğal agrega ile oluşturulan kendiliğinden yerleşen betonların özelliklerini incelemiştir. Beton tasarımları sabit çökme oranı (680 ± 30 mm) 0.3 ve 0.43'lük iki su / bağlayıcı oranları ile tasarlanılmışlardır. Ayrıca karışımlara %0-10 oranlarında silis dumanı kullanılmıştır. Kendinden yerleşen betonların 56 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve net eğilme mukavemeti açısından değerlendirmişlerdir. Değerlendirme sonucunda geri kazanılmış agrega kullanılan betonlarda performans kaybının olduğunu ortaya koymuşlardır.

Modanil ve Mohitkar 2014, çevresel açıdan geri kazanılmış agreganın kullanımını artırmayı hedeflemişlerdir. Bu amaçla geri kazanılmış agrega oranını %20 artırarak %0' dan %100'e kadar doğal agrega yerine kullanarak kendiliğinden yerleşen beton üretmeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, geri kazanılmış agreganın mukavemet, geçirgenlik, asit direnci, klorür penetrasyonu ve kendiliğinden yerleşen betonun alkalilik oranı üzerindeki etkisini incelemiştir. Geri kazanılmış agreganın, mukavemet ve dayanıklılıkta önemli bir azalma olmaksızın kendiliğinden yerleşen betonda kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır.

Sharma ve Singla 2014 yapmış oldukları çalışmada, geri dönüşümlü beton agregalarının ve inşaat sektöründeki çeşitli uygulamalarının tanıtılması ve üretimini aktarmışlardır. Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş agregaların fiziksel özellikleri doğal

agregalar ile karşılaştırılmıştır. Geri dönüşüm agregalar ile ilgili gelecekte yapılacak çalışma önerileri de bulunularak kullanım alanlarını araştırmışlardır.

Tu vd. 2006'da yapmış oldukları çalışmada, inşaat atıklarını yüksek performanslı betonlarda kullanıla bilirliliğini incelemişlerdir. Su emme kapasiteleri, tane dağılım ve yoğunlukları, dayanım deneyleri araştırılmıştır. Uygun karışım oranları belirlenerek geri dönüşüm agreganın yüksek performanslı betonda kullanımını sağlamışlardır.

1.3. Püskürtme Beton

Püskürtme beton; agrega, çimento, su ve bazı kimyasalların oluşturduğu katı karışımının boru hattı içerisinde tazyik ile taşınıp, püskürtülerek yapılan beton olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel betona göre kalıp gerektirmeden yerleştirilmesi ve özel katkıları yardımıyla hemen dayanım kazanarak taşıyıcılığını yerine getirmeye başlaması gibi özellikleriyle yeraltı mühendislik yapılarında ve maden mühendisliği uygulamalarında yaygın kullanım alanı bulunmaktadır.

Püskürtme betonu Amerikan Beton Enstitüsü tarafından, 1966 yılında “bir hortumla taşınarak bir yüzey üzerine basınçlı hava yardımıyla yüksek hızla püskürtülen beton ya da harç karışımı” şeklinde tanımlanmıştır. (ACI Committee 506, 1966). Türkiye’de ise Türk Standartları 11747’de “onarım veya yapım amacı ile önceden hazırlanmış olan betonun hava basıncı yardımı ile yüksek hızla uygulama yüzeyi veya uygulama alanına püskürtülerek elde edilen beton” ifadesi ile tanımlanmıştır.

Cari Akeley'in 1900'lü yıllarda, ABD'de püskürtme alçı patentini almasıyla başlayan püskürtme beton teknolojisinin gelişimi, günümüzde malzeme ve ekipman alanındaki gelişmelere bağlı olarak hızla sürmektedir. Başlangıçta püskürtme harcı (günlük) olarak adlandırılan karışıma, iri çakılların eklenmesi, kireç yerine Portland çimentosunun kullanımıyla karışımın performansı artırılmış, böylece yeraltı yapılarında ve zor arazi koşullarında açılan tünellerde kalıcı ve iyileştirici tahkimat yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle 1960'lardan sonra, Rabcewicz ve arkadaşları tarafından ortaya konulan Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi'nin (NATM: New Austrian Tunneling Method) geliştirilmesiyle birlikte, püskürtme beton teknolojisine karşı dünya çapında bir güven oluşmuş ve böylece püskürtme beton; kaya saplaması, çelik hasır ve çelik bağdan oluşan destekleme sisteminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Bugünün püskürtme betonu, 20. yüzyıl içerisinde denenmiş birçok yeniliklerin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır (Barreth and McCreath, 1995). Önceleri kayaların aşınmasını önlemek amacıyla kullanılan püskürtme harcı veya "gunite" olarak adlandırılan çimento, kum ve su karışımının yeterince sağlam olmaması ve etkin bir şekilde kullanılamaması nedeniyle arazi tahkimatında kullanımı düşünülmemiştir. 1950'lerde kesintisiz olarak karışım püskürten kuru karışım püskürtme donanımının geliştirilmesiyle; püskürtme beton, arazi tahkimatında kullanılacak bir yöntem olarak düşünölmeye başlanmıştır (Rose, 1985; Barreth and McCreath'ten, 1995). Ancak, bu yöntemin ilk uygulamalarında püskürtme betonun düşük basınç dayanımı, gerilmelere karşı dirençsizliği, sert olmamasına rağmen çabuk kırılması, yüksek geri sıçrama özelliği ve zor yapışması gibi sorunlarla karşılaşmıştır. 1970'lerin başında, püskürtme betonun düşük basınç dayanımı, çekme gerilmesine karşı dirençsizliği ve bunun gibi kullanışsız yönleri; karışıma iri çakılların eklenmesi, su/çimento oranının düşürölmesi ve ardışık uygulamaların arasına çelik hasırların yerleştirelmesiyle ortadan kaldırılmıştır.

1970'lerin sonlarında silis dumanının (mikrosilika amorf SiO_2) kullanılması, yaş karışım püskürtme beton yönteminin gelişmesi ile basınç dayanımı arttırılmış ve geri sıçrama (rebound) seviyesi düşürölmüştür. Yaklaşık aynı zamanda da çelik lifle güçlendirilmiş püskürtme beton (SFRS: steel fibre reinforced shotcrete), çelik hasır takviyeli yönteme bir seçenek olarak piyasaya sunulmuştur. Çelik lifle güçlendirilmiş püskürtme betonun çelik hasır takviyeli yönteme göre en büyük avantajı daha kısa sürede uygulanabilmesi olmuştur. Ayrıca darbelere karşı direnci de fazla şiddetli olmayan yer değiştirmelerde arttırılmıştır (Barreth and McCreath, 1995).

Günümüzde, yeraltı inşaat ve maden mühendisliği projelerinde başarıyla uygulanmakta olan gerek kuru gerekse yaş püskürtme beton yöntemlerinin 1900'lerden 1980'lere uzanan tarihsel gelişiminin özeti Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2. Püskürtme betonun tarihsel gelişiminin özeti (Rose, 1985; Barreth and McCreath'ten, 1995).

Dönem, Yıl	Ülke	Püskürtme betonun tarihsel gelişiminin kilometre taşları
1900-1910	ABD	Cari Akeley, Smithsonian Enstitüsü'nde hayvan derisini kablo çerçeve üzerine oturtmak için kullandığı püskürtme alçı patentini alır.
1910-1930	ABD	Allentown çimento tabancası şirketi Akeley'in patentini alır ve ticari kullanım için uyarlar.
1930-1940	ABD	Amerika Metro Mühendisliği kurumu "püskürtme harç" (gunite) işlemini tanımlamak için "püskürtme beton" (shotcrete) jenerik terimini kullanır.
1940-1950	Avrupa ve İran	Rabcewicz tünel desteğinde püskürtme betonu saplamalarla birlikte kullanmaya başlar. Bu projelerden elde edilen deneyim Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) için temel oluşturur.
1950-1960	ABD	Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) kuru karışım işlemini tanımlamak için püskürtme beton terimini kullanır. Daha sonra bu terim yaş karışımı içerecek şekilde genişletilir.
	ABD	Hortuma sürekli akışı sağlayan kuru karışım Reed tabancası ilk defa kullanılır.
1960-1970	ABD	Carnegie-Melon Üniversite' sinden (USA) Romualdi tarafından yazılan, güçlendirilmiş betonda çelik lifin tanıtılması.
	Güney Afrika Cumhuriyeti	Hasır takviyeli püskürtme betonun kavisli bağlarla güçlendirilmiş betonun yerini alacak şekilde büyük hidroelektrik güç santralı açıklıklarında kullanılması
1970-1980	ABD	Illinois Üniversitesi'nde Parker'in çelik lifle güçlendirilmiş beton kavramını kullanması.
	Norveç	Yaş karışım işlemi kullanılarak ticari çerçevede çelik lifle güçlendirilmiş "silica füme" püskürtme betonun geliştirilmesi.
1980-1990	Batı dünyası	Çelik lifle güçlendirilmiş "silica füme" püskürtme betonun tünel desteğinde hızla ekonomik bir yol olarak kabul görmesi.

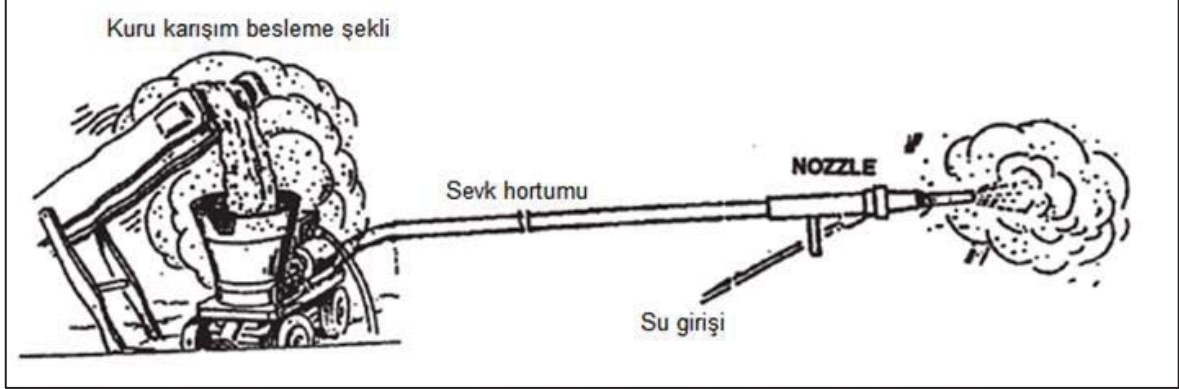
1.3.1. Püskürtme Betonun Uygulama Yöntemleri

Püskürtme betonun uygulama şekline göre kuru ve yaş karışım sistemi olmak üzere iki farklı şekilde uygulanır. Bu uygulama şekilleri karışımın tasarımına, kullanılan ekipman ve yöneme göre isimlendirilmektedir.

1.3.1.1. Kuru Karışım Sistemi

Bu yöntemin temel özelliği suyun karışıma nozül ucunda katılmasıdır. Uygulama şekline ve dozajına göre hazırlanan kum, çimento ve çakıl kuru olarak harmanlandıktan sonra basınçlı hava ile yüzeye yollanır, ikinci hattan ise su ve kullanılıyorsa kimyasallar

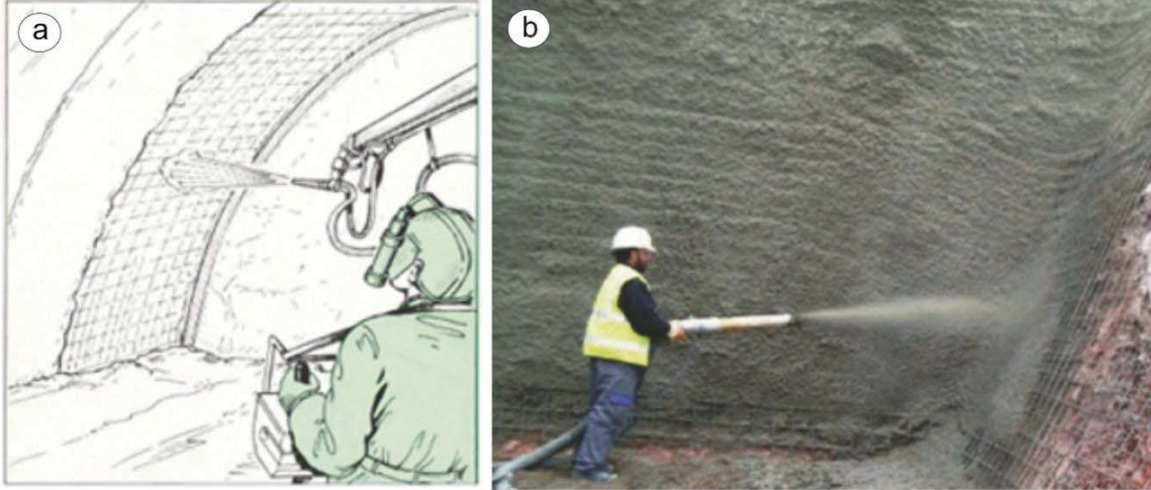
yollanarak püskürtme tabancasında (Nozül) iki karışım uygulama yapılacak yüzeye uygulanır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Kuru karışım püskürtme beton uygulaması

1.3.1.2. Yaş Karışım Sistemi

Bu yöntemde çimento, kum, çakıl, su ve kimyasallar karıştırıldıktan sonra basınçlı hava ile yüzeye uygulanmaktadır. Bu yöntemde karışımın püskürtme yüzeyine iletilmesi beton pompaları ile sağlanmaktadır. Püskürtme kapasitesi pompa başında bulunan operatör tarafından sağlanır. Yaş püskürtme makinelerinin ortalama kapasiteleri 2-15 m³/saat arasındadır. Yaş püskürtmede verimin artırılması ve geri sıçramanın az olabilmesi için ayarlanması gereken en önemli parametre basınç, uygulama yüzeyi ile tabanca arası mesafe ve su çimento oranıdır. Bu metotta basınçlı hava gereksinimi birim m³/saat başına yaklaşık 1 m³/dak uygulama yüzeyi ile püskürtme beton tabancası arasındaki uzaklık ortalama 0.6–1.8 m olmalıdır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Yaş püskürtme beton uygulaması a) Makine kullanılarak, b) Manuel uygulama

1.3.1.3. Püskürtme Beton Uygulama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Püskürtme betonun uygulama şekline ve yerine göre kuru ve yaş sistemde birbiri üzerinde avantaj ve dezavantaj oluşturabilmektedir. Bu farklar Tablo 1.3’de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Uygulanan yaş veya kuru yöntemli püskürtme betonun kalitesini etkileyen etmenlerin başında; agrega gradasyonu ve ince/iri agrega oranı, çimento cinsi ve kalitesi, su/çimento oranı, priz hızlandırıcı katkı cinsi ve dozajı, geri sıçrama oranı, püskürtme uzaklığı ve açısı, püskürtme basıncı olarak belirtilmektedir.

1.3.2. Püskürtme Betonda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Püskürtme betonun uygulandığı alan ve şekline göre farklı karışımlar kullanılır. Püskürtme beton karışımında kullanılan malzemeler (agrega, su, bağlayıcı, mineral ve kimyasal katkıları) püskürtme betonun basınç, yapışma, kayma dayanımı gibi mekanik özelliklerini direkt etkilemektedir. Bu yüzden püskürtme betonun karışımında kullanılan bütün malzemelerin özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Tablo 1.3. Yaş ve kuru püskürtme beton yöntemlerinin karşılaştırılması (Girgin vd., 1998).

Özellikler	Kuru Yöntem	Yaş Yöntem
Ekipman	<ul style="list-style-type: none"> Daha düşük yatırım maliyeti-esnek donanım Küçük kapasiteli çalışma genellikle üretim hızı $<5 \text{ m}^3/\text{saat}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Yatırım maliyeti daha yüksek Büyük kapasiteli, üretim hızı maksimum $20 \text{ m}^3/\text{saat}$
Karıştırma	<ul style="list-style-type: none"> Şantiyede küçük karıştırma tesisi Ön karışım ve kuru bileşenler kullanılabilir, Islak kum, dayanımı olumsuz etkiler Uzak mesafeye iletim imkânı 	<ul style="list-style-type: none"> Mikserde uygun karışım elde etme imkânı Hazır beton kullanma imkânı Islak kum kullanılabilir İletim süresi ve mesafesi sınırlı
Su içeriği	<ul style="list-style-type: none"> Düşük su/çimento oranı mümkün Değişken, operatör tarafından kontrol edilir. Su karışıma homojen dağılmayabilir 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük su/çimento oranı ile çalışılmaz Sabit, operatörden bağımsız Homojenlik sağlanır
İlave bileşen	<ul style="list-style-type: none"> Toz ve sıvı hızlandırıcı kullanılır 	<ul style="list-style-type: none"> Sıvı hızlandırıcı kullanılır
Geri sıçrayan malzeme, %	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek miktarda, $G = \%20-60$ Kayıp malzeme yığınları oluşur, işgücü kaybı yaratır Kaba agrega kaybı fazla 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük miktarda, $G = \%5-15$ Yığın oluşmaz Çok az kaba agrega kaybı oluşur
Kalite	<ul style="list-style-type: none"> Su/çimento oranı daha düşük-daha yüksek dayanım, ancak, değişken kalite söz konusu Operatör tecrübesi çok önemli Pompalama problemi yok 	<ul style="list-style-type: none"> Su/çimento oranı daha yüksek-daha düşük dayanım ama daha homojen kalite elde edilebilir Operatör tecrübesi önemli değil Pompalanabilir karışım olmalı ve pompalama uzaklığı sınırlı
Uygulama kolaylığı bakımından	<ul style="list-style-type: none"> Uzak mesafeye iletim imkânı Önemli bir toz problemi mevcut $\%5- \%15$ oranında ön-nemlendirme ile toz azaltılabilir 	<ul style="list-style-type: none"> Toz problemi pek yoktur Daha iyi yüzey görünümü

1.3.2.1. Agrega

Püskürtme betonda ağırlık olarak en fazla bulunan agregadır. Ağırlıkça karışımın $\%70-80$ 'nini oluşturan agreganın fiziksel özellikleri iyi belirlenmesi gerekmektedir. Bunun yanında püskürtme betonda kullanılacak agregaların betonda kullanılan agregaların mekanik yeterliliklerini sağlaması yeterli olacaktır (Arnoğlu, 2008).

Uygun tane boyut ve tane dağılımına sahip, dona dayanıklı, sert, boşluksuz ve uygun tane şekilli agregalar püskürtme betonda kullanılabilir. Agregaların betonda ve püskürtme betonda kullanımına yönelik verilen standartlar Tablo 1.4'de verilmiştir.

Tablo 1.4. Çeşitli standartlara göre beton agregalarının sağlaması gereken fiziksel ve mekanik özellikler (Arıoğlu, 2008)

Özellik	Agrega	TS 706 EN12620	ASTM C 33	BS 882:1983
Uygunsuz tane şekli, maks. %	İri	50	-	C20-35 için 35
Su emme, maks %	İri ve ince	-	-	BS5337:1976'ya göre: 3.00
Aşınma Dayanımı, maks. %	İri	Los Angeles 100 devir: 10 500 devir: 50 Darbeli aşınma: 45	Los Angeles 500 devir: 50	Darbeli aşınma: 45
Dona dayanıklılık, maks %	İri	27	18	-
	İnce	22	15	-
Organik Maddeler, mak %	İri ve ince	0.5	0.5	-
Alkali agrega reaktifliği, maks %	İri ve ince	6 ayda: 0.05 1 yılda: 0.01	3 ayda: 0.05 6 yılda: 0.10	

Püskürtme betondan dayanım ve işlenebilirlik aranan temel özelliklerdendir. Bu özelliklerin sağlanabilmesi için agrega boyutu, şekli ve karışımda dağılımının önemi çok fazladır. Karışımda ince agreganın çok olması fazla su ihtiyacının ve yüzey alanı arttığı için çimento miktarının da artmasına neden olacaktır. Dolayısıyla öngörülen su/çimento miktarının sabit kalması için gerekli çimento ve su miktarını da artacaktır. İri agrega miktarının fazla olması durumunda ise iletim hatlarında tıkanmalar yüzeye çarparak geri sıçrama sorunları ile karşılaşılacaktır. Bundan dolayı püskürtme beton karışımında ince ve iri agrega oranı oldukça önemlidir. TS 706 EN12620 standartlarında püskürtme betonda kullanılacak agrega boyutları verilmiştir. Standartlara göre uygulamalar da iletim hattı çapı ve geri sıçrama vb. limitlerinden dolayı çapı 16 mm'den ince agrega kullanılmalıdır. Ayrıca en iri tane büyüklüğü dağıtım hortumu çapının 1/3'ünden küçük olmalıdır (Bourchier, 1990). Dayanımın yüksek olması için kullanılacak agreganın kırmataş seçilmesi uygun olacaktır. Kırmataş köşeli yapıya sahip olduğundan tıkanma ve aşınmayı %25- % 45 arasında artırdığı için kırmataşın püskürtme betonda kullanımını negatif etkilemektedir (Yurdakul, 2001). Özellikle yaş püskürtme beton uygulamasında iyi pompalanabilir bir granülometrik yapı sağlanması açısından bu konuda kazanılan deneyimlere göre kumun %15- % 30'u No.50 elek açıklığından, %5- %10'u ise No. 100 eleğinden geçmelidir. Kullanılan agrega

malzemesi dayanımlı, ayrışma ve aşınmaya karşı dirençli olmalı içerisinde kil, silt, mika, alkaliler ve organik malzemeler bulunmamalı, 0,075 mm'den ince malzeme miktarı %2'yi geçmemelidir (Arioğlu, 2002).

1.3.2.2. Su

Püskürtme betonda, agregadan sonra önemli ve vazgeçilmez ikinci bileşen sudur. Suyun başlıca iki ana görevi vardır. Birinci temel görevi çimento ile hidrate olarak çimento hamurunu oluşturmaktır. Bu hamur agregaların birbirine yapışmasını sağlayarak dayanımın temelini oluşturur. İkinci görevi ise püskürtme beton karışımına nakliye ve püskürtme için uygun akışkanlığı sağlamaktır (Birön,1985).

Püskürtme betonda kullanılacak suyun özellikleri TS EN 1008 standartında belirtilmiştir. Genel olarak kirletici (yağ, asit, organik maddeler) içermemesi gerekmektedir. İçme suyu olarak kullanılabilen suların püskürtme betonda kullanımı uygundur. Ayrıca çimento ile tam olarak hidratasyonun sağlanması için karışım suyunun sıcaklığının 50 C⁰ den fazla olması istenmektedir (Bourchier, 1990).

Püskürtme betonda yüzeye yapışmanın istenen ölçüde olması ve hedeflenen dayanımın sağlanması için su / çimento oranı yaş sistemlerde 0.40 ile 0.60 kuru sistemlerde ise 0.30 ile 0.55 arasında olmalıdır. Bu oranlar agrega tane dağılımı, işlenebilirlik, akışkanlık, istenilen dayanım ve kullanılan kimyasallar (akışkanlaştırıcı, piriz hızlandırıcı) göz önünde bulundurularak seçilmektedir. Bu oranın iyi seçilememesi durumunda geri sıçramanın artmasına ya da bu oranın çok yüksek olması durumunda zayıf sıkışma nedeni ile ya da yüzeye tutunamamasından dolayı püskürtme betonda geri sıçramayı arttıracaktır (Bourchier, 1990).

1.3.2.3. Bağlayıcı ve Mineral Katkılar (Puzolanlar)

Madencilikte püskürtme betonun en fazla uygulandığı yeraltında bağlayıcı olarak genellikle CEM I 42.5R Portland çimento kullanılmaktadır. Yeraltında püskürtme betonun kullanıldığı yerin özelliklerine (sülfat, erken kür vb.) bağlı olarak çimento tipi ve miktarı değişebilir. Çimento CSA tip 20, 30 ya da 50 kullanılabilir bunun yanında çimento miktarı püskürtme betondan istenen mekanik özelliklere bağlı olarak 330 kg/m³ ile 450 kg/m³ arasında olabilir. Püskürtme işleminde bağlayıcı en büyük ekonomik yükü oluşturur.

Bağlayıcı miktarının artırılması maliyeti arttırırken yüksek oranda kullanılması dayanım ve diğer mekanik özelliklere olumsuz etki yaptığı görülmüştür. (Bourchier 1990).

Yapılan çalışmalarda çimento seçiminde, yeraltı suyunun sülfat içeriği, püskürtme betonundan istenen dayanım süresi ve yeraltındaki hidrasyon sıcaklığına dikkat edilmesi gerekmektedir. Sülfat içeriğinin yüksek olduğu yeraltı koşullarında ASTM Tip 5 (CSA tip 20), orta seviyede sülfat içerdiği durumlarda ASTM Tip 2 (CSA Tip 20), püskürtme betondan yüksek ve erken dayanım beklendiği durumlarda ASTM Tip 3 (CSA Tip 30), yeraltı sıcaklığının çok düşük olduğu durumlarda ise bağlayıcı olarak ASTM tip 4 (CSA Tip 40) seçilebilir. Bourchier 1990' da yapmış olduğu çalışmada piriz hızlandırıcıların püskürtme betonun erken piriz almasını sağlarken dayanımlarında %20-25 düşme oluşturabileceğini vurgulamıştır (Bourchier 1990).

Püskürtme betonda ekonomik olarak en fazla gideri bağlayıcı oluşturmaktadır. Püskürtme beton maliyetini düşürmek, dayanımı arttırmak ve sülfat gibi olumsuz etkileri minimize etmek için çimento yanında katkı malzemesi kullanılmaktadır. Tek başına bağlayıcı özelliği arz etmeyen bununla birlikte çok ince öğütüldüklerinde sulu ortamda kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliği kazanan malzemelere puzolan denir. Puzolan malzeme Portland çimentoya eklendiği zaman, kalsiyum hidroksit ve su ile tepkimeye girerek dayanımı oluşturan kalsiyum silikat hidrat bileşeni oluşturmakta ve uzun dönem dayanımını artırmasını sağlarken geçirgenliğinin azalmasını sağlamaktadır. Bunların yanında püskürtme betonun işlenebilirliğini, pompalanabilirliğini ve sülfata karşı direncini arttırmaktadır. Puzolan olarak kullanılan uçucu kül püskürtme betonun pompalanma uzaklığının artmasına da yardımcı olmaktadır. Ancak çimento yerine kullanılacak olan puzolan malzemenin miktarını dikkatli ayarlamak gerekmektedir. Bunun nedeni puzolan malzeme püskürtme betonun dayanımını uzun dönemde olumlu etki yapmasına karşı kısa kür süreleri için olumsuzdur. Puzolanlar için önerilen karışım oranları Tablo 1.5' de verilmiştir (Özdoğan, 2009, Melbye and Dimmock, 2001).

Püskürtme betonda temini ve kullanım kolaylığı açısından en fazla kullanılan puzolan uçucu kül ile ve yüksek fırın curufudur. Puzolan katkıları püskürtme betonda kullanıldığında; sülfata karşı dayanım artışı ve maliyet tasarrufu gibi artıların yanında dayanımı artırma, hidrasyon ısını düşürme, donatıda korozyon etkisini azaltma, işlenebilirliği arttırma, dayanıklılığı yüksek ve düşük maliyetli beton üretimi gibi özelliklere sahiptir (Aruntaş, 2006, Arıoğlu vd., 2008).

Tablo 1.5. Puzolanik katkıların çimento ile ikamesi için önerilen maksimum oranlar (Melbye and Dimmock, 2001).

Puzzolanik Katkılar	Maksimum Katkı Miktarı
Silis Dumanı	%15 Portland Çimentosu
	%30 Portland Çimentosu
Uçucu Kül	%15 Portland/ Uçucu kül
	%20 Portland/ Yüksek Fırın Cürufu
Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu	%30 Portland Çimentosu

1.3.2.4. Katkı Maddeleri

Madencilikte, yeraltında sürekli farklı ortamlarla karşılaşılır ve bu ortamlara uyum sağlamak mecburidir. Yeraltında kullanılan püskürtme betonun farklı ortamlarda istenen dayanımı sağlaması için priz hızlandırıcı, akışkanlaştırıcı, lif gibi bazı katkıları kullanılır. Bu katkıların her birinin farklı bir mekanik özellik üzerinde etkisi vardır. Bu katkıları belli bir oranda kullanılmalıdır.

➤ Priz Hızlandırıcılar

Maden işlerinde tahkimat veya barikat amaçlı kullanılan püskürtme betondan istenen en önemli özelliklerinden biri erken dayanımdır. Bu amaçla çoğunlukla nozülün ucundan katılan katkı maddelerinin başında priz hızlandırıcı gelir. Bu katkı maddeleri hidrasyonu hızlandırarak betonun erken dayanım almasını ve püskürtme betonun karşı çepere yapışarak geri sıçramasını azaltırlar. Kimyasal katkıların performansları çimentonun kimyasal bileşimine, katılan mineral katkıların çeşidi ve miktarına ve hidrasyon ısısına bağlı olarak değişir.

Kimyasal katılardan olan priz hızlandırıcılar genel olarak alüminat ve silikat tabanlı (alkali silikat, Sodyum alüminat, potasyum alüminat vs...) malzemelerdir. Püskürtme betonda priz hızlandırıcılar genel olarak alkali içeren priz hızlandırıcılar, alkali içermeyen priz hızlandırıcılar şeklinde iki farklı başlıkta incelenir. İki grubunda püskürtme betonda kullanımında birbirini üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri mevcuttur.

Katkı maddesinin oranı çimento kütlelerinin ağırlıkça %2 ile %6'sı arasında olması önerilir. Priz hızlandırıcı katkının fazla kullanılması durumunda püskürtme betonun nihai basınç dayanımında %25- %30'lara varan düşüşler gözlemlenmiştir (Arıoğlu vd., 2008). Bunun yanında beton püskürtüldüğü yüzeyde anında donarsa ikinci katman olarak

püskürtülen karışım sert bir yüzeye çarpacak ve geri sıçrama oranını yine arttıracaktır. Priz hızlandırıcıların genel özellikleri Tablo 1.6' da verilmiştir.

Tablo 1.6. Priz hızlandırıcı katkıların genel özellikleri (Arıoğlu vd., 2008).

Özellik	Değer
Priz Süresi:	
Priz Başlangıcı	≤ 10 dak 3-10 dak
Priz Sonu	≤ 60 dak 9-60 dak
Alkali İçeren Priz Hızlandırıcı:	
Priz Başlangıcı	<60 sn.
Priz Sonu	<3.5 dak
Alkali İçermeyen Priz Hızlandırıcı:	
Priz Başlangıcı	<4 dak
Priz Sonu	<8 dak
Al ₂ O ₃ içeriği	Hızlandırıcı dozajı x Al ₂ O ₃ içeriği <115
Basınç Dayanımında Azalma	≤ %45 -toz katkı- ≤ %30 -sıvı katkı- ≤ %25
Suda Çözünebilir Maddeler:	
Alüminat	≤ %3 (püskürtme betonla temasta suda SO ₄ > 600 mg/l)
Klorür	<%1
Sülfat içeriği (SO ₃)	<%4,8
Eşdeğer Na ₂ O içeriği	<%1
pH	3 <pH<8
Uygunluk Testi: Proktor testi	≥ 110 N, (10 dak 'da)

ACS=Avusturya Beton Birliği

EFNARC=Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Federasyonu

➤ Akışkanlaştırıcılar

Püskürtme betonun iletilmesi, hatlarda iletim ve yapışmayı artırmak için su oranı önemlidir. Akışkanlaştırıcı kullanılarak sabit su/çimento oranında yüksek işlenebilirlik ve pompalanabilirlik sağlanabilir. Genel olarak yaş püskürtme betonda kullanılan bu katkıları belli bir oranda kullanılmalıdır. Kullanılan kimyasalların oranı arttıkça püskürtme betonda su gereksinimi azalacak, su/çimento oranı korunabilmesi için çimento oranını da azaltmak gerekecektir. Çimento oranının azalması püskürtme betonun mekanik özelliklerini azalmasına neden olacaktır.

➤ Lif katkıları

Püskürtme betonun mekanik özelliklerinden eğilme direnci ve enerji absorpsiyonunun artırılması amacı ile 1800'lü yılların sonlarına doğru kullanılmaya başlanmıştır. Püskürtme beton teknolojisinin birçok sektörde kullanılması ve ihtiyaçlara cevap verebilmesi açısından püskürtme betonda lif kullanımı hızlı bir şekilde yayılmıştır (Yurdakul, 2001).

Lifsiz betonların eğilme ve çekme değerleri çok düşüktür. Çekme ve eğilme özelliklerini iyileştirmek için beton ve püskürtme betonda değişik miktarlarda çelik, plastik ve cam elyaf gibi değişik malzemelerden oluşan farklı tip ve boyutlarda lif kullanılmaktadır. Kullanım alanına uygun özellik ve miktarda kullanılan lif yeraltı madenciliğinde çekme ve eğilme özelliklerini önemli derecede artırmakta ve tahkimat amaçlı kullanılan çelik hasır gereksinimini ortadan kaldırmaktadır (Malmgren, 2005).

Püskürtme betonda uygulama yeri ve şekline göre genel olarak kullanılan liflerin uzunlukları 12.7-63.5 mm arasında, 0.45 mm – 1.0 mm çapında dairesel kesitli veya eni 0.25 - 0.90 mm kalınlığı ise 0.15 ile 0.41 mm boyutlarında kare veya dikdörtgen kesitli lifler kullanılmaktadır (Arıoğlu, 2000). Püskürtme betonda ve normal betonda en yaygın kullanılan lifler ve özellikleri Tablo 1.7’de verilmiştir.

Tablo 1.7. Değişik lif tiplerine ait mekanik büyüklükler (DSİ, 1994).

Lif Cinsi	Çekme dayanımı, MPa	Elastisite modülü, GPa	Maksimum şekil değiştirme, %	Yoğunluk, ton/m ³
Çelik	1100-2760	200	0.5-35	7.8
Polipropilen	552-759	3.5	25	0.9
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0.6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-35	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
Pamuk-Yün	414-621	6.9	10-25	1.5

1.3.3. Püskürtme Betonla İlgili Literatür Çalışmaları

Choumanidis vd. 2017’de yapmış oldukları çalışmada, sentetik fiberlerin yüksek sıcaklık altında Barcelona deneyi ile mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. İki farklı polimer elyaf ve çelik lif kullanarak farklı oranlarda yaptıkları karışımlar üzerinde Barcelona test yapmışlardır. Dolaylı gerilme mukavemeti ve tokluk özellikleri ortam sıcaklığında ve numunelerin 280 ° C’de ısıtılmasından sonra değerlendirmişlerdir. Barcelona testi ile tahmin edilen modifiye tokluğun, hem ısınmamış hem de ısıtılmış numuneler için, süneklik açısından fiber reinforced concrete (FRC) sınıflandırmak için uygun bir indeks olabileceği gösterilmişlerdir. Ayrıca, uygun miktarda farklı elyaf türü içeren hibrid FRC'nin, tek FRC'ye

kıyasla süneklik açısından üstün olduğunu ortaya koymuşlardır. Son olarak, sırasıyla elyafın uzunluğu, kopma mukavemeti ve hacim fraksiyonu gibi elyafların ve FRC karışımının temel özelliklerini göz önüne alan eksenel yer değiştirme ölçümleri kullanılarak Toplam Çevresel Açılış Yer Değiştirme (TCOD) değerlerinin hesaplanması için denklemler önermişlerdir.

Lee vd. 2017'de yapmış oldukları çalışmada, elyaf takviyeli betonun beton dayanımına ve lif içeriği dikkate alınarak bükülme kapasitesi incelenmiştir. Çelik elyaf takviyeli betonun bükülme kapasitesi üzerindeki beton mukavemeti ve lif içeriği oranının etkilerini incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Üç fiber hacim fraksiyonu, %0.25, %0.375 ve %0.5 ve üç beton basınç dayanımı 25 MPa, 35 MPa ve 45 MPa deneyler için tasarlanmıştır. Gerilme ve bükülme ilişkisi, ilk pik ve çatlama sonrası mukavemet ve enerji sönümleme kapasitesi, elyaf hacim fraksiyonundaki ve beton mukavemetindeki değişime göre değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, ilk pik kuvveti ve enerji sönümleme kapasitesinden saptanan eşdeğer bükülme mukavemeti oranının, lif hacim fraksiyonundaki artışla birlikte arttığını göstermiştir ve beton mukavemetindeki artış ile birlikte azaldığını ortaya koymuşlardır.

Choi vd. 2017 de yapmış oldukları kırılmış agregalar içeren püskürtme beton (WMS) karışımlarının reoloji, mukavemet ve klorür iyonu penetrasyon direnci özelliklerine mineral katkı maddeleri ve çelik lifin etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, kırılmış agrega ile yapılan püskürtme betonun reoloji, mukavemet ve klor iyonu penetrasyon direncinin silis dumanı, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS), metakaolin ve çelik lif gibi çeşitli mineral katkıları ile ilişkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada test edilen karışımlar çoğunlukla silika dumanı ile harmanlanmış üçlü karışımlardır. WMS karışımlarının pompalama ve atış performansı ile ilişkili olarak ölçülen reolojik özelliklerin potansiyel etkilerini de analiz etmişlerdir. Sonuçlar, silika dumanının, WMS'nin hem pompalanabilirliği hem de atılabilirlik özelliklerini artıran etkili bir katkı maddesi olabileceğini göstermiştir. Uçucu külün, kayma gerilmesi belirgin bir şekilde artırarak WMS karışımlarının pompalanabilirliğini olumsuz olarak etkilediği, GGBFS, hem pompalanabilirlik hem de atılabilirlik üzerine anlamlı olmayan etkilere sahipken, WMS'nin klorür iyonu penetrasyon direncini ve mukavemetini geliştirdiği görülmüştür. Çelik tellerin WMS'de kullanılmasıyla ilgili birçok beklenen avantaja rağmen, yüksek dozajda ($> 50 \text{ kg} / \text{m}^3$) çelik lifler kullanıldığında pompalanabilirlik ve klorür iyonu penetrasyon direncinin aşırı derecede bozulduğunu belirtmişlerdir.

Fallah ve Nematzadeh 2017’de yapmış oldukları çalışmada, farklı miktarlarda polipropilen (PP) ve makro polimerik (MP) liflerin silika dumanı ve nano-silika içeren yüksek mukavemetli betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, su emme ve gözeneklilik parametrelerini değerlendiren toplam 28 farklı test grubunda 280 beton numunesi üzerinde çalışılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları, nano-silika ve silis dumanı uygulamasının beton mekanik özelliklerinde ve dayanıklılığında bir iyileşme oluşturduğu. Buna ek olarak, liflerin hacim içeriği göz önüne alındığında, beton karışımına makro-polimerik elyaf dahil edilerek, yüksek mukavemetli betonun mekanik özelliklerini artırıldığı ve beton karışımında polipropilen elyafların yüksek hacim fraksiyonları, yüksek dayanımlı betonun fizikomekanik özelliklerini olumsuz etkilediği ortaya konulmuştur.

Deng vd. 2016’da yapmış oldukları çalışmada, makro poliolefin elyafları elyaf uzunluğu, elyaf dozajı ve beton mukavemetinin elyaf takviyeli betonun tokluğuna etkisi araştırmışlardır. Bu çalışma yuvarlak determinate panel testi kullanarak betonda makro poliolefin elyaflarının takviye edici etkilerinin miktarının belirlenmesine çalışılmıştır. Öncelikle tokluk indeksini kullanarak yeni bir karakterizasyon yöntemi geliştirilmeye çalışılmıştır.

Su vd. 2016’da yapmış oldukları çalışmada, çelik liflerin ultra yüksek performanslı betonlardaki mukavemete etkilerini incelemişlerdir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda (UHPC) malzemesinin karışım tasarımında çelik lif önemli bir bileşik olarak almışlardır. Lifler statik basınç dayanımı ve yarmada çekme mukavemetinde büyük iyileşme sağlamıştır. Mevcut araştırmada, UHPC’nin dinamik özelliklerini araştırmak için Split-Hopkinson-Basınç-Bar (SHPB) testleri yapılmıştır. UHPC’de, iki tür mikro elyaf ve iki çeşit bükülmüş elyaf içeren farklı çelik elyaf türleri karıştırmışlardır. UHPC’nin dinamik mukavemeti üzerine çelik tel ilavesinin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çelik lif ilavelerinin beton dinamik mukavemeti üzerinde belirgin bir etkisi olduğu ancak çelik lif takviyeli UHPC’nin Dinamik Arttırma Faktörleri (DIF) sürekli olarak geleneksel beton malzemelerin Dinamik Arttırma Faktörlerinin (DIF) altında olduğu görülmüştür.

Mo vd. 2015’de yapmış oldukları çalışmada, akrilik elyaf ilavesi ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun hafif beton özelliklerine katkısını incelemişlerdir. %20 yüksek fırın cürufu bulunan hafif betona %0,1 akrilik elyaf ilavesinin çekme mukavemetini artırdığı ve 60 günlük numuneleri kuruma büzülmesinin %10’a kadar azaldığını ortaya koymuşlardır.

Yun vd. 2015'de yaptığı çalışmada, katkıların yüksek performanslı püskürtme betonların (HPWMS) reolojik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, silis dumanı, hava sürükleyici (AEA), süper akışkanlaştırıcı, sentetik elyaf, toz polimer ve viskozite artırıcı katkıları kullanılmıştır. Akma gerilmesi ve plastik viskozite gibi temsili reolojik özelliklerin, değişik karışım türleri ve içerikleri ile oluşturulmuş püskürtme betonun pompalanabilirliğini ve atılabilirliğini değerlendirmek için bir IBB reometresi kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Sonuçlar, AEA kullanımının HPWMS'nin hem akış direncini hem de tork viskozitesini neredeyse orantılı olarak azaltma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Süperakışkanlaştırıcı, tork viskozitesinden ziyade akış direnci üzerinde nispeten daha büyük bir etkiye sahiptir. Ayrıca silis dumanının akış direncinde belirgin bir artışa neden olduğu, buna karşılık tork viskozitesini biraz düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu davranış eğilimi silis dumanının, özellikle sürülebilirlik ve pompalanabilirlik açısından, HPWMS'nin reolojik özelliklerini arttırmada oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

Choi vd. 2015'de yapmış oldukları çalışmada, elyaf takviyeli alkali ile aktive olan cüruf esaslı çimentosuz kompozitin reolojik ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Kompozitin reolojik ve mekanik özelliklerini karakterize etmek için reoloji, sıkıştırma ve tek eksenli gerilme testleri de dahil olmak üzere bir dizi deney gerçekleştirmiş ve ardından kompozitin mikromekanik davranışını karakterize etmek için fiber çekme testleri ve matris kırılma testlerini yapmışlardır. Test sonuçları, düşük aktif viskozite, düşük akma gerilmesi ve yüksek sünekliğe, bileşimlerde %40'lık su/bağlayıcı oranına ve %1.3 hacimdeki polivinilalkol (PVA) liflerine sahip, alkali ile aktive edilen cüruf esaslı bir bağlayıcı kullanılarak elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır.

Maida vd. 2015'de yapmış oldukları çalışmada, çimento matrisine yerleştirilen makro sentetik polipropilen elyafların elyaf takviyeli çimentolu kompozitlerin (FRCC) ara yüzey özelliklerini iyileştirmesi amaçlanmıştır. Çekme testinden önce ve sonra polipropilen (PP) elyaf yüzeylerinin morfolojik özelliklerini izlemek için taramalı elektron mikroskopu kullanmışlardır. Uygulamanın etkileri, işlem görmüş ve işlenmemiş lifler üzerindeki karşılaştırmalı çekme testleri ile araştırılmıştır. Çekme testi esnasında elyaf yüzeyinde oluşan aşınma fenomeni, elyaf kayma ile sürtünme kayma gerilmesinin artmasına ve böylece elyaf ekstraksiyonu için gerekli enerjinin oluşumundan oluşan sertleşme davranışından sorumlu bulunmuştur.

Park vd. 2015'de yapmış oldukları çalışmada, bir çalışma, kırıntı kauçuğu, çelik ve sentetik (polipropilen) liflerin kullanılması yoluyla beton boruların yapısal performansının

arttırılmasına yöneliktir. Bu çalışma, kuru dökme beton karışımında lif hacim fraksiyonunun ve kırıntı kauçuk içerikli 600 mm (24 inç) ve 900 mm (36 inç) çaplarındaki boruların davranışını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Parçalanmış kauçuk parçacıkları beton borular için kullanılan karışımda hacimce %3 ile %20 ince agrega ile değiştirmişlerdir. Test sonuçları, kauçuklanmış beton boru mukavemetini ve sünekliğini arttırmada hibrit elyaf takviyelerinin (hem çelik hem de polipropilen elyaflar) tek tip fiber takviyeden (çelik veya polipropilen elyaftan) daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. ASTM C76'ya göre Sınıf III (96 kN / m / m) ve Sınıf II (72 kN / m / m) için mukavemet gereksinimine ulaşmak için ince agregalar %3'e eşit miktarda kırıntı kauçuğu ile değiştirilebileceğini ortaya koymuşlardır.

Kadam vd. 2014'de yapmış oldukları çalışmada, taş duvarların püskürtme beton ve kaynaklı tel örgü ile güçlendirmeye çalışılmıştır. Bu tekniğin duvar yapımında kesilme ve süneklik kapasitesini arttırmada etkinliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Altı güçlendirilmemiş ve on iki güçlendirilmiş panel seti, diyagonal sıkıştırma testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, ferro-cement betonu kullanıldığı güçlenmenin, güçlendirilmemiş duvarların kesilme mukavemetinde ve süneklikte önemli bir iyileşme sağladığını ortaya koymuşlardır.

Kaufmann vd. 2013'de yapmış oldukları çalışmada, ıslak püskürtmeli beton uygulamalarında elyafların dengelenmesi ve yönlendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Makro sentetik polimer elyafların ve çelik liflerin geri sekme davranışı saha deneylerinde olduğu kadar laboratuvar deneylerinde de çalışılmıştır. Beton, iyi tanımlanmış yapay taş kabartmalara püskürtülmüş ve elyaflı malzemelerden geri sıçrayanlar toplanarak analiz edilmiştir. Makro-sentetik lif örneklerinde, farklı lif parametrelerinin geri sıçrama davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tek hızlı çekim deneyleri ve yüksek hızlı bir kamera aracılığıyla yapılan doğrudan gözlemler çarpma davranışlarını ve dolayısıyla lifin geri tepmesinin nedenlerini ortaya çıkarmıştır. Püskürtülen beton içerisindeki lif oryantasyonu X-ray bilgisayar tomografisi ile analiz edilmiştir. Özel morfolojik filtreleme, düşük yoğunluklarına rağmen plastik liflerin özelliklerinin analiz edilmesini sağlamıştır. Püskürtülen yüzey boyunca bu elyafların tercihli bir yönlenmesi olduğunu ortaya koymuşlardır.

1.4. Yeraltında Dolgu Yöntemleri

Madencilik işlemleri sonucunda yeraltında oluşan boşlukların, uygun bir malzeme kullanarak tahkimat sağlamak, topukların kazanımı ve/veya atıkları depolamak amacıyla

yapılan doldurma işlemine dolgu denir. Yeraltı madenciliğinde yeraltında üretimin güvenli bir şekilde yapılabilmesi, yerüstünde oluşabilecek çökmeleri engelleme, işletme atıklarının kullanılması, istenilen üretim metodlarının uygulanması, çıkarılan değersiz kısımların ve cevher işlendikten sonra oluşan atığın güvenli depolanabilmesi için dolgu işlemi uygulanır. (Archibald vd., 2003, Amaratunga ve Hein 1997; Benzaazoua vd., 2002, Külekçi, 2013).

Dolgu uygulaması, yeraltı madenciliğinde tahkimat amaçlı, yerüstü stabilitesinin sağlanması ve topuk kazanımı gibi duraylılık problemlerini engellemek ve madencilikte en fazla kullanılan işletme yöntemi olan kes-doldur yöntemini efektif kullanabilmek için sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun yanında yeraltından ve cevher hazırlama tesisinden çıkan atıkların yeryüzünden uzaklaştırılması yönüyle çevreye verilen olumsuz etkiyi azalmaktadır (Weaver ve Luka, 1970). Dolgu sistemi tercihi ve uygulamasının doğru yapıldığı durumlarda ekonomik olarak işletmeye katkı sağlayacaktır (Nanthanathan, 2006).

Dolgu işleminde, yeraltından çıkarılan değersiz malzeme, cevher zenginleştirme atıkları, kum, taşocaklarından patlatma sonucu elde edilen iri kayaç parçaları, kırılmış agrega, geri kazanılmış agrega kullanılmaktadır (Çakmakçı, 1997). Dolgu işleminde kullanılan katı atıklara belli oranda bağlayıcı, akışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı gibi kimyasallar ve bunlara ek olarak bağlayıcı ile birlikte puzolan (silis dumanı, yüksek fırın, cüruf ve uçucu kül) karıştırılması ile yeraltına uygulanır (Archibald vd., 2003). Madenlerde kullanılan dolgu yöntemleri genel olarak içeriğine bağlı olarak kaya, hidrolik ve macun dolgu olarak üç gruba ayrılır (Nasir ve Fall, 2009; Fall vd., 2010). Bu ana dolgu çeşitleri dışında Norveç'te uygulanan buz dolgusu gibi yerel farklı dolgu çeşitleri bulunmaktadır. Başlıca dolgu tipleri avantaj ve dezavantajları Tablo 1.8'de verilmiştir.

Tablo 1.8. Madenlerde uygulanan dolgu çeşitleri ve özellikleri (Yılmaz, 2003).

Özellikler	Hidrolik Dolgu	Macun Dolgu	Kaya Dolgu
Katı oranı	%60- %75	%75- %85	%95- %100
Nakliye sistemi	Sondaj kuyusu ve boru hattı	Sondaj kuyusu ve boru hattı	Nakliye kuyusu ve mobil ekipmanlar
Bağlayıcı	Çimentolu veya çimentosuz	Yalnızca çimentolu	Çimentolu veya çimentosuz
Bağlayıcı miktarı	%3- %11	%3-8	%1-10
Su/çimento oranı	w/c oranı yüksek, dayanım düşük	w/c oranı yüksek, dayanım yüksek	w/c oranı düşük, dayanım yüksek
Tane boyu	> 20 μm (\geq % 90)	< 20 μm (\geq % 15)	> 20 cm
Yerleştirme hızı	100-200 ton/saat	50-200 ton/saat	100-400 ton/saat
Ayrışma (segregasyon)	Mevcut	Yok	Mevcut
Dayanıklılık	Düşük	Düşük veya yüksek	Yüksek
Barikat dizaynı	Pahalı	Ucuz	Gerekli değil
Drenaj	Su miktarı fazla	Gözardı edilebilir	Önemsiz
İlk yatırım giderleri	Düşük	Yüksek	Yüksek
İşletme giderleri	Orta (8.20 \$/ton)	Düşük (5.10 \$/ton)	Yüksek (9.70 \$/ton)
Avantajları	<ul style="list-style-type: none"> Altyapı tesislerinin kurulum ve işletiminin nispeten kolay olması, Malzeme temini kolay, Kullanımının yaygın olması İyi bir nakliye dizayn sistemi ile pompa ve boru maliyetlerinin azaltılabilmesi, 	<ul style="list-style-type: none"> Aynı çimento oranında hidrolik dolguya kıyasla Dayanım kazanımı yüksek, Sülfürlü atıkların yeraltında depolanması sağlama, Yerüstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerini azaltma, Drenajla birlikte bağlayıcı kaybının düşük olması 	<ul style="list-style-type: none"> Dolgu hazırlamanın kolay olması, Yüksek dayanım elde edilebilmesi Su ihtiyacının düşük olması ve yeraltında su drenajına gerek olmaması
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none"> Fazla suyun uzaklaştırılması (drenaj) işlemi maliyeti arttırmakta, Çimentonun bir kısmının drenaj ile birlikte ortamdan uzaklaşması dayanım kazanımını azaltmakta, Yeraltındaki ateşlemeler nedeniyle sivilaşma ve barikat yıkılması problemlerinin oluşması, 	<ul style="list-style-type: none"> Pompalama ve susuzlandırma işlemlerinin pahalı olması, İleri teknoloji gerektirmesi, Yeraltındaki ateşlemeler nedeniyle sivilaşma ve barikat yıkılması problemlerinin oluşması, Sülfürlü atıkların oksidasyonu nedeniyle sülfat atak oluşması ve uzun dönemde dayanım kaybının görülmesi 	<ul style="list-style-type: none"> Malzeme temininin taş ocağı vb. yerden temini nakliye maliyetini arttırmakta, Ayrışma nedeniyle yeraltında (in-situ) porozite ve gözenekliliğin fazla olması

1.4.1. Yeraltı Yapılarında Kullanılan Dolgu Metotları

Madencilikte dolgu olarak kullanılan ana maddeye ve doldurma yöntemine göre temelde üç dolgu metodu vardır. Bunlar hidrolik, macun ve kaya dolgu yöntemleridir (Şekil 1.5).

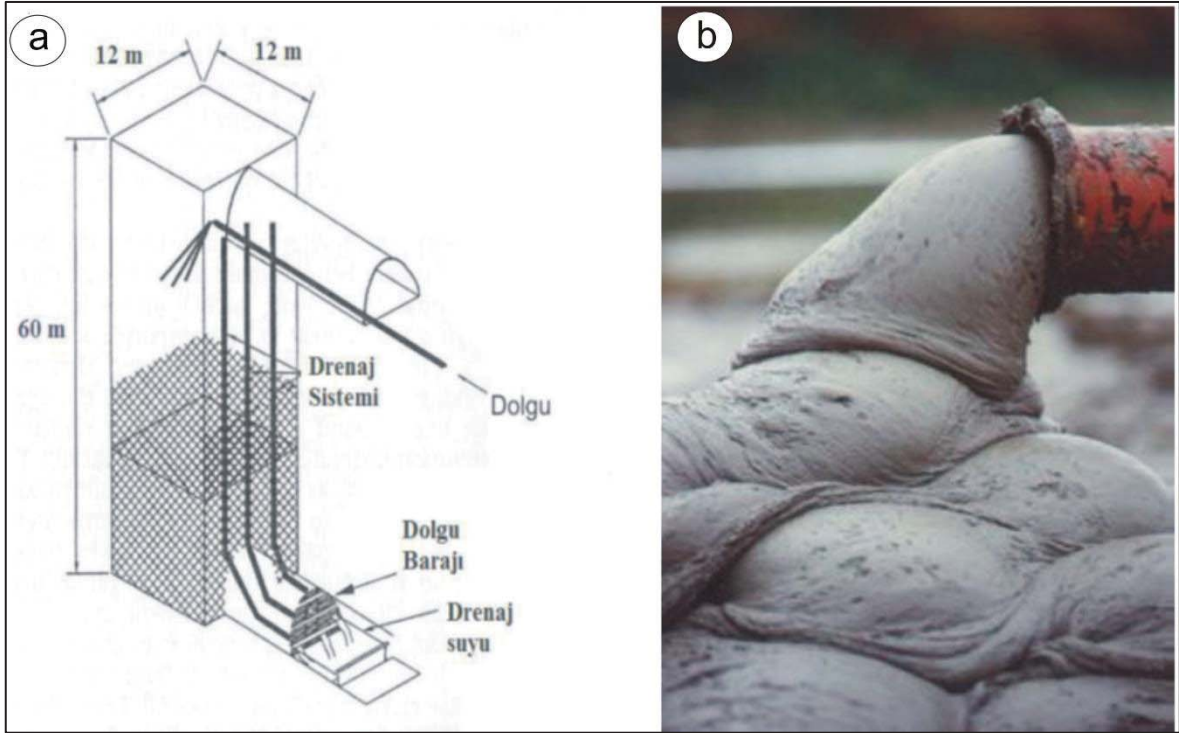


Şekil 1.5. Yeraltında kullanılan dolgu yöntemleri, a) hidrolik dolgu, b) macun dolgu, c) kaya dolgu (URL-1).

1.4.1.1. Hidrolik Dolgu

Madencilik sektöründe 1940'lı yıllardan itibaren en yaygın şekilde kullanılan dolgu yöntemidir. Hidrolik dolgu, uygun boyuttaki malzemenin su ile yeryüzünden yeraltına uzanan boru hattı ile nakledilerek, madencilik faaliyetleri sonucu oluşan boşlukların doldurulması, fazla suyun katı dolgu malzemesinden ayrışması ve sertleşmesi döngüsü şeklinde tanımlanır. Dolgu malzemesi olarak kullanılacak atığın belirli özelliklere sahip olması gerekir (Potvin, 2005) (Şekil 1.6).

Karışım, nakil sisteminin çapına, akış hızının üzerine çıkabilen iri tanelerin hacmi, en büyük tane boyutu ve sudan süzulebilecek ince tanelerin hacmine bağlı olarak katı oranı %60- %70 arasında olmalıdır (Thomas ve ark, 1981). Hidrolik dolgu karışımında kullanılan malzemenin ağırlıkça %10'dan az 10 µm altı malzeme olması istenir bunun sebebi hidrolik dolguda serbest drenaj sistemi olduğu için suyu tutması istenmez ve içerdiği suyun en kısa sürede uzaklaşması istenir (Abdul-Hussain, 2011).



Şekil 1.6. Hidrolik dolgu uygulaması, a) dolgu uygulama prosedürü, b) fiziksel görüntü (URL-2).

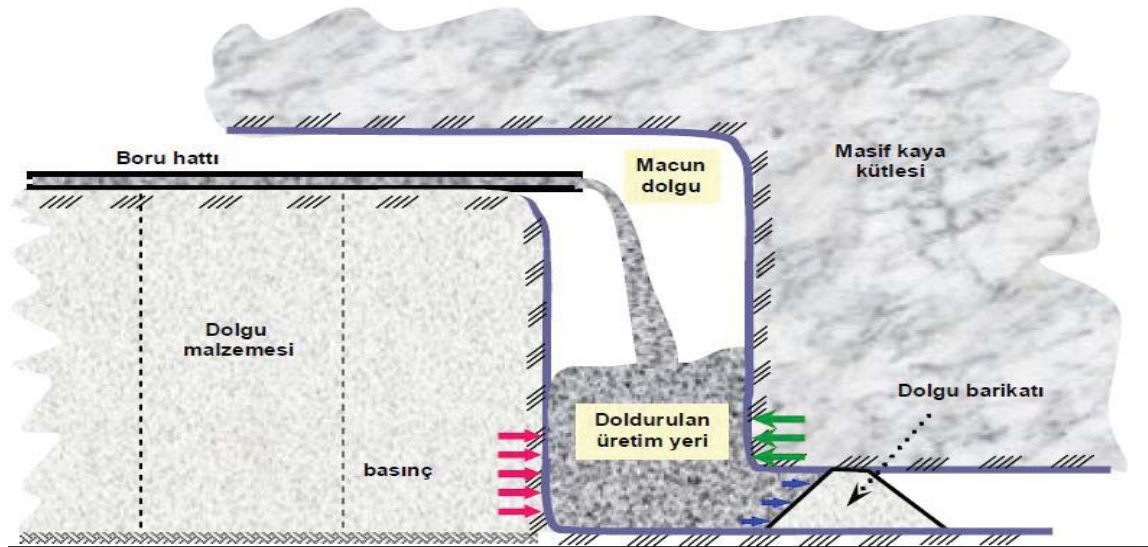
Madencilikte kullanılan bütün dolgu yöntemlerinin ekonomik ve çevresel faydaları ve riskleri vardır. Hidrolik dolgu yönteminde, yeraltı boşluklarını doldurmak için genel olarak cevher hazırlama tesisinden çıkan atıklar kullanılmaktadır. Bu atıkların incelenmesinin tam olarak yapılamadığı durumlarda atıkta bulunabilecek siyanür, arsenik gibi zararlı kimyasalların çalışanların sağlığını olumsuz etkileyebilir ayrıca tesisten gelen atıklarda bulunması muhtemel kurşun, çinko, pirit gibi mineraller dolgu dayanımını etkileyerek uzun vadede dayanım düşmesine ve çökmelere neden olabilirler.

Hidrolik dolguda karşılaşılan en büyük problemlerden biri su problemidir. Dolgunun yeraltına nakil sırasında hatların tıkanmaması ve aşınmanın az olması için fazla su kullanılabilir. Bu fazla su drene edilmediği veya edilemediği durumlarda, çimento/su oranı düştüğü için düşük dayanım, barikat sisteminin çökmesi gibi ciddi sorunlar oluşacaktır. Bu dolgu sisteminin en büyük dezavantajı dolgu sürecinin her aşamasının takip edilmesi gerekmektedir. Çünkü, güvenli bir madencilik uygulaması için özellikle barikat sisteminin izlenmesi gerekmektedir. Barikat patlamaları ve dayanımın yetersizliği nedeniyle ölümcül kazalar tecrübe edilmiştir (Torlach, 2000).

1.4.1.2. Macun Dolgu

Macun dolgu yöntemi, malzemenin akışkan özelliğini sağlamak için karışımı oluşturan tanelerin arasındaki boşlukları dolduracak kadar su ile karışmış taneli bir yapıdır. Macun dolgu sistemlerinde, katı partikülleri ile su molekülleri bir araya getiren koloidal elektrikli partikül yükü, taneli malzemenin partikülleri arasında suyun muhafaza edilmesini temin etmektedir (Kesimal ve ark., 2002).

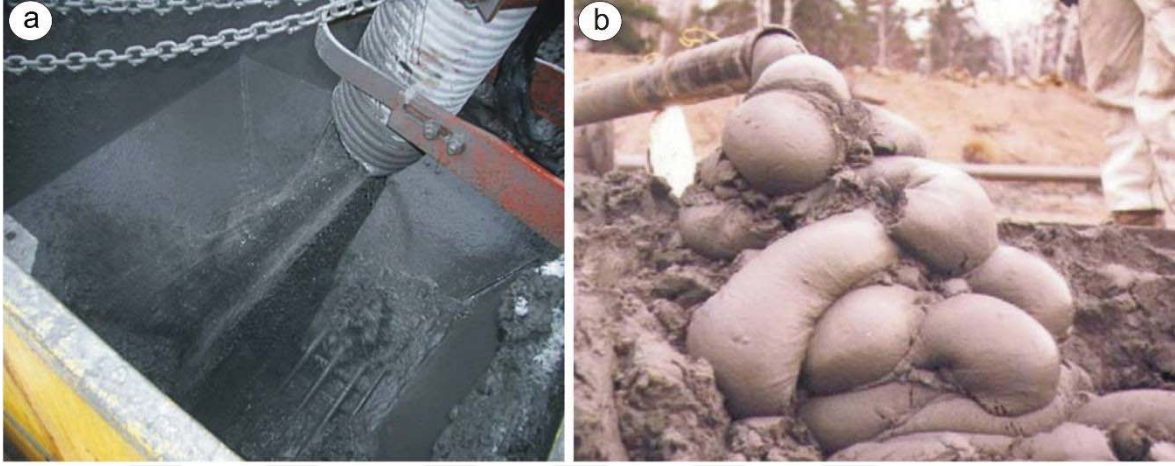
Bu yöntem 1900'li yılların son çeyreğinde Almanya'da bulunan Grund Madeninde kullanılmıştır. Uygulama kolaylığı, düşük maliyet ve en önemlisi çevresel sorunlara yol açan tesisi atıklarının tamamına yakınının yeraltında depolanmasından ötürü macun dolgu başta Kanada ve Avustralya olmak üzere bütün dünyada sıklıkla uygulanmaktadır (Şekil 1.7). Atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerinin önemli ölçüde azalmasına neden olan macun dolgu yöntemi birçok madende hidrolik dolgu yerine geçmiştir (Yumlu, 2001; Landriault, 2006; Sivakugan vd, 2006).



Şekil 1.7. Yeraltı madenlerinde uygulanan macun dolgu yöntemi (Erçikdi, 2009).

Macun dolgu yöntemi %65- %85 gibi yüksek oranda katı, bağlayıcı, gerek duyulduğunda mineral katkı, taşıma ve hidrasyonun sağlanması için bir miktar su içeren oldukça kompleks bir malzemedir (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995). Hidrolik dolguda olduğu gibi macun dolguda da su ve tane boyutu önemlidir. Karışımda kullanılan

malzemenin 20 mikronun üzerindeki tanelerin miktarının en fazla ağırlıkça %15 olması istenir (Landriault, 1995) (Şekil 1.8).



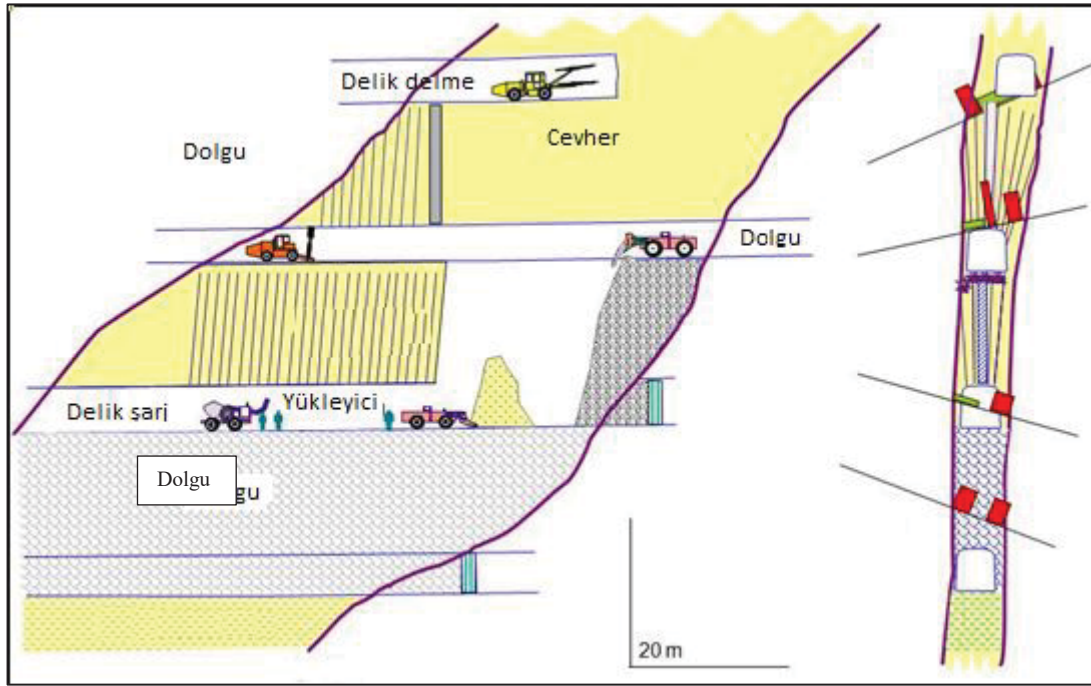
Şekil 1.8. Macun dolgu uygulaması, a) Macun dolgunun nakil borusundan çıkışı, b) fiziksel görüntü (URL- 3).

1.4.1.3. Kaya Dolgusu

Madencilikte ucuz maliyeti, uygulama kolaylığı nedeni ile en fazla tercih edilen kaya dolgu yöntemidir. Kaya dolgu yönteminin taşıma, yerleştirme ve içeriklerine bağlı olarak farklı uygulama şekilleri vardır (Şekil 1.9). Yeraltından çıkarılan işe yaramayan yan taşın tek başına kullanıldığı uygulamalarla birlikte, aynı ocağın açık işletmesindeki dekapajın kullanıldığı ya da taş ocaklarından üretilen iri agreganın bağlayıcı ile karıştırılarak yeraltı boşluklarının doldurulduğu uygulamalar da mevcuttur (Archibald vd., 2003).

Kaya dolgu yönteminin bağlayıcı içeriğine, taşınmasına ve yerleştirme şekline bağlı olarak farklı uygulamaları mevcuttur. Bağlayıcı içeriğine göre dolgunun yeraltında kullanım amacına göre (dolgu stopunun altına girilecek mi, üzerinde, iş makinesi çalışacak mı, ne kadar süreli stabil kalması isteniyor vb.) bağlayıcı kullanılan ya da kullanılmayan şekilde ikiye ayrılır. Yapılan dolgunun çimentolu mu yoksa çimentosuz mu olacağı beklenen basınç dayanımı ile ilişkilidir. Madencilik işlemlerinde boşlukları sadece doldurmak ya da tahkimat amaçlı doldurmak için dolgu yapılır, bu nedenle çimentolu kaya dolgusunda basınç dayanım aralığı çok geniştir. 28 günlük dayanımın genel olarak 1 ile 11 MPa arasında olması istenmektedir. Buna bağlı olarak dolguda kullanılan çimento oranı ağırlıkça %4 ile %8 arasında değişmektedir. Kullanılacak olan çimentonun miktarı istenilen dayanım ve

ekonomikliğe bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Madencilik sektöründe son yıllarda ekonomiklik ön plana çıktığı için bağlayıcı olarak çimento miktarını azaltıp, çimentoyla beraber uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolan malzemeler de kaya dolguda denenmeye başlanmıştır (Özdoğan, 2009).

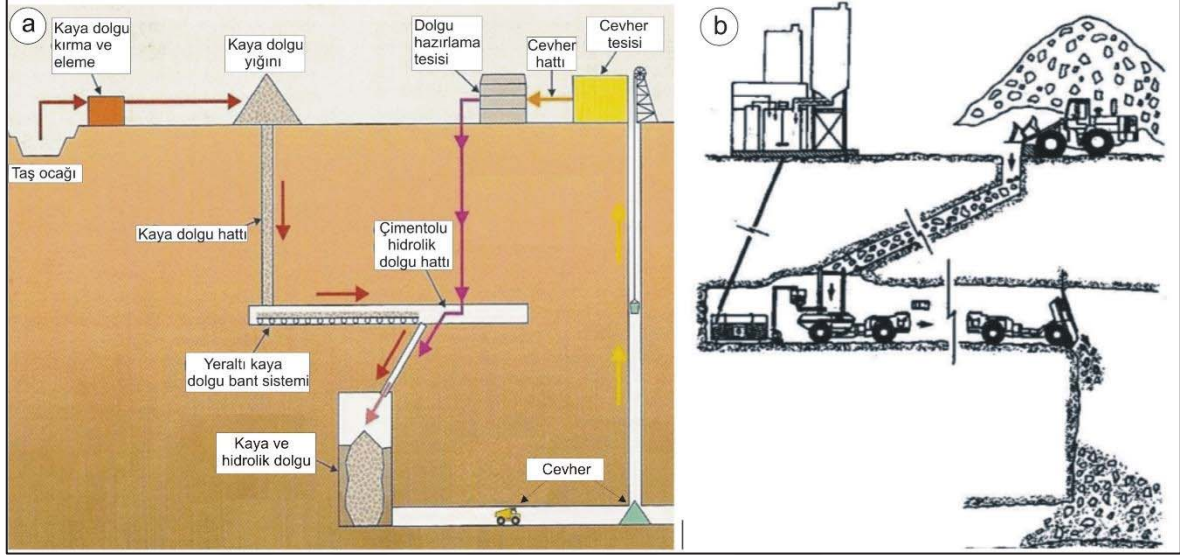


Şekil 1.9. Kaya dolgu yöntemi (Url-4).

Kaya dolgusu yeraltına taşıma şekline göre sondaj deliği ile taşıma ve kamyonlarla taşıma şeklinde ikiye ayrılır. Dolgu yapılacak boşluğun hacmi, yeryüzüne uzaklığı gibi kriterler incelenerek yer üstünde hazırlanan karışım uygun şekilde nakledilir (Şekil 1.10). Sondaj deliği yönteminde kuru malzemenin önceden açılan sondaj delikleri ile dolgu yapılacak alana gönderilmesi işlemidir. Bu uygulama şeklinde dikkat edilmesi gereken noktalar, saatte nakledilecek malzeme miktarı, malzemenin tane boyut dağılımı, sondaj çapı ve malzeme de bulunan en büyük tane büyüklüğüdür. İkinci taşıma şekli ise hazırlanan kuru ya da yaş dolgunun kamyonlar ile yeraltına taşınmasıdır. Bu yöntemin her aşamasının kontrolünün kolay oluşu, pratikliği ve kullanımın kolaylığı nedeni ile en fazla tercih edilen yöntemdir (Darling, 2011).

Kaya dolgu işlemi hazırlama taşıma ve en son yerleştirme işlemi ile sonlandırılmaktadır. Yerleştirme işlemi belli bir mesafeden kamyonlar ya da sondaj deliği

ile yukarıdan aşağıya dökme şeklinde yerleştiriliyorsa, dolgu ağırlığı ve yerçekimin etkisi ile kendi kendine yerleşmesi beklenir.



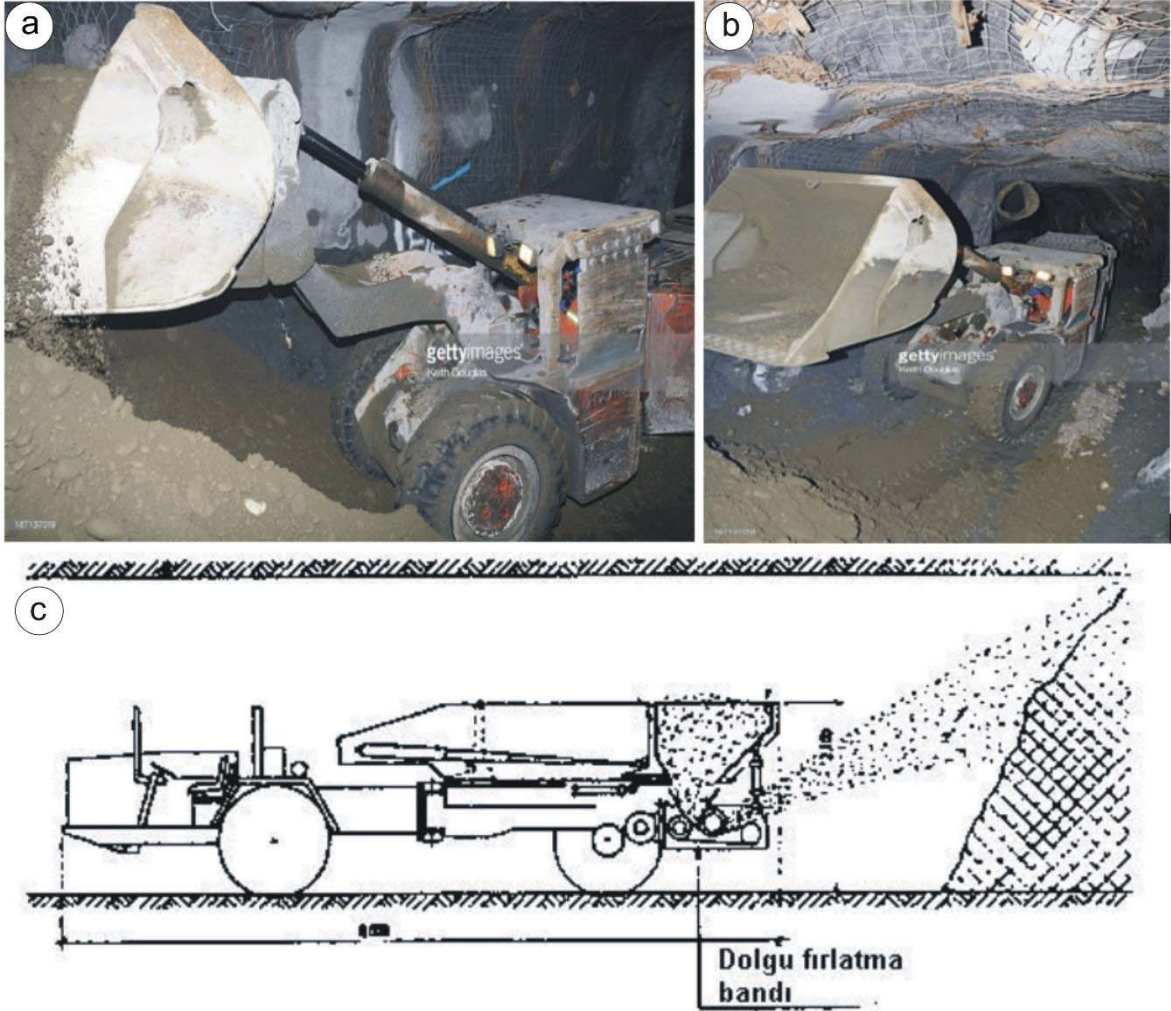
Şekil 1.10. a) Taş ocağından sağlanan agrega ile yapılan kaya dolgu, b) Yerçekimi yardımı ile yapılan çimentolu kaya dolgusu uygulaması (Erçikdi, 2009, Hustrulid W., 2001).

Yerçekimi etkisi kullanılmıyor veya etkili olmuyorsa bu durumda yatay biçimde yerleştirilir, uzaktan kumandalı kepçe gibi çeşitli maden makinaları ile boşluklara doldurulabilir (Darling, 2011) (Şekil 1.11).

Kaya dolgusu yönteminin;

- Yeraltından elde edilmiş ve genellikle 40 mm boyutuna kadar kırılmış agrega dekapaj ya da yan kayaç kullanımı ile atık depolamasını ve atık depolama maliyetlerini azaltmaktadır.
- Yerüstünde depolamayı azaltarak atık maddelerin çevreye verdiği zararlar azaltılmaktadır.
- Hazırlama, taşıma ve nakliye işlemleri oldukça basit ve uygulanabilir olduğu için barikat hazırlama maliyeti, susuzlandırma maliyeti gibi maliyetler içermemektedir.
- Yeraltında dolgu işlemi güvenli çalışma ortamı sağlamaktadır.
- Çimento oranı artırılarak dayanım istenen seviyede nispeten sağlanabilir.
- Yeraltından çıkarılan veya açık işletmelerden elde edilen dolgu malzemesinin kabarması nedeni ile dolgu tonajını üç kat ve hacmini 2 kat arttırmasına, bu artışında

dayanımı arttırması ve bağlayıcı (çimento) tüketimini %2'nin altına düşürebilmektedir. Bağlayıcı miktarının düşmeside maliyeti düşürecektir (Abdul-Hussain, 2011).



Şekil 1.11. Kaya dolgunun yatayda, a, b) kepçe yardımı ve c) dolgu fırlatma bandı ile yerleştirilmesi yöntemi (URL- 5, Hustrulid W., 2001).

1.4.2. Yeraltı Dolgusu ile İlgili Literatür Çalışmaları

Zha vd., 2011'de yapmış oldukları çalışmada madencilik işlemleri nedeni ile binalar da oluşan çökme ve hasarların giderilmesi için kaya dolgu madenciliğini önermişlerdir. Mekanizma araştırmalarına dayanarak, katı dolgu madenciliğinin binalarda çökme kontrolüne ilişkin bazı ilkeler önermiş ve eşdeğer madencilik yüksekliği, madenlerin neden

olduğu yer hareketi ve deformasyonunu, mukavemet kriterlerinden daha az olmasını sağlayan binaların ve bağlantı yapılarının tahkimat kriterlerine göre tasarlamışlardır.

Guo ve ark. 2011'de yaptıkları çalışmada, fay bölgesinde ve yeraltı boşluğunun yoğun olduğu alanların üzerinde bulunan tarım arazilerini tasmandan korumak için kaya dolgu teknolojisini kullanılmasını önermişlerdir. Madencilik alanındaki tarım arazilerinin yok edilme durumundan yola çıkarak, çiftlik alanlarının korunması için üç yol önermişlerdir. Kaya dolgu teknolojinin fizibilitesini artırmak, kaynakların geri kazanım oranını artırmak için sınırlı dolgu malzemesinin kullanılması gerektiğini belirterek bir kömür madeni örneği üzerinde önerilerini savunmuşlardır.

Wu ve ark. 2016 yılında ki çalışmalarında, çimentolu gang dolgu (CGB), çimento, kömür gang ve gang suyu karışımı ile hazırlandığını, Kömür yanmasından gelen uçucu kül CGB'nin mekanik performansını ve akışkanlığını arttırmak ve aynı zamanda CGB hazırlama maliyetini düşürmek için bir karışım olarak kullanıldığını, tek eksenli basınç dayanımı, CGB'nin mekanik performansını değerlendirmek için en sık kullanılan göstergelerden bir olduğunu ve tahribatsız bir ölçüm olan ultrasonik test, CGB gibi çimentolu malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için de uygulandığını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada farklı uçucu kül dozajında (ağırlıkça %19, %20 ve %21) ve katı içeriğinde (%76.5, %77.5 ve %78.5) hazırladıkları CGB'nin basınç dayanımı ve ultrasonik pulse hızı (UPV) -28 gün. CGB'nin basınç dayanımı ve UPV değerleri uçucu kül dozajı ve katı içerik arttıkça arttığını, CGB örnekleri için basınç dayanımı ve UPV arasında korelasyon katsayısının 0.959 olan üssel bir ilişkinin var olduğunu ve elde edilen üstel ilişki, t ve F testleri yapılarak doğruluğunun kanıtlayarak yeraltı CGB yapılarının dayanımını tahmin etmek için UPV testinin uygulanması için referans olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Nandy ve Szwilski, 1987'de yapmış oldukları çalışmada, maden ve enerji santral atıklarının bertarafının problem olduğuna dikkat çekmişlerdir. Yeraltı kömür madenlerinin mayınlı alanlarının doldurulması, genel sorunun bir kısmının bir çözümü olup, enerji santralinin potansiyel atıklarının bir kömür madenlerinin yeraltı depolama alanı olarak kullanılabilmesi ve bunun ekonomik fayda sağlayacağını belirtmişlerdir. Çalışmalarında dünyadan örnekler vererek Kentucky'nin Amerika Birleşik Devletleri'nin kömür üreten merkezinde yer alan coğrafi konumu, maden atıklarının yeraltına taşınmasına yönelik çalışma için iyi bir yer olduğunu vurgulayarak, bir dizi atık madde ve bunların kompozitlerini yeraltı kömür madenleri için bir dolgu olarak değerlendirmesini çalışmışlardır.

Yang vd. 2005' de yapmış oldukları çalışmada, Sijiaying demir madeninin kapasitesinin artırılması için kaya dolgu dizayn edilmiştir (SSFm). Madenin yüzeyinde tarım arazileri ve köyler bulunduğu için, cevherin istiflenme stabilitesi ve yüzey çöküşünü en aza indirmek için yüzey deformasyonu kontrol edilmelidir. Yaptıkları çalışmada, sahaya özgü jeolojik koşullara göre, dolgu kütlesi incelenerek nerede hata yapıldığı ve dolgu dizaynını ortaya koymuşlardır. Ardından, dolgu kütlesinin gövdesinin stabilitesi ve madencilik işlemleri sonucu yüzeyde oluşmuş 450 m'lik tasman fiziksel modelleme kullanılarak analiz edilmiştir. Son olarak, FLAC3D programı kullanılarak yüzey gerilimi ve stope stabilitesinin elde edildiği üç boyutlu bir sayısal model oluşturmuşlardır.

Jiang vd. 2015' de yaptıkları çalışmada, çevre kirliliği, kömür madeni atıklarının yüzey bertarafı ile ilgili konulara dikkat çekerek, Çin'de yedi farklı yerden elde edilen atık kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerini tanımlamış ve değerlendirmişlerdir. Bunlara ek olarak, dinamik parametre güncellemeleri yoluyla, katı malzeme konsolidasyonunun simülasyonu için temel bir yöntem açıklanmış ve bunun uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

Li ve ark. 2012 yılında yaptıkları dolgu yüzeyinde oluşan deformasyon analizi çalışmasında, farklı dolgu malzemeleri için sayısal simülasyonlar ile yüzey deformasyonu, eşdeğer madencilik yüksekliği modeli öngörmüşlerdir. Sonuç olarak, dolgu malzemesinin elastisite modülünün artmasıyla yüzey çöküntüsünün azaldığı, elastisite modülü değerinin 5 GPa'dan sonraki değerleri için çökme hızının düştüğü, tam mekanize geri dolun madenciliği teknolojisi ile yüzey deformasyonunu etkin bir şekilde kontrol edilebildiğini ortaya koymuşlardır.

Guo ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptığı çalışmada, kaya dolgu teknolojisinin tabaka hareketlerinin özelliklerine dayanarak, yüzeyde oluşan tasmanların eşdeğer madencilik yüksekliği teorisi ile tahmin yöntemi ve bu yöntemin parametreleri önerilmiştir. Göçertmeli madencilikte tasman oluşmaması için eşdeğer yükseklik hesaplaması yapılırken kullanılan kat yüksekliği, sarkma zonu ve kırılma zonu gibi parametrelerin yanında kaya dolgu parametresinin de etkili olduğunu savunmuşlardır.

Zhou vd. 2013 yılında ki çalışmalarında, yer üstü kaya atıklarının depolama sorunu ve bu sorunun giderilmesi için yeraltı depolamasını önermiştir. Yeraltı depolama verimini artırmak için atığın temizlenmesi ile ilgili somut teknik gereklilikler, dolgu malzemesinin fiziksel özelliklerinin analizi ve tane boyutunun dolgu işlemine olan etkisi incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada ayrıca, farklı katı dolgu malzemelerinin kaynağına göre, üç tane ön arıtma teknik planı önermişlerdir. Atık kaya ve uçucu kül karışımı dolgu malzemelerinin

teknik özellikleri sırasıyla detaylı olarak açıklamış ve bu yöntemleri kömür madenlerinde test etmişlerdir.

Zhou ve ark. 2014'de yapmış oldukları çalışmada, kömür madenlerinde yapılan dolguda dikey olarak beslenen katı atıkların silolara verdiği zararı engellemek için gaz-katı iki fazlı akışta parçacıkların bir yörünge modeli oluşturmuşlardır. Düşen katı atık tarafından üretilen kuvveti ve katı parçacıkların kuvvet özelliklerini incelemek için gaz-katı iki fazlı akış alanında dinamik analiz metodu benimsenmiştir. Araştırma, hava viskoz direnci ve yer çekiminin katı parçacıkların hareketini etkileyen ana dikey kuvvetler olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, yer değiştirme, hız ve ivme ile ilgili korelasyon denklemleri MATLAB yazılımı kullanılarak oluşturulmuş, dikey bir boruda katı parçacıkların hareket kanunu, belirli bir kömür madeninin gerçek koşullarını göz önünde bulundurarak, hızın, zamanın geçişi ile arttığı, elde edilen sonuçlara göre, tasarlanan özel bir tampon ile dikey besleme sisteminde oluşan itme kuvveti engellenmiştir.

Muzgina 2003, yılında yaptığı bildiride Kazakistan Cumhuriyetindeki cevher yataklarında katı dolgu yapma işlemi gittikçe yaygın bir şekilde kullanılmaya başlandığı, fakat yeni ekonomik koşullar bu tip madenciligi, dolgu çok fazla çimento gerektirdiği için pahalı bir duruma getirdiğini savunmuş, bundan dolayı optimum düzeyde gerekli dolgu malzemesinin özelliklerini (örneğin basınç dayanımı) bularak bu probleme bir çözüm bulma yaklaşımındadır. Çalışma konusu jeomekaniksel ve ekonomik özellikler dikkate alınarak yapılmıştır. Cevher kaybı dolgu malzemesinin basınç dayanımına ve çimento kullanım miktarına bağlıdır. Sonuç olarak, optimum düzeydeki dolgu miktarının bulunması, çimento kullanımındaki fazla harcamaları önlemesinin yanısıra fazla cevher kaybının da önleyeceğini bildirmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Dünya üzerinde gerek depremler sonucu gerekse kentsel dönüşüm amaçlı yıkılan binaların atıkları birçok açıdan problem oluşturmaktadır. Türkiye’de son yıllarda yaşanan depremler sonucu oluşan inşaat molozları ve depreme dayanıksız binaların yıkılması sonucu oluşacak molozların bertarafı çevresel sorunları gündeme getirmiştir. Bina molozlarının bertarafı konusundan özellikle Marmara depremi sonrasında oluşan inşaat atıklarının konulacak yer bulunamaması ve olası büyük İstanbul depremi sonrası açığa çıkacak molozların oluşturacağı problemlerin çözüme kavuşturulması nedeni ile küçük ölçekte bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Fakat inşaat molozlarının GKA olarak madencilik ve yeraltında kullanımına dair herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu tezin amacı; Karadeniz Bölgesi’nde çeşitli sebepler ile yıkılmış binalardan alınan molozların geri kazanılmış agrega (GKA) olarak kullanılabilirliğinin tespiti ve bu GKA’ların inşaat sektöründe beton agregası, madencilikte yer altı dolgusunda ve püskürtme betonda agrega malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması olarak belirlenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda Karadeniz bölgesinden çeşitli il ve o illerde değişik bölgelerden alınan inşaat moloz örnekleri literatürde var olan agrega deneylerine tabi tutularak molozların agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen inşaat molozlarından, çeşitli fiziksel ve mekanik deneyler yapılarak bu agregaların yeraltında çevreye zarar vermeden ve püskürtme betonda agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Tez çalışması sonucunda;

- Karadeniz Bölgesindeki inşaat atıklarının agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması,
- Geri kazanılmış agreganın (GKA) doğal agrega olarak kullanılabileceğini ortaya koymak ve iyileştirmek amacı ile belli oranlarda GKA’nın doğal agrega yerine kullanılması,
- GKA’nın çimento ve uçucu kül ile etkileşiminin incelenmesi,
- Geri kazanılmış agrega (GKA) kullanımı ile üretilen betonlarda Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) riskinin tespiti,

- GKA'ların madencilik sektöründe zararsız olarak yeraltına dolgu malzemesi olarak depolanması amacı ile yeraltında dolgu yöntemlerinden çimentolu kaya dolgu yönteminde doğal agrega yerine belirli oranlarda GKA kullanılarak mekanik dayanım, durabilite bakımından kullanılabilirliğinin incelenmesi,
- Madencilikte tahkimat amaçlı en fazla kullanılan püskürtme beton uygulamasında doğal agrega yerine GKA kullanım imkanlarının araştırılması,
- GKA'nın püskürtme betonda kullanılan farklı lif çeşitleri (Sentetik lif, çelik lif, vb.) kullanılarak GKA ile etkileşimi ve enerji absorpsiyonunun belirlenmesi,
- İnşaat atıklarının yerüstünde depolanması sonucu oluşan çevresel problemlerin (atık vb.) elimine edilmesi ve bu atıkların dolguda agrega yerine belirli oranlarda kullanılabilirliğinin ortaya konulması hedeflenmiştir.

Bu tez kapsamında Tablo 2.1'de verilen deneyler yapılmış ve deney sonuçları irdelenmiştir.

Tablo 2.1. Tez kapsamında yapılan deney listesi

İnşaat atıklarının incelenmesi deneyleri	Geri kazanılmış agrega deneyleri	Püskürtme beton deneyleri	Yeraltı dolgu deneyleri
Karot örnek alımı	Elek analizi	Çökme testi	Çökme Testi
Ultrasonik hız tayini	Yoğunluk- su emme, nem ve porozite	Ultrasonik hız tayini	Tek Eksenli Basınç Dayanım Deneyi
Tek eksenli basınç dayanımı	Metilen Mavisi deneyi	Tek eksenli basınç dayanımı deneyi	Ultrasonik Hızı Tayini Deneyi
Nokta yükleme deneyi	Darbe dayanım deneyi	Enerji yutma kapasitesi (tokluk) tayini	
Böhme aşınma deneyi	Yassılık deneyi	Plaklarda ultrasonik P-dalga hızı ölçümü	
Schimidt çekici sertlik tayini (L tipi)	Donma-Çözünme deneyi	Plaklarda Donma-Çözünme Deneyi	
Karbonatlaşma derinliği tayini	Alkali silika deneyi (Kimyasal yöntem)	Plaklarda birim hacim kütle deneyi	
	Alkali silika deneyi (Hızlı harç çubuğu yöntemi)	İnce Kesit Analizi	
	Mikro deval Aşınma Deneyi		
	Losangeles Aşınma Deneyi		

Bu doktora tez çalışması; yapılan arazi çalışması, numune temini ve sınıflandırması 16 ay, laboratuvar çalışmaları 26 ay, literatür taraması 38 ay, tezin yazılarak sunulması 9 ay olmak üzere toplam 60 ay sürmüştür. Yapılan çalışmalarda kullanılan malzeme miktarları ve temin süreleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Tez kapsamında yapılan çalışmalar ve alınan malzeme miktarları

	Yapılan iş	Ağırlık, kg	Adet	Boyut, mm	Zaman, gün
İnşaat atıklarının incelenmesi deneyleri	Moloz temini	5750			120
	Karot örnek alımı	-	55	100x200	43
	Ultrasonik hız tayini		30	100x200	30
	Tek eksenli basınç dayanımı		30	100x200	30
	Nokta yükleme deneyi		15	25x55	30
	Böhme aşınma deneyi		7	70x70x70	36
	Schmidt çekici sertlik tayini		20		3
	Karbonatlaşma derinliği tayini		10		12
Geri kazanılmış agrega deneyleri	Elek analizi	3750			240
	Yoğunluk- su emme, nem ve porozite	50			15
	Metilen Mavisi deneyi	5			3
	Darbe dayanım deneyi	5			3
	Yassılık deneyi				
	Donma-Çözünme deneyi	25			30
	Alkali silika deneyi (Kimyasal yöntem)	5			15
	Alkali silika deneyi (Hızlı harç çubuğu yöntemi)	20	30	25x25x285	45
	Mikro deval Aşınma Deneyi	6			5
	Losangeles Deneyi	40			14
Püskürtme beton deneyleri	Ultrasonik hız tayini		192	105x200	300
	Tek eksenli basınç dayanımı deneyi		192	105x200	300
	Enerji yutma kapasitesi (tokluk) tayini		16	600x600x100	40
	Plaklarda ultrasonik P-dalga hızı ölçümü		16	600x600	28
	Plaklarda Donma-Çözünme Deneyi		16	100x100	90
	Plaklarda birim hacim kütle deneyi		16	100x100	28
	İnce Kesit Analizi		63		30
Yeraltı dolgu deneyleri	Tek Eksenli Basınç Dayanım Deneyi		126	15x15x15	300
	Ultrasonik Hızı Tayini		126	15x15x15	300

2.2. Materyal

Tez çalışması kapsamında 9 farklı lokasyondan alınan 5700 kg inşaat atığı, 1000 kg doğal agrega, 500 kg bağlayıcı, 250 kg uçucu kül, mermer tozu, 2 çeşit sentetik fiber, priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcı kimyasallar kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında temin edilen malzemeler Şekil 2.2' de diyagram şeklinde sunulmuştur. Kullanılan malzemeler başlıklar halinde detaylandırılmıştır.

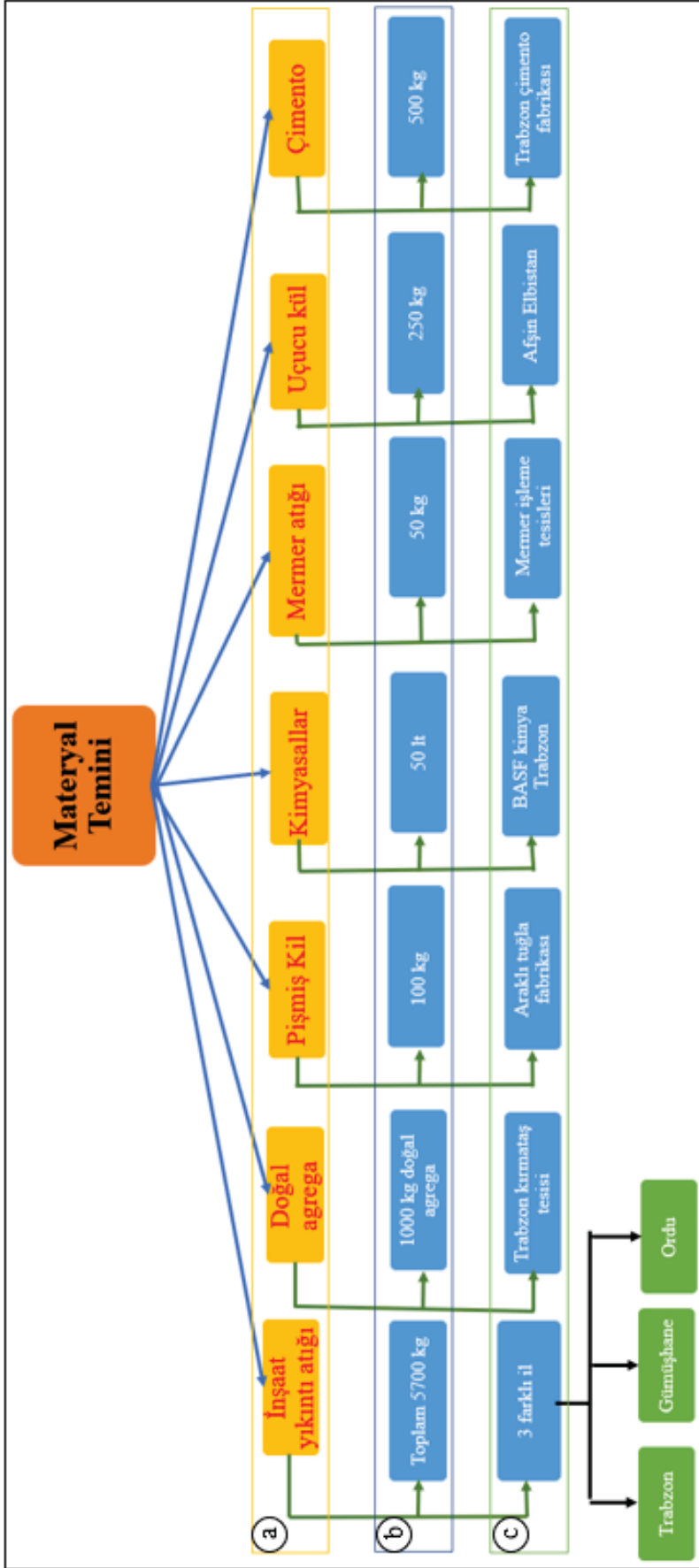
2.2.1. İnşaat Yıkıntı Atıkları

Tez kapsamında ekonomik ömrünü doldurmuş veya kentsel dönüşüm kapsamında yıkılan binalardan oluşan atıklar kullanılmıştır. Yıkılan bina artıklarından, yaklaşık olarak 5700 kg malzeme alınarak KTÜ Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarına getirilmiştir. Çalışmada kullanılacak malzeme miktarının fazla olması nedeni ile yıkıntı atıklarına kolayca ulaşılabilecek ve laboratuvara naklinin kolay olacağı Türkiye'nin kuzey doğusunda bulunan Ordu, Trabzon ve Gümüşhane illerinden temin edilmiştir (Şekil 2.1).

Alınan inşaat atıklarının bölgenin özelliklerini temsil etmesi açısından 3 farklı ilden ve her ilden 3 farklı noktadan numune alınmıştır. Alınan örnekler belli bir boyuta getirilerek çuvallara konulmuş ve araçlarla laboratuvara getirilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.1. İnşaat molozlarının temin edildiği noktalar



Şekil 2.2. Tez çalışması kapsamında kullanılan a) malzeme, b) miktarları ve c) temin yeri



Şekil 2.3. İnşaat atıklarının alınması a, b, c) Kentsel dönüşüm amaçlı binaların yıkılması ve moloz oluşumu, d, e, f) numunelerin laboratuvara getirilmesi g, h) boyut küçültme işlemine hazırlanması

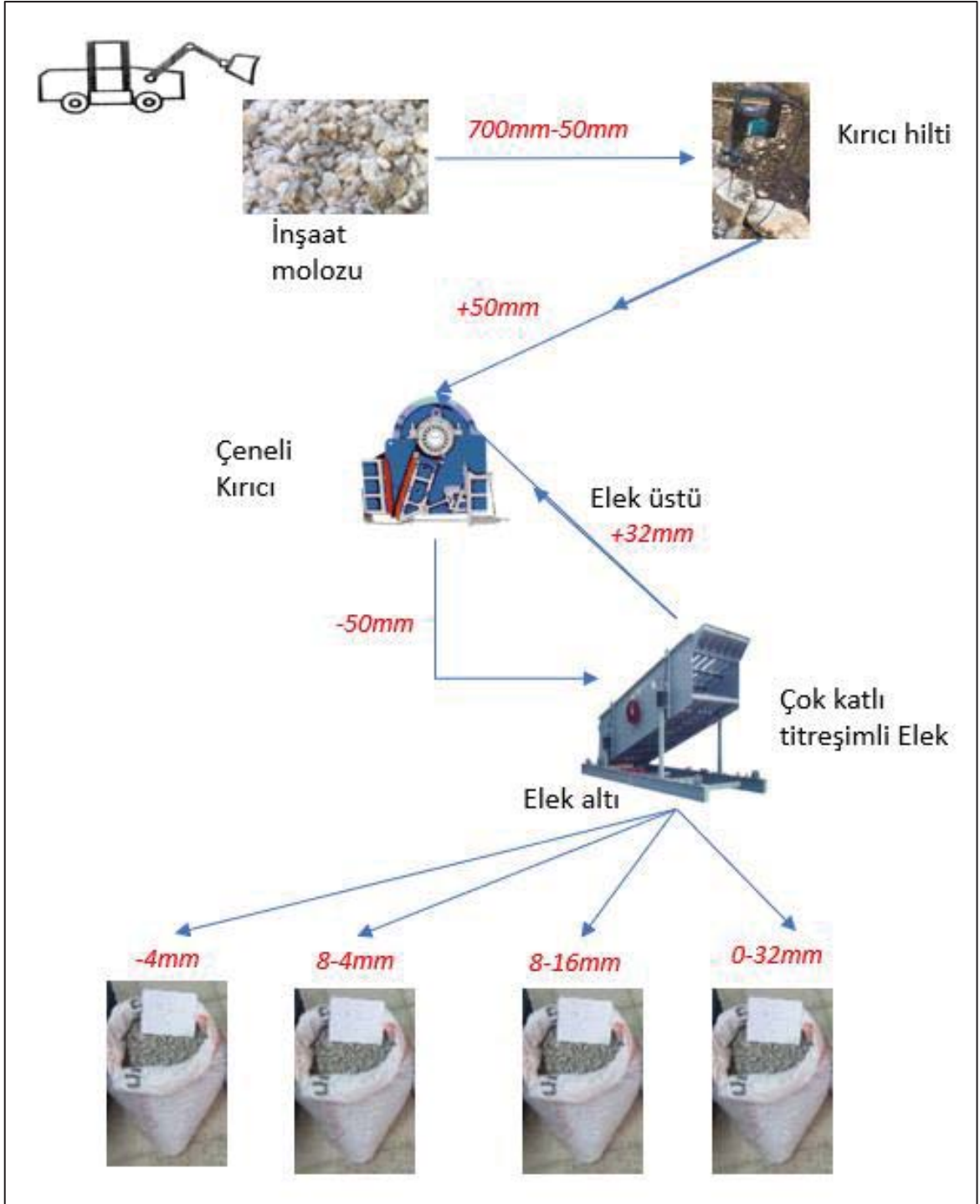
İnşaat ve yıkıntılardan elde edilen beton molozları bloklar halinde agrega deneylerinin yapılabileceği 63 mm- 0,063 mm boyutlarına getirilebilmesi için genellikle iki aşamalı kırma ve eleme işlemlerinden geçirmiştir. Genellikle birbirini izleyen seri halinde kırıcılar kullanılarak, çok iri parçalar geri beslenerek uygun kırıcıda tekrar kırılarak istenen tane sınıfına getirilmektedir. İlk kırma işlemi ile 50 mm'lik parçalar haline getirilen beton atıkları, ikinci kırma işlemi ile istenilen boyutuna indirgenir (Rao vd., 2007). Alınan inşaat atıklarında beton kalıntısının yanında tuğla molozu da mevcuttur. Tuğla molozlarının kırma devresinde çok hızlı ufalanacağı ve boyutu düşüreceği göz önüne alınmalıdır.

Çalışma kapsamında farklı yerlerden alınan blok halindeki inşaat molozları agrega deneyleri için boyut küçültme işlemine tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında uygulanan kırma eleme devresi Şekil 2.4'de verilmiştir. Boyutları küçültülerek agrega boyutuna getirilen geri kazanılmış agregalar (GKA) tane sınıfı belirlenebilmesi için TS 622 standartlarına göre katlı elek kullanılarak elek analizi yapılmıştır (Şekil 2.5).

Yapılan elek analizleri sonucunda tane boyut dağılımına göre 0-4 mm, 4-8 mm ve 0-31,5 mm olmak üzere 3 sınıf yapılmıştır. Yapılan sınıfların elek analiz değerleri Tablo 2.3' de verilmiştir. Beton dökümlerinde kullanılan agregaların TS 802 de belirtilen b eğrisine uygun şekilde alınarak oluşturulmuştur.

Tablo 2.3. Geri kazanılmış agregaların elek analiz değerleri

Elek göz açıklığı Di, mm	İnce Agrega 0-4 mm		Orta agrega, 4-8 mm		İri Agrega, 0-32 mm	
	Geçen (g)	%P	Geçen (g)	%P	Geçen (g)	%P
31.5	1000	100	1000	100	1000	100
16	1000	100	1000	100	865	86.5
8	1000	100	986	98.6	646	64.6
4	963	96	130	13	534	53.4
2	584	58	45	4.5	145	14.5
1	360	36	15	1.5	115	11.5
0.5	214	21	0	0	15	1.5
0.25	89	9	0	0	12	1.2



Şekil 2.4. Geri kazanılmış agrega için kırma eleme devresi



Şekil 2.5. GKA sınıflandırılması a) Laboratuvara getirilen beton molozların b) hilti ve çeneli kırıcı yardımı ile boyutlarının küçültülmesi, c, d, e) elenerek sınıflandırılması

2.2.2. Doğal Agreg

İnşaat ve madencilik sektöründe kullanılan doğal agrega yerine geri kazanılmış agrega kullanımını belirlemek için doğal agrega kullanılarak referans numuneler dökülmüştür.

Deneysel çalışmalarda GKA'nın yanında Trabzon Belediyesi'ni tarafından işletilen agrega kırma-eleme tesislerinden 0-4 mm ve 4-8 mm boyutlarında kırmataş agrega alınarak laboratuvara getirilmiştir (Şekil 2.6). Laboratuvara getirilen agrega deneylerinde kullanılacak olan agregalar, TS 706 EN 12620+A1 (2009) ve TS EN 932-2 (1999) agregalardan numune alma ve laboratuvar numunelerinin azaltılması ile deney numunesi hazırlama metotlarına göre hazırlanmıştır.



Şekil 2.6. Doğal agreganın kırma eleme tesisinden taşınması, a) Kamyonu yükleme, b, c, d) Paketleme ve uygun sınıf aralığına getirilme işlemi

2.2.3. Çimento

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak da Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM I 42.5 R (TS EN 197-1) sınıfı çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve basınç özellikleri katalog bilgisi olarak Tablo 2.4'de gösterilmiştir.

Tablo 2.4. CEM I 42.5 R kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Analizler		Fiziksel Testler	
Kimyasal Bileşen	Miktar, %	Fiziksel özellikler	Değer
SiO ₂	20.32	İncelik (45 µ elek üstü %)	8.58
Al ₂ O ₃	5.59	Özgül Kütle (g/cm ³)	3.05
Fe ₂ O ₃	3.09	Özgül yüzey (cm ² /g)	3172
CaO	62.50	Priz başlangıcı (saat-dak)	01sa-58dak
MgO	1.74	Priz sonu (saat-dak)	02sa-57dak
SO ₃	3.29	Hacim genleşmesi (mm)	2
Kızdırma Kaybı	1.18	Su ihtiyacı (%)	29.9
Na ₂ O	0.34	Mekanik Özellikler	
K ₂ O	0.91	Basınç Dayanımı (MPa)	
Ölçülemeyen	0.31	2. gün	30.8
S. CaO	0.93	7. gün	39,5
Katkı %	-	28.gün	56.1

2.2.4. Puzolanlar (Uçucu Kül, Pişmiş Kil)

Bu çalışma kapsamında puzolan katkısı olarak Afşin Elbistan Termik santralinden elde edilen uçucu kül ve Trabzon ili Araklı ilçesinde faaliyet gösteren tuğla fabrikasından temin edilen pişmiş kil kullanılmıştır.

2.2.4.1. Uçucu Kül

Termik santralde ısı kaynağı olarak kullanılan kömür yakıldıktan sonra bacalardan bulunan filtrelerde tutulan çok ince malzemeye uçucu kül denmektedir.

Çalışmada kullanılan uçucu küller Kahramanmaraş ilinde bulunan Afşin-Elbistan termik santralinden temin edilerek çuvallanarak laboratuvara getirilmiştir (Şekil 2.7).



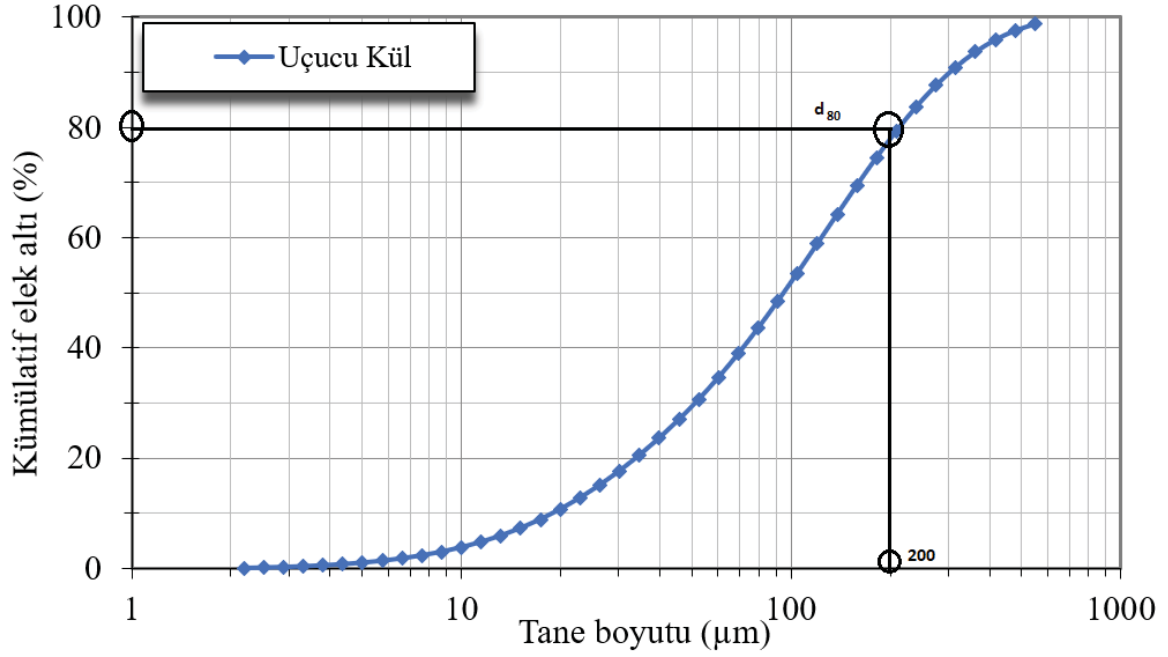
Şekil 2.7. Uçucu kül, a, b, c) Uçucu külün laboratuvarda depolanması, d) bilyeli ve çubuklu değirmen yardımı ile uygun boyuta getirilmesi

Uçucu küllerin boyut analizi ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Afşin-Elbistan uçucu külünün kimyasal özellikleri Tablo 2.5’de verilmiştir. Kül sınıflamasında, ASTM C618’de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının min. %50 olması istenmektedir, fakat Afşin-Elbistan uçucu külü verilen %50’nin altında kalmıştır. Yazıcı, (2004) külleri CaO miktarına göre de bir sınıflandırma yapmıştır, bu sınıflandırmaya göre $\text{CaO} > \%14$ olan küllere çok aktif küller olarak sınıflamıştır. Tez çalışmasında kullanılan Afşin-Elbistan külleri “Çok Aktif Küller” sınıfına girmektedir (Tablo 2.5).

Tablo 2.5. Tez çalışması kapsamında kullanılan Afşin-Elbistan C- sınıfı uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Analizler		Fiziksel Testler	
Kimyasal bileşen	Miktar, %	Fiziksel özellikler	Değer
Toplam SiO_2	23.08	45 m elek üzeri (%)	4
Al_2O_3	6.25	Özgül kütle (g/cm^3)	2.44
Fe_2O_3	2.58	Özgül yüzey (cm^2/g)	2496
CaO	47.03	28 günlük puzolanik aktivite ,MPa	15.8
MgO	1.6		
SO_3	14.61		
K_2O	0.47		
Na_2O	0.32		
Kızdırma kaybı	3.95		
Cl	0.0334		

Kullanılacak uçucu külün tane boyut analizi yapılmıştır Şekil 2.8’ da verilen tane boyut eğrisine bakıldığında d_{80} 200 μm olarak okunmaktadır. Uçucu külün özgül ağırlığı $2.44 \text{ g}/\text{cm}^3$, Blaine özgül yüzey alanı $2496 \text{ cm}^2/\text{g}$ dır. TS EN 206 standartlarında belirtilen sınıflamaya göre Afşin-Elbistan uçucu külü “C” sınıfı küller sınıfına girmektedir.



Şekil 2.8. Afşin-Elbistan uçucu külün tane boyut dağılımı

2.2.4.2. Pişmiş Kil

Çalışmada geri kazanılmış agrega üzerinde etkisini ve alkali silika reaksiyonunu önlemek için pişmiş kil kullanılmıştır. Pişmiş kil Trabzon araklı ilçesinde bulunan tuğla fabrikasından temin edilmiştir. Fabrikadan alınan tuğlalar ilk olarak laboratuvarında çekiçle kırılarak merdaneli kırıcıdan (-4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyeli değirmende 90 dakika kuru öğütmeye tabi tutularak inceliği minimum $2680 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'ye getirilmiştir (Şekil 2.9).

Öğütme işleminden sonra TS EN 196-2 ve TS EN 196-6' ya göre malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Öğütülmüş kilin tane boyut dağılımı d_{80} 180 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 2.10).

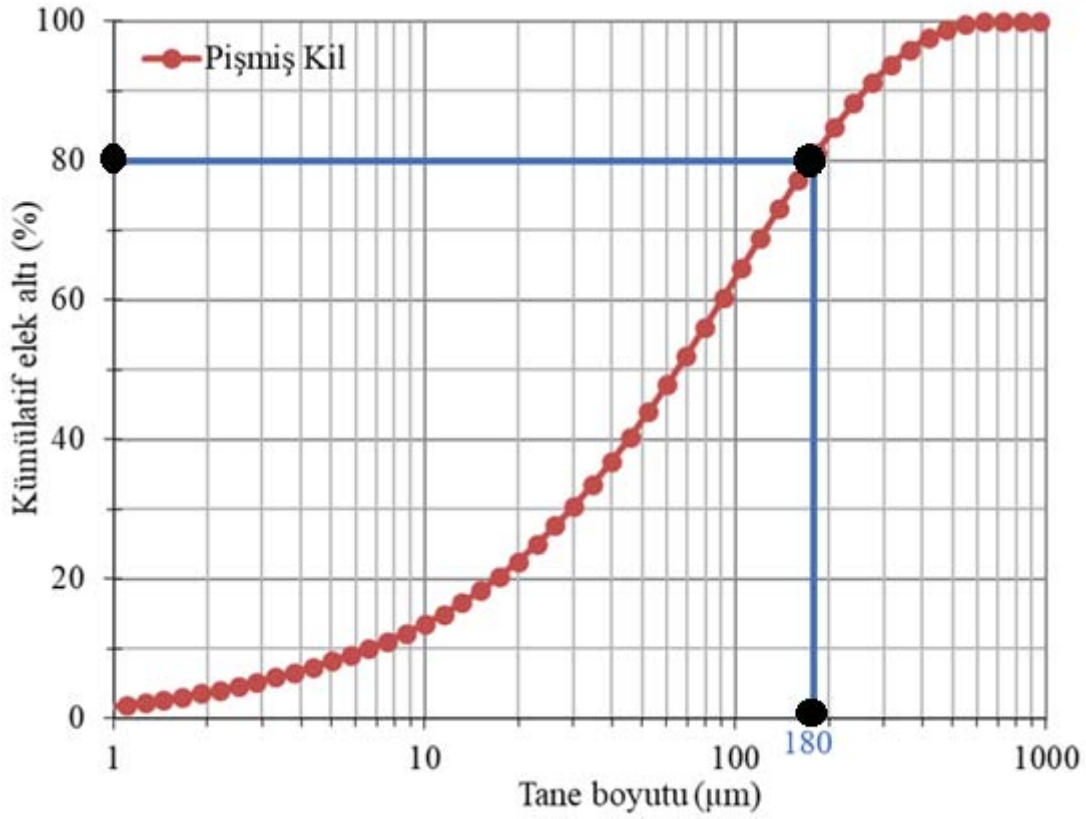
Pişmiş kilin kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri Şekil 2.6'de verilmiştir.



Şekil 2.9. Pişmiş kilin öğütülmesi a) bilyeli ve b) çubuklu değirmen kullanarak pişmiş kil numunesinin c) uygun boyuta getirilmesi

Tablo 2.6. Pişmiş kilin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri

Kimyasal Analizler		Fiziksel Testler	
Kimyasal bileşim	Miktar, %	Fiziksel özellikler	Değer
SiO ₂	69,01	Özgül kütle	2,68
Al ₂ O ₃	14,66	Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	5670
Fe ₂ O ₃	4,60	Öğütme süresi (dak)	15
MgO	1,60	7 günlük puzolanik aktivite (MPa)	9,3
CaO	3,11	Kalsinasyon derecesi (°C)	700-800
Na ₂ O	1,94	Reaktif SiO ₂ (%)	17,75
K ₂ O	2,34	Camsı faz içeriği (%)	55,15
TiO ₂	0,54		
P ₂ O ₅	0,11		
		Mineralojik bileşim	
MnO	0,07	Kuvars	Albit
Cr ₂ O ₃	0,007	Anortit	Hematit
		İllit	
Kızdırma kaybı (LOI)	1,8		



Şekil 2.10. Pişmiş kilin tane boyut dağılımı

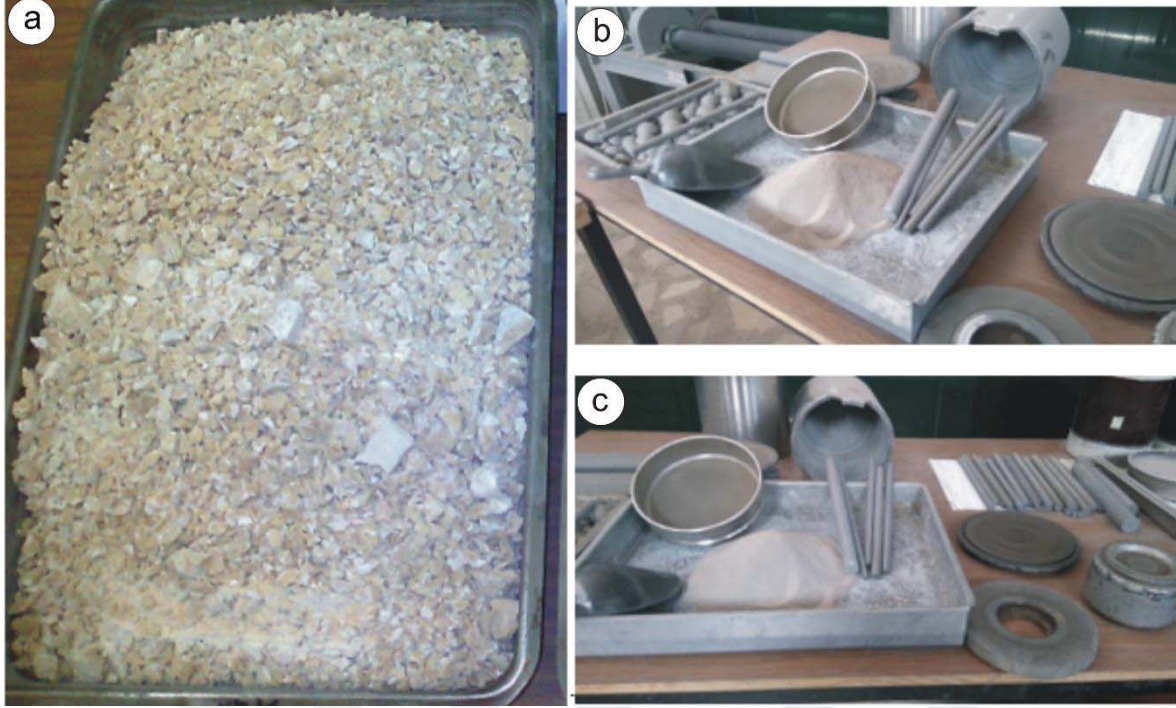
2.2.5. Mermer Tozu

Tez kapsamında geri kazanılmış agrega (GKA)'da oluşabilecek alkali silika reaksiyonu etkisini incelemek için Gümüşhane ilinden temin edilen mermer atığı kullanılmıştır (Şekil 2.11). Mermer atıkları hacimce %15 ve %30 oranlarında kullanılmıştır. Mermer işleme fabrikalarından alınan mermer atıkları ilk önce el ile boyut küçültme işlemi yapılmış, ardından merdaneli kırıcıdan (-4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyalı değirmende 60 dakika kuru öğütmeye tabi tutularak inceliği minimum 3000 cm²/g'ye getirilmiştir.

Öğütme işleminden sonra TS EN 196-2 ve TS EN 196-6' ya göre malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir (Tablo 2.7).

Tablo 2.7'de verilen analiz sonuçlarına göre Gümüşhane mermer atıklarının kalsiyum oksit (CaO) içeriğinin (%55,12) olduğu görülmüştür. Literatür çalışmalarında kullanılan mermerin CaO oranlarına bakıldığında benzer sonuçlar görülmektedir (Kavas, 2007, Ergün, 2011). Bu da çalışmada kullanılan mermerin CaO içeriği olarak uygunluğunu

göstermektedir. Bunun yanında dayanıma olumsuz etki yapan demir oksit (Fe_2O_3) değeri de literatür çalışmalarına göre çok düşük seviyededir.



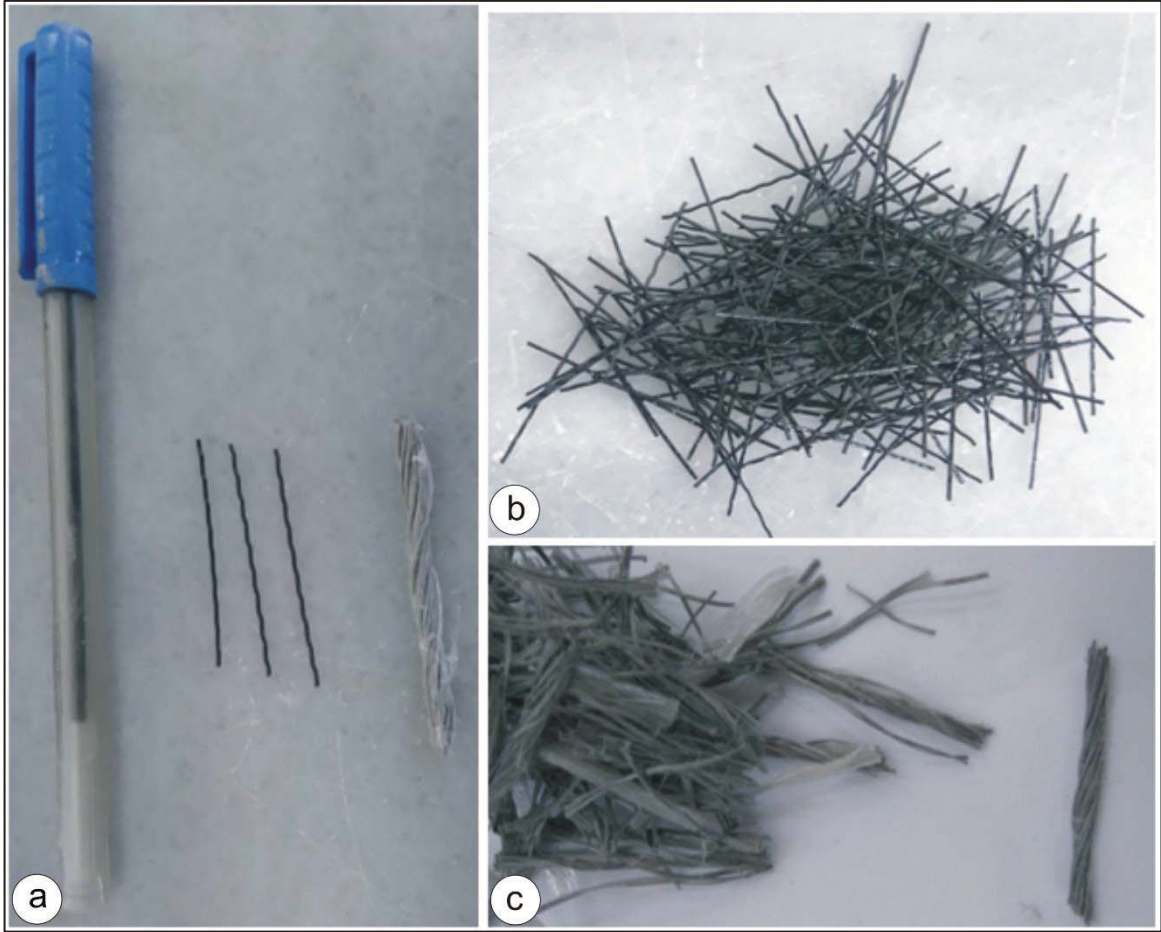
Şekil 2.11. Mermer atıkları, a) tez çalışmasında kullanılan mermer atığı, b, c) bilyeli ve çubuklu değirmen ile uygun boyuta getirilmesi

Tablo 2.7. Mermer atıklarının kimyasal, fiziksel ve mineralojik bileşimi

Kimyasal Analizler		Fiziksel Testler	
Kimyasal bileşim	Miktar, %	Fiziksel özellikler	Değer
SiO_2	1,16	Özgül kütle	2,72
Al_2O_3	0,53	Özgül yüzey alanı (cm^2/g)	3190
Fe_2O_3	0,10	Öğütme süresi (dak)	60
MgO	0,21	Metilen mavisi (g boya/kg)	0,17
CaO	55,12	Toplam organik karbon (%)	0,098
Na_2O	<0,01	7 günlük puzolanik aktivite (MPa)	0
K_2O	0,11		
TiO_2	0,01	Mineralojik bileşim	
P_2O_5	<0,01	Kalsit	
MnO	<0,01	-	
Cr_2O_3	0,007	-	
Kızdırma kaybı	42,7	-	

2.2.6. Sentetik Fiberler

Madencilik sektöründe yeraltı işletmelerinde betonun enerji yutma kapasitesini yükselttiği için püskürtme betonda lif kullanımı çok yaygındır. Bu çalışmada iki farklı yapıya sahip sentetik lif kullanılmıştır (Şekil 2.12). Çalışmada kullanılan Forta-Ferro (FF), Meyco F1b SP 540 (MF), lifleri farklı firmalardan temin edilmiştir.



Şekil 2.12. Dökümlerde kullanılan sentetik lifler (a), b) Meyco F1b SP 540), c) Forta-Ferro

Çalışmada kullanılan sentetik liflerin firma isimleri ve teknik özellikleri Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.8. Tez kapsamında kullanılan fiberlerin teknik özellikleri

Lif cinsi (marka)	Forta-ferro	Meyco fib sp 540
Hammadde	%100 saf kopolimer pp/pe	Polipropilen
Şekil	Sarmal	Dalgalı
Uzunluk	54 mm	54 mm
Çekme gerilmesi	550- 750 MPa	560-900 MPa
Elastisite modülü	5,75 GPa	-
Yüzey dokusu	Deforme edilmiş yüzey	-
Fiber sayısı	220.000 parça / kg	-
Yoğunluk	0,91 g/cm ³	0,92 g/cm ³
Erime noktası	162-168 °C	150- 170 °C
Yanma noktası	398 °C	-
Su emilimi	Sıfır	Sıfır
Asit / alkali direnci	Mükemmel	Mükemmel
Renk	Beyaz	Siyah

2.2.7. Kullanılan Kimyasallar (Priz Hızlandırıcı, Akışkanlaştırıcı)

Geri kazanılmış agreganın püskürtme betonda doğal agrega yerine kullanılabilirliğini ölçmek amacı ile yapılan silindir ve plak dökümlerinde priz süresini hızlandırmak ve karışımın kıvamını ayarlamak için bütün karışımlarda toplam çimento ağırlığının %8'i oranında priz hızlandırıcı, %1 oranında da kıvam artırıcı kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılan bütün kimyasal katkıları, BASF Yapı Kimyasalları San. A.Ş.'den temin edilmiş olup Tablo 2.9'de teknik özellikleri verilen kimyasallar kullanılmıştır (Tablo 2.9).

Tablo 2.9. Kimyasal katkı maddelerinin teknik özellikleri

Kimyasal cinsi (marka)	MasterGlenium TC 1500	MasterRoc SA 160
İşlevi	Akışkanlaştırıcı	Priz hızlandırıcı
Şekil	Viskoz sıvı	Süspansiyon
Renk	Koyu Kahverengi	Bej
Yoğunluk (+20 °C)	1.084 kg/lt	1.44 g/ml
pH değeri	4	2.5
Klor Miktarı (%)	<0.01	<1
Alkali Miktarı (%)	<3	-
Türü	Hiperakınlaştırıcı	Yüksek performanslı
İçerik (Köken)	Polikarboksilik eter	Alkali içermez

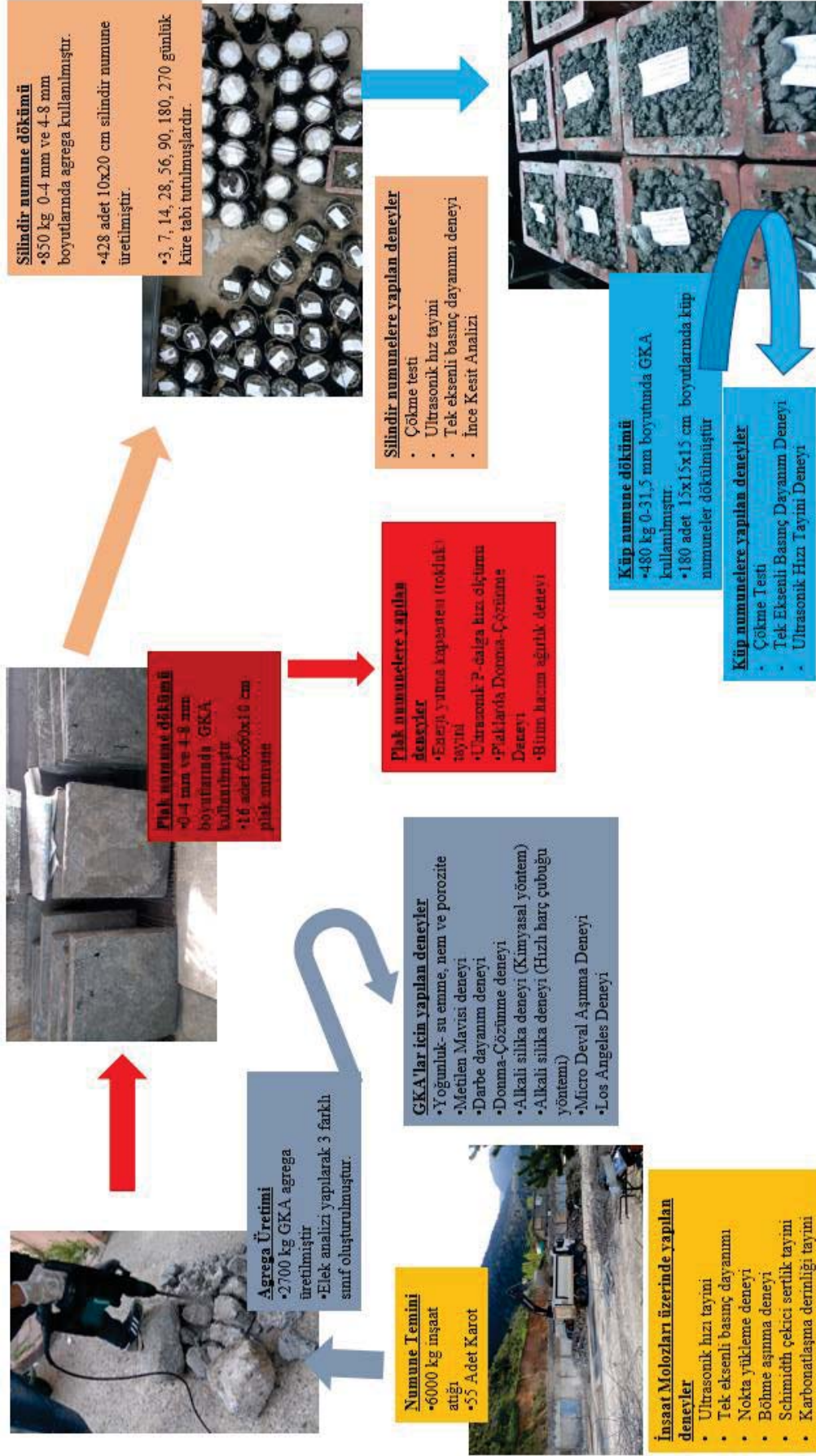
2.3. Metod

Yapılan çalışma 4 ana aşamadan oluşmaktadır. Çalışmada kentsel dönüşüm kapsamında yıkılan bina molozlarının değerlendirilmesi, agrega olarak kullanılabilirliği ve madencilik açısından faydalı hale getirmek için bir dizi deneyler yapılmıştır. Öncelikli

olarak inşaat atıklarının agrega olarak kullanılabilirliği incelenmiştir, sonrasında madencilikte püskürtme beton ve yeraltında dolgu amaçlı kullanımı incelenmiştir. Deney sırası şematik olarak Şekil 2.13’de verilmiştir.

Birinci aşamada kentsel dönüşüm yapılan bölgelerden inşaat atıklarının donatısız kısmından alınan blok betonlar laboratuvara getirilmiştir. Bu betonlardan karot alınarak Schmidt çekici deneyi, karbonatlaşma, ultrasonik sismik hız, tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükleme deneyi yapılmıştır.

İkinci aşamada, laboratuvara blok halinde getirilen beton atıklar kırılarak agrega boyutuna getirilmiştir. Geri kazanılmış agrega (GKA) üretildikten sonra GKA’lar üzerinde yoğunluk, nem ve porozite deneyleri, darbe dayanım deneyi, yassılık indeksi deneyi, donma-çözünme deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu ve kimyasal yöntem olmak üzere iki alkali silika deneyi, Mikro deval aşınma deneyi, Los Angeles deneyleri yapılarak ikinci kısım tamamlanmıştır.



Şekil 2.13. Yapılan çalışmanın akış şeması

Üçüncü aşamada 0-4mm, 4-8mm boyutlarındaki GKA'ların püskürtme betonda kullanımını incelemek için 10x20 cm silindir numuneler ve 60x60x10 cm boyutlarında plaklar hazırlanmıştır. Hazırlanan taze beton numuneleri üzerinde çökme testleri yapılmıştır. Dökülen silindir numuneler kür havuzunda 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 270 günlük kür süresi sonunda tek eksenli basınç dayanımı, ultrasonik hız tayini deneyleri yapılmıştır. Plak numuneler ise 28 gün sonunda enerji yutma kapasiteleri, ultrasonik hız tayini deneyleri yapılmıştır. Kırılan plaklardan 10x20 cm silindir karotlar alınarak birim hacim kütle, donma çözünme deneyleri yapılmıştır.

Dördüncü aşamada iri GKA'ların (0-31,5 mm) yeraltında maden alımından sonra oluşan boşluklara koyulabileceği incelenmiştir. Bu kapsamda iri GKA ile 15x15x15 cm boyutunda küp numuneler dökülerek 7-14-28-56-180-270 günlük kür süresi sonunda tek eksenli basınç dayanım deneyleri, UPV ve çökme deneyleri yapılmıştır.

Yapılan deneyler ve kullanılan bütün malzeme miktarları, tez süresince döküm sayıları ve alınan karot sayıları Tablo 2.10' da verilmiştir.

Tablo 2.10. Tez kapsamında kullanılan bütün malzeme, döküm ve örnek sayıları

	Ön hazırlık deneyleri	Geri Kazanılmış Agrega Deneyleri	Püskürtme Beton Deneyleri	Yeraltı Dolgu Deneyleri	Genel Toplam
Toplam karot sayısı, adet	55	-	48	-	103
Kullanılan toplam GKA miktarı, kg	-	100	1750	480	2.330
Kullanılan toplam çimento miktarı, kg	-	-	460	50	510
Kullanılan toplam doğal agrega, kg	-	-	650	100	750
Toplam döküm sayısı, adet	-	-	428	180	608

2.3.1. Bina Molozlarından Örnek Alınması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Bu tez kapsamında 3 farklı il ve bu illerin 3 farklı noktasından inşaat molozu alınmıştır. İnşaat molozları içerisinde özenle seçilen yaklaşık 60x60x40 cm ebatlarında düzensiz beton kütleleri laboratuvara getirilmiştir (Şekil 2.14). Alınan inşaat molozları üzerinde Schmidt çekici deneyi, karbonatlaşma ve karot alınarak ultrasonik sismik hız, tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükleme deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler aşağıda başlıklar halinde ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 2.14. Bina molozları, b) bina molozlarından örnek alımı, c, d) laboratuvara getirilmesi

2.3.1.1. Karot Örneklerinin Hazırlanması

Tez çalışması kapsamında sahadan alınan beton blok numuneler TS EN 12504-1'e uygun şekilde boy çap oranı 1/2 olacak şekilde 30 tane 10x20 cm boyutlarında karot alınmıştır (Şekil 2.15).

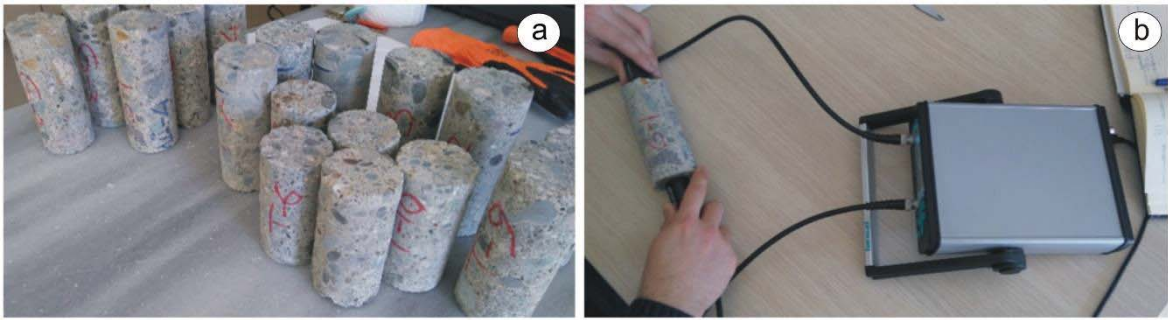


Şekil 2.15. Atık betonlar, a, b, c, d) Beton molozlarından karot alınması, e, f, g) alınan karotların sandıklanması ve h, i, j, k) boy çap oranı ayarlanarak kesilmesi

2.3.1.2. Ultrasonik Sismik Hız Tayini

Ultrasonik sismik hız testi (UPV); hasarsız, güvenilir, ucuz ve kolay uygulanabilen bir metot olmasından dolayı birçok sektöründe malzemelerin jeoteknik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden birisidir.

Araziden temin edilen blok beton kütlelerden alınan karotlar ASTM C 597 (2016) standartlarına uygun olarak 0,1 μ s hassasiyette sinyal süresine ve 24-500 kHz sinyal frekansına sahip Pundit Lab+ model test cihazı ile P dalga hızı ölçümleri (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. (a) İnşaat molozlarında alınan karotlar (b) üzerinde yapılan UPV ölçümleri

2.3.1.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini

Tek eksenli basınç dayanım deneyleri araziden alınan moloz bloklarından TS EN 12504 standartlarına göre karot numuneler üzerine uygulanmıştır. Döküm sahasından blok şeklindeki inşaat molozlarından 110 mm boyunda 52 mm çapında karotlar alınmıştır. Alınan karotların uçları düzeltilerek tek eksenli basınç dayanım testleri yapılmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. İnşaat moloz karotlarının a) tek eksenli basınç dayanım deneyi ve b, c) kırılma şekilleri

2.3.1.4. Nokta Yükleme Deneyi

Nokta yükleme, deneyi, iki konik, uç arasına yerleştirilen kayaç örneğinin kırılması esasına dayanmaktadır ve karot örnekler (çapsal ve aksenal deneyler için), kesilmiş blok örnekler veya düzensiz boyutlu örnekler kullanılabilir. Boyutları ölçülen ve konik uçlar arasına yerleştirilen kayaç örneği belirli, bir süre içerisinde kırılır ve yenilme yükü, yük göstergesinden, okunur ve uygun hesaplama yöntemi kullanılarak hesaplanır.

Bu tez kapsamında sahadan getirilen örnekler boy çap oranı 1/2 olacak şekilde düzelterek aksenal ve çapsal deneyler yapılmıştır (Şekil 2.18). 15 numune üzerinden gerçekleştirilen nokta yükleme deneylerin ölçülen yenilme yükü ISRM (1985)'in önerdiği deney formülü kullanılmıştır.

$$I_{s(50)} = F \times I_s$$

$$F = (D_e / 50)^{0.45}$$

Burada;

$I_{s(50)}$ = Düzeltmiş nokta yük dayanımı, MPa

F = Düzeltme faktörü,

I_s = Düzeltilmemiş nokta yük dayanımı,

D_e = Eşdeğer çaptır, mm



Şekil 2.18. İnşaat atıklarına uygulanan, a) aksenal nokta yükleme deneyi

2.3.1.5. Schmidt Çekici Deneyi

Schmidt çekici ölçümlerinin değişik standartları mevcuttur; bu çalışma da ASTM C 805, (2013) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde numune üzerine Schmidt çekici ile on farklı noktaya tek vuruş yapıp, bu vuruşların ortalaması alınarak ortalamanın 7 birim altındaki ve üstündeki değerler iptal edilir ve geriye kalanların ortalaması Schmidt sertlik değeri olarak alınır.

Bu tez kapsamında inşaat molozlarından alınan malzeme karakterizasyonunu yapmak ve sertlik sınıfını belirlemek için arazide ve laboratuvara getirilen örnekler üzerinde Schmidt çekici ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. a, b) Schmidt çekici sertlik ölçümleri

2.3.1.6. Böhme Aşınma Deneyi

Aşınma direnci taşların sertlik değerine bağlı olarak değişkenlik gösteren bir özelliktir. Kayaç yüzeyinin aşınma miktarı; mekanik deney yöntemleri ile belirli boyutlardaki kayaç numunelerinin yüzeyinin aşındırılması ve bu süreçteki aşınma miktarının kütlece hesaplanması sonucu belirlenir. Yapılarda kullanılacak agregaların dış etmenlere maruz kalması kaçınılmaz olduğundan, agregalar için aşınma değeri oldukça önemlidir.

İnşaat yıkıntılarında alınan blok halindeki betonlar kesilerek 7 adet 70x70x70mm boyutlarında küp numune oluşturulmuş ve bunlar üzerinde böhme aşınma deneyi yapılmıştır.

TS 2824 EN 1338 standartlarına göre numune kenar uzunluğu (71 ± 1.5) mm olan kare plâka veya küpler kullanılır. Numunenin temas eden ve ona karşı gelen yüzü paralel ve düz olmalıdır. Öncelikle numuneler hassas terazi ile tartılır. Daha sonra deney eksenine 20 g zımpara tozu konulur. Temas yüzü sürtünme şeridine (deney izi) gelecek şekilde numune tutucusuna yerleştirilen numune eksensel olarak (294 ± 3) N yük ile yüklenir. Disk, sürtünme şeridi üzerindeki aşındırıcının, numunenin genişliğinin belirlediği alan üzerine eşit olarak dağılı kalmasına özen gösterilerek hareket ettirilir. 22 devirden sonra disk otomatik olarak durur. Numuneye, her biri 22 dönüşten meydana gelen 16 çevrim uygulanır. Her çevrimden sonra disk ve temas yüzü üzerindeki zımpara tozu temizlenir ve yeniden 20 g zımpara tozu deney şeridine serpilir. Numune düşey eksen etrafında 90° çevrilir ve aynı işlem tekrar yapılır. Daha sonra numunenin üzerindeki tozlar iyice temizlendikten sonra numunenin boyutları 0.01 mm hassasiyetle olan kumpas ile ölçülür ve numune hassas terazide tartılır (Şekil 2.15). Böhme aşınma değerleri aşağıda verilen formülle hesaplanır (TS 2824 EN 1338, 2005).

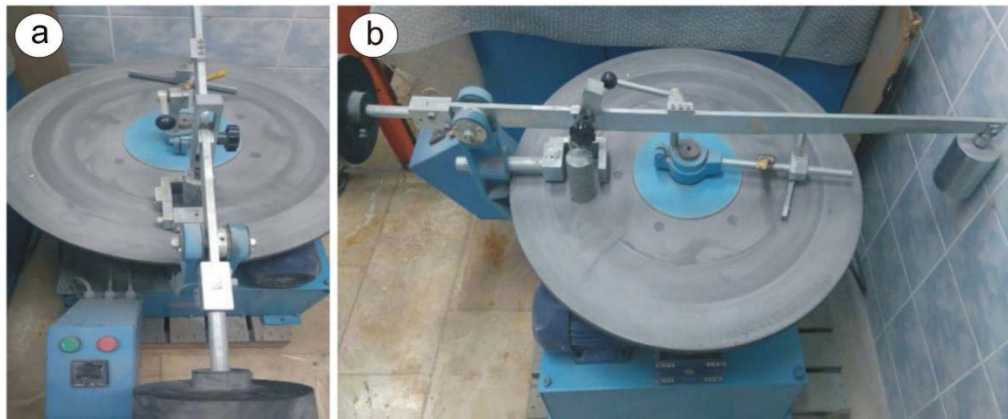
$$\Delta V = \frac{\Delta m}{P}$$

Burada:

ΔV = Toplam hacim kaybı, $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$

Δm = Toplam kütle kaybı, $\text{g}/50 \text{ cm}^2$

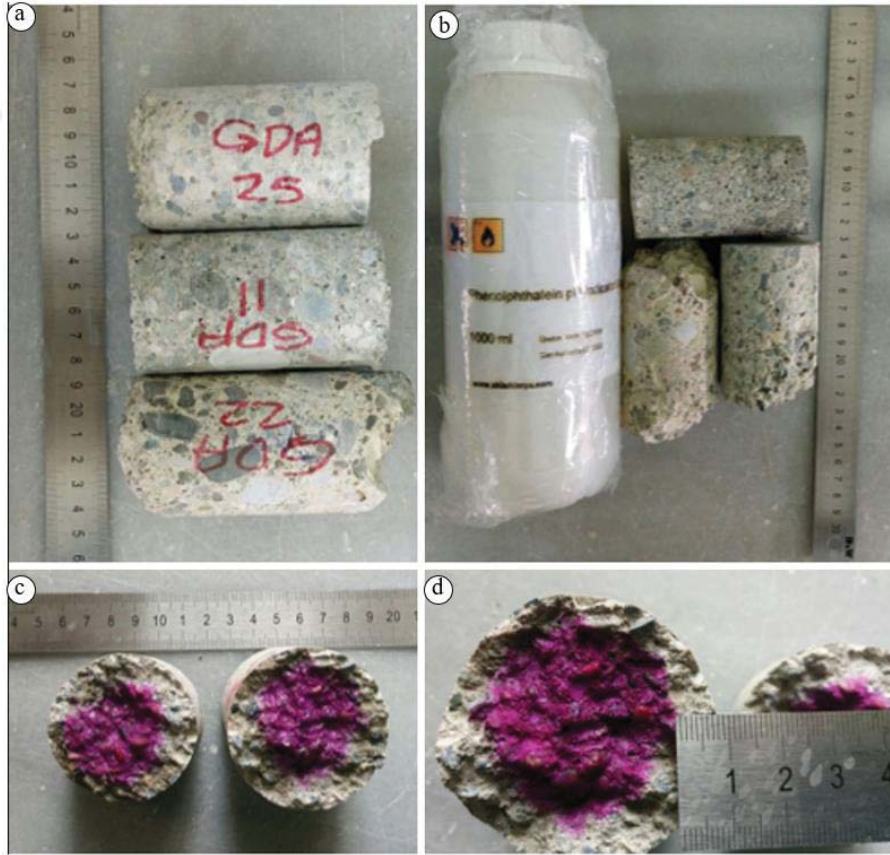
P = Numune yoğunluğu, g/cm^3



Şekil 2.20. Böhme aşınma deneyi, a, b) deney düzeneği

2.3.1.7. Karbonatlaşma Derinliğinin Tayini

Betonlar hava ile etkileşim içerisinde oldukları süre boyunca yüzeylerinde karbondioksit ile tepkime olur ve betonun dış yüzeyini sert bir tabaka kaplar bu tabaka oluşumuna karbonatlaşma denir. İnşaat molozlarından alınan betonlarda karbonatlaşma derinliği agreganın fiziksel özelliklerini ve dolayısı ile betonun özelliklerini belirlemesi açısından önemlidir. Fenolftalein indikatörü püskürtülen yüzeyde renk değişimi olması karbonatlaşma olmadığı anlamına gelir, eğer şeffaf renkte ise karbonatlaşma var demektir. Bu açıdan bina molozlarından alınan karot numuneleri yarma yöntemiyle 2'ye bölünmüş ve üzerlerine fenolftalein indikatörü püskürtülmüştür, açık hava ile temas eden karot başlarında karbonatlaşma görülmüştür. Karbonatlaşan kısımlardan en az 10 adet ölçüm alınmış ve ortalama karbonatlaşma derinliği belirlenmiştir. Karbonatlaşma derinliği ölçülen beton örnek Şekil 2.21'de görülmektedir.



Şekil 2.21. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi, a) inşaat moloz karotlarının ve b) fenolftalein hazırlanması, c, d) karbonatlaşma derinlik ölçülmesi

2.3.2. Geri Kazanılmış Agrega Deneyleri

Bina molozlarından elde edilen atık betonların geri kazanılmış agrega (GKA) olarak kullanılabilirliğini incelemek için yapılan deneyler aşağıda başlıklar halinde irdelenmiştir.

2.3.2.1. Agrega Örneklerinin Hazırlanması

Bu tez kapsamında Karadeniz Bölgesinde ki farklı illerden alınan inşaat atıklarının agrega olarak kullanılabilirliğinin tespiti için TS 706 EN 12620+A1 da bulunan agrega deneyleri yapılmıştır.

Agrega deneylerinin yapılabilmesi için laboratuvara getirilen molozlar elektrikli hilti ve çeneli kırıcı yardımı ile kırılarak gerekli boyuta indirilmiştir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. İnşaat molozlarının sınıflanması a). molozların boyut küçültme ve b) eleme işlemi

2.3.2.2. Yoğunluk- Su Emme, Nem ve Porozite Deneyleri

Farklı kaynaklardan elde edilen geri kazanılmış agregaların yoğunlukları farklıdır. Tablo 2.11’de verilen örnek çalışmalarda inşaatı oluşturan bileşenlerin (Agrega, su ve çimento) farklılığından dolayı birçok araştırmacı farklı sonuçlar elde etmiştir.

Farklı atık kaynaklarından elde edilen beton atıklarının yoğunlukları birbirinden farklı olduğu ve geri kazanılmış agregaların yoğunluklarının, doğal agregalardan daha düşük olduğu görülmektedir.

Çalışmada farklı illerden bloklar halinde alınan inşaat molozları belli bir boyuta kadar küçültülerek TS EN 1097-6 (2013) standartlarına uygun bir şekilde tel sepet (Arşimet terazisi) metodu ile yoğunluk ve su emme oranı tespit edilmiştir (Şekil 2.23).

Kayaçların ve betonların dayanımlarını ve kullanım alanlarını etkileyen önemli fiziksel özelliklerden biride porozitedir. Beton gözenekliliği kalitesi porozite terimi ile tanımlanır. Beton içindeki boşluklar gözle görülemeyecek kadar küçük olabilmektedir ve büyük bir kısmı birbirine bağlı ve bu gözenekler hava ile de irtibatlıdır. Beton içindeki gözenek ya da boşlukların varlığı, betonun mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler.

Tablo 2.11. Geri kazanılmış agreganın literatür yoğunlukları ve su emme oranları

Çalışmayı yapan	Agreganın temin edildiği yer	GKA'nın görünür yoğunluğu (g/cm ³)	GKA'nın kütlece su emme değeri (%)
Topçu (1997)	Beton kalıntılarından elde edilen agregalar	2,45	
Poon (1997)	Beton kalıntılarından elde edilen agregalar	2,1-2,3	
Poon vd. (2006)	Beton kalıntılarından elde edilen agregalar	2,41	3.17 -10,3
Öztürk, (2003)	Kargır kalıntılarından elde edilen agregalar	0,85-1,4	
Akıllıoğlu vd., (1996)	Geri kaz. Agregası ve min. %80 doğal agrega karışımı	2,40	
Rakshvir vd., (2006)	Beton kalıntılarından elde edilen agregalar		1,63 -1,65

Beton içerisinde dayanımı artırıcı C-S-H jel oluşumudur bu jelin içinde veya etrafında oluşan kapiler boşluklar jel oluşumunu dolayısı ile betonun ve betondan üretilen agreganın mekanik özelliklerini etkileyecektir. Porozitedeki artış sonucunda suda bulunan klor iyonları gibi ve zararlı iyonların beton içerisine penetrasyonu artar ve sonunda malzemenin zamanla mekanik özelliklerinde azalma meydana gelir (Tekin 2011).

Dolayısı ile porozitedeki artış GKA'nın fiziksel özelliklerini de etkileyeceği için alınan numuneler üzerinde TS EN 1097-6 'ya göre porozite deneyi yapılarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$p = \frac{P_1 - P_0}{P_0} \times \delta$$

Bu formülde,

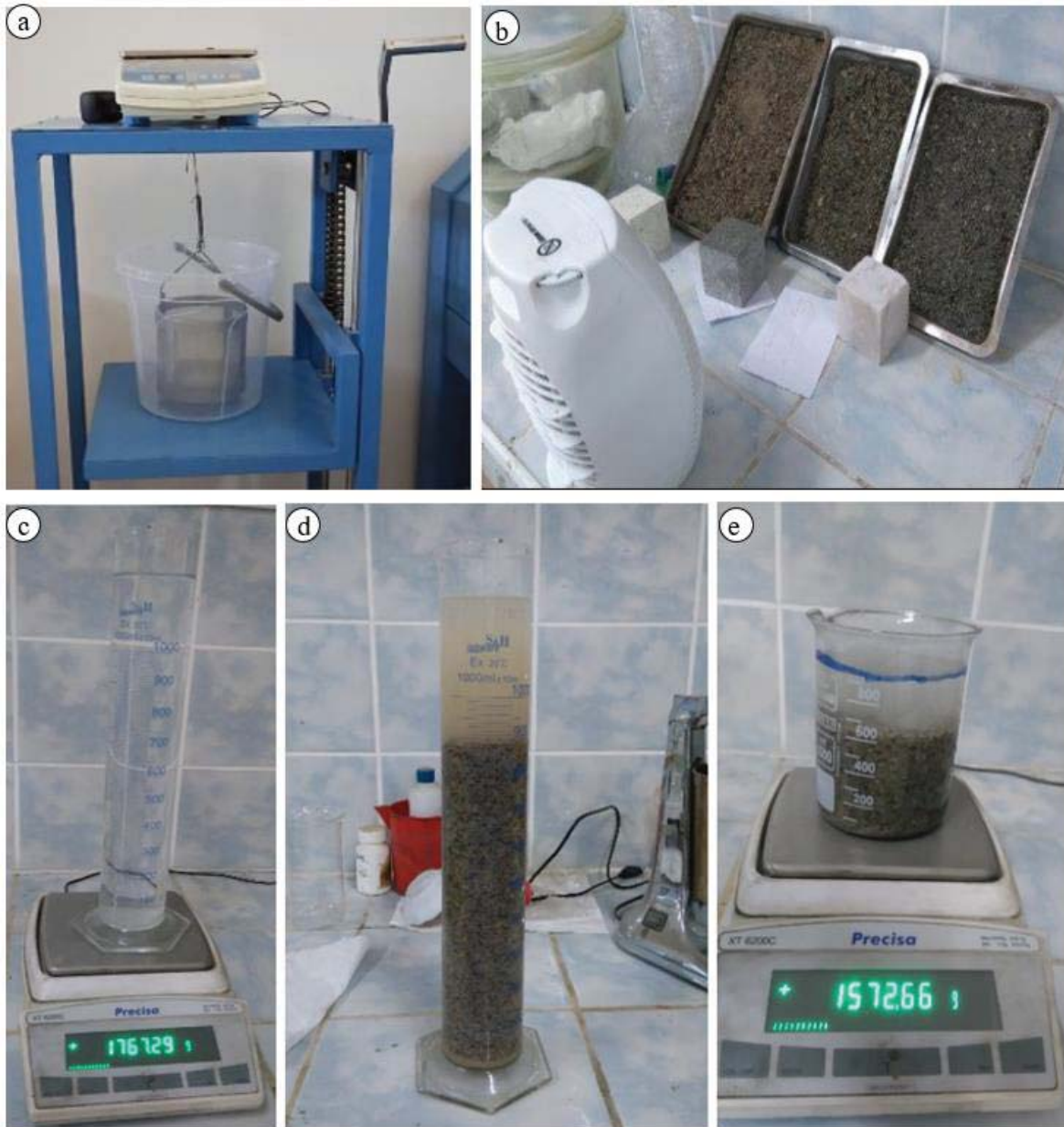
P = GKA'nın porozitesi

P_1 = GKA dan alınan örnek malzeme miktarının ilk ağırlığı, g

P_0 = Kurutulan malzemenin ağırlığı, g

δ = Tamamen kuru agreganın özgül ağırlığı, g

İri agrega tanelerinin porozitesinin küçük olması bu tanelerin dayanımlarının yüksek değerler almasına neden olabilir. Bu yüzden beton üretiminde kullanılacak olan agregalarda porozitesinin belirli bir değerden büyük olmaması istenir. Literatürde belirlenmiş kaya poroziteleri Tablo 2.12' de verilmiştir.



Şekil 2.23. Yoğunluk deneyleri, a) Arşimet terazisi ve b, c, d, e) suda yüzdürme yöntemleri

Tablo 2.12. Bazı kayaçların porozite değerleri

Kayaç ismi	Porozite oranı (%)
Kuarsit	1,5-15
Kireçtaşı	0-38
Granit	0-4

2.3.2.3. Metilen Mavisi Deneyi

Beton için zararlı olduğu düşünülen, agregada içerisindeki kil ve ince madde miktarını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (TS EN 933-9). Metilen mavisi boya deneyi, beton ve harç agregalarının 0.063 mm göz açıklıklı elekten geçen ince taneleri içinde bulunan kil içeriğinin belirlenmesi amacıyla kullanılır. Bu deney kil minerallerinin miktarını belirler. Ancak zarar verme oranlarını belirleyemez (Yool vd, 1998)

Geri kazanılmış agregada numuneleri üzerinde yapılan metilen mavisi deneyi sonucunda kayaçların kil içermedikleri saptanmıştır (Şekil 2.24).

Deney sonuçları aşağıda belirtilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$MB = \left(\frac{V_1}{M_1} \right) \times 100$$

Bu formülde

MB = Metilen boyası, %

M1 = Deney kısmı kütlesi, g

V1 = İlave edilen toplam boya hacmi, ml



Şekil 2.24. Metilen mavisini deney düzeneği

2.3.2.4. Darbe Dayanım Deneyi

Darbe dayanımı, standart boyutlardaki kayaçların belirli bir doğrultuda darbelere karşı gösterdiği dirençtir. Kayacın ve agreganın kullanım alanlarının belirlenmesinde darbe dayanımının bilinmesi önemli bir konudur. Agreganın darbeye karşı mukavemetini öğrenmek için, silindirik bir hazne içine koyulan agreganın üzerine 13,6 kg ağırlığındaki silindirik hazne yaklaşık 38 cm (15 inç) yükseklikten numune üzerine 15 serbest düşmesi sağlanarak, agreganın çarpma dayanıklılığı hakkında bilgi edinmektir (Şekil 2.25). Darbe dayanım deneyi TS EN1097/2-D1 göre yapılmıştır ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

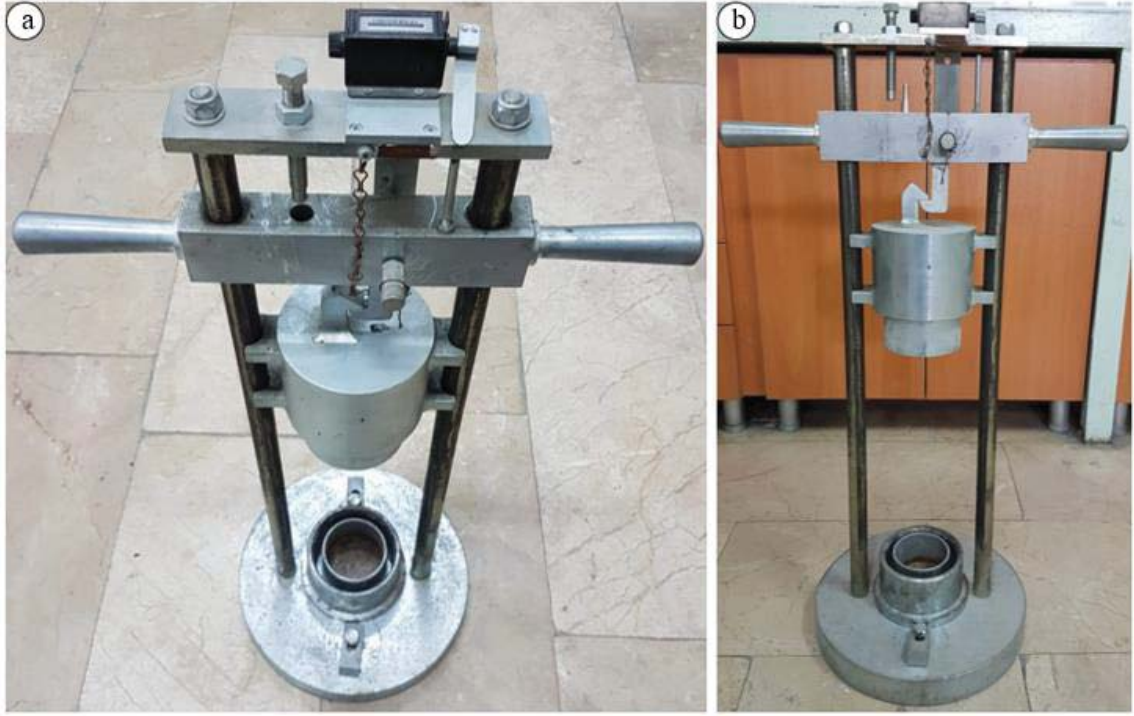
$$ADDI = \frac{B}{A} \times 100$$

Bu formülde;

ADDI = Agregada Darbe Dayanımı İndeksi, %

A = Başlangıçta tartılan malzeme miktarı, g

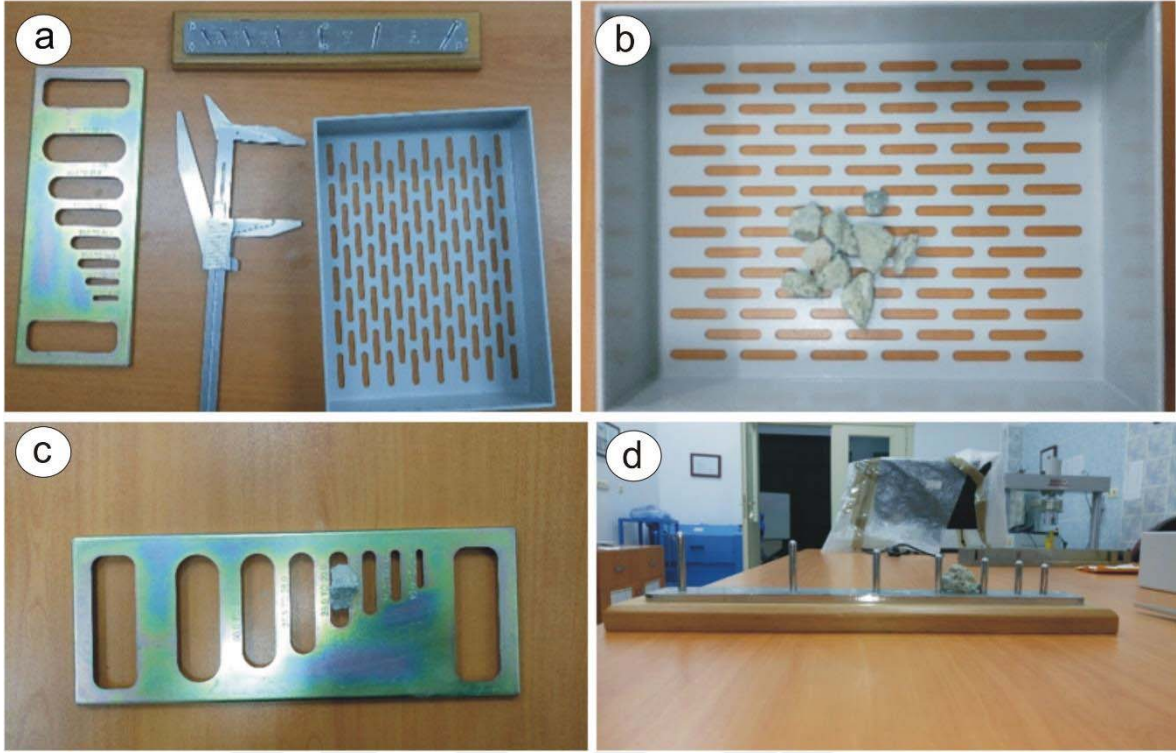
B = 2,36 mm'lik elekten altı malzeme miktarı, g



Şekil 2.25. Darbe dayanım deneyi, a,b) darbe dayanım cihazı hazne ve sayacı

2.3.2.5. Yassılık İndeksi Deneyi

Bu deney ile kullanılan agregaların yassılık dereceleri ölçülür. Agregatanelerinin yassı olmaları durumunda taze betonun işlenebilirlik özelliğini doğrudan etkilemektedir. Yassı şekilli tanelerin oranı çok ise taze betonun işlenebilirliği azalmakta, su ihtiyacı artmakta ve betonun dayanımını olumsuz etkilemektedir. Geri kazanılmış agreganın (GKA) tane şekli ve yassılık indeksi TS 9583 EN 933-3'te belirtilen yassılık indeksi cinsinden tayin edilmiştir. Deneyde kullanılan agrega tane büyüklüğü 4 mm ile 80 mm arasında olan agregalara uygulanmıştır. Boyut küçültme işlemi uygulanan inşaat atıklarından TS 9583 EN 933-3 uygun olarak alınan GKA lar, TS 9583 EN 933-3 'e uygun gridli elekleri ile elle eleme yapılarak elek üzerinde kalan malzemenin kütlesi 1 dakikalık eleme işlemi sonrasında %1'den daha fazla değişmeyinceye kadar elenerek eleme işlemi tamamlanmıştır. Çubuklu elekten geçen her tane büyüklüğü grubundaki malzeme tartılmıştır (Şekil 2.26). Toplam yassılık indeksi, çubuklu eleğin arasından geçen tanelerin toplam kütlesi deneye tâbi tutulan tanelerin toplam kuru kütlelerinin %'si olarak hesaplanır.



Şekil 2.26. Yassılık indeksi deneyi, a) deney seti, b) GKA'ların elek ile elenmesi, c) Agregaya yassılık tayin şablonundan ve d) GKA'nın çubuklu elekten geçirilmesi

2.3.2.6. Donma-Çözünme Deneyi

Bu deney, agreganın arka arkaya donma ve çözülme etkisine maruz bırakılması halinde gösterdiği davranış biçimi hususunda bilgi sağlar. Donma çözünme deneyi 4 mm ile 63 mm arasında tane büyüklüğüne sahip agregalara uygulanır. Bu deneyde TS EN 1367-1 deney standardına göre Tablo 2.13'de belirtilmiş agrega miktarları kullanılmıştır.

Tablo 2.13. Donma-Çözülme döngü deneyi için gereken deney numunesi kısımlarının miktarları (TS EN 1367-1).

En Büyük Agregaya Tane Büyüklüğü, mm	Agrega Kütlesi veya Hacmi	
	Normal Agregaya, g	Hafif Agregaya (Yığın Hacmi), mL
4-8	1000	500
8-16	2000	1000
16-32	4000	1500
32-63	6000	-

Çalışma alanından alınan +8,-16 mm boyutundaki numuneler 10 defa donma-çözülme döngüsüne tâbi tutulmuştur. Burada, su altında -17,5 °C'ye soğutma ve daha sonra da yaklaşık 20 °C'deki su banyosunda çözme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Donma-çözülme döngülerinin tamamlanmasından sonra GKA, 8 mm lik elekten geçirilerek % kütle kaybı hesaplanmıştır. Bu hesaplama aşağıdaki eşitlik ile yapılmıştır;

$$\% F = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

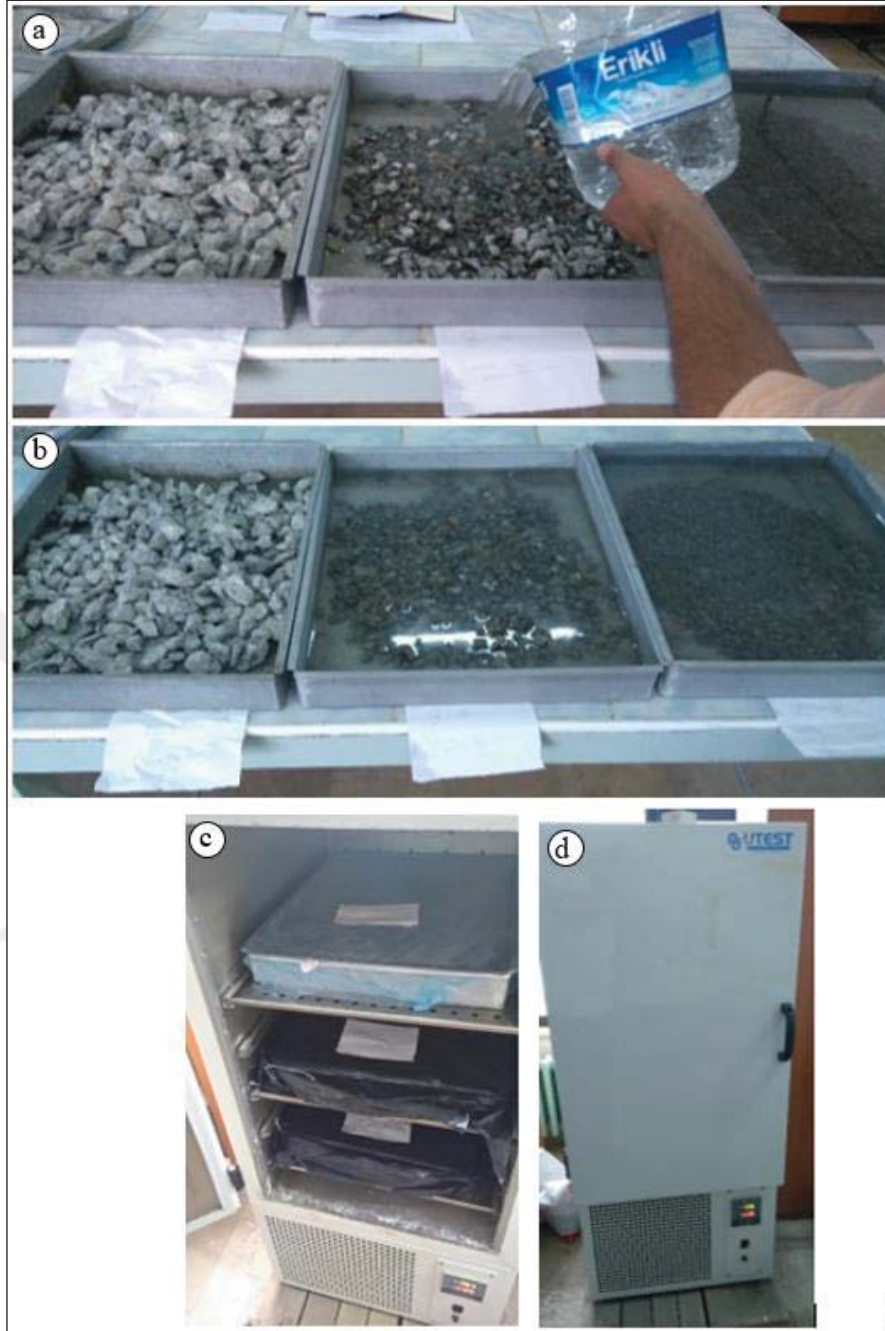
Burada;

M_1 = Deney numunesinin ilk kuru kütlesi, g

M_2 = Elekte tutulan deney numunesinin toplam nihai kuru kütlesi, g

F = Donma-çözülme döngüsünden sonra deney numunesinin kütlece yüzde kaybı, %

Donma çözülme deney düzeneği Şekil 2.27'de görülmektedir.



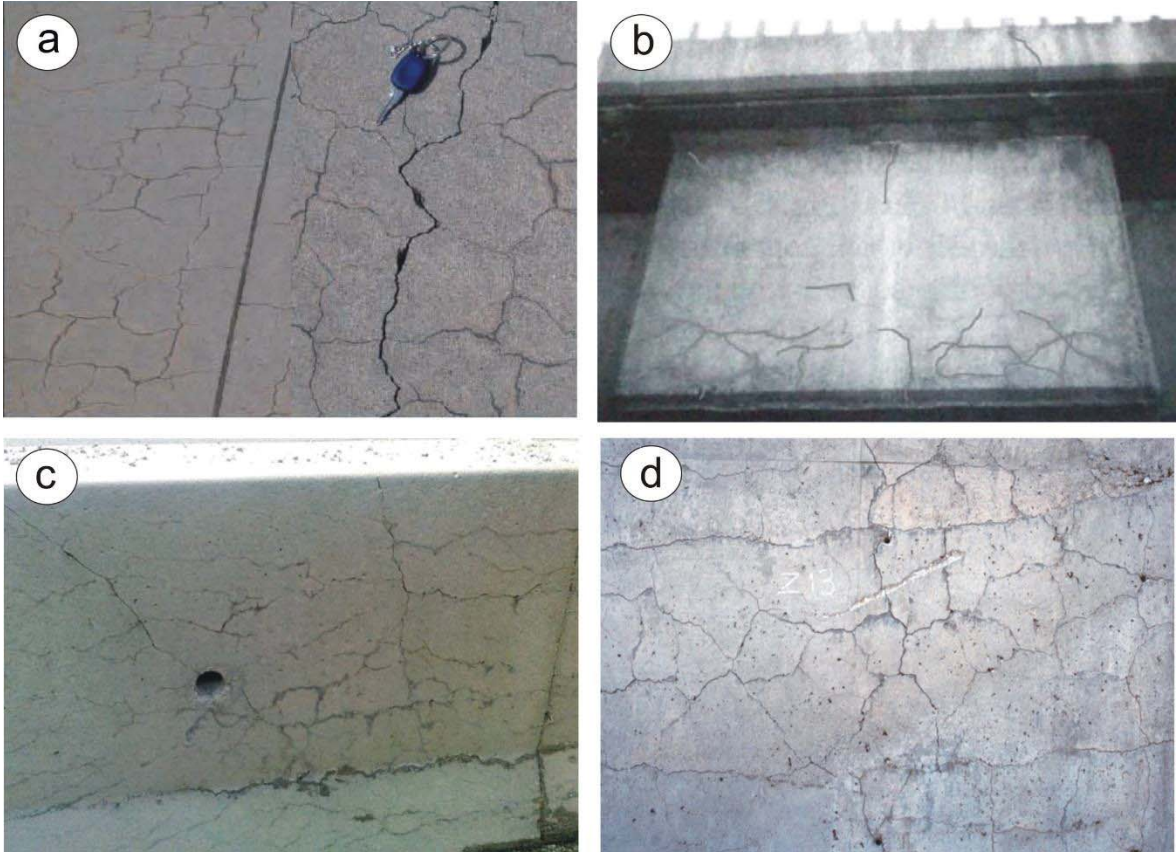
Şekil 2.27. Donma çözünme deney düzeneği, a, b) GKA'ların suya doygun hale getirilmesi, c) su kaybını engellemek için ağızları kapatılarak d) donma çözünme dolabına yerleştirilmeleri

2.3.2.7. Alkali Silika Reaksiyon Tayini

Geri kazanılmış agrega kullanılarak oluşturulan betonlarda alkali silika reaksiyonununun incelemek için kimyasal yöntem ve hızlandırılmış harç çubukları yöntemleri ile ASR analizi yapılmıştır.

➤ Alkali silika reaksiyonu deneyi (kimyasal yöntem)

Alkali silika reaksiyonu, bazı agregaların içerdikleri aktif minerallerin çimentonun yapısında bulunan alkaliler ile reaksiyona girmesi ile oluşan bir reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucunda betonda deformasyonlar oluşur (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. Alakali silika reaksiyonu sonucu oluşan çatlaklar, a) İzmir havalimanı pistinde, b) köprü ayaklarında, c, d) karayolu yol bariyerinde gözlenen ASR çatlakları (Katayama, 2000, Andiç Çakır, 2007).

Bu deneyde ASTM C 289 standartlarına göre geri kazanılmış agregalarının kimyasal yöntemle reaktiveleri saptanmıştır. Bu şekilde geri kazanılmış agregaların silika reaksiyonuna sebep olacak aktif silika miktarı belirlenmiştir.

Geri kazanılmış agreganın içerdiği çözülmüş silika miktarı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S_c = M_1 - M_2 \times 3330$$

Formülde kullanılan değerler;

S_c = Orijinal süzöntü içindeki çözülmüş silika konsantrasyonu, m mol/L

M_1 = 100ml seyreltik çözelti içindeki silika miktarı, g

M_2 = Tanık örnekte bulunan silika miktarı, g

Alkali azalması miktarının hesaplanmasında ise;

$$R_c = \left(\frac{20xN}{V_1}\right)X(V_3 - V_2)x1000$$

Bu formülde;

R = Alkali azalması, m mol/L

N = Hidroklorik asitin normalitesi

V_1 = 200 ml'lik çözüldüden çekilen örnek hacmi, ml

V_2 = Örnek için sarf edilen hidroklorik asit hacmi, ml

V_3 = Tanık örnek için sarf edilen hidroklorik asit hacmi, ml

➤ Alkali silika deneyi (hızlı harç çubuğu yöntemi)

Geri kazanılmış agregaların alkali aktivitesini görmek için 30 adet 25x25x285 mm boyutlarında 2 farklı katkı ve 3 değişik miktarlarda pirizma numune dökülmüştür. Döküm oranları Tablo 2.14' de verilmiştir. Dökülen numuneler hızlı harç çubuğu yöntemi kullanılarak alkali silika reaksiyonunun yol açtığı genleşme incelenmiştir. Harç çubukları (ASTM C-227) ve (ASTM C-1260)'da belirtilen esaslara uygun olarak hazırlanmıştır. Harç karışımları için 8-16-30-50 ve 100 nolu elek serilerinden elenen agregalar, Tablo 2.14'de karışım oranları verilen miktarlarda kullanılmıştır.

Tablo 2.14. Harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri için malzeme karışım oranları

Elek göz açıklığı, mm		Kütlece, %
Üzerinden geçen elek	Üzerinde kalan elek	
4,75 (No.4)	2,36 (No.8)	10
2,36 (No.8)	1,18 (No.16)	25
1,18 (No.16)	0,60 (No.30)	25
0,60 (No.30)	0,30 (No.50)	25
0,30 (No.50)	0,15 (No.100)	15

Karışım su / çimento oranları, ASTM C 109 “Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars” ‘da belirtilen esaslara uygun olarak belirlenmiştir.

Dere agregası ve kırmataş harç çubuğu dökümü için gerekli malzeme karışım miktarları Tablo 2.15'de verilmiştir.

Tablo 2.15. Harç çubukları malzeme karışım miktarları

Malzeme Türü	Elek Serisi					s/ç	Su, ml	Çimento, g
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100			
	%10	%25	%25	%25	%15			
Doğal agreg	100 g	250 g	250 g	250 g	150 g	0,45	199,8	444
Kırma taş agreg	100 g	250 g	250 g	250 g	150 g	0,5	222	444

Tablo 2.15’de verilen karışım miktarları ASTM C 305 standartlarına uygun olarak hazırlanan karışımlar, harç çubuklarının üretiminde, 2 adet örnek dökümüne imkân veren 25x25x285 mm boyutlarında, çelik kalıplar ve oluşturulan harç çubuklarının boy değişimlerini ölçmek için, 7 mm çapında ve 3.2 mm boyundaki pirinçten üretilmiş pimler kalıplarda açılan deliklere yerleştirilmiştir (Şekil 2.29).

Geri kazanılmış agreg, pişmiş kil ve uçucu kül kullanılarak %0-15-30 deney numuneleri hazırlanmıştır. Hızlandırılmış harç çubuğu deneylerinden her biri için 2’şer adet olmak üzere 3 farklı malzeme ve 3 farklı karışım oranı için toplam 30 adet harç çubuğu örneği üretilmiştir (Tablo 2.16).

Tablo 2.16. Harç çubuk döküm karışımları

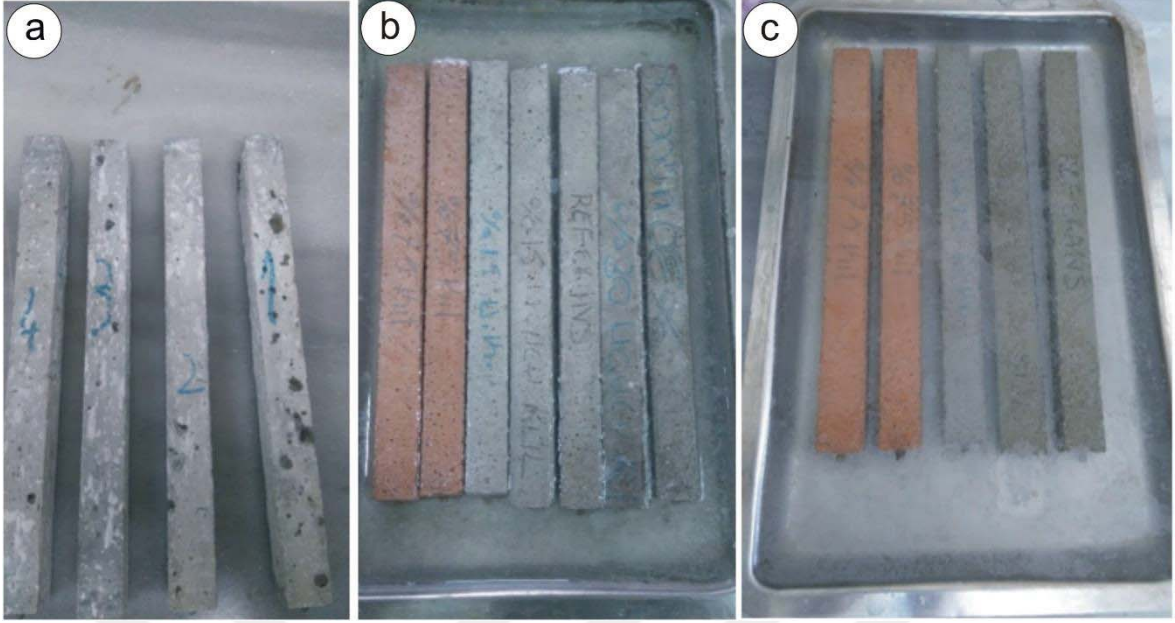
Numune Sayısı, adet	Numune Boyutu, mm	Agrega Tipi	Katkı tipi	Katkı oranı, %	Bağlayıcı oranı, g	Kür süresi, gün
2	25x25x285	GKA	-	-	444	7
2	25x25x285	GKA	-	-	444	14
2	25x25x285	GKA	-	-	444	28
2	25x25x285	GKA	PK	15	444	7
2	25x25x285	GKA	PK	15	444	14
2	25x25x285	GKA	PK	15	444	28
2	25x25x285	GKA	PK	30	444	7
2	25x25x285	GKA	PK	30	444	14
2	25x25x285	GKA	PK	30	444	28
2	25x25x285	GKA	UK	15	444	7
2	25x25x285	GKA	UK	15	444	14
2	25x25x285	GKA	UK	15	444	28
2	25x25x285	GKA	UK	30	444	7
2	25x25x285	GKA	UK	30	444	14
2	25x25x285	GKA	UK	30	444	28

GKA: Geri kazanılmış agreg, PK: Pişmiş kil, UK: Uçucu kül

Kalıplara yerleştirilen harç şişlenerek sıkıştırılmıştır. Kalıplar %90 nispi nem bulunan kür odasında $23 \pm 1,7$ °C' de 24 saat bekletilmiştir (Şekil 2.26).



Şekil 2.29. Alkali silika reaksiyonu deneyi a, b) karışımda kullanılan malzemeler, c) ikili harç çubuğu kalıpları, d) harç çubuklarının dökülmesi



Şekil 2.30. a) Hızlı harç çubuklarının kalıplardan çıkarılması, b, c) sıcak suda bekletilmesi

Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi Harç çubukları saf su ve etüvde 24 saat bekletildikten sonra ilk boy ölçümleri alınmıştır. 1 N NaOH çözeltisi, 1000 ml. saf suya 40 g sodyum hidroksit konularak hazırlanmış ve hazırlanan bu sodyum hidroksit çözeltisi 80 °C'de sabit ısıda tutularak, harç çubukları bu çözelti içerisine konmuştur (Şekil 2.31).

Bu işlemten sonra devam eden 7, 16, 28. günlerde boy ölçümleri alınarak boy değişim yüzdeleri hesaplanmıştır (Şekil 2.32). Birim boy değişim yüzdelerini belirlemede aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır;

$$\%r = \left(\frac{\Delta L_n}{L_0} \right) \times 100 \quad \Delta L_n = (L_1 - a_1) \times (L_n - a_n)$$

Eşitlikte;

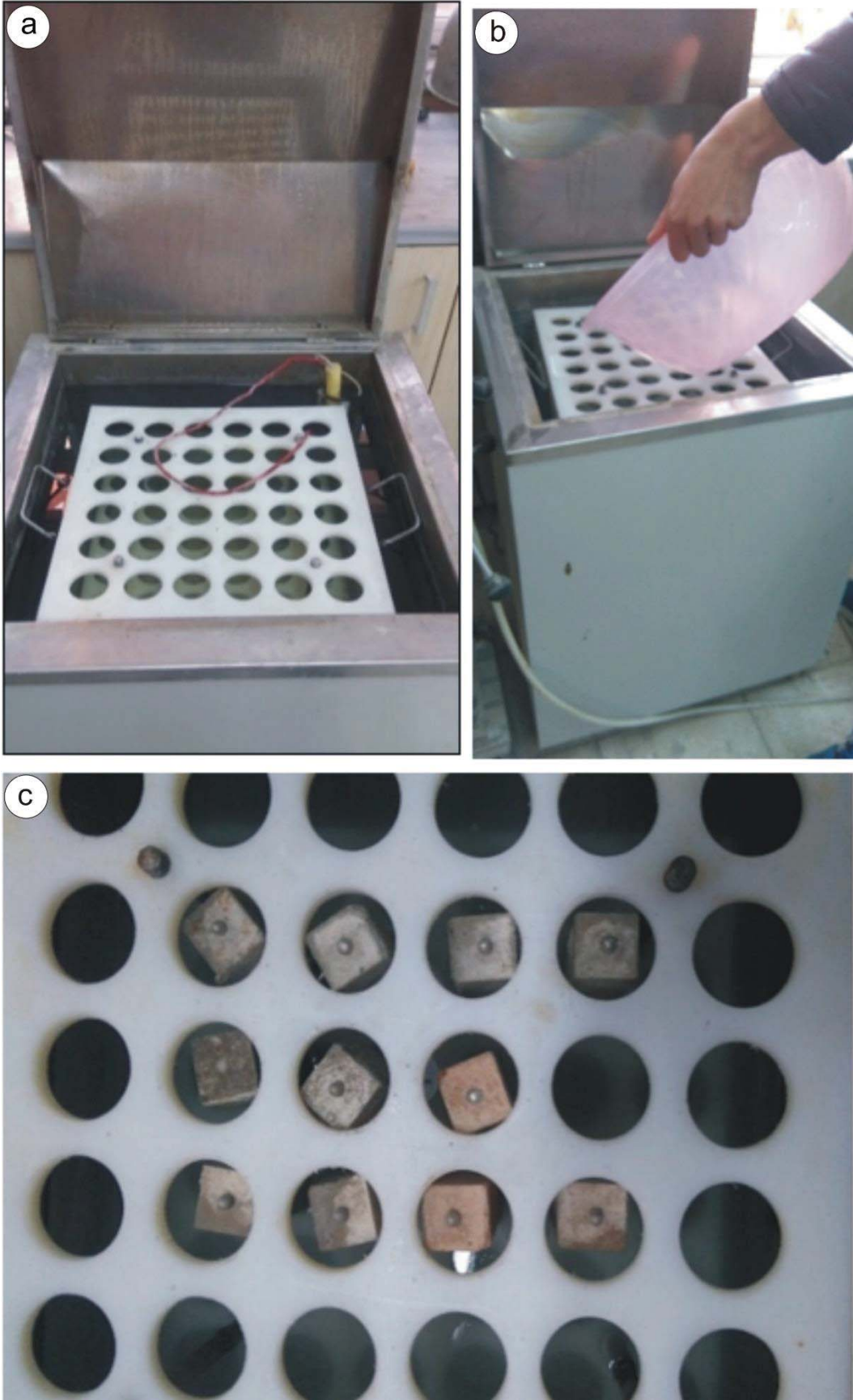
r = Boy değişim yüzdesi, %

L₀ = Harç çubuğunun başlangıç boy ölçümü, mm

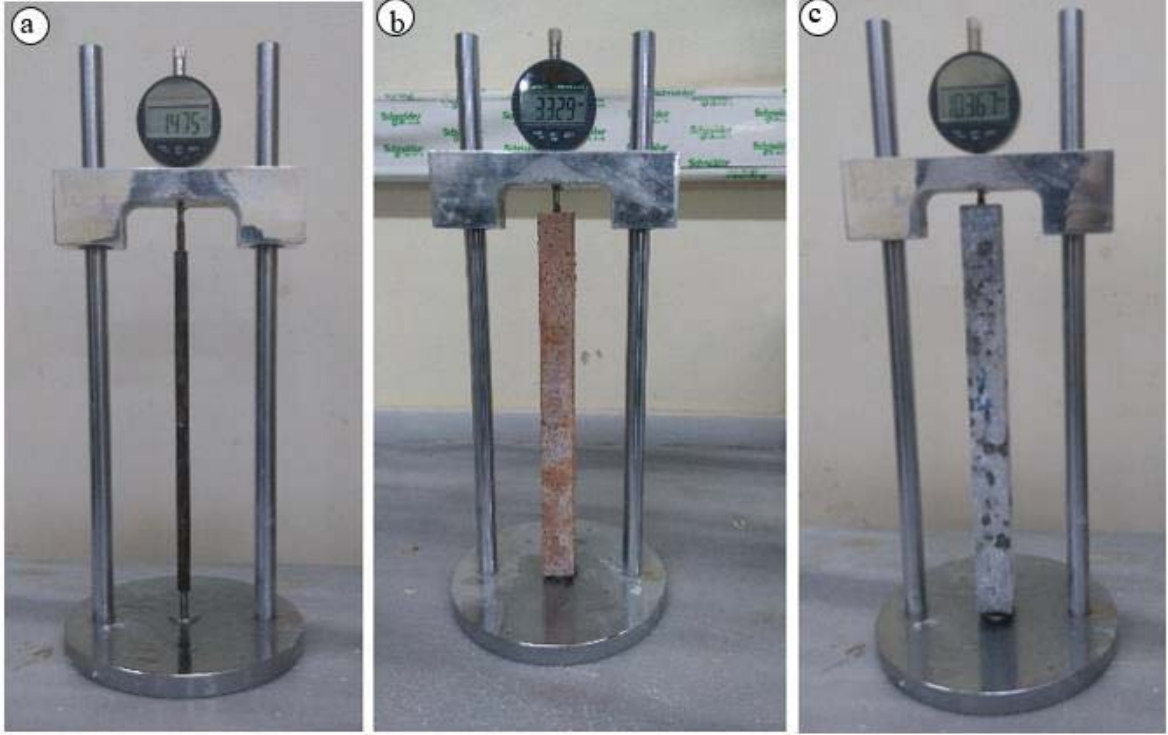
L_n = Harç çubuğunun n. günde boy ölçümü, mm

a₁ = Ayar çubuğu başlangıç boyu, mm

a_n = Ayar çubuğunun n. günde boyu, mm



Şekil 2.31. a) Termostat'lı kür tankı, b) solüsyon eklenmesi, c) numune yerleşimi



Şekil 2.32. a) Dijital komparatörün sıfırlanması, b, c) örneklerin boy ölçümü

2.3.2.8. Aşınma Tayini

Geri kazanılmış agregaların aşınmaya karşı direncinin ölçmek için inşaat molozlarından alınan numuneler üzerinde mikro-deval ve Los Angeles deneyleri yapılmıştır.

➤ Mikro Deval aşınma deneyi

Geri kazanılmış agregalarınlar üzerinde mikro-deval deneyi yapılarak aşınma dirençlerine bakılmıştır. Deney laboratuvarında ASTM D6928-10 (2010) standardına göre yapılmıştır, +4,75 mm, – 6,3 mm arası 750 g ve 6,3 mm, – 9,5 mm arası 750 g olmak üzere toplam 1500 g örnek hazırlanmıştır.

Hazırlanan örnekler deneyden önce etüvde 24 saat kurutularak nemi alınmıştır. Bu işlemler her iki numune için ayrı ayrı uygulanmıştır. Tamburun içine 1500 g örnek, 5000 g 1 cm çapında çelik bilye ve 2 litre su eklenerek kapatılmıştır (Şekil 2.33). Kapatılan tamburlar mikro deval cihazına yerleştirilerek 100 devir/dakika hızda olmak üzere 9500 tur çevrilmiştir. Çıkarılan örnek 1,18 mm'lik elekten elenmiş ve elek üstü malzeme etüvde kurutulduktan sonra tartılmıştır. kütle kaybı, ilk ağırlığa bölünerek aşınma kaybı (MDA) yüzde (%) olarak hesaplanmıştır. Deney geri kazanılmış agregaya numuneleri için en az iki

kez tekrarlanmıştır. Aşağıdaki bağıntı yardımı ile Mikro-Deval aşınma değeri (MDA) hesaplanmıştır.

$$MDA = \frac{\Delta m}{m} \times 100$$

Burada;

MDA = Mikro-Deval aşınma değeri, %

Δm = Toplam ağırlık kaybı, g

m = İlk ağırlık, g



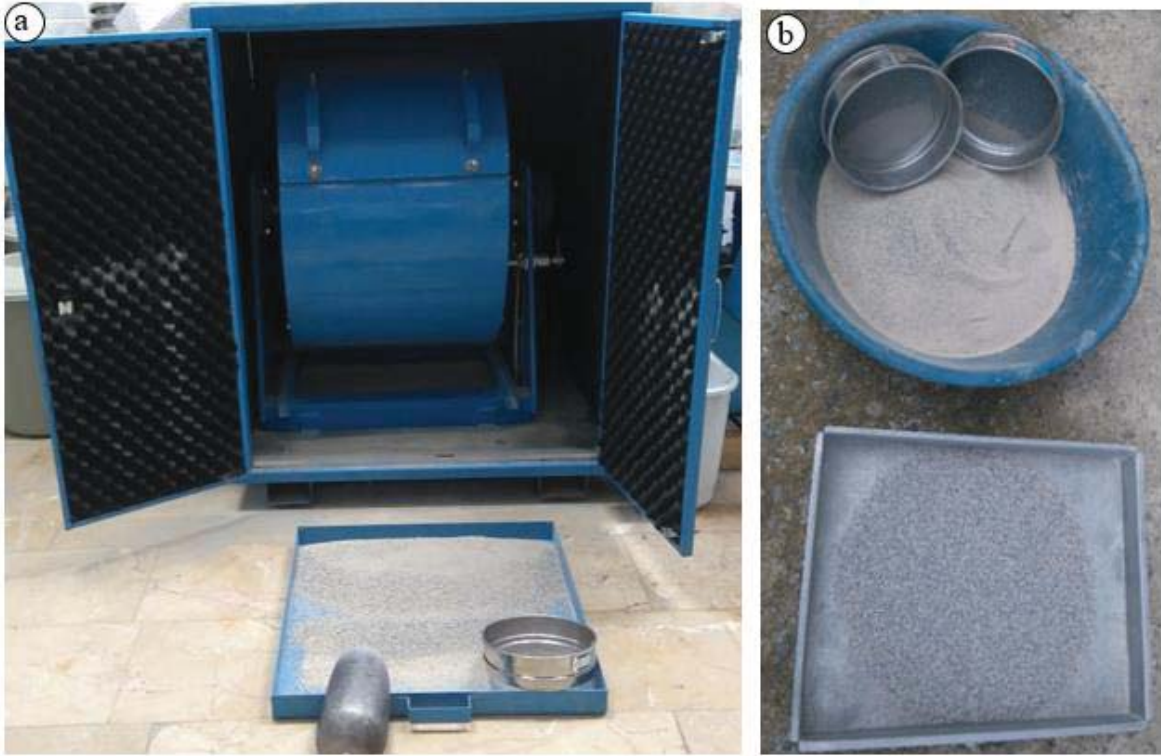
Şekil 2.33. Mikro- Deval aşınma deneyi, a) deney için uygun boyutta GKA, b, d) haznelerin sökülmesi ve deney düzeneği, c, e) deney sonrası eleme işlemi

➤ Los Angeles deneyi

Çalışılan agregaların aşınma direncinin tespiti için Los Angeles aşınma direnci deneyi TS EN 1097-2 standartlarına göre yapılmıştır (Şekil 2.34).

TS EN 1097-2 standartlarına göre deneyde Los Angeles deney aleti kullanılmıştır. Aşınma deneyi için 10-14 mm boyutlarında 5000'er g numune hazırlanmıştır. Deney numunesi yıkanmış, 110°C'de etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Numune ve aşındırma sınıfına göre gerekli olan 11 adet çelik küre, deney aletine konularak 30-33 devir/dakika olacak şekilde, alete 500 devir yaptırılmıştır. Gerekli devir sayısı tamamlandıktan sonra numune 1,60 mm'lik elekten elenmiş, elek üstünde kalan malzeme yıkanmış ve 110°C'lik etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutularak tartılmıştır. Bu işlem 7 defa tekrarlanmıştır. Deney sonuçları

Los Angeles aşınma kaybı (%) = $(\text{ilk ağırlık} - \text{son ağırlık}) / (\text{ilk ağırlık})$
Bağıntısı ile hesaplanmıştır.



Şekil 2.34. GKA ile yapılan Los Angeles deneyi a) öncesi ve b) sonrası

2.3.3. Püskürtme Beton Deneyleri

Bu tez kapsamında kullanılan GKA'ların püskürtme betonda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Geri kazanılmış agreganın püskürtme betonda kullanımına yönelik numune üretilerek, tek eksenli basınç dayanımı, çökme, ultrasonik hız tayini, plak deneyleri, ince kesit deneyleri yapılmıştır.

2.3.3.1. Beton Numunelerinin Hazırlanması

Birçok işletme yeraltında kullanılan püskürtme beton tahkimat amaçlı kullanılmaktadır. Tahkimat amaçlı kullanılan püskürtme betonun erken kür dayanımı, çökmesi ve boşluk oranı önemli bir etmendir.

Püskürtme betonun dayanımını uygulama şekli ile birlikte kullanılan bağlayıcı oranı ve agregası ile etkileşimi büyük oranda etkilemektedir. Madencilikte tahkimat amaçlı en fazla kullanılan püskürtme beton uygulamasında kullanılan 0-4,4-8 mm doğal agregası (DA) yerine aynı büyüklükte farklı oranlarda GKA kullanılmıştır. Karışım oranları Tablo 2.17'de verilmiştir. Ayrıca püskürtme betonda kullanılan liflerin geri kazanılmış agregası ile etkileşimini görmek için farklı miktarlarda ve farklı cinslerde lifler kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır (Tablo 2.17).

Hazırlanan karışım oranlarına bağlı kalarak 264 adet 10x20 cm ebadında silindir numune üretilerek kür havuzuna konulmuştur. Kür süresi dolan silindir numuneler üzerinde tek eksenli basınç dayanımı, çökme, ultrasonik hız tayini deneyleri yapılmıştır (Şekil 2.35).

Tablo 2.17. Lifsiz püskürtme beton karışım oranları

Numune Sayısı, adet	Numune Boyutu, cm	Agrega Tipi	Agrega Oranı, %	Lif tipi	Lif ilave miktarı, kg/m ³	Kullanılan kimyasal türü	Kimyasal Miktarı, %*	Bağlayıcı oranı, ağırlık %	Kür süresi, gün
3	10x20	GKA/DA	100/0	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	3
3		GKA/DA	100/0	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	7
3		GKA/DA	100/0	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	14
3		GKA/DA	100/0	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	28
3		GKA/DA	100/0	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	56
3		GKA/DA	100/0	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	90
3		GKA/DA	100/0	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	180
3		GKA/DA	100/0	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	270
3	10x20	GKA/DA	75/25	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	3
3		GKA/DA	75/25	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	7
3		GKA/DA	75/25	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	14
3		GKA/DA	75/25	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	28
3		GKA/DA	75/25	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	56
3		GKA/DA	75/25	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	90
3		GKA/DA	75/25	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	180
3		GKA/DA	75/25	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	270
3	10x20	GKA/DA	50/50	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	3
3		GKA/DA	50/50	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	7
3		GKA/DA	50/50	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	14
3		GKA/DA	50/50	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	28
3		GKA/DA	50/50	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	56
3		GKA/DA	50/50	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	90
3		GKA/DA	50/50	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	180
3		GKA/DA	50/50	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	270
3	10x20	GKA/DA	25/75	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	3
3		GKA/DA	25/75	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	7
3		GKA/DA	25/75	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	14
3		GKA/DA	25/75	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	28
3		GKA/DA	25/75	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	56
3		GKA/DA	25/75	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	90
3		GKA/DA	25/75	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	180
3		GKA/DA	25/75	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	270
3	10x20	GKA/DA	0/100	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	3
3		GKA/DA	0/100	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	7
3		GKA/DA	0/100	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	14
3		GKA/DA	0/100	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	28
3		GKA/DA	0/100	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	56
3		GKA/DA	0/100	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	90
3		GKA/DA	0/100	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	180
3		GKA/DA	0/100	-	-	PH-AKŞ	8-1	7,0	270
Toplam 120									

GKA: Geri kazanılmış agrega DA: Doğal Agregası, PH: Piriz hızlandırıcı, AKŞ: Akışkanlaştırıcı *kimyasal miktarları çimento miktarının % si dir

Tablo 2.18. Hazırlanan lif katkılı püskürtme beton numuneleri

Numune Sayısı, adet	Numune Boyutu, cm	Agrega Tipi	Agrega Oranı, %	Lif tipi	Lif ilave miktarı, kg/m ³	Bağlayıcı oranı, ağırlık %	Kullanılan kimyasal türü	Kimyasal Miktarı, %*	Kür süresi, gün
3	10x20	GKA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	3
3		GKA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	7
3		GKA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	14
3		GKA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	28
3		GKA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	56
3		GKA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	90
3		GKA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	180
3		GKA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	270
3	10x20	GKA	100	Polipropilen	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	3
3		GKA	100	Polipropilen	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	7
3		GKA	100	Polipropilen	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	14
3		GKA	100	Polipropilen	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	28
3		GKA	100	Polipropilen	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	56
3		GKA	100	Polipropilen	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	90
3		GKA	100	Polipropilen	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	180
3		GKA	100	Polipropilen	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	270
3	10x20	GKA	100	Polipropilen	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	3
3		GKA	100	Polipropilen	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	7
3		GKA	100	Polipropilen	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	14
3		GKA	100	Polipropilen	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	28
3		GKA	100	Polipropilen	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	56
3		GKA	100	Polipropilen	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	90
3		GKA	100	Polipropilen	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	180
3		GKA	100	Polipropilen	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	270
3	10x20	GKA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	3
3		GKA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	7
3		GKA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	14
3		GKA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	28
3		GKA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	56
3		GKA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	90
3		GKA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	180
3		GKA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	270
3	10x20	GKA	100	Kopolimer	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	3
3		GKA	100	Kopolimer	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	7
3		GKA	100	Kopolimer	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	14
3		GKA	100	Kopolimer	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	28
3		GKA	100	Kopolimer	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	56
3		GKA	100	Kopolimer	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	90
3		GKA	100	Kopolimer	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	180
3		GKA	100	Kopolimer	4	7,0	PH/AKŞ	8/1	270
3	10x20	GKA	100	Kopolimer	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	3
3		GKA	100	Kopolimer	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	7
3		GKA	100	Kopolimer	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	14
3		GKA	100	Kopolimer	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	28
3		GKA	100	Kopolimer	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	56
3		GKA	100	Kopolimer	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	90
3		GKA	100	Kopolimer	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	180
3		GKA	100	Kopolimer	6	7,0	PH/AKŞ	8/1	270
Toplam 144									

GKA: Geri kazanılmış agrega DA: Doğal Agregası, PH: Piriz hızlandırıcı, AKŞ: Akışkanlaştırıcı *kimyasal miktarları çimento miktarının % si dir



Şekil 2.35. Silindir numune dökümü a) Dökümde kullanılan malzemeler, b) Mikserde karıştırma işlemi, c) kalıpların yağlanması, d, e) silindir numunelerin dökümü ve sıkıştırılması, (f) numunelerin kalıptan çıkarılarak kür tankına yerleştirilmesi

2.3.3.2. Çökme Testi

Madencilikte sıklıkla kullanılan püskürtme beton teknolojisinde yüzeye yapışması, taşınması ve işlenebilirliği açısından çökme testi çok önemlidir.

Doğal ve geri kazanılmış agrega kullanılarak üretilen betonda çökme deneyi TS EN 12350-2'ye uygun şekilde yapılmıştır. Agregadan oluşturulan betonlar kesik huni şekilli kalıba üç tabaka halinde dökülmüştür. Her kalıbın eşit kalınlıkta olmasına ve her katmandan sonra 25 defa şişlenmesine dikkat edilerek doldurulmuştur.

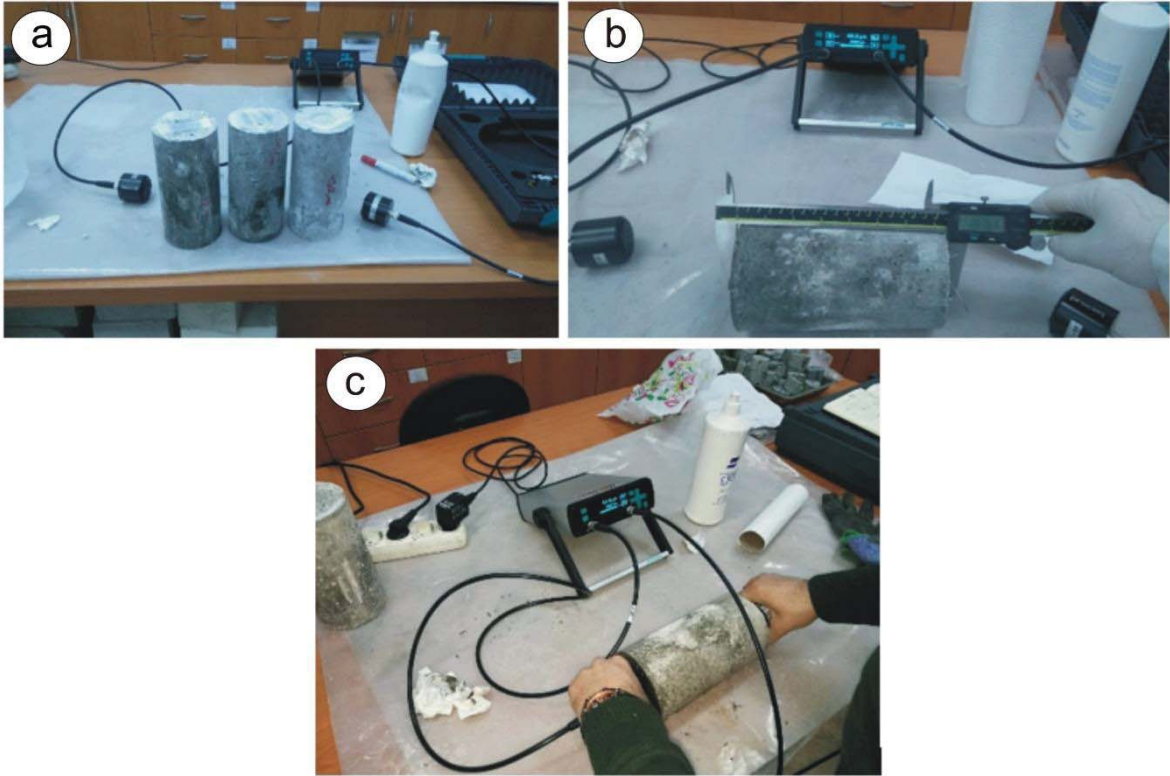
Doldurma işleminden sonra kesik huni düşey şekilde yukarıya doğru çekilmiş, kalıbın üst seviyesi ile çöken betonun en yüksek noktası arasındaki mesafe (h, cm) ölçülmüş taze betonun çökmesi (slump) belirlenmiştir (Şekil 2.36).



Şekil 2.36. (a) Çökme testi deneyi, (b) kıvamı uygun ve (c) uygun olmayan döküm

2.3.3.3. Ultrasonik Sismik Hız Tayini

Betonda boşluk yapısı, basınç ve çekme dayanımı gibi geoteknik özelliklerinin belirlenmesinde ultrasonik ses geçiş hızı testi (UPV) uygulanmaktadır. Geri kazanılmış agregaların püskürtme betonda kullanılabilirliğinin incelenebilmesi için kür süresi sonunda kür tankından çıkarılan silindir numuneler 24 saat kuruması beklenildikten sonra ASTM C 597 (2016) standartlarına uygun olarak 0,1 μ s hassaslıkta sinyal süresine ve 24-500 kHz sinyal frekansına sahip Pundit Lab+ model test cihazı ile UPV ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.37).



Şekil 2.37. Ultrasonik sismik hız deneyi, a) silindir numunelerin hazırlanması, b) boy ölçümü ve c) UPV ölçümleri

2.3.3.4. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Geri kazanılmış agregaların (GKA) yeraltında püskürtme betonda kullanımını görmek için tek eksenli basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla TS EN 12504 standardına göre önceden hazırlanmış 10x20 cm boyutlarında 126 adet numuneler 3, 7, 14, 28, 56, 90,

180 ve 270 günlük kür süresince kr tanklarında bekletilmiştir. Kr süresini tamamlayan numuneler BESMAK marka 200 tonluk pres makinesi ile tek eksenli basıncı dayanım testleri yapılmıştır (şekil 2.38).



şekil 2.38. Tek eksenli basıncı dayanım deneyi a, b) silindir numuneler, c) kırılmış numunelerin içerisindeki sentetik lifler

2.3.3.5. Plak Deneyleri

Geri kazanılmış agregayı madencilik sektöründe püskürtme betonda kullanımını araştırmak adına 60x60x10 boyutlarında plak numuneler hazırlanmıştır. Plak numuneler

üzerinde enerji yutma, UPV, tek eksenli basınç dayanımı ve donma çözünme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin yapılışı aşağıda başlıklar halinde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

➤ Plak numunelerinin hazırlanması

60x60x10 cm ebatlarında ki kalıplara 0-4 mm ve 4-8 mm elek aralıklarında kalan doğal agregalar ve GKA'lar Tablo 2.19' da verilen oranlarda kullanılarak dökümler yapılmıştır.

Tablo 2.19. Plak deneyi beton karışım oranı

	Kütle, kg	Hacim, dm ³	Özkütle, kg/dm ³
Çimento	410	131	3.14
Su	250	250	1
P. Hızlandırıcı (%8)	33	23	1.44
Akışkanlaştırıcı	4.1	4	1.08
Hava		20	0
G.A. 0-4 mm (%75)	898	430	2.09
G.A. 4-8 mm (%25)	357	143	2.49
Lif			
Toplam	1951	1000	

Bu çalışmada 2 farklı lif ve 8 farklı karışım oranı ile GKA'lardan oluşan 16 adet 60x60x10 cm ebatlarında plaklar hazırlanmıştır (Şekil 2.39).

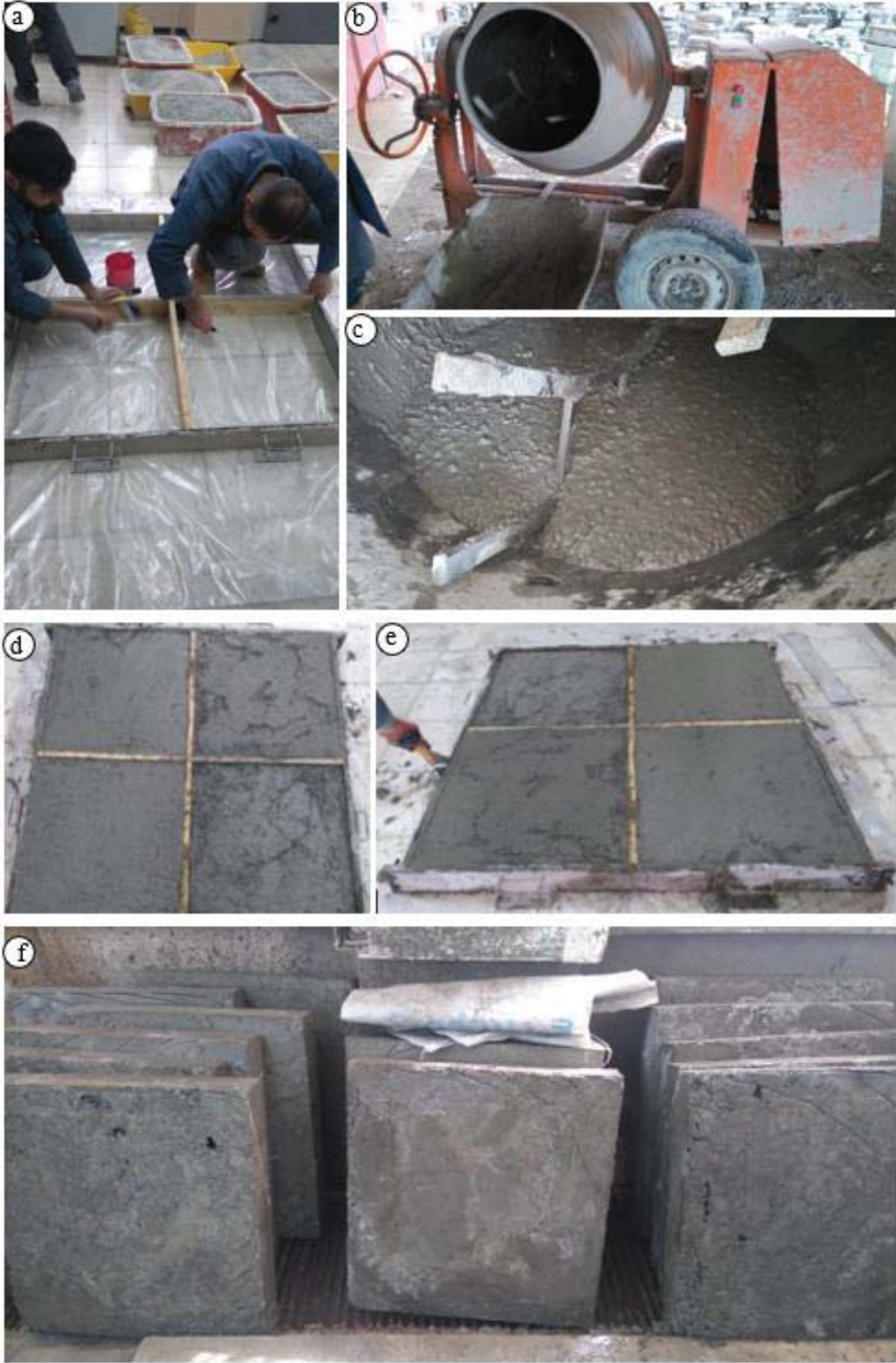
Değerlendirmeler enerji yutma kapasiteleri baz alınarak referans olan tamamen doğal agrega kullanılarak üretilen beton türüne göre yapılmıştır. Beton türlerine ait kodlama aşağıda görülmektedir (Tablo 2.20).

Tablo 2.20. Plak beton türü ve kodlamaları

Numune Sayısı, adet	Numune Boyutu, cm	Plak Beton Kodu	Agrega Tipi	Agrega Oranı, (%)	Lif tipi	Lif ilave miktarı, kg/m ³	Kür süresi, gün
2	60x60x10	2GPL	GKA	100	Polipropilen	2	28
2	60x60x10	6GPL	GKA	100	Polipropilen	6	28
2	60x60x10	100GKA	GKA	100	---	---	28
2	60x60x10	50GKA	GKA / (DA)	50/50	---	----	28
2	60x60x10	100DA	DA	100	---	---	28
2	60x60x10	2GKL	GKA	100	Kopolimer	2	28
2	60x60x10	6GKL	GKA	100	Kopolimer	6	28
2	60x60x10	25GKA	GKA/DA	25/75	---	---	28

GKA: Geri kazanılmış agrega

DA: Doğal Agreg

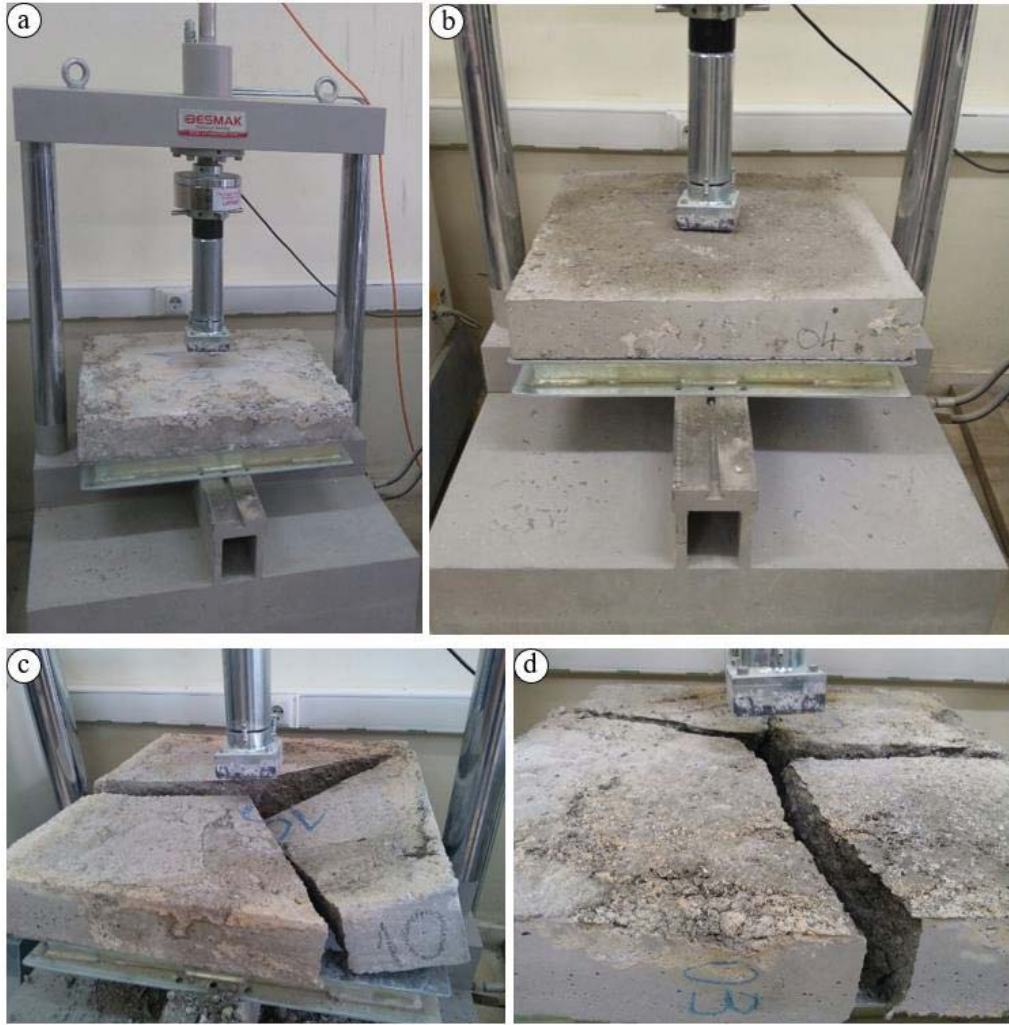


Şekil 2.39. Plak dökümleri, a) Plak döküm kalıplarının montaj ve yağlanması, b, c) karıştırıcı ile karıştırılma, d, e) kalıba döküm işlemi, f) kalıplardan çıkarılan plakların nemli ortama konulması

➤ Enerji yutma kapasitesi (tokluk) tayini

Yeraltı ve yerüstü maden işletmelerinde tahkimat amaçlı kullanılan püskürtme betonda lif kullanımı oldukça yaygındır. Lifli püskürtme beton, mekanik ve fiziksel özelliklere bakımından lifsiz püskürtme betona göre farklılıklar içerir. Püskürtme betonun tahkimat amaçlı kullanımının en önemli sebeplerinden biri tokluk diğer adı ile enerji yutabilme özelliğidir. Çatlak direnci, süneklik, esneklik, darbe direnci gibi değişik mekanik özellikler enerji yutabilme kapasitesi ile ilişkilidir Tokluk olarak da adlandırılan bu özellik, yük-sehim eğrisinin altında kalan alan ile ifade edilir.

Dökülen plaklar 28 günlük kür süresi sonunda ultrasonik hız deneyleri ve tek eksenli basınç deneyleri yapılarak kırılmıştır. Bu betonlar genel olarak düzenli bir şekilde 4 parçaya bölünmüştür (Şekil 2.40).



Şekil 2.40. (a, b) Tokluk tayini için plakların yerleştirilmesi, (c, d) plakların düzgün kırılma şekilleri

➤ Ultrasonik sismik hız ölçümü

60x60x10 cm boyutlarında dökülen plaklar 28 günlük kür süresi sonunda kırım yapılmadan önce ASTM C 597 (2016) standartlarına uygun olarak 0,1 µs hassaslıkta sinyal süresine ve 24-500 kHz sinyal frekansına sahip Pundit Lab+ model test cihazı ile UPV ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.41). UPV ölçümleri plakların en (10 cm) ve boy (60 cm) ekseninde yapılmıştır. Aşağıdaki hız formülü kullanılarak P dalgası geçiş hızları hesaplanmıştır.

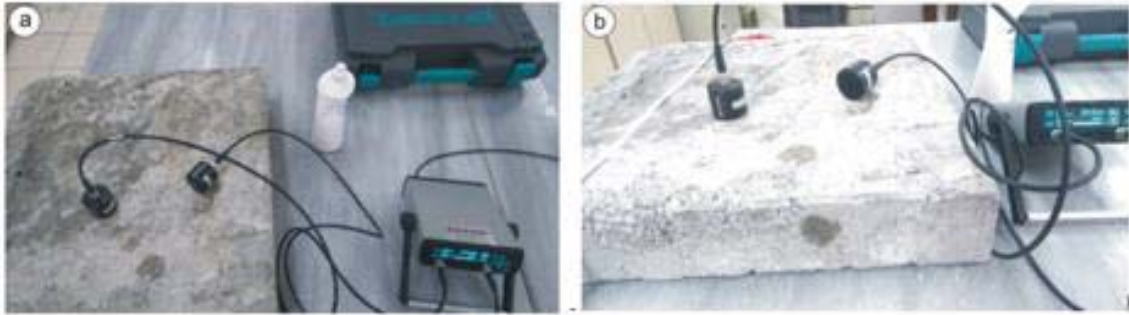
$$V = \frac{L}{t}$$

Formulde;

L = Ölçüm yapılan numunede problar arası mesafenin, mm

t = Okunan süre, µs

V = Geçiş hızı, mm/ µs

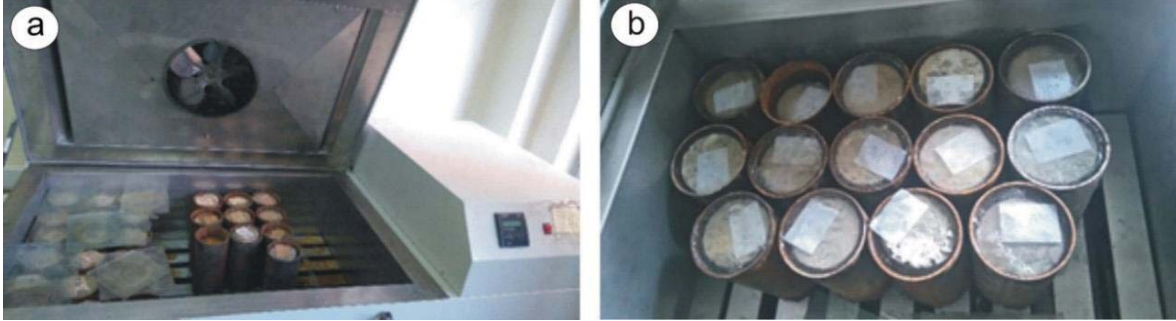


Şekil 2.41. a, b) Plak numunelerinde Ultrasonik hız ölçümü (UPV) ölçümü

➤ Plaklarda Donma-Çözünme Deneyi

Betonların ani ısı değişimlerinden nasıl etkilenebileceğini görmek için donma-çözünme dayanımı incelenir. Donma- çözünme deneyi 60x60x10 cm boyutlarındaki plaklardan alınan 10x10 cm boyutlarında ve her plak için 2 şer adet olmakla üzere toplam 16 silindir numuneye uygulanmıştır. Silindir numuneler ASTM C666 Prosedür A'da belirtilen esaslara uygun olarak, ısıyı iyi iletebilen ve suda korozyona uğramayan bir malzemedен yapılmış olan iç çapı 10,6 mm olan numune hücrelerine yerleştirilmiştir. Uygun haznelere yerleştirilen silindir numuneler su ile doldurulmuş ve donma çözünme cihazına konularak döngü süresini tamamlaması beklenmiştir (Şekil 2.42). Beton örnekleri her 30

donma çözülme döngüsünde temel enine frekans değişimleri, kütle değişimleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.42. Plaklardan alınan numuneler üzerinde donma çözünme deneyi a) karotlarının donma çözünme kabına yerleştirilmesi ve b) donmuş numuneler

➤ Birim hacim kütle deneyi

Plaklar üzerinde tokluk deneyleri yapıldıktan sonra kırılmış plaklardan alınan 10x20cm boyutlarındaki karot numuneleri üzerinde TS 12390-7'ye uygun şekilde birim hacim kütle deneyi yapılmıştır (Şekil 2.43). Deney de aşağıdaki formül kullanılmıştır.

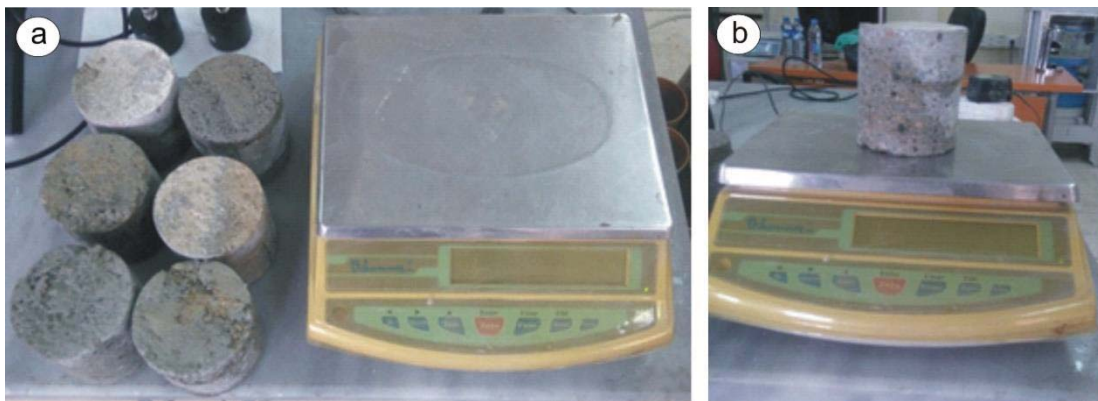
$$D = \frac{m}{v}$$

Bu formülde;

m = Numuneler suya doymuş yüzey kuru konumdayken hassas terazi ile kütlesi, kg

v = Belirlenmiş ve düzgün hacimli olduğu kabul edilerek numunenin hacmi, m³

D = Sertleşmiş betonun yoğunluğu, kg/ m³



Şekil 2.43. a, b) Plak numunelerinin birim hacim kütle deneyi

2.3.3.6. İnce Kesit

Alkali silika reaksiyonu incelemesi ve dayanım için kırılan numunelerinden elde edilen beton parçaları, mineralojik özelliklerinin belirlenmesi ve C-S-H jelini tespit etmeye yönelik 13 adet örneğin ince kesitleri hazırlanmıştır. Bunun için betonlardan kesilen 0.5x2x4 cm boyutunda plakacıklar, bir yüzeylerinin pürüzlülükleri giderildikten sonra 1mm kalınlığındaki 2.5x5 cm boyutundaki cam üzerine kanada balzamu kullanılarak yapıştırılmıştır. Cam üzerine yapışmış olan kayaç örneği, aşındırıcılar yardımıyla 0.025 mm kalınlığına kadar inceltilerek petrografik tayin için hazır hale getirilmiştir. İnce kesit örnekleri Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü İnce Kesit Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır (Şekil 2.44a).

Hazırlanan ince kesit örnekleri Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Araştırma Mikroskobu Laboratuvarı'nda Leica marka polarizan mikroskoplarıyla incelenmiştir. Beton içerisinde bulunan minerallerin durumu ve boşluk yapıları incelenmiş, CSH jelinin boşlukları doldurma şekli ve oranı irdelenmiştir. İncelenen örnekler içerisinde önemli olduğu düşünülen kesitlerden mikroskoba bağlı fotoğraf makinesi ile tek ve çapraz nikelde mikro fotoğraflama işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.44b).



Şekil 2.44. İnce kesit analizi a) İnce kesit laboratuvarı, b) Araştırma mikroskobu ve c), görüntü işleme, d) oluşturulan ince kesitler

2.3.4. Yeraltı Dolgu Deneyleri

Yeraltı dolgu deneyleri, yeraltı madenciliğinde yeraltında açılan açıklıkların doldurulması amacı ile kullanılan kütle betonda, doğal agregaya yerine geri kazanılmış agregaların kullanılabilirliğinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çimento ve çökme oranı sabit tutularak doğal agregaya yerine yüzde 0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında geri kazanılmış agregaya kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır (Tablo 2.21).

Tablo 2.21. Geri kazanılmış agregada dolgu betonda kullanımına yönelik deneysel tasarım

Toplam numune sayısı, adet	126
Numune Boyutları, cm	15x15x15
Slamp değeri, inch	6.0
Bağlayıcı Tipi	Çimento, CEM I
Puzolan Tipi/ oranı	Uçucu Kül/ %25-50 ilave
Bağlayıcı Oranı, %	%5
Agrega Tipi	Geri Kazanılmış / Doğal
Agrega Boyutu, D_{max}	0-31.5 mm
Agrega Oranı, %	0, 25, 50, 75, 100
Kür süresi, gün	7, 28, 56, 90, 180, 270

Hazırlanan karışım oranlarına uyularak 126 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler dökülmüştür. Dökülen numuneler kür havuzuna konularak 7, 28, 56, 90, 180, 270 günlük kür süresi sonun da tek eksenli basınç dayanımı, çökme, ultrasonik hız tayini deneyleri yapılmıştır (Şekil 2.45).



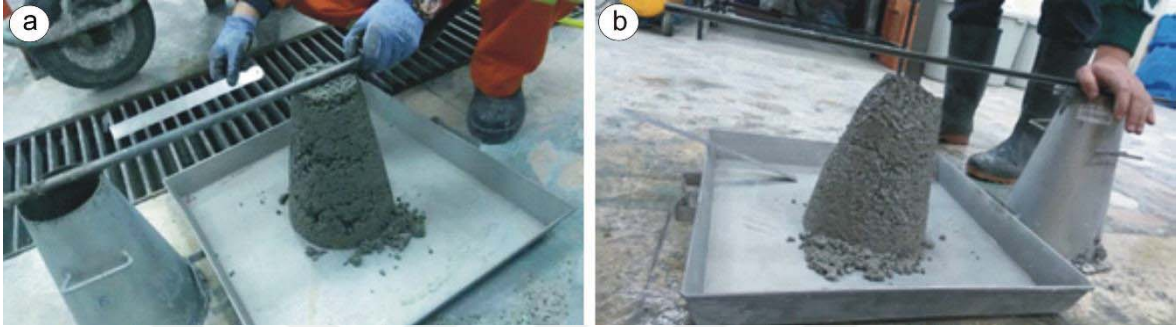
Şekil 2.45. Dolgu deneyleri a) Küp dökümler için karışımın karıştırılması, b) küp kalıplarının hazırlanması, c, d, e), küplerin doldurulması ve sıkılama işlemi, f) numunelerin kür havuzuna konulması

2.3.4.1. Çökme Testi

Yeraltı dolgusunda kullanılan kütle betonun mekanik deneylerini yapmak için doğal agrega yerine kullanılan geri kazanılmış agrega ile üretilen betonda çökme deneyi TS EN 12350-2'ye uygun şekilde yapılmıştır. Geri kazanılmış agregalar ile oluşturulan karışım

kesik huni şekilli kalıba üç tabaka halinde dökülmüştür. Her kalıbın eşit kalınlıkta olmasına ve her katmandan sonra 25 defa şişlenmesine dikkat edilerek doldurulmuştur.

Doldurma işleminden sonra kesik huni düşey şekilde yukarıya doğru çekilmiş, kalıbın üst seviyesi ile çöken betonun en yüksek noktası arasındaki mesafe (h, cm) ölçülmüş taze betonun çökmesi (slump) belirlenmiştir (Şekil 2.46).

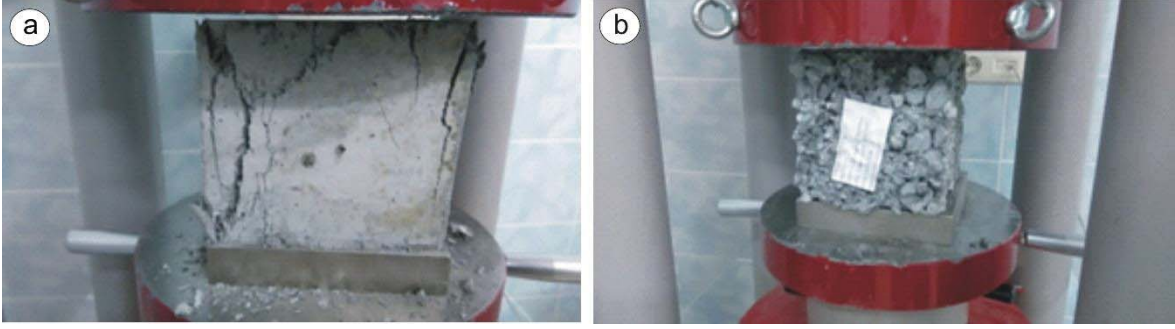


Şekil 2.46. Çökme deneyi a) çökme hunisinin çıkarılması, b) çökme miktarının ölçülmesi

Geri kazanılmış agregaya ve doğal agregaya ile üretilen bütün betonların mekanik özelliklerini karşılaştırabilmek için bütün serilerde slump değeri ölçülmüş ve 12-15cm arasında olarak ayarlandıktan sonra döküm yapılmıştır. Yeraltında yapılan dolgunun katı olması akması istenmektedir bundan dolayı üretilen tüm serilerde işlenebilirliğin TS EN 206-1 standardında verilen kıvam sınıflarından S4 sınıfında (11-16 cm) sabit tutulması amaçlanmıştır.

2.3.4.2. Tek Eksenli Basınç Dayanım Deneyi

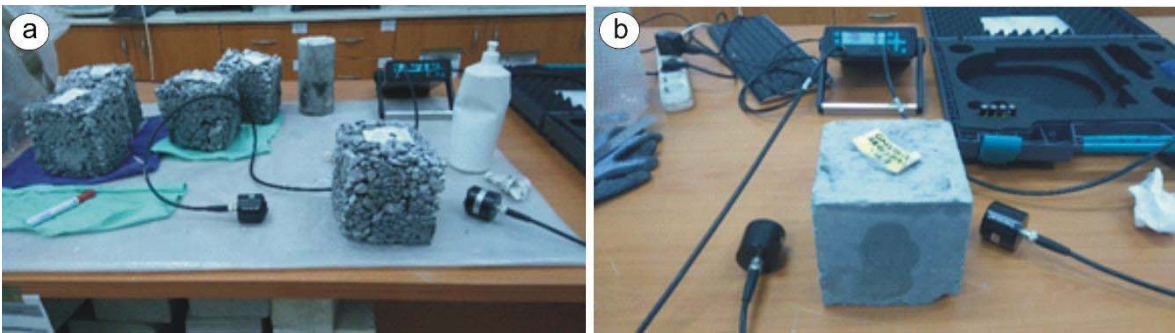
Geri kazanılmış agregaların (GKA) yeraltında oluşturulan boşlukların doldurulması amaçlı kullanılan dolguda performansını görmek için tek eksenli basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Bu amaçla Tablo 2.20 de verilen karışım oranlarında ASTM (2010) standartlarına göre 15x15x15 cm küp numuneler hazırlanmıştır. %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında doğal agregaya yerine GKA kullanılarak dökülen 90 adet numune 7, 14, 28, 56, 180 ve 270 günlük kür süresince kür tanklarında bekletilmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler 200 tonluk pres makinesi ile tek eksenli basınç dayanım testleri yapılmıştır (Şekil 2.47).



Şekil 2.47. Tek eksenli basınç dayanım deneyi a, b) küp numunelerin TEB aletine yerleştirilmesi ve kırılması

2.3.4.3. Ultrasonik Sismik Hız Tayini Deneyi

GKA'nın yeraltı beton dolgusunda kullanılabilirliğini araştırılmıştır. Bu amaçla tek eksenli basınç dayanımı öncesi kalıplardan çıkarılan 15x15x15 cm küp numunelerin ölçüm yapılacak numunenin alt ve üst yüzeyleri ile alıcı ve gönderici jeofon arasında sağlıklı bir bağlantı kurmak ve hava boşluklarını engellemek için jeofonların yüzeyleri özel jel ile kaplanarak ölçüm için hazır hale getirilmiştir. Önceden belirlenen kür süreleri (7, 14, 28, 56, 180 ve 270 gün) sonunda ASTM C 597 (2016) standartlarına uygun olarak 0,1 μ s hassaslıkta sinyal süresine ve 24-500 kHz sinyal frekansına sahip Pundit Lab⁺ model test cihazı ile yapılmıştır (Şekil 2.48).



Şekil 2.48. Ultrasonik sismik hız (UPV) deneyi a) küp numunelerin ultrasonik hız ölçü deneyine hazırlanması ve b) UPV ölçümü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Bina Molozlarının Mekanik Özellikleri

Tez kapsamında sahadan alınan blok halindeki moloz atıkları üzerinde ultrasonik sismik hız tayini, tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme deneyi, Schmidt çekici deneyi, böhme aşınma deneyi ve karbonatlaşma derinlik tayini deneyleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar başlıklar halinde irdelenmiş ve inşaat atıkları agrega olarak kullanılacağı için kayaç sınıflamalarına göre standartlar ile irdelenmiştir.

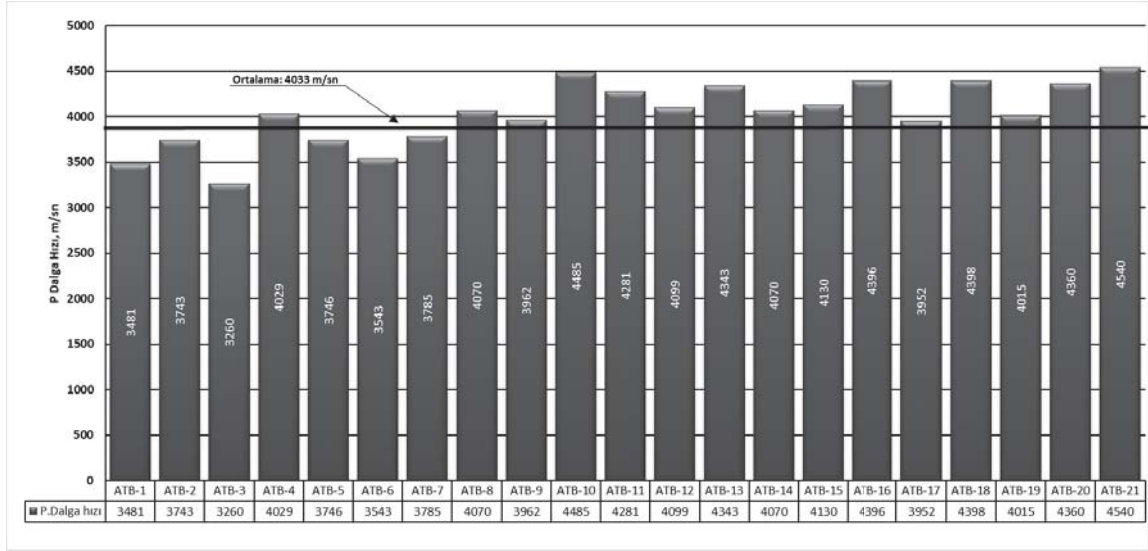
3.1.1. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Tayini

İnşaat atıklarının geri kazanılmış agrega olarak kullanılabilirliğini incelemek için inşaat atıklarından alınan moloz (MLZ) örneklerinin ultrasonik geçiş hızları (UPV) incelenmiştir. Yıkılmış yapılardan alınan beton kütlelerinden elde edilen 21 karot numunesine yapılan UPV analiz sonuçları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. İnşaat molozlarının boyutları

Numune adı	Boy, mm	Çap, mm	Numune adı	Boy, mm	Çap, mm
MLZ-1	134	51	MLZ-11	131	51
MLZ-2	134	51	MLZ-12	132	51
MLZ-3	134	51	MLZ-13	109	51
MLZ-4	137	51	MLZ-14	105	51
MLZ-5	133	51	MLZ-15	133	51
MLZ-6	141	51	MLZ-16	131	51
MLZ-7	134	51	MLZ-17	132	51
MLZ-8	134	51	MLZ-18	106	51
MLZ-9	105	51	MLZ-19	106	51
MLZ-10	135	51	MLZ-20	109	51
			MLZ-21	137	51
Boy ortalaması: 126.3 mm					

Bulunan ses geçiş hız sonuçları grafişsel olarak Şekil 3.1 de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Atık beton (ATB) numunelerinin P dalga hızı

Yapılan lmler sonucunda 51cm çapında ve ortalama 127 cm boyundaki 21 karot numunesinin P dalga hızı ortalama 4033 m/sn olarak bulunmuştur.

Betonların UPV değerlerine göre sınıflandırması Tablo 3.2’de görülmektedir.

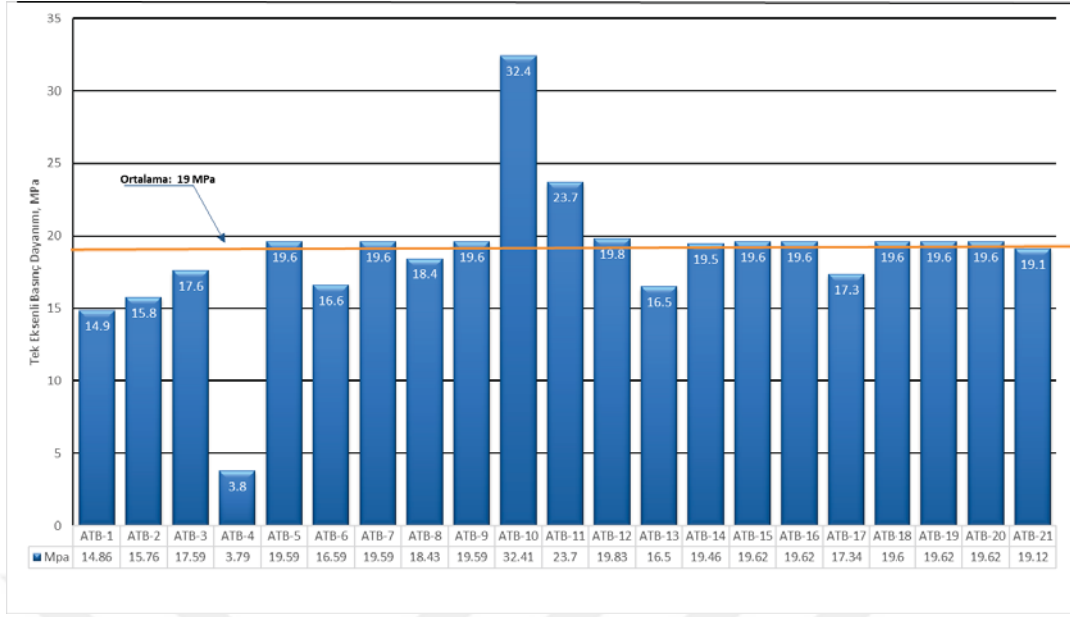
Tablo 3.2. Betonun UPV’ye göre sınıflandırılması (IS., 1992)

UPV, km/s	Beton kalitesi
>4.5	çok iyi
3.5-4.5	İyi
3.0-3.5	Orta
<3.0	Kötü

Çalışmada kullanılan inşaat molozlarının ortalama p dalga hızıolan 4033 m/sn Tablo 3.2’ye göre beton kalitesi “iyi” sınıfına girmektedir.

3.1.2. Tek Eksenli Basınç Dayanımı

Yıkılmış yapıardan alınan beton kütlelerinden elde edilen 21 karot numunesine yapılan tek eksenli basınç dayanımı Şekil 3.2’ de verilmiştir.



Şekil 3.2. Atık beton bloklarının tek eksenli basınç dayanımı

Yapılan ölçümler sonucunda 51mm çapında ve ortalama 127 mm boyundaki 21 karot numunesinin tek eksenli basınç dayanımı ortalama 19 MPa olarak bulunmuştur.

İnşaat molozlarından elde edilen bloklardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan Tek eksenli basınç dayanımı değerleri, Deer ve Miller'e göre hazırlanan sınıflamaya göre "çok düşük dirençli kaya" sınıfına girdiği görülmektedir (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Tek eksenli basınç dayanımına göre kaya sınıflaması (Deer ve Miller ,1966)

Kaya Sınıfı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı, Mpa
Çok düşük dirençli	<25
Düşük dirençli	25-50
Orta dirençli	50-100
Yüksek Dirençli	100-200
Çok yüksek dirençli	>200

3.1.3. Nokta Yükleme Deneyi

Yıkıntı atıklarından alınan beton kütlelerinden boy çap oranı 1/2 olacak şekilde 15 adet silindir numune hazırlanmıştır. Hazırlanan silindir numuneler üzerinde ISRM, 1985 standartlarına göre yapılan nokta yükleme dayanımı sonuçları Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. İnşaat atıklarının nokta yükleme sonuçları

Numune no	Nokta yükleme dayanımı, MPa	Numune no	Nokta yükleme dayanımı, MPa
1	0.9	9	1.5
2	1.6	10	1.6
3	1.8	11	2.3
4	1.4	12	1.8
5	0.6	13	1.3
6	1.7	14	2.1
7	1.6	15	1.5
8	1.3		
Ortalama: 1.53 MPa			

Yapılan ölçümler de nokta yükleme değerleri ortalama 1.5MPa olarak bulunmuştur. Bina molozlarından agrega elde edileceği için kaya olarak düşünülmüş ve deney sonucunda elde edilen verileri Bieniawski (1975) tarafından nokta yük dayanımına göre yapılan kaya sınıflandırmaları ile karşılaştırıldığında kaya sınıfı “düşük dayanımlı kaya” olarak belirlenmiştir (Tablo 3.5).

Tablo 3.5. Kayaçların nokta yük dayanımlarına göre sınıflandırılması (Bieniawski, 1975).

Kaya Sınıfı	Nokta Yük Dayanımı, MPa	Atık beton ortalama nokta yük dayanımı, MPa
Çok düşük dayanımlı	<1	
Düşük dayanımlı	1-2	1.53
Orta dayanımlı	2-4	
Yüksek dayanımlı	4-8	
Çok yüksek dayanımlı	>8	

3.1.4. Schmidt Çekici Yüzey Sertlik Deneyi

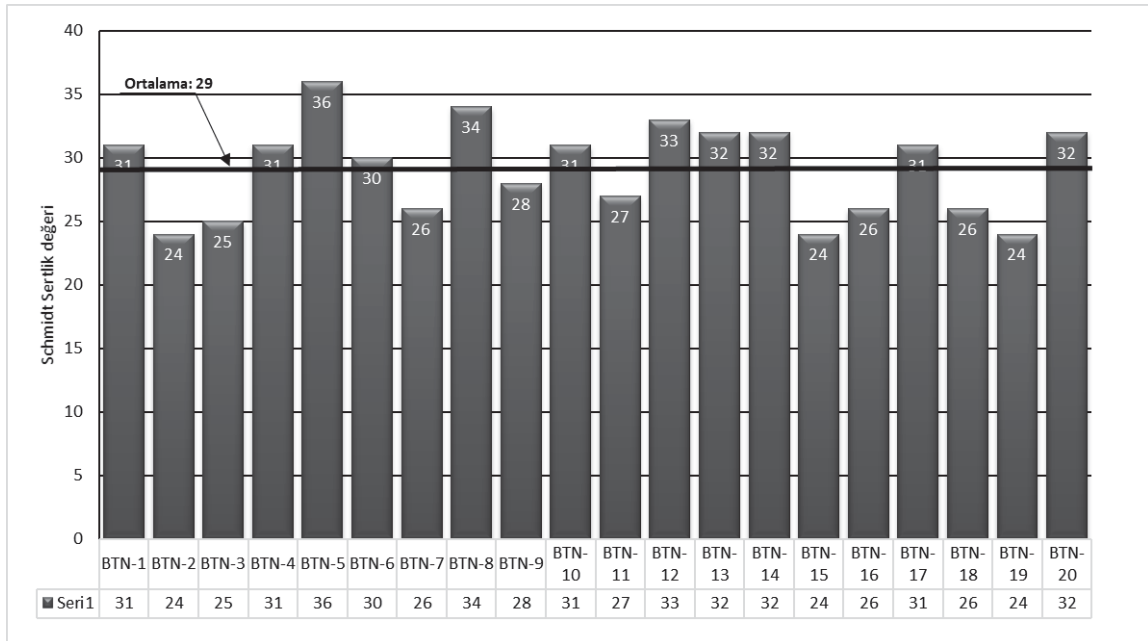
Bu çalışmada bina atıklarının donatısız betonları üzerinde ASTM C 805, (2013) standartlarına göre Schmidt sertlik değerleri bulunmuştur (Şekil 3.3). Bulunan değerlere göre beton artıklarının ortalama Schmidt çekici geri tepme değeri 29 olarak ölçülmüştür.

Schmidt, 1951’ de kayalar üzerinde yapmış olduğu sertlik sınıflaması Tablo 3.6’ da görülmektedir.

Tablo 3.6. Kayaların Schmidt sertlik değerlerine göre sınıflaması ve alınan örneklerin sınıfı

Kaya Sınıfı	Schmidt Çekici Geri Tepme Sayısı, N	Beton ortalama, N
Fevkalade Yumuşak	16-20	
Çok Yumuşak Kaya	20-24	
Yumuşak Kaya	24-30	29
Sert Kaya	30-45	
Çok Sert Kaya	45-60	
Fevkalade Sert Kaya	>60	

Tablo 3.6’da göre beton atıklarının “Yumuşak kaya” sınıfına girdiği görülmektedir (Tablo 3.6).



Şekil 3.3.Schmidt çekici sertlik sonuçları

3.1.5. Böhme Aşınma Deneyi

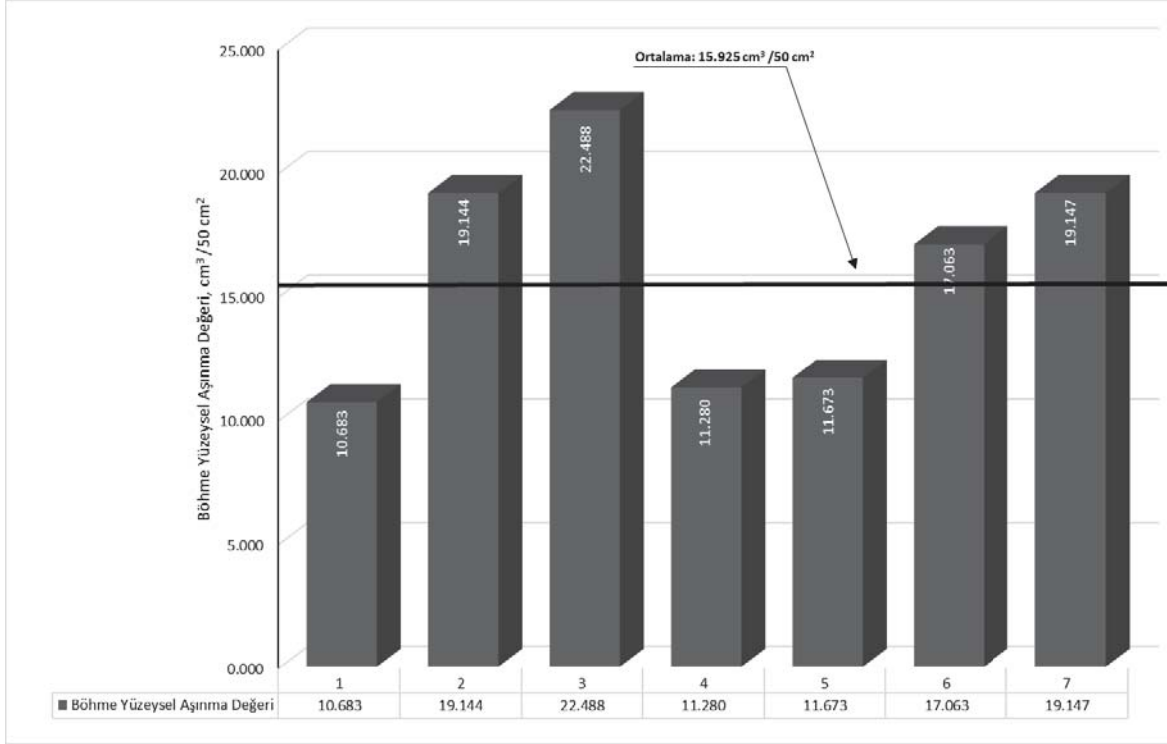
İnşaat molozlarından alınan beton numunelerden TS EN 12504'e uygun olarak en az 71 mm ebatlarında kesilen 7 adet küp numune üzerinde Böhme aşınma deneyi yapılmıştır. 7 adet küp üzerinde yapılan deney sonucunda bina atıklarının ortalama yüzey aşınma değeri $15.93 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$ olarak bulunmuştur (Tablo 3.7).

Agregaların bina dış cephelerinde ve yol kaplaması gibi aşınmanın yüksek olduğu yerlerde kullanılabilmesi için TS 10449 standartlarına göre Böhme aşınma değerinin $15 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$ olması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında bulunan değer sınır değerdir. Diğer aşınma deneyleri ile ilişkilendirilerek ya da daha az aşınmanın olduğu yerlerde GKA kullanılabilir.

Tablo 3.7. Böhme yüzeysel aşınma değerleri

Örnek no	En, cm	Boy, cm	Yükseklik, cm	İlk hacim, cm^3	Son hacim, cm^3	Böhme yüzeysel aşınma değeri, $\text{cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$
1	7.74	7.62	7.81	460.80	450.12	10.68
2	7.46	7.25	7.12	385.03	365.89	19.14
3	7.35	7.23	7.46	396.43	373.94	22.49
4	7.12	7.1	7.12	359.93	348.65	11.28
5	7.86	7.26	7.13	406.86	395.19	11.67
6	7.26	7.19	7.59	396.19	379.13	17.06
7	7.43	7.24	7.27	391.08	371.93	19.15
Ortalama						15,93

Bulunan aşınma değerleri Şekil 3.4'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 3.4. Bohme aşınma değerleri

3.1.6. Karbonatlaşma Derinliği

İnşaat atıklarından alınan 20 numune üzerinde yapılan karbonatlaşma derinliği deneyinde, beton numunelerinin kırılma yüzeylerine fenolftalein çözeltisi püskürtülerek ölçülmüştür. Serbest $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pembe renk göstermiş, karbonatlaşmış kısımlar ise renk değişimine uğramamıştır. Renk değişimine uğramayan kısımlar cetvel yardımı ile ölçülerek karbonatlaşma derinliği bulunmuştur (Tablo 3.8).

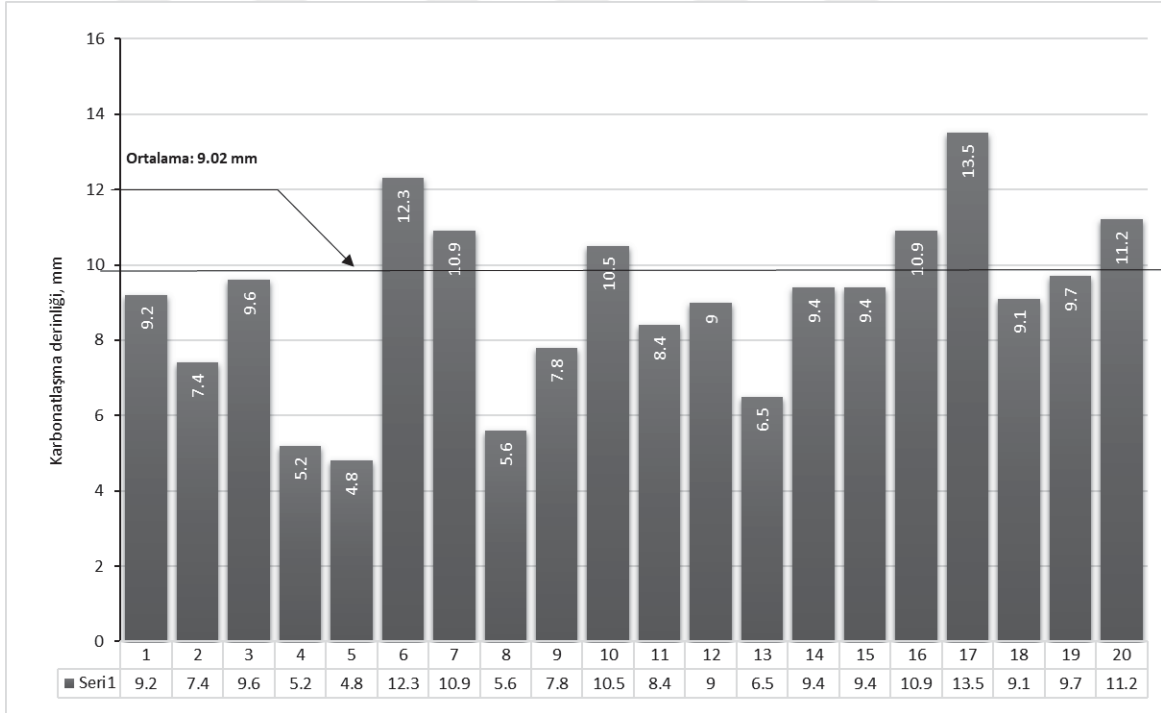
İnşaat molozlarından blok halinde ve değişik yerlerden alınan blok kütlelerden elde edilen karotlarda oluşan karbonatlaşma derinliği Şekil 3.5’de verilmiştir.

Ölçümler sonucunda ortalama karbonatlaşma derinliği 9.02 mm olarak bulunmuştur. Daha önce GKA’nın karbonatlaşması ile ilgili yapılan çalışmalarda çelişkili sonuçlar vardır. Bunun çelişkilerin sebebi, karbonatlaşma derinliğindeki farklılıklar betonun servis ömrü boyunca maruz kaldığı çevre şartlarının ve beton yaşı çeşitliliği ile değişiklik gösterebilir.

Tablo 3.8. Karbonatlaşma derinliği

Numune No	Karbonatlaşma Derinliği, mm	Numune No	Karbonatlaşma Derinliği, mm
1	9.2	11	8.4
2	7.4	12	9
3	9.6	13	6.5
4	5.2	14	9.4
5	4.8	15	9.4
6	12.3	16	10.9
7	10.9	17	13.5
8	5.6	18	9.1
9	7.8	19	9.7
10	10.5	20	11.2

Ortalama: 9.02 mm



Şekil 3.5. İnşaat molozlarından alınan karotlarda oluşan karbonatlaşma derinlikleri

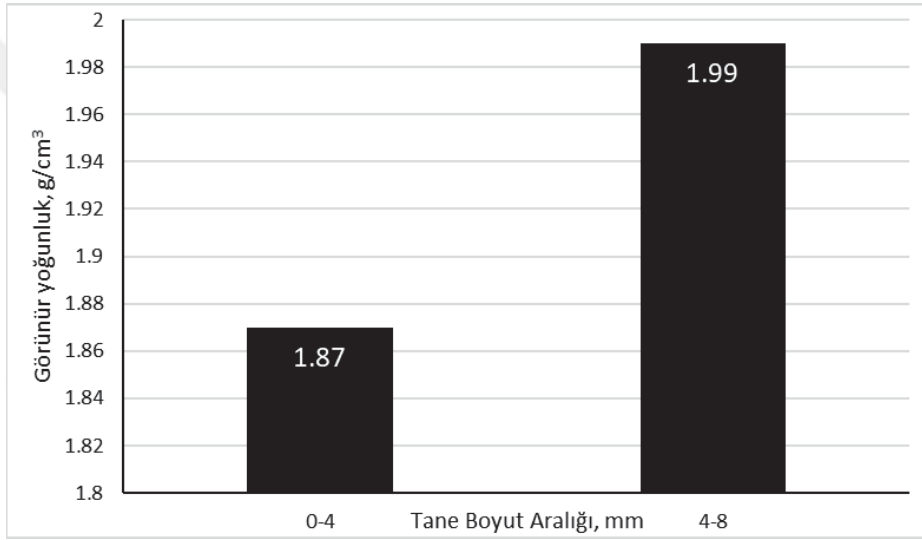
3.2. Geri Kazanılmış Agrega Deneyleri

İnşaat moloz ve atıklarından alınan blok halindeki kütleler kırılarak agrega boyutuna getirilmiştir. Geri kazanılmış agregalar (GKA) üzerinde yoğunluk, nem ve porozite deneyleri, darbe dayanım deneyi, yassılık indeksi deneyi, donma-çözünme deneyi,

hızlandırılmış harç çubuğu ve kimyasal yöntem olmak üzere iki alkali silika reaksiyonu deneyi, Mikro Deval aşınma deneyi, Los Angeles aşınma deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar başlıklar halinde irdelenmiştir.

3.2.1. Geri Kazanılmış Agregaların Yoğunluk, Porozite ve Nem İçerikleri

Çeşitli illerden alınan beton örnekleri kırılarak oluşturulan agregaların yoğunluk, porozite ve nem içeriği tayini yapılmıştır. Agregaların 0-4mm ve 4-8mm boyutlarında ki yoğunluk değeri Şekil 3.6'de görülmektedir.



Şekil 3.6. GKA görünür tane yoğunluk değerleri

Yoğunluk sonuçları incelendiğinde inşaat atıklarından kazanılan agregaların yoğunluklarının 2000 kg/m^3 den küçük olduğu ve TS EN 206 standartlarına göre hafif agreg sınıfına girdiği görülmektedir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda farklı illerden alınan inşaat molozlarından elde edilen GKA'nın porozite değeri %19,46 olarak belirlenmiştir.

İnşaat molozlarının agregaya olarak kullanılabilmesinde GKA'ların nem ve su emme potansiyelleri önemlidir. Topçu vd. (1995), yapmış oldukları çalışmada, beton üretiminde geri dönüştürülmüş agreganın kullanılabilmesi için su emme oranının düşük olması gerektiğini vurgulamıştır. Tarhan 1989 da yapmış olduğu çalışmada, kayaçları porozitelerine

göre 6 sınıfa ayırmıştır (Tablo 3.9). Çalışmada kullandığımız molozlardan oluşan GKA'lar "çok boşluklu" sınıfına girmektedir.

Tablo 3.9. Kayaçların Poroziteye Göre Sınıflandırılması (Tarhan 1989)

Kaya sınıfı	Porozite, %
Çok kompakt	<1
Az boşluklu	1-2.5
Orta boşluklu	2.5-5
Oldukça boşluklu	5-10
Çok boşluklu	10-20
Çok fazla boşluklu	>20

Yapılan çalışmada, belirtilen şekilde yapılan su emme deneyleri sonrasında GKA'nın su emme değeri %10.13 olarak bulunmuştur.

Demirel ve Şimşek 2015'de yapmış oldukları çalışmada, iri geri kazanılmış agreganın TS 500 ve TS EN 12390-3 standartlarına göre sınır değerlerini ortaya koymuşlardır, ortaya konulan standartlar ile bu çalışmada bulunan sonuçlar karşılaştırıldığında, çalışılan GKA ların zayıf agrega sınıfında yer aldığı görülmüştür (Tablo 3.10).

Tablo 3.10. GKA'ların yoğunluk ve su emme oranlarının standartlar ile karşılaştırılması

Agrega Özellikleri	GKA	TS 500 ve TS EN 12390-3 Standartları			
		Mükemmel	İyi	Orta	Zayıf
Yoğunluk, g/cm ³	1.87-1.99	>2.9	2.6-2.9	2.5-2.6	<2.5
Su emme, %	8.17	<0.5	0.5-2.0	2.0-6.0	>6.0

3.2.2. Metilen Mavisi Deneyi

İnşaat atıklarından elden edilmiş geri kazanılmış agregalar (GKA) üzerinde yapılan metilen mavisi deneyinde TS EN 933-9 standartlarına göre üst limit değeri 1.5 g/kg olarak belirtilmiştir. TS EN 933-9 standardına göre yapılan deneyde GKA sonucu 0.3 g/kg çıkmıştır (Tablo 3.11).

Tablo 3.11. Metilen mavisi deney sonuçları

	TS EN 933-9	GKA
Metilen mavisi, g/kg	≤ 1.5	0.3

3.2.3. Darbe Dayanım Deneyi

Geri kazanılmış agregalar üzerinde TS EN1097/2-D1 göre darbe dayanım deneyi yapılmıştır. Darbe dayanım deneyi 5 defa tekrar edilerek sonuçlar Tablo 3.12’de verilmiştir.

Tablo 3.12. Geri kazanılmış agrega darbe dayanım deney sonuçları

Deney No	A: Başlangıçta tartılan malzeme miktarı, g	2,36 mm’lik elek üstü malzeme miktarı, g	B: 2,36 mm’lik elek altı malzeme miktarı, g	Agrega darbe dayanımı indeksi, %
1	520	417.78	102.22	19.66
2	500	395.12	104.88	20.98
3	540	436.58	103.42	19.15
4	420	301.25	118.75	28.27
5	470	367.95	102.05	21.71
			Ortalama	21.95

Geri kazanılmış agregalar üzerinde yapılan agrega darbe dayanımı deneyi sonucunda ortalama agrega darbe dayanımı indeksi 21.95 olarak bulunmuştur. BS 812: Part 112 (1990)’de bu değer, yoğun trafiğin olduğu alanlarda kullanılacak beton döşemeler için maksimum %25, diğer beton türlerinde ise maksimum %50 olarak sınırlandırılmıştır. Bulunan değerler her iki beton türüne uygunluk göstermiştir.

3.2.4. Yassılık İndeksi

İri GKA üzerinde TS 3814 EN 933–3 standartlarına göre yapılan deney sonucunda yassılık indeksi %7.1 olarak bulunmuştur. TS 706 EN 12620 standardına göre; betonda kullanılacak agrega için yassılık indeksi oranının, iri agregalarda ağırlıkça %40’dan az olması gerektiği belirtilmiştir. Elde edilen değerler standartlara uygundur.

3.2.5. Donma-Çözünme Deneyi

TS EN 1367-1 standartlarına göre yapılan geri kazanılmış agreganın donma çözünme deneyleri yapılmıştır. Deney süresi 10 döngü olarak seçilmiştir. Sonuçları Tablo 3.13’de verilmiştir.

3 farklı grup üzerinde yapılan 10 döngü donma çözünme sonucu kütle kaybı ortalama %1.19 olduğu görülmüştür.

Tablo 3.13. GKA’ların donma çözünme deney sonuçları

Deney No	Tane boyutu 8-16 mm beslenen malzeme, g	10 döngü sonunda, g	10 döngü sonunda kütle kaybı, %
1	2000	1976.69	1.17
2	2000	1952.36	2.38
3	2000	1956.36	2.18
		Ortalama	1.91

Suda yapılan deney sonucunda donma çözünme değeri ortalama %1,19 olarak bulunmuştur. Donma çözünme deneyi TS EN 1367-1’e göre uygulanmıştır. Elde edilen bu değerler Tablo 3.14’de belirtilen %2 sınır değerinin altında olduğu ve F₂ sınıfına girdiği görülmüştür.

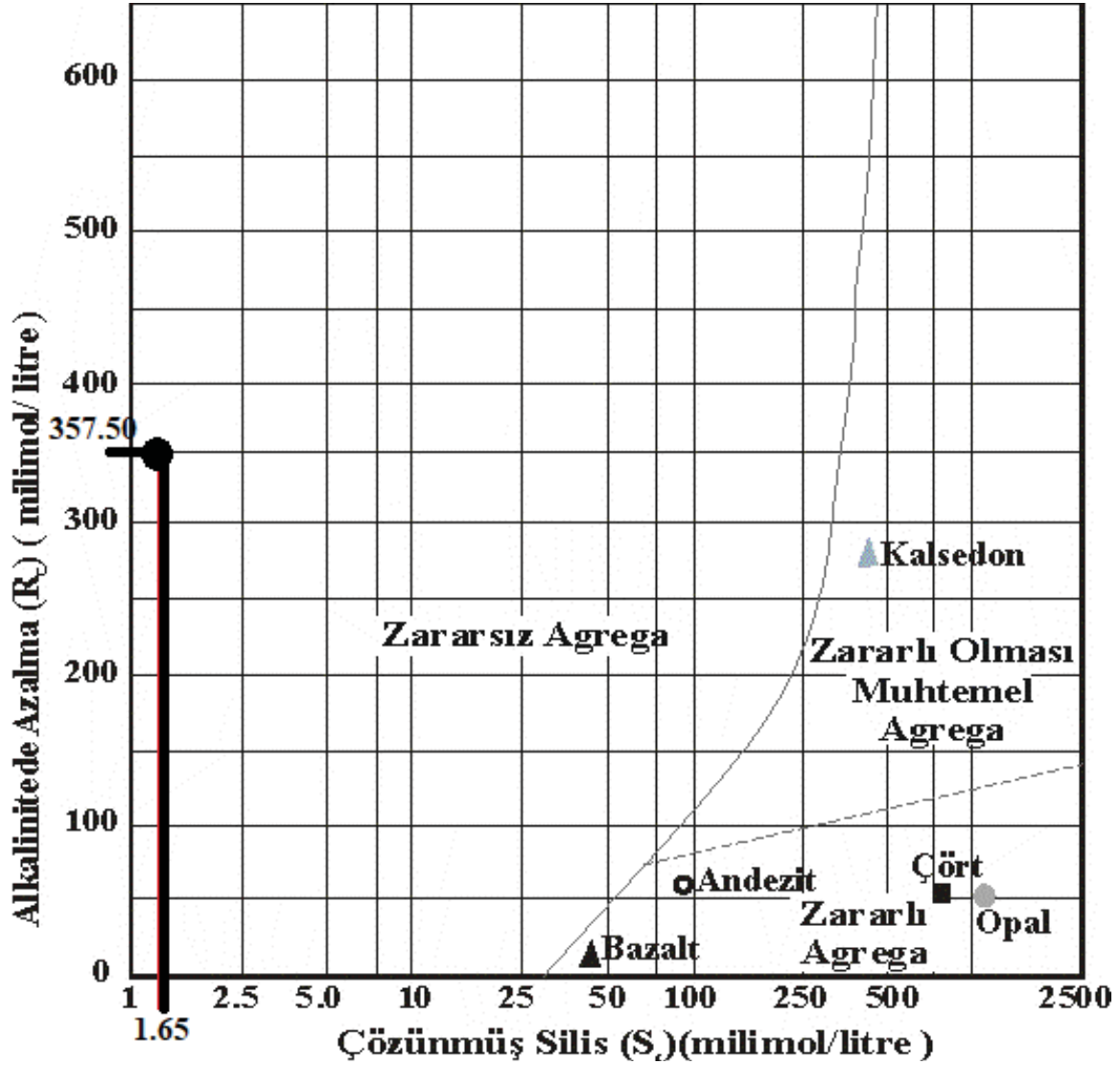
Tablo 3.14. En yüksek donma-çözülme direnç değerlerine göre kategoriler (TS 706 EN 12620).

Donma /Çözülme sonucu Kütlece Kayıp (%)	Kategori (F)
≤1	F ₁
≤2	F ₂
≤4	F ₃
>4	F _{beyan}
Serbest	F _{NR}

3.2.6. ASR Deneyi (Kimyasal Yöntem)

Geri kazanılmış agregaların içerdiği aktif silis miktarının ölçülmesi için TS 2517 standartlarına göre yapılan deney sonucundan geri kazanılmış agregaların çözülmüş silis

miktarı (S_c) 1.65 milimol/litre, alkalimetrede azalma (R_c) 357.50 milimol/litre olarak bulunmuştur. Abakta geri kazanılmış agrega zararsız kısma düştüğü görülmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Geri kazanılmış agreganın aktif silis içeriği

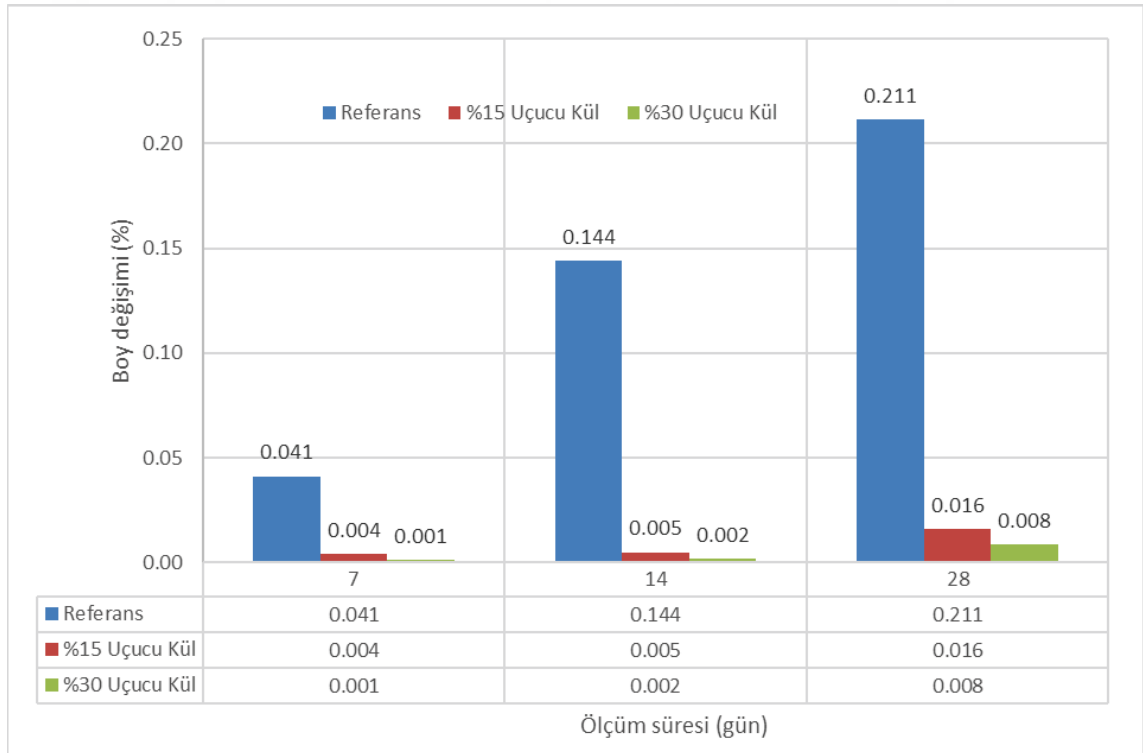
3.2.7. Alkali Silika Reaksiyonu Deneyi (Hızlandırılmış Harç Çubuğu)

30 adet harç çubuğu üzerinde yapılan hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri sonucunda, örneklerin boy değişimi değerleri belirlenmiştir. Her karışım oranı için 2 numune dökülmüş 7-14-28 gün sonunda alınan ölçümlerin ortalamaları üzerinden değerlendirme yapılmıştır (Tablo 3.15).

Tablo 3.15. Harç çubukların boy değişim değerleri

	L ₀ -a ₀ , mm	L ₇ -a ₀ , mm	L ₁₄ -a ₀	L ₂₈ -a ₀
Referans	0.30	0.40	0.43	0.64
%15 Uçucu Kül	2.01	2.02	2.02	2.06
%30 Uçucu Kül	0.02	0.03	0.03	0.05
%15 Kil	1.64	1.66	1.70	1.73
%30 Kil	4.24	4.45	4.47	4.49

Uçucu kül katkılı harç çubuklarının boy değişimleri ilişkin Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8. Uçucu kül katkılı harç çubukların boy uzama değerleri

Uçucu kül katkılı harç örneklerinin boy değişim değerlendirmesinde; Referans örneklerin 7 günlük boy değişim değerlerinin %0.144 ile alkali silika reaksiyonu (ASR) açısından riskli bölgededir ve bu durumdan dolayı deney 28. güne uzatılmıştır. 28. gün sonunda %0.211’lik boy değişimi ile GKA alkali silika reaksiyonu açısından risklidir. Uçucu kül katkılı harç örneklerinde uçucu kül miktarının artışı ile boy değişiminin azaldığı görülmüştür. En az genleşme %30 uçucu kül katkılı örneklerde belirlenmiştir. Davraz ve

Gündüz tarafından yapılan araştırmada 16. gün sonunda ASR değeri 0.2 den büyükse agrega zararlı olarak değerlendirilmektedir (Davraz ve Gürbüz, 2004).

Uçucu kül katkılı örneklerin ölçülen boy değişim değerleri arasında istatistik çalışmada yapılmış, örneklerin 7, 14 ve 28 günlük boy değişimleri arasındaki istatistik değerlendirmede, referans örneklerin arasındaki ilişki denklemi $y=0.0076x+0.0076$ olduğu ve arasındaki korelasyonun ise $R^2=0.9058$ olduğu belirlenmiştir.

Uçucu kül örnekleri arasındaki ilişki denklemi %15 uçucu kül için: $y=0.0006x-0.0014$ ve arasındaki korelasyonun ise $R^2=0.9231$, %30 uçucu kül için: $y=0.0004x+0.0019$ ve $R^2=0.9187$ olduğu belirlenmiştir.

Pişmiş kil katkılı harç çubuklarının boy değişimleri ilişkin Şekil 3.9'de görülmektedir.

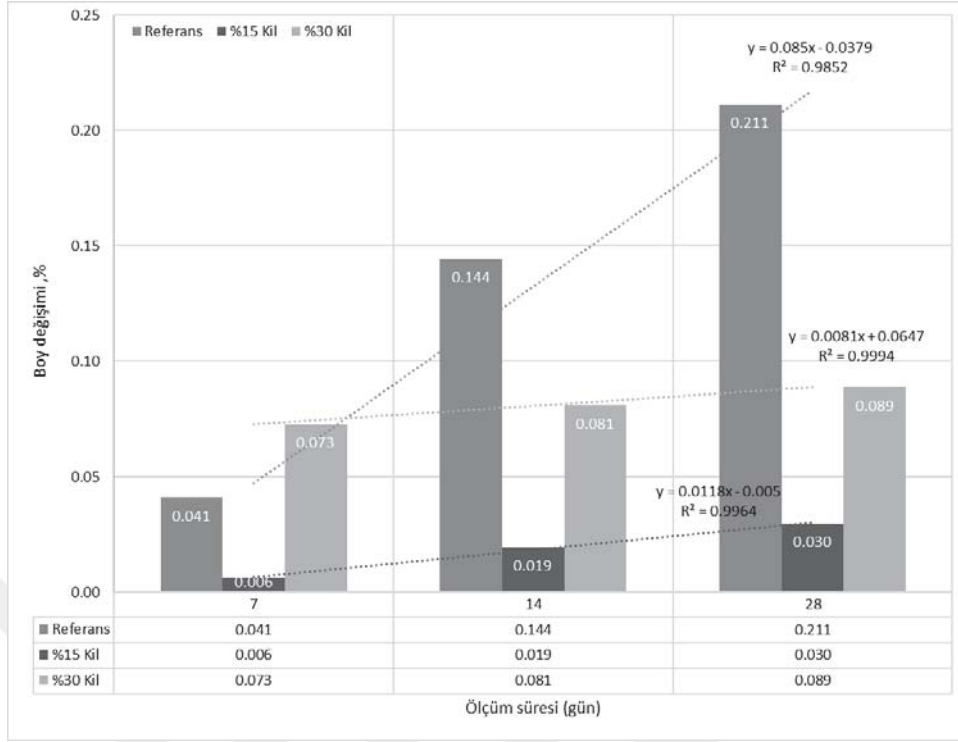
Pişmiş kil katkılı harç örneklerinin boy değişim değerlendirmesinde; referans örneklerin 7 günlük boy değişim değerlerinin %0.144 ile alkali silika reaksiyonu açısından riskli bölgededir ve bu durumdan dolayı deney 28. güne uzatılmıştır. 28. gün sonunda %0.211'lik boy değişimi ile GKA alkali silika reaksiyonu (ASR) açısından zararlı olabileceği, pişmiş kil katkılı harç örneklerinde uçucu kül miktarının artışı ile boy değişiminin azaldığı görülmüştür. En az genleşme %30 pişmiş kil katkılı örneklerde belirlenmiştir. Pişmiş kil katkılı örneklerin ölçülen boy değişim değerleri arasında istatistik çalışmada yapılmış, örneklerin 7, 14 ve 28 günlük boy değişimleri arasındaki istatistik değerlendirmede referans örneklerin arasındaki ilişki denklemi $y=0.0076x+0.0076$ olduğu ve arasındaki korelasyonun ise $R^2=0.9058$ olduğu belirlenmiştir.

Pişmiş kil katkılı örnekleri arasındaki ilişki denklemi %15 pişmiş kil için: $y=0.0007x+0.0668$ ve arasındaki korelasyonun ise $R^2=0.9544$, %30 pişmiş kil için: $y=0.0011x+0.0011$ ve $R^2=0.9386$ olduğu belirlenmiştir.

Bütün katkı türlerine göre boy değişimleri ilişkin Şekil 3.10'de görülmektedir.

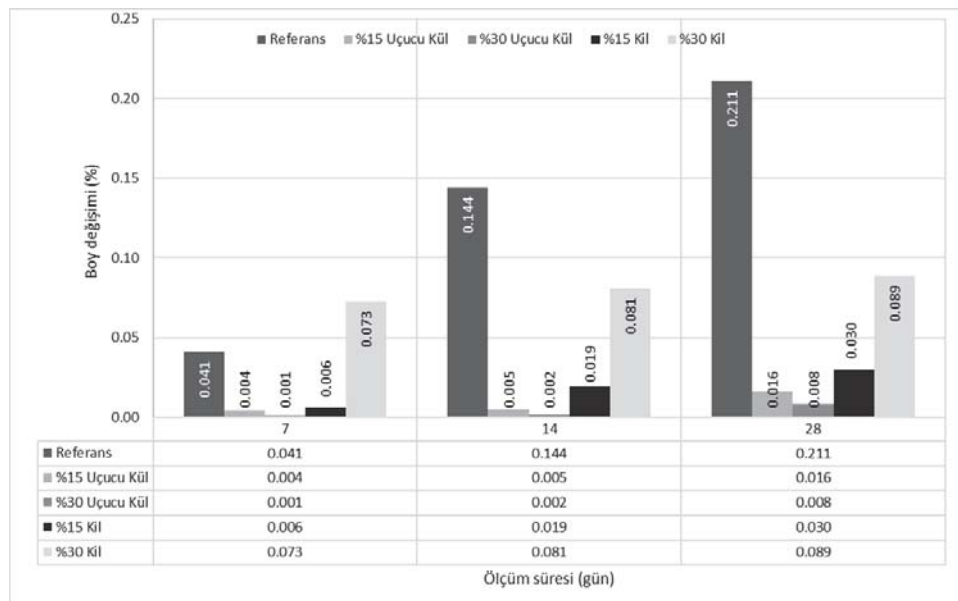
Sonuçlar doğrultusunda harç çubuğunda kullanılan atık inşaat betonlarından elde edilen agregaların "potansiyel olarak zararlı" olduğuna sonucuna varılmıştır. Uçucu kül ve pişmiş kil kullanımının ASR yi yaklaşık %17 düşürdüğü belirlenmiştir.

ASR riski agregada bulunan ikincil kuvars, kuvarsit, çört, fosil silisi gibi unsurların gözenek suyunda bulunan Na^{++} , K^{++} iyonları ve OH^- iyonları ile tepkimeye girerek agrega içerisinde ASR jeli oluşturması, sonrasında bu jelin çevreden su emerek şişmesi ve zamanla agrega içerisinde mikro çatlak oluşumu nedeniyle gerçekleşir.



Şekil 3.9. Pişmiş kil katkılı harç çubukların genleşme değerleri

Na^{++} , K^{++} gibi iyonların fosil silislerle, zararlı kuvars vd. ile reaksiyon vermemesi için yüksek puzolanik içeriğe sahip mineral katkıları kullanılabilir. Tez kapsamında kullanılan mermer tozu puzolanik özelliği olmadığı için ASR oluşumuna bir etkisi olmamıştır.



Şekil 3.10. Bütün katkılı ve referans harç çubukların boy uzama değerleri

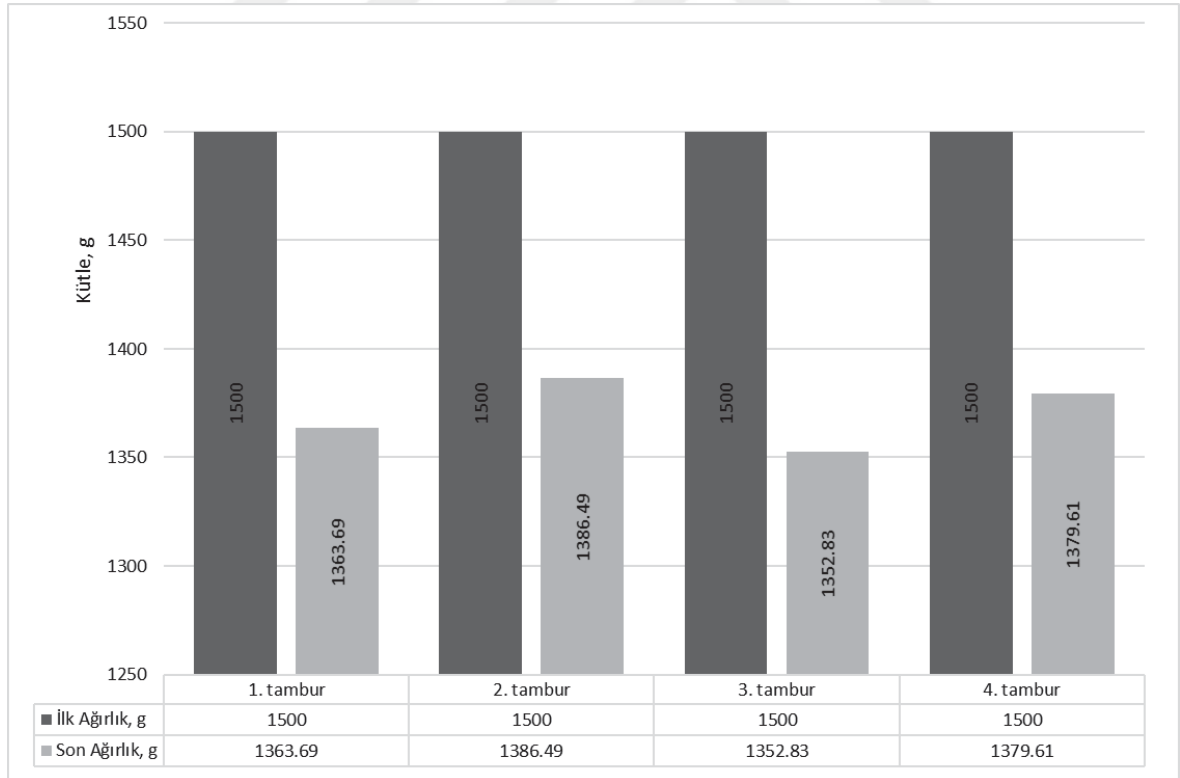
3.2.8. Mikro Deval Aşınma Deneyi

Geri kazanılmış agregalar üzerinde yapılan mikro-deval aşınma deneyinde 4 tamburda ortalama 129 g kütle kaybı olduğu görülmüştür (Şekil 3.11).

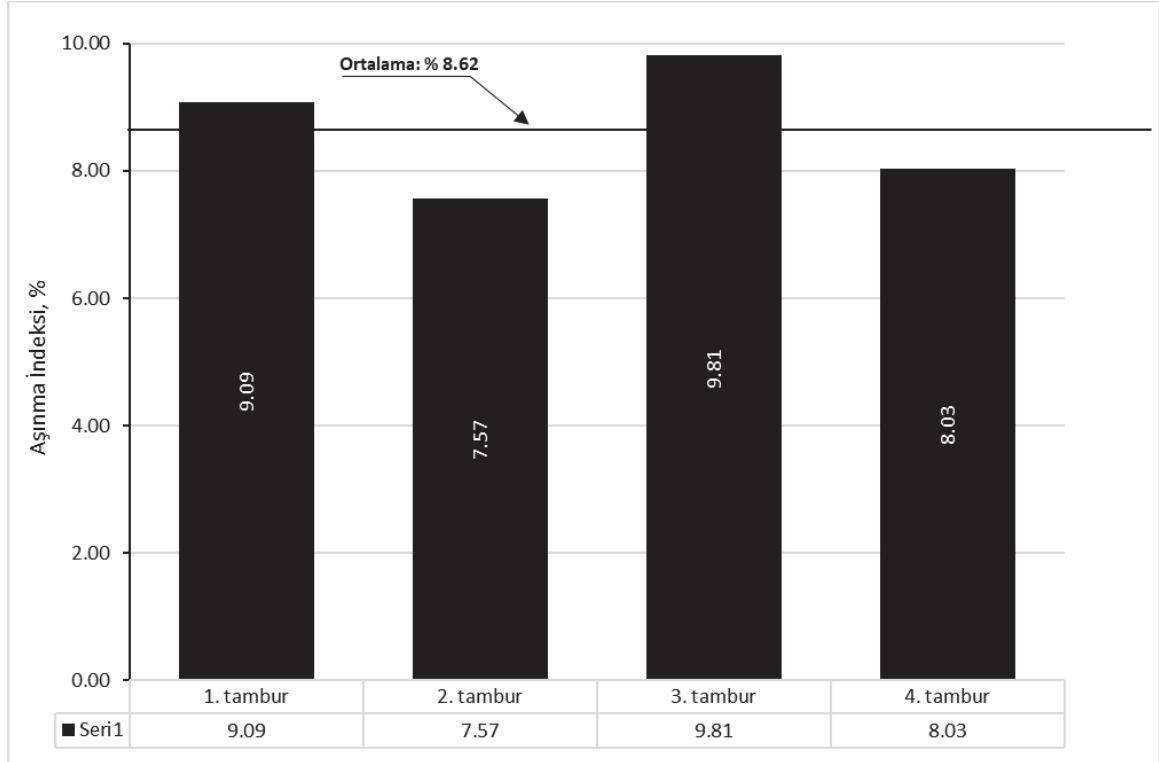
TS 706 EN 12620 standartlarında iri agregalarda Mikro-Deval aşınma direncinin %35 ‘den daha az olması istenmektedir (TS 706 EN 12620, 2003).

Yapılan 4 adet deney sonucunda birinci tamburda %9.09 ikinci tamburda %7.57, üçüncü tamburda %9,81 ve dördüncü tamburda ise %8.03 kütle kaybı gerçekleşmiştir (Şekil 3.12).

4 tamburdaki mikro-deval aşınma kaybının ortalaması alınarak agreganın mikro-deval aşınma kaybı yüzde %8.62 olarak hesaplanmıştır. Geri kazanılmış agrega TS 706 EN 12620 standartlarında belirtilen en yüksek aşınmaya karşı direnç değerlerine göre M_{DE} 10 sınıfına girmektedir (Tablo 3.16).



Şekil 3.11. Micro-deval deneyinde tamburlarda meydana gelen kütle kaybı



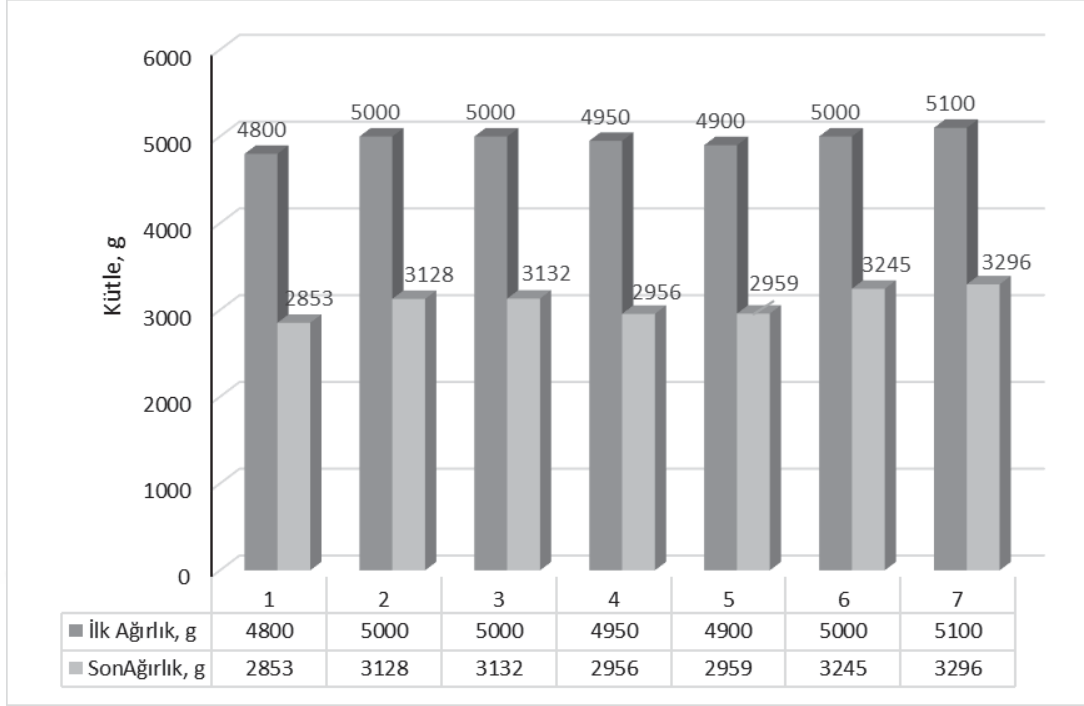
Şekil 3.12. Mikro deval aşınma indeksi

Tablo 3.16. En yüksek aşınmaya karşı direnç değerlerine göre kategoriler (TS 706 EN 12620, 2003)

Mikro Deval Katsayısı	Kategori, M_{DE}
<10	$M_{DE} 10$
≤ 15	$M_{DE} 15$
≤ 20	$M_{DE} 20$
≤ 35	$M_{DE} 35$
>35	M_{DE} beyan
Serbest	M_{DE} NR

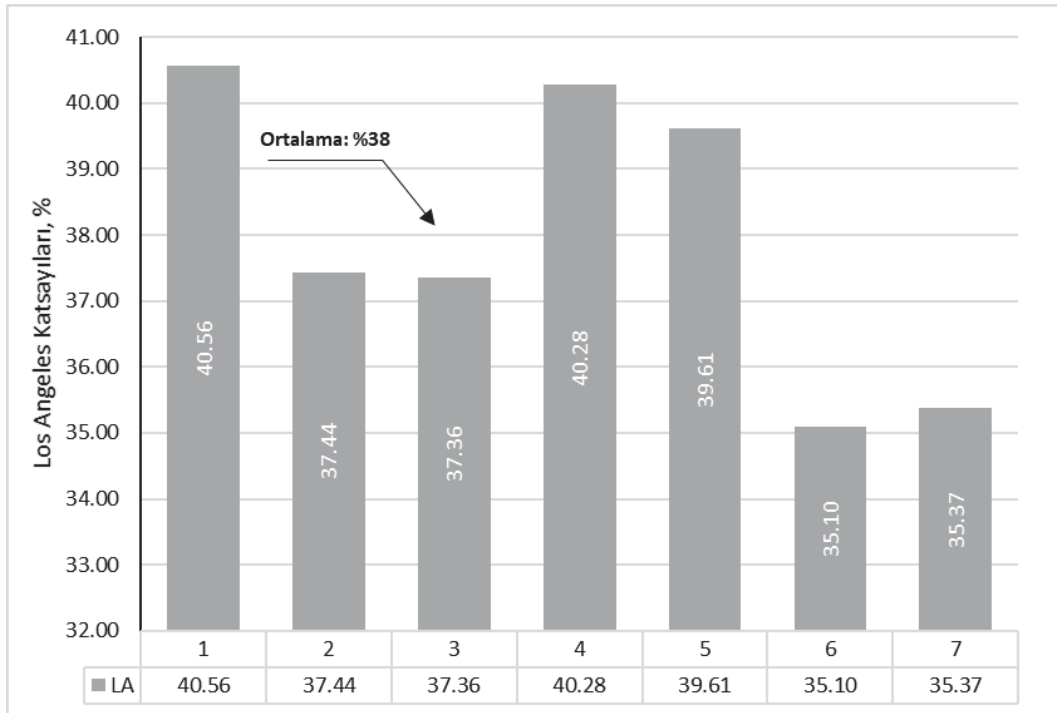
3.2.9. Los Angeles Deneyi

Geri kazanılmış agregalar üzerinde TS 706 EN 12620 standardına göre yapılan Los Angeles deneyi sonucundaki parçalanma değeri hakkında bilgi vermektedir. Aşınma dayanımı değeri ne kadar az ise, danelerin mekanik etkilere karşı dayanımının o derece yüksek olduğu kabul edilir. Her deneyde yaklaşık 5000 g malzeme kullanılmıştır ve deney 7 defa tekrar edilmiştir. Deney sonucunda geri kazanılmış agregada ortalama 1880g kütle kaybı görülmüştür (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Los Angeles deneyi sonucunda oluşan kütle kaybı

Geri kazanılmış agregatlar üzerinde yapılan Los Angeles Deneyi sonucunda ortalama LA katsayısı %38 olarak bulunmuştur (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Geri kazanılmış agregatların Los Angeles aşınma indeksi

İnşaat atıkları ve molozlardan alınan örneklerden oluşturulan agregalar Tablo 3.17’de yapılan kategoriye göre LA₄₀ sınıfına girmektedir.

Tablo 3.17. Los Angeles Katsayı değerlerine göre kategoriler (TS 706 EN 12620)

Los Angeles Katsayısı	Kategori, LA
≤15	LA ₁₅
≤20	LA ₂₀
≤25	LA ₂₅
≤30	LA ₃₀
≤35	LA ₃₅
≤40	LA ₄₀
≤50	LA ₅₀
>50	LA beyan
Serbest	LA _{NR}

3.3. Püskürtme Beton Deneyleri

Hazırlanan 10x20 cm silindir numuneler 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 270 günlük kür süresi sonunda tek eksenli basınç dayanımı, çökme, ultrasonik hız tayini deneyleri yapılmıştır bulunan sonuçlar başlıklar halinde irdelenmiştir.

3.3.1. Çökme Testi

Geri kazanılmış agregaların püskürtme beton amaçlı yeraltında kullanılabilirliği ölçmek amacı ile yapılan çökme testinde su çimento oranı sabit tutularak slump hunisi ile yapılan çökme testlerinde slump değerleri ortalama 19.15 cm çıkmıştır. Kontrol numunesinde ise slump değeri 19.3 cm çıkmıştır (Tablo 3.18Tablo 3.19).

Geri kazanılmış agrega ve doğal agrega ile üretilen bütün betonların mekanik özelliklerini karşılaştırabilmek için bütün serilerde slump değeri ölçülmüş ve 17-20 cm arasında ölçülmüştür. Üretilen tüm serilerde işlenebilirliği TS EN 206-1 standardında verilen kıvam sınıflarından S4 sınıfında (16-21 cm) olduğu görülmüştür (Tablo 3.19).

Tablo 3.18. Püskürtme beton çökme değerleri

Karışım Oranları, %	KOD	Çökme değeri	
		İnch	cm
100 Doğal agregası	DA	7.60	19,3
100 geri kazanılmış agregası	100GKA	7.32	18.6
75 geri kazanılmış agregası	75GKA	7.52	19.1
50 geri kazanılmış agregası	50GKA	7.31	18.56
25 geri kazanılmış agregası	25GKA	7.95	20.2
100 GKA (2 kg) Polipropilen Lif	2PLYLİF	8.03	20.4
100 GKA (4 kg) Polipropilen Lif	4PLYLİF	8.54	21.7
100 GKA (6 kg) Polipropilen Lif	6PLYLİF	6.93	17.6

Tablo 3.19. TS EN 206-1 standardına göre kıvam sınıflaması

Sınıf	Çökme, mm
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	>220

3.3.2. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı

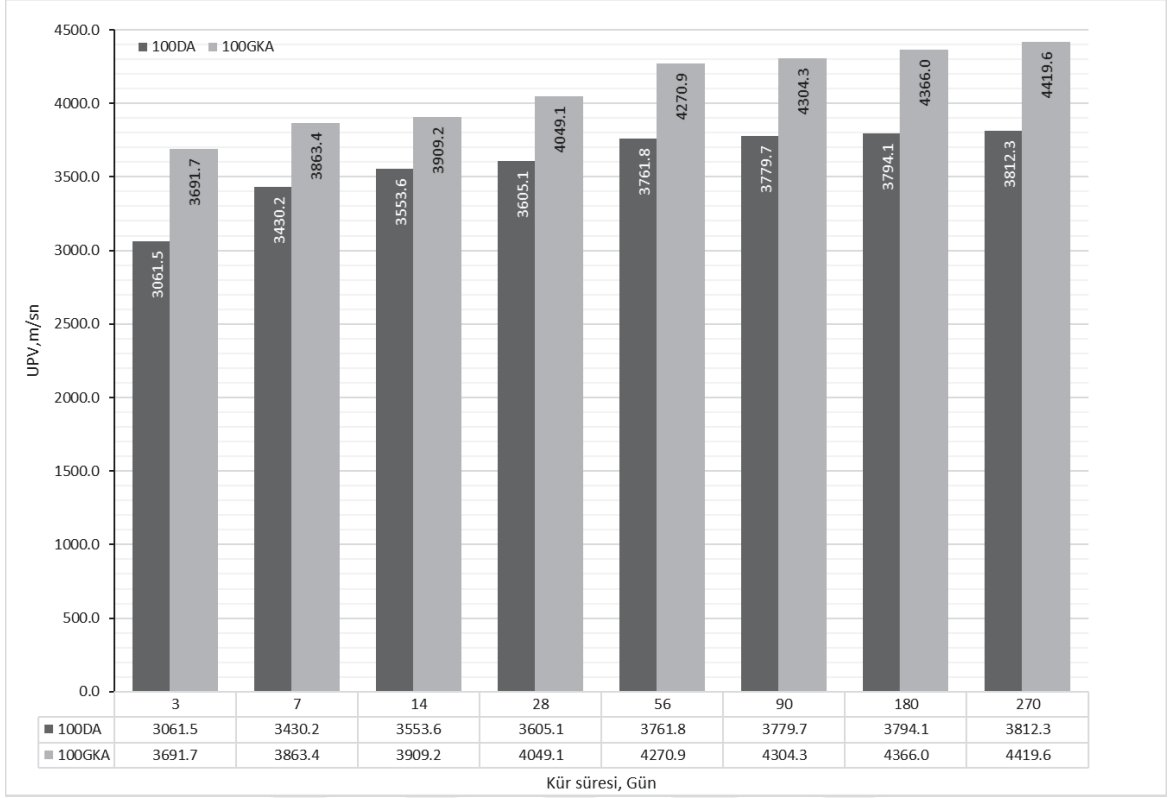
Geri kazanılmış agreganın (GKA) madencilikte püskürtme betonda kullanılabilirliğine yönelik dökülen silindir numunelerin içerdiği boşluk oranı ve dayanımını tahminine yönelik ultrasonik ses geçiş hızı (UPV) deneyi yapılmıştır. Püskürtme betondaki geri kazanılmış agregası oranı arttıkça ses geçiş hızının arttığı ve en uzun kür süresi (270 gün) sonunda 100GKA'nın 4420m/s olduğu belirlenmiştir. Doğal agregası (DA) katkılı püskürtme betonlarda uzun süreli ultrasonik ses geçiş hızının en düşük katkı (25GKA) GKA'yı geçemediği ortaya konmuştur. Püskürtme betonda P-dalgası hızları Tablo 3.20'de verilmiştir.

Tablo 3.20. Püskürtme betonda kür süresine bağlı ultrasonik P-dalga hız değerleri

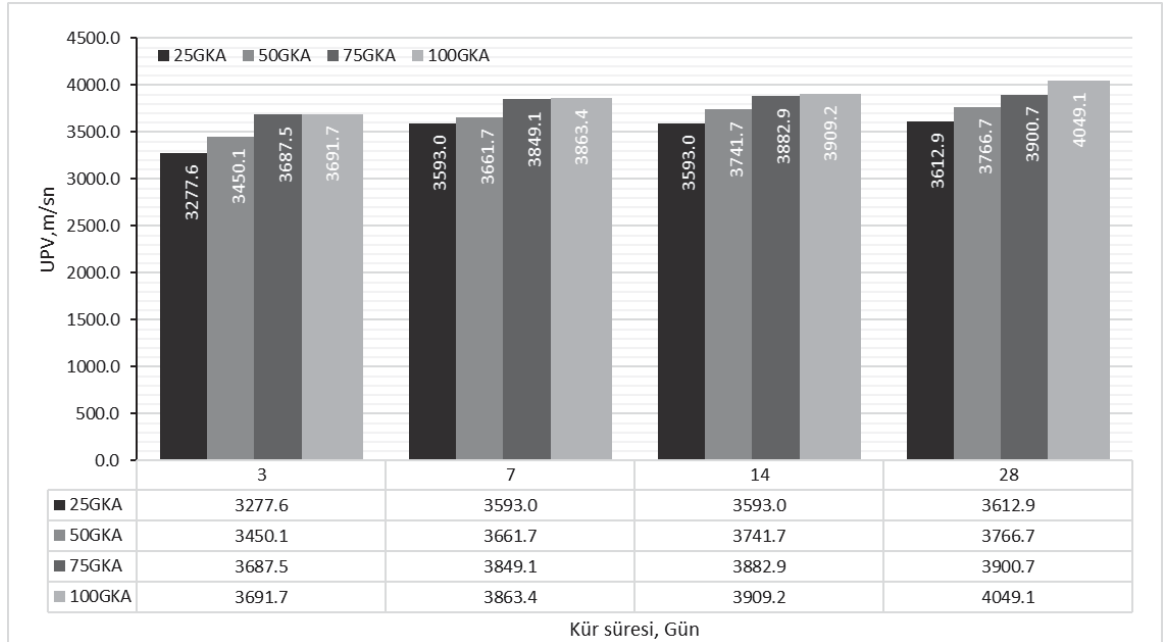
		Kür Süreleri							
		3	7	14	28	56	90	180	270
Numune kodu	Karışım oranları, %	Ultrasonik P-dalgası geçiş Hızları, m/s							
		100DA	100 Doğal agregası	3061	3430	3554	3605	3762	3851
100GKA	100 geri kazanılmış agregası	3692	3863	3909	4049	4271	4304	4366	4420
75GKA	75 geri kazanılmış agregası	3687	3849	3883	3901	4020	4216	4120	4129
50GKA	50 geri kazanılmış agregası	3375	3713	3840	3767	3788	3848	3932	3988
25GKA	25 geri kazanılmış agregası	3278	3593	3593	3613	3881	3976	3940	3992
2PLYLİF	100 GKA 2 kg polipropilen	3421	3616	3741	3851	3900	3924	3960	3976
4PLYLİF	100 GKA 4 kg polipropilen	3424	3726	3754	3861	3873	3877	3912	3971
6PLYLİF	100 GKA 6 kg polipropilen	3634	3776	3910	3956	3990	4041	4146	4190

ASTM C 597 (2009) standardına göre yapılan ve değerlendirilen silindir numuneler üzerinde yapılan ultrasonik ses geçiş hızı deneylerin de kür süresine bağlı olarak P-dalga geçişlerinin genel olarak arttığı, doğal agregası (DA) katkılı betonlara nazaran geri kazanılmış agregası (GKA) katkılı püskürtme betonlarda geçişlerin daha hızlı olduğu görülmüştür (Şekil 3.15).

Silindir numuneler içerisinde doğal agregası yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanılan geri kazanılmış agregası oranı arttıkça kısa kür süresinde UPV hızının arttığı belirlenmiştir. Kısa kür süresinde bütün karışımlar için ortalama %9 olmuştur. 28 gün sonunda en fazla artış %10 ile 25GKA dökümlerinde olmuştur. En az artış ise %6 ile 75GKA örneklerinde görülmüştür (Şekil 3.16).

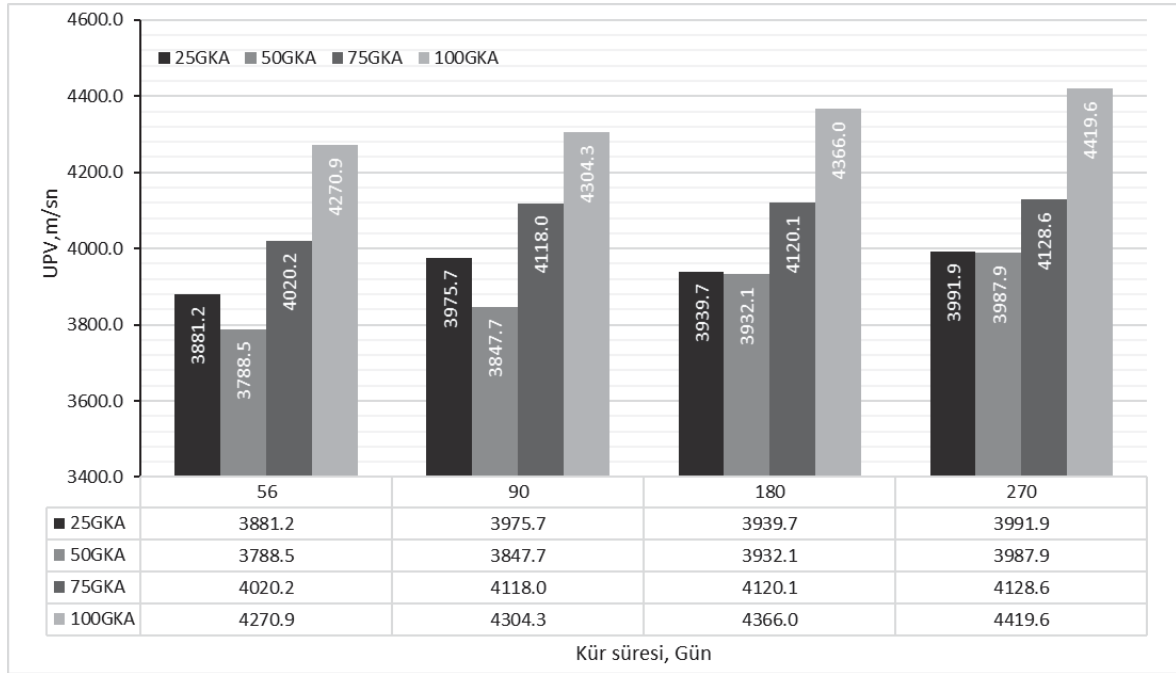


Şekil 3.15. Geri kazanılmış agrega ve doğal agregalı silindir numunelerin ultrasonik ses geçiş hızı



Şekil 3.16. Geri kazanılmış agrega oranının kısa kür süresinde UPV'ye etkisi

Kısa kür süresinde UPV’de meydana gelen artış uzun kür süresinde yavaşlayarak arttığı daha belirgin bir şekilde görülmektedir. 270 gün sonunda en fazla artış %3,5 ile 100GKA dökümlerinde olmuştur. En az artış ise %2.7 ile 75GKA örneklerindedir (Şekil 3.17).

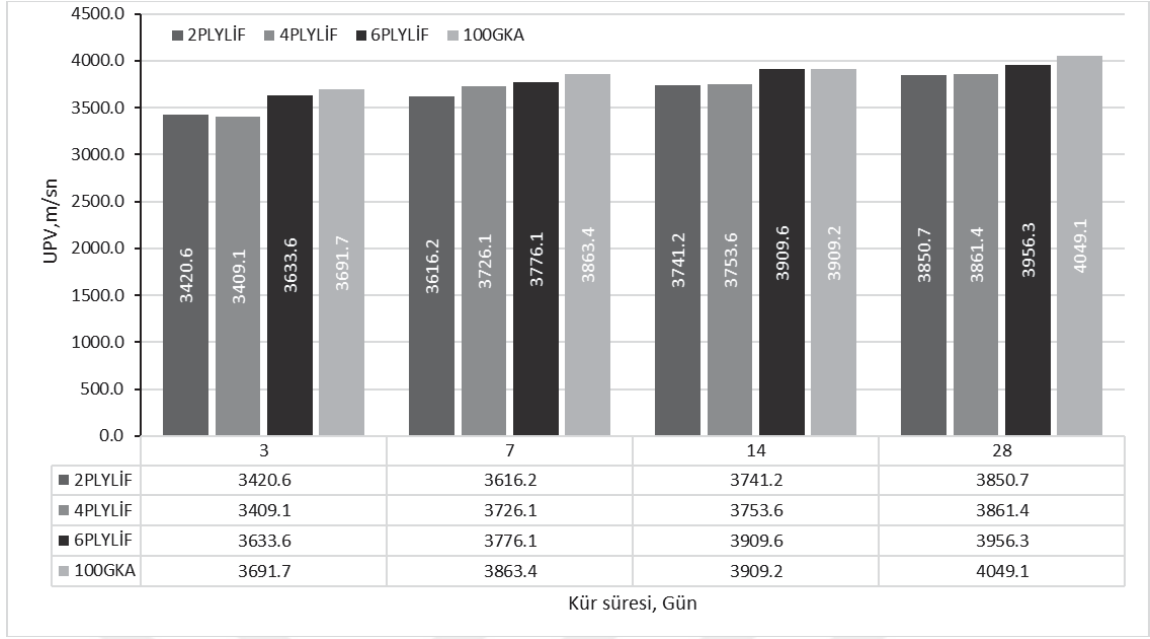


Şekil 3.17. Geri kazanılmış agrega oranının uzun kür süresinde UPV’ye etkisi

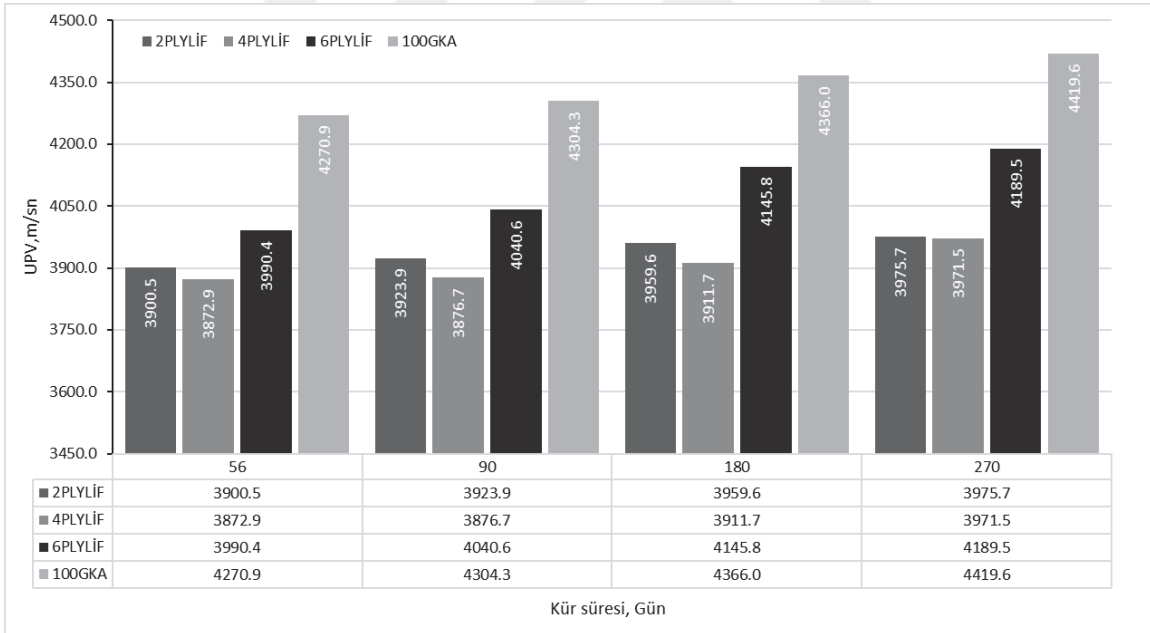
Püskürtme betonda kullanılan polyester liflerin uygulanan beton karışımındaki oranları (2, 4, 6 kg) arttıkça P-dalga geçişleri artmaktadır. Kısa kür sürelerinde kür süresi ile UPV hızının doğru orantılı olduğu, lifli betonların lifsiz betonlara kıyasla daha düşük hızlara sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.18).

Uzun kür sürelerinde lifli betonlarda en hızlı geçiş 270 gün sonunda 6 kg lif katkılı (6PLYLİF) püskürtme betonda 4189.5m/s olarak ölçülmüştür. Referans numunelerindeki UPV hızının bütün kür sürelerinde en fazla çıktığı saptanmıştır (Şekil 3.19).

Lif oranındaki artışa bağlı olarak basınç dayanımı ve UPV’de oluşan düşüşün başlıca sebebi beton içerisinde lif kaynaklı oluşan boşluklardır.



Şekil 3.18. Lif katkı miktarının kısa dönem UPV üzerinde etkisi



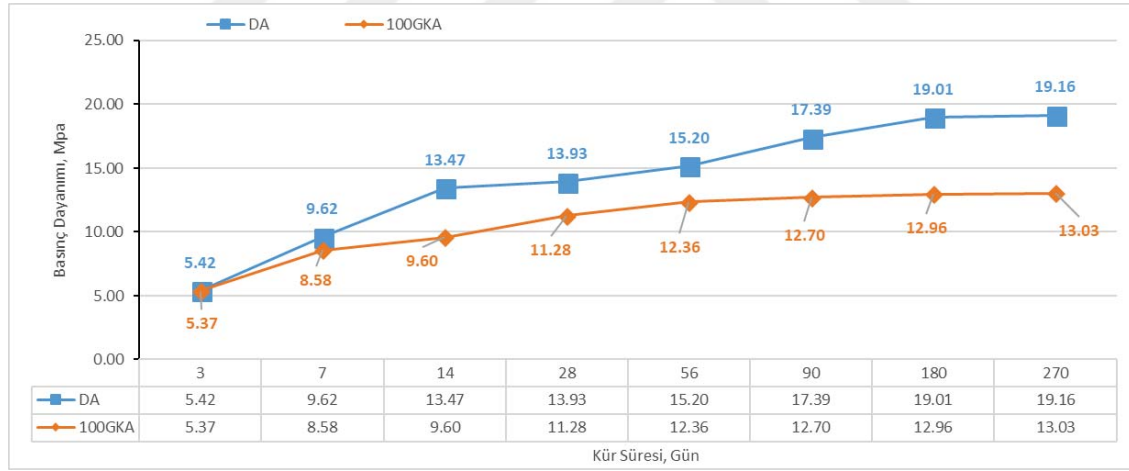
Şekil 3.19. Lif katkı miktarının uzun dönem UPV üzerinde etkisi

3.3.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımı

Geri kazanılmış agreganın madencilikte püskürtme betonda doğal agrega yerine kullanılabilirliğini görmek için 10x20 cm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde tek

eksenli basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde kontrol numunesi olarak kullanılan %100 doğal agrega (DA) ile %25, %50, %75, %100 oranlarında kullanılan geri kazanılmış agregaların (GKA) tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Ayrıca püskürtme betonda sıklıkla kullanılan polipropilen liflerin GKA ile ilişkisini görmek amacı ile 2, 4, 6 kg lif kullanılarak dayanımları karşılaştırılmıştır.

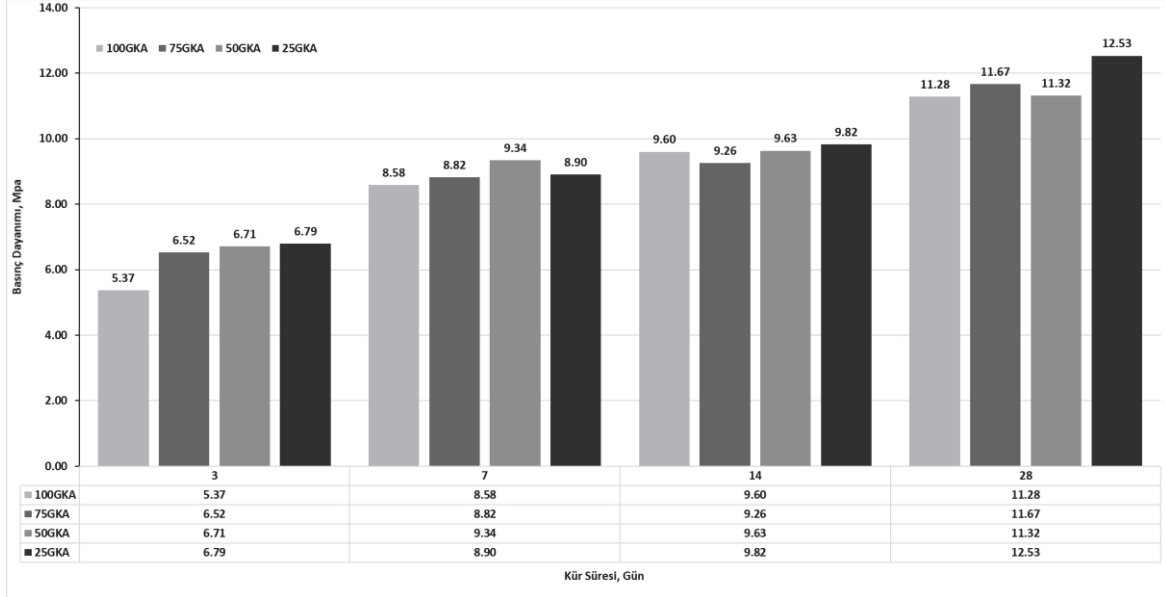
Şekil 3.20’ de görüldüğü gibi tek eksenli basınç dayanım deneyleri sonucunda kontrol numunesi (%100 doğal agrega) ile dökülen numunelerinin 3. Günde 5.42 MPa dayanım verdiği 270 gün sonunda ise dayanımının artarak 19.16 MPa’ya çıktığı görülmüştür. Doğal agrega yerine kullanılan GKA ile yapılan deneylerde ise 3. Gün sonunda 5.37MPa dayanım verirken 270 gün sonunda dayanımı %59 artarak 13.03 MPa olmuştur. Kontrol numunelerinin 28 gün sonunda dayanımları %61 artmıştır. 100GKA numunelerinde ise 28 gün sonunda dayanım artışı %52 olmuştur. Kısa kür süresi sonunda (28 gün) kontrol numuneleri ile 100GKA numuneleri arasında dayanım farkı %19 iken uzun kür süresi (270 gün) sonunda bu fark 6.13MPa ile %31’e yükselmiştir.



Şekil 3.20. Kontrol numunesi ve geri kazanılmış agrega dayanım ilişkisi

Doğal agrega yerine %25, %50, %75 ve %100 oranların da geri kazanılmış agrega kullanılarak dökülen silindir numunelerin dayanımlarının kısa kür sürelerinde (3, 7, 14, 28) ortalama %46 dayanım kazandığı uzun kür sürelerinde ise dayanımı yavaşlayarak artmaya devam ettiği görülmüştür. Doğal agrega yerine kullanılan GKA oranı arttıkça dayanımın düştüğü görülmüştür, 28 gün sonunda %25 GKA içeren beton numunelerinin basınç

dayanımı 12.53MPa olurken %100 GKA ile yapılan basınç dayanımı da 11.28 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 3.21).

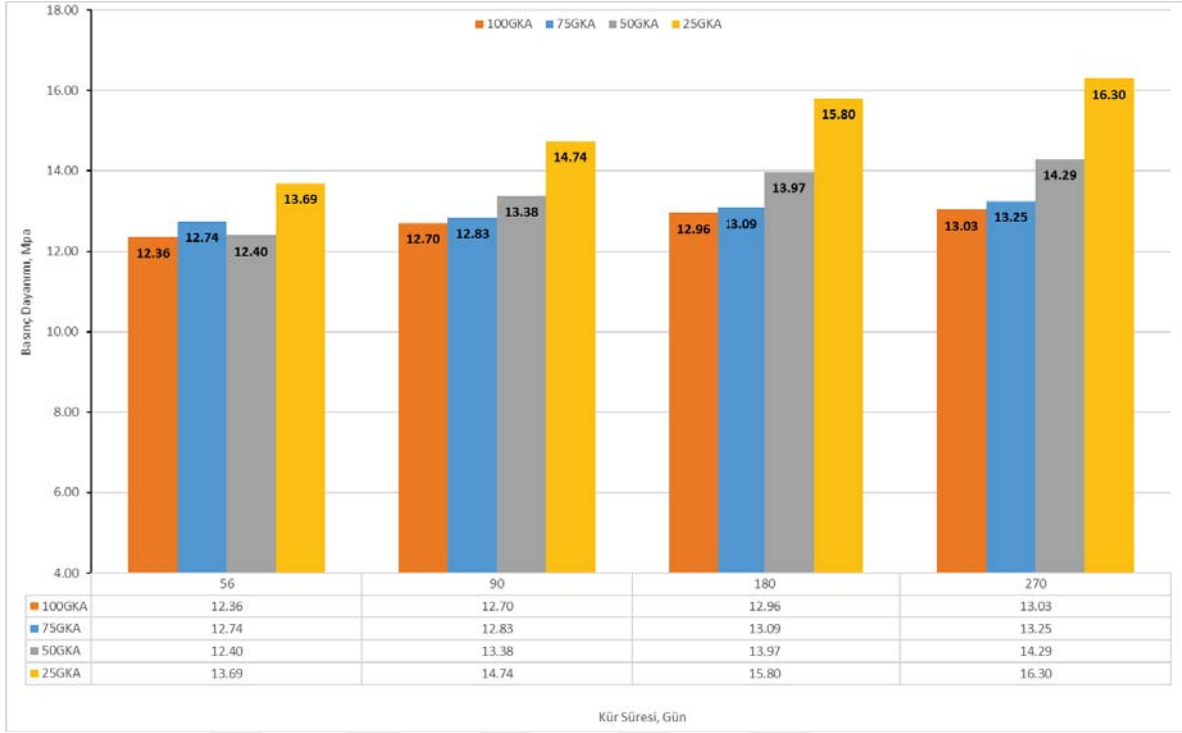


Şekil 3.21. Farklı oranlardaki GKA'ların kısa kür süresinde dayanıma etkisi

Uzun kür süresinde dayanımlar incelendiğinde tamamen geri kazanılmış agrega (GKA) ile dökülen %100 GKA örneklerinin 270 gün sonunda dayanımı %25 GKA dayanımından %20 daha az çıkmıştır (Şekil 3.22).

GKA'ların madencilikte yer altında püskürtme betonda kullanımını görebilmek adına lif katkılı hazırlanan silindir numunelerde yapılan basınç dayanımı sonucunda lif miktarı belli bir seviyenin üzerine çıktığında dayanımlarda düşme görülmüştür. 2 ve 4 kg/m³ lif kullanılarak hazırlanan silindir numunelerin 28 gün sonunda sırası ile 11.79 ve 11.93 MPa dayanım kazandığı, 6 kg lif kullanılarak hazırlanan numuneler ise 9.80 MPa'da kaldığı görülmüştür.

4kg lif katkılı betonların kısa ve uzun kür sürelerinde dayanımlarının en fazla olduğu, 3 gün sonunda 5.98 MPa, 270 gün sonunda ise 13.22 MPa olduğu görülmüştür. Kür süresine bağlı olarak dayanımlarda artış olduğu görülmüştür. Bütün kür sürelerinde en yüksek dayanımı gösteren 4PLYLİF, 270 gün sonunda içerisinde lif olmayan 100GKA dayanımlarından en fazla %1.5 lik bir dayanım artışı sağladığı görülmüştür. Lif katkılı GKA'lı betonların olumlu yönde dayanıma belirgin bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.22. Farklı oranlardaki GKA'ların uzun kür süresinde dayanıma etkisi



Şekil 3.23. GKA'nın polyester lif ile etkileşimi

Yapılan tek eksenli basınç dayanım sonuçları Tablo 3.21 de verilen TS EN 206 +A1 göre sınıflandırıldığında GKA ile yapılan silindir numunelerin C8/10 sınıfına girdiği DA ile

yapılanların ise C12/15 sınıfına girdiği görülmüştür. GKA'nın içerisine katılan liflerin dayanımı artırdığı fakat dayanım sınıfının değiştirmedığı ortaya konulmuştur.

Tablo 3.21. Beton sınıfları için standart değerler (TS EN 206 +A1, 2013)

28 Günlük basınç dayanım değeri, MPa					
Beton Sınıfı, sil/küp	Silindir	Küp	GKA	DA	GKA Lifli
	Minimum Karakteristik Basınç Dayanımı, f_{ck}	Minimum Karakteristik Basınç Dayanımı, f_{ck}			
C8/10	8	10	C8/10		C8/10
C12/15	12	15		C12/15	
C16/20	16	20			
C20/25	20	25			
C25/30	25	30			
C30/37	30	37			
C35/45	35	45			
C40/50	40	50			

Sonuç olarak; GKA'nın püskürtme betonda DA yerine kullanılmasın da dayanım açısından standartlara göre aynı dayanım sınıfında yer almadığı fakat tek eksenli dayanımları arasında çok fazla fark bulunmadığı bu yüzden DA yerine kullanılabileceği görülmüştür.

3.3.4. Plak Deneyleri

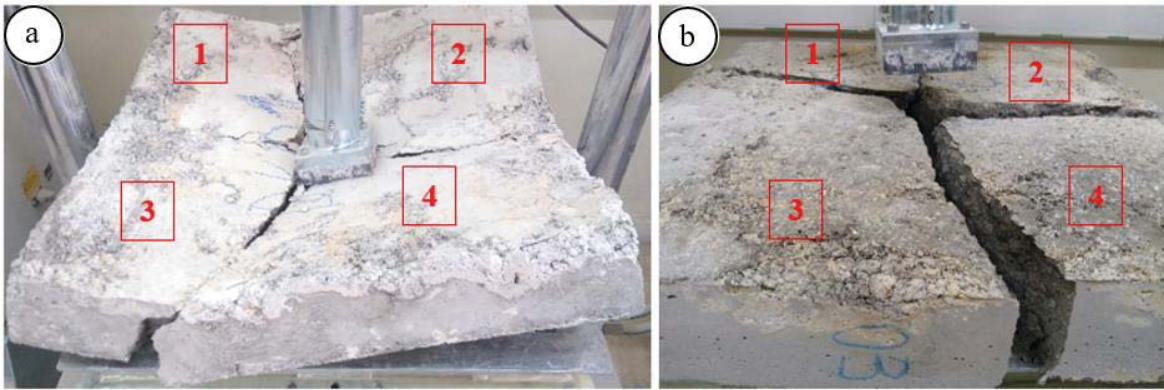
Geri kazanılmış agregaların madencilikte püskürtme betonda kullanımını belirlemek ve doğal agregadan farkını incelemek için plak numuneler hazırlanmıştır. Dökülen plaklar üzerinde yapılan enerji yutma, ultrasonik ses geçiş hızı ve plaklardan alınan silindir karotlar üzerinde yapılan birim hacim kütle, donma çözünme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde plaklara verilen kodlar **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de gösterilmiştir.

Tablo 3.22. Plak kodlamaları

Plak Beton Kodu	Agrega Tipi	Agrega Oranı, (%)	Lif tipi	Lif ilave miktarı, kg/m ³	Kür süresi, gün
2GPL	GKA	100	Polipropilen	2	28
6GPL	GKA	100	Polipropilen	6	28
100GKA	GKA	100	---	---	28
50GKA	GKA / (DA)	50/50	---	----	28
100DA	DA	100	---	---	28
2GKL	GKA	100	Kopolimer	2	28
6GKL	GKA	100	Kopolimer	6	28
25GKA	GKA/DA	25/75	---	---	28

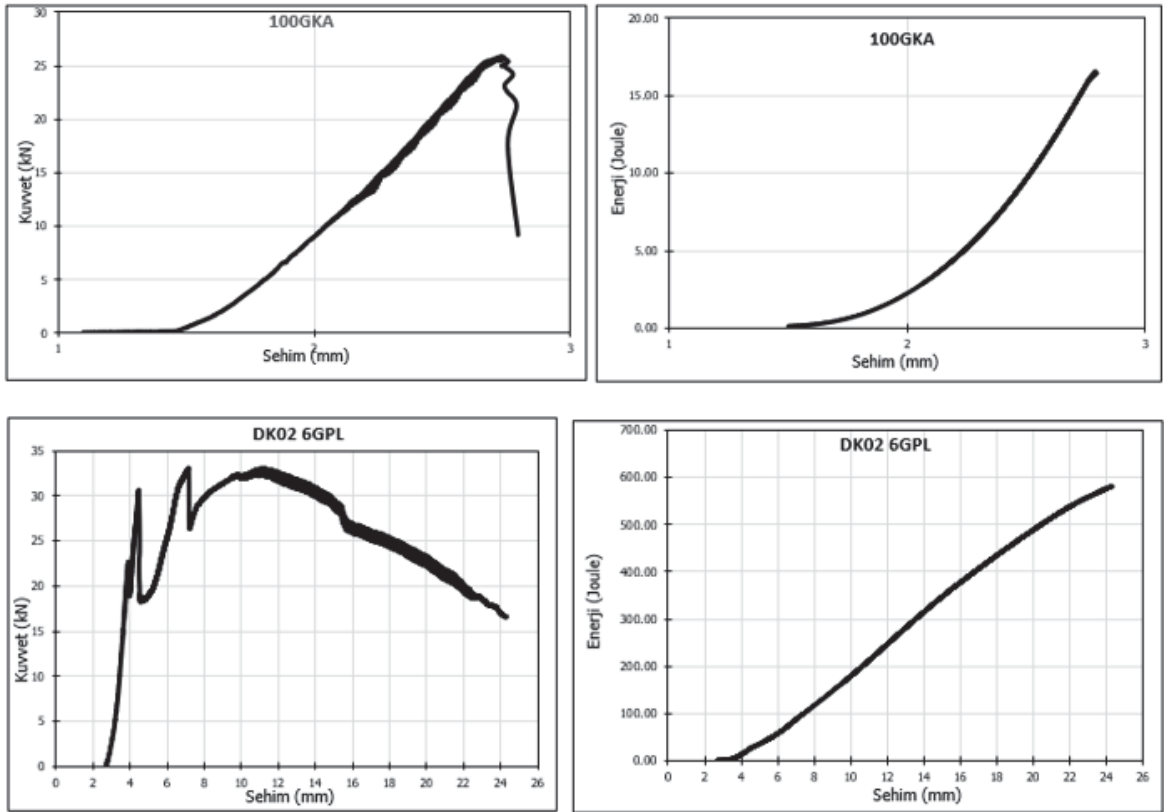
3.3.4.1. Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk) Tayini

Özellikle lifli yapılara yük uygulandığında, yük altında kırılmadan bir süre şekil değiştirir. Yük- şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alana enerji yutma kapasitesi (tokluk) denilmektedir. TS EN 14651+A1 (2008) tanımlanan deney yöntemi, lifli betonlar maksimum yük altında belli bir aralığına kadar olan deformasyon boyutu göz önüne alınarak lifli betonların davranışlarını açıklamak için geliştirilmiştir. Kullanılan geri kazanılmış agrega (GKA) ve sentetik liflerin tokluk değerine etkisinin belirlenmesi amacı ile plak deneyleri yapılmıştır. Plak numuneleri en yüksek taşıma yükünden sonra kırılmış ve test sona erdirilmiştir. Bu betonlar genel olarak düzenli bir şekilde 4 parçaya bölünmüştür (Şekil 3.24).



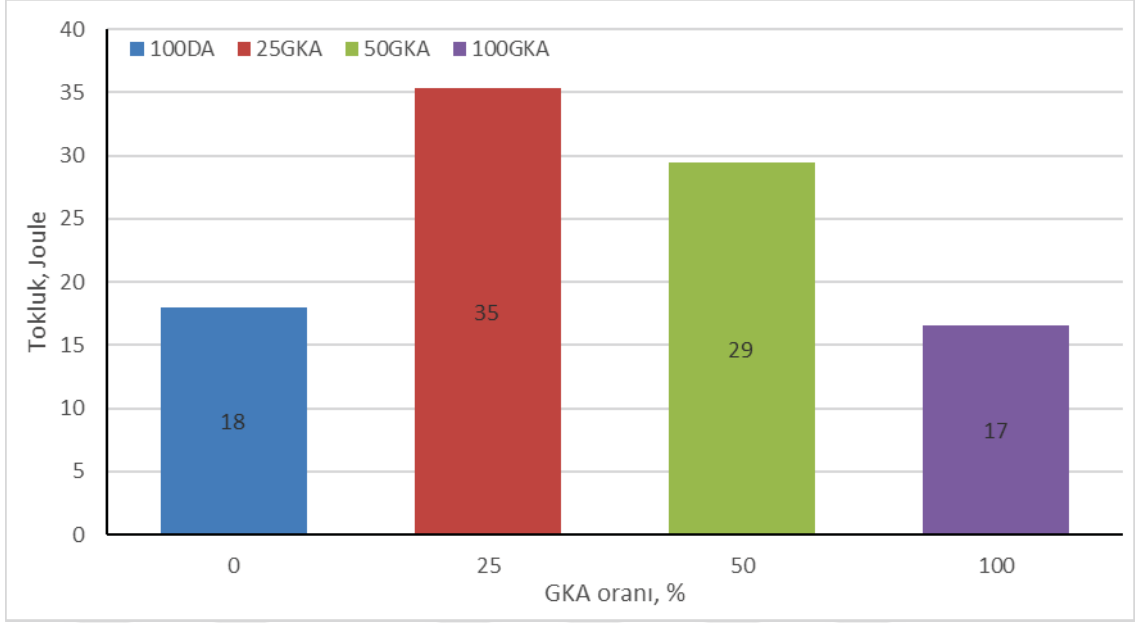
Şekil 3.24. Plakların düzenli bir şekilde 4 parça halinde kırılması, a) lifli plaklar, b) referans plaklar

Geri kazanılmış agregaların, mevcut madenlerde sıklıkla kullanılan doğal agregaya göre oluşturduğu kuvvet-sehim ve enerji-sehim grafikleri incelenmiştir. Plak numuneleri kırıldıktan sonra oluşan grafikler Ek1 de verilmiştir. Kuvvet ve enerji grafikleri incelendiğinde en büyük kırılma yükünün 35 kN ile 6GKL kodlu %100 geri kazanılmış agrega (GKA) ve 6kg kopolimer lif (6KL) katkısı ile üretilen beton olduğu, %100 geri kazanılmış agrega ve 2 kg polipropilen lif (2PL) katkılı 2GPL kodlu betonun ise 20,94 kN kuvvet ile en düşük olduğu görülmektedir. Sehim oranları incelendiğinde en düşük sehim 2.80 mm ile lifsiz 100GKA kodlu %100 geri kazanılmış agregada en yükseği ise 39.05mm ile 6GKL de belirlenmiştir (Şekil 3.25).



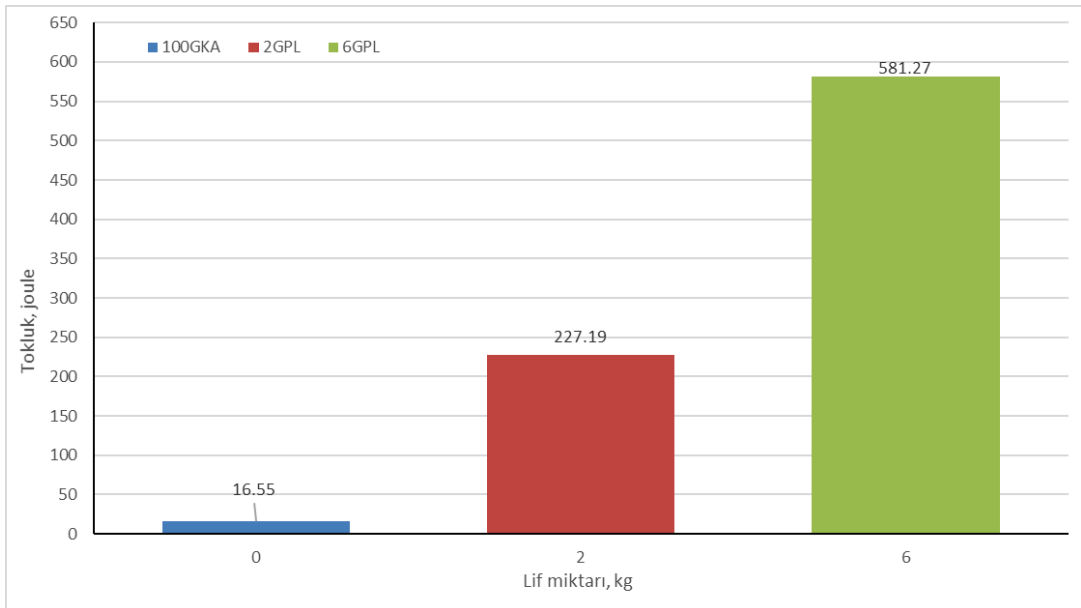
Şekil 3.25. Plak numunelerinde kuvvet-sehim ilişkisi

Geri kazanılmış agregaların plaklar içerisindeki oranları arttıkça tokluk değerlerinin genel olarak yükseldiği görülmüştür. %100 doğal agrega ile üretilen 100GKA kodlu referans plak 28 gün sonunda kırıldığında tokluk değeri 18 joule olarak ölçülmüştür, %25, %50 ve %100 GKA ile üretilen plakların ise tokluk değeri ise sırası 35, 29 ve 17 joule çıkmıştır (Şekil 3.26).



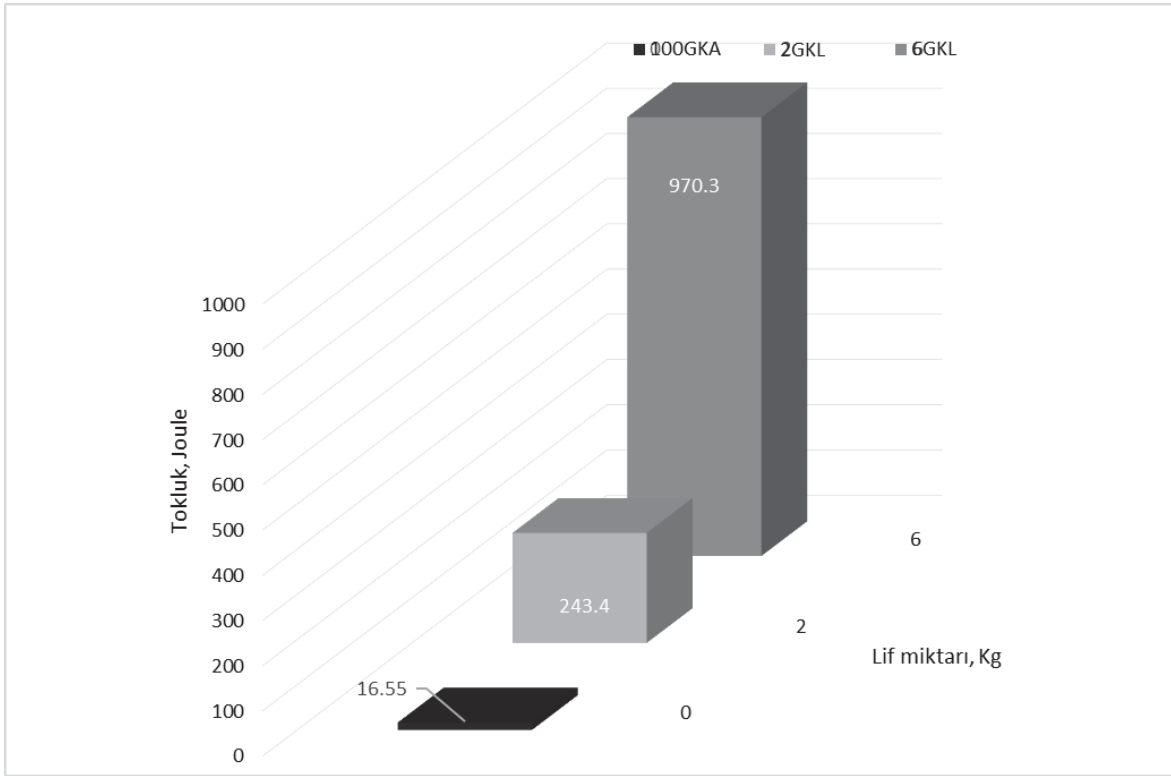
Şekil 3.26. Geri kazanılmış agrega oranı tokluk enerji ilişkisi

1m³ beton karışımı içerisinde katılan 2 ve 6 kg poliporilen, liflerin geri kazanılmış agrega ile etkileşimi ve tokluk üzerine etkisi incelendiğinde, tokluk indeksinin lif oranı ile beraber arttığı görülmektedir. Lifsiz 100GKL plaklarında tokluk değeri 16.55 joule bulunurken 6 kg polipropilen lif katkılı 6GPL kodlu plakların tokluk enerjisi 581,27 joule bulunmuştur (şekil 3.19).



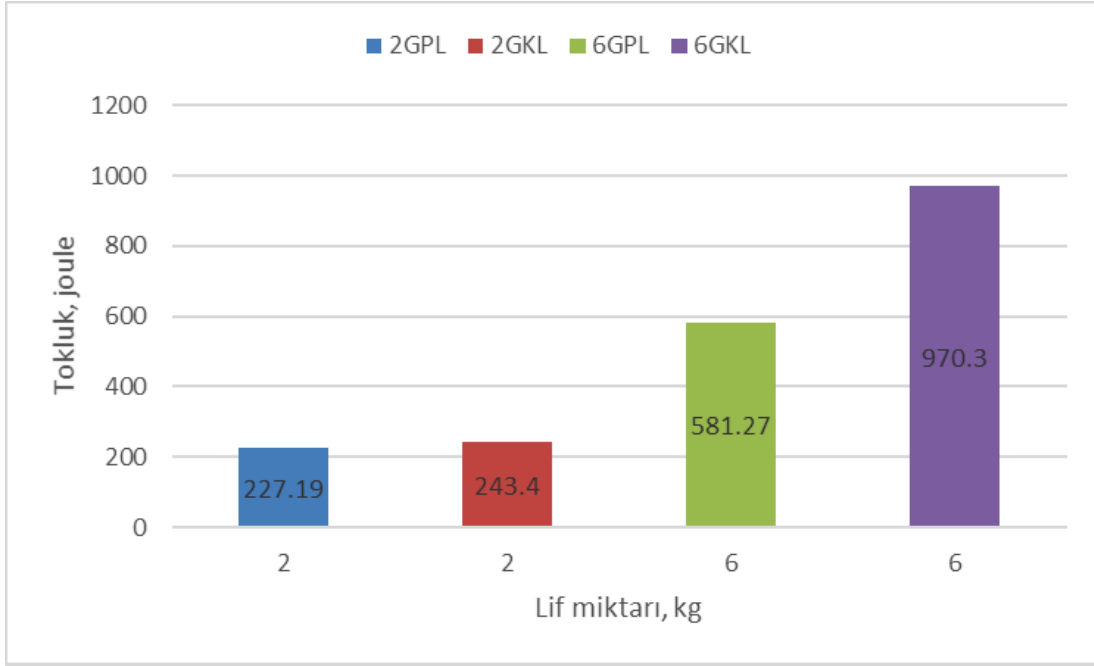
Şekil 3.27. Polipropilen lif miktarı tokluk ilişkisi

Madencilikte geri kazanılmış agregaların püskürtme betonda kullanımını belirlemek için 2 ve 6 kg kopolimer lif katkılı plak numuneler üretilmiş ve bunların tokluk değerleri belirlenmiştir. %100 geri kazanılmış agrega ile üretilen 100GKA kodlu referans numunesinin 28 gün sonunda tokluk değeri 16.55 joule çıkarken, 2kg kopolimer katkılı 2GKL plaklarının 243,4 j, 6kg lif katkılı 6GKL numunesinin ise 970,3 j çıkmıştır (Şekil 3.28).



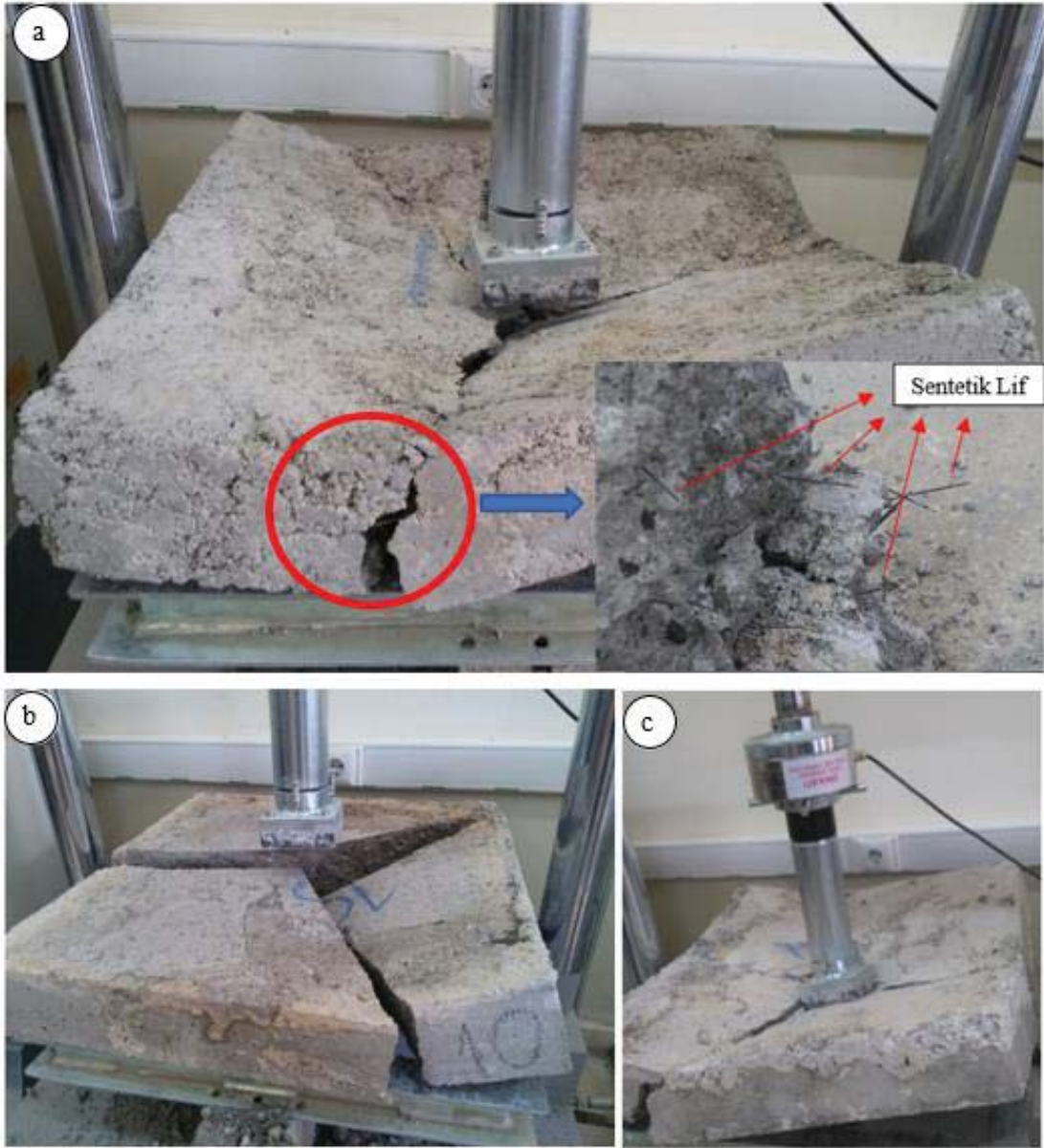
Şekil 3.28. Kopolimer lif tokluk ilişkisi

Geri kazanılmış agregalarda kullanılan lif çeşitleri karşılaştırıldığında kopolimer liflerin tokluk indeksinin daha yüksek olduğu görülmektedir. 2 kg polipropilen lif kullanılarak hazırlanan plakların tokluk değeri, 2 kg kopolimer lif kullanılarak hazırlanan plakların tokluk değerinden %7,15 daha fazladır. Bu değer 6 kg lık karışımlarda çok fazla artarak %67 olmuştur (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. Geri kazanılmış agrega ve farklı liflerin tokluk üzerine etkisi

Yeraltında kullanılabilirliği araştırılan geri kazanılmış agregaların tokluk ve sehim değerleri genel olarak incelendiğinde, lif katkısız betonların tokluk değerlerinin düşük olduğu, referans betonlarla GKA içerikli betonlar ile karşılaştırıldığında %50 oranında doğal agrega ile yer değiştirilerek yapılan dökümlerde tokluk değerinin arttığı, %50 den sonra ise düşerek doğal agrega gibi davrandığı görülmüştür. Ayrıca lif katkılı betonların yüksek sehim değerlerine ulaştığı ve tokluk indekslerinin referans betona göre çok yüksek olduğu saptanmıştır. Çalışmada kullanılan iki farklı lif ve iki farklı oranda yapılan ölçümler sonucunda, 2 kg katkıya kadar kopolimer ve polipropilen liflerin tokluk değerlerinin yakın olduğu fakat 6 kg miktarda kopolimer liflerin tokluk enerjilerinin %299 artarken polipropilen liflerin tokluk enerjisinin %156 arttığı saptanmıştır. Lif miktarındaki artış tokluğu arttırmıştır (Şekil 3.30).

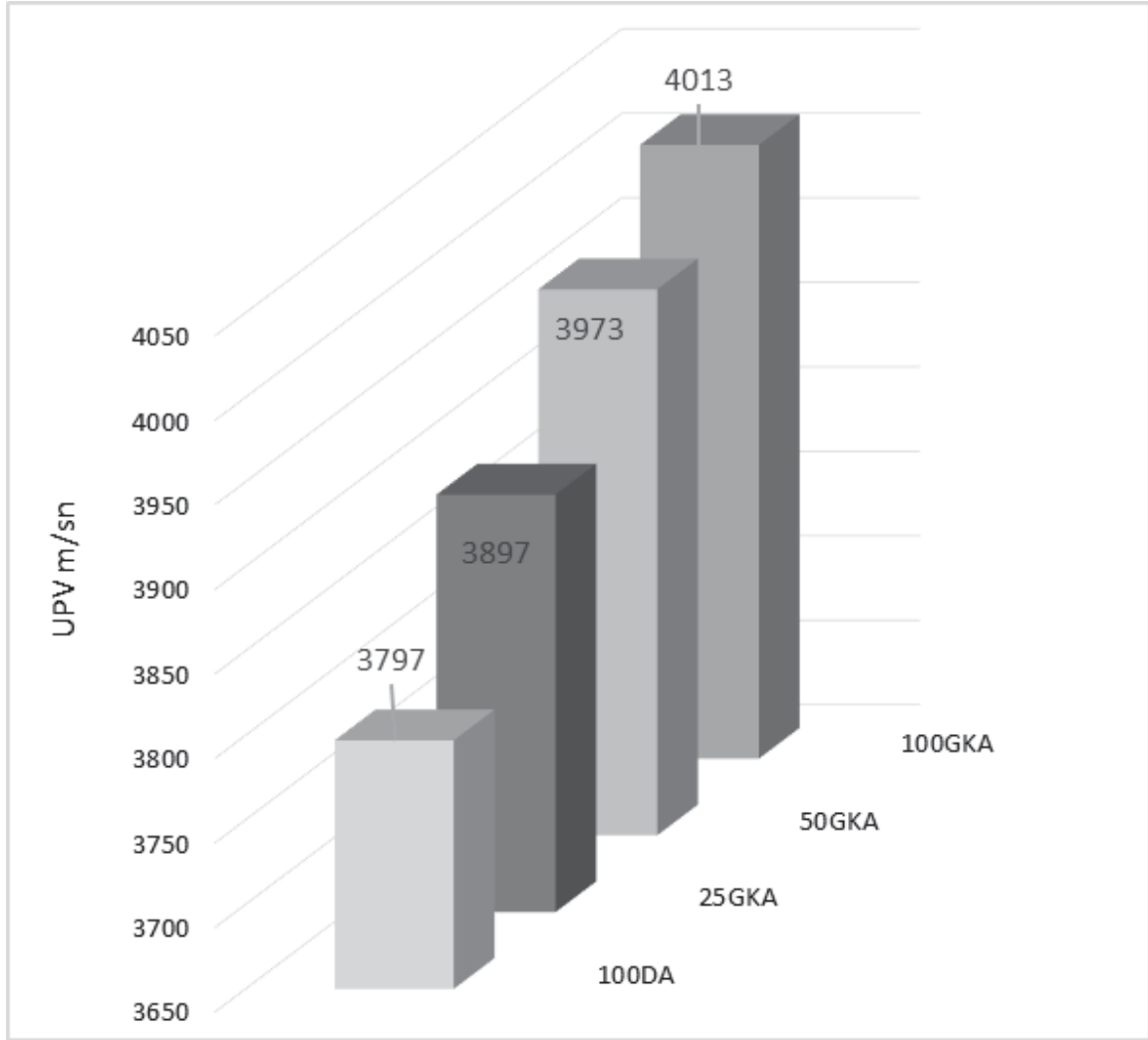


Şekil 3.30. Plaklarda kırılma şekilleri, a, c) sentetik lif kullanımı dağılmayı engellemesi ve esnekliği artırması, b) sentetik lif kullanılmayan referans plak örneği

3.3.4.2. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Ölçümü

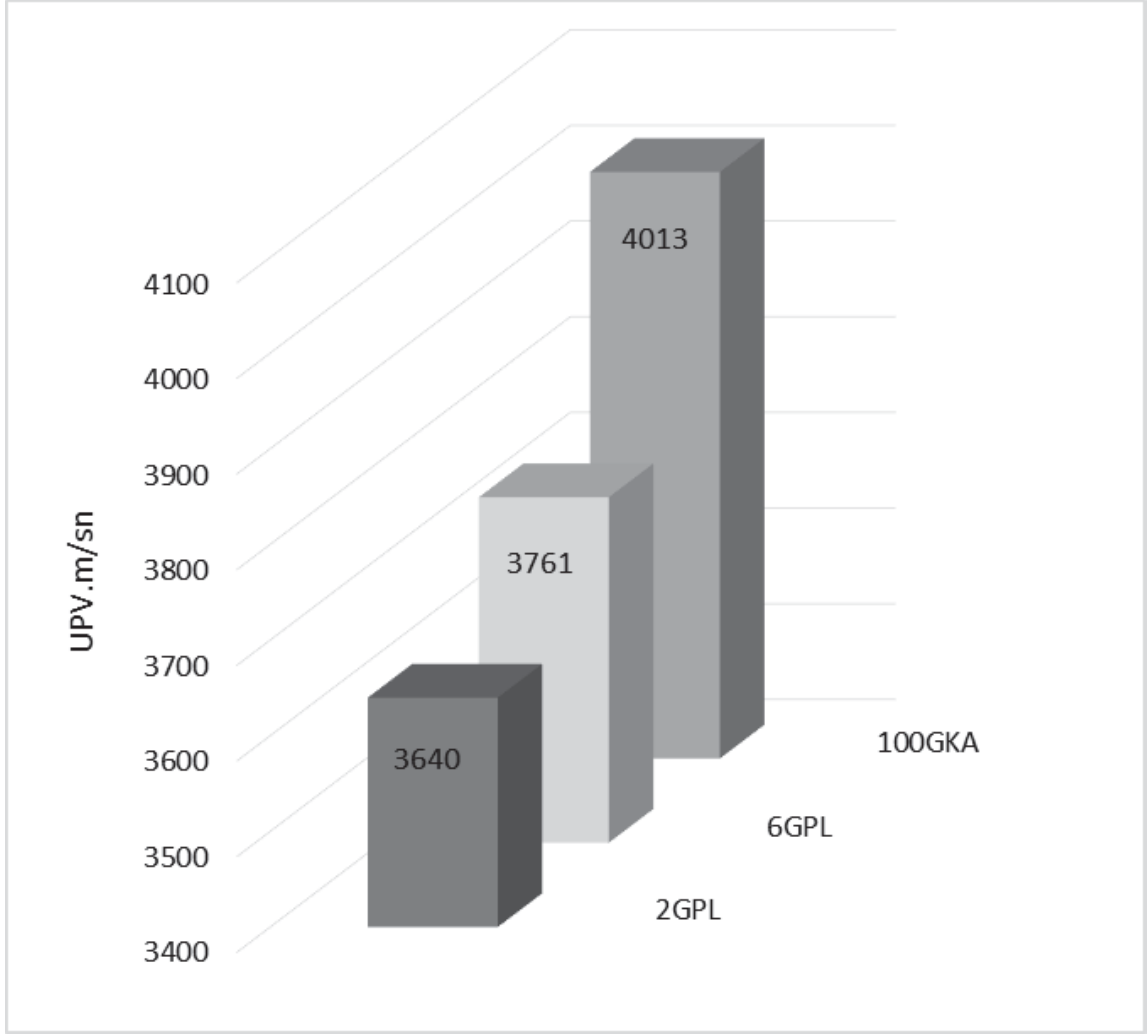
16 adet 60x60x10 cm boyutundaki plak numuneleri kırmadan önce geri kazanılmış agrega oranının ve liflerin P dalgası üzerindeki etkisini incelemek amacı ile ultrasonik ses geçiş hız (UPV) ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler 60x60 (eksenel) boyutlarından yapılmıştır.

Yapılan ölçümler sonucunda geri kazanılmış agrega oranı arttıkça ses hızının arttığı görülmüştür. Tamamen doğal agrega ile üretilen (100DA) referans numunesinden alınan UPV ölçümü 3797 m/s iken tamamen geri kazanılmış agregadan üretilen plaklarda (100GKA) bu değer %5,7 artarak 4013m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 3.31).



Şekil 3.31. Geri kazanılmış agrega oranı ile UPV ilişkisi

Geride kazanılmış agregalara katılan lif ile hazırlanan plaklar üzerinde yapılan ultrases geçiş hızı deneylerinde polipropilen lif oranı arttıkça UPV değerinin arttığı fakat referans numunelerden düşük çıktığı görülmüştür. 2 kg/m³ polipropilen lif katkıli plaklarda P dalga hızı 3640 m/s , 6 kg/m³ polipropilen lif katkıli plaklarda ise %3.3 artarak 3761 m/s çıkmıştır. En yüksek hıza sahip 6 kg/m³ polipropilen lif katkıli plakların (6GPL) ulaştığı hız referans numunesinden % 6.3 azdır (Şekil 3.32).

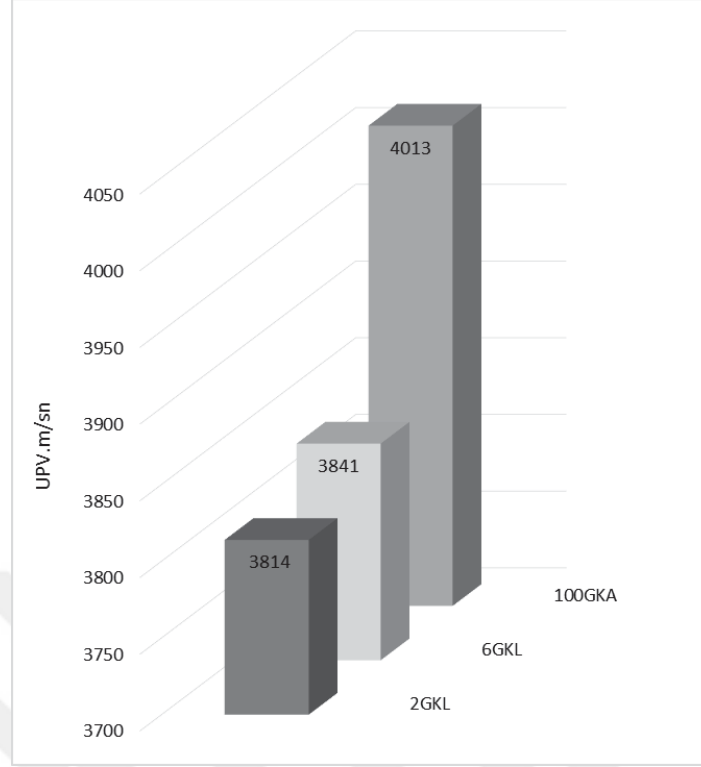


Şekil 3.32. Polipropilen lif oranı P dalga hızı ilişkisi

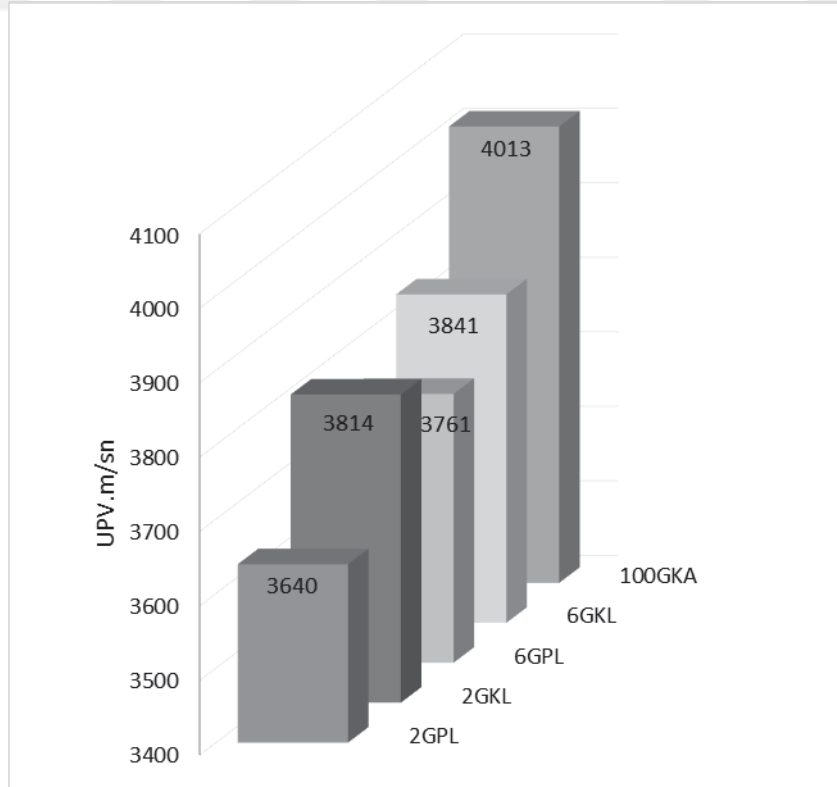
Plaklarda kullanılan kopolimer liflerin P dalgası üzerine etkisi incelendiğinde lif oranı ile dalga hızının doğru orantılı olduğu anlaşılmıştır. 2kg/m^3 lifli 2GKL plaklarının P- dalga hızı 3814m/s çıkarken 6 kg/m^3 lifli plakların dalga hızı 3841m/s çıkmıştır (Şekil 3.33).

Geri kazanılmış agregaların içerisine farklı lifler konularak yapılan P-dalgası hız ölçümlerinde lif cinsine ve beton içindeki miktarına göre değiştiği görülmektedir. Kopolimer lif katkılı plaklarda ses hızı en fazla 3841m/s olduğu bu değer referans betonlarla kıyaslandığında %4.3 daha az olduğu görülmüştür. Polimer lif katkılı betonlarda UPV değeri kopolimer katkılı betonlara kıyasla ortalama %2.1 daha yavaş olduğu saptanmıştır (Şekil 3.34).

Sonuç olarak geri kazanılmış agreg içerisindeki lif oranı ile P-dalga hızının doğru orantılı olduğu görülmüştür.



Şekil 3.33. Kopolimer lif P-dalga hızı ilişkisi



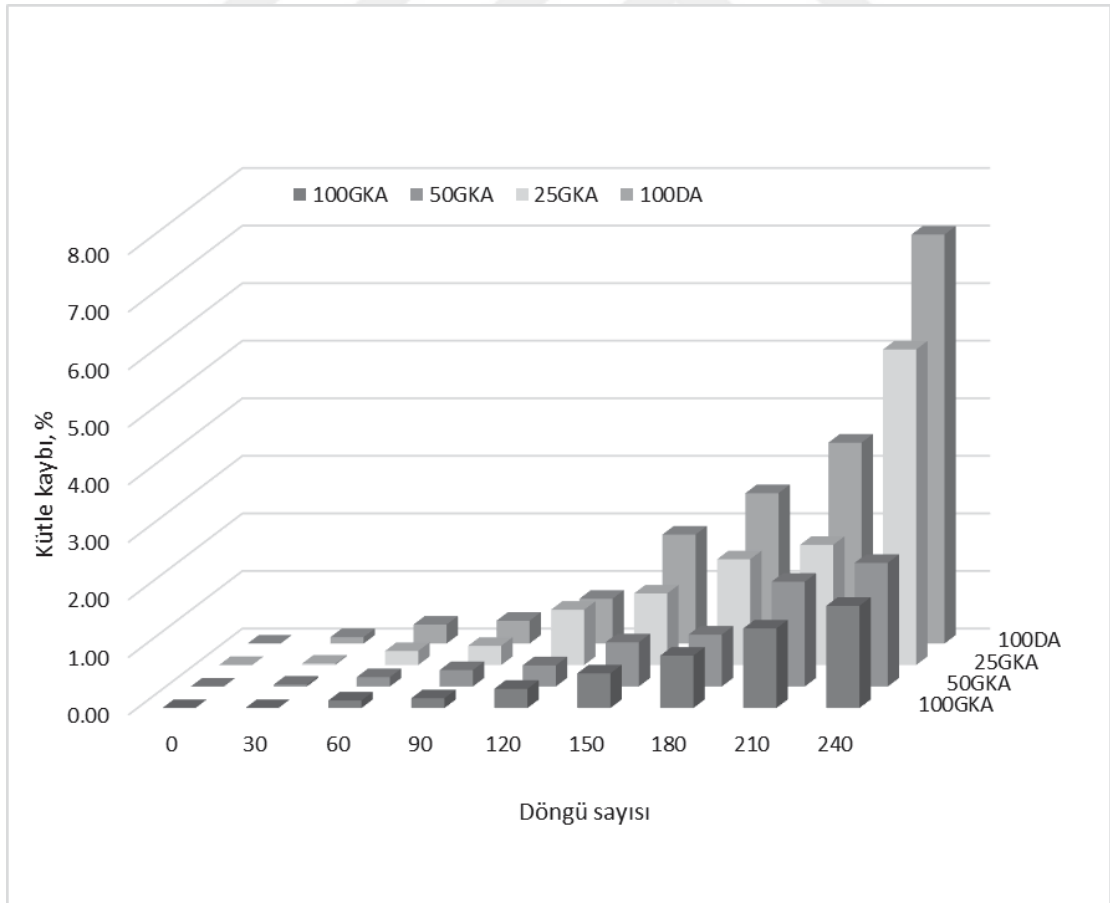
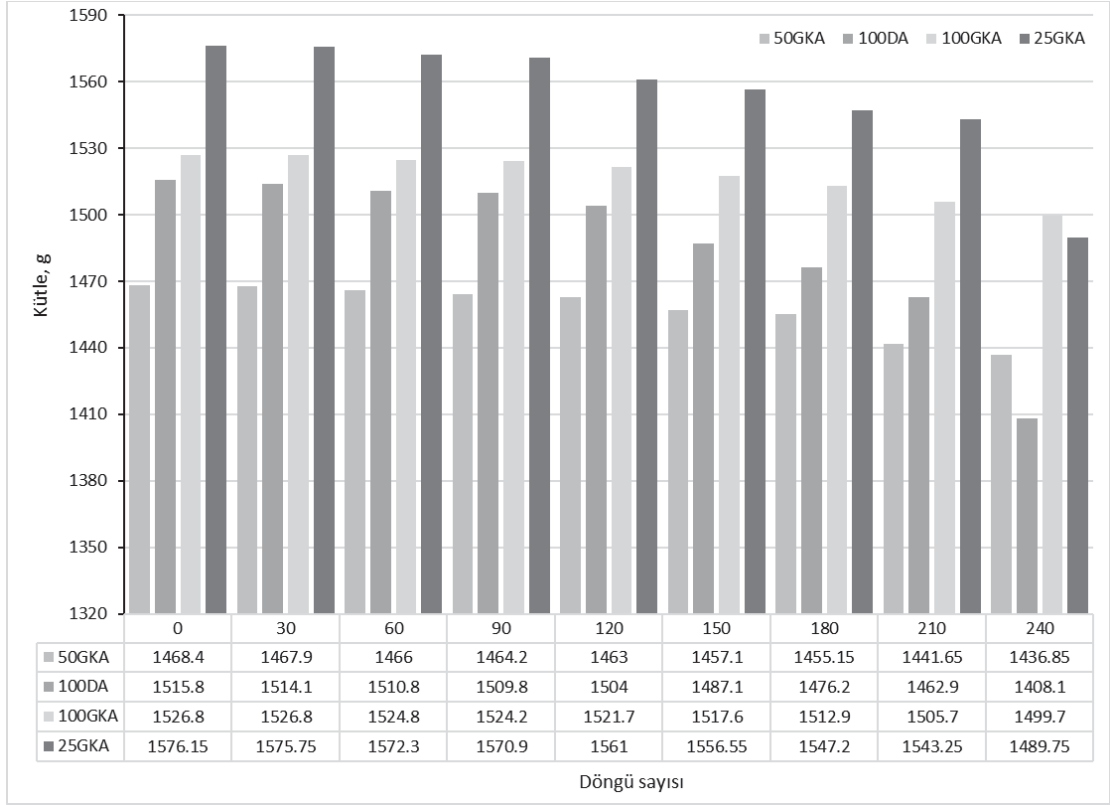
Şekil 3.34. Geri kazanılmış agrega ve farklı liflerin P dalga hızı üzerine etkisi

3.3.4.3. Plaklarda Donma-Çözünme Deneyi

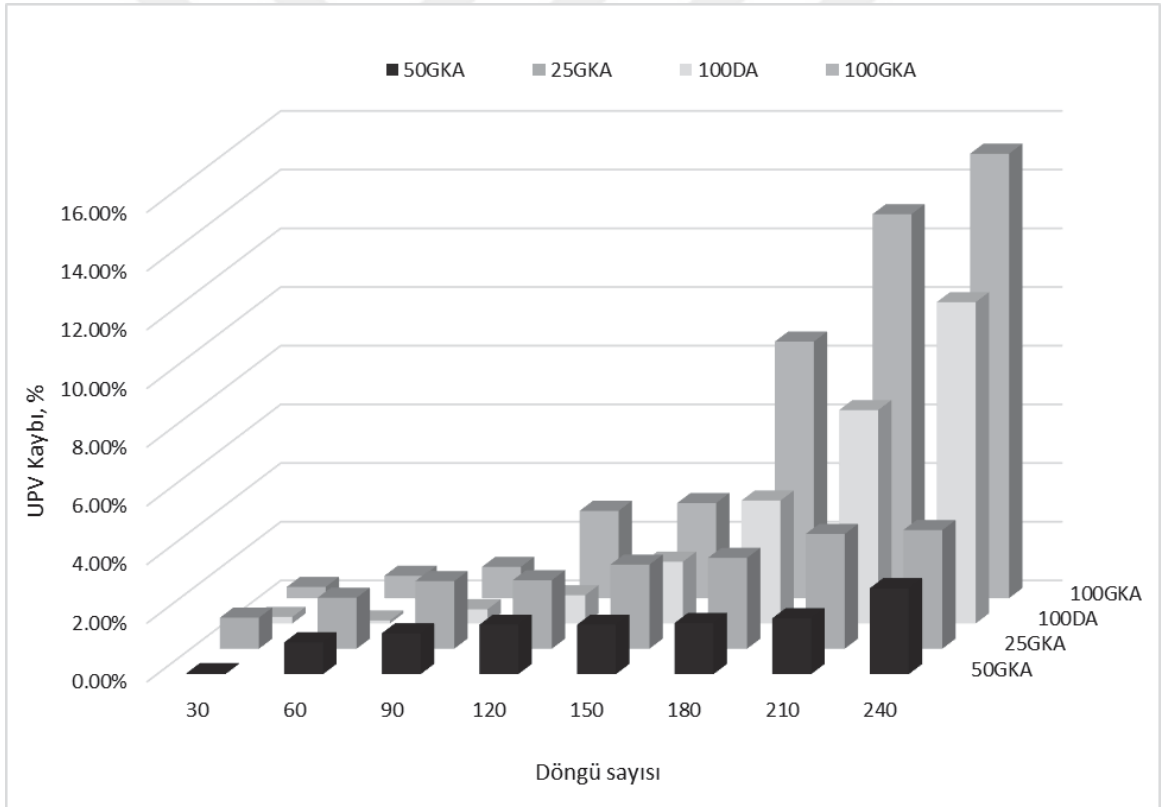
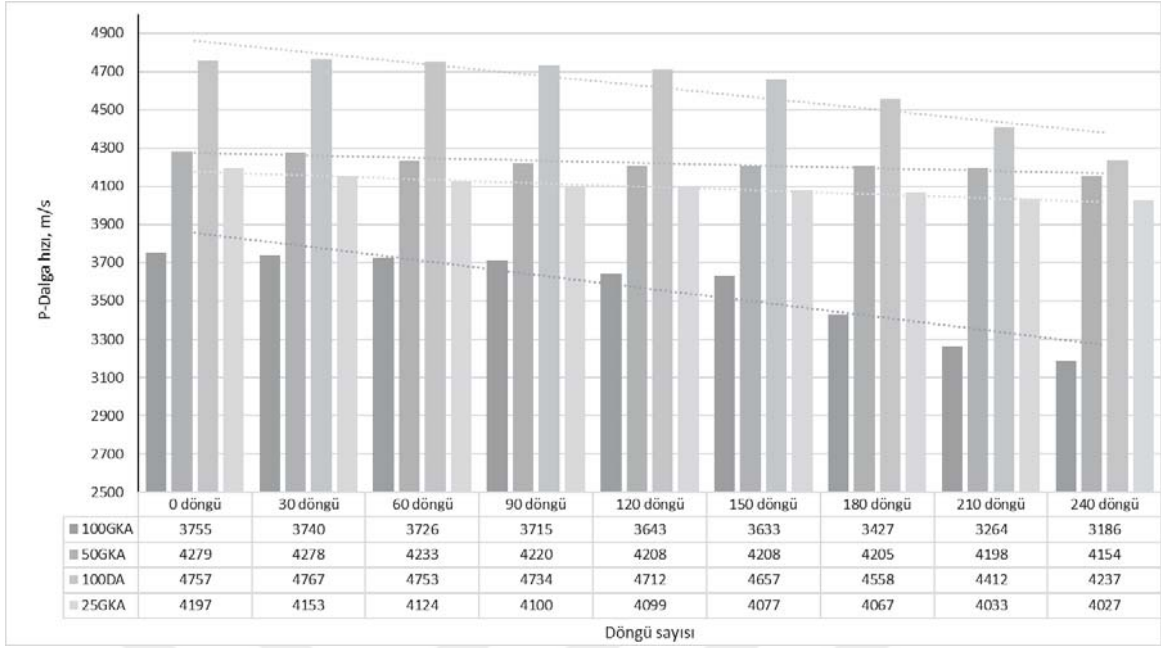
Lifli betonlardan alınan silindir numuneler uygun şartlarda donma çözünme deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneyler 240 döngü sürdürülmüş ve her 30 döngüde bir P dalga hızı ve numunelerin kütleleri ölçülmüştür. Deney sonuçlarında 240 döngü sonunda genel olarak numunelerin kütleleri ve ultrasonik hız geçişlerinin azaldığı görülmüştür.

Şekil 3.35’de görüldüğü gibi 240 döngü sonunda, donma çözünmenin etkisi ile GKA ve doğal agregadan üretilen betonlarda kütle kaybı olmuştur. En fazla kütle kaybı %7.11 ile doğal agregada yaşanırken, en az ağırlık kaybı %1.77 ile %100 GKA kullanılan 100GKA da olmuştur.

Donma çözünme deneyinde ultrasonik ses geçiş hızı da azalmıştır. Doğal agrega ile üretilen betonlarda 240 döngü sonunda ultrasonik ses hızı en fazla 100DA’da 4237 m/s olarak okunmuştur. En az ise 3186 m/s ile 100GKA’da görülmüştür. İlk ölçümlere göre hızda en fazla azalma %15.14 azalma ile 100GKA olurken en az azalma %2.93 ile 50GKA’da olmuştur (Şekil 3.36).



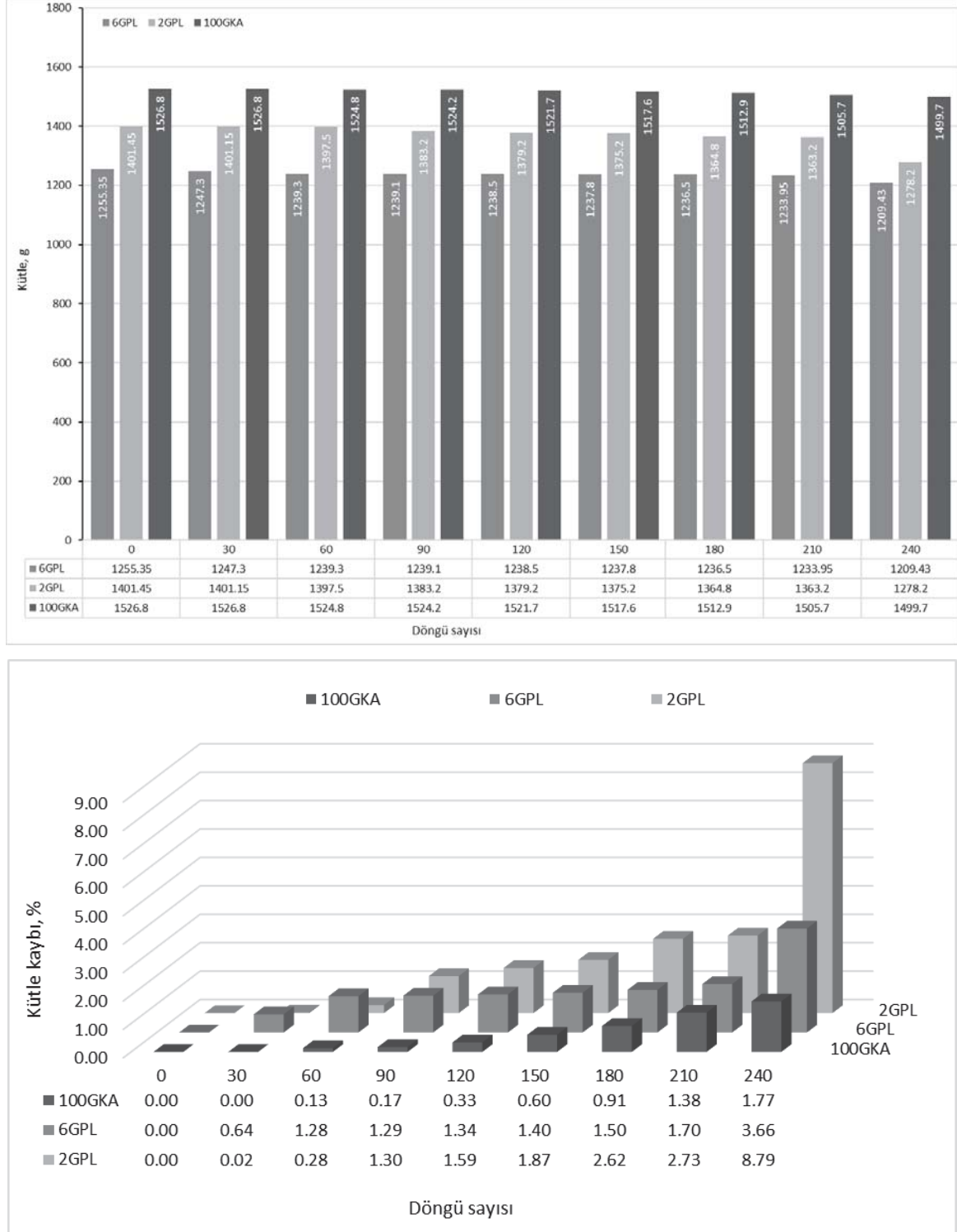
Şekil 3.35. Geri kazanılmış agrega oranı ile donma çözünme ilişkisi



Şekil 3.36. Plaklarda donma çözünme sonrası geri kazanılmış agrega oranı ile P-dalgası ilişkisi

GKA'larda lif içeriğinin donma çözünme üzerindeki ilişkisi incelendiğinde polipropilen lif içerikli numunelerde lif oranına bağlı olarak ağırlıklarının azaldığı, 240 döngü sonunda referans numunelerin kütle kaybı %1.77 olurken 2 kg polipropilen lif içeren

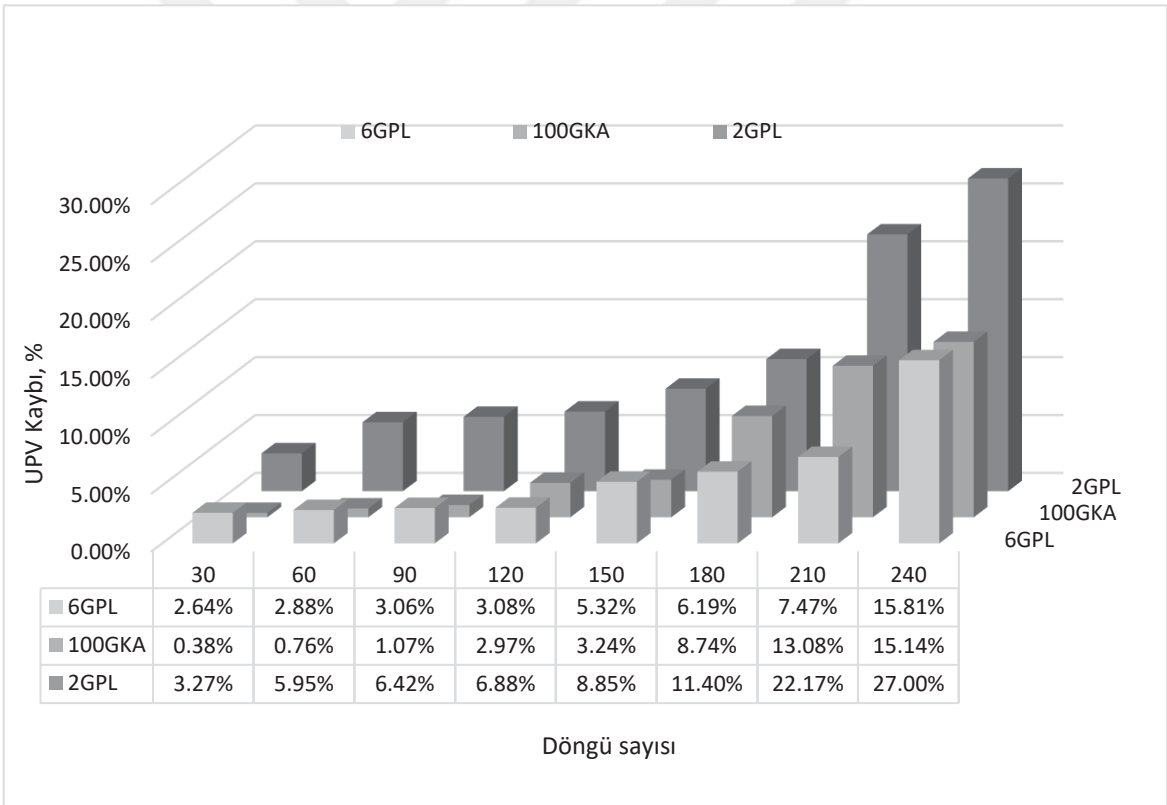
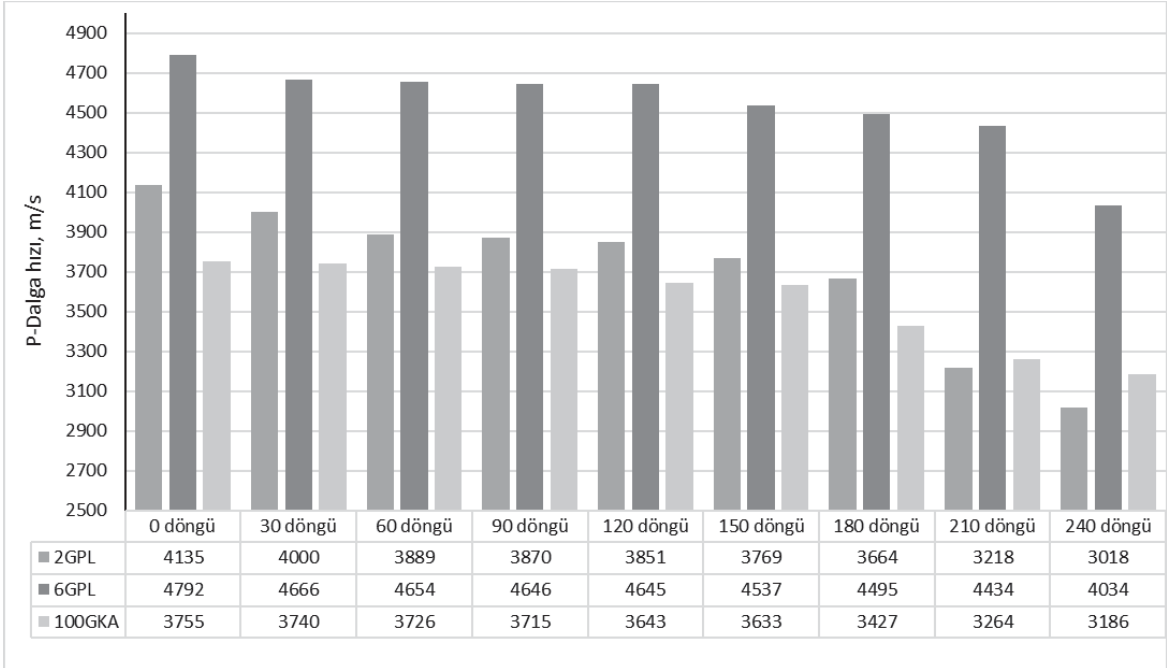
numunelerin kütle kaybı %8.79, 6 kg polipropilen lif içeren numunelerin ise %3.66 'lık bir kütle kaybı oluşmuştur (Şekil 3.37).



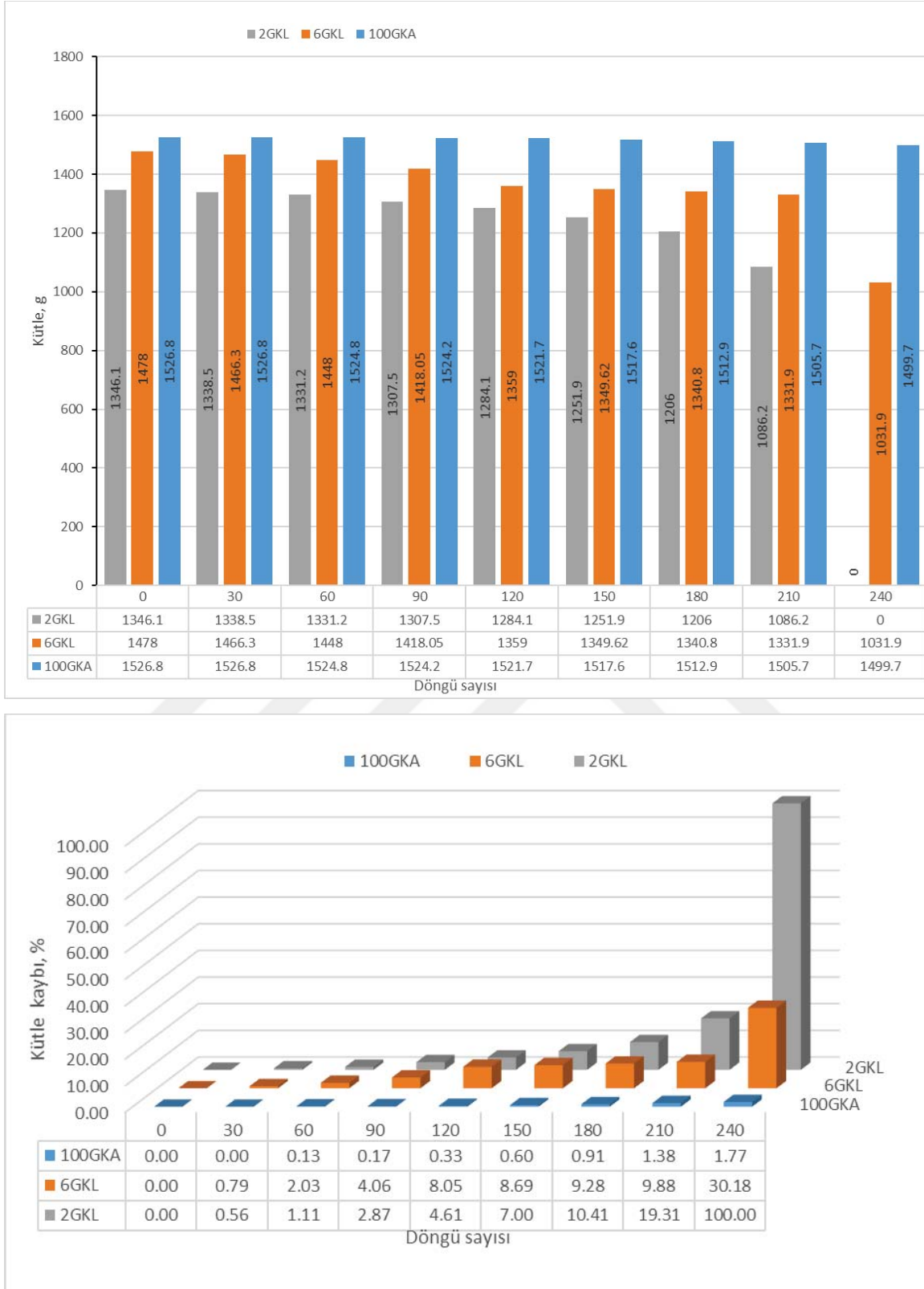
Şekil 3.37. GKA'larda polipropilen lif miktarı ve donma çözünme ilişkisi

Polipropilen lif içerikli beton numunelerin donma çözünme deneyinden sonra P-dalga hızlarının düştüğü görülmüştür, bunun sebebi mikro çatlaklar ve porozitenin artmasıdır. Başlangıçta 2 kg polipropilen lif içeren numunelerin P-dalga hızı 4135 m/s iken 240 çevrim sonunda %27 azalarak 3018m/s olduğu görülmüştür. 6 kg polipropilen lif içeren numunelerin ise 240 döngü sonunda ses geçiş hızlarının %15.81 azaldığı ve 4034 m/s olduğu saptanmıştır. Polipropilen lif katkılı betonların referans betondan UPV kayıplarının daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 3.38).

Geri kazanılmış agregaya katılan kopolimer liflerin donma çözünmeye dayanımının çok düşük olduğu görülmüştür. 240 döngü sonunda 2 kg kopolimer katkılı 2GKL numunelerinin tamamen dağıldığı saptanmıştır. İlk ölçümde ağırlığı 1478g olarak okunan 6GKL 240 döngü sonunda ağırlığının %30.18 kaybederek 1031.9g olarak bulunmuştur (Şekil 3.39).

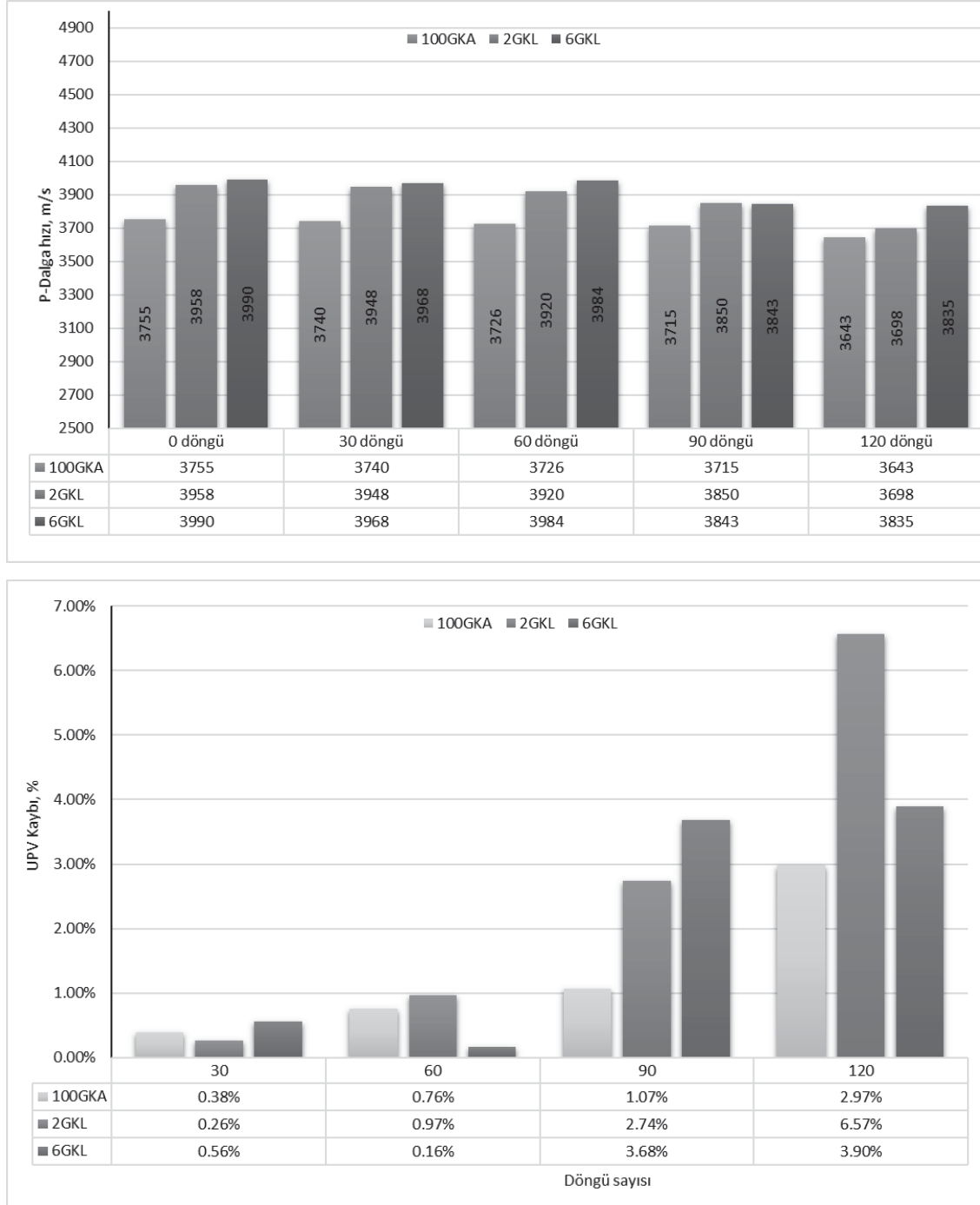


Şekil 3.38. Donma çözünme döngüsü sonrası plaklarda polipropilen lif miktarı ve UPV ilişkisi



Şekil 3.39. Kopolimer lif miktarı ve donma çözünme ilişkisi

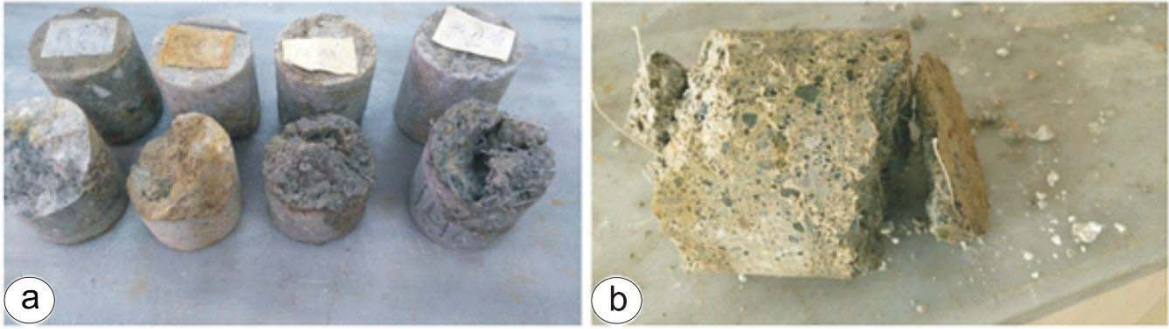
Püskürtme betonda geri kazanılmış agreganın ve içerisinde kopolimer lif kullanımını görmek için yapılan donma çözünme deneyinde, kopolimer lifli betonların 120 döngü sonunda UPV ölçülemez duruma geldiği görülmüştür. Başlangıçta 3990 m/s UPV ölçülen 6GKL numuneleri 120 döngü sonunda hızı %3.90 yavaşlayarak 3835 m/s 'ye düşmüştür. En fazla hız düşüşü %6.57 ile 2GKL numunelerinde görülmüştür (Şekil 3.40).



Şekil 3.40. Kopolimer lif miktarı ve UPV ilişkisi

Yapılan deneyler sonucunda özellikle kopolimer liflerin donma çözünmeye olumsuz etkiledikleri, lifli serilerin ultrases geçiş hızı değerleri, lifsiz serilerden daha düşük olduğu görülmüştür.

Donma çözünme deneyi sonunda plak numunelerinden alınan karot örneklerinin 240 gün sonunda dağıldığı ve UPV ölçümü alınamayacak duruma geldiği görülmüştür (Şekil 3.41).

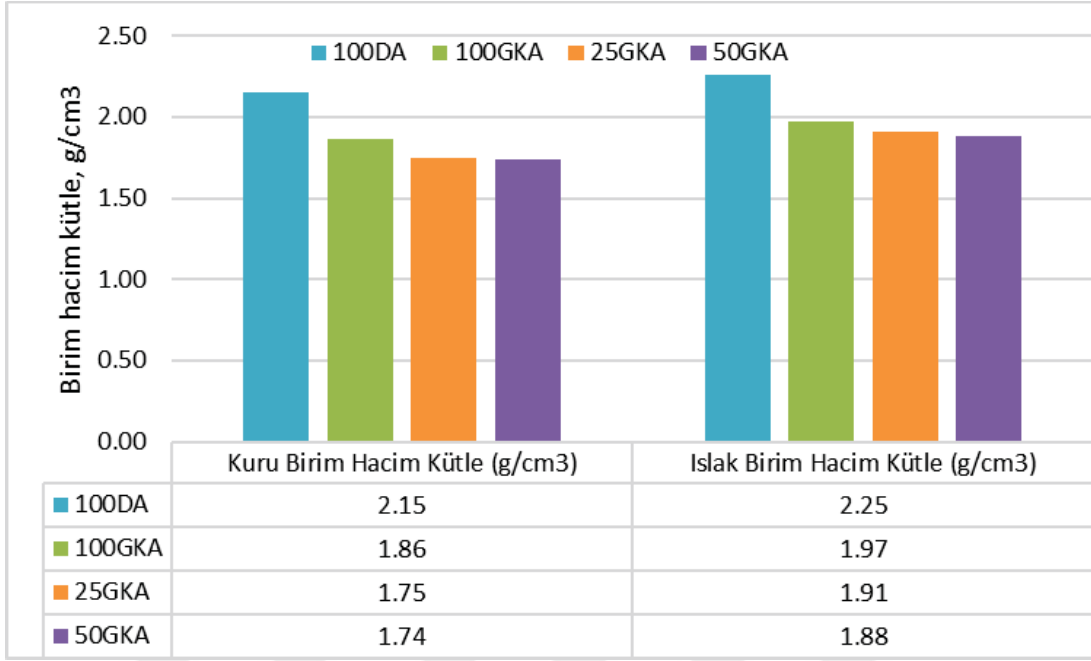


Şekil 3.41. Donma çözünme deneyi (a) sonunda karot numunelerinin dağılması ve (b) dağılmayı engelleyen lif taneleri

3.3.4.4. Birim Hacim Kütle Deneyi

Sertleşmiş plaklardan alınan 10x20 cm boyutlarındaki karotlar üzerinde yapılan ıslak ve kuru birim hacim kütle deneyleri sonucunda %100 geri kazanılmış agrega ile üretilmiş betonların doygun-yüzeyi kuru halde birim hacim kütlelerinin 1.97 g/cm^3 olduğu kuru birim hacim ağırlıklarının ise 1.86 g/cm^3 olduğu görülmüştür. %100 doğal agrega ile üretilen betonların kuru birim hacim ağırlıkları 2.15 g/cm^3 doygun-yüzeyi kuru halde birim hacim kütleleri ise 2.25 g/cm^3 olarak bulunmuştur. GKA oranı arttıkça birim hacim kütle azalmıştır (Şekil 3.42).

Püskürtme beton için üretilen serilerin tamamında taze beton birim hacim ağırlığı üretilen betonlarda geri kazanılmış agrega miktarı arttıkça taze beton birim hacim ağırlığının azaldığı, bunun nedeninin GKA özgül ağırlığının, doğal agregaların özgül ağırlığından daha düşük olmasıdır. Bu nedenle, geri kazanılmış agrega ilave edilen beton karışımlarının taze beton birim hacim ağırlığının doğal agrega ile üretilen referans betonuna göre daha düşük olduğu görülmüştür (Altınışık, 2013).

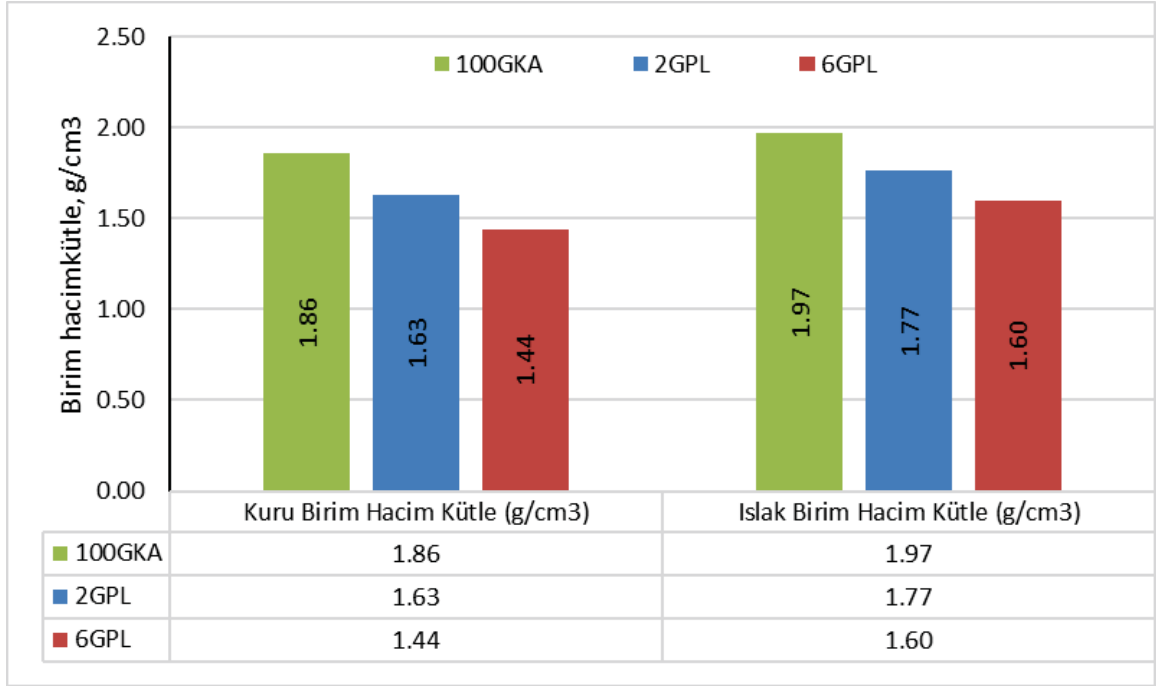


Şekil 3.42. Geri kazanılmış agrega oranı ile birim hacim kütle ilişkisi

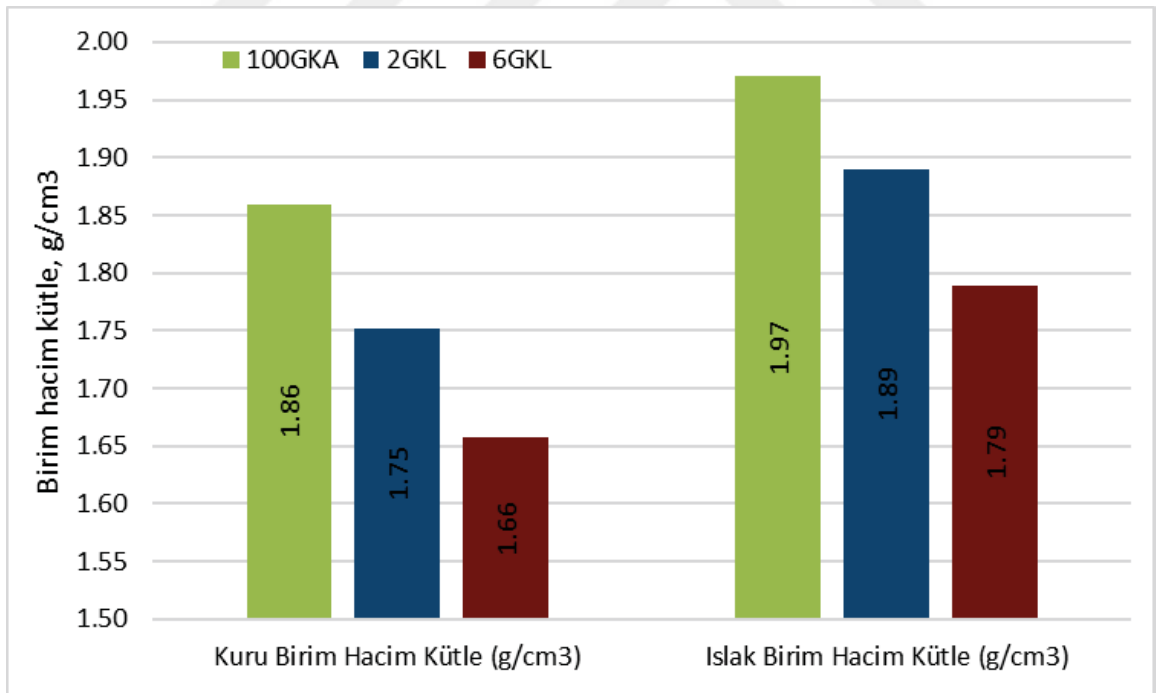
Geride kazanılmış agregaya kopolimer lif katılarak üretilen betonların birim hacim kütleleri incelendiğinde; 2 kg/m³ kopolimer lif katkılı betonların doymun-yüzeyi kuru halde birim hacim kütlelerinin 1.77 g/cm³ kuru birim hacim kütleleri ise 1.63 g/cm³ olarak saptanmıştır. 6 kg/m³ kopolimer lif katkılı betonların ise sırasıyla 1.60 g/cm³ ve 1.44 g/cm³ olarak bulunmuştur. 6 kg/m³ lif katkılı betonların, kuru birim hacim kütleleri referans numunelerden %22.6 az, ıslak birim hacim kütlelerinin ise %18.9 daha az çıkmıştır (Şekil 3.43).

Plak numuneleri içerisinde katılan kopolimer lifler referans numunelerine kıyasla yoğunluğu düşürmüşlerdir. 2 kg/m³ lif katkılı GKA beton örnekleri referans betonlara göre doymun-yüzeyi kuru halde birim hacim kütleleri %4.06 daha az çıkmıştır. Aynı şekilde kuru birim hacim kütleleri ise %6 azalarak 1.75 g/cm³ bulunmuştur (Şekil 3.44).

Genel olarak bakıldığında sertleşmiş plaklardan alınan silindir numuneler üzerinde yapılan birim hacim kütle deneylerinde; beton içerisindeki GKA oranı arttıkça birim hacmin düştüğü, lif katkılı plaklarda birim hacim kütleleri referans numunesine göre çok daha düşük olduğu belirlenmiştir. GKA'ların yoğunluklarının doğal agregadan düşük olması ve kullanılan liflerin yoğunluklarının her iki agrega türünden de düşük olması, beton içerisinde konulan malzeme oranı arttıkça birim hacim kütlelerinde düşmeye neden olduğu görülmüştür.



Şekil 3.43. Popolimer lif miktarı birim hacim kütle ilişkisi



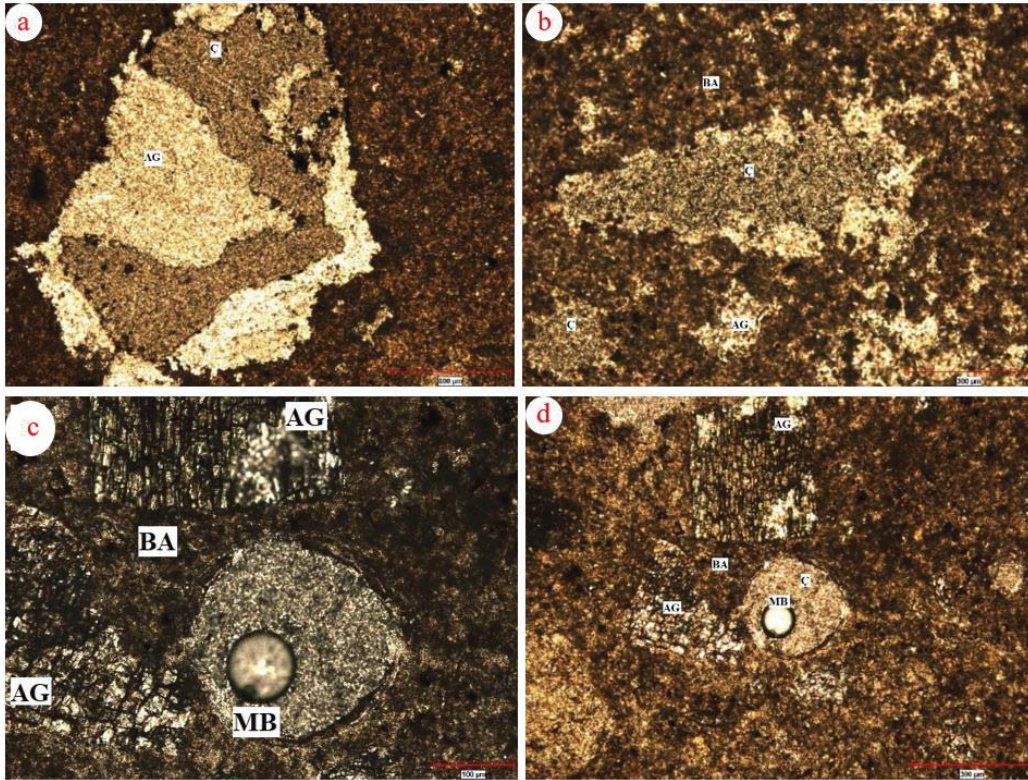
Şekil 3.44. Kopolimer lif miktarı birim hacim kütle ilişkisi

Lif çeşitlerinden polipropilen liflerin birim hacim kütlelerinin kopolimerlere göre ortalama %6 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Plaklar üzerinde yapılan kuru birim hacim

kütle değerleri 1.86 g/cm^3 ile 1.44 g/cm^3 arasında değişmektedir. TS EN 206-1 beton – bölüm 1: özellik, performans, imalat ve uygunluk standardına göre; Etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 800 kg/m^3 veya daha büyük olup, 2000 kg/m^3 ü geçmeyen beton, hafif beton sınıfına girmektedir. Bu çalışmada, beton karışımlarının tamamı “Hafif Beton” sınıfındadır. Geri kazanılmış agregaya yer değiştirme oranının artması taze betonda olduğu gibi sertleşmiş betonda da yoğunluğunu azalttığı ortaya konulmuştur, bu bulgular literatürde yapılmış diğer çalışmaları desteklemektedir (Yong ve Teo 2009, Karahan, 2006).

3.3.5. İnce kesit deneyleri

GKA ile ASR deneyleri için hazırlanan betonlardan alınan 18 adet ince kesit numunesinde yapılan görüntüleme çalışmasında, örneklerinde önceki çimentonun agregaya yüzeyini kapladığı ve bazen içerisine nüfus ettiği görülmektedir. Dökümlerde bağlayıcı olarak kullanılan yeni çimentonun agregaların arasına girerek birbirine bağladığı, fakat çimentonun oluşturduğu boşluklara giremediği görülmektedir (Şekil 3.45).



Şekil 3.45. Püskürtme betonda kullanılan GKA’ların ince kesit görüntüsü (a, b, c, d)
(AG: agregaya, MB: mikro boşluk, BA: bağlayıcı madde, Ç: agregaya yüzeyini kaplayan eski çimento)

3.4. Yeraltı Dolgu Deneyleri

Hazırlanan 150x150x150 mm küp numuneler 7, 14, 28, 56, 180, 270 günlük kür süresi sonunda tek eksenli basınç dayanımı, çökme, UPV ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar başlıklar halinde irdelenmiştir.

3.4.1. Çökme Testi

Geri kazanılmış agregaların dolgu amaçlı yeraltında kullanılabilirliği ölçmek amacı ile yapılan çökme testinde su çimento oranı sabit tutularak slump hunisi ile yapılan çökme testlerinde slump değerleri ortalama 5.5 cm belirlenmiştir. Kontrol numunesinde ise slump değeri 5.1 cm olarak belirlenmiştir (Tablo 3.23).

Tablo 3.23. Dolgu beton çökme değerleri

Karışım Oranları, %	Kod	Çökme değeri	
		İnch	cm
100 Doğal agreg	100DA	2.01	5.1
25 geri kazanılmış agreg	25GKA	2.20	5.6
50 geri kazanılmış agreg	50GKA	2.24	5.7
75 geri kazanılmış agreg	75GKA	2.05	5.2
100 geri kazanılmış agreg	100GKA	2.28	5.8
100 GKA 25 Uçucu kül	25UGKA	2.32	5.9
100 GKA 50 Uçucu kül	50UGKA	2.13	5.4

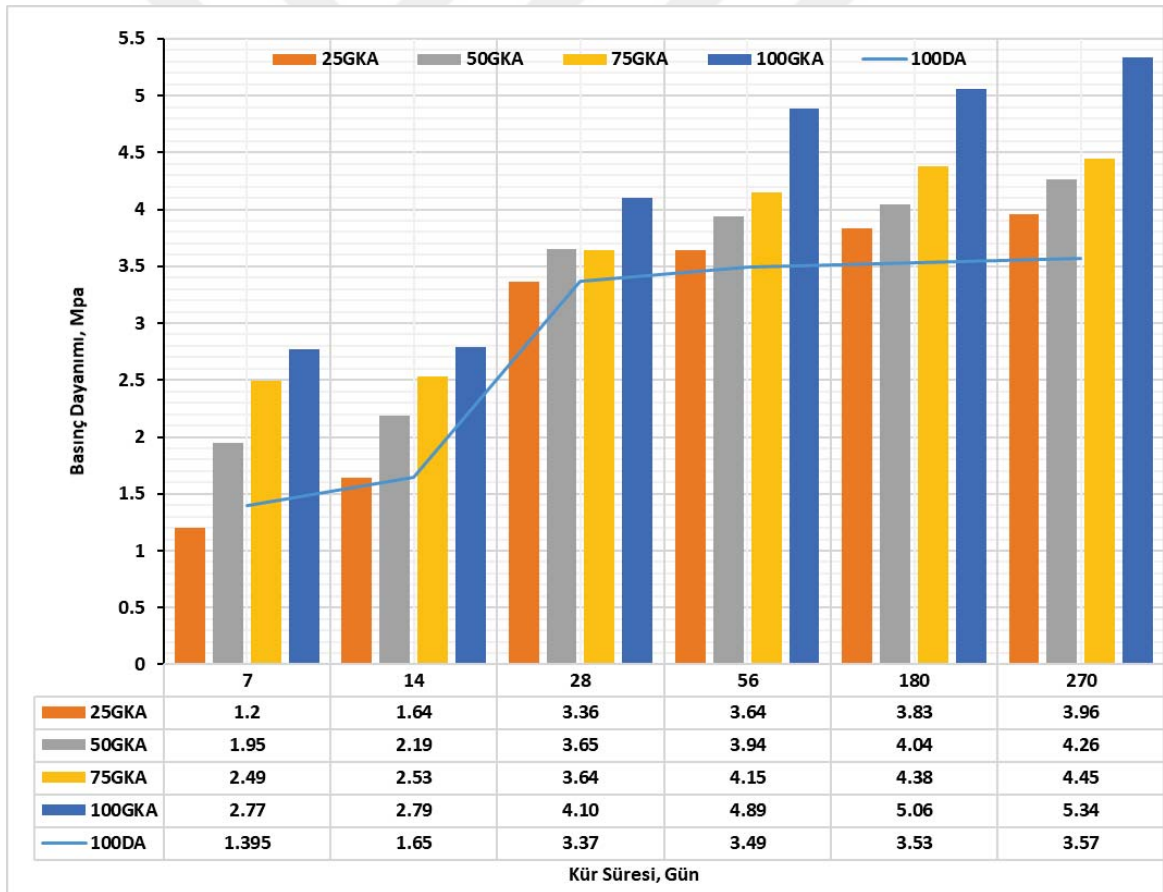
Geri kazanılmış agreg ve doğal agreg ile üretilen bütün betonların mekanik özelliklerini karşılaştırabilmek için bütün serilerde slump değeri ölçülmüş ve ortalama 5-5.5 cm arasında olması sağlanmıştır. Üretilen tüm serilerde işlenebilirliği TS EN 206-1 standardında verilen kıvam sınıflarından S2 sınıfında (50-90 mm) olduğu belirlenmiştir.

3.4.2. Tek Eksenli Basınç Dayanım

Geri kazanılmış agreganın madencilikte yeraltında dolgu amaçlı kullanılabilirliğini saptamak 15 x15x15 cm boyutlarında ki küp numuneler üzerinde tek eksenli basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler de kontrol numunesi olarak D_{max} : 31.5 cm

boyutlarında %100 doğal agrega (DA) kullanılmıştır. GKA ise doğal agregaya ikame olarak 0-40 mm boyutlarında %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanılarak tek eksenli basınç dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. Deneylerde çimentoya ikame olarak %25-%50 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır.

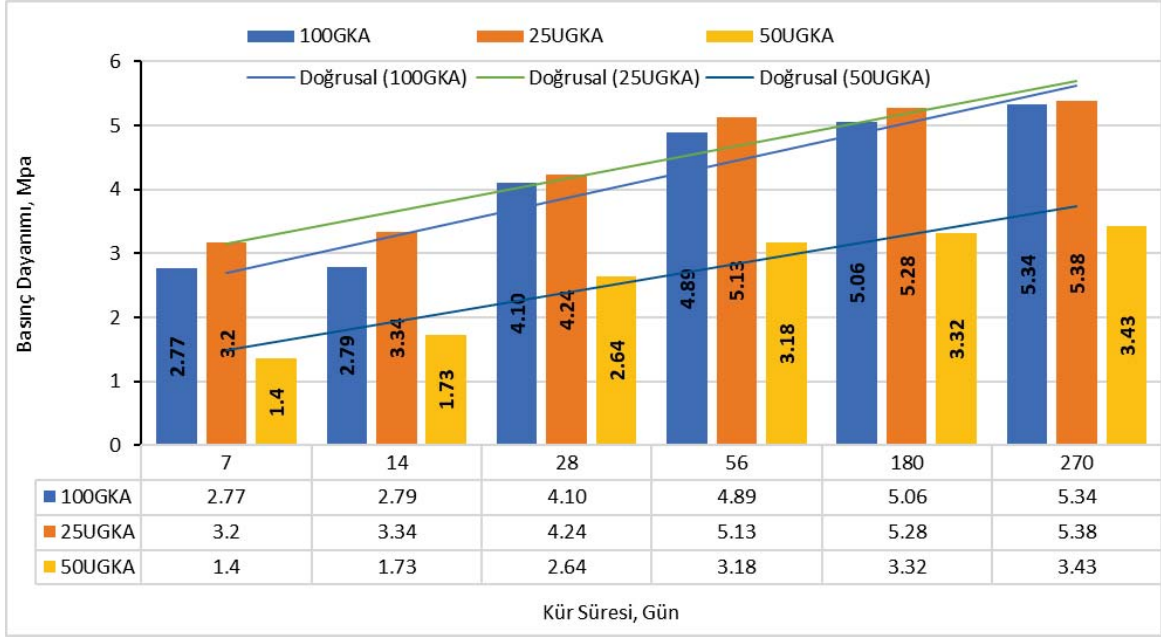
Yeraltı dolgusunda kullanılması amaçlanan GKA'lar ile yapılan tek eksenli basınç dayanım deneylerinde GKA oranı ve kür süresi arttıkça dayanım değerlerinin arttığı, tamamen GKA'dan oluşan 100GKA küp numunelerinin 7 günlük kür süresinde dayanımı 2.77MPa iken 270 gün sonunda %92 artarak 5.34 MPa olduğu bulunmuştur. 100GKA numunelerinin 270 gün sonunda dayanımlarının referans numunelerinden %49.7 daha fazla olduğu, referans numunelerinin sadece kısa kür süresi (7, 14, 28 gün) sonunda %25 GKA 'lı betonlardan dayanımlarının yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 3.46).



Şekil 3.46. GKA içerikli küp numunelerin kür süresi ile basınç dayanım ilişkisi

Yeraltı dolgusunda GKA ile beraber çimentoya ikame olarak kullanılan uçucu külün %25 seviyesinde dayanıma olumlu etki yaptığı bu oranın %50 ye çıkarıldığında dayanımda

ciddi düşüş olduğu görülmüştür. %25 uçucu kül katkılı 25UGKA 7 gün sonunda tek eksenli basınç dayanımı 3.2MPa iken 28 gün sonunda %32.5 artarak 4.2MPa olmuştur. 270 gün sonunda ise 5.4MPa olmuştur. %50 uçucu kül katkılı 50UGKA 7 gün sonunda tek eksenli basınç dayanımı 1.4MPa iken 270 gün sonunda 3.4MPa olmuştur, referans numunesinin dayanımı ise 270 gün sonunda 3.6MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 3.47).



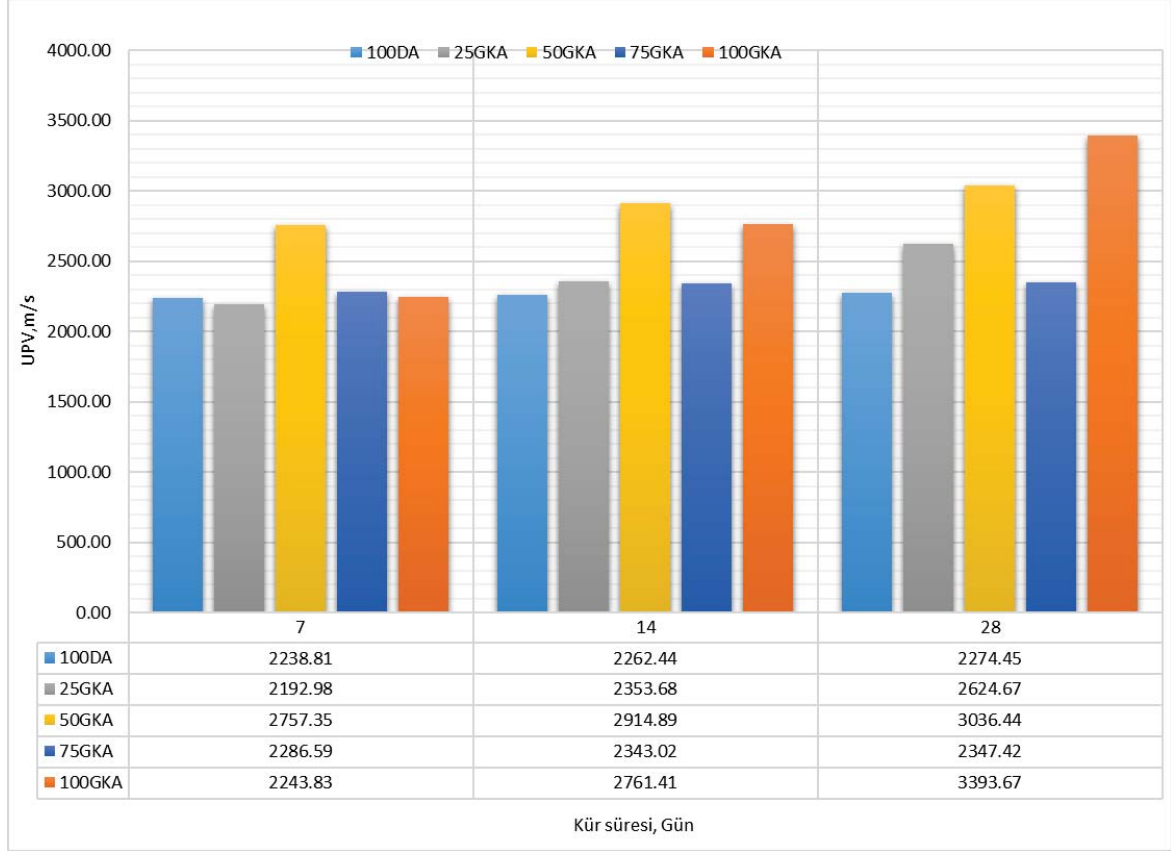
Şekil 3.47. Uçucu kül katkılı GKA tek eksenli basınç dayanımı

Sonuç olarak, iri boyutlu GKA oranı arttıkça dayanımda belirgin bir artışın olduğu Doğal agregaya yerine yeraltında inşaat atıkların dan elde edilen agregaların kullanılabilceği görülmüştür. Uzun kür süresi sonunda doğal agregaya göre %33 dayanım farkı sağlamıştır. Ayrıca yeraltı dolgusunda kullanılabilcek iri GKA içerisine ikame olarak katılan uçucu külün belli bir orana kadar dayanımı artırdığı, daha sonrasında düşürdüğü görülmüştür.

3.4.3. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Tayini

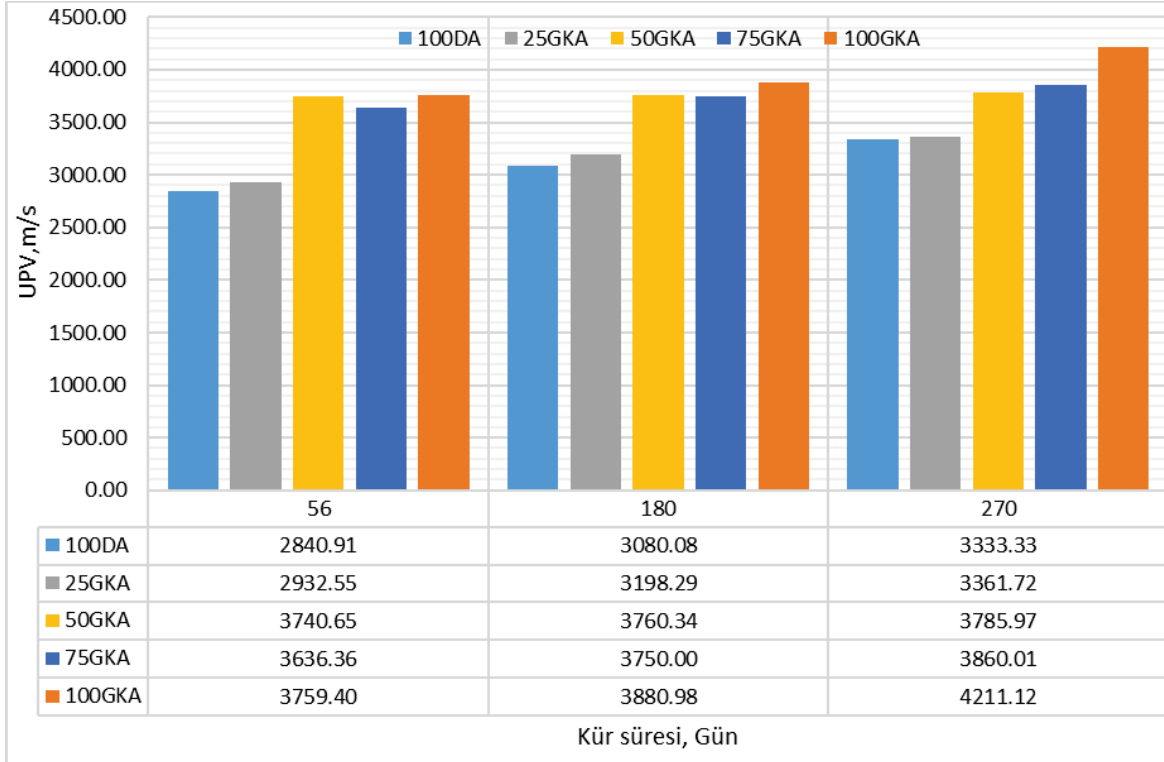
GKA'nın yeraltında dolgu amaçlı kullanımına yönelik iri GKA ile dökülen 15x15x15 cm'lik küp numuneler üzerinde yapılan ultrasonik P dalga hızı deneylerinde kür süresine bağlı olarak P-dalga geçişlerinin genel olarak arttığı, doğal agregaya (DA) katkılı betonlara nazaran geri kazanılmış agregaya (GKA) katkılı püskürtme betonlarda geçişlerin daha hızlı

olduğu görülmüştür. Ayrıca GKA oranı arttıkça geçiş hızında da artış görülmüştür. Kısa kür süresinde en fazla artış %51 ile 100GKA numunelerinde görülmüştür, en az artış ise %1.6 ile tamamen doğal agrega ile üretilen 100DA numunelerinde ölçülmüştür (Şekil 3.48).



Şekil 3.48. Kısa kür süresine bağlı GKA miktarı ile UPV ilişkisi

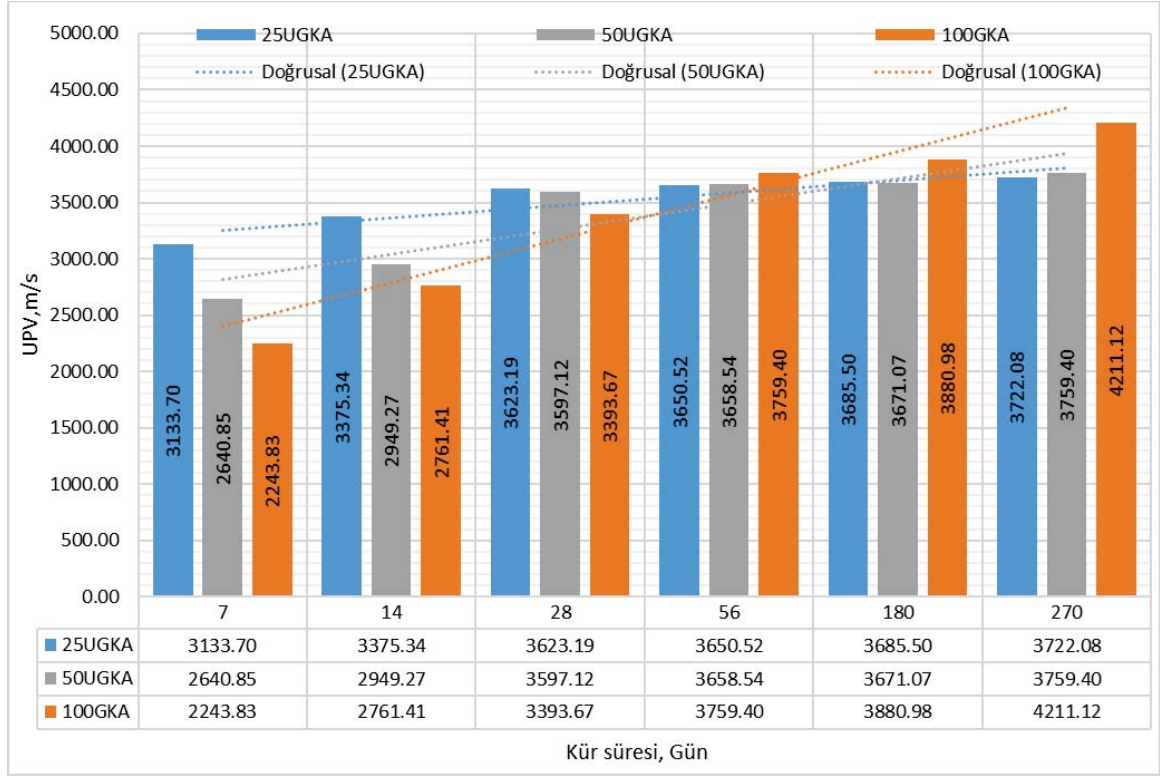
Uzun kür süresinde GKA ile ultrasonik ses geçiş hızına (UPV) bakıldığında 270 günlük kür süresi sonunda doğal agrega ile oluşturulan referans numunelerin geçiş hızı 3333m/s iken tamamen GKA dan oluşan beton numunelerinde hızı 4211m/s olarak ölçülmüştür (Şekil 3.49).



Şekil 3.49. Uzun kür süresine bağlı GKA miktarı ile UPV ilişkisi

Dolgu amaçlı doğal agrega yerine kullanılan GKA katkılı betonlarda uçucu kül kullanılması ile P-dalga hızı geçişinin arttığı belirlenmiştir. %25 uçucu kül katkılı 25UGKA 7. Günde UPV değeri 3133 m/s iken 270. Günde %18.8 hızlanarak 3722m/s hıza ulaşmıştır. 270 gün sonunda %50 UK katkılı numunelerin UPV değerlerin de ise %42.35 artış olmuştur. Kür süresi sonunda %25 uçucu kül katkılı GKA lar referans numunesine göre %11.62 daha yavaş P dalgasını iletirken, %50 uçucu kül katkılı betonlarda bu oran %10.73 olarak saptanmıştır (Şekil 3.50).

Genel olarak madencilikte yeraltı dolgusu amacı ile kullanılacak betonlarda iri GKA oranı arttıkça UPV hızının da arttığı, en hızlı geçişin tamamen GKA ile oluşturulan 100GKA numunelerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca uçucu külün UPV'ye olumsuz etki ederek beton örneklerinde UPV nin düşük çıkmasına neden olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.50. Dolgu amaçlı kullanılan UK katkıli beton numunelerinde GKA miktarı ile UPV ilişkisi

3.5. Genel Değerlendirme

Tez kapsamında yapılan deney ve ölçümlerden bulunan sonuçlar, deneylerin hangi standart ile yapıldığı ve sınır değerleri Tablo 3.24’de verilmiştir.

Tablo 3.24. Tez çalışmasında yapılan tüm deneyler sonuçlar ve sınır değerleri

Yapılan Deneyler		Tezde Kullanılan Standart	Tezde Kullanılan Örnek Sayısı	Deney Sonuçları	Sınır Değerler		
Bina Molozlarının Mekanik Özellikleri	UPV, m/s	ASTM C 597	21	4033			
	TEBD, MPa	ISRM (1981)	21	19			
	Nokta yük değeri, MPa	ISRM, 1985	15	1.53			
	Schmidt Çekici Yüzey Sertlik Deneyi	ASTM C 805	20	29			
	Böhme aşınma deneyi, cm ³ /50 cm ²	TS 699	7	16			
	Karbonatlaşma derinliği, mm	TS 3790 EN ISO 9963-1	20	9			
GKA Deneyleri	Tane yoğunluğu, g/cm ³	TS EN 1097-6	2	1.87-1.99			
	Su emme, %	TS EN 1097-6	3	10.13			
	Porozite, %	TS EN 1097-6	3	19.46			
	Donma-çözülme, %	TS EN 1367-1	3	1.91	<4		
	Tane şeklinin tayini yassılık indeksi, %	TS 9582 EN 933-3	3	7.1	<50		
	Los Angeles, %	TS EN 1097 – 2	7	38	<50		
	Mikro Deval, %	TS EN 1097 – 1	4	35	<35		
	Darbe Dayanımı, %	TS EN1097/2-D1	5	22	25-50		
	Metilen mavisi değeri, g/100g	TS EN 933-9	1	0.3	< 1.5		
Püskürtme Beton Deneyleri	Çökme testi, cm	TS EN 206-1	16	19	>15		
	UPV, m/s	ASTM C 597	192	3825*			
	TEBD, MPa	TS 699	192	11.78*	>10		
	Plak deneyleri	Enerji yutma kapasitesi, joule	TS EN 14651+A1	16	265		
		UPV, m/s	ASTM C 597				
		Donma-çözünme	Ağırlık kaybı, %	ASTM C 666-97	32	3.8**	
			UPV kaybı,%			29.4**	
	Birim hacim kütle deneyi	Kuru B.A., g/cm ³	TS 12390-7	16	1.75		
		Islak B.A., g/cm ³			1.88		
Yeraltı Dolgu Deneyleri	Çökme Testi, cm	TS EN 206-1	14	5.5			
	TEBD, MPa	TS 699	126	3.6*	>1		
	UPV, m/s	ASTM C 597	126	2985*			

* 28 günlük ölçüm ortalamaları, UPV; Ultrasonik Ses Geçiş Hızı, TEBD: Tek Eksenli Basınç Dayanımı, ** 180 döngü sonundaki kayıp

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde inşaat molozlarından ve inşaat atıklarından geri kazanılmış agrega elde edilerek bu agregaların madencilik sektöründe kullanılması amaçlanmıştır. Çalışma alanı olarak Karadeniz Bölgesi seçilmiştir. Bu gölgede 9 farklı noktadan alınan yaklaşık 5700kg malzeme üzerinde çeşitli deneyler yapılarak, inşaat moloz ve atıklarının doğal agrega yerine kullanımı ve bu agregaların inşaat sektöründe doğal agrega yerine, madencilikte yeraltı dolgusunda ve püskürtme betonda agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Tez kapsamında inşaat molozlarının donatısız kısımlarından seçilen ortalama 25-45 cm boyutunda alınan karot numuneler üzerinde ultrasonik ses geçiş hız tayini, tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme deneyi, Schmidt çekici sertlik deneyi, böhme aşınma deneyi ve karbonatlaşma derinlik tayini deneyleri, bloklar kırılarak agrega boyutuna getirilerek geri kazanılmış agregalar (GKA) üzerinde yoğunluk, porozite ve nem deneyleri, darbe dayanım deneyi, yassılık indeksi deneyi, donma-çözünme deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu ve kimyasal yöntem olmak üzere iki alkali silika reaksiyonu deneyi (ASR), Mikro deval aşınma deneyi, Los Angeles deneyleri yapılmıştır. Ayrıca GKA'ların madencilikte kullanılabilirliği açısından hazırlanan 10x20 cm silindir numuneler 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 270 günlük kür süresi sonunda püskürtme beton deneyleri (tek eksenli basınç dayanımı, çökme, ultrasonik hız tayini) ve madencilikte dolgu amaçlı kullanımı açısından 15x15x150 cm küp numuneler üzerinde tek eksenli basınç dayanımı, çökme, ultrasonik hız tayini deneyleri yapılmış elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

➤ Bina Molozları Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları

Geri kazanılmış agrega (GKA) üretilmesi planlanan kentsel dönüşüm sonucu oluşmuş inşaat atıklarından alınan beton örnekleri üzerinde yapılan;

- Ultrasonik deneyler sonucunda IS standartlarına göre beton kalite sınıflandırmasında “iyi beton” kalite sınıfına girdiği, Deer ve Miller’e göre hazırlanan kaya sınıflamasına referans alındığında bina molozlarının tek eksenli basınç dayanımına göre, “çok düşük dirençli kaya” sınıfına girdiği, Nokta yükleme deneylerin de bulunan ortalama değerler Bieniawski (1975) tarafından yapılan sınıflamaya göre inşaat atıklarından alınan ve geri kazanılmış agrega olarak kullanılacak betonların “düşük dayanımlı” kaya sınıfına girdiği belirlenmiştir.

- Yapılan Schmidt sertlik deneyi sonucunda agrega olarak kullanılacak bina atıklarının ortalama sertlik değerlerininine bakıldığında yumuşak kaya sınıfında yer aldığı bulunmuştur.
- Agregaların farklı kullanım alanları bulunmaktadır ve kullanım yerlerine göre farklı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Kentsel dönüşüm sonucu oluşan inşaat atık ve molozlardan elde edilen geri kazanılmış agregaların (GKA) doğal agrega yerine kullanımında bütün özelliklerin araştırılması gerekmektedir. Örneğin GKA döşeme, merdiven basamağı, yol parkesi, bordür gibi aşındırıcı etkilerin yoğun olduğu yerlerde kullanılabilmesi için TS 10449 standartlarına göre Böhme aşınmasının $15 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$ Dış cephede aşınmanın daha az olduğu yerlerde kullanılacaksa aşınmanın $25 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$ den büyük olması istenmemektedir. Tez çalışması kapsamında yapılan Böhme aşınma deneyi sonucunda inşaat atıklarından elde edilen molozların ortalama Böhme aşınma değerlerinin $15.9 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$ olduğu bu molozlardan elde edilecek agreganın dış cephede rahatlıkla kullanılabileceği aynı zamanda çok işlek olmayan yol ve kaldırımlarda da kullanılabilceği belirtilmiştir.
- GKA üretimi için alınan blok örneklerin üzerinde yapılan karbonatlaşma derinliği ölçümleri sonucunda ortalama karbonatlaşma derinliği bulunmuştur, bu derinlik daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Literatürde B.C.S.J., 1978' de yapılan çalışmada GKA ile üretilen betonlarda GKA oranı arttıkça karbonatlaşmanın artacağı ve referans betona göre daha çok olacağı saptanmıştır. Bu nedenle donatılı betonlarda donatıya zarar vereceği vurgulanmıştır (B.C.S.J., 1978). Buna karşın Levy ve Helene, (2004)' de yapmış oldukları çalışmada GKA ile üretilen betonlarda karbonatlaşma derinliğinin, referans betonlara göre daha az olacağını savunmuşlardır. Tez kapsamında 20 farklı örnek üzerinde yapılan karbonatlaşma deneyi sonucunda ortalama karbonatlaşma derinliğinin 9 mm olduğu saptanmıştır.
- Tez kapsamında beton molozlarına yapılan Schmidt yüzey sertlik deneyinde farklı sonuçlar bulunmuştur. Bulunan sonuçların ortalaması 29 olarak belirlenmiştir. Farklı sonuçların bulunmasının sebebi, beton yüzey sertlik değerlerini etkileyen en önemli unsurlardan birisi karbonatlaşmadır. Betonun servis ömrü boyunca maruz kaldığı CO_2 miktarına bağlı olarak karbonatlaşma miktarı artmaktadır. Beton örneklerde meydana gelen karbonatlaşma, yüzey sertliğinde artışa neden olmuştur. Bu ise, yüzey sertliğinden tahmin edilen basınç dayanımlarının da beklenen değerlerin üzerinde olmasına neden olmaktadır. Budan dolayı, geri kazanılmış agrega kullanılacak

betonların, sadece yüzey sertliği ile basınç dayanımlarının belirlenmesi hatalı sonuçlara neden olacaktır. Çalışmada atık betonların temin edildiği Ordu, Trabzon illerinde sanayileşme ve dolayısı ile havadaki CO₂ miktarı açısından Gümüşhane ilinden daha fazla hava kirliliği görülmektedir. Oluşan karbonatlaşmadan dolayı Ordu, Trabzon illerinden alınan örneklerin yüzey sertlikleri Gümüşhane ilinden daha büyük olduğu, belirlenmiştir.

➤ Geri Kazanılmış Agrega Deney Sonuçları

İnşaat atıklarından alınan blok halindeki betonlar kırılarak agrega boyutuna getirilmiş ve doğal agrega yerine kullanılabilirliğinin belirlenmesi için yapılan;

- Geri kazanılmış agregalar (GKA) üzerinde yapılan yoğunluk, nem, su emme deneyleri sonucunda GKA'ların 0-4mm ve 4-8mm boyutlarında ki yoğunluk değerleri sırası ile 1.87 gr/cm³ ve 1.99 gr/cm³, su emme oranının ise 10.13 olduğu saptanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda Topçu vd. (1995), GKA'nın beton üretiminde kullanılabilmesi için su emme oranının %2'den düşük olması gerektiğini belirtmişlerdir, Demirel ve Şimşek (2015) yapmış oldukları çalışmada su emme değerinin yüksek çıkmasının sebebinin GKA taneleri üzerinde olan eski çimento parçalarından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca yine yapmış oldukları çalışmada çeşitli sınıflamalarda GKA'nın sınır değerlerini ortaya koymuşlardır. Demirel ve Şimşek çalışmalarında GKA'nın alındığı her bölgenin kendine özgün özellikleri olduğunu ve iri GKA'nın TS 500 ve TS EN 12390-3 standartlarına göre sınır değerlerini ortaya koymuşlardır. Bu standartlar ile tezde kullanılan GKA değerleri karşılaştırıldığında GKA'ların yoğunluklarına göre "hafif agrega" sınıfında olduğu, su emme ve porozite değerlerine göre "zayıf agrega" sınıfında yer aldığı görülmüştür. Ayrıca kullanılan GKA'lar üzerinde yapılan porozite değeri %19,46 olarak bulunmuştur. Bulunan bu porozite değeri Tarhan 1989'da yapmış olduğu sınıflamaya göre değerlendirildiğinde tez çalışmasında kullanılan GKA lar "çok boşluklu" kaya sınıfın da olduğu belirlenmiştir.
- İnşaat yığıntılarından elde edilen ve doğal agrega yerine kullanılması planlanan GKA üzerinde TS EN 933-9 standartlarına göre yapılan metilen mavisi deneyinde organik madde içeriği 0,3 g/kg çıkmıştır. Üst limit değeri 1,5 g/kg olduğu standartın çok altında ince madde içerdiği belirlenmiştir.

- Geri kazanılmış agregar (GKA) üzerinde darbe dayanım deneyi yapılmıştır. Darbe dayanım deneyi sonucunda BS 812: Part 112 (1990)' standartlarına göre agregaların beton agregası olarak kullanılabilmesi için sınır değer %25 dir. Tez kapsamında kullanılan GKA' ların darbe dayanım indeksi %22 bulunmuştur. Bu da beton agregası olarak doğal agrega yerine kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca Akbulut vd. 2003'de yapmış oldukları çalışmaya göre yoğun trafiğin olduğu alanlarda kullanılacak beton döşemelerinde ve diğer beton türlerinde kullanımına uygunluk gösterdiği saptanmıştır.
- İri GKA'lar üzerinde TS 706 EN 12620 standardına göre yapılan; yassılık indeksi deneyinde yassılık indeksi %7 bulunmuştur. Agregaların betonda kullanımı için belirtilen standart değer %40'dır. Yapılan çalışma sonucunda GKA'ların yassılık indeksi açısından betonda kullanılabilir olduğu saptanmıştır.
- Agreganın, donma ve çözülme işleminden kaynaklanan hasar görme hassasiyeti, iklim şartlarına, nihai kullanıma, agreganın petrografik tipine ve agrega taneleri içindeki gözeneklerin boyut dağılımına bağlıdır. Donma çözülme şartlarına maruz betonlarda kullanılacak agregalar TS 706 EN 12620' da sınıflandırılmıştır. İnşaat atıklarından kazanılan agregalar üzerinde TS EN 1367-1'e standartlarına göre yapılan donma çözünme deneyleri sonucunda TS 706 EN 12620 standartlarına göre %2 değerinin altında olduğu ve F2 sınıfına girdiği sonucu elde edilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre, kısmi suya doygun veya doygun, tuzun olmadığı çevre şartlarındaki beton üretimlerinde kullanılabilmesi belirlenmiştir.
- GKA numuneleri üzerinde kimyasal yöntemle yapılan alkali silika reaksiyonu (ASR) analizinde, GKA'ların ASR yönünden zararsız agrega olduğu fakat literatürde betonda alkali içeren çimento ile silis agreganın potansiyel reaktifliğinin değerlendirilmesinde, kimyasal yönteme ek olarak diğer ASR analiz yöntemlerinin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. (Arslan ve Çullu, 2006, Binal 2004, Ramyar 2003,). Bu deneyle elde edilen sonuçlar betonda alkali silika reaktifliği (ASR) için tek başına kabul veya ret kriteri olarak kullanılmamalıdır. Agreganın petrografik ve hızlı harç çubuğu yöntemi ile ASR etkisi incelendikten sonra sonuçlar değerlendirilerek GKA'nın beton agregası olarak kullanılıp kullanılmayacağına karar verilebilmesi için, kimyasal yöntem ile kesin olarak belirlenemeyen Alkali silika reaksiyonu reaktifliğinin GKA'lar üzerinde hızlı harç çubuğu yöntemi uygulanmıştır, yapılan deneyde 14 günlük sürenin sonunda bütün numunelerin boy değişimlerinin kritik değerde olduğundan ASTM C1260'a

göre deney süresi 28 güne uzatılmış ve 28 gün sonunda refans örneklerin boy değişim değerlerinin ASR açısından riskli olduğu, fakat uçucu kül katkısı ve pişmiş kil katkısı eklenen örneklerde boy uzama değerlerinin azaldığı ve %0.1 in altına düşürdüğü saptanmıştır.

- Mikro-Deval deneyi TS-EN 1097-1 (2011)'ye göre uygulanmıştır, fakat GKA için ülkemizde bu konuda bir standart mevcut değildir. Bunun yanında betonda kullanılacak doğal agregalarda TS-EN 1097-1 standartına göre mikro-deval aşınma indeksi en fazla 35 olmalıdır. USA'de yapılan araştırmalar sonucunda mikro-deval sınır değerinin ise en fazla % 18 olduğu kabul edilmiştir (Wu v.d., 2004). Tez çalışması kapsamında bulunan mikro-deval değeri %8.62 olarak hesaplanmış olup beton agregasında kullanımı için her iki standarta da uygunluk göstermektedir. Los Angeles aşınma deneyi sonucunda ise TS 706 EN 12620 standartlarına göre LA₄₀ sınıfına girdiği, belirlenmiştir. "LA" ne kadar küçük değer alıyorsa, agreganın aşınmaya karşı direnci o kadar yüksektir. ASTM standartlarına göre en büyük Los Angeles aşınma değerleri 500 devir sonucunda, beton agregaları için %50, Yol, havaalanı betonlarında kullanılacak agregalar için %30 olarak belirlenmiştir. Çalışmada bulunan Los Angeles deneyi parçalanma direnci değeri olan %38, beton agregaları için uygun olurken, yol ve havaalanı betonları için uygun olamadığı belirlenmiştir.

➤ Püskürtme Beton Deney Sonuçları

Geri kazanılmış agreganın (GKA) madencilik sektöründe püskürtme betonda kullanımına yönelik çalışmalar kapsamında dökülen 10x20 cm boyutlarındaki silindirik numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda ulaşılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Püskürtme betonun boru hattı içerisinde aktarılması ve uygulama yüzeyine yapışabilmesi için çökme oranı önemlidir. Çökme oranını etkileyen en önemli faktör su/çimento oranıdır. Tez kapsamında madencilikte sıklıkla kullanılan doğal agreg (DA) yerine geri kazanılmış agreg (GKA) kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin ortalama çökme değeri 19.2 cm olarak ölçülmüştür. Lif katkısı ve geri kazanılmış agreg oranına bağlı olarak çökme değeri 18.5cm ile 21.7 cm arasında değişmiştir. Püskürtme betonda kullanılması uygun olan çökme sınıfı TS EN 206-1 standardında S4 sınıfındadır (16-21 cm). Tez kapsamında yapılan çökme testi sonuçları bu sınıfta yer almıştır. Ayrıca literatürde yapılmış çalışmalar da yapılan tezi destekler niteliktedir. Güçlü 2014'de yapmış olduğu doktora çalışmasında püskürtme

beton numunelerinde çökme değerlerini 13 ila 23 cm arasında belirlemiştir. Benzer şekilde Ayış, 2010 çalışmasında çökme miktarını 12-17cm arasında belirlemiştir.

- Tez kapsamında püskürtme beton numuneleri üzerinde yapılan ultrasonik ses geçiş hızı deneyi sonucunda, kısa kür süresinde en fazla UPV artışı %25 GKA içeren 25GKA numunelerinde %10 olmuştur. Uzun kür süresinde ise bu artış %2.8 olarak ölçülmüştür. Lifsiz betonlarda 270 gün sonunda yapılan UPV ölçümünde tamamen GKA dan oluşan 100GKA örneklerinde 4420m/s ölçülürken tamamen doğal agregaya (100DA) ile üretilen referans betonlarda %16 daha az 3812 m/s ölçülmüştür. Genel olarak bakıldığında 270 gün sonunda 100DA hız artışı %24 iken 100GKA'da %19 olarak saptanmıştır. Lif katkılı betonlarda ise lif miktarı ile P-dalga hızının doğru orantılı olduğu görülmüştür. 2 kg lif içeren 2PLYLİF örnekleri 3 gün sonunda UPV hızları 3420.6m/s iken 270 gün sonunda %16 artarak 3976 m/s olmuştur. 6 kg lif içeren örnekler ise 270 gün sonunda %15 artarak 41890 m/s ölçülmüştür. Liflerin beton içerisinde oluşturduğu boşluk yapısı sesin geçişini etkilemiştir. Geri kazanılmış agregaya yüzeyindeki çimento ses geçiş hızını artırdığı düşünülmektedir.
- Püskürtme betonda doğal agregaya (DA) kullanımının azaltılması için geri kazanılmış agregaların (GKA) kullanılabilirliği incelendiğinde tamamen doğal agregaya ile üretilen (100DA) numuneleri 28 gün sonunda tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) 13.93MPa bulunurken tamamen GKA ile üretilen (100GKA) numunelerin dayanımları %19 daha az olduğu belirlenmiştir. Hazırlanan beton örneklerinde GKA oranı düşürülerek yapılan TEBD sonucunda %25 GKA içeren numunelerin en yüksek dayanım verdiği, 28 gün sonunda 12,53MPa, 270 gün sonunda bu dayanımın 16.30 MPa'a yükseldiği saptanmıştır. Literatür çalışmaları ile uyumlu olarak geri kazanılmış agregaya oranı ile dayanımın ters orantılı olduğunu, GKA oranının artması ile tek eksenli basınç dayanımının düştüğü görülmüştür (Eguchi vd.,2007, Kou vd.,2005, Tabsh ve Abdelfettah, 2009).
- GKA'nın püskürtme betonda kullanılan sentetik lif katkıları ile etkileşiminin incelendiği çalışmada 2kg lif katkılı 2PLYLİF beton numunelerinin en yüksek TEBD verdiği 28 gün sonunda 11.8MPa, 270 gün sonunda ise 13MPa olduğu, 6 kg lif katkılı 6PLYLİF beton numunelerinin TEBD 28 gün sonunda %17 daha az çıktığı belirlenmiştir. Lif katkılı betonların, DA ile üretilen referans betonlardan %15 daha düşük dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Düşük dayanımın sebebi literatürde yapılan çalışmalarda, lif katkılı betonlar ile üretilen püskürtme beton örneklerinin

içerisinde boşluk oranı fazla olması nedeni ile basınç dayanımlarının lifsiz betonlardan daha düşük çıktığı şeklinde açıklanmıştır (Karahan, 2006).

- Madencilikte kullanılan lifli betonlarda tokluk ve sehim değerleri ani kırılma ve çökme süreleri açısından çok önemlidir. Üzerinde tonlarca yük taşıyan yeraltı tahkimat elemanlarının, enerji yutma kapasitelerinin artması gerek dinamik gerekse statik yüklemelerde yapılan işi arttırarak, püskürtme betona daha yüksek deformasyon yapabilme yeteneği kazandırır. Normal betonlar gerilme altında sınırlı miktarda deformasyon yapabilir ve yük artımı sonucunda sistem göçer. Lifler ise çatlakları sınırlı mertebede tutup gerilme transferi ile betona daha yüksek deformasyon yapma yeteneği sağlarlar (Yiğiter, 2002). Bu nedenle yeraltında doğal agregaya yerine GKA'nın püskürtme betonda kullanılabilirliği incelemek açısından 60x60x10 cm boyutlarında dökülen plak numuneler üzerinde tokluk ve sehim değerleri incelenmiştir. Tez kapsamında yapılan ölçümler sonucunda, lif içermeyen ve %25, %50 ve %100 GKA ile üretilen plakların ise tokluk değerleri sırası ile 35, 29 ve 17 j çıkmıştır, Lifsiz referans 100GKL plaklarında tokluk değeri 16.55 joule bulunurken 6 kg polipropilen lif katkılı 6GPL kodlu plakların tokluk enerjisi 581 j bulunmuştur lif içeren betonların lif oranları arttıkça sehim ve tokluk indekslerinin arttığı, bu değerlerin referans betona göre çok yüksek olduğu saptanmıştır. Yeraltında genel olarak tahkimat amaçlı kullanılan püskürtme betonda, doğal agregaya yerine GKA kullanılması ve bunların liflerle desteklenmesi enerji yutabilme kapasitesinin artırmaktadır.
- Plaklardan alınan 10x10cm boyutunda silindir numuneler üzerinde yapılan donma çözünme deneyinde özellikle kopolimer liflerin artan porozite nedeni ile donma çözünmeye olumsuz etkiledikleri, lifli serilerin ultrases geçiş hızı değerleri, lifsiz serilerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. GKA püskürtme betonda kullanımının donma çözünmeye karşı direncini ve GKA'lı püskürtme betonda kullanılan liflerin donma çözünmeye etkisi literatürde henüz araştırılmamıştır. Buna karşın birçok araştırmacı geri kazanılmış agregayı normal betonda kullanmış ve bu betonların donma çözünmeye karşı direnç gösterdiğini saptamışlardır. GKA yüzeyinde ki çimento kalıntılarının, karışım içerisinde hava sürüklenmiş beton gibi davrandığını, bu nedenle de beton içerisinde GKA yüzeyindeki harç miktarı azaltıldığı zaman açık bir şekilde donma-çözülme direncine katkı sağlamadığı görülmüştür (Gokce vd. 2004). Kısacası, agreganın yüzeyine yapışan çimentonun içinde var olan boşluklardan dolayı geri kazanılmış agregalı beton hava sürüklenmiş beton gibi davrandığından geleneksel

betona göre daha iyi donma-çözülme direnci gösterdiği, bununla birlikte literatürde lifli betonların donma çözünmeye karşı direnci konusunda yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar içerdiği, birçok çalışmada lifli betonlarda yapılan donma-çözülme deneylerinde lifin, betonlarda ultrases geçiş hızını azalttığı belirtmişlerdir (Yıldırım ve Ekinci, 2006). Tez kapsamında yapılan çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Lif içerikli betonlarda kısa döngülerde donma çözünme etkisi referans numunelere göre az olurken uzun dönemde beton içerisinde topaklaşan liflerin bir kütle şeklinde davranarak toplam kütleden hızlı bir şekilde koparak ayrıldığı ve tamamen dağılmaya neden olduğu görülmüştür.

➤ Yeraltı dolgu deney sonuçları

Bina molozlarından elde edilen iri agregaların madencilikte yeraltında dolgu amaçlı kullanılabilirliğini belirlemek için hazırlanan 150x150x150 mm küp numuneler üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir.

- Tek eksenli basınç dayanım testlerinde beton numunelerinde doğal agrega yerine iri boyutlu geri kazanılmış agrega (GKA) oranı arttıkça dayanımda belirgin bir artışın olduğu, tamamen doğal agrega ile üretilen numunelerin 28 gün sonunda tek eksenli basınç dayanımları 3.37MPa olurken, tamamen GKA ile üretilen numuneler %22 fazla dayanım gösterdiği saptanmıştır.
- Yeraltı dolgusunda GKA ile beraber çimentoya ikame olarak kullanılan uçucu külün %25 seviyesinde dayanıma olumlu etki yaptığı, uçucu kül oranının %50 ye çıkarıldığında dayanımda %38 düşüş olduğu görülmüştür. %25 uçucu kül katkılı 25UGKA 28 gün sonunda tek eksenli basınç dayanımı 4.24MPa iken %50 uçucu kül katkılı 50UGKA 28 gün sonunda tek eksenli basınç dayanımı 2.64MPa olarak saptanmıştır. Betonda GKA ile birlikte uçucu külün kullanılmasının hem ince malzeme görevi görerek boşlukları doldurması hem de puzolan etkisi yaparak dayanıma katkı sağladığı, ancak bağlayıcıya ikame olarak belli bir oran aşıldığında dayanımı düşürdüğü belirlenmiştir.
- Madencilikte yeraltındaki boşlukları doldurmak amacı ile dökülen kütle betonların iri GKA oranı arttıkça UPV hızının da arttığı, belirli oranda uçucu kül katkısının dayanıma olumlu etkisi olurken UPV ye olumsuz yönde etki ettiği belirlenmiştir. Yeraltında uygulanan kaya dolguların büyük bir çoğunluğu dozer ve kamyonlar yardımı ile yerine yerleştirilmektedir. Dolayısıyla katı oranlarının yüksek olması ve ayrışmaması istenir. Bu nedenle çalışmada kullanılan dolgu beton örneklerinin çökme

oranları ölçülmüş ve ortalama 5-5.5 cm arasında olduğu ve TS EN 206-1 standardında verilen kıvam sınıflarından S2 sınıfında (50-90 mm) olduğu saptanmıştır. Yüksek kıvam geri kazanılmış agregaların sahaya uygulanabilirliğini artıracığı ortaya konulmuştur.

Sonuç olarak bina molazlarından elde edilen geri kazanılmış agregaların (GKA) madencilik sektöründe kullanılması ile inşaat atıklarının oluşturduğu depolama ve çevresel problemlerin önüne geçeceği, GKA'ların madencilik sektöründe kullanılmasının doğal agrega tüketimini ve taş ocak madenciliğinin oluşturduğu çevresel etkileri azaltacaktır.



5. KAYNAKLAR

- Abdul-Hussain, N., 2011. Experimental Study on the Engineering Properties of Gelfill, MSc Thesis, University of Ottawa, Ottawa, Canada, 229 p.
- Adams, M.P., Fu, T., Cabrera, A.G., Morales, M., Ideker, J.H., ve Isgor, O.B., 2016. Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete Aggregates, Construction and Building Materials, 102 802–810.
- Akbulut, H., İaa, Y., ve Gürer, C., 2003. Atık Agregaların Asfalt Yol Kaplamalarında Tekrar Kullanım İmkanları ve CEN Standartları III Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Aralık, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 271-276
- Altınışik, D., 2013. Sürdürülebilirlik Kavramı Bağlamında Geri Kazanılmış Agregalı Beton, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Amaratunga, L. ve Hein, G.G., 1997. Development of a High Strength Total Tailings Paste Fill Using Fine Sulfide Mill Tailings, Proceedings Of The 29th Annual Conference of The Canadian Mineral Processors, Ottawa (Ontario)-Canada, 293-305.
- Andiç akır, ., 2007. Alkali-Agrega Reaktivitesinin Tespitinde Kullanılan Deney Metotlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 252 s.
- Archibald, J., Gange, D.D., Nantel, J., ve Hassani, F., 2003. Underground Mine Backfill, Vol. I.
- Arenas, C., Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Vilches, L.F., Arroyo, F., Villegas, R., ve Fernández-Pereira, C., 2017. Development of a Fly Ash-Based Geopolymeric Concrete with Construction and Demolition Wastes as Aggregates in Acoustic Barriers, Construction and Building Materials, 134433–442.
- Arioğlu, E. ve Yüksel, A., 2002. Yeraltı Yapılarında Pkrtme Beton. İstanbul: TMMOB Maden Müh. Odası alışma Raporu.
- Arioğlu, E., Arıoğlu, N., ve Kurt, G., 2009. Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Kimi Mekanik Büyüklüklerinin İncelenmesi, Beton Prefabrikasyon, 89, 5-11.
- Arioğlu, E., Köylüoğlu, .S., ve Arıoğlu, N., 1996. Dünyadaki Geri kazanılmış agrega üretim ve politikalarının gözden geçirilmesi ve ülkemiz açısından irdelenmesi, 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 33-52.

- Arioğlu, E., Yüksel, A., ve Yılmaz, A.O., 2008. Püskürtme Beton Bilgi Föyleri – Çözömlü Problemler, İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın No: 142.
- Arslan, M., ve Çullu, M., 2006. Ankara Yöresindeki Bazı Agregâ Ocaklarının Alkali Silika Reaktivitesi Açısından İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 21,4, 613-620.
- Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Ankara.
- ASTM C 597-16, 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 618, 1998. Standard Specification for Coal FlyAsh and Rawor Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM, U.S.A.
- ASTM C 666-97, 1998. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing”, Concrete and Mineral Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, USA, 4, 2, 1-6.
- ASTM C 805, 2013. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete PAGE:1-4.
- ASTM, 2010. Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, American Standarts for Testing and Materials, D7012-10, United States, 9.
- Ayış, H.İ., 2010. Tünel Açma Sistemlerinde Çelik Lifli Püskürtme Betonun Uygulanabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- B.C.S.J., 1978. Study on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. Building Contractors Society of Japan. Committee on Disposal and Reuse of Concrete Construction Waste. Summary in Concrete Journal, Japan, 16, 7, 18-31.
- Behnood, A., Gharehveran, M.M., Asl, F.G., ve Ameri, M., 2015. Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash, Construction and Building Materials, 96, 172–180
- Benzaazoua, M., Belem, T., ve Bussiere, B., 2002. Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill, Cement and Concrete Research, 32, 1133-44.
- Bieniawski, Z.T., 1975. The Point Load Test in Geotechnical Practice. Eng. Geol., Sept., 1-11.
- Binal, A., 2004. Pesimum Reaktif Agregâ İçeriğinin Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisinin Deneysel Yöntemlerle Araştırılması, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 17, 2, 119-128.

- Birön, C. ve Artoğlu, E., 1985. Beton Tahkimat ve Dolgu, Madenlerde Tahkimat İşleri ve Tasarımı, Birsen Kitabevi, 276-360 İstanbul.
- Boesman, B., 1985. Crushing and Separating Techniques for Demolition Material, EDA/RILEM Demo-Recycling Conference, Proceedings, Vol. 2, Re-Use of Concrete and Brick Materials, Rotterdam, European Demolition Association, Wassenaarseweg 80, 2596 CZ, Den Haag, The Netherlands.
- Bourchier, F.B., 1990. Practical Considerations of Shotcrete in an Underground Mining Environment, Doktora Tezi, Toronto Üniversitesi.
- BSI, 1990. Testing aggregates: Methods for determination of particle shape, part 105-2. Code no. BS812, British Standards Institution, London.
- Cardoso, R., Silva, R.V., Brito, J., ve Dhir, R., 2016. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review, Waste Management, 49, 131–145.
- Chandra, S., 2004. Implications of using recycled construction and demolition waste as aggregate in concrete, International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling, Kingston University, 105-114, London.
- Choi, P., Yun, K., ve Yeon, J.H., 2017. Effects of mineral admixtures and steel fiber on rheology, strength, and chloride ion penetration resistance characteristics of wet-mix shotcrete mixtures containing crushed aggregates, Construction and Building Materials, 142, 376–384.
- Choi, S., Choi, J., Song, J. ve Lee, B.Y., 2015. Rheological and mechanical properties of fiber-reinforced alkali-activated composite, Construction and Building Materials, 96, 112–118.
- Choumanidis, D., Badogiannis, E., Nomikos, P., ve Sofianos, A., 2017. Barcelona test for the evaluation of the mechanical properties of single and hybrid FRC, exposed to elevated temperature, Construction and Building Materials, 138, 296–305.
- Contreras, M., Teixeira, S.R., Lucas, M.C., Lima, L.C.N., Cardoso, D.S.L., Silva, G.A.C., Gregório, G.C., Souza A.E., ve Santos A., 2016. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study), Construction and Building Materials, 123, 594–600.
- Çakmakçı, G., 1997. Mechanical Evaluation of Cemented Backfill Materials, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural & Applied Sciences, Ankara.
- Darling, P., 2011. SME Mining Engineering Handbook third edition- volume two, 1375-1384.
- Davraz, M., Gündüz, L., 2004. Doğal Amorf Silikanın Alkali Silika Reaksiyonu Gelişimine Etkisi, Beton 2004, İstanbul, ss. 664-673

- Demir, İ., 2009. İnşaat Yıkıntı Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı ve Beton Özelliklerine Etkisi, *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 02, 105 -114.
- Deng, Z., Shi, F., ve Yin, S., 2016. Characterisation of macro polyolefin fibre reinforcement in concrete through round determinate panel test Rabin Tuladhar, *Construction and Building Materials*, 121, 229–235.
- Di, W., Yongliang, Z., ve Yucheng, L., 2016. Mechanical performance and ultrasonic properties of cemented gangue backfill with admixture of fly ash, *Ultrasonics*, 64, 89-96.
- Dilbas, H., Şimşek, M., ve Çakır, Ö., 2015. Kentsel Dönüşüm Sonucu Oluşan Molozların Geri Dönüşümle Betonda Kullanımı, *Silis Dumanı Katkılı Geri Kazanılmış Agregalı Betonlar*, Ulusal Beton Kongresi, Antalya.
- Döndüren, M.S., ve Şişik, Ö., 2016. Geri Dönüştürülmüş Agregarlarla Üretilen Betonların Özellikleri, *Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Teknik-Online Dergi*, 15, 2.
- DSİ, 1994., Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi, Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton MLZ-878: 9-75, Ankara.
- Eguchi, K., Teranishi, K., Nakogome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K., ve Narikawa, M., 2007. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction, *Construction and Building Materials*, 21: 1542-1551.
- Erçıkıd, B., 2009. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, s125.
- Erdin, E., Alten, A., ve Tunalı, T., 2004. İnşaat Atıklarının Değerlendirilmesi, *5 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, *Bildiriler Kitabı*: 387, 393.
- Esin, T., ve Coşgun, N., 2007. A Study Conducted to Reduce Construction Waste Generation in Turkey, *Building and Environment*, 42, 1667-1674.
- Fall, M., Celestin, J.C., Pokharel, M., ve Toure, M., 2010. A Contribution to Understanding the Effects of Curing Temperature on the Mechanical Properties of Mine Cemented Tailings Backfill, *Engineering Geology*, 114, 3-4, 397–413.
- Fallah, S., ve Nematzadeh, M., 2017. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume, *Construction and Building Materials*, 132, 170–187.
- Fatemi, S., ve Imaninasa, R., 2016. Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials, *Construction and Building Materials* 120, 450–456.
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Öz, H.Ö., Taha, I., ve Yasemin, M.T., 2015. Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled Aggregates, *Construction and Building Materials*, 98, 334–344.

- Girgin, C., Yüksel, A., ve Arıoğlu, E., 1998. Tünelde Püskürtme Betonun Mekanik Büyüklükleri ve Kalite Kontrol İlkeleri, Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, Ekim, Zonguldak, Türkiye, Bildiriler Kitabı.
- Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T., ve Hisada, M., 2004. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete, Cement and Concrete Research, 34:799–806.
- Guang-li, G., Xiao-jun, Z., Jian-feng, Z., ve Qiang, W., 2014. Subsidence prediction method based on equivalent mining height theory for solid backfilling mining, *Trans. Nonferrous Met. Soc., China*, 24, 3302-3308.
- Guo, G., Feng, W., Zha, J., Li, Y., ve Wang, Q., 2011. Subsidence control and farmland conservation by solid backfilling mining technology, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21, 665-669.
- Güçlü, E., 2014. Maden Galerilerinde Püskürtme Betonun Yenilme Sonrası Performansının Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Haiqiang, J., Cao, Y., Huang, P., Fang, K. ve Li, B., 2015. Characterisation of coal-mine waste in solid backfill mining in China, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, 124, 1, 56-63.
- HQ, AFCEE, Construction and Demolition Waste Management Guide, 2004. Pocket Guide, www.afcee.brooks.af.mil/green/resources/resources.asp, United States of America.
- Hustrulid, W.A., ve Bullock, R.L.Ed., 2001. *Underground Mining Methods*. Colorado: SME.
- IS., 1992. Non-destructive testing of concrete methods of test, part1, IS, 13311.by, bureau of indian standards, manak bhavan, 9 bahadur shah zafar maro new delhi 110002.
- ISRM, 1985. Suggested method for determining point load strength, *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, 22, 51-60.
- Jian, L., Jixiong, Z., Yanli, H., Qiang, Z., ve Junming, X., 2012. An investigation of surface deformation after fully mechanized, solid back fill mining, International Journal of Mining Science and Technology, 22, 453–457.
- Jian, L., Jixiong, Z., Yanli, H., Qiang, Z., ve Junming, X., 2012. An investigation of surface deformation after fully mechanized, solid back fill mining, International Journal of Mining Science and Technology, 22 (2012) 453–457.
- Jian-feng, Z., Guang-li, G., Wen-kai, F., ve Qiang, W., 2011. Mining subsidence control by solid backfilling under buildings, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21, 670-674.

- Kadam, B. S., Singh, Y., ve Li, B., 2014. Strengthening of unreinforced masonry using welded wire mesh and micro-concrete – Behaviour under in-plane action, Construction and Building Materials, 54, 247–257.
- Karahan, O., 2006. Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Katayama, T., 2000. Alkali-aggregate reaction in the vicinity of Izmir, Western Turkey, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Bérubé, M.A., Fournier, B., Durand, B. (eds.), Quebec, Canada, 365-374.
- Kaufmann, J., Frech K., Schuetz P., ve Münch, B., 2013. Rebound and orientation of fibers in wet sprayed concrete applications, Construction and Building Materials, 49, 15–22
- Kawano, H., 2003. The state of using by-products in concrete in Japan and outline of JIS/TR on recycled concrete using recycled aggregate, Proceedings of The 1st The International Federation For Structural Concrete Congress On Recycling, 10, 245–253.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Alp, İ., Yumlu, M., ve Özdemir, B., 2002. Çimentolu Macun Dolgunun Laboratuvar Testi, Madencilik, 41 (4), 11-20.
- Khalaf, F.M., ve Devenny, A.S., 2004. Recycling of demolished masonry rubble as course aggregate in concrete: review, ASCE Journal of Material In Civil Engineering, 16:331-340.
- Kou, S.C., Poon, C., ve Chan, D.,. Properties Of Steam Cured Recycled Aggregate, Fly Ash concrete , <http://congress.cimne.uupc.es/rilem04/admin/Files/FilePaper/p200.pdf>, 20. 03. 2017.
- Köken, A., Köroğlu, M.A., ve Yonar, F., 2008. Atık Betonların Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi Cilt 7, Sayı:1.
- Külekcı, G., 2013. Mermer ve Tuğla Atıklarının Macun Dolguda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Landriault, D. A., 1995. Paste Backfill Mix Design for Canadian Underground Hard Rock Mining, Proceedings of the 97th Annual General Meeting of the CIM Rock Mechanic and Strata Control Session, Nova Scotia–Canada, 652–663.
- Landriault, D., 2006. They said “It will never work.”-25 years of Paste Backfill 1981-2006, Proceeding of 9th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Limerick, Ireland, 277-292.
- Lee, J., Cho, B., ve Choi, E., 2017. Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content, Construction and Building Materials, 138, 222–231.

- Lennon, M., 2005. Recycling Construction and Demolition Wastes A Guide for Architects and Contractors, The Institution Recycling Network.
- Lennon, M., 2005. Recycling Construction and Demolition Wastes A Guide for Architects and Contractors, The Institution Recycling Network.
- Lucas, E.A., Medina, C., Frías, ve Rojas, M.M.I.S., 2016. Clay-based construction and demolition waste as a pozzolanic addition in blended cements; Effect on sulfate resistance, Construction and Building Materials, 127, 950–958.
- Maida, P.D., Radi, E., Sciancalepore, C., ve Bondioli, F., 2015. Pullout behavior of polypropylene macro-synthetic fibers treated with nano-silica, Construction and Building Materials, 82, 39–44.
- Malmgren, L., Nordlund, E., ve Rolund, S., 2005. Adhesion strength and shrinkage of shotcrete, Tunneling and underground space technology, 20, 1, 33-48.
- Melbye, T.A., ve Dimmock, R.H., 2001. Modern Advances and Applications of Sprayed Concrete” Keynote Paper Given at the International Conference on Engineering in Shotcrete, Hobart, Tasmania, April, Australia.
- Mo, K. H., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., ve Liu, M.Y.J., 2015. Contribution of acrylic fibre addition and ground granulated blast furnace slag on the properties of lightweight concrete, Construction and Building Materials, 95,686–695.
- Modani, P.O., ve Mohitkar, V.M., 2014. Self-compacting concrete with recycled aggregate: A solution for sustainable development, International Journal of Civil and Structural Engineering, 4, 3.
- Mueller, A., Schnell, A., ve Ruebner, K., 2015. The manufacture of lightweight aggregates from recycled masonry, Rubble Construction and Building Materials, 98, 376–387.
- Muzgina, V.S., 2003. Madencilikte Katı Dolgu Yapma İşleminin Ekonomik Yönden İncelenmesi, Türkiye 18 Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, IMCET2003, 214.
- Nan Z., Zhang Q., Feng J., ve Shiwei L., 2013. Pre-Treatment Research in Solid Backfill Material in Fully Mechanized Backfilling Coal Mining Technology, Disaster Advances, 6, 118-125.
- Nan, Z., Jixiong, Z., Baifu A., Zhang Q., Yanli H., ve Feng J., 2014. Solid material motion law in vertical feeding system within fully mechanized coal mining and backfilling technology, Environmental engineering and management journal, 13, 1, 191-196.
- Nandy, S.K. ve Szwilski, A.B., 1987. Disposal and Utilization of Mineral Wastes as a Mine Backfill, Advances in Mining Science and Technology, 1, 241-252.
- Nanthanathan, N., 2006. Backfill Optimization Using Mine Tailings for Improved Ground Stability in Underground Mines., Dalhousie University, Canada.

- Nasir, O., ve Fall, M., 2009. Coupling Binder Hydration, Temperature and Compressive Strength Development of Underground Cemented Paste Backfill at Early Ages, Tunneling and Underground Space Technology, 25,1, 9-20.
- Oikonomou, N.D., 2005. Recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites, 27, 315–318.
- Oymael, S., 2009. Yapıda Beton Teknolojileri ve Teorisi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı Ders Notları, Edirne.
- Özalp, F., Yılmaz, H.D., Kara, M., Kaya, Ö., ve Şahin, A., 2016. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes, Construction and Building Materials, 110 17–23
- Özalp, F., Yılmaz, H.D., ve Kaya Ö., 2015. İnşaat ve Yıkıntılardan Geri Kazanılan Agregaların Çeşitli Beton Elemanların Üretiminde Değerlendirilmesi, Ulusal Beton Kongresi, Antalya.
- Özdoğan, M.V., 2009. Yeraltı Yapılarında Püskürtme Beton ve Dolgu Dizaynı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Öztürk, M., 2003. İnşaat/Yıkıntı Atıklarının Yönetimi, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara,
- Öztürk, Ö., Çelikkol M. ve Erkan M., 2007. Türkiye Agrega Sektör Raporu”, Kasım-Aralık, 52-56.
- Park, Y., Abolmaali, A., Mohammadagha, M., ve Lee, S., 2015. Structural performance of dry-cast rubberized concrete pipes with steel and synthetic fibers, Construction and Building Materials, 77, 218–226
- Poon, C.S., 2007. Management of Construction and Demolition Waste, Waste Management, 27, 159-160.
- Potvin, Y., 2005. Pastefill in Australia, Handbook on Minefill, 101-108.
- Rahal, K., 2007. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, Building and Environment, 42, 407–415, Kuwait.
- Rakshvir, M. ve Barai, S.V., 2006. Studies on Recycled Aggregates-Based Concrete, Waste Manage Res., 24, 225-233.
- Ramyar, K., 2003. Betonda Alkali-Silis Reaksiyonu: Bir Derleme, Hazır Beton, 70-82.
- Rao, A., 2005. Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete, Thesis Submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur.
- Rao, A., Kumar, N., Jha ve Misra, S., 2007. Use of aggregates from recycled construction and demolitionwaste in concrete, Conservation and Recycling, 50, 71-81.

- Salomon, M.L. ve Paulo H., 2004. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development”, *Cement and Concrete Research*, 34, 1975–1980.
- Samton, G., 2003. *Construction and Demolition Waste Manual*, City of New York.
- Schepper, M.D., Heede, P.V., Arvaniti, E.C., Buysser, K.D., Driessche, I.V., ve Belie, N.D. 2017. Sulfates in Completely Recyclable Concrete and the effect of CaSO₄ on the clinker mineralogy, *Construction and Building Materials*, 137, 300–306.
- Sharma, J., ve Singla, S., 2014. Study of Recycled Concrete Aggregates, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 13, 3.
- Silva, R.V., Brito de J., ve Dhir R.K., 2016. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes, *Construction and Building Materials*, 105, 400–415.
- Sivakugan, N., Rankine, R.M., Rankine, K.J. ve Rankine, K.S., 2006. Geotechnical considerations in mine backfilling in Australia, *Journal of Cleaner Production*, 14, 1168–1175.
- Su, Y., Li J., Wub C., Wub P., ve Li Z., 2016. Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC, *Construction and Building Materials*, 114, 708–718.
- Symonds Report to DGXI European Commission, Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts, http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_chapter1-6.pdf , 22. 02. 2015.
- Şimşek, O., 2007. *Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Tabsh, S. ve Abdelfettah, A., 2009. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 23, 1163-1167.
- Thomas, E.G., Nantel, J.H., ve Notely, K.R., 1981. *Fill Technology in Underground Mealliferous Mines*, *Internitonal Academic Services Limited*, Canada, 293.
- Torlach, J., 2000. Potential hazards associated with minefill, *Safety Bulletin 55*, Department of Minerals and Energy of Western Australia.
- TS 10449, 1992. *Mermer – Kalsiyum Karbonata Esaslı – Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan*, Ankara.
- TS 10515, 1992. *Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2824 EN 1338, 2005. *Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-Gerekli şartlar ve deney metotları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 699, 1987. *Tabii Yapıtaşlarının Muayene ve Deney Metodları*, UDK 6912, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

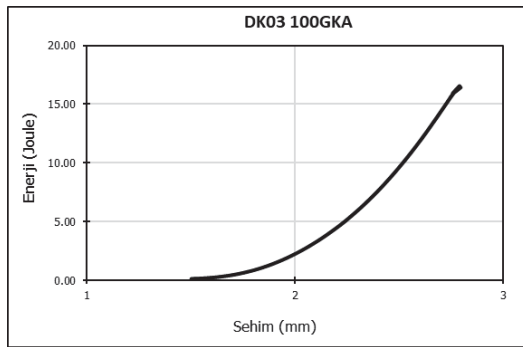
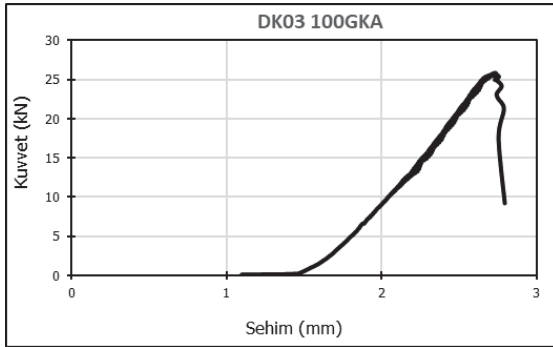
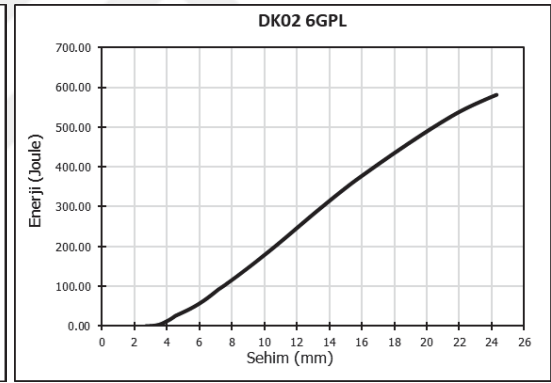
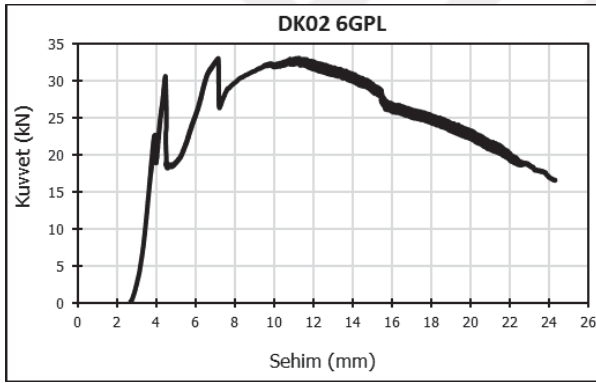
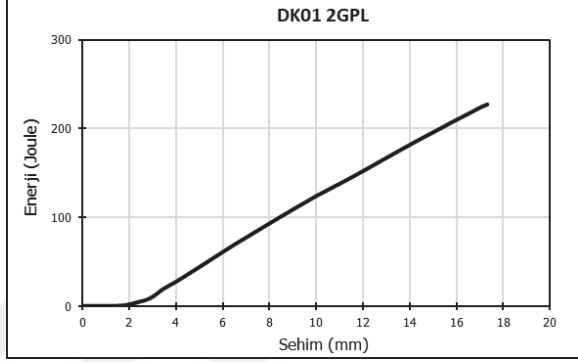
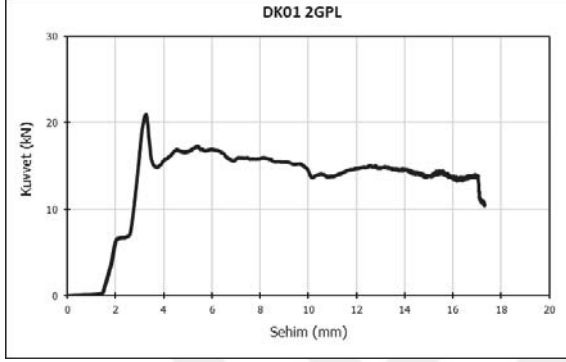
- TS 706 EN 12620, 2003. Beton agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS 706 EN 12620+A1, 2009. Beton Yapımında Kullanılmak Amacıyla, Doğal, Yapay Veya Geri Kazanılmış Agregaların, Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılan Agregaların Ve Bu Malzemelerin Oluşturduğu Karışımların Özellikleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2, 2000. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğuve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2, 2010. Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2010. Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş Beton Yoğunluğunun Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1367-1, 2001. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 1: donmaya ve çözülmeye karşı direncin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 14651+A1, 2008. Metal lifli beton- Deney yöntemi- Eğilmede çekme dayanımının tayini (Kalıcı orantısal sınır (LOP)), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 197-1, 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206 +A1, 2013. Concrete Specification, performance, production and conformity, Türk Standartları Enstitüsü, 1-12 Ankara.
- TS EN 206-1, 2002. Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 932-2, 1999. Agregaların genel özellikleri için deneyler bölüm 2: Laboratuvar numunelerin azaltılması metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 933 – 9, 2001. Agregaların Metilen Mavisi Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 933-3, 1999. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 3: Tane Şekli Tayini Yassılık Endeksi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-9+A1:2013, 2014. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 9: İnce malzeme tayini- Metilen mavisi deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tu, T.Y., Chen, Y.Y., ve Hwang, C.L., 2006. Properties of HPC with recycled aggregates, Cement and Concrete Research, 36 943–950.

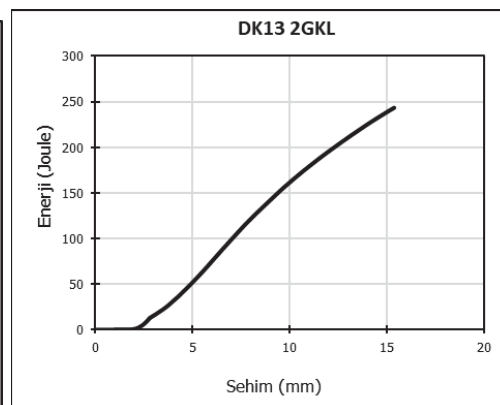
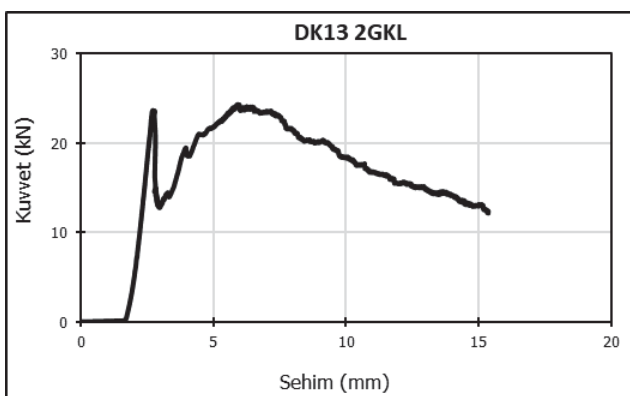
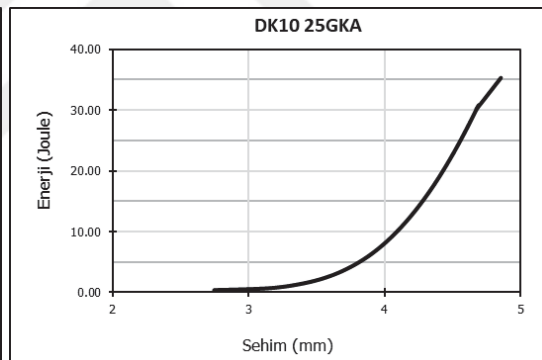
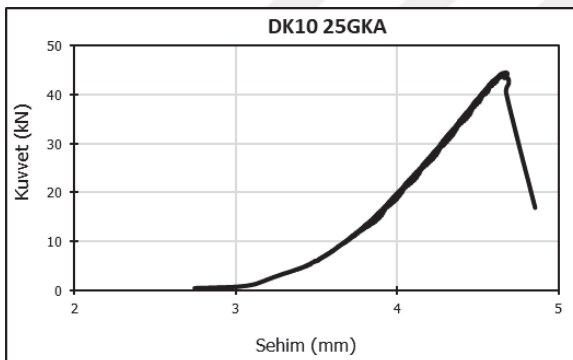
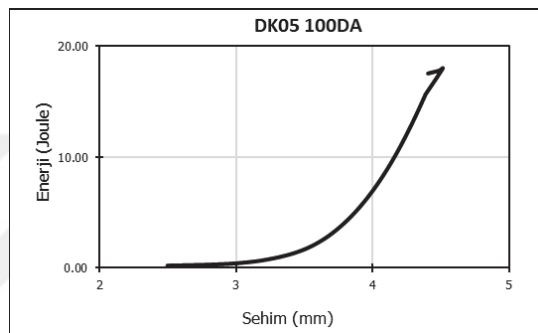
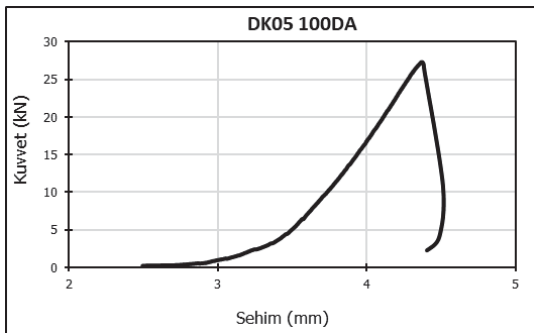
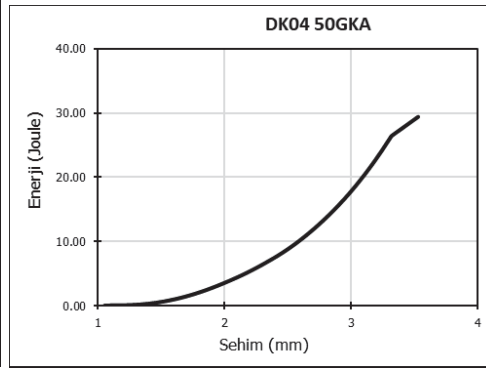
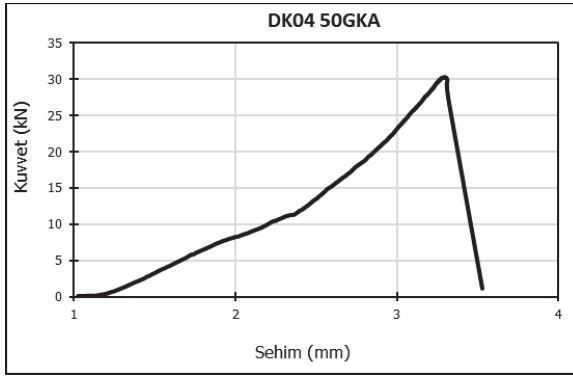
- Tüfekçi, M.M., 2011. Geri Kazanılmış Agregaların Beton Üretiminde Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- URL 1, <http://www.edumine.com/courses/online-courses/underground-mine-backfill-1-introduction/>, 25.03.2017.
- URL 2, http://www.pmw.de/cps/rde/xchg/SID-F8CB512C-65402D4D/pm_online/hs.xsl/9046_ENU_HTML.htm, 22.04.2017
- URL 3, <http://www.tailings.info/storage/backfill.htm>, 15.03.2017
- URL 4, <https://www.endomines.com/index.php/karelian-gold-line/pampalo>, 05.03.2017
- URL 5, <https://www.gettyimages.com/detail/photo/scooptram-or-mucker-loading-backfill-into-high-res-stock-photography/187137018>
- Weaver, W.S. ve Luka, R., 1970. Laboratory Studies of Cement-Stabilized Mine Tailings. CIM Bulletin, 63, 701, September, 988-1001.
- Wu, Y., Parker, F., ve Kandhal, K., 2004. Aggregate Toughness/Abrasion Resistance and Durability/Soundness Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements. NCAT Report 98-4, National Center for Asphalt Technology, Auburn, Alabama.
- Xiao, J., Li, W., F., Fan, Y. ve Huang, X., 2012. An Overview of Study on Recycled Aggregate Concrete in China (1996-2011), Construction and Building Materials, 31, 364-383.
- Xuan D., Zhan B. ve Poon C. S., 2016. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites, 65-67, 74.
- Yazdanbakhsh, A. ve Bank, L.C., 2016. The effect of shear strength on load capacity of FRP strengthened beams with recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials, 102, 133-140.
- Yazıcı, H., 2004. Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yıldırım, S.T., ve İkinci, C.E., 2006. Çelik, Cam ve Polipropilen Lifli Betonlarda Donma Çözülme Etkilerinin Araştırılması, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 18, 3, 359-366.
- Yılmaz, E., 2003. Sülfür içeren Maden Atıklarından Hazırlanan Çimentolu Macun Örneklerinin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 117.

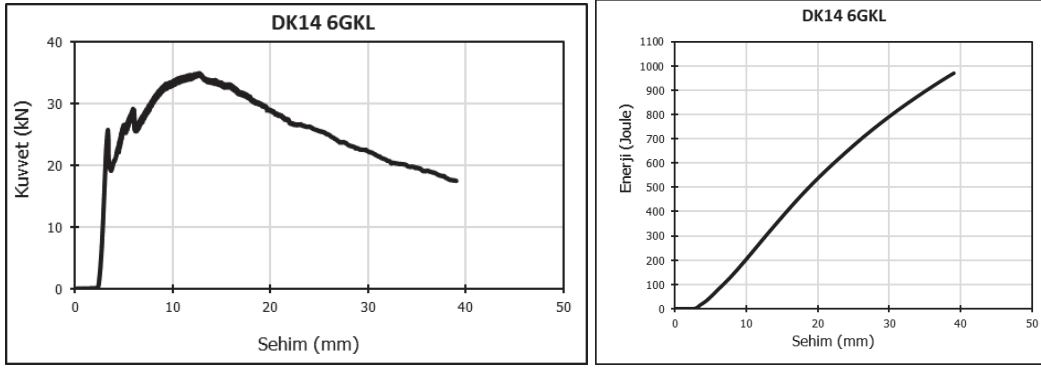
- Yiğiter, H., 2002. Yüksek Performanslı Betonların Süneklik Özelliğinin Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 207s.
- Yong, P.C., ve Teo, D.C.L., 2009. Utilisation Of Recycled Aggregate As Coarse Aggregate Concrete, Unimas E-Journal Of Civil Engineering, 1, 1.
- Yumlu, M., 2001. Backfill Practices at Çayeli Mine. Proceeding of the 17th international Mining congress and Exhibition of Turkey. Ankara 333-339.
- Yun K., Choi S., ve Yeon, J.H., 2015. Effects of admixtures on the rheological properties of high-performance wet-mix shotcrete mixtures, Construction and Building Materials, 78, 194–202.
- Yurdakul, Ş., 2001. Püskürtme Beton Teknolojisinin TTK Ocakları Ana Galerilerinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Müh. Tezi, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 221s.
- Zhiqiang, Y., Shuhua, Z., Qian, G., ve Maohui, L., 2005. Stability analysis of large-scale stope using stage subsequent filling mining method in Sijiaying iron mine, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7-87, 94.

6. EKLER

EK 1 Püskürtme betonu enerji yutma kapasitesi plak deneyleri tokluk ve kuvvet eğrileri







Plak numunelerin kuvvet-sehim ve enerji-sehim ilişkisi



ÖZGEÇMİŞ

Gökhan KÜLEKÇİ 1986'da Gümüşhane'de doğmuştur. İlkokulu Gümüşhane Merkez Gazipaşa ilkokulunda tamamlayan Gökhan KÜLEKÇİ, orta ve lise eğitimini Gümüşhane Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. Lise eğitiminden sonra 2005 yılında Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümünü kazanmıştır. Bir yıl burada okuyan Gökhan Kulekçi 2006 yılında ÖSYM'nin özel durumlar yönetmeliğinden yararlanarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümüne geçiş yapmıştır. 2010 yılında 4 üzerinden 3.20 ortalama ile bölüm birincisi olarak eğitimini tamamlamıştır Aynı yıl içerisinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini bitirmiştir. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora programına başlamıştır. Gökhan KÜLEKÇİ akademik hayatı boyunca 3'ü uluslararası hakemli olmak üzere 5 adet makalesi ve 20'nin üzerinde bildirisi bulunmaktadır. 2010 yılında ÖYP programı kapsamında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve doğa Bilimleri Fakültesi Maden Mühendisliği bölümüne Araştırma görevlisi olarak atanmıştır. 3 yıl Karadeniz Teknik Üniversitesinde görev yapan Gökhan KÜLEKÇİ şu anda Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Kazı mekanizasyon anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Yazar evli ve iki çocuk babasıdır.