

**HAFİF BETON AGREGASI OLARAK ATIK
PLASTİKLERİN VE PET'İN
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**Merve GÜL
Yüksek Lisans Tezi**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışmanı: Doç. Dr. Filiz KAR
Nisan - 2018**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAFİF BETON AGREGASI OLARAK ATIK PLASTİKLERİN VE PET'İN
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve GÜL

(142118105)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Mart 2018
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Nisan 2018

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Filiz KAR (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nurhan ARSLAN (F.Ü)

Prof. Dr. Mehmet Adıgüzel YÜCEER (İ.Ü)

NİSAN-2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bana değerli görüş ve katkılarıyla yol gösteren, çalışmamın her kademesinde büyük bir özveri göstererek bana yardımcı olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Filiz KAR' a,

Laboratuvar çalışmalarında laboratuvar olanaklarından faydalandığım Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümüne, özellikle tecrübeleriyle çalışma arzumuzu görüp yönlendiren ve bakış açısıyla ufukumuzu açan Sn. Prof. Dr. Nurhan ARSLAN' a,

Analizlerinin yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü tüm araştırma görevlilerine, özellikle ısı iletkenlik katsayısı ölçümü aşamasında emeği geçen Sn. Arş. Gör. Ercan AYDOĞMUŞ' a, kendi çalışmalarından esinlenerek yardımcı olan Sn. Arş. Gör. Dr. Ayşe BİÇER' e,

Analizlerin yürütülmesinde laboratuvarlarını kullanmama olanak sağlayan Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Sn. Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ' a

Analizlerin yürütülmesinde büyük görev üstlenen Ele International marka cihaz ile basınç ve çekme dayanımı test tayini yardımında bulunan Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında Sn. Teknisyen Seyfettin ÇİÇEK' e

Hayatım boyunca aldığım kararlarda beni destekleyen, maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen ve bu yolda sonuna kadar devam etme cesareti veren sevgili aileme,

Deneyde kullandığım plastik ve PET malzemelerinin teminini sağlayan ve görüşlerine çok değer verdiğim babam Sn. Ruhi GÜL' e

Tezimin yazım aşamasında benimle birlikte yorulan sevgili annem Sn. Hülya GÜL' e, bölümde benimle birlikte emek veren çalışma arkadaşlarıma

Ve emeği geçen herkese,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	V
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XI
RESİMLER LİSTESİ	XII
SİMGELER LİSTESİ.....	XIII
KISALTMALAR.....	XIV
1.GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Beton.....	3
2.2. Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler	8
2.2.1 Agrega.....	8
2.2.2 Çimento.....	11
2.2.3 Karışım ve kür suyu.....	13
2.2.4 Katkı maddeleri.....	14
2.2.4.1 Kimyasal katkıları	15
2.2.4.1.1 Su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkı maddeleri:	16
2.2.4.1.2 Çimento ve süperakışkanlaştırıcı katkı uyumunu etkileyen faktörler	19
2.2.4.1.3 Süperakışkanlaştırıcının çimento üzerinde tutunması	22
2.2.4.1.4 Süperakışkanlaştırıcının karışıma eklenme zamanı	22
2.2.4.1.5 Sıcaklık etkisi.....	23
2.2.4.2 Mineral katkıları.....	23
2.3. Betonda İstenen Özellikler.....	24
2.3.1 Taze beton özellikleri.....	24
2.3.2 Sertleşmiş beton özellikleri.....	25
2.4. Hafif Betonların Tanımı ve Önemi	26
2.4.1 Hafif betonların tarihçesi ve uygulama alanı	26
2.4.2 Hafif betonların sınıflandırılması.....	30
2.5. Hafif Agregalar ve Hafif Agregalı Betonlar	33

2.5.1 Hafif agregaların sınıflandırılması	34
2.6. Ülkemizde Betonların Durumu	34
2.7. Ülkemizde Hafif Agregaların Durumu	35
3. POLİETİLEN TEREFTALAT (PET).....	38
3.1. PET'in Üretim Prosesi	40
3.2. PET'in Isıl Davranışı ve Kristal Yapısı	42
3.3. PET'in Uygulamaları ve Kullanım Alanları	42
3.4. PET'in Geri Dönüşümü	42
3.4.1. PET'in mekanik geri dönüşümü	44
3.4.2. PET'lerin kimyasal geri dönüşümü	47
4. KONU İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	49
5. MATERYAL VE METOD	65
5.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	65
5.1.1. Çimento.....	65
5.1.2. Kum (ince agrega)	66
5.1.3. Atık PET ve atık plastikler.....	67
5.1.4. Karışım ve bakım suyu	68
5.2. Harç Karışım Oranları	69
5.3. Numunelerin Üretimi ve Kürü	72
5.4. Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar	73
5.4.1. Çimentonun priz süresinin tayini	73
5.4.2. Birim ağırlık tayini.....	74
5.4.3. Basınç ve çekme dayanımı tayini	74
5.4.4. Yarmada-çekme dayanımı tayini	76
5.4.5. Su emme ve kuruma hızları miktarının tayini	77
5.5. Notasyonlar	78
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	80
6.1. Kuru Birim Ağırlık	80
6.2. Isı İletim Katsayısı	81
6.3 Su Emme Deneyi	85
6.4. Kuruma Oranı	88
6.5. Basınç Dayanımı.....	91
6.6. Çekme Dayanımı	93

6.7. Yarmada Çekme Dayanımı.....	95
7. SONUÇLAR.....	99
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	113



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HAFİF BETON AGREGASI OLARAK ATIK PLASTİKLERİN VE PET'İN KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Merve GÜL

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Filiz KAR

İnşaat sektöründe en sık kullanılan yapı malzemesi olan beton; çimento, agrega, su ve kimyasal katkılardan meydana gelmektedir. Bu bileşenlerin özellikleri ve miktarı, sertleşmiş betonun özelliklerini belirler. Agregalar, betonların özelliklerine büyük ölçüde etki eden ve hacimce betonun büyük bir kısmını oluşturan kontrol malzemeleridir. Kullanılan agrega betonun mekanik özelliklerini etkileyeceği gibi ısı ve ses yalıtımı özelliklerini de etkilemektedir. Hafif ve gözenekli agregaların betonun bir bileşeni olarak kullanılması hafif betonun üretilmesini sağlar.

Bu çalışmada; hacimce farklı oranlarda PET/plastik ve doğal kum kullanılarak, hafif betonlar üretilmiştir. Çeşitli birim ağırlıklarda üretilen hafif agregalı betonların, basınç dayanımları, ısıl iletkenliği, su emme oranları ve yarmada çekme dayanımları ile PET/plastik oranları arasındaki ilişki incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda taze beton birim ağırlıkları 1150-2100 kg/m³ arasında değişen toplam 40 seri hafif beton üretilmiştir. Üretilen tüm hafif betonların etkin su/çimento oranı 0.50 ve 0.3 olarak belirlenmiştir. Hafif beton karışımları, toplam agrega hacminin sırasıyla %0, %10, %20, %30, %40 oranında PET/plastik kullanılarak üretilmiştir.

PET katkılı hafif betonların küp basınç dayanımları, artan hacimce PET oranına bağlı olarak (%0, %10, %20, %30, %40) sırasıyla 29.10 MPa, 17.03 MPa, 12.08 MPa, 10.84 MPa, 6.25 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu oranlar akışkanlaştırıcı ve PET kullanılarak hazırlanan betonlar için 38.21 MPa, 26.47 MPa, 26.42 MPa, 20.51 MPa, 16.94

MPa olarak tespit edilmiştir. Plastik katkılı hafif betonların küp basınç dayanımları, artan hacimce plastik oranına bağlı olarak (%0, %10, %20, %30, %40) sırasıyla 29.10 MPa, 21.91 MPa, 16.25 MPa, 13.48 MPa, 7.49 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu oranlar akışkanlaştırıcı ve plastik kullanılarak hazırlanan betonlar için 38.21 MPa, 36.0 MPa, 24.51 MPa, 19.01 MPa, 15.12 MPa olarak tespit edilmiştir.

PET/plastik katkılı hafif betonların ısı iletkenliği ile birim ağırlıkları arasında lineer bir ilişki bulunduğu gözlenmiştir. PET/plastik katkılı hafif beton karışımındaki PET/plastik miktarı arttıkça (hacimce %0-%40) ısı iletkenlik değeri 1.1 W/mK'den 0.38W/mK'e düşmüştür. PET/plastik miktarı arttıkça su emme oranları artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hafif beton, PET, süperakışkanlaştırıcı, mekanik testler

SUMMARY

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE USE OF WASTE PLASTICS AND PET AS LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE

Merve GÜL

Firat University

Institute of Science and Technology

Department of Chemical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Filiz KAR

Concrete, most used construction material, is consisted of cement, aggregate, water and chemical admixtures. The specifications and amount of these constituents determine the properties of hardened concrete. Aggregates are constituents which effect properties of concretes mostly and formed big part of concrete by volume. Employed aggregates effect both the mechanical properties and the properties of heat and sound insulation properties. The usage of lightweight and porous aggregates as a constituent of concrete enables production of lightweight concrete.

In this study, the lightweight concretes were produced by changing the ratio of PET/plastic and natural sand. The relations between the PET/plastic rates, compressive strengths, heat conductivity, water absorption and splitting tensile strength are investigated. In the experimental study, 40 series of lightweight concretes with the fresh concrete unit weights between 1150-2100 kg/m³ are produced. Water to cement ratio is set 0.50 and 0.3 in all of the compositions. In lightweight concretes, by volume ratio %0, %10, %20, %30, %40 PET/plastic are used respectively

Cubic compressive strength of perlite added light weight concretes, with ascending ratio of perlite content (%0, %10, %20, %30, %40 by vol. is found 33.95 MPa, 21.91 MPa, 16.25 MPa, 13.48 MPa, 7.49 MPa respectively. These ratios were determined as 38.21 MPa, 36.0 MPa, 24.51 MPa, 19.01 MPa and 15.12 MPa for concrete prepared using plasticizer and PET. The compressive strengths of the lightweight concrete with plastic additives were determined as 29.10 MPa, 21.91 MPa, 16.25 MPa, 13.48 MPa, 7.49 MPa depending on the increasing proportion of plastic volume (0%, 10%, 20%, 30%, 40%).

These ratios were determined as 38.21 MPa, 36.0 MPa, 24.51 MPa, 19.01 MPa and 15.12 MPa for concrete prepared using plasticizer and plastic.

There is a linear relation between the thermal conductivity and unit weights of PET/plastic added lightweight concrete. As the amount of PET / plastic in the PET / plastic additive light concrete mixture increased (0-40% by volume), the thermal conductivity value decreased to 1.1 W/mK degrees 0.38W/mK. It is observed that water absorption increases with increase of PET/plastik content.

Key Words: Lightweight concrete, PET, superplasticizer, mechanical tests



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Su azaltıcı katkıların dağıtma etkisi a) topaklaşmış hamur; b) katkılı hamur (Mindess, 2003).....	17
Şekil 2.2. Katkıların stearik etkisi (Collepari, 2005).....	18
Şekil 2.3. Polikarboksilat (PK) bazlı süperakışkanlaştırıcılara ait tipik moleküler yapı çeşitleri. Yan zincirler arasındaki mesafe farklılığı (A-B), yan zincir uzunluğu farklılığı (C-D), ana zincir uzunluğu farklılığı (A, B, C, D-E).....	18
Şekil 2.4 Hafif betonların sınıflandırılma	32
Şekil 2.5 2010-2012 yılları arasında dünya genelindeki beton üretim miktarları (ERMCO, 2014).....	36
Şekil 3.1 Polietilen Tereftalat'ın kimyasal yapısı (Tayyar ve Üstün, 2009)	38
Şekil 3.2 PET'in üretim prosesi reaksiyonları.....	41
Şekil 3.3 PET'in depolimerizasyonu sonucunda oluşan maddeler (Awaja, 2005)	48
Şekil 5.1 Kum (ince agreganın) elek analizi sonuçlarının grafiksel gösterimi	66
Şekil 5.2. Basınç deneyi	75
Şekil 6.1. Çimento/plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yoğunluğun plastik oranı ile değişimi	80
Şekil 6.2. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yoğunluğun PET oranı ile değişimi	81
Şekil 6.3. Çimento/plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde ısı iletkenlik katsayısının plastik oranı ile değişimi	82
Şekil 6.4. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde ısı iletkenlik katsayısının PET oranı ile değişimi	82
Şekil 6.5. Aynı şartlarda hazırlanan Çimento/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde ısı iletkenliğin PET ve plastik oranı ile değişimi	84
Şekil 6.6. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde su emme oranının plastik oranı ile değişimi	85
Şekil 6.7. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde su emme oranının PET oranı ile değişimi	86
Şekil 6.8. Çimento/PET-plastik/kum katkılı numunelerde su emme esnasında numune ağırlığının zamanla değişimi (a)çp (b)çpk (c)çpet (d)çpetk	87

Şekil 6.9. Çimento/PET-plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde su emme esnasında numune ağırlığının zamanla değişimi (a)çpa (b)çpka (c)çpeta (d)çpetka..	88
Şekil 6.10. Çimento/Plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde kuruma oranının plastik oranı ile değişimi	89
Şekil 6.11. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde kuruma oranının PET oranı ile değişimi	89
Şekil 6.12. Çimento/PET-plastik/kum katkılı numunelerde kuruma esnasında numune ağırlığının zamanla değişimi (a)çp (b)çpk (c)çpet (d)çpetk	90
Şekil 6.13. Çimento/PET-plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde kuruma esnasında numune ağırlığının zamanla değişimi (a)çp (b)çpk (c)çpet (d)çpetk.....	91
Şekil 6.14. Çimento/Plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde basınç dayanımının plastik oranı ile değişimi	92
Şekil 6.15. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde basınç dayanımının PET oranı ile değişimi	92
Şekil 6.16. Çimento/Plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde çekme dayanımının plastik oranı ile değişimi	94
Şekil 6.17. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde çekme dayanımının PET oranı ile değişimi	94
Şekil 6.18. Çimento/plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yarmada çekme dayanımının plastik oranı ile değişimi.....	95
Şekil 6.19. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yarmada çekme dayanımının PET oranı ile değişimi	96
Şekil 6.20. Çimento/Plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yarmada çekme dayanımının basınç dayanımı ile değişimi	97
Şekil 6.21. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yarmada çekme dayanımının basınç dayanımı ile değişimi	97

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Beton, harç ve çimento hamurunun genel tanımı (Akman, 1990).....	4
Tablo 2.2 Avrupa agrega birliği üyesi ülkelerde agrega ile ilgili çeşitli yüzdeler (UEPG, 2012).....	10
Tablo 2.3 Çimento ana bileşenleri	13
Tablo 2.4 Hafif beton sınıfları	32
Tablo 2.5 Fonksiyonlarına göre hafif betonların sınıflandırılması (RILEM, 1975).....	33
Tablo 2.6 Türkiye Hazır Beton Sektörü İstatistikleri 2016	37
Tablo 3.1 PET'in fiziksel ve kimyasal özellikleri	40
Tablo 5.1 Çimentonun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri	65
Tablo 5.2 Kum (ince agreganın) elek analiz değerleri.....	66
Tablo 5.3 Kumsuz harç karışımlarının içeriği	71
Tablo 5.4 Kumlu harç karışımlarının içeriği.....	72
Tablo 5.5 Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri	73

RESİMLER LİSTESİ

Resim 2.1 Marina City Towers	28
Resim 2.2 Australia Square.....	28
Resim 2.3 Lake Point Tower.....	29
Resim 2.4 One Shell Tower	29
Resim 3.1 Atıklara göre düzenlenmiş çöp kovaları	45
Resim 3.2 Plastik malzemelerin detektöre gönderilmeden önce işçiler tarafından ayrılması	45
Resim 3.3 Geri dönüşüm bandı üzerinde X-ray ve manyetik seperatör ile otomatik ayrıştırma	45
Resim 3.4 Shredder (Parçalayıcı).....	46
Resim 3.5 Satışa hazır haldeki PET parçacıkları	47
Resim 5.1 Deneyde kullanılan atık plastikler	68
Resim 5.2 Deneyde kullanılan PET'ler.....	68
Resim 5.3 Deney aşamasında kullanılan kalıplar	69
Resim 5.4 Kalıplara doldurulan harç numuneleri	70
Resim 5.5 Kür sandığı ve içerisindeki beton numuneler	73
Resim 5.6 Basınç dayanım testinde kullanılan deney düzeneği	75
Resim 5.7 Yarmada-çekme dayanım testi uygulanmış numuneler	76
Resim 5.8 Su dolu kap içerisindeki numuneler.....	78
Resim 5.9 Kurumaya bırakılmış numuneler	78
Resim 5.10 Beton numuneler	79

SİMGELER LİSTESİ

k	: Isı iletim katsayısı, (W/mK)
T	: Sıcaklık, (K, °C)
t	: Zaman, (s)
A	: Alan, (m ²)
p	: Numunenin yoğunluğu, (g/cm ³)
fck	: Basınç dayanımı, (MPa)
fctk	: Çekme dayanımı, (MPa)
σ	: Basınç dayanımı, (MPa)
P	: Uygulanan kuvvet, (kg)

KISALTMALAR

Ç	: Çimento
PE	: Polietilen
PET	: Polietilen tereftalat
PVC	: Polivinil klorür
PS	: Polistiren
EPS	: Genleştirilmiş polistiren
PP	: Polipropilen
UEPG	: Avrupa agrega birliği üyesi ülkeler
KÜB	: Beton ve harç kimyasal katkı maddeleri üreticileri derneği
PK	: Polikarboksilatlar
MLS	: Modifiye lignosülfonatlar
SNF	: Polinaftalin sülfonatlar
SMF	: Polimelamin sülfonatlar
RILEM	: Uluslararası yapı malzemeleri sistemleri, laboratuvarları ve uzmanları birliği
THBB	: Hazır beton birliği
MTA	: Maden tetkik ve arama genel müdürlüğü
ERMCO	: Avrupa hazır beton birliği
SCC	: Kendiliğinden yerleşen beton (KYB)
EVA	: Etilen vinil asetat
NPC	: PET içeren normal beton
LPWC	: PET içeren hafif beton
LWC	: PET içermeyen hafif beton
ÇP	: Çimento + plastik
ÇPET	: Çimento + PET
ÇPA	: Çimento + plastik + akışkanlaştırıcı
ÇPK	: Çimento + plastik + kum

ÇPETK : Çimento + PET + kum
ÇPKA : Çimento + plastik + kum + akışkanlaştırıcı
ÇPETKA : Çimento + PET + kum + akışkanlaştırıcı



1.GİRİŞ

İnsanların barınmak amacıyla çeşitli yapılara ihtiyaçları vardır. Yapıda en önemli yeri malzeme almaktadır. Sağlam, ekonomik ve iyi bir yapı, malzeme esası üzerine kurulmaktadır. Bir yapının ömrü malzemenin niteliği ve malzemenin uygun bir şekilde kullanılmasıyla arttırılabilir. Aksi halde en iyi işçiliğin sağlanması ve gerekli özenin gösterilmesi ayrıca bir yarar sağlamaz. Günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan beton, bir yapı malzemesidir. Üretimin ucuzluğu, kolaylığı, ömrünün uzun oluşu ve üzerine aldığı yüklere karşı dayanımı betonu en önemli yapı malzemesi haline getirmiştir. Çimento, su, agrega ve gerektiği takdirde bazı katkı malzemelerinin birlikte karıştırılması ile üretilmektedir. Artık yüksek dayanımlı betonların üretimi, katkı malzemelerin kullanılması ile çok daha kolaylaşmıştır.

Günümüzde beton üretiminde, hem yüksek performans elde etmek hem de maliyeti azaltmak için yapılan araştırmaların sayısı oldukça artmıştır. Çağımız dünyasında endüstrideki hızlı gelişme ile beraber enerji ve malzeme tasarrufuna verilen önem artmaktadır. Ayrıca bu endüstrilerde ana ürün yanında oluşan yan ürünler doğada kirlenmeye sebep olmaktadır. Hali hazırda bulunan malzemelerin geliştirilmesi ve atıl malzemelerin değerlendirilmesi, hem ekonomik açıdan katkı sağlar hem de çevreye verilen zararı azaltır.

Gelişmekte olan teknolojiyle birlikte, sanayi sektöründe hammaddelerin ortaya çıkarılması veya üretimi esnasında veya tüketimi sonrasında ortaya çıkan atıklar çevre kirliliği bakımından büyük tehlikeler oluşturmaktadır. Fiziksel ve kimyasal geri dönüşüm işlemleri ayrıca bir yatırım gerektirdiğinden atıkların tamamının geri dönüştürülmesi mümkün olmamaktadır. İnşaat sektöründeki hızlı gelişmeye paralel olarak, çevre kirliliğine sebep olan pek çok atık maddenin yapı malzemesi veya dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için imkanların araştırıldığı pek çok çalışma mevcuttur (Özcan, 2006; Mesci, vd., 2007; Şahin, vd., 2007; Etcheberria, 2010; Galvao vd., 2010; Hebhouh vd., 2010).

Doğal kaynaklar sınırsız değildir ve uygun kullanılmaması sonucunda tükenmesi yakındır. Kaynak israfının önlenmesi açısından, artan hayat standartlarına uyum sağlama çabası sonucunda toplumdaki enerjiye olan ihtiyacın artması neticesinde, enerji maliyeti

artmaktadır. Dolayısı ile kaynakların etkin bir şekilde kullanımı ve çevrenin korunması açısından atıkların geri kazanılması oldukça önemlidir. Plastik atıkların çevreye etkileri giderek artan bir önem arz etmektedir. Plastikler, çevreye atık olarak bırakıldığı zaman çok büyük çevre sorunlarına neden olmaktadır. Su ve toprağın kirlenmesine sebep olmakla birlikte uzun vadede başka ne tür zararlar verebilecekleri henüz tam olarak tespit edilememiştir.

Son yıllarda çevreye verdikleri zarar ve atıkların yeniden değerlendirilmesinin işlenmemiş plastik tüketimini azaltacağı beklentisi ile ticari polimerlerin (PVC, PE, PET, PS, PP vs.) geri kazanımı üzerinde çalışmalar hız kazanmıştır. PET, meşrubat, su, sıvı gıda ambalajlanmasında yaygın bir şekilde kullanılır. PET'in geri kazanım ve değerlendirme yöntemleri değişik şekillerde uygulanmaktadır. Bunlardan bazıları, metanoliz-hidroliz ile PET'i oluşturan hammaddelerin geri kazanılması, kullanılmış PET'lerin elyaf haline getirilmesi, PVC kalıplanmasında dopt yağı olarak kullanılması sayılabilir.

Tez çalışmasında, PET ve plastik atıkları harç içerisinde değerlendirilerek betonun özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Geri kazanılmış plastiklerin çimento esaslı bağlayıcılarla birlikte kullanılması ile; hafif, dayanıklı ve ısı yalıtımı yüksek bir malzeme elde ederek yapı sektöründe kullanılması amaçlanmıştır. Ayrıca akışkanlaştırıcı ilave edilen PET ve plastik katkılı betonların mekanik ve termal özellikleri araştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Beton

Beton, günümüzde kullanılan en yaygın yapı malzemelerinden biridir. Betonun serüveni, 1824 yılında Joseph Aspdin'in Portland Çimentosunu keşfetmesi ile başlar ve 1800'lü yılların sonlarında betonarme, 1930'lu yıllarda ise öngörülmesi yapı sistemlerinin gelişmesiyle hız kazanır. Günümüze kadar geçirdiği gelişmeler ile kullanım alanları genişlemiş ve hakkında pek çok çalışma yapılmıştır.

Beton; çimento, su, doğal veya yapay iri agrega ve gerekirse mineral katkı ve / veya kimyasal katkıların karıştırılması ile hazırlanan ve çimentonun hidrasyonu ile dayanım kazandıran malzemenin genel adıdır (TS 11222 / Şubat 2001, TS EN 206 – 1). Çimento burada iri agrega ve kum tanelerini birbirine bağlanmasını sağlar. Kum ise iri agrega arasındaki boşlukların dolmasını sağlayarak betonun kapasitesini artırır. Betonda kırma taş ve çakıl taneleri iskelet görevi yaparak, dış kuvvetlere karşı korurlar.

Çağdaş toplumların kullandığı yapı malzemelerinden en önemlilerinden biri betondur. Binalar, köprüler, barajlar, yollar, su depoları, limanlar, istinat duvarları, santraller, havaalanları vb. genellikle betondan yapılmaktadır. Beton diğer pek çok yapı malzemelerine göre;

- a. Ekonomik olması
- b. Her yerde üretilebilir olması
- c. Dayanıklı olması
- d. Daha kolay şekil verilebilir olması
- e. Üretiminde daha az enerji tüketilmesi
- f. Estetik özellikleri,

nedeniyle en çok kullanılan yapı malzemesidir.

Beton taze haldeyken plastik bir kıvama sahiptir bu nedenle kolayca şekil verilebilir. Böylelikle, kolonlar, kirişler, döşemeler, karmaşık şekilli kabuklar, kütle betonları, kazıklar ve benzerlerini yapmak mümkün olur. Büyük oranda yerel malzemelerin kullanılması, beton üretiminde önemlidir. Diğer yapı malzemelerine göre maliyeti düşüktür ve dayanıklı bir yapı malzemesidir. Üretim şartlarına uygun olarak

üretilmişse ve bakımı gerektiği gibi yapılmışsa uzun yıllar boyunca herhangi bir onarım gerektirmeden kullanılabilir.

Beton, hazır beton santralinde hazırlanabildiği gibi ülkenin en ücra köşesinde de (denetime tabi tutulması koşulu ile) hazırlanabilir. Betonun üretimi için harcanan enerji ile diğer birkaç malzemenin enerji sarfiyatları karşılaştırılırsa beton için harcanan enerjinin çok küçük olduğu görülmektedir (1 m^3 cam, çelik ve alüminyum üretimi için sırasıyla, yaklaşık 50 GJ, 300 GJ ve 360 GJ; 1 m^3 beton için yaklaşık 3.5 GJ). Enerji maliyetlerindeki hızlı artış göz önüne alındığında betonun önemi bir kez daha anlaşılmaktadır. Aynı zamanda, beton, pek çok estetik olanaklara sahip bir yapı malzemesidir. İstenen, yüzey, şekil ve renk özellikleri verilerek farklı görüntüler elde etmek olasıdır.

Betonun, mühendislik uygulamalarında istenen özelliklerinin yanı sıra istenmeyen bazı özellikleri de vardır. Fakat bunları giderebilmek için beton üretici ve tüketiciye birçok olanak sağlamaktadır. Bazen hatalı olarak, çimento harcı ve hamuruna da beton denildiği görülmektedir. Bu üç malzemenin genel tanımları Tablo 2.1’ de verilmiştir (Akman, 1990).

Tablo 2.1 Beton, harç ve çimento hamurunun genel tanımı (Akman, 1990)

Malzeme	Bileşimi
Çimento hamuru	Çimento + Su
Harç	İnce agregası ($< 4.00 \text{ mm}$) + Çimento hamuru
Beton	Kaba agregası ($> 4.00 \text{ mm}$) + İnce agregası ($< 4.00 \text{ mm}$) + Çimento hamuru

İyi bir betonda tüm kaba agregası tanelerinin harçla, tüm ince agregası tanelerinin çimento hamuru bütünüyle kaplanmış olması gerekmektedir. Sistem içindeki bağlayıcı malzeme olan çimentonun hidratasyonu sonucunda beton dayanım kazanmaktadır.

İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan betonların olumsuz taraflarını giderebilmek için, daha kullanışlı ve ekonomik betonlar elde etmek amacıyla yeni betonlar üretilme yoluna gidilmiştir. Bunun için betonda özellikle farklı agregalar ve katkı maddeleri ilave edilerek, karışım oranları değiştirilerek veya sadece çimento ve normal agregası kullanılarak yapım tekniğinde değişiklik yapılmasıyla, ya da bu yöntemlerden bir kaçını beraber kullanılarak özel betonlar üretilmiştir (Balaban ve Şen, 1988). Bu özel

betonların başında hafif betonlar gelmektedir. Uygulama kolaylığı olan hafif betonların yapı malzemesi olarak kullanılması ve yapı ağırlığının azaltılmasına bağlı malzeme olarak depreme karşı dayanıklılık, ısı ve ses yalıtımı ve ekonomi için ikinci bir yalıtım malzemesi kullanılmasını ortadan kaldırarak fayda sağlanabilmektedir (Ünal ve Uygunoğlu, 2007).

Hafif betonlar, birim ağırlıkları $200-4000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmekle birlikte ısı yalıtımı ve hafiflik gibi özelliklerin arandığı yerlerde kullanılmaktadır. Hafif betonlarda temel amaç hafif bir malzeme ve ısı yalıtımı yüksek olan bir malzeme elde etmektir. Bu hafif malzeme yapının zati yükünü düşürmeye yaramaktadır. Normal betonlarda ise zati yük yapının taşıdığı hareketli yüklere neredeyse eşittir. Bu durum ekonomik olmayan bir durumdur.

Hafif betonların tümü istenilen özellikte mekanik dayanımı sağlamaktan uzaktır. Diğer taraftan depremler esnasında ağır bir yapının alacağı yatay kuvvetler daha büyük olacağından oluşabilecek kesit etkileri de büyüktür. Yatay kuvvetlerin dayanımı açısından da hafif betonlar yarar sağlamaktadır (Ekmekyapar ve Örüng 1993).

Yapı elemanları ve bu elemanlara gelen dinamik ve statik yükler yapı içerisindeki nem ve ısı dengesini sağlayabilecek minimum kalınlığa göre boyutlandırılır. Genellikle yüke göre hesaplanan yapı elemanları kalınlıkları, nem ve ısı dengesine göre yalıtım malzemesi kullanılmadan belirlenen yapı elemanları kalınlığından azdır. Yapı elemanları kalınlıklarının buna göre planlanması yapıldığında yapının kullanışlılığı azalır ve yapının maliyeti artar. Burada dikkat edilmesi gereken durum için yapı elemanları taşıyabilecekleri yüke göre planlanmaktadır. Yapı, içindeki nem ve ısı miktarlarına göre yalıtılmaktadır (Okuroğlu ve Delibaş 1986).

Kullanılan inşaat malzemesinin ısı iletim değeri, nem ve ısı dengesini sağlayacak minimum yapı malzemesinin kalınlığına bağlıdır. Yapı elemanlarının kalın yapılması durumunda ısı iletim katsayısı düşer ama bu durum yapıya aşırı yük getirir, malzeme maliyetinde artış göstermesi ve depreme dayanıksız olması sebebiyle günümüz koşullarında hafif malzemelerle ısı yalıtımına dayanıklı duvarlar elde ederek depreme dayanıklı yapılar inşa edilerek maliyetinin azalması sağlanmaktadır.

Betonarmenin taşıyıcı iskelet olarak ortaya çıkması ve yapı teknolojilerindeki gelişmeler, yapıların duvarlarında incelme meydana gelmesine ve buna bağlı olarak nem ve ısı ile ilgili problemlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kalın duvarlarda meydana

gelmeyen bu problemler, duvarların incilmesi sonucunda daha iyi sonuçlar veren yeni malzemelerin kullanımını gerektirmektedir. Kompozit malzemelerle hazırlanan duvarların kullanımı sorunu kısmen çözecektir ancak bu durumda da maliyet artacaktır (Toydemir, 1986).

Normal beton iyi bir taşıyıcı olmasına rağmen, birim ağırlığı büyük, bu sebeple de ısı iletkenlik katsayısı yüksektir. Normal betona bazı olumlu özellikler kazandırmak amacıyla günümüzde sanayi ülkelerinin birçoğunda hafif betonlar tercih edilmektedir. Betonun birim ağırlığının düşürülmesi ile betonarme elemanların ağırlıklarının azaltılması sağlanıp, yapı hafifletilebilir. Böylelikle betonarme elemanların kesitleri küçültülebilir. Bu hem ekonomik açıdan hem de estetiklik açısından faydalı olmaktadır. Ayrıca betonun birim ağırlığının azaltılması ile ısı iletim katsayısı azalır, ses yalıtımı artar. Hafif betonların ısı yalıtımı bakımından normal betondan üstün olması günümüzde enerji sorunu dikkate alındığında, önemli bir özelliktir (Toydemir, 2000).

Yapılardaki ısı kayıplarının azaltılması için yapıların ısı iletkenlik katsayılarının düşük olduğu yapı malzemesi kullanmak veya yapıların yalıtılması gerekmektedir. Özellikle kış mevsiminin çok uzun sürdüğü ve ortalama sıcaklığın çok düşük olduğu bölgelerimiz açısından daha fazla önem taşımaktadır (Diler, 1994). Günümüzde çeşitli malzeme ve yapım yöntemleri ile hafif beton üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu amaç doğrultusunda doğal ve yapay agregalar kullanılmaktadır. Ülkemizde bu malzemelerin kullanımı arzu edilen ölçüde olmamasına karşın yine de uygulama alanı bulunmaktadır (Uysal, 1999).

Kullanılan hafif beton seçilirken genelde tek bir amaç ön planda tutulmakla birlikte, başka alternatif malzeme çeşidinin olup olmadığı, ekonomik analizi ve diğer özelliklerin karşılaştırılması ile ilgili bir inceleme yapılmamaktadır (Aksoy, 1995). Ayrıca hafif betonların kullanılma nedenleri arasında ısı ve sese karşı yalıtkan olmalarının yanında ateşe dayanıklı ve hafif olmaları da sayılabilir.

Beton üretiminde agrega kullanımının başlıca iki önemli nedeni vardır. Bunlardan birincisi; maliyeti çimentoya göre ucuzdur. Bu sebeple dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. İkincisi ise betona önemli teknik avantajlar sağlamasıdır. Beton, çimento harcına göre hacim sabitliğini daha iyi korur ve çevre etkilerine karşı daha dayanıklı

olmasını sağlar. Ayrıca taze betonun işlenebilmesi, pompalanabilmesi için beton içindeki hava miktarı agrega tarafından belirlenmektedir (Neville, 1975).

Betonun özellikleri kullanılan malzeme ile oldukça ilgilidir. Betonun hacimce %60-%85'inin agreganın oluşturması gerekir. Uygun agrega seçerek özellikleri iyi beton elde etmek mümkündür. Agreganın kimyasal, mineralojik ve petrografik yapısı, özgül ağırlığı, dayanımı, fiziksel ve kimyasal kararlılığı, boşluk yapısı, rengi gibi özellikleri bu özellikleri etkiler. Normal betonun ağırlığının düşürülmesi ile betonarme elemanlarının öz ağırlıkları azaltılarak yapı hafifletilmiş olur. Böylece taşıyıcı sistem elemanlarının boyutları küçültülerek ekonomi sağlanabilir. Ülkemizin büyük bir bölümü 1. derece deprem kuşağında bulunmaktadır, yapılarda özellikle iç duvarlarda kullanılan betonun hafifletilebilmesi, deprem yükünü azaltacak ve bunun sonucunda deprem sırasında meydana gelebilecek yapı hasarları da azaltılacaktır. Ayrıca betonun birim ağırlığının azaltılmasıyla ısı iletkenlik katsayısı küçülecektir.

Aşağıdaki yöntemler ile betonun birim ağırlığı azaltılabilir:

- a. Boşluklu yapıya sahip olan doğal veya yapay hafif agregaların kullanılması,
- b. Beton içinde fiziksel veya kimyasal yollarla oluşturulan geniş boşluklara sahip gaz ve köpük betonların kullanımı,
- c. İnce agreganın ortaya çıkarıldığı kumsuz betonlar.

Günümüzde hafif betonların üretimi için çeşitli yöntemlerle beton içindeki gözenek hacmi artırılır. Boşluk oluşturma ya harç içinde ya da iri agrega daneleri arasında yapılır. Hafif betonların normal betonlara göre avantajları kısaca şöyle sıralanabilir;

- Birim hacimdeki toplam malzeme ağırlığındaki azalmadan dolayı beton kalıbında basınç düşer ve betonun yerleşmesi daha kolay olur.
- Hafif betonla üretilen malzemelerin düşük birim ağırlıklarından dolayı yatay ve dikey yapı yükleri azalır, bu azalma ile birlikte temeller ve diğer yapı malzemeleri daha küçük kesitlerde yapılarak ekonomi sağlanmış olur.
- Ses ve ısı yalıtımları yüksek, ısı iletkenlik katsayıları düşüktür.
- Yangına dayanıklılık bakımından normal betona kıyasla daha elverişlidir.
- Yüksek çekme dayanımı / Basınç dayanım oranına sahip olması sebebiyle rötre test aşamasında çatlama meydana gelmesi düşük olasılıktır (Price, 1949).

Hafif betonların normal betonlara göre sakıncaları şöyle sıralanabilir;

- Gözenek açıklığının fazla olması nedeniyle dayanıklılıkları düşüktür. Bundan dolayı yüksek mukavemetli beton uygulamalarında tercih edilmez.
- Aşınmaya karşı dayanıklı değildir.
- Rutubete (nem) karşı yalıtım olması gerekir.
- Elastiklik modülü değerleri düşük olur.
- Sünme ve rötne daha yüksektir.

2.2. Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler

2.2.1 Agregas

Agrega; hastane, konut, sanayi tesisleri gibi bina inşaatını, su yapıları, köprü, boru hattı ve yol gibi altyapı faaliyetlerinin geniş bir kısmına sahip olan inşaat sektöründe beton üretiminin ve asfalt üretiminin önemli hammaddesidir (Öztürk, 2007). Agregalar, betonun hacimce yaklaşık %70-80'ini oluşturmaktadır. Kum, kırma taş ve çakıl en çok kullanılan agrega türleridir. Doğada hazır halde bulunurlar bu sebeple beton yapımında kullanılan diğer agregalara göre daha düşük maliyetlidir (Gönen, 2012). Beton yapımı için kullanılan agregaların büzülme ve çatlakları önlemesi gerekmektedir.

Hacimsel olarak betonun çoğunluğunu oluşturan agreganın birim ağırlığı, kapasitesi, şekli, tane boyutu, yüzey dokusu, dağılımı, yabancı ve organik madde içeriği gibi fiziksel özellikleri betonun özellikleri ve kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle agreganın fiziksel özelliklerinin detaylı bir şekilde bilinmesi gerekmektedir.

Agregaların, mekanik özellikleri beton üretiminde önemli bir yer teşkil etmektedir. Mekanik özelliklerinin arasında aşınmaya karşı dayanıklılık, poisson oranı, basınç dayanımı, elastik modülü, sertlik ve tokluk örnek verilebilir (Nebioğulları, 2010).

Avrupa Agregas Birliği'ne göre; agregalar, maden ve taş ocaklarından ve bazı ülkelerin denizinden çıkarılan doğal agregalar, yapı elemanlarında kullanılıp daha sonra yapım ve yıkım kalıntılarının yeniden işleme tabi tutularak elde edilen geri kazanılan agregalar ve endüstriyel bir proses işlemi sonucunda elde edilen elektrik ark ocağı fırını cürufu, yüksek fırın cürufu vb. üretilmiş agregalar olarak sınıflandırılması mümkündür. Tablo 2.2'de agregalar için kaynaklar, ara ürünler ve son kullanımları ile ilgili Avrupa Agregas Birliği üyesi olan ülkelerle ilgili çeşitli yüzdeler gösterilmiştir (UEPG, 2012).

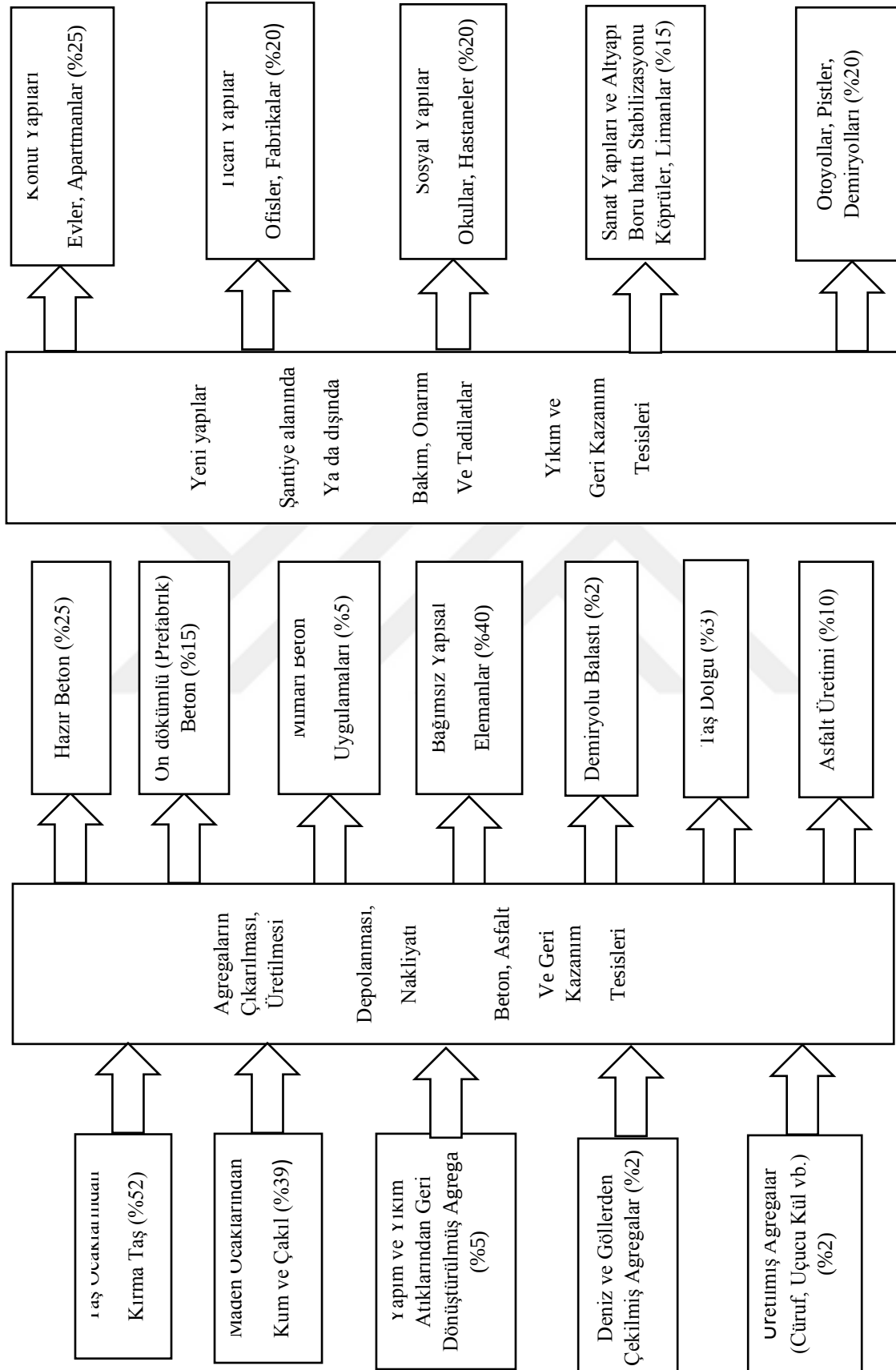
Beton yapımında kullanılan agreganın, teknik ve ekonomik yönlerden çok önemli bir yeri vardır. Betonda hacimce yaklaşık %70-80'lik kısmı agrega tarafından karşılanmaktadır. Çimentoya göre agreganın maliyeti oldukça düşük olduğundan, betonda nispeten ucuz olan bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmesi mümkündür. Diğer taraftan agrega betona teknik açıdan özellikler de kazandırmaktadır. Betonda agrega kullanmak, sertleşmiş betonun hacim değişikliğini azaltmakta veya önlemekte, betonu çevre etmenlerine karşı durabilitesini arttırmakta ve gerekli dayanım sağlanmaktadır. İçerisinde agrega bulunmayan bir sistem yani sadece çimento harcında oluşan karışım ile içerisinde agrega bulunan harç veya betona göre çok daha fazla hacim değişikliğine (büzülme) uğramaktadır (Erdoğan, 1995).

Kaliteli bir beton imalatı için agregalarda olması gereken şartlar şu şekilde sıralanabilir,

- a. Agregalar çimento bileşenleri ile uyumlu olmalıdır.
- b. Agregalar içerisinde zararlı maddeler bulunmamalıdır.
- c. Agregalar, aşınmamalı, suyun etkisi ile yumuşamamalı ve sağlam olmalıdır.
- d. Agregalar, tane büyüklük bakımından amaca ve standartlara uygun olmalıdır.
- e. Agregalar, dokusu ve tane biçimi açısından iyi olmalıdır (Şimşek, 2012).

Beton karışımında kullanılan agrega özellikleri, malzemelerin karışım oranlarını, pompalanabilmesi, beton yüzeyin mastarlanıp düzeltilebilmesi, terlemesini ve taze betonun işlenebilmesini önemli derecede etkilemektedir. Sertleşmiş betonun birim ağırlığı, dayanımı, termik özellikleri, dayanıklılığı ve büzülmesi gibi başlıca özellikler agreganın özellikleri tarafından etkilenen önemli ölçüde hususlar vardır.

Tablo 2.2 Avrupa agrega birliği üyesi ülkelerde agrega ile ilgili çeşitli yüzdelere (UEPG, 2012)



Agreganın, başta tane büyüklüklerine göre dağılım oranı (gradasyon), birim ağırlığı, yüzey pürüzlülüğü, özgül ağırlığı, tane şekli ve agregada gözenekler içinde ve tane yüzeyinde su bulunup bulunmadığı gibi özellikleri ile beton karışım oranlarını etkilemektedir. Beton dayanımına agreganın temizliği, dayanımı, gradasyonu, tanelerin yüzey pürüzlülüğü, en büyük tane boyutu ve tane şekli gibi özellikler önemli derecede etki etmektedir.

Betonun dayanımı ise, agreganın gözenekliliği, mineral yapısı, gradasyonu, elastiklik modülü, agregada kil olup olmadığı, dayanıklılığı, tane şekli, agreganın temizliği, su geçirgenliği, tanelerin yüzey pürüzlülüğü, termik genleşme katsayısı gibi pek çok özellikler etkilemektedir (Erdoğan, 1995).

2.2.2 Çimento

Çimento; su ile karıştırıldığında hidratasyon sonunda priz alan ve sertleşmiş bir hamur olan, daha sonra suyun altında bile dayanıklılığını koruyan hidrolik bağlayıcılara denir (TS EN 197-1, 2009). Kil ve kalkerin belirli bir oranda karıştırılması ve pişirilip öğütülmesi ile çimento elde edilir. Beton üretiminde kullanılacak olan çimento, ortam şartlarına ve kullanım yerine göre değişiklik göstermektedir (Yardımcı, 2005). Ülkemizdeki çimentolar TS EN 197-1 (2002)'ye göre üretilmektedir.

Çimentolar, hidrolik bağlayıcılar olup, hem kendi başına hem de yanına katılan kırma taş, çakıl ve kum gibi malzemeler ile birlikte ve su ile karıştırılıp hamur haline geldikten sonra hava ve su içerisinde yavaş yavaş sertleşerek taş haline gelmektedirler (Şimşek, 2012). Çimento ve su karıştırıldığı durumda, çimento hamuru denilen plastik ve yumuşak bir karışım ortaya çıkmaktadır. Çimento ve su birleştiği andan itibaren hidratasyon başlamakta ve bunun devam etmesi sonucunda önce plastik ve yumuşak durumdaki çimento hamuru giderek daha sert ve dayanımlı bir yapı elde edilmektedir. Çimento hamuru, başlarda plastik kıvamda bir özellik göstermesi sebebiyle, taze beton da aynı şekilde başlangıçta plastik bir kıvamda olmaktadır. Bu özelliğinden dolayı taze betona istenen şekli verebilmek mümkün olmaktadır. Çimento hamurunda zamanla gerçekleşen sertleşme sebebiyle betonda da zamanla sertleşme ve dayanım kazanma özelliği gerçekleşmektedir (Erdoğan, 1995). Çimento ve suyun reaksiyonu sonucunda, priz başlangıcı ve sonu belirli bir limit içinde bulunmalıdır. Eğer betonda sertleşme erken olursa, nakli ve yerleştirmesi çok güç olmaktadır. Beton sertleşmesi çok geç olursa da,

istenilen süre içinde, arzu edilen mukavemeti sağlamayacaktır. Katkı maddeli çimentolarda priz başlama ve priz sonu için herhangi bir limit belirlemek olası değildir. Çimentolarda katkı maddesi türüne ve çimento oranına bağlı olarak priz süresinde değişiklikler olması mümkündür (Şimşek, 2012).

Çimentonun su ile oluşan kimyasal reaksiyonlarının hızı, ortaya çıkan ısı hızı ve ısı miktarı, çimento hamurundaki katılaşma ve sertleşme süresi ve dayanımı için kullanılan çimentonun özellikleri açısından yakından ilgilidir. Bu sebeple, bu özelliklerin tümü beton özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bunun yanında, kullanılacak olan çimentonun özellikleri, zamanla çevreden gelmesi olası olan fiziksel ve kimyasal etkilere karşı betonun durabilitesi ve elde edilecek olan betonun gösterebileceği büzülme veya genleşme gibi hacim değişikliklerini büyük ölçüde etkileyebilir. Betonun hacimsel olarak yalnızca beşte birini oluşturan çimento miktarı, betonu oluşturan çimentonun temel malzemeleri içinde en pahalılarından biri olması nedeniyle elde edilen betonun ekonomikliğini önemli derecede etkilemektedir (Erdoğan, 1995).

Beton üretiminde önemli hususlardan biri çimentonun inceliğinin bilinmesidir. İncelik ne kadar fazla olursa çimentonun hidrasyon hızı o kadar fazla olur. Çimentonun özgül yüzeyiyle belirlenen incelik, çimento çeşitlerinin tümü için, özgül yüzeyin 2800 cm²/g'dan daha az olmaması anlamına gelir. Çimento hamurunun sertleştikten sonra hacim değişimini belirlemek amacıyla Le Chatelier aleti kullanılır. Çimento için önemli parametrelerden biri de hacim genişlemesinin belirlenmesidir. Vicat aleti kullanılarak çimento hamuruna uygulanan priz deneyi sonucunda çimento hamurunun sıvı halden katı hale geçme süresi ölçülebilmektedir (Gönen, 2012).

Üretilen çimentonun esası; ana maddesi olan kili ve kalkerini belli oranlarda karıştırmak ve yüksek sıcaklıktaki fırında pişirilmesini sağlamaktır. Kalkerin ayrışmasından CaO, kilin ayrışmasından da silis (SiO₂), alümina (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) meydana gelir. Sıcaklığın artması ile birlikte ortaya çıkan maddeler aralarında birleşerek alüminat ve silikatlar oluşmaktadır. Alüminat ve silikatlar çimentoya bağlayıcı özelliği kazandıran maddelerdir. Çimentonun ana bileşenleri Tablo 2.3'te gösterilmektedir (Gönen, 2012).

Tablo 2.3 Çimento ana bileşenleri

Bileşen Adı	Formül	Kısa Adı	Yüzdesi
Trikalsiyum Silikat	$(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$	C_3S	%50
Dikalsiyum Silikat	$(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$	C_2S	%20
Trikalsiyum Alüminat	$(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	%7-8
Tetrakalsiyum Alümina Ferrit	$(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	%9-10

Çimentoya ilk dayanıklılık kazandıran ve dayanıklılığı arttıran bileşik C_3S 'tir. C_2S ise, ötektik oluşturucu bir özelliği vardır ve ilerleyen zamanlarda dayanıma katkı sağlamaktadır (İnt. Kyn. 1).

2.2.3 Karışım ve kür suyu

Betonun diğer ana malzemelerinden biri de karışım suyudur. Karışım suyu betonun karışma uygun işlenebilmesinin yanı sıra asıl görevi çimento ile birlikte hidrasyona sebep olmasıdır. Bu nedenle kalitesinin yüksek olması gerekli ve yabancı maddelerin olmamasına özen gösterilmelidir (Nebioğulları, 2010).

Beton içerisindeki su miktarı, beton dayanımını etkileyen en önemli değişkenlerden birisidir. Su /Çimento oranının çok fazla yükselmesi mukavemetin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, tepkimeye girmeyen suyun yaratacağı boşluklar; suda bulunan sülfat, klor vb. maddeler sebebiyle donatı ve betona zarar vermektedirler (Gönen, 2012).

Betonla ilgili uygulamalarda, suyun farklı işlevleri vardır;

1. " Karışım suyu" , çimento ve agrega ile beraber karıştırılarak beton üretimini sağlamak,
2. " Kür suyu", yerine konulmuş betonun yüzeyinin ıslak olmasını sağlayarak içindeki suyun buharlaşmasını önlemek, böylelikle beton içindeki kimyasal tepkimelerin gerçekleşebilmesi için yeterli ölçüdeki suyun bulunabilmesini sağlamak ve
3. " Yıkama suyu" beton karışımına ilave edilecek agregaların yıkanmasını sağlamak (Erdoğan, 2003).

Karışım suyunun betonda iki önemli işlevi vardır. Bunlardan ilki, çimentonun hidratasyonunu sağlayarak mukavemet kazandırmak ve kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesini sağlamaktır. İkincisi ise, çimento hamuru ile agreganın birbirlerine yapışması, betonda boşluk oranını azaltıp sıkıştırılmasını sağlamaktır. Bundan dolayı da karışım suyuna işlenebilirlik suyu da denilmektedir.

Beton sertleşme esnasında ve sertleşme olayından sonra da ara sıra ya da her an suyla temas halindedir. Başka bir ifadeyle, beton karışım suyu, beton karışımı hazır hale getirilirken, betona doğrudan eklenen su ile agreganın nemi yoluyla betonun bünyesine giren toplam su kütlesi olarak tabir edilir.

Beton içerisine katılacak karışım suyu, optimum miktarda olmalıdır. Bu nedenle karışımda kullanılacak olan su, çimentonun ağırlığının %36-42'si kadarı çimentonun hidratasyonu için yeterli ölçüdedir. Çimentonun inceliği ve agregadaki çok ince malzeme ile karışım suyu miktarı doğru orantı göstermektedir. Kimyasal olarak bağlanmakta güçlük çeken su, betonda istenmeyen boşluklara ve büzülmelere sebep olur. Gereğinden fazla veya gereğinden az olan karışım suyu, betonun geçirgenliğini ve basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Şimşek, 2012).

2.2.4 Katkı maddeleri

Betonun özelliklerini geliştirmek ve değiştirmek için beton üretiminde ilave edilen mineral kökenli maddelere ve kimyasal maddelere beton katkı maddesi denmektedir. Beton hacminin %8'lik bir kısmını kapsamaktadır. Mineral kökenli katkı maddelerine uçucu kül, silis dumanı ve taş unu; kimyasal katkı maddelerine ise su azaltıcı, hava sürükleyici, antifriz, priz geciktirici ve priz hızlandırıcı örnek olarak verilebilir (Yardımcı, 2005).

ASTM C 125 (1994), katkı maddesini, geleneksel beton bileşenlerinden olan çimento, su ve agreganın dışında, karıştırma öncesi veya karıştırma işlemi esnasında beton harcına ilave edilen maddeler olarak tanımlanmıştır. Bu maddeler organik veya inorganik olup, beton bileşimine ağırlıkça toplam bağlayıcının %5'ini aşmayacak şekilde ilave edilen maddelerdir. Bu maddeler genelde sıvı halde bulunup litaretürde "kimyasal katkı maddeleri" olarak bilinmektedirler. Bu maddeler çok ince öğütülerek bazen çimento ile sınırlı oranda karıştırılarak, bazen de beton üretimi sırasında belli oranlarda eklenerek kullanılan çimentoya benzer olan, yani bağlayıcı özellikte olan maddelerdir.

Betonun temel üretim kurallarına aykırı hazırlanan kötü niteliklerini iyileştirmesi katkı maddelerinden beklenmemektedir. Katkı maddelerinin seçilmesinde ve kullanılmasında çok dikkatli davranılması gerekir. Çünkü betonun kötü niteliklerini iyileştirmek için kullanılan bir katkı maddesi, betondaki bazı özellikleri üzerinde beklenen olumlu bir etki ya da olumsuz bir etki göstermeyebilir. Bu maddelerin özelliğine uygun miktarda ve doğru zamanda kullanıldığında, çimentonun mukavemet artışını hızlandırmak, daha az miktarda su kullanarak mukavemetini arttırmak, dış etkilere karşı daha dayanıklı olmasını sağlamak ve soğuk havalarda da beton dökülebilmek gibi olumlu sonuçları olabilir (Şimşek, 2012).

2.2.4.1 Kimyasal katkılar

Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler, beton teknolojisine de yansyarak kimyasal katkıların betonda çimento, su, agreganın yanında dördüncü bir bileşen olarak kullanılmıştır. Kimyasal katkılar taze betonun priz süresini değiştirmek ve işlenebilirliğini arttırmak, sertleşmiş betonda ise dayanıklılık ve dayanım gibi amaçlarla beton üretiminde kullanılmaktadır (Topçu, 2006)

Kimyasal katkı maddeleri, su içinde erime özelliği olan ve karıştırma işlemi esnasında çimento dozajının %5'ini geçmeyecek şekilde ilave edilen maddeler olarak tanımlanabilir (Akman, 1996 ve Erdoğan, 1997).

TS EN 934-2 (2011)'e göre kimyasal katkı türleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Hava Sürükleyici
- Sertleşme Hızlandırıcı
- Su Azaltıcı / Akışkanlaştırıcı
- Yüksek Oranda Su Azaltıcı / Süperakışkanlaştırıcı
- Priz Hızlandırıcı / Priz Geciktirici
- Priz Geciktirici, Su Azaltıcı / Akışkanlaştırıcı
- Priz Geciktirici, Yüksek Oranda Su Azaltıcı / Süperakışkanlaştırıcı
- Priz Hızlandırıcı, Su Azaltıcı / Akışkanlaştırıcı
- Su Geçirimsizlik Katkıları
- Su Tutucu Katkıları

Bunların dışında şimdilik standart kapsamında olmayan özel katkı türleri de vardır:

- Korozyon Azaltıcılar
- Rötire Azaltıcı Katkılar
- Renkli Beton Pigmentleri
- Ayırışma Azaltıcı Katkılar
- Yüzey Geciktiriciler
- Alkali-Silika Reaksiyonu Azaltıcılar (KÜB, 2014).

2.2.4.1.1 Su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkı maddeleri:

Süperakışkanlaştırıcı katkıları, son 30 yılda beton teknolojisinde en önemli ilerlemelerinden bir tanesi haline gelmiştir. Su azaltıcı katkıları, organik ya da inorganik bileşenlerden oluşmakta ve beton içerisinde belli bir kıvama gelmesi için gereken su miktarını azaltmak sebebiyle kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri azalan su miktarına bağlı olarak, akışkanlaştırıcı veya süperakışkanlaştırıcı olarak adlandırılmaktadır. Normal dozajlarda, akışkanlaştırıcılar karışım suyu miktarını %5-11 arasında, süperakışkanlaştırıcılar ise karışım suyu miktarını %12 ve üzerinde azaltabilmektedir (ASTM C494, 2002).

Yüksek performanslı beton üretimi için başlıca iki hedef, su/bağlayıcı oranını olabildiği şekilde azaltmak ve betonu ayırışma ve boşluklu olmaması için kolayca yerine yerleştirmektir. Klasik beton teknolojisinden istenen bu iki özellik en önemli çelişkidir. Ancak süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerinin bulunması ile bu çelişki ortadan kalkmıştır (Akman, 1999).

Süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerini diğer katkı maddelerinden farklı kılan en önemli özelliği çok fonksiyonlu iyileştirme sağlamasıdır. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanarak, karışım su/çimento oranı sabit duruma gelmesi halinde su ve çimento içeriği azaltılabilir. Böylelikle, karışımın dayanım ve işlenebilme özelliklerinde çimentonun azalmasına bağlı olarak hidrasyon ısı azalır. Katkı maddesinin bu amaçla kullanımı, özellikle sıcak iklimlerde ve kütle beton uygulamalarında kolaylık sağlayabilir. Bu gibi uygulamalarda, karışımda hamur hacminin azalması ile birlikte yerine agrega konulması sonucunda agrega/çimento oranı artar ve karışımın büzülmesi azalır. Kontrol karışımına, karışım oranları değiştirilmeden süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave

edilmesi durumunda ise dayanım ve durabilite özelliklerinde değişme olmadan, işlenebilmede artış gözlenir.

Süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri, kimyasal kökenlerine bağlı olarak dört ana gruba ayrılır (Aitcin, 2004):

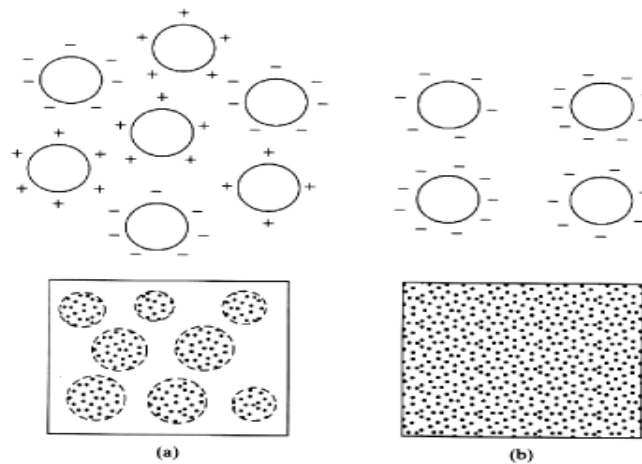
1. Polinaftalin sülfonatlar (sülfone naftalin formaldehit kondensesi-SNF)
2. Polimelamin sülfonatlar (sülfone melamin formaldehit kondensesi- SMF)
3. Modifiye lignosülfonatlar (MLS)
4. Poliakrilat ve polikarboksilatlar (PK).

Süperakışkanlaştırıcıların Etki Mekanizması

Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi içeren çimentolu sistemde, çimento tanelerinin dağılma özelliği genel olarak “elektrostatik” ve “stearik” etki mekanizmalarıyla açıklanır. Aşağıda bu iki etki mekanizmasına kısaca değinilmiştir.

Elektrostatik Etki

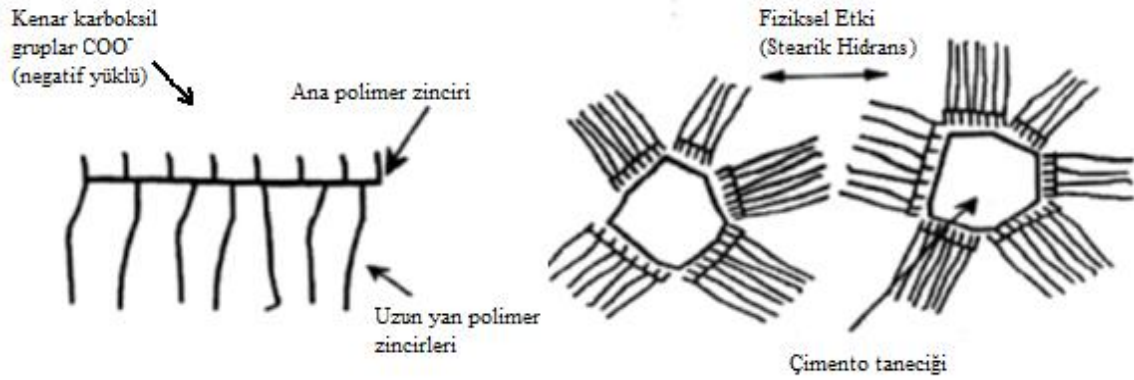
Süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri, çimento tanelerinin topaklaşmasını önler. Bu etki sebebiyle çimento hamurunun akışkanlığı artar (Collepardi, 2005; Mindess, 2003). Askıdaki çimento tanesi benzer şekilde elektriksel yük taşır ve bunların arasında bir itme kuvveti oluşturur. Bu elektriksel yükler yeteri kadar fazla ise taneler birbirinden ayrılır ve topaklaşma oluşmaz. Şekil 2.1’de su azaltıcı katkının (süperakışkanlaştırıcının) çimento tanelerinin dağıtılmasında rol oynayan etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Su azaltıcı katkıların dağıtma etkisi a) topaklaşmış hamur; b) katkılı hamur (Mindess, 2003)

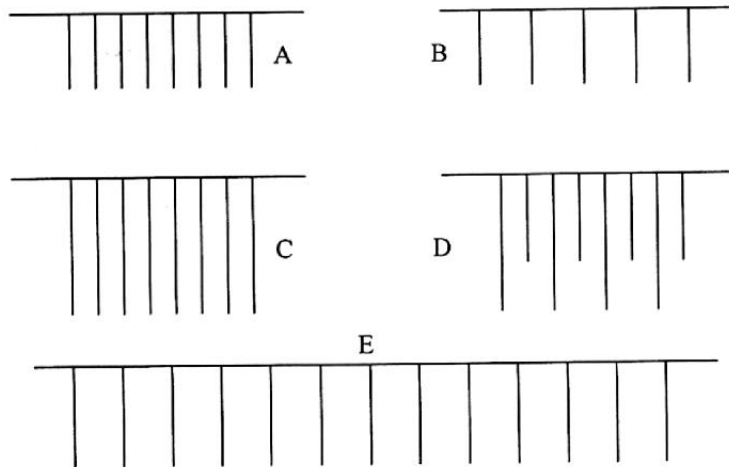
Stearik Etki

Polikarboksilat (PK) bazlı katkı maddelerinin dağıtma etkisi elektrostatik etkiden çok, stearik (fiziksel-geometrisel) engelleme etkisi ile açıklanmaktadır. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere, polimer molekülündeki yan zincirler çimento taneleri arasında fiziksel bir etki yaratmakta ve topaklaşmayı önlemesi sağlanmaktadır.



Şekil 2.2. Katkıların stearik etkisi (Collepardi, 2005)

Stearik etki, elektrostatik etkinin aksine, çimento kompozisyonundan kaynaklanan, boşluk çözeltisi içerisindeki iyon tipi ve yoğunluğundan çok daha az etkilenmektedir. Stearik etkide etkin parametreler ana zincir uzunluğu, yan zincirlerin uzunluğu ve yan zincirler arası uzaklıkların farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Polikarboksilat (PK) bazlı süperakışkanlaştırıcılara ait tipik moleküler yapı çeşitleri. Yan zincirler arasındaki mesafe farklılığı (A-B), yan zincir uzunluğu farklılığı (C-D), ana zincir uzunluğu farklılığı (A, B, C, D-E)

2.2.4.1.2 Çimento ve süperakışkanlaştırıcı katkı uyumunu etkileyen faktörler

Beton kalitesinde önemli rol oynayan çimento hamuru akışkanlığı, süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılması ile artırılabilir. Fakat süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi içeren özellikle düşük su/çimento oranına sahip betonların başlangıçtaki yüksek işlenebilirliği, kısa bir süre sonra kaybolabilmektedir (Jiang, 1999). Çimento ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi arasındaki uyum, özelliklerinden kaynaklanan çeşitli faktörlerden etkilenmektedir.

Çimento Kaynaklı Etkiler

Yüksek performanslı betonların reolojik özelliklerini etkileyen en önemli faktör, çimentonun kimyasal kompozisyonu, inceliği ve içerdiği sülfatların çözünürlüğü gibi faktörlerdir. Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir.

Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu

Portland çimentosundaki C_3A bileşeni, genel olarak kübik ve ortorombik kristal yapıya sahip olan karışım olarak bulunmaktadır. Kübik yapı, ortorombik yapıya göre daha hızlı reaksiyona girmektedir. Kübik yapıda olan C_3A , sülfat iyonları ile hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve üzerinde oluşan etrenjit tabakasından dolayı sonraki hidrasyon sürecini yavaşlatır. Böylelikle, çimento hidrasyonu durgunluk devresinde iken çok fazla kıvam kaybı oluşmadan betonun taşınması ve yerleştirilmesi mümkün olmaktadır. Ortorombik yapıda olan C_3A ise kübik yapıdakine göre biraz daha yavaş tepkimeye girer ve sürekli devam eden iğne şekilli etrenjit oluşumuna sebep olur (Aitcin, 2004). Süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerinin varlığı, kübik C_3A yapısının sülfat iyonlarıyla olan reaksiyonun daha kolay kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Genel olarak çimentonun C_3A yapısının içeriğinin az olması, süperakışkanlaştırıcı içermesi sistemde istenen bir durumdur. C_3A yapısının reaksiyonu ile oluşan iğne formundaki etrenjit, ortamdaki suyu tüketir ve hamurun işlenebilirliğini azaltır. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri oluşan etrenjit formlarının üzerinde tutunarak bunların iğnemsî yapıya dönüşmesini geciktirmektedir (Prince, 2002).

Süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerinin dağıtma etkisinin kararlı ve sürekli olabilmesi için asıl olarak C_3S ve C_2S bileşenleri üzerinde tutunması gerekmektedir (Akman, 1999). Fakat $C_3A + C_4AF$ içeriği fazla olan çimentolarda, katkının bu bileşenlere tutunması sebebiyle, C_3S ve C_2S bileşenleri üzerine tutunan göreceli miktarı dolayısıyla,

hamurun akışkanlığı azalır (Chandra, 1994). Çok sayıda yapılan araştırmaya rağmen süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri ve C_3A bileşeni arasındaki etkileşimi kontrol eden temel prensipler net olarak anlaşılmamıştır. Karışım içerisinde bulunan süperakışkanlaştırıcı moleküllerinin tükenmesi ile beraber etrenjit tekrar normal olarak gelişmeye devam etmektedir (Prince, 2002).

Bazı araştırmacılar, süperakışkanlaştırıcı etkinliğinin çimentodaki $C_3A/ CaSO_4$ oranına bağlı olduğunu, bu oranın artmasıyla akışkanlığın azaldığını bildirmiştir (Boragafio, 1992). Bununla beraber akışkanlığın azalmasının, C_3A içeriğinden ziyade, boşluk çözeltisinin yapısıyla ilgili olduğunu belirten araştırmalar da bulunmaktadır. Çökme kaybının C_3S bileşeni hidratasyonu ile ilgili olduğunu, bu durumun iğne formundaki etrenjit oluşumu ile alakalı olmadığını vurgulayan araştırmalara da rastlanmaktadır (Chandra, 2002).

SNF (Polinaftalin sülfonatlar) kullanarak yapılan deneylerde, çimentodaki C_3S/C_2S ve C_3A/C_4AF oranı arttıkça karışımın viskozitesinin arttığı rapor edilmiştir (Asakura, 1992; Ramachandran, 2005).

Çimentonun İnceliği

Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi içeren çimento hamurunun viskozitesi çimento inceliğine de bağlıdır. Çimentonun inceliği arttıkça hamurun viskozitesi artar. Yapılan araştırmalarda, 11 μm 'den küçük tane boyutu ile viskozite arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermiştir (Ramachandran, 2005; Nawa, 1992). Aynı şekil işlenebilmeyi sağlamak amacıyla çimentonun inceliğine bağlı olarak daha fazla süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılması gerekmektedir (Aitcin, 1994; Hanna, 1989; Griesser, 2002). Göreceli olarak düşük inceliğe ve düşük C_3A içeriğine sahip çimentoların daha iyi akışkanlık özeliği gösterdiği bildirilmiştir (Bonen, 1995; Tanaka, 1998).

Öğütmeyi Kolaylaştırıcı Katkıların Etkisi

Çimento üretiminde öğütmeyi kolaylaştırmak için klinkere katılan katkılar, süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerinin çimentoya tutunma özelliğini dolayısı ile işlenebilmeyi değiştirmektedir (Houst, 1999). Öğütmeyi kolaylaştırmak için kullanılan trietanol aminasetat katkısının, hamurun eşik kayma gerilmesini %25 düzeyinde azalttığı belirtilmiştir (Flatt, 2001).

Süperakışkanlaştırıcı Kaynaklı Etkiler

Katkı maddeleri üretici firmaları tarafından verilen, katkı madde oranı, yoğunluk, pH, sülfat ve klorür içeriği gibi özellikler, ürünün performansı hakkında elle tutulur bir bilgi vermez (Aitcin, 1994). Süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerinin etkinliğini belirleyen bağlı sülfonat grubunun pozisyonu, polimer zincirinin uzunluğu ve bunların çapraz bağlanmaları, atık sülfat miktarı ve nötürleştirme işleminde kullanılan karşıt (counter) iyon tipi en önemli özellikleridir.

Katkı Kökeni, Moleküler Ağırlık, Sülfonasyon ve Polimerizasyon Derecesi Etkisi

Süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kökenlerinden dolayı birbirinden farklı olabilecekleri gibi aynı kökene sahip olan katkılar da, moleküler ağırlık ve kimyasal kompozisyonlarındaki değişkenlikten, farklılık gösterebilirler (Chandra, 2002).

MLS esaslı katkının ortalama molekül ağırlığının yaklaşık 20000-30000, SMF ve SNF bazlılarındaki ise yaklaşık olarak 30000'dir (Aitcin, 1994; Ramachandran, 1995). Süperakışkanlaştırıcının molekül ağırlığının artmasıyla akışkanlığın arttığı, fakat bir noktadan sonra, moleküler ağırlığın artmasının viskozitede artışa yol açtığı gözlenmiştir (Basile, 1989). Çok yüksek moleküler ağırlığa sahip olması katkıdaki uzun polimer zincirinin çimento tanelerine tutunarak topaklaşmaya yol açabileceğini göstermiştir (Kim, 2001). Süperakışkanlaştırıcının sülfonasyon derecesinin göreceli olarak moleküler ağırlığından daha fazla işlenebilirliği etkilediği belirtilmiştir (Hsu, 2000).

Süperakışkanlaştırıcının polimerizasyon derecesinin, karışımın dayanımının gelişmesine olan etkisinin polimerin tipine bağlı olarak değiştiği, bununla birlikte, düşük moleküler ağırlıklı polimerin çimento tanelerini dağıtmada daha etkili olduğu gözlemlenmiştir (Ramachandran, 1995; Mouka, 1993).

Asidik sülfonat grubunun (HSO_3), naftalin molekülüne bağlanma şekli süperakışkanlaştırıcının verimini etkilemektedir (Aitcin, 2004).

Karşıt İyon Kökeni Etkisi

Üretim sırasında nötürleştirmek için kullanılan baz, süperakışkanlaştırıcının performansını etkilemektedir. SNF bazlı katkılarda, sodyumun karşıt iyon olarak kullanılması (Na-SNF) magnezyum (Mg-SNF) ve kalsiyuma (Ca-SNF) göre daha iyi reolojik özelliklere yol açmıştır (Kim, 2000). Polikarboksilat bazlı katkılarının üretiminde ise

sodyum veya magnezyum kullanımı süperakışkanlaştırıcının performansında etkili olmamıştır (Flatt, 2001).

2.2.4.1.3 Süperakışkanlaştırıcının çimento üzerinde tutunması

Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesinin etkinliği, katkının çözeltideki miktarına bağlıdır. Hidratasyon işleminin ilk aşamalarında, hızla çimento taneleri hidrate olur ve katkının miktarı önemli ölçüde azalır (Ramachandran, 1995). Negatif yüklü katkı polimeri, çimento bileşenleri üzerine tutunur. Fakat C_3S 'e göre daha az negatifliğe sahip olan C_3A üzerindeki tutunma oranı daha fazladır. Bu etki SNF ve SMF esaslı katkılarda daha çarpıcı bir sonuç gösterir (Nawa, 1992; Kim, 2000). Bir başka çalışmada (Yoshika, 2002), C_3A ve C_4AF bileşenleri üzerinde C_3S ve C_2S bileşenlerine göre daha fazla katkının tutunduğu, bunun tüm süperakışkanlaştırıcılar için geçerli sayıldığı vurgulanmıştır.

Sistemdeki süperakışkanlaştırıcı bittiğinde, olağan şekilde iğne formundaki etrenjit oluşumu tekrar başlar (Prince, 2002). Süperakışkanlaştırıcı molekülleri, etrenjit ile birlikte C_3A 'nın diğer hidrate fazları (hegzagonal C_2AH_8 ve C_4AH_{13}) üzerinde de tutunmaya eğilim göstermektedir. Fakat hegzagonal yapı üzerindeki tutunma hızı C_3A üzerindeki göre çok düşüktür (Ramachandran, 1993).

Süperakışkanlaştırıcı katkının çimento tanelerine tutunma özeliği, çimentonun alkali içeriğinden önemli derecede etkilenir. Çimentodaki alkalilerin, suda çözünebilir olması ya da ana bileşenlere bağlı olması farklı etkiler yaratabilmektedir (Ramachandran, 1993; Luke, 1990).

Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, süperakışkanlaştırıcı katkının hidratasyon ürünleri üzerinde tutunması durumunda dağıtma işleminin gerçekleştiği, çimento bileşenleri tarafından emilen katkının ise, dağıtma yeteneğine sahip olmadığı bildirilmiştir (Nakajima, 2004).

2.2.4.1.4 Süperakışkanlaştırıcının karışıma eklenme zamanı

Karışım suyundan birkaç dakika sonra betona süperakışkanlaştırıcı katkının ilave edilmesi, çimento tanelerini dağıtma yeteneğini artırır. Çimentonun reaktif bileşenleri üzerinde bu süre içinde ince bir hidrat tabakası oluşur. Böylelikle, katkı moleküllerinin reaktif bileşenler tarafından tutunma oranı azalır. Katkının eklenme zamanı ile ilgili pekçok araştırma yapılmıştır (Ramachandran, 1993; Hsu, 1999).

2.2.4.1.5 Sıcaklık etkisi

Sıcaklığın artması, karışımın akışkanlığını azaltır ve çökme kaybını artırır. Sıcaklık artışı ile birlikte süperakışkanlaştırıcı katkı maddesinin tutunma oranı arttırdığından akışkanlıkta artma sağlayabilir (Nawa, 2000). Ancak, sıcaklığın artması her zaman aynı etkiyi yapmayabilir (Griesser, 2002; Flatt, 1997).

2.2.4.2 Mineral katkılar

Mineral katkı maddeleri, hacimleri eşdeğerlerinde çimento ile ikame edilerek kullanılan, betonda olumsuzluklara sebep olmaksızın, kullanılan çimentoyu azaltmasına neden olan maddelerdir. Beton üretiminde mineral katkı maddelerinin kullanılmasının ekonomik yararının olmasının yanında ekolojik faydası da bulunmaktadır. Mineral katkı maddelerinin mühendislik kuralları içerisinde kullanıldıklarında sağlanan ekolojik ve ekonomik yararı yanında, işlenebilirliğe sağladığı olumlu katkı betonun özellikle olumsuz çevre şartlarında performansında önemli ölçüde iyileştirmesi mümkündür (Erdoğan ve Kurbetçi, 2003). Mineral katkı maddelerinin neredeyse hepsi, beton üretiminde kullanılan puzolanik özelliklidir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Puzolanlar, bağlayıcılık değeri çok az olan veya kendi kendine bağlayıcılık değeri olmayan, ancak ince taneliyken sulu ortamda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'le birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterebilen alüminalı ve silikalı malzemelerdir (ASTM C 618, 1994). Çimento klinkerine göre daha ucuz olan puzolanların çimento klinkerinin bir bölümü yerine mineral katkı maddesi olarak kullanılması maliyeti düşürür. Betonda aşırı ölçüde puzolan mineral katkı malzemesi kullanmak betonun priz geciktiriciliğine sebep olur. Puzolan kullanmanın portland çimentosuna göre üstünlükleri ve sakıncaları aşağıda sıralanmaktadır;

Portland çimentosuna göre üstünlükleri:

- Beton dökümü sıcak havada ve kütle beton üretimi için uygundur. Hidratasyon ısısı ve bu ısının çıkış hızı düşük olmaktadır
- Satış fiyatları aynı olmasına rağmen üretimleri daha ucuza mal olmaktadır.
- Kirecin, CO_2 'li ve asitli sularda erimesini önler ve kimyasal mukavemetini arttırmasını sağlar.
- Dona dayanımı daha fazla ve geçirimsizlikleri azdır.

Portland çimentosuna göre dezavantajları:

- Portland çimentosuna göre daha çok su gerekir ve bu durumda rötreyi arttırmaktadır.
- Düşük hidrasyon ısisına sahip olmasından dolayı soğuk iklimler için uygun değildir.
- Mukavemeti yavaş kazanmaktadırlar.
- Mukavemeti yavaş olduğundan, yapılan betonun kalıplarda uzun süre ve uygun nem şartlarında saklanması gerekmektedir.
- Puzolanların daha ince öğütölmesi gerekir ve bundan dolayı havadaki nemle bozulma ihtimalleri daha fazladır.

Puzolanlar, doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Doğal puzolanlar, puzolanik özellik göstermesi ve yeryüzünde doğal olarak bulunması gereken malzemelerdir. Yapay puzolanlar ise, aynı şekilde yine puzolanik özelliğe sahip olması ve endüstriyel bir üretimde yan ürün olarak ortaya çıkan malzemelerdir. Doğal puzolan olarak pişirilmiş kil, volkanik kül, diatomik toprak ve volkanik tüf örnek gösterilebilir. Yapay puzolan olarak ise, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül sayılabilir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

2.3. Betonda İstenen Özellikler

Karışımını oluşturan malzemelerin özellikleri ve karışım içerisindeki bu malzemelerin miktarları betonun özelliklerini etkilemektedir. Özelliklerine göre:

2.3.1 Taze beton özellikleri

Beton malzemelerinin karışma işleminden sonra yani şekil verilebileceği en kolay andan itibaren betonun katılaştığı ana kadar betonda aranan şeklin verilebileceği zamanda ki betona denir (Gönen, 2012). Adım adım izlenecek yolda beton üretiminde, katılaşmış beton özelliklerini direk etkilediğinden dolayı taze betonun bazı özelliklerini içermesi gerekmektedir (Aruntaş, 2006).

Üretimde kullanılacak olan malzemelerin, kolay karışabilen, kalıplara kolayca yerleşebilen ve sıkışabilen özellikte olması istenmektedir. Beton dökümü sırasında sıcaklığı 5-33 °C arasında olması gerekmektedir. Betonun taşınma, yerleştirme ve

sıkıştırma işlemlerinde beton içerisindeki malzemelerin betonun homojenliğini bozmaması gerekmektedir.

Çünkü betonun yerleştirmesi aşamasında kaba agregalar çökme eğiliminde olmaktadır. Taze beton içerisinde hacimce %0.5-8 arasında hava bulunmaktadır. Betondaki hava miktarı yoğunluk ve dayanım gibi özellikler betona direk etki eden bir özellik olmaktadır. Ayrıca, donma-çözülme direncinin artırılması ile beton içerisindeki hava sürükleyici katkılarla hava miktarı artırılması sağlanabilmektedir (Gönen, 2012).

2.3.2 Sertleşmiş beton özellikleri

Betonda şekil verilebilme işleminin bittiği ve katılaşmanın başladığı sürece denir. Sertleşmiş beton kendinden istenen dayanıklılık, hacim sabitliği ve dayanım özelliklerine sahip olmalıdır. Betonda dayanım, betonun kırılmamak için eksenel basınç yükü etkisi altında gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak ifade edilir. Birimi MPa ve kgf/cm² olarak gösterilmektedir. İncelemeler sonucunda, uygun çevre koşullarında betonun dayanımının yaşla arttığı görülmüş ve betonun ulaşabileceği dayanımının %90'ini ilk 28 günde aldığı gözlenmiştir. Hesaplamalar yapılırken de betonda 28 günlük dayanım değerleri kullanılmaktadır. Bu nedenle betonun 7 ve 28 günleri ve daha ileri ki günler için ulaşılması gereken dayanım değerlerinden daha düşük bir değere düşmemesi gerekmektedir.

Ömrü boyunca beton ürünleri bozulmaya ve yıpranmaya karşı pek çok etkenle karşı karşıyadır. Bu tür kimyasal ve fiziksel etkilere karşı betonun gösterdiği direnç kabiliyetine durabilite (dayanıklılık) adı verilmektedir (Gönen, 2012). Suyu doymuş halde bulunan betonun hava değişimleri ile beraber donma-çözünme olayının gerçekleşmesi sonucu betonda bozulmalar meydana gelebilmektedir. Ayrıca, çimentoda bulunan alkallerle, agregada bulunabilecek reaktif silika arasında meydana gelebilecek olan “alkali-silika reaksiyonları” betonda genleşmelere neden olabilmektedir.

Beton içindeki suyun kimyasal ve fiziksel nedenlerle azalması betonun hacminde gerçekleşen küçülmeye “rötre veya büzülme” denilmektedir. Bu nedenle sertleşmiş betonun uygun hacim sabitliğine ihtiyacı vardır. Bunların yanı sıra sertleşmiş betonda yalıtım, geçirimsizlik, dış görünüş ve ekonomiklik konuları da önem arz etmektedir.

2.4. Hafif Betonların Tanımı ve Önemi

Hafif beton ve hafif agreganın tanımı üzerinde pek çok yaklaşım bulunmaktadır. Anonim (1997), hafif betonu; etüv kurusu durumundaki birim ağırlığı 800 kg/m^3 'den büyük, 2000 kg/m^3 'den küçük olan betonlar olarak adlandırmıştır.

Birim ağırlıkları 1840 kg/m^3 'ü aşmayan ve 28 günlük silindirik basınç dayanımı 17 MPa 'ı geçen betonlar, hafif beton kategorisine girerler. Ülkemizin de içinde olduğu bazı ülkelerin standartlarında, hafif betonun birim ağırlığının 1900 kg/m^3 'e kadar çıkmasına izin verilmektedir. Genel anlamda hafif betonların birim ağırlıklarının pratikte değişim ağırlığı $300\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ arasındadır (Demirboğa, 1999). Hafif ve ekonomik yapılar oluşturmak için, modern yapı uygulamalarının pek çoğunda, hafif betonlara olan talep giderek artmaktadır. Isıl iletkenlik katsayısı normal betona kıyasla yaklaşık 10 kat daha az olan hafif betonlar, binalarda taşıyıcı özellik gerektirmeyen ve ilave yük getirmemesi gereken yerlerde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.

2.4.1 Hafif betonların tarihçesi ve uygulama alanı

Hafif betonların kullanımı M.Ö. 3000 yıl öncesine kadar dayanmaktadır. 2000 yıl öncesine kadar Avrupa'da ise Romalılar tapınak ve heykellerinin inşasında hafif beton kullanmışlardır. III. yüzyılda Irak'ta Babül Sarayları, IV. yüzyılda Sümerler tarafından inşa edilen Ayasofya Cami ve 624 ile 987 yılları arasında Meksika'da yapılan piramitlerin inşası esnasında hafif beton kullanılmıştır (Aitcin, 1998).

Hafif agrega olarak ilk yıllarda doğal hafif agregalardan olan perlit, scoria, ponza, tüf vb. volkanik orijinli kayalar kullanılmıştır. Bu hafif agregalar hem ince hem iri agrega yerine kullanılmıştır. Hafif agregalardan büyük bir bölümü ince olarak kullanılarak pozolanik aktiviteye sahiptir (Chandra ve Berntsson 2003). Erdoğan (2003), Milas ve Efes gibi Antik Yunan tarihi eserlerin bozulmadan günümüze kadar gelmesi, bu yapılarda kullanılan kayaç ve bağlayıcıların pozolanik aktiviteye sahip olduklarından dolayıdır. Hafif agregalar pozolanik aktiviteye sahip oldukları için, özellikle çimentonun hidratasyonu neticesinde ortaya çıkan serbest kireç ile tepkimeye girerek, bağlayıcılık özelliğine sahip olan kalsiyum silikat hidratı oluşturmak, çimento matrisinin yoğunluk ve dayanımını artırmak ve boşluklu yapısını düzenlemek, elde edilen betonların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri ve durabiliteleri üzerinde yadsınamayacak derecede olumlu katkı sağladığı

görülmektedir (Short ve Kinniburg 1978; Chandra and Berntsson 2003; Anwar Hossain 2004).

İngiltere’de 20. yüzyılın başlarında pek çok yapı uygulamalarında hafif beton kullanılmıştır. Bu yapılardan biri tanesi de British Museum’dur. J. Hayde 1918 yılında ilk hafif agregalı üretim yöntemlerini geliştirmiş ve patentli olarak fabrikalarda üretilmeye başlanılmıştır. Üretilen agregaların pek çoğunun her türlü betonarme yapılarda kullanılabilecek düzeyde olduğu belirtilmektedir. Hafif agregalı kullanımı o kadar artmıştır ki, 1917 yılında Birinci Dünya Savaşı sonrasında hafif beton kullanılarak gemi inşa edilmiştir (Short ve Kinniburg 1978; Chandra ve Bertsson 2003).

Hafif betonla yapılmış dünyada çok sayıda yapı mevcuttur (Gül ve Geçten 1994; Öztok 1997). Bunların içinden birkaç örnek verilmesi gerekirse;

Hafif betondan yapılan ilk örnek, 1920 yılında ABD’nin St. Louis kentinde inşa edilen “Park Plaza Hotel” dir. 1950’den sonra hafif beton, birçok çok katlı ve diğer büyük binalarda kullanılmıştır. Bu yapıların önemli örneklerinden biri, 1961–1962 yılları arasında ABD’nin Chicago kentinde inşa edilen “Marina City Towers” dır (Resim 2.1). Üç kuleden meydana gelmiş ve her kulenin dış çapı 39 m olan binanın inşasında, genişletilmiş kil ve tabii kumdan elde edilen beton kullanılmıştır. Betonun yoğunluğu 1680 kg/m^3 ve 28 günlük silindirik basınç dayanımı 25 MPa’dır.

Avustralya’nın Sydney kentinde 1967 yılında tamamlanan “Australia Square” 50 katlı, 184 m yüksekliğinde ve 42.5 m çapında dairesel olarak inşa edilmiştir (Resim 2.2). Bu betonun yoğunluğu 1792 kg/m^3 ve 28 günlük basınç dayanımı 34.3 MPa’dır.

1968 yılında, ABD’nin Chicago kentinde yapılan 71 katlı “Lake Point Tower” binasının döşeme tabliyeleri hafif beton kullanılarak inşa edilmiştir. Betonun yoğunluğu, 1730 kg/m^3 ve 7 günlük basınç dayanımı 20–22 MPa’dır (Resim 2.3).

Dünyada hafif betonla inşa edilmiş en yüksek bina, Huston’da ki “One Shell Tower” dır (Resim 2.4). 1969 yılında inşası tamamlanan ve “Tube in Tube” tipi olan bu yapı, merkez, iç ve dış duvarları yakın açıklıklı kolonlar şeklinde yapılmıştır. 218 m yüksekliğindedir. Beton, iri agregalı ve genişletilmiş kille, tabii kumdan oluşturulmuştur. Bu yapı için dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta; beton yoğunluğunda küçük bir artışla 1840 kg/m^3 yoğunluğa karşılık, 28 günlük silindirik basınç dayanımında 42 MPa’lık bir değer sağlanmıştır. Bina genelinin tümünde hafif beton kullanılmıştır. 52 kattan oluşan

bu binanın ağırlığı, normal betondan yapılmış 35 katlı bir binanın ağırlığıyla eşit düzeydedir.

Avrupa, ABD ile uzun binalardaki yarışına 1972 yılında BMW yönetim binasının yapımı ile başlamıştır. Yüksekliği 100 m olan binanın inşası esnasında, genişletilmiş kil ve tabii kumdan üretilen beton kullanılmıştır. Beton yoğunluğu 1660 kg/m^3 ve 28 günlük basınç dayanımı 41 MPa'dır.



Resim 2.1 Marina City Towers



Resim 2.2 Australia Square



Resim 2.3 Lake Point Tower



Resim 2.4 One Shell Tower

Hafif betonun, 1970'li yıllarda köprülerdeki kullanımında gelişmeler görülmektedir. Bu uygulamalara güzel bir örnek olarak, Hollanda Nijmegen yakınlarında, “Mass–Well Kanalı” üzerindeki “Dukenburgse Köprüsü” verilebilir. Köprünün uzunluğu 188.8 m, genişliği 28.7 m ve boyuna üç açıklığı sırasıyla 37.4 m, 112.2 m ve 37.4 m'dir. Bu köprünün inşası sırasında kum ve genişletilmiş kilden üretilen beton kullanılmıştır. Betonun, yoğunluğu 1750 kg/m^3 ve 28 günlük silindir basınç dayanımı 38.5 MPa değerinde olacak şekilde tasarımı gerçekleştirilmiştir (Gül ve Geçten 1994).

2.4.2 Hafif betonların sınıflandırılması

Hafif betonların sınıflandırılması genellikle hem mukavemetine hem de birim ağırlığına göre yapılmaktadır.

Birim ağırlıkları 1840 kg/m^3 'ü geçmeyen ve 28 günlük olan silindir basınç dayanımı 17 N/mm^2 'i aşan betonlar hafif beton sınıfına girmektedir (ASTM C330-69). Ancak, ülkemizde ve diğer bazı ülkelerin standartlarında hafif betonun birim ağırlığının 1900 kg/m^3 'e çıkması kabul edilebilir bir durumdur (Manuel, 1980). Genellikle hafif betonların birim ağırlıklarının değişim aralığı $300\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ 'tür (Neville, 1975). Taşıyıcı hafif betonların birim ağırlığı ise $1450\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmekte, ama çoğunlukla birim ağırlıkları $1600\text{-}1700 \text{ kg/m}^3$ arasında olmaktadır. Dayanımları $7\text{-}17 \text{ N/mm}^2$ arasında olan betonlar orta mukavemetli beton ile yalıtım betonu sınıfına girmektedir (Neville, 1975 ve Price, 1949).

Hafif betonları fonksiyonlarına göre üç ayrı gruba ayırabiliriz (Neville, 1975):

- a. Taşıyıcı betonlar
- b. Yalıtım betonları
- c. Orta mukavemetli betonlar

Hafif betonlar dayanım ve yoğunluk açısından üç sınıfa ayrılmaktadır. Birinci sınıf hafif betonlar düşük dayanım ve düşük birim ağırlığa sahip yalıtım malzemesi olarak, ikinci sınıf betonlar orta dayanıma sahip blok duvar yapımında ve üçüncü sınıf yapısal betonlar ise yüksek dayanıma sahip taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılmaktadır. Hafif betonların kategorilerine göre dayanım ve birim ağırlıkları sırası ile birinci sınıf hafif betonlarda $7\text{-}20 \text{ kg/cm}^2$, $250\text{-}750 \text{ kg/m}^3$, ikinci sınıf hafif betonlarda $20\text{-}140 \text{ kg/cm}^2$, $1000\text{-}1400 \text{ kg/m}^3$ ve üçüncü sınıf betonlarda $170\text{-}418 \text{ kg/cm}^2$ ve $1500\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir.

Kosmatka ve Panarese (1992), hafif betonları 28 günlük basınç dayanımlarına ve birim ağırlıklarına göre yapısal ve düşük dayanımlı yalıtım ve dolgu betonları olarak sınıflandırmışlardır. Basınç dayanımları 170 kg/cm^2 'den büyük ve birim ağırlıkları $1400\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ arasında olan hafif betonlara yapısal hafif beton, basınç dayanımları $70\text{-}170 \text{ kg/cm}^2$ arasında, birim ağırlıkları $800\text{-}1400 \text{ kg/m}^3$ olanlara orta dayanımlı hafif beton, basınç dayanımları $7\text{-}70 \text{ kg/cm}^2$ arasında, birim ağırlıkları 800 kg/m^3 'den küçük olanlara ise düşük dayanımlı yalıtım ve dolgu betonları adını vermiştir.

Akbaba (2007), hafif betonları birim ağırlıklarına göre sınıflandırırken birim ağırlıkları $300\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ arasında olanları yalıtım betonu, $800\text{-}1400 \text{ kg/m}^3$ arasında olanları orta mukavemetli hafif beton ve 1400 kg/m^3 'den büyük olanları ise taşıyıcı hafif beton olarak adlandırmıştır.

DIN 1045 (Akbaba, 2007)'e göre birim ağırlıklarına göre betonlar şöyle sınıflandırılabilir:

Ağır betonlar: Birim ağırlık $> 2800 \text{ kg/m}^3$

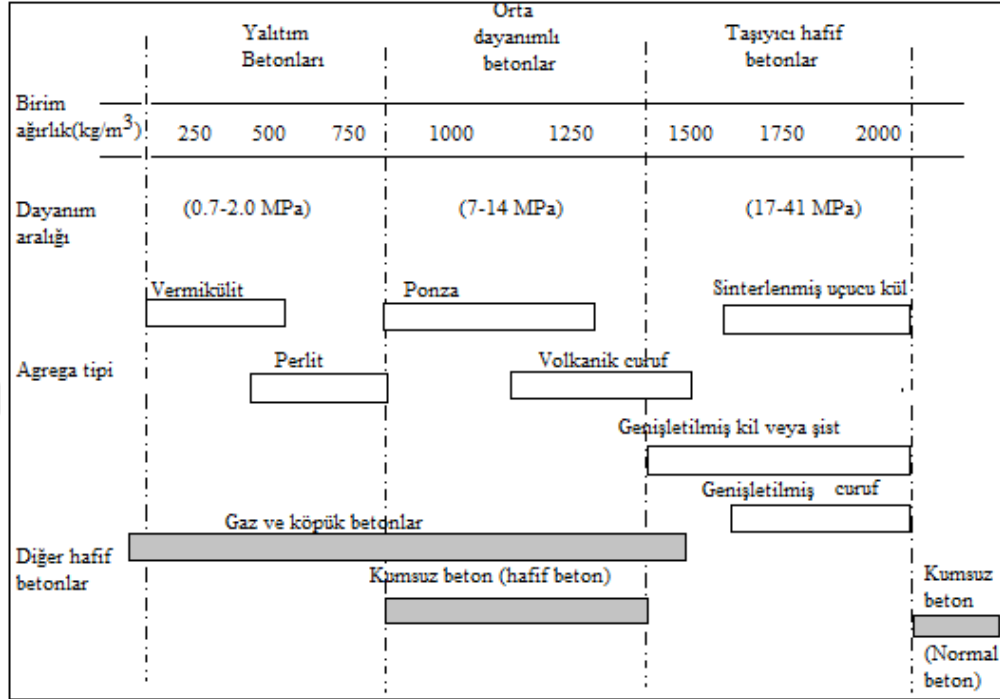
Normal betonlar: $2000 \text{ kg/m}^3 < \text{birim ağırlık} < 2800 \text{ kg/m}^3$

Hafif betonlar: Birim ağırlık $< 2000 \text{ kg/m}^3$

Diğer yandan yine birim ağırlıklarına göre tüm betonların sınıflandırılması şu şekilde olur:

1. Birim ağırlıkları $400\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ arasında olan betonlar hafif beton olarak adlandırılır (TS 2823 (TS 2823, 1977)'de alt sınırı 1000 kg/m^3 ve üst sınırı 1300 kg/m^3 , DIN 1045 (Çetmeli, 1974)'de ise hafif betonların birim ağırlıkları $300\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ arasındadır.)
2. Birim ağırlıkları $1800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ arasındaki betonlar ne hafif ne de normal beton olmaktadır. Bazı yayınlarda bu aralıktaki betonlara yarı hafif beton adı da verilebilir (Malhotra vd., 1976). Alman literatüründe (Heufers ve Wierig, 1976) çoğunlukla hafif normal beton diye geçen taşıyıcı yarı hafif betonların birim ağırlıkları ise $2000\text{-}2100 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Bu değerler yukarıda anlatıldığı gibi DIN 1045 (Çetmeli, 1974)'de ki normal betonun alt sınırındadır.
3. Birim ağırlıkları $2200\text{-}2500 \text{ kg/m}^3$ arasında olan betonlarda normal beton sınıfındadır.

Şekil 2.4’de Ponza taşı hafif betonun orta dayanımlı betonlar aralığında, perlit ve vermikülit hafif agregasıyla üretilen betonlar ise yalıtım betonları sınıfında gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Hafif betonların sınıflandırılması

Şekil 2.4’de görüldüğü üzere köpük ve gaz betonları hem orta dayanımlı hem de yalıtım betonları sınıfına girmektedirler. Hafif betonları sahip oldukları basınç dayanımlarını da göz önüne alarak Tablo 2.4’de ki sınıflandırmayı yapmak olasıdır (Postacıoğlu, 1975).

Tablo 2.4 Hafif beton sınıfları

Hafif Beton Sınıfı	Birim Ağırlıkları (kg/m ³)	Basınç Dayanım Aralıkları (MPa)
S1	≤ 800	1 – 7
S2	800 – 1200	7 – 10
S3	1000 – 1400	10 – 14
S4	1300 – 1800	14 – 25
S5	1500 – 1800	25 – 40
S6	1800 – 2000	40 – 70

Bazı ülkelerde SI betonunda en düşük basınç dayanımının 17 MPa’nın üstünde olması gerektiği düşünülürken, diğer bazı ülkelerde standartlar sadece 15 MPa’nın üstünü

kabul eder. Çok sayıda ki ülke için bu en son değer yaygı olarak kabul görür. Pek çok ülkede SI ve SII sınıflarına yönelik en büyük birim ağırlık sınırlaması getirilmemiştir. Tasarım ve sınıflandırma için konmuş olan değerler ısı iletim katsayısı ve basınç dayanımıdır.

Tablo 2.5 Fonksiyonlarına göre hafif betonların sınıflandırılması (RILEM, 1975)

Sınıf	I	II	III
Hafif betonun türü	Taşıyıcı	Taşıyıcı ve Yalıtım	Yalıtım
Fırın kurusu birim ağırlığı (kg/m ³)	< 2000	Koşul konmamış	Koşul konmamış
Basınç dayanımı (MPa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Isı yalıtım katsayısı (W/mK)	–	< 0.75	< 0.3

2.5. Hafif Agregalar ve Hafif Agregalı Betonlar

Özgül ağırlıkları 2.4 g/dm³'ten küçük olan agregalar “Hafif Agregalar” olarak adlandırılmaktadır. Pomza (bims), genleştirilmiş perlit, diatomit ve genleştirilmiş kil gibi hafif agregalar ile birim ağırlığı 300–1800 kg/m³ arasında olan hafif agregalı betonlar üretilmektedir. Yoğunluğu geniş bir değişim aralığına sahip olan bu betonlar çoğunlukla prefabrik yapı elemanlarının üretiminde kullanılmasının yanında yapılarda taşıyıcı, yarı taşıyıcı ve yalıtım amaçlı olarak da kullanılmaktadır (Erdoğan, 2003).

Beton üretiminde, normal agreganın yerine boşluklu olan doğal ve yapay hafif agregaların kullanılması ile “Hafif Agregalı Betonlar” elde edilmektedir. Hafif beton üretmek için kullanılan agregalar genel olarak iki kategoride ele alınmaktadır. Bunlardan birincisi doğal hafif agregalar (ponza, diatomit, volkanik cüruf vs.), ikincisi ise yapay hafif agregalar (genleştirilmiş kil, genleştirilmiş perlit, uçucu kül vs.) dir. Özkul vd (1999) ise, hafif beton üretiminde bims, scoria, volkanik tüf ve kil, diatomit, perlit gibi doğal agregalar ile genleştirilmiş çeşitli cüruflar gibi yapay agregaların kullanılabileceğini bunun yanında, hafif betonların ses ve ısı yalıtım özelliklerinin, normal betonlara göre daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Yalıtım betonları özellikle perlit ve vermikülit hafif agregası ile üretilen betonlardır. Gaz ve köpük betonlar, hem yalıtım hem de orta dayanımlı beton olarak adlandırılmaktadır (Şahin vd. 2003).

2.5.1 Hafif agregaların sınıflandırılması

Hafif agregalar kullanılarak hafif beton üretimi en sık kullanılan yöntemdir. Hafif agregalar üretildikleri malzemenin kaynağına ve kendi birim ağırlıklarına göre sınıflandırılır. Hafif agregalar elde ediliş biçimlerine göre dört ana gruba ayrılır:

- (1) Doğal hafif agregalar: Ponza taşı, volkanik cüruf, volkanik tuf ve ağaç parçacıkları gibi organik malzemelerden oluşmaktadır.
- (2) Doğal malzemelerden oluşan yapay hafif agregalar: Genleştirilmiş şist, genleştirilmiş kil, genleştirilmiş arduaz, vermikülit, perlit ve styropor gibi polimer özellikli malzemelerdir.
- (3) Endüstriyel atıklardan oluşan hafif agregalar: Uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur.
- (4) Endüstriyel atıkların işlenmesi ile oluşturulan hafif agregalar: Kızdırılmış uçucu kül ve genleştirilmiş yüksek fırın cürufudur.

Hafif agregalar birim ağırlıklarına göre sınıflandırıldıklarında üretiminde kullanılacakları hafif betonun sınıfına göre ayrılırlar. Bu ayrılma şöyledir:

- 400 kg/m³'ten küçük olan hafif agregalar: Yalıtım betonlarının üretiminde kullanılmaktadır.
- 400-650 kg/m³ değerleri arasında olan hafif agregalar: Orta mukavemetli ve yalıtım betonlarının üretiminde kullanılmaktadır.
- 650 kg/m³'ten büyük olan hafif agregalar: Taşıyıcı hafif betonların üretiminde kullanılmaktadır.

2.6. Ülkemizde Betonların Durumu

Tüm gelişmiş ülkelerde ve dünyada beton, başta dayanıklılık olmak üzere, ekonomikliği ve kullanım kolaylığı açısından en fazla tercih edilen taşıyıcı yapı malzemesidir.

Nüfus artışı ile birlikte insanların birçok ihtiyaçları gün geçtikçe artmakta ve bu durumu giderebilmek için yol, konut, okul, baraj ve fabrika inşa edilmesi gerekmektedir. Yapıların temel girdisini bilindiği gibi beton ve çelik oluşturmakta ve maliyetten %10'luk bir pay almaktadır. Beton sürdürülebilirlik ve ekonomik oluşu sebebiyle günümüzde en yaygın şekilde kullanılan yapı malzemesi olma yolunda devam etmektedir.

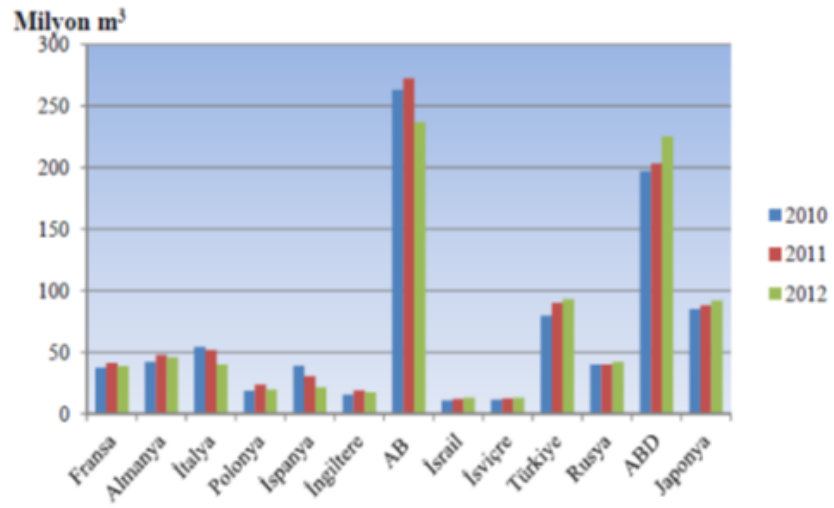
Son 20 yılda Türkiye’de beton sektörü çok büyük ölçüde ilerleme kaydederek, Türkiye’de 1988 yılında kurulan Hazır Beton Birliği beton sektöründe 1,5 milyon m³ seviyelerinde iken bugün beton üretiminde 102 milyon m³ seviyesine ulaşarak Avrupa’da birinci sıraya oturmuştur (THBB, 2014).

Beton sektörü sadece Türkiye’de 2013 yılında %10 büyüyerek 93 milyon m³ olan üretimini 107 milyon m³’e çıkarmayı başarmıştır. Beton sektöründeki aynı şekil büyümenin 2014 yılında da 3.köprü, 3.havaalanı, kentsel dönüşüm projeleri ve bağlantı yolları ile yüksek hızlı tren projeleri devam etmektedir. 2014 yılında beton üretimi %5 büyüyerek 107 milyon m³’e ulaşmıştır (THBB, 2014).

Türkiye’deki beton üretimindeki bu hızlı artışa karşılık Avrupa’da finansal krizin etkileriyle 2011’de birinci sırada olan İtalya 51.8 milyon m³’den 40 milyon m³’e, Fransa 41.3 milyon m³’den 38.9 milyon m³’e, Almanya’da ise 48 milyon m³ seviyelerinden 46 milyon m³ seviyelerine düşmüştür. Aşağıda verilen grafikte Türkiye, Rusya, ABD, Japonya ile beraber Avrupa Birliği ülkelerinin 2010-2012 yılları arasındaki hazır beton üretimi gösterilmiştir. Diğer bölgelerde hazır beton üretiminde artış meydana gelirken Avrupa Birliği’nde bu durumun aksine bir durum meydana gelmiş ve dünyada beton üretimi belli seviyede durumunu korumuştur (ERMCO, 2014).

2.7. Ülkemizde Hafif Agregaların Durumu

1981 yılında MTA tarafından yayınlanan rapora göre ülkemiz doğal hafif agrega açısından oldukça zengindir. Bayındırlık Bakanlığı ile İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalı’nın birlikte yürüttükleri çalışmaya göre ülkemizdeki doğal hafif agregaların %57’sinin basınç dayanımı 10 N/mm²’nin üstündedir. Bu kalitede ki doğal hafif agregalar, taşıyıcı hafif beton ve orta mukavemetli beton üretimi için uygundur. Ülkemizde granül halde bulunan doğal hafif agregaların üretimi için sorun yoktur; ancak özellikleri çok değişkendir ve bulunduğu bölgeye bağlı olarak büyük farklılıklar göstermektedir. Hafif beton yapı elemanlarının sağlayacağı ekonomi dışında kendi ağırlığının da azalması ile deprem kuşağında olan ülkemiz daha hafif ve güvenli yapılar üretebilir (Taşdemir, 1982).



Şekil 2.5 2010-2012 yılları arasında dünya genelindeki beton üretim miktarları (ERMCO, 2014)

Tablo 2.6 Türkiye Hazır Beton Sektörü İstatistikleri 2016

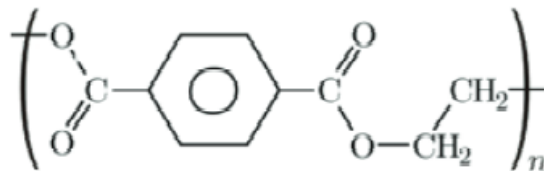
DÜNYADA VE AVRUPA HAZIR BETON BİRLİĞİNE (ERMCO) ÜYE ÜLKELERDE YILLARA GÖRE HAZIR BETON ÜRETİMİ (milyon m³)			
Ülkeler	2014	2015	2016
Avusturya	10.0	10.5	10.8
Belçika	12.3	12.3	12.5
Çek Cumhuriyeti	6.5	6.5	6.8
Danimarka	2.3	2.3	2.5
Finlandiya	2.6	2.6	2.9
Fransa	36.4	34.8	36.1
Almanya	46.8	47.2	49.5
İrlanda	2.4	3.5	4.2
İtalya	28.0	25.3	23.3
Hollanda	6.5	6.3	6.5
Polonya	19.2	19.8	20.4
Portekiz	2.8	2.8	3.5
Slovenya	1.6	1.9	1.9
İspanya	15.9	16.3	16.3
İsveç	4.0	4.1	4.5
İngiltere	22.7	23.7	24.6
Toplam Avrupa Birliği	220.0	220.0	226.2
Averaj Avrupa Birliği	13.8	13.8	14.1
İsrail	14.0	15.6	15.4
Norveç	3.8	3.7	4.0
İsviçre	12.0	12.0	11.5
Türkiye	107	107	109
Toplam ERMCO	356.8	358.3	366.1
Rusya	40.0	40.5	37
ABD	230.0	260.0	265.0
Japonya	99.0	99.0	99.0

3. POLİETİLEN TEREF TALAT (PET)

Polietilen tereftalat, polyester ailesine ait geri dönüştürülebilir termoplastik bir malzemedir. Ülkemizde ilk olarak 1980 yılında PET şişeler üretilmeye başlanmıştır. Plastik Endüstri Birliği (Society of Plastics Industry) 1987 yılında plastikleri tanımlayıcı kodlar geliştirmişlerdir. PET'leri kod 1 olarak tanımlamışlardır. Yoğunluğu 1,30-1,38 g/cm³ arasında değişmektedir. PET'ler orta sertlikte en çok kullanılan plastiklerdir. Yarı saydam, açık veya hafif, 250°C erime sıcaklığına sahip olan bir plastiktir. Farklı boyutlarda meyve suyu, içme suyu, soda ve salata kapları, bitkisel yağ şişeleri, mikrodalga gıda tepsisi örtüsü, fıstık yağı kavanozları PET'lerden yapılmaktadır. PET'ler hızlı yanar ve alevleri renksizdir. Yanarken mum kokusuna benzer, sönerken de beyaz bir kalıntı bırakır (Pehlivan vd. 2004)

Günümüzde şişeler, çoğunlukla PET'in reçine şeklinde kalıba dökülmesiyle yapılmaktadır. Etilen ve paroksilen hammaddelerinden PET şişeler yapılmaya başlanmıştır. PET, tereftalik asit, etilen glikol polyesterinden ve etilen glikol ile dimetil tereftalatın çoklu tekrarlarıyla oluşmaktadır. Kimyasal olarak kararlı ve yüksek ısıya direnç gösterir, sağlam, parçalanmaya, dağılmaya ve gaz geçişlerine dayanıklıdır. PET, absorpsiyonu düşük olan bir polyesterdir. Çeşitli solventlere, yağa, aside ve petrole dirençlidir. Yüksek dirençli bir kap olduğu için biçimlendirmek güçtür. Meyve suları, yağ gibi gıda maddelerinin ambalajında, su, alkollü içeceklerde, gargara, temizlik ürünleri ve diğer yiyeceklerin saklanma işleminde kullanılmaktadır (Saçak 2003, Pehlivan 2004). Değişime uğramış PET, 180°C'de mikrodalga fırınlarda yarım saat ısınabilir.

Şekil 3.1'de Polietilen Tereftalat'ın molekül yapısı görülmektedir. PET, polyester ailesine ait poli kondenzasyon metoduyla üretilen termoplastik bir malzemedir. Isıtıldığında yumuşayan, soğutulduğunda tekrar sertleşen zincir içinde kovalent bağa, zincirler arasında Van der Waals bağlarına sahiptir (Tayyar ve Üstün, 2009).



Şekil 3.1 Polietilen Tereftalat'ın kimyasal yapısı (Tayyar ve Üstün, 2009)

PET amorf bir yapıya sahiptir. Eritilme aşamasında iki kritik sıcaklığa sahiptir. İlk kritik sıcaklık derecesi olan 80°C'ye geldiği zaman "camsı geçiş" adı verilen faz değişimi olmaktadır. İkinci kritik sıcaklık da 175°C'ye çıkana kadar sertliliğini kaybetmemektedir. PET'in fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

PET farklı kimyasal yöntemlerle sentezlenebildiği gibi, sentez sonrasında da farklı ısı işlemlere tabi tutularak üretim yapılabilir. Termoplastik bir malzeme olduğu için, üretim sürecinde hangi fiziksel yapıya sahip olursa olsun, ek bir ısı işlemle bu değiştirmek ve geliştirmek olasıdır. Amorf bir yapıya sahip olan PET, şeffaf bir ürün olması, yapısındaki kristallerin boyutuna ve yapısına bağlı olarak yarı-kristal, opak ya da saydam olabilir. Amorf yapıyı elde etmek için eriyik halde bulunan PET, hızla soğutularak zincirler düzensiz yapıda dondurulur.

Ticari olarak sentezlenen PET'in ortalama erime sıcaklığı 270°C civarında ve en fazla %60 oranında kristal yapıya sahip olabilir. 270°C gibi son derece yüksek bir erime noktasına sahip olan PET, bükülmesi zor ve sert bir zincir yapısına sahiptir. Bu nedenle yüksek mukavemete ve 150°C'ye kadar yorulmaya karşı dirençli bir yapıya sahiptir.

Sağlam bir plastik olan PET, darbelere karşı da dayanıklıdır. Gazlara, alkollere ve çözücü kimyasallara karşı iyi bir bariyer özelliği taşır. Özellikle de asitlere karşı çok dayanıklılık gösterir. Fakat az da olsa bazik ortama karşı duyarlıdır. Bu sebeple betonun kimyasal yapısı itibarıyla bazik ortama sahip olması PET (Polietilen Tereftalat) için risk teşkil etmektedir (Anabal, 2007).

PET'in neme karşı bariyer özelliği o kadar iyi olmasa da diğer plastiklere göre yine de yeterli kalır. Geçirgenlik özelliği sayesinde özellikle plastik şişelerde kullanılan PET, oksijen geçirgenliğinin kritik olduğu zamanlarda ise poli (vinil alkol) ile kompozit oluşturularak daha iyi bir bariyer elde etmemizi sağlar.

Tablo 3.1 PET'in fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	Değerler
Molekül Ağırlığı	192 g/mol
Yoğunluk	1,41 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	265°C
Camsı Geçiş Sıcaklığı	69-115°C
Basınç Dayanımı	70 MPa
Çekme Dayanımı	1700 MPa
Eğilme Dayanımı	50 MPa
Darbe Dayanımı (ASTM D256-86)	90 J/m
Kopma uzaması	%70
Sertlik	80-95 Rockwell M
Su Absorbsiyonu (24 saat sonra)	%5
Deformasyona Uğrayabildiği En Düşük Uzama Değeri	%4

3.1. PET'in Üretim Prosesi

Ticari PET'in üretim prosesi sırası ile başlatıcı tepkime, ileri polimerizasyon, polikondensasyon ve kararlı hal polimerizasyonu aşamalarından oluşur.

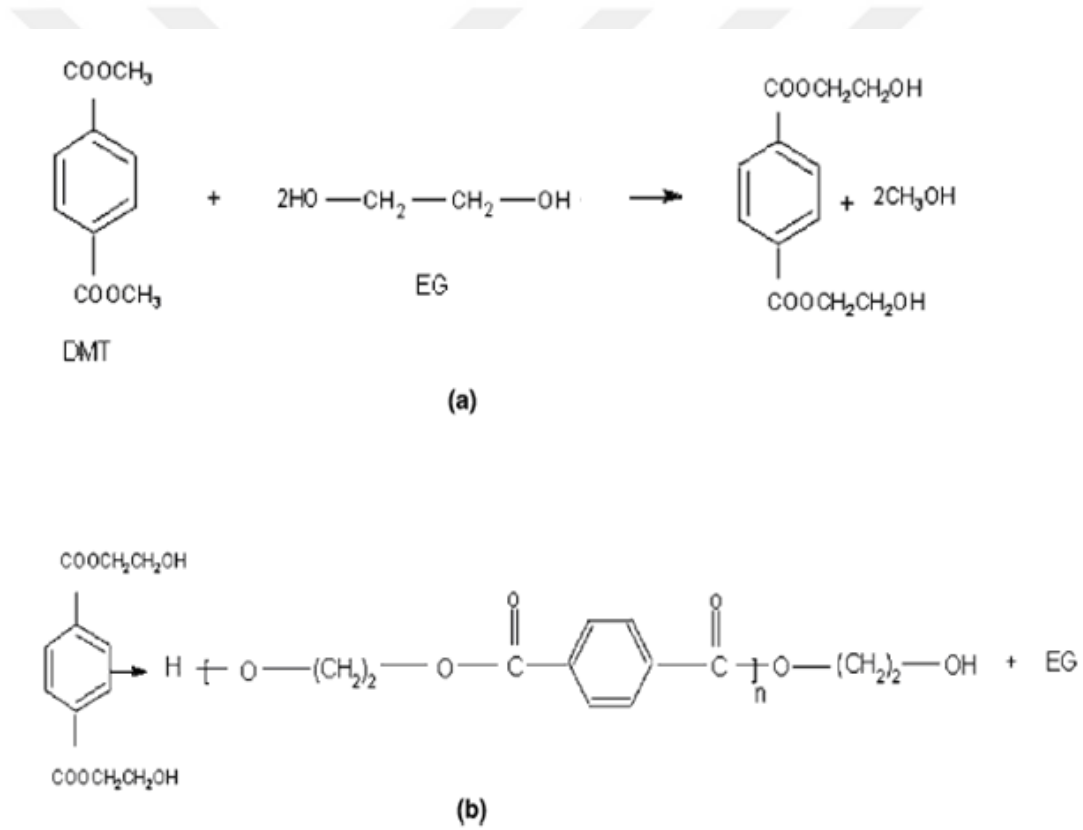
Başlatıcı Tepkimeler: PET'in üretim prosesinde başlatıcı tepkime iki farklı şekilde olmaktadır. 1) Estrifikasyon tepkimesi; Terafitalik asitin (TFA) 300-500 kPa basınç ve 240-260 °C sıcaklık aralığında EG (etilen glikol) ile etkileşimidir. 2) Trans-estریفikasyon tepkimesi; Dimetil terefitalat'ın (DMT) 100 kPa basınç altında ve 150-220 °C sıcaklık aralığında etilen glikol ile etkileşimidir.

Trans-estریفikasyon estrifikasyona göre kolay uygulanabilirliği açısından daha fazla tercih edilmektedir.

İleri Polimerizasyon: Başlatıcı tepkimelerin (estریفikasyon ve trans-estریفikasyon) ürünü bis (hidroksietil) terafitalattır (BHET). İleri polimerizasyonda bis (hidroksietil) terafitalatın polimerizasyon derecesi; 30'un üstüne çıkacak şekilde polimerize edilir. İleri polimerizasyon reaksiyonları 2-3 kPa basınçta ve 250-280 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir.

Polikondensasyon Prosesi: Polikondensasyon prosesinde polimerizasyon derecesi (PD), 100'e kadar çıkabilir. Polikondensasyon prosesinin koşullarında basınç 50-100 kPa ve sıcaklık 270-290 °C arasındadır. Bu aşamalardan sonra PET uygulamaları dışında diğer uygulamalar içinde kullanılabilir.

Kararlı Hal Polimerizasyonu: Kararlı hal polimerizasyon prosesiyle daha yüksek yoğunluklu PET üretilmektedir. Bu proste PET'in polimerizasyon derecesi 150'ye kadar yükseltilirken aynı zamanda molekül ağırlığı da yükselir. Kararlı hal polimerizasyon prosesi, 100 kPa basınçta, 200-240 °C sıcaklık aralığında ve 5-25 saat reaksiyon süresinde uygulanır, elde edilen polimer yoğunluğu 0,7-0,81 dl/g arasındadır. Şekil 3.2'de PET'in üretim prosesinin reaksiyonları verilmiştir (Awaja vd. 2005).



Şekil 3.2 PET'in üretim prosesi reaksiyonları

(a) trans-estirifikasyon reaksiyonu, (b) kondensasyon reaksiyonu

3.2. PET'in Isıl Davranışı ve Kristal Yapısı

Ticari PET'in yarı kristal (beyaz) veya amorf yapıda olması üretim koşullarına bağlıdır. PET erime sıcaklığında iken, camsı geçiş sıcaklığının altında herhangi bir sıcaklığa kadar hızlı soğutulduğu takdirde daha saydam ve amorf bir yapıya ulaşmış olur (Kong vd. 2003).

Orijinal PET'in kristalizasyon davranışları ve termal geçişleri üzerinde yapılan araştırmalarda; termal analiz esnasında birden fazla endotermik geçiş olduğu saptanmıştır. Ayrıca PET çok düşük kristalizasyon hızına sahiptir. En düşük kristalizasyon hızı 170-190 °C sıcaklıkları arasında gerçekleşir.

3.3. PET'in Uygulamaları ve Kullanım Alanları

1977 yılının ortalarında ticari olarak sunulan PET, zaman içinde endüstride geniş bir yere sahip olmuştur. Meyve suları, maden suyu, yenilebilir yağlar, şuruplar, çeşitli gıda maddeleri, kozmetik ve evsel kimyasal maddeler gibi gazsız ambalaj şişelerinde kullanılmaktadır. Ayrıca PET film ve elyaf gibi pek çok kullanım alanları da vardır (Anonim, 2001). Bazıları şunlardır:

- Röntgen filmleri
- Fotoğraf filmi
- Et ve peynir ambalajı filmler
- Manyetik şerit
- Kaynatma torbaları
- Elektriksel yalıtım

3.4. PET'in Geri Dönüşümü

Zamanla, dünya üzerinde insanın sebep olduğu çevresel azaltmaya yönelik gereklilik ortaya çıkmaktadır. Plastik atıkların çevre faktörü büyük oranda arttığı için dikkatleri üzerine çekmektedir. Bu yönde geri dönüştürülmüş ambalaj malzemeleri ilgi çekmeyi başarmıştır. Plastik atıkları çevreye atıldıkları zaman çok büyük çevre sorunu olmaktadır. Plastiklerin maliyeti ucuz olduğundan atık olarak atılmaları özendirici, ayrıca yeniden kullanımları açısından da engelleyici olmaktadır (Güler vd. 1997). Çöpe atılan plastikler paslanmadan, biyolojik olarak bozulmadan, çürümeden ve çözünmeden

doğa da uzun yıllar kalabilmektedir. Bazı plastik maddelerin, doğa da 700 yıl bozulmadan kalabilmesinin mümkün olduğu ifade edilmiştir.

PET atıkların çevresel etkileri giderek daha fazla dikkat çekmektedir. PET atıkları, çevreye atıldıkları zaman çok büyük sorunlara neden olurlar, en basit haliyle toprağın ve suyun kirlenmesine sebep olmakla birlikte uzun vadede ne gibi zararlar verebilecekleri tam olarak bilinmemektedir. Son otuz yıl içerisinde artan PET kullanımı sonucunda oluşan atıkların çevreye verebileceği zararlar ile ilgili elimizde yeterince istatistiksel veri bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra her yıl doğaya karışan PET atıklarının miktarı ve maddi değeri düşünüldüğünde, geri dönüşümlerinin, kaynakların etkin kullanımı yönünden de önemi vurgulanmaktadır. Atık PET'lerin azaltılması için bilinen en etkin yöntemleri; mekanik ve kimyasal geri dönüşüm olarak iki başlık altında incelemek mümkündür.

PET'in geri dönüşüm projesi ilk olarak 1976 yılında St Jude Polymers isminde bir şirket tarafından başlatılmıştır. Plastik maddelerin önceden belirlenmeden ve bu niteliklere uygun ayrımları yapılmadan yeniden kullanılması önemli bir ikincil ürün sorunları yaratabilir. Yeniden kullanılan plastik maddelerin bu aşamada bozulma işlemleri kanserojen ve toksik pek çok maddenin çevreye yayılmasına sebep olabilir. 2002 yılındaki Amerikan Plastik Konseyi toplantısında geri dönüştürülmüş PET'in tekrar hızlandırılması tartışılmıştır.

Geri dönüşüm olayındaki en önemli faktörlerden biri parçacıklarda kirlilik olmasıdır. Atıklardaki kirlilik geri kazanımdan itibaren POSTC-PET'in fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen en önemli faktördür (Torres vd. 2000). R-PET'in kalitesi kirlilik ne kadar az olursa o oranda artmış olmaktadır. Bu kirlilikler:

Su Kirliliği: PET'in geri kazanımı esnasında su, PET'in molekül ağırlığını azaltıcı etki yapmaktadır (Scheirs, 1998). PET'in molekül ağırlığının düşmemesi için nem oranının %0,02'den az olması gerekir. Suyun bu içeriği genellikle PET parçalandıktan sonra yıkanmasıyla oluşan uzaklaşmamış sulardır.

Asit Kirliliği: PET'in geri kazanımı boyunca oluşan en önemli asitler abiyetik asit, asetik asit, hidroklorik asit ve reçine asitidir. PET'in eritilme prosesi süresince asitler PET'in parçalanmasına neden olurlar. La Manita ve Paci bir çalışmalarında PET'in eritilme prosesi süresince küçük miktarlarda bulunan PVC ile etkileşimini araştırmış ve

çok az miktarda (100 ppm'den az) PVC'nin bu tepkimeleri hızlandığını bildirmişlerdir (Paci, 1998).

Asetaldehit: PET içerisinde asetaldehit de bulunması mümkündür. Geri kazanım esnasında atık yiyeceklerden meydana gelir. Asetaldehit yüksek uçuculuğa sahip olan iyi bir kurutma ve vakum sağlanarak minimize edilmektedir. Ayrıca 4,5-dihidroksibenzoik asit, 4-aminobenzoik asit ve fenilamin ilave edilerek bu işlem gerçekleştirilebilir (Villain vd. 1995).

Renkli Maddeler: Renklendirilmiş şişelerden ve etiket mürekkeplerinden istenilmeyen renkler gelmektedir. Bu istenilmeyen renkler iyi bir yıkama ve ayırma işlemlerinden sonra giderilmesi mümkündür. Böylelikle elde edilecek ürün daha açık bir şekilde elde edilebilir.

Diğer Safsızlıklar: Atık durumundaki PET içine konulan veya saklanan maddelerin çeşitliliği farklı türlerde safsızlık içermektedir. Bunlar sabun, deterjan, sıvı yakıt hatta turşu gibi çok farklı ürünler olabilir (Eastman, 1995).

3.4.1. PET'in mekanik geri dönüşümü

Geri dönüşüm için en önemli faktör çok miktarda kullanılmış plastiklere ulaşmaktır. Geri kazanılabilir maddelerden en fazla bulunanı kağıtlardır. Diğer plastikler, metal, cam ve pil gibi maddelerin geri dönüşümleri için biriktirilmesi çok düşük seviyededir. Ayrı bir şekilde biriktirilen geri dönüştürülebilir maddeler arasında %11.7'lik paya sahip olan plastikler vardır. Atık plastik maddelerin tekrar kullanımı için öncelikle toplanması gerekir. Atık plastiklerin yeniden kullanılabilmesi için toplanması amacıyla başlıca şu yöntemlere başvurulmuştur.

1. Özel plastik şişe ve ambalaj malzemelerinin atılacağı kapların konulması,
2. Plastik ambalajlardan kullanılabilir olanların ikincil bir amaç olarak kullanılması,
3. Petrol, motor yağı gibi maddelerin konulduğu kapların, bu ürünleri satan firmalar tarafından kendi çöp kutularında ayrı olarak toplanması,
4. İnsanlar çöplerini " yeniden değerlendirebilir katı maddeler" ve " doğada çözünebilen katı maddeler" olarak iki ayrı çöp kutusunda ya da iki bölmeli bir çöp kutusunda toplamaları,
5. Yeniden işlenme amaçlı kullanılacak plastik materyallerin tercih edilmesi, bazı ülkelerde denenilen yöntemlerden birisidir.



Resim 3.1 Atıklara göre düzenlenmiş çöp kovaları

Bu işlemlerden sonra ki basamak toplanan plastikleri sınıflandırmak ve ayrılımlarını sağlamaktır. Önce sarsak elekten geçirilerek gevşek toprak ve çamur gibi istenmeyen maddelerden temizlenerek ve elektromanyetik alandan geçirilerek teneke ve çelik malzemeler diğer malzemelerden ayrılmaktadır. Geriye kalan plastik malzemeler ayrıştırma bandı üzerinde kimlik kodlarına göre ayrılımları sağlanmaktadır. Geri dönüşüm bandı üzerinden geçen plastikler işçiler aracılığı ile elle sınıflandırılır (Resim 3.2).



Resim 3.2 Plastik malzemelerin detektöre gönderilmeden önce işçiler tarafından ayrılması



Resim 3.3 Geri dönüşüm bandı üzerinde X-ray ve manyetik seperatör ile otomatik ayrıştırma

PET mısır tanesi büyüklüğüne yakın büyüklükte Shredder adında ki makinelerde parçalanmaktadır. Daha sonra bu kademeye kadar gelmiş PET ve farklı yoğunluklardaki diğer plastikler yüzdürme ile ayrılırlar. Kalan yabancı malzemeler ise silikonlar yardımı ile tutulurlar.



Resim 3.4 Shredder (Parçalayıcı)

Mekanik geri dönüşümü; ayıklama, parçalama, yıkama, yoğunluklarına göre ayırma, kurutma ve eritme gibi mekanik işlemler uygulanarak atık PET'lerin işlenmesini içermektedir. Geri dönüşüm tesisine atık PET'ler önce ayıklanma işleminden geçirilirler. Ayıklanma işlemi önemli ve kritik bir basamak olup iki şekilde gerçekleştirilir;

1. Atık PET, polietilen, PVC ve diğer plastik türlerinden ayrılması sağlanır. Ayrıca PET'lerin toplanması esnasında farklı plastiklerle veya metal parçalarla karışmış olabilir.
2. PET şişelerin renk farkına dayanan bir ayırma işlemidir. Amaç aynı renklerde ki atık PET şişelerin işlenmesi sağlanarak aynı renkte ürün elde etmektir.

Yabancı maddelerden arındırılan PET, üzerindeki kirleticileri temizlemek için yıkanır. Bu PET'lerin saklama kabı olarak kullanılanları pekmez, yağ, reçel ve turşu gibi birçok çeşitli maddeler olabilir. Bundan dolayı yıkama işlemi buhar ve deterjan ile daha sonra da %2'lik NaOH ile yapılmalıdır. PET parçacıkları santrifüj vasıtası ile kurutularak paketleme işlemi yapılır. Nem oranı %0,02'den az oluncaya kadar plastiklerin kurutulması gerekir.

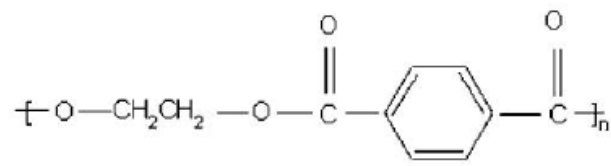


Resim 3.5 Satışa hazır haldeki PET parçacıkları

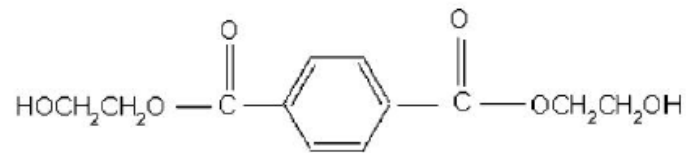
3.4.2. PET'lerin kimyasal geri dönüşümü

Kimyasal geri dönüşüm genelde monomerler içerisinde toplu depolimerizasyon şeklinde veya oligomerler içerisinde parçalı depolimerizasyon şeklinde olur. EG (glycolsis), su (hydrolysis) ve metanol (methanolysis) PET'in depolimerizasyonunda kullanılan kimyasallardır (Ghaemy, 2005). PET bu yöntemle genelde, ısıl parçalanmaya tabi tutularak, PET'in monomeri olan etilen glikol ve tereftalat asit elde edilmektedir. Elde edilen bu kimyasal maddeler belirli bir ekonomik değere sahip olduklarından çeşitli endüstri alanlarında değerlendirilmektedir.

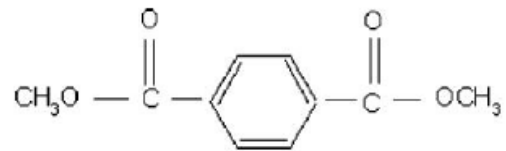
Bu prosesde, polimeri meydana getiren monomerleri toplu oligomerler veya depolimerizasyon olacak şekilde parçalı depolimerizasyonun gerçekleşmesi amaçlanmaktadır. Kimyasal depolimerizasyon işlemi esnasında su, metanol, etilen glikol kullanılır. PET'in depolimerizasyonu sonucunda gerçekleşen maddelerin yapılarını ve etkileşimleri Şekil 3.3'de gösterilmektedir (Scheirs, 1998). Kimyasal geri kazanım işleminin en önemli dezavantajı pahalı olması ve bundan dolayı da elde edilen ürünün maliyetli olmasıdır.



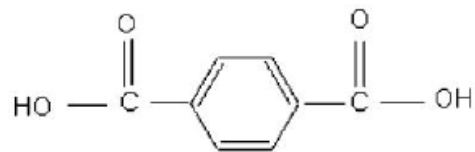
PET



BHET= bis-(hidroksietil) teraftalat



DMT= di metil teraftalat



TPA= Teraftalik asit

Şekil 3.3 PET'in depolimerizasyonu sonucunda oluşan maddeler (Awaja, 2005)

4. KONU İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Plastikler, petrokimya sektöründe, petrol bazlı ürün veya ürünler ile doğalgazı hammadde olarak kullanmak ve bu maddelerin kimyasal dönüşümleri ile elde edilen önemli gruplardan bir tanesidir. Hafif olmalarının yanında; korozyona uğramamaları ve paslanmaz olmaları, dayanıklı olmaları (kolay kolay hasara uğramamaları), esnek ve yumuşak olmaları ve kolay şekil alabilmeleri gibi özellikler, plastikleri vazgeçilmez bir malzeme yapmıştır. Dünya’da üretilen petrolün %4’ü petrolden elde edilen plastiğin %20-25’i paketleme ve ambalaj sektöründe kullanılmaktadır (Pehlivan vd. , 2004).

Plastiklerin toz ve kırıklıklar olarak beton katkısı ve agregası olarak kullanılması yeni bir uygulamadır. Schroeder (1994) yüksek yoğunluklu Polietilenle ince agregayı yer değiştirerek hafif beton karışımı elde etmekte ve hafif beton katkısı olarak Shulman (1996) ise, mikronize büyüklüğe sahip Polistren (PS) köpük parçalarını kullanmış ve patent almaya hak kazanmıştır.

Malloy ve ark. (2001)’a göre ise, Schroeder (1994) yüksek yoğunluğa sahip Polietilen (PE) ile bir ince agreganın bir kısmını yer değiştirerek hafif beton karışımı elde etmişlerdir. Beton içerisindeki yüksek yoğunluklu Polietilen (PE) granülleri, basınç dayanımı olarak daha düşük, fakat tokluk değeri olarak daha fazladır.

Koide ve ark., yapmış oldukları bir araştırmada büyük miktarda geri kazanılmış plastik atıklarından biri olan Polietilen Tereftalat (PET) şişelerden hafif beton agregası olarak kullanmışlardır. Bu plastik agregası içeriğinde %85 oranında PET, %15 oranında Polietilen (PE) ve Polipropilen (PP) vardır. Geri dönüştürülmüş agregası, plastik atıkların sıkıştırılarak kırılması ile elde edilmiş ve uygulamanın ekonomik olması için, agregalar yıkanmadan kullanılmaya çalışılmıştır. Bu deneysel çalışmada doğal ince agregası ve normal Portland çimento kullanılmıştır.

Maksimum 10 mm dane boyutunda kaba agregası olarak plastik agregaları kullanılmıştır. Kimyasal katkı maddesi olarak su azaltıcı katkı ve yüksek oranda hava sürükleyici katkı ilave edilerek, su/çimento oranı 0.35 olarak alınmıştır. Beton numunelerinin 28 günlük doymuş yüzey ağırlıkları yaklaşık 1.85 g/cm^3 seviyesine ve basınç dayanımları 20 MPa civarına ulaşmıştır. Bu şekilde elde edilen hafif beton yaklaşık 60 °C sıcaklık dayanımına ve donma-çözülme dayanımına sahiptir. PET atıklarının agregası olarak kullanılan betonun net ağırlığı oldukça azaltılmıştır. PET atıklarında agregası yok

denecek kadar az oranda su emmediği için, agrega içindeki nem kolaylıkla kontrol edilebilmiştir. Elde edilmiş olan bu karışımın hafif beton yapı uygulamalarında kullanılabileceği belirtilmiştir.

Araştırmacılar, yüksek dayanımlı harç kullanılarak üretilen hafif betonun basınç dayanımının artırılması için gerekli olduğunu belirtmektedirler. Bundan dolayı, plastik atık agregasının kum agrega yerine kullanılması gerektiği, çünkü çimento hamuru ile plastik atık agrega arasındaki bağın zayıf olmasından dolayı, hafif beton harcının dayanımının normal harçtan düşük olabileceği düşünülmektedir (Koide ve ark. 2002).

Gavela ve ark., atık olan PET (Polietilen tereftalat) ve PP (Polipropilen) malzemeleri, bilinen bir yöntem olan agregaların bir kısmıyla yer değiştirilerek kullanılmış ve alternatif değişim oranları üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Su/çimento oranları 0.5-0.6 alınarak süperakışkanlaştırıcı olarak kullanmışlardır. Doğal agregaların ve plastik agregaların elek analizleri, özgül ağırlık testleri ve su emme deneyleri yapılmıştır.

Doğal agrega ile %20-30 oranında atık plastik agreganın yer değiştirmesiyle üretilen 100×100×500 mm boyutlarındaki beton örneklerinin 28 günlük basınç dayanımları 23.5 MPa ve 35.1 MPa değerlerinde hesaplanmıştır. Eğilme dayanımları ise 2.89 MPa ve 5.03 MPa seviyelerinde ölçülmüştür. Hem Polietilen tereftalat (PET) hem de Polipropilen (PP) agregalı betonların, kontrol betonuna göre eğilme ve basınç değerlerindeki azalma aynı oranda bulunmuştur. Araştırmacıların buradan çıkardığı sonuç, basınç dayanımlarının polimer agrega çeşidine değil, doğal agrega ile polimer agreganın yer değiştirmesine bağlı olduğunu düşünmektedirler. Karışımda plastik agreganın miktarı arttıkça hacim yoğunluğu azalmıştır bunun nedeni, plastik agreganın birim ağırlığının doğal agregadan daha düşük olmasıdır. 7 ve 28. günlerde ölçülen elastisite modülü değerleri, plastik agrega miktarının artmasıyla düşmüştür.

Betona plastik agrega eklenmesi sonucunda, 28 günlük basınç ve çekme dayanımlarında düşmeye, çimento ve plastik agrega arasındaki bağın zayıf olmasına ve plastik agrega dayanımının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen bu beton çeşidinin, elastisite modülünün düşük olması bazı gereken uygulamalarda avantajlı olabileceği düşünülmektedir. Sonuç olarak, atık PET ve PP'in, çok sıcak koşullardaki durumları göz önüne alınarak, yapısal uygulamalarda beton agregası olarak kullanılmasının uygun olabileceği düşünülmektedir (Gavela vd. 2004).

Choi ve ark., hafif agrega olarak PET şişe atıklarının mikro yapısını inceleyerek yüksek fırın cürufunun hafif agrega üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, hafif agrega olarak kullanılan yüksek fırın cürufu ve PET atık şişelerinin, basınç dayanımı, elastisite modülü, çekme dayanımı, çökme değerleri ve elde edilen hafif betonun yoğunluğunu inceleyerek; yüksek fırın cürufunun hafif agreganın kalitesinde bir artışa sebep olup olmadığını araştırmaktadırlar.

PET şişe atıklarından üretilen hafif agregalar sıcak bir çırpıcıda (mikser) yüksek fırın cürufuyla karıştırılarak, agrega yüzeyinin cüruf ile homojen bir şekilde kaplanması sağlanmaya çalışılmıştır. Deneylerde kullanılan küresel şekilli hafif agrega Resim 4.1’de ve agreganın kesiti ise Resim 4.2’de verilmektedir. Karışım harcında doğal agregalar PET agregalarla %25, %50 ve %75 oranlarında yer değiştirilerek hazırlanmıştır.

Elde edilen deneyler sonucunda, doğal agreganın hafif agregadan özgül ağırlık ve hacim yoğunluğu olarak %50 oranında yüksek olduğu saptanmıştır. Hafif agregaya sahip betonun anlaşılabilirliğinin su/çimento ve yerine koyma oranlarıyla arttırılması ile mümkün olabileceği düşünülmektedir. Hafif agrega yüzeyine yüksek fırın cürufunun yapışması, agrega yüzeyinin güçlenmesine katkı sağlamaktadır (Choi vd. 2005).

Shehata ve ark., beton üretiminde, %5-20 oranlarında ince agrega ile yer değiştiren atık olarak kullanılan granül haldeki cam, plastik ve fiberglas malzemeleri kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan atık plastikler, süt şişelerinden ve PET şişelerinden kullanılan HDPE (yüksek yoğunluklu Polietilen)’den oluşmaktadır. Her defasında yalnızca biri olarak kullanılan beton numuneler, bu agrega türlerinden üretilmiştir. Bu beton numuneler üzerinde yapılan basınç ve yarmada çekme dayanımlarının, kırılma ve elastisite modülleri kadar iyi olduğu saptanmıştır.

Beton numuneler üzerinde yapılan mekanik özellikleri ve kesitlerin mikro yapısı, elektron mikroskobuyla tarama yöntemiyle arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda, plastik agregaların, cam ve fiberglas agregalara göre çimento hamuruna daha az yapıştıkları gözlenmiştir. Atık cam, plastik ve fiberglas kırıklarının, çimentolu bileşenlerde az da olsa kumla yer değiştirilerek kullanılabileceği öngörülmüştür (Shehata vd. 1996).

Al-Maneer ve Dala yapmış oldukları deneylerinde, hafif beton üretiminde araba tamponlarından elde edilen plastik atıklarının agregası üzerinde araştırma yapmışlardır.

%10-50 oranları arasında plastik agregası içeren betonun 28 günlük basınç dayanımının 19-48 MPa arasında; çekme dayanımının ise 3.2-6.5 MPa'da olduğu saptanmıştır. Harç karışımındaki plastik miktarı arttıkça yoğunluğun azaldığı görülmüştür. Kullanılan plastik agregası ile betonun daha fazla uzayabilen bir davranış gösterdiği ve bu özelliğinin betonda çatlak oluşumunu azaltması bakımından avantajlı olabileceği düşünülmektedir (Al-Maneer ve Dala 1997).

Elzafraney ve ark., beton karışımında kaba agregası olarak, yüksek yoğunluklu PE (Polietilen), PVC (Polivinil Klorid) ve PP (Polipropilen)'den oluşan geri dönüşümlü plastikleri kullanmışlardır. Böylelikle binalarda ısı yalıtımları iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, beton karışımlarının birinde yüksek oranda geri dönüşümlü plastik diğerinde ise normal beton kullanarak benzer özelliklere sahip iki bina tasarlanmış ve inşa edilmiştir. İnşa edilen bu iki binanın enerji ve ısı performansları üzerinde inceleme yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, normal betonlu binaya oranla, enerji verimliliği ve konfor açısından düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Binaların konfor düzeyinin artırılması ve binaların ısıtma ve soğutma giderlerinin azaltılmasını sağlamak için geri dönüşümlü plastik betonun enerji-etkin bina tasarımında kullanılmasını öngörmüşlerdir (Elzafraney vd. 2005).

Babu ve Babu, genişletilmiş PS (Polistren) agregalı betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmalarda kum ile genişletilmiş PS (Polistren) tanelerini %22-36 oranında yer değiştirerek kullanmışlardır. Ayrıca, harç karışımında %3-9 oranında silis dumanı, çimentonun yerine konularak kullanmışlardır. Agregası olarak ince ve kaba agregaların kullanıldığı harç karışımlarının yoğunlukları 1500-2000 kg/m³ arasındadır. Karışımların dayanımları ve akıcılıkları, silis dumanı miktarı arttıkça iyileşmektedir.

Betonların dayanımı için kullanılan Genleştirilmiş PS (Polistren) agregaları yoğunluk ile doğru orantılıdır. İri agregası boyutu büyüdükçe ve genişletilmiş Polistren (PS) agreganın dane boyutu küçüldükçe dayanım artmaktadır. Basınç arttıkça yarmada çekme dayanımı da artmaktadır. Genleştirilmiş PS (Polistren) agregalı tüm betonlarda su emme değerleri düşük çıkmıştır. Buna ek olarak, silis dumanı yerine konulma oranı arttıkça, toplam su emme değeri de düşmektedir (Babu ve Babu, 2003).

Babu ve ark., beton ve harç karışımlarında genleştirilmiş Polistren (PS) agregaların hafif agregalar olarak kullanılabilirliği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Genleştirilmiş Polistren (PS) agregası, %0-95 oranları arasında Polistren (PS) yerine konmuştur. Harç karışımında katkı malzemesi olarak süperakışkanlaştırıcı da kullanılmıştır. Örnek betona göre Polistren (PS) agregalı betonlar daha iyi akıcılık değerleri göstermiş olmaktadır.

Düşük oranlı genleştirilmiş Polistren (PS) agregası içeren betonlar, yüksek miktarda genleştirilmiş Polistren (PS) ile karşılaştırıldığında, kırılmaların daha gevrek olduğu görülmüştür. Polistren (PS) agregası miktarı arttıkça elastisite modülü azalmakta buna ek olarak basınç dayanımı arttıkça da elastisite modülü azalmaktadır. Normal betondan farklı olarak, uçucu kül ve genleştirilmiş Polistren (PS) agregası içeren betonun basınç dayanımının 90 güne kadar sürekli yükseldiği görülmektedir (Babu vd., 2005).

Babu ve ark., hafif beton dayanımı ve nem karakteristikleri üzerinde yaptıkları araştırmada Polistren (PS) agregası boyutunun; genleştirilmiş ve genleştirilmemiş Polistren (PS) agregaları yerine %20-50 oranında kum konularak, 1000-1900 kg/m³ yoğunluklarda beton elde etmişlerdir. %30 oranında çimentoyla uçucu kül yer değiştirilerek kullanılmıştır. Üretilen betonların nem hareketi, su emme özellikleri, çekme-gerilme dayanımı ve basınç dayanımları incelenmiştir.

Zoorob ve Suparna, sürekli kademelendirilmiş asfalt beton karışımına (plastiphalt) geri kazandırılmış haline getirilmiş plastik agregası içeren laboratuvar dizaynı üzerinde araştırma yapmışlardır. Yoğun kıvamdaki bitümlü karışım içine, küçük parçalar halindeki düşük yoğunluklu Polietilen (PE) ve belli oranda eşit tane boyutundaki doğal agregayla yer değiştirilerek eklenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, aynı hava boşluğuna sahip numunelerde, sıkıştırılmış asfalt beton karışımının (plastiphalt) geleneksel kontrol karışımından daha düşük hacim yoğunluğuna sahip olduğu belirtilmiştir.

%30 oranında normal agregayla yer değiştiren düşük hacim yoğunluğuna sahip Polietilen (PE) agregasının karışımın, sıkıştırılmış karışım yoğunluğunun %16'sı olduğu görülmüştür. Nakliye sırasında yoğunlukta böylesi bir azalmanın avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Asfalt beton karışımının (plastiphalt) 60 °C'de 1 saat yüke maruz kalması sonucunda sünme dayanımı, kontrol asfalt betonuna göre çok az düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, %6 kontrol asfalt betonuyla karşılaştırıldığında, 1 saat

boşaltma zamanından sonra, asfalt karışımı beton (plastiphalt) %14 geri dönüşüm sağladığı görülmüştür (Zoorob ve Suparma 2000).

Hassani ve ark., doğal agregadan tasarruf etmek ve PET atıklarının çevreye verdikleri zararları azaltmak için, asfalt betonunda agrega yerine PET şişe kırıklarının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Araştırmada, %20-60 oranında doğal agregayla, agrega boyutuna eşit boyuttaki (2.36-4.75 mm) atık PET taneleri ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Karışımların tümünde %6.6 oranında bitüm kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, kontrol betonunun akıcılık değerinin, PET'in agrega olarak kullanıldığı karışımdan (plastiphalt) daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Pratik uygulamalar için bu özelliklerdeki asfalt karışımının uygun olduğu belirtilmektedir (Hassani vd., 2005).

Silva ve ark., geri dönüşümlü PET lif takviyeli malzemelerin, portland çimento bazlı malzemeler içinde kullanarak dayanıklılık özelliklerini incelemişlerdir. PET lif takviyeli malzemeler üzerinde yapılan mikroskobik analizler, kızılötesi ve mekanik testler sonucunda; geri kazandırılmış PET liflerin Lawrance ve Ca(OH)_2 çözeltileriyle etkileşime girdiği, yüzeylerin pürüzlü bir hal aldığı ve "alkalin tereftalat" adında bir çökelti oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Beton karışımında PET lif takviyeli malzemelerin %0.4-0.8 oranlarında kullanıldığında; harç karışımlarının basınç, gerilme ve eğilme dayanımları üzerinde etkisinin olmadığı görülmüştür. Harç karışımları içinde PET lif takviyeli malzemelerin bozulmasından dolayı, zaman içerisinde sertlikte azalma gözlenmiştir. Elektron mikroskopuyla tarama (SEM) sonuçlarına göre, tetkik edilmiş olan tüm liflerde yüzey pürüzlülüğünün aynı olduğu, bazı bölgelerinde ise liflerin tamamen bozulduğu görülmüştür (Silva vd., , 2005).

White, geri dönüşümlü PET agreganın bağlanma mekanizması ile ve basınç yüklemesi esnasında oluşan çatlakların dağılımıyla ilişkili olan mikro yapısal özelliklerinde çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, uçucu kül konsantrasyonunun hem dayanıma hem de geri dönüşümlü PET bağlayıcının kristalliliğine yüksek oranda bağlı olduğunu göstermiştir. Bu kanıta dayanarak, PET atıklarından yapılan kompozit malzemelerin, çeşitli yapı ve inşaat uygulamalarında kullanılabileceği öngörülen önemli bir malzeme olabileceği düşünülmektedir (White, 2000).

Malloy ve ark., hafif beton üretiminde kullanılmak üzere sentetik hafif agregâ için, uçucu kül ve eritilmiş termoplastik bağlayıcıları ile çalışmışlardır. Uygun agregâ gradasyonunu sağlayabilmek ve uçucu kül-plastik karışımı granül hale getirmesi için sınıflandırılmıştır. Agregâ ve bağlayıcının dayanıklılığı için, sert ve esnek yapıda olan termoplastik bağlayıcılar kullanarak fiziksel özellikleri arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

Bu araştırmanın sonucunda, hafif agregânın hem termoplastik bağlayıcıdan hem de uçucu kül konsantrasyonundan etkilendiği görülmüştür. Bunun yanında, yüksek oranda kullanılan uçucu küllü karışımlarda, termoplastik bağlayıcının agregâ üzerindeki etkisinin daha az olduğu görülmüştür. Örnek olarak, %80 oranında kullanılan uçucu kül karışımları, agregânın fiziksel özellikleri termoplastik bağlayıcının özelliklerinden çok az etkilenmektedir.

Yüksek karbonlu uçucu kül ve plastik karışımı içeren hafif betonun basınç dayanımı yaklaşık 30 MPa olarak ölçülmüştür. Buna ilâveten, geleneksel geliştirilmiş killi hafif agregâyla üretilen beton, sentetik hafif agregâyla üretilen betona göre daha fazla gevrek davranış göstermektedir. Araştırmacılar, sentetik hafif agregâ üretiminde bağlayıcı malzeme olarak eritilmiş plastiklerin çeşitli kompozisyonlarının kullanılmasının uygun olduğunu düşünmektedirler (Malloy vd., 2001).

Jansen ve ark., beton karışımı içinde sentetik hafif agregânın kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma esnasında %12 oranında karbon içeriğine sahip olan uçucu kül ve yüksek yoğunluklu Polietilen (PE) kullanılmıştır. Agregâ boyutunun maksimum 9,5 mm olduğu ve %0, %35, %80 oranlarında uçucu kül içeren çeşitli agregalar elde edilmiştir. Agregalara, ısıtma teknikleri uygulanarak plastiklerin uçucu kül partiküllerini sarması sağlanarak üretilmektedir. Genleştirilmiş killi hafif agregâ ile normal ağırlıklı agregalar da kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

Agregaların su emme kapasiteleri, özgül ağırlıkları ve gradasyonu incelenmiştir. Farklı türlerde kaba agregâ çeşitleriyle beş tip beton numune hazırlanmıştır. Normal ağırlıklı agregalara ve genleştirilmiş killi hafif agregalara göre, sentetik agregaların basınç ve çekme dayanımlarının daha düşük olduğu gözlenmiştir. Sentetik hafif agregaların içindeki uçucu kül miktarı arttıkça, betonun tüm özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. %80

oranında uçucu kül içeren sentetik hafif agregaların zararlı tuzlara karşı dayanımlarının oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir (Jansen vd., 2001).

Mahmoud ve Halim, plastik atıklarını ayırmaya gerek kalmadan yeni bir malzeme üretiminde kullanımını sağlayarak, kolay bir yöntem uygulayarak geri dönüştürülebileceğini ifade etmektedirler. Araştırmalarında, kum ile eritilmiş atık plastikler karıştırılarak kompozit bir malzeme elde etmişlerdir. Bu araştırmada kullanılan plastikler, atık plastik kutular ve atık plastiğin büyük çoğunluğunu oluşturan Polietilen (PE) filmlerdir.

Plastik atıklarının, oranlarını belirlemek için tartım işlemelrinden sonra bir fırında 1 dakika ısıtılarak kendi kendisine yanması sağlanmaktadır. Karışım yeterli oranda kumla karıştırılarak hazırlandıktan sonra, içine eritilmiş plastik eklenmekte ve 15 dakika kadar karıştırılarak homojen dağıtılması sağlanmaktadır. Homojen olarak dağıtılan karışım 7 cm³'lük kalıplara dökülmesinden sonra, açık havada 30 dakika bekletildikten sonra kalıptan çıkarılması sağlanmaktadır.

Beton numuneler üzerinde yoğunluk ve basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin tatmin edici derecede yoğunluk değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir. %30-40 plastik oranlarında en yüksek basınç dayanımı olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra dekoratif amaçlara uygun olan malzemeler üretmek için çeşitli renkte ve şekilde kumlar kullanılarak üretilmiştir (Mahmoud ve Halim, 2004).

Rebeiz vd., (1994-a), geleneksel çimento harcı ve betonundaki bağlayıcıların kısmi olarak polimer harcı veya polimer betonu ile yer değiştirmesiyle yapılmaktadır. Polimer harcı veya polimer betonu çimento bazlı malzemelerle karşılaştırıldığında, polimer betonu üretilme maliyeti geleneksel reçinelerin yüksek maliyetinden dolayı oldukça pahalı olmaktadır. Öte yandan, reçine üretme maliyetini düşürmek açısından, geri dönüşümlü plastik polimerlerin kullanılması oldukça önem arz etmektedir.

Azim, polimer betonu üretiminde, PET atıklarından elde ettikleri polyester reçineleri kullanarak çalışmıştır. Üretilen polyesterler, stiren monomeri içerisinde eritilmiş ve kül davranışları gözlemlenmeye başlanılmıştır. PET atıklarından elde ettikleri reçinelerin polimer betonlarına karşı basınç dayanımları da incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında, reçine hammaddeli polimer betonu ile geri kazandırılan PET'lerden oluşan polimer betonunun özellikleri karşılaştırılmıştır. Araştırmada, PET atıklarının reçine

yapımında kullanılmasının, çevresel problemleri azaltmak ve reçine elde etme maliyetini düşürmek açısından yararlı olabileceği düşünülmektedir (Azim, 1996).

Tawfik ve Eskander, dayanıklı bir polimer betonu elde etmek için, PET şişe atıklarını polyester reçinesi yapımında kullanmayı amaçlamışlardır. Doğal bazalt ve mermer atıkları gibi dolgu malzemeleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, PET şişe atıklarından üretilen ve hızlı küre tabi tutulan polimer betonunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin tatmin edici düzeyde olduğu görülmüştür. Elde edilen kompozit malzemenin donma-çözülme direncinin ve kimyasal karakteristiklerinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. PET şişe atıklarının polyester reçinesi yapımında kullanılması ile üretilen polimer betonunun endüstriyel uygulamalarda, ekonomik ve ekolojik açıdan avantaj sağlayacağı öngörülmektedir (Tawfik ve Eskander, 2006).

Rebeiz yaptığı bir çalışmada, geri kazandırılmış PET'ler kullanarak polyester reçinesiyle yapılan polimer betonunun dayanım özelliklerini test etmiştir. Polyester kompoziti olarak geri dönüşümlü PET kullanılarak yapım işlerinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. İnorganik agregalarda, doymamış polyester reçinesi karıştırılarak polimer betonu üretmek için dönüştürülmektedir (Rebeiz, 1994).

Rebeiz bir başka çalışmasında, doymamış polyester reçineli polimer betonunun içerisine geri kazandırılmış PET konularak sıcaklığa ve zamana bağlı özellikleri incelenmiştir. Araştırmacı, yüksek kalitede polimer betonu üretmenin doymamış polyesterlerin uygun şekilde formüle edildiğinde, kum, çakıl ve uçucu külleri karıştırıldığında mümkün olabileceğini belirtmektedir. Araştırma ışığında yaşın dayanımı üzerindeki etkisi, ısıya dayanım ve elastisite modülü üzerindeki etkisi, ısı genleşme, çatlak oluşumu ve rötre gibi özellikler incelenmiştir. Araştırmanın sonucunda, polimer betonun prekast uygulamalarda kullanımının yararlı olabileceği ifade edilmiştir (Rebeiz, 1995).

Rebeiz ve ark., polimer betonu yapımında geri kazandırılmış PET'in kullanılabilirliği konusunda araştırma yapmışlardır. Bir reçineyle kaba agrega, kum ve uçucu kül gibi dolgu malzemelerinin birleşmesiyle polimer betonu elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen bu malzemenin oldukça sağlam olmasından dolayı, yol ve köprülerin onarımı ve prekast bileşenlerin yapımı gibi uygulama alanları olduğu belirtilmiştir (Rebeiz vd., 1991-a).

Rebeiz ve ark., polyester reçineli polimer betonuna geri kazandırılmış PET konularak, sıcaklık ve zaman bağıntısı gibi parametreler üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, sıcaklık, yaş, ısı genleşme, çatlak oluşumu ve rötre ile ilgili testlerin sonuçları incelenmiştir. Hızlı kür ve mükemmel anlaşılabilirliğinin, polimer betonunun hızlı ve etkili bir biçimde şekil alabilmesini sağlamaktadır. Polimer betonunun daha ince kesitlerde kullanılabilmesi, dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin de uygun olmasından dolayı binaların ölü yüklerinin azaltılmasına katkıda bulunabileceğı savunulmaktadır. PET atıklarının uzun süren bozulma süreçlerinden dolayı, bu ürünlerin uzun ömürlü olması önem taşımaktadır (Rebeiz vd., 1991-b).

Rebeiz ve ark., çalışmalarında, doymamış polyester reçine bağlayıcı ve çelikle güçlendirilmiş polimer betonuna geri kazandırılmış PET plastikler eklenerek strüktürel davranışı incelenmiştir. Çalışma kapsamında; parçalanma örnekleri, moment-eğilme tepkileri, çökme modu dayanım özellikleri, yüklemelerdeki tarafsız eksen derinliğindeki çeşitlilikler, süneklik göstergesi, makaslama mesafesinin etkileri, gerilme donatısı, polimer betonlu kirişlerin eğilme dayanımı üzerindeki gerilme donatısının etkisi ile basınç dayanımı incelenmiştir.

Diğer güçlendirilmiş betonlarla, geri kazandırılmış PET kullanarak yapılan güçlendirilmiş polimer betonunun eğilme dayanımı karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, geri kazandırılmış PET reçineli polimer betonunun, strüktürel uygulamalarda kaliteli ve ekonomik bir beton türü olarak kullanılabileceğı kanısına varılmıştır (Rebeiz ve ark. 1994-b).

Rebeiz ve ark., güçlendirilmiş polyester betonu için geri kazandırılmış PET kullanarak kopma dayanımını incelemişlerdir. Araştırmacılar, elik ilaveli polimer betonlu kirişlerin kopma davranışlarıyla ilgili çalışmaların kısıtlı sayıda olması ve kullanışlı dizayn yöntemleri hakkında öneri getirilmesinden dolayı bu konu üzerinde yoğunlaşmışlardır. Çalışmada, PET tabanlı, elik takviyeli polimer betonu ile doymamış polyester reçineli betonun kopma davranışları ile ilgili yeni bir dizayn yöntemi geliştirildiğı belirtilmektedir (Rebeiz vd., 1995).

Rebeiz ve ark., elik takviyeli atık PET ve uçucu küllü polyester reçineli betonla, normal betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerinde çalışmışlardır. Uçucu küllün ve kazandırılmış PET'in polimer betonu üretiminde kullanılmasının; betonu hafifletmek,

beton üretiminde kullanılan malzeme miktarını azaltmak ve atık malzemelerden kaynaklanan çevresel problemlerin azaltılması gibi avantajlar sağlayabileceği düşünülmektedir (Rebeiz 1996-a).

Rebeiz ve ark., doymamış polyester reçineli polimer betonu içerisine geri kazandırılmış PET atıkları ilave edilerek prefabrik uygulamalarda kullanılabilirliği üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada, geri kazandırılmış PET atıkları kullanılarak hazırlanan betonarme elemanlarının ve doymamış polyester reçineli polimer betonun dayanım özellikleri ve davranışları incelenmiştir. Sonuç olarak, yüksek kaliteli beton üretmek için, geri kazandırılmış PET atık içerikli reçinelerin, ulaşım bileşenleri, bina bileşenleri vb. prefabrik uygulamalarda kullanılabilmesinin uygun olduğunu göstermektedir (Rebeiz, 1996-b).

Rebeiz ve ark., çelik takviyeli polimer betonu ve geri kazandırılmış PET gibi plastik atıkları olan doymamış polyester reçineli betonun dayanım ve eğilme davranışları üzerinde araştırma yapmışlardır. Birçok kirişlerin, çekme bölgesinde tek çelik çubukla takviye edilmesi sağlanmıştır. Sonuçlara göre, geri kazandırılmış PET atıklarından elde edilen doymamış polyester reçineli polimer betonun eğilme dayanımında oldukça iyi değerlere sahip olduğu gözlenmiştir (Rebeiz ve Fowler 1996).

Chen ve ark., çalışmalarının temel amacı köpük içeriklerinin EPS (polistiren köpük) kullanarak betonun işlenebilirliği, mekanik özellikleri ve ısı iletkenliği üzerindeki etkileri hakkında ek bilgi sağlamaktır. Deneysel çalışmalarında, karışımlar, EPS parçacıklarının kısmen, kabarcık çapı 25-100 μm arasında olan köpük ile değiştirilmesi suretiyle hazırlandı; EPS köpüklü betonların taze halde elde edilen yoğunlukları 400 kg/m^3 ve 800 kg/m^3 idi. Test sonuçlarında, EPS karışımına ilave edilen uygun köpük içeriğinin EPS köpüklü betonun işlenebilirliğini, mukavemetini ve ısı iletkenliğini önemli ölçüde artıracakını göstermektedir. Sırasıyla yoğunlukları 400 kg/m^3 ve 800 kg/m^3 ile mukavemetleri 3.0 MPa ve 13.0 MPa ve ısı iletkenlik katsayıları 0.009 W/mk ve 0.25 W/mk sahip olan yeni hafif EPS betonlar üretildi. Malzemenin kaydedilen çekme-gerilme eğrileri EPS köpüklü betonun sünek olduğunu belirtti. Ayrıca, EPS köpüklü beton, son uygulanan basınç sonrasında yükü tutma yeteneğine ve sıkıştırma yükü altında yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir (Chen ve Liu, 2013).

Rahmani ve ark., Polietilen Tereftalat (PET), dünyanın çeşitli ülkelerinde polyester lifleri, şişe reçinesi ve mühendislik polyesteri üretiminde kullanılan bir polimer türüdür. Bu polimerin gıda ambalaj endüstrilerinde yaygın olarak uygulanması ve bu tür atıkların doğada uzun süre bozulması, pek çok araştırmacıyı onları geri dönüştürmek ve yeniden kullanmak için yeni yollar bulmak için teşvik etti. Bu makalede, daha önceki çalışmalara göre daha kapsamlı bir yaklaşımla, kumun %5, %10 ve %15 oranlarında PET ile işlenmiş parçacıklara etkileri araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, farklı su/çimento oranlarına sahip kübik ve silindirik numuneler üretilmiş ve taze betonun fiziksel özellikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, standart koşullar altında iyileştirilen numuneler, deneysel bir programda mekanik özellikler elde etmek için kullanılmıştır. Sonuçlarda, PET tanecikleri içeren taze betonların daha düşük işlenebilirlik ve yoğunluk verdiğini göstermektedir. PET partikülleri ile elde edilen beton, geleneksel betonlara göre daha düşük elastisite modülü ve gerilme direnci göstermiştir. Basınç ve eğilme mukavemeti ilk etaplarda yükselme eğilimi gösterir, ancak bir süre sonra azalma eğilimi gösterirler. Öte yandan, ultrasonik titreşim deneyleri, PET partikülleri içeren beton için gözenekli bir yapı ortaya koymuştur (Rahmani vd., 2013).

Saikia ve ark., bu çalışmanın amacı, geri dönüşümlü polietilen tereftalat (PET) agreganın boyut ve şeklinin aşınma direnci dahil olmak üzere taze ve sertleştirilmiş beton özelliklerine etkisini değerlendirmektir. Beton karışımlarındaki doğal agregaya hacimce %5, %10 ve %15 üç farklı eşit oranda şekillendirilmiş ve boyutlandırılmış PET agregaya ile yer değiştirmiştir. Sonuçlarda, pelet şeklindeki PET-agreganın eklenmesiyle taze betonun çökmesinin yavaşça arttığı görülüyor. İnce plastik agregaya, taze betonun çökmesini keskin bir şekilde azaltır ve bu tür PET-agregaya içeriği ve boyutu artarsa daha da azalır. PET-agregaya'nın birleşmesinden dolayı betonun basınç dayanımı, çekme-gerilme mukavemeti, elastikiyet modülü ve eğilme mukavemeti bozulmakta ve agregaya içeriğinin artmasıyla bu özelliklerin bozulması yoğunlaşmaktadır. PET agregalarının büyüklüğü, şekli ve yapısındaki farklılıklar, suyun çimentoya oranının yanı sıra taze beton karışımlarının çöküşünü ve sonuç olarak mekanik davranışını da değiştirir. İnce parçacıklar halindeki PET agregaları ikiye ayrılmış beton parçasını köprü olma görevi üstlenmekte ve bundan dolayı bozukluktan sonra betonun parçalanmasını önlemektedir. Çeşitli PET-agregaya türlerini içeren beton karışımlarının aşınma direnci, referans betonunkinden daha iyidir. PET-agregaya muhtelif tipleri ve içerikleri içeren beton aşınma direnci, basınç dayanımı ile ilişkili olabilir (Saikia vd., 2013).

Liu ve ark., genişletilmiş polistiren (EPS) beton, inşaat sektörüne uygun, iyi mekanik özelliklere ve öncül mekanik özelliklere sahip yeni hafif bir yapı malzemesidir. EPS betonun mekanik özellikleri, EPS'nin beton matrisi ve parçacık boyutuna bağlı olduğu tespit edildi. Bu çalışmada EPS betonun EPS ebadının farklı olduğu EPS betonun basınç dayanımı, çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti karşılaştırılmıştır. Basınç dayanım testlerinin sonuçlarına dayanarak bir basınç dayanımı ifadesi önerildi. Ultrasonik test, tek eksenli sıkıştırma yetmezliğine kadar yükleme işlemleri sırasında gerçekleştirildi. Ultrasonik test sonuçları, EPS betonun mekanik özelliklerinin EPS parçacık boyutuna ve granül içeriğine bağlı olduğunu ve yükleme işlemi sırasında EPS betonun hasar görüp görmediğini ultrasonik test yöntemiyle tespit ettiğini gösterdi (Liu vd., 2014).

Sadrmomtazi ve ark., bu çalışmada, atık polietilen tereftalat (PET) parçacıklarının ve puzolanik malzemelerin, kendi kendini sıkıştıran betonun (SCC) reolojik, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerine karışık etkileri değerlendirildi. Aynı ağırlığa sahip atık PET agregalar ile ince agregaların yer değiştirme oranları, ağırlıkça %5, %10 ve %15'dir. Ayrıca silis dumanı ve uçucu külün aynı ağırlığı ile çimentonun değiştirme oranı sırasıyla %10 ve %30'dur. Atık PET parçacıklarını içeren SCC'nin işlenebilirliği, çökme akışı, V-huni ve L-kutusu testleri kullanılarak belirlendi. Mekanik (çekme, çekme ve eğilme mukavemetleri ve elastikiyet modülü), reolojik (L-Box, çökme akışı ve V-huni) ve dayanıklılık (su emme ve elektrik direnci) özellikleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar atık PET parçacıklarının SCC'lerde agrega olarak tekrar kullanılabilceğini göstermektedir. SCC'de atık PET kullanımı sıkıştırıcı, çekme ve eğilme mukavemetlerini azaltıcı özelliğe sahiptir. Bununla birlikte, puzolanik malzemeler (uçucu kül ve silis dumanı), PET ilavesinden kaynaklanan güç kaybını telafi etmektedir. Atık PET kullanımı birçok avantaja sahiptir. Atık PET'in elektrik direnci üzerinde hiçbir etkisi yoktur ve betonun kırılma dayanımını azaltır. Ayrıca atık PET, çevresel problemleri azaltır, doğal kaynaklarını korur ve birim ağırlığının düşük olması nedeniyle binaların ölü yüklerini azaltır (Sadrmomtazi vd., 2015).

Corinaldesi ve ark., bu çalışmada doğal kumun yerine hafif harç üretimi için ahşap işleme yan ürünleri kullanılmıştır. Ahşap ürünler ve mobilya imalatçıları, kütükten dikdörtgen şekillerde kesim parçaları ve talaş üretirler. Bunlar, ahşap parçalar ahşap kütüklerden veya bitmiş ürünler hazırlanırken kesildiğinde, kesme, delme ve öğütme işlemleri ile de üretilir. Testere tozları çoğunlukla filtre torbaları veya toz toplayıcılarda toplanır. Doğal kum ile yer değiştirme üç farklı yüzde şeklinde denendi: hacimce %2.5, %5

ve %10. Ahşap yan ürünleri harç karışımına ilave edilmeden önce ahşap mineralizasyonu elde etmek için sürekli suda ve bazen de kalsiyum hidroksit sulu çözeltide karıştırılarak önceden ıslatılmıştır. Ağaç yan ürünlerini içeren harçlar gerilme ve eğilme testleri, kurutma çekme, su buharı geçirgenliği direnci, su kılcal emme ve ısı iletkenlik ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Harç karışımlarında elde edilen sonuçlarda, mekanik mukavemetinin aşırı bir şekilde kaybedilmesini önlemek ve yaklaşık bir %25'lik ısı iletkenliğinin azaltılmasından kaçınmak için, maksimum %5 ahşap yan ürün dozajının kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. Öte yandan, su azaltıcı bir katkı ilave edilirse, %10 odun yan ürünleriyle bile yeterli mekanik performans elde edilebilir (Corinaldesi vd., 2016).

Gregorova ve ark., kablo, polistiren ve etilen vinil asetat (EVA) atığından yapılmış hafif beton eldesi konusunda çalışmışlardır. Hafif betonda, ayakkabı endüstrisinden EVA atıkları, elektrik kablolarından atıklar ve atık polistiren, agrega olarak kullanılmıştır. Bu fikir, pazardaki polistiren eksikliğini ve aynı zamanda, köpüklü plastiklerin büyük miktarda atılmasıyla, uygulamanın aradığı fırsat için yol açtı. Daha da önemlisi, hafif beton dolgu maddesi olarak kullanılan polistiren incilerin üretimi çok pahalıya mal oluyordu. Plastik atık, tek agrega olarak veya EVA-kablo ve EVA-polistiren kombinasyonu olarak 1:3, 1:1 ve 3:1 oranlarında kullanıldı. Tüm karışımlar için su-çimento oranı 0.50 ve çimento dozu - 175 kg/m³ kullanıldı. Hafif betonda özellikle yoğunluk, mukavemet özellikleri ve ısı-tekniik özellikler kanıtlanmış olmuştur (Gregorova vd., 2016).

Nursyamsi ve ark., son yıllarda, hafif beton agreganın yerine kullanılan endüstriyel atıklar ve diğer agregalar gibi materyallerin kullanılması bir endişe haline gelmektedir. Bunun nedeni, bu materyallerin sanayiden gelen atıkları yönetmek ve bina yapılarının ağırlığını azaltmak için bir çözüm olabilmesidir. Bu çalışma, iri agrega kadar hafif polietilen tereftalat (PET) plastik atık kullanmaktadır. PET plastik atığından elde edilen iri agrega, aglomerasyon üretmek için PET ile ısıtılan maddenin sonucudur ve daha sonra soğutulur ve belli tonlarda çeşitli ebatlara sahip agregalarla ezilir. Bu çalışmanın amacı, PET plastik atığının hafif betonunun sıkıştırılma mukavemetini kaba agrega olarak belirlemek ve üretilen beton basınç dayanımı için agrega gradyanlarının etkisini belirlemektir. Çeşitli incelik modülü (FM) ile yapılan malzeme testi çeşitli sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Maksimum sıkışma mukavemeti, PET plastik atık agrega maksimum inceltme modülü kullanılarak numune üzerinde elde edilir. SNI 03-3994-2002'ye göre,

malzemenin ağırlığı ve sıkışma mukavemeti standarda uymalıdır. Sonuç olarak, PET plastik atık kaba agrega derecelendirmesi hafif betonun basınç dayanımını etkileyebilir (Nursyamsi vd., 2016).

Nikbin ve ark., şişeleri veya kapları üretmek için PET'i hammadde olarak kullanmak, kullanımdan sonra zorlu bir çevre koruma sorununa yol açması açısından oldukça yaygındır. Büyük miktarda tüketilen PET atık olur ve birkaç 10 tonun bir defada tamamen geri dönüştürülememesi nedeniyle depolama için geniş araziler gerektirir. Bu konu ile ilgili olarak, PET atıklarının beton üretimi için geri dönüşüme tabi tutulması ve betonun daha uzun kullanım ömrü nedeniyle plastiklerin çevre ile doğrudan temasını önleme potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışmada, normal PET beton (NPC) ve hafif PET betonun (LWPC) sülfürik asit erozyonuna karşı direnci araştırılmıştır. Atık PET parçacıklarının 5, 10 ve 15'lik yüzdeleri hem NPC hem de LWPC karışımlarında ince doğal agrega yerine kullanılır. Sertleştirildikten sonra numuneleri % 15 sülfürik asit solüsyonuna 15, 30 ve 60 günlük aralıklarla batırdıktan sonra kırma yükü, kütle ölçümü ve ultrasonik dalga hızı testleri gerçekleştirildi. Elde edilen sonuçlara göre, sadece LWPC, NPC'den daha az aşınma yapmadı, aynı zamanda kırma yükü azalması, kütle kaybı ve ultrasonik dalga hızı düşürme oranı NPC örneklerinden daha düşüktü. Ayrıca, PET (LWC) içermeyen hafif beton, normal beton (NC) ile karşılaştırıldığında daha düşük bir redüksiyon hızı göstermiştir. Atık PET'i betonda yeniden kullanmak, onu büyük miktarda tüketmek, elden çıkarma sorunlarını telafi eden, doğal kaynakları koruyan, düşük birim ağırlığı nedeniyle binaların ölü yüklerini azaltan ve bu çalışmada her iki beton tipinin asit dayanımını geliştirmeye yöneliktir (Nikbin vd., 2016).

Mohammed, PET plastik atıklarını içeren betonun özellikleri, birçok deneysel testin sonucu olarak iyi anlaşılmıştır. PET atıklarını içeren betondan yapılan beton elemanların yapısal tasarım ve analizleri, mekanik özellikler için doğru denklemlere ihtiyaç duyar. Bu yazıda, normal atık içeren beton PET atıklarının mekanik özellikleri hakkında mevcut veriler toplanmış, analiz edilmiş ve elastik modül, çekme ve eğilme dayanımlarının hesaplanması için denklemler geliştirilmiştir. Analiz sonuçları, genel olarak, PET plastik atığı içeren betonun basınç ve üç mukavemeti arasında iyi bir korelasyon bulunduğunu göstermektedir. Önerilen denklemler güvenli ve doğru bulundu ve parçalanmış PET atıkları haricinde farklı plastik atık türlerini içeren geri dönüştürülmüş beton için başvuruda bulunabilirler. Mekanik özellikler için önerilen modeller, PET çöpü ve bazı

diğer plastik atıklar içeren geri dönüştürölmüş betonlardan yapılan yapısal elemanların analiz ve tasarımında kullanılabilir (Mohammed, 2017).



5. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, deneysel çalışmaların fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimleri, harç karışımlarında kullanılan malzeme oranlarına ve gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

5.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri

5.1.1. Çimento

Bu çalışmada, Elazığ ilindeki ÇİMENTAŞ Elazığ Çimento Fabrikası tarafından üretilen ve Öz Torgutlar Ticaret Şirketinden temin edilen TS EN 197-1 (2002) ile uyumlu Pozolanik çimento kullanılmıştır. Çimentonun taze olarak kullanılmasına dikkat edilmiş ve nem almaması için koruyucu kaplarda muhafaza edilmiştir. Çimentaş Elazığ Fabrikasından alınan CEM IV / B (P) 32.5 R Pozolanik çimentosuna ait temel kimyasal ve fiziksel özellikleri hakkında bilgi Tablo 5.1’de verilmiştir. Çimentonun priz başlangıç ve bitiş süreleri TS EN 196-3 (2002)’de belirtilen yöntemle göre tespiti yapılmıştır.

Tablo 5.1 Çimentonun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri

Görünüm	Gri veya beyaz granül toz	Bağıl Yoğunluk (Özgül Ağırlık) (g/cm ³)	2,75 – 3,20
Koku	Yok	Görünür Yoğunluk (g/cm ³)	0,9 – 1,5
pH (suda) 20 °C	9 – 14	Viskozite cPs 25 °C	Uygulanması yok.
Kaynama Noktası (°C) 760 mm Hg	Uygulanması yok.	Buhar Basıncı hPa 20°C	Uygulanması yok.
Erime Noktası (°C)	> 1200 °C	Patlama Tehlikesi	Ürünün patlama tehlikesi yoktur.
Parlama Noktası (°C) 760 mm Hg	Uygulanması yok.	Oksidasyon Özellikleri	Uygulanması yok.
Kendiliğinden Alevlenme Sıcaklığı(°C)	Uygulanması yok.	Ortalama Tane İriliği (Mikron)	1 – 30
Ayrışma Sıcaklığı (°C)	Uygulanması yok.	Suda Çözünürlük (%)	0,1 – 1,5
Ayrılma Katsayısı	Uygulanması yok.	Buhar Yoğunluğu	Uygulanması yok.

NOT: Yukarıdaki özellikler, Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmeliğinde öngörülen yöntemlere veya karşılaştırılabilir diğer bir yöntemle göre belirlenmiştir.

5.1.2. Kum (ince agrega)

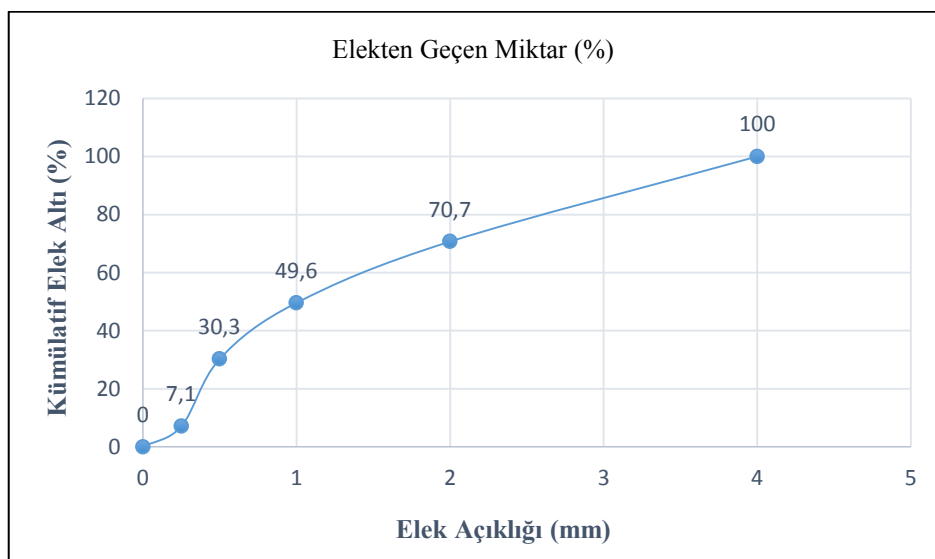
Çalışmada, 0-4 mm dane büyüklüğündeki kum (ince agreg) kullanılmıştır. Kum yıkanarak temizlenmiş ve etüvde kurutularak deneylerde kullanılmıştır.

Mukavemeti ve kalitesi yüksek bir beton üretmek için agreganın fiziksel özellikleri büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple bu çalışmada su ihtiyacını azaltmak ve işlenebilirliğini arttırmak amacıyla ince agrega olarak 0-4 mm aralığında kum kullanılmıştır.

Harç numunelerinin hazırlanmasında kullanılan kumun TS 130 (1978)'a göre elek analizi yapılarak sonuçları aşağıda verilmiştir. Bu sonuçlara göre çizilen grafik ise Şekil 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Kum (ince agreganın) elek analiz değerleri

Elek No	Elek Üzerinde Kalan (g)	Elek Üzerinde Kalan (%)	Kümülatif Kalan (%)	Kümülatif Geçen (%)
4 mm	0	0	0	100
2 mm	2934	29,3	29,3	70,7
1 mm	2110	21,1	50,4	49,6
0,5 mm	1933	19,3	69,7	30,3
0,25 mm	2323	23,3	92,9	7,1
Tava	700	7	100	0
Toplam	10000			



Şekil 5.1 Kum (ince agreganın) elek analizi sonuçlarının grafiksel gösterimi

5.1.3. Atık PET ve atık plastikler

Bu çalışmada agrega olarak kullanılan atık PET, Elazığ Elkay Atık Toplama ve Geri Dönüşüm Orman Ürünleri İnşaat Nakliyat Petrol Makine Gıda Sanayi ve Tic. Ltd. Firmasından ayrıca atık plastikler Elazığ Güneş PET Ambalaj Malzemeleri Pazarı Sanayi Tic. Ltd. Şti. Firmasından temin edilmiştir. Atık PET şişe kırıkları toplanarak Elkay Geri Dönüşüm Firmasında ayrılmakta, yıkanarak temizlendikten sonra kırıcı makinelerden geçirilmektedir. Küçük kırıklar haline getirilen atık PET şişeler farklı elek boyutlarından geçirildikten sonra, farklı uygulamalarda değerlendirilmektedir. Bu çalışmada PET şişe kırıkları hafif harç üretiminde dört şekilde kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında atık PET şişe kırıkları elenmeden, olduğu şekilde 0-4 mm dane büyüklüğünde kullanılmıştır. İkinci aşamasında atık PET şişe kırıkları ile doğal agrega birlikte kullanılmıştır. Üçüncü aşamasında süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi ve atık PET şişe kırıkları birlikte kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı, Elazığ ilinde üretim yapan FRC Kimya Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi deneylerde, üretici firma talimatlarına uygun olarak çimento ağırlığının % 0.7'si oranında kullanılmıştır. Son aşamada ise atık PET şişe kırıkları, doğal agrega ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi beraber kullanılmıştır. Atık PET agreganın özgül ağırlığı 1.30-1.38 g/cm³'tür. Atık plastikler ise ürün cinsine göre uygun biçimde yabancı cisimlerden ayklanır. Yabancı cisimler ayırma masasında elle giderilir. Kirlilik bulunduran atıklar yıkanarak temizlenir ve kurutulur. Temiz olanlar yıkanmayabilir. Plastikler nem oranı %1' den az oluncaya kadar kurutulur ve deneylerde bu şekilde kullanılır. Bu çalışmada atık plastikler de, atık PET şişe kırıkları gibi hafif harç üretiminde dört şekilde kullanılmıştır. Atık plastik agreganın özgül ağırlığı 1.10 g/cm³'tür. Resim 5.1 ve Resim 5.2'de bu çalışmada agrega olarak kullanılan karışık boyuttaki plastikler ve atık PET şişe kırıkları görülmektedir.



Resim 5.1 Deneyde kullanılan atık plastikler



Resim 5.2 Deneyde kullanılan PET'ler

5.1.4. Karışım ve bakım suyu

Agrega deneylerinde ve beton deneylerinde kullanılan karışım ve bakım suyu şehir şebekesinden temin edilmiştir. Karışım ve bakım suyunun kalitesi ile ilgili özel bir Türk Standardı yoktur. Kaynaklarda karışım ve bakım suyu içilebilir su olarak tarif edilmektedir (Erdoğan, 1995; Neville ve Brooks, 1993).

5.2. Harç Karışım Oranları

Bu çalışmada, atık plastik kırıkları ve atık PET hafif harç üretiminde agregası olarak kullanılmıştır. Deneyler, atık plastik ve atık PET'in agregası olarak kullanıldığı ve atık plastik, atık PET ve kumun agregası olarak birlikte kullanıldığı iki grup harç numunesi üzerinde karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca su oranını düşürmek için akışkanlaştırıcı ilavesi ile harçlar hazırlanmıştır. Karışımında kullanılan atık PET agregası boyutu 0-4 mm olarak alınmıştır. Su/çimento oranları; 0.30 ve 0.50 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan numunelerin, yoğunluk, ısı iletim katsayısı, mekanik dayanımı, su emme ve kuruma oranı gibi özellikleri belirlenmiştir.

Isıl testlerde kullanılan numunelerin dökümü için kalıplar, ölçme aletinin prob ölçülerine uygun olarak 20×60×150 mm ve mekanik testlerde kullanılan numunelerin dökümü için kalıplar 100×100×100 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Resim 5.3'te kalıplar gösterilmektedir.



Resim 5.3 Deney aşamasında kullanılan kalıplar

Küp numunelerin alınması TS EN 12390-2 standardı esas alınarak yapılmıştır. Küp numuneleri için kalıplar temizlenerek, iç yüzeyleri ince bir yağ tabakası ile yağlanmıştır. Numune alınacak olan beton üretiminden itibaren en geç 15 dakika içinde kalıplara dökülmeye başlanmıştır. Beton, kalıplara dökülmeden önce beton sıcaklığı ve kıvamı tespit edilmiştir. Dökülme işleminden sonra betonun kıvamına bağlı olarak sağlı, sollu ve değişik şiddetlerde tokmaktama yapılmıştır. Üst yüzeyleri tesfiye edilip beyaz boş bir kağıda bilgileri yazılarak üzerlerine konulmuştur. 100×100×100 mm ebatlarındaki küp numuneler

betonun sertleşme aşamasında zarar görmeyecek şekilde saklanmış ve kalıplarından en geç 48 saat sonra çıkartılarak 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzuna yerleştirilmiştir. TS EN 12390-2 esas alınarak, deney numuneleri 20 $\pm$ 4 saat sonra basınçlı su veya hava yardımı ile, düz bir zeminde kalıplar ters çevrilerek çıkartılmıştır. Resim 5.4'te kalıplara dökülen numuneler gösterilmiştir.



Resim 5.4 Kalıplara doldurulan harç numuneleri

Kumsuz numunelerin üretiminde, çimento, PET, plastik ve akışkanlaştırıcı karışımların her biri için toplam 36 harç karışımı hazırlanmıştır. Kumsuz örneklerin hazırlanmasında belirlenen oranlar kullanılarak kumlu örnekler hazırlanmıştır. Kumlu karışımlarda PET, plastik ve akışkanlaştırıcı agregaların yanı sıra kum da kullanılmıştır. Kum-bağlayıcı oranı 1 alınmıştır. Ayrıca PET, plastik ve akışkanlaştırıcı oranları hacimce sırasıyla %0, %10, %20, %30 ve %40 alınmıştır. Bu oranlara sahip olan 36 kumsuz ve 36 kumlu olmak üzere toplam 72 harç karışımı hazırlanmıştır.

Tablo 5.3 Kumsuz harç karışımlarının içeriği

No	KARIŞIM KODU	AGREGA			Kum/B	PET ve Plastik boyutu	Su/B
1	ÇP1*	-	Plastik	-	-	5-15 mm	0.50
2	ÇP2	-	Plastik	-	-		
3	ÇP3	-	Plastik	-	-		
4	ÇP4	-	Plastik	-	-		
1	ÇPET1	-	PET	-	-	1.0-3.5 mm	0.50
2	ÇPET2	-	PET	-	-		
3	ÇPET3	-	PET	-	-		
4	ÇPET4	-	PET	-	-		
1	ÇPA1	-	Plastik	Akışkanlaştırıcı	-	5-15 mm	0.30
2	ÇPA2	-	Plastik	Akışkanlaştırıcı	-		
3	ÇPA3	-	Plastik	Akışkanlaştırıcı	-		
4	ÇPA4	-	Plastik	Akışkanlaştırıcı	-		
1	ÇPETA1	-	PET	Akışkanlaştırıcı	-	1.0-3.5 mm	0.30
2	ÇPETA2	-	PET	Akışkanlaştırıcı	-		
3	ÇPETA3	-	PET	Akışkanlaştırıcı	-		
4	ÇPETA4	-	PET	Akışkanlaştırıcı	-		
1	ÇP0	-	-	-	-	-	0.50
2	ÇPET0	-	-	-	-		
3	ÇPA0	-	-	Akışkanlaştırıcı	-	-	0.30
4	ÇPETA0	-	-	Akışkanlaştırıcı	-		

*0, 1, 2, 3 ve 4 ile PET/plastik oranı kastedilmektedir ve % 0, %10, %20, %30 ve %40 PET veya plastik anlamına gelmektedir. ÇP=Çimento+plastik, ÇPET=Çimento+PET, ÇPA=Çimento+plastik+akışkanlaştırıcı, ÇPETA=Çimento+PET+akışkanlaştırıcı.

Tablo 5.4 Kumlu harç karışımlarının içeriği

No	Karışım Adı	Agregalar			Kum/B	PET ve Plastik boyutu	Su/B
1	ÇPK1*	Kum	Plastik	-	1	5-15 mm	0.50
2	ÇPK2	Kum	Plastik	-			
3	ÇPK3	Kum	Plastik	-			
4	ÇPK4	Kum	Plastik	-			
1	ÇPETK1	Kum	PET	-	1	1.0-3.5 mm	0.50
2	ÇPETK2	Kum	PET	-			
3	ÇPETK3	Kum	PET	-			
4	ÇPETK4	Kum	PET	-			
1	ÇPKA1	Kum	Plastik	Akışkanlaştırıcı	1	5-15 mm	0.30
2	ÇPKA2	Kum	Plastik	Akışkanlaştırıcı			
3	ÇPKA3	Kum	Plastik	Akışkanlaştırıcı			
4	ÇPKA4	Kum	Plastik	Akışkanlaştırıcı			
1	ÇPETKA1	Kum	PET	Akışkanlaştırıcı	1	1.0-3.5 mm	0.30
2	ÇPETKA2	Kum	PET	Akışkanlaştırıcı			
3	ÇPETKA3	Kum	PET	Akışkanlaştırıcı			
4	ÇPETKA4	Kum	PET	Akışkanlaştırıcı			
1	ÇPK0	Kum	-	-	1	-	0.50
2	ÇPETK0	Kum	-	-		-	0.3
3	ÇPKA0	Kum	-	Akışkanlaştırıcı			
4	ÇPETKA0	Kum	-	Akışkanlaştırıcı			

*0, 1, 2, 3 ve 4 ile PET/plastik oranı kastedilmektedir ve % 0, %10, %20, %30 ve %40 PET veya plastik anlamına gelmektedir. ÇPK=Çimento+plastik+kum, ÇPETK=Çimento+PET+kum, ÇPKA=Çimento+plastik+kum+akışkanlaştırıcı, ÇPETKA=Çimento+PET+kum+akışkanlaştırıcı.

5.3. Numunelerin Üretimi ve Kürü

Tablo 5.3’de verilen kumsuz karışımlar ve Tablo 5.4’te yer alan kumlu karışımlar toplam 72 harç karışımı taze haldeyken kıvamları ile birim ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra harç karışımları 100×100×100 mm boyutlarındaki küp kalıplara dökülmüş ve sertleşmesi için laboratuvar ortamında bırakılmıştır. En geç 48 saat sonra numuneler

kalıplarından çıkarılarak deney sürelerine kadar 22 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzunda kür edilmişlerdir.



Resim 5.5 Kür sandığı ve içerisindeki beton numuneler

5.4. Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar

5.4.1. Çimentonun priz süresinin tayini

Deneylerde kullanılan çimentonun priz süresi TS EN 196-3 (2002)'e uygun olarak ölçülmüş ve üretici firmanın verdiği değerlere uygun olduğu görülmüştür. CEM IV / B (P) 32,5 R Pozolanik çimento ile ilgili fiziksel özellikler aşağıdaki Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5 Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlığı (g/cm^3)		2,92 – 2,99
Priz Süresi	Priz Başı (saat: dakika)	3 - 3 ²⁰
	Priz Sonu (saat: dakika)	4 ⁴⁰ - 4 ⁵⁰
İncelik	Özgül Yüzey (cm^2/g)	4200 - 4600
	32 mikron elekte	8 – 10
Su İhtiyacı (%)		32 - 33
Litre Ağırlığı (g/lt)		880 – 920

5.4.2. Birim ağırlık tayini

Beton harç karışımları taze haldeyken yaş birim ağırlıkları ölçülmüştür. Beton örnekler 28 gün bekletildikten sonra (yani sertleşmesi ile) hava kurusu birim ağırlıkları hesaplanmıştır.

5.4.3. Basınç ve çekme dayanımı tayini

Numunelere uygulanan basınç dayanımı deneyleri Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır. Ele International marka cihaz, 3000 kN yükleme kapasiteli, dijital kumanda panelli, yükleme hızı ayarlanabilen ve tek eksenli kuvvet uygulayabilen özelliktedir. Resim 5.6’da deney cihazının test ve kontrol üniteleri görülmektedir.

Deneye tabi tutulacak numunenin yüzeyleri düz ve pürüzsüz olmalıdır. Cihazın alt çenesi sabit, üst çenesi hareketli yapıdadır. Cihaz çalıştırıldıktan sonra, üst çene yavaşça numuneye doğru hareket eder ve artan miktarda numuneye kuvvet uygulanır. Numunenin kırıldığı anda basma kuvveti durur ve ekranda en son kuvvet kN cinsinden ve basma gerilmesi de MPa olarak okunur. Ölçüm sonucunda, kırılan parça test bölümünden çıkarılır ve diğer ölçüme geçilir.

Basınç dayanımı sonuçları, TS500 standardına göre aşağıdaki (5.1) bağıntısıyla çekme dayanımına dönüştürülmüştür.

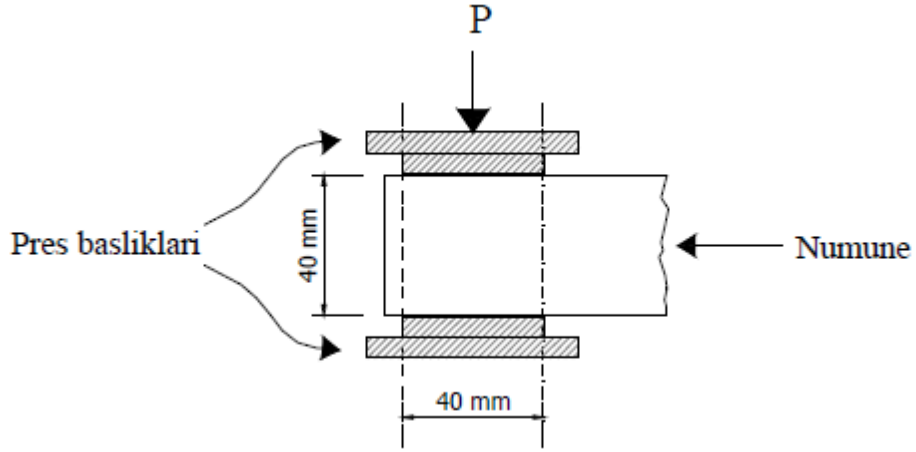
$$f_{ctk} = 0.35\sqrt{f_{ck}} \quad (5.1)$$

burada;

f_{ck} : basınç dayanımı (MPa) ve f_{ctk} : çekme dayanımı (MPa)’dır.

Beton harç numuneleri TS EN 1015-11 (2000) uygun olarak kür elde edilen, 28 günlük süreçten sonra basınç testine tabi tutularak basınç dayanım değerleri bulunmuştur. Bunun için 100×100×100 mm boyutlarındaki küp numunelerinin yaklaşık olarak ortalarından kırılmasıyla elde edilmiştir. Bunun için numune, hazırlanan bir aparatın içine kırık yüzeyi yana gelecek şekilde yerleştirilirler. Numunelerin alt ve üstündeki 10×10 mm’lik metal başlıklarla numune yüklemeye tabi tutulmuştur. Kırma başlıkları arasındaki prizma 10×10×10 mm’lik bir küp görevi görmektedir. Bu şekilde yüklemeye tabi tutulan

numunelerin basınç değerleri (5.2) eşitliği yardımı ile bulunur ve ortalamaları alınan numunelerden elde edilen sonuçların basınç dayanım değeri olarak tespit etmek mümkündür (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Basınç deneyi

Aşağıdaki formül yardımıyla basınç dayanımı hesaplanmaktadır:

$$\sigma = P/A \quad (5.2)$$

σ : Basınç Dayanımı

P: Uygulanan Kuvvet (kg)

A: Kesit Alanı (m²)



Resim 5.6 Basınç dayanım testinde kullanılan deney düzeneği

5.4.4. Yarmada-çekme dayanımı tayini

Deneyin uygulanmasında, beton numuneler, deney presinin üzerine, numune eksenini presin alt tablasına paralel olacak tarzda yatırılmaktadır. Numunelerin yan yüzünün alt ve üst kısımlarına 1 mm eninde ve yaklaşık 1 mm kalınlığında duralit çubuklar yerleştirilmektedir. Deney presi vasıtasıyla uygulanan basınç yükü numune kırılincaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) ölçülmektedir. Böyle bir yükleme altında, beton numunelerin kırılma tarzı, numunelerin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir.

Kırılma hazır hale gelen numuneler yarmada-çekme ve basınç deneyleri için 2000 kN kapasiteli dijital makinedeki çelik başlıklar içine yerleştirilip kırılarak tepe yükleri kaydedilmiştir. Ortalama olarak küp numunelerin maksimum yüke ulaşması 2 dk. ± 30 sn olacak şekilde yüklenmiştir. Küp numunelerin üzerine sabitlenen duralitler numunenin bir düzlem boyunca ikiye bölünmesini sağlamıştır. Her küp numune deney cihazına yerleştirilmeden önce yeni bir duralit çubuk yerleştirilmiştir. Amaç hatayı en aza indirmektir. Basınç test tayininde bu duralit çubuklar kullanılmamıştır. Resim 5.7’de yarmada-çekme dayanım testi uygulanmış beton numuneler verilmiştir.



Resim 5.7 Yarmada-çekme dayanım testi uygulanmış numuneler

5.4.5. Su emme ve kuruma hızları miktarının tayini

Islak kür halinde bulunan 20×60×150 mm ve 100×100×100 mm boyutlarındaki prizmatik numunelerin 28 günlük süreçlerinden sonra ki su emme ve kuruma hızları miktarlarının değerleri TS 3624 (1981)'e uygun olarak bulunmuştur.

Sertleşmiş numuneler önce 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilerek kurutulmakta ve ağırlıkları ölçülmektedir. Kurutulan bu numuneler, su ile doldurulmuş bir kap içerisine konularak 20 dakika/40 dakika/1 saat/2 saat/3 saat ve 24 saat sonunda tartılmış ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Resim 5.8'de su dolu kap içerisindeki numuneler bulunmaktadır

Kuruma hızlarında ise 24 saatlik doygun ağırlıklarından sonraki 30 dakika/1 saat/2 saat/3 saat/4 saat/24 saat ve 48 saatlerinde tartım sonuçları alınarak su emme ve kuruma hızları (5.3) ve (5.4) eşitlikleri yardımı ile bulunmuştur. Resim 5.9'da ise kurumaya bırakılmış numuneler bulunmaktadır.

$$m_1 = \frac{B-A}{A} \times 100\% \quad (5.3)$$

m_1 : Ağırlıkça su emme oranı (%)

A: Etüv kuru numune ağırlığı (kg)

B: 24 saat sonrasındaki doygun yaş ağırlığı (kg)

$$m_2 = \frac{B-C}{C} \times 100\% \quad (5.4)$$

m_2 : Kuruma hızı oranı (%)

C: 48 saat sonrasındaki kuru ağırlığı (kg)

B: 24 saat sonrasındaki doygun yaş ağırlığı (kg)



Resim 5.8 Su dolu kap içerisindeki numuneler



Resim 5.9 Kurumaya bırakılmış numuneler

5.5. Notasyonlar

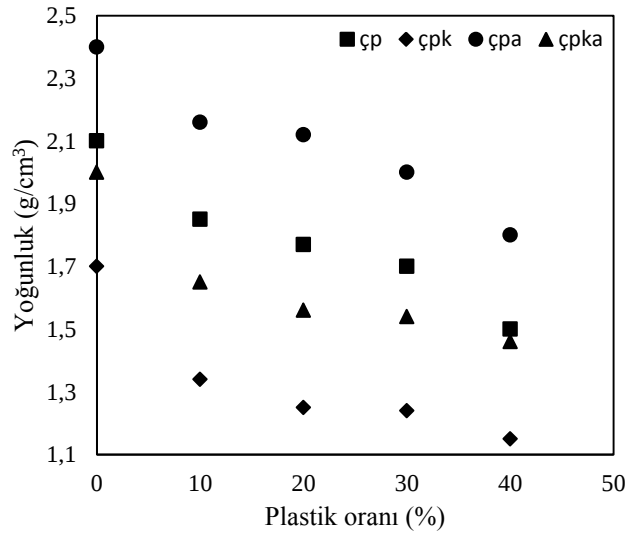
Agrega olarak atık PET, plastikler ve akışkanlaştırıcının kullanıldığı karışımlar için kumsuz karışımlar; kum, atık PET şişe kırıkları, plastikler ve akışkanlaştırıcının birlikte kullanıldığı karışımlar için kumlu karışımlar ifadesi kullanılmıştır. Tablo 5.3 ve 5.4’te örneklerin kısaltma şeklindeki adlandırmalarının anlamı verilmiştir. S/B kısaltması, su/çimento oranını ifade etmektedir. Resim 5.10’da beton numuneler toplu bir şekilde gösterilmiştir.

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

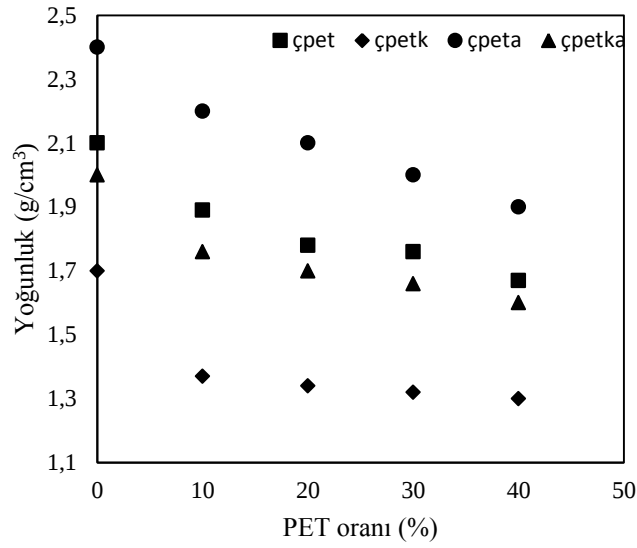
Bu çalışmada hafif beton üretimi amacıyla atık plastik ve PET agrega olarak kullanılmıştır. Agrega olarak kullanılan atık plastik ve PET için hem kumlu hem de kumsuz örnekler hazırlanmıştır. Ayrıca su oranını düşürmek amacıyla polikarboksilat esaslı bir akışkanlaştırıcı ilave edilmiş ve aynı deneyler tekrarlanmıştır. Deneyler için her numuneden 3 örnek hazırlanmış ve sonuçlar bu üç deneyin ortalaması alınarak sunulmuştur. Hazırlanan numunelere uygulanan testler sonucu elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

6.1. Kuru Birim Ağırlık

Atık plastik ve PET içeren harçlar akışkanlaştırıcı ilave edilen ve edilmeyen numuneler ile kumlu ve kumsuz olmasına göre hazırlanmış ve bu numunelerin hava kurusu sonuçlarına göre yoğunlukları hesaplanmıştır.



Şekil 6.1. Çimento/plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yoğunluğun plastik oranı ile değişimi



Şekil 6.2. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yoğunluğun PET oranı ile değişimi

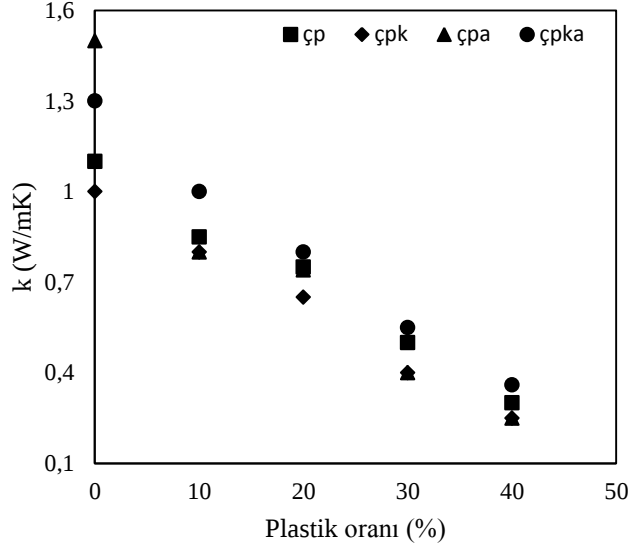
Şekillerin incelenmesi halinde, plastik ve PET oranı arttıkça yoğunluk değerlerinin küçüldüğü görülmektedir. Bu küçülme plastik atıkların yoğunluğunun yaklaşık 1.1 g/cm^3 ($0.9\text{-}1.4 \text{ g/cm}^3$) olmasından kaynaklanmaktadır. PET in yoğunluğu ise $1.30\text{-}1.38 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Akışkanlaştırıcı ilave edilerek hazırlanan numunelerin yoğunluk değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumu su oranının düşmesiyle birlikte artan çimento ve kum miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Betonun ağırlığı, sertleşme süresi ve nemine göre farklı değerler alır ve taze betonun veya 28 günlük sertleşmiş betonun fırın veya hava kurusu birim ağırlıkları olarak tanımlanır. Hafif beton, TS En 260-1 standardına göre etüv kurusu yoğunluğu $800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ aralığındaki betondur. Amerikan Beton Enstitüsü tarafından yayınlanan ACI 213R-87 raporunda ise taşıyıcı hafif beton, hava kurusu birim hacim ağırlığı $1440\text{-}1850 \text{ kg/m}^3$ arasında olan ve 28 günlük basınç dayanımı en az 17.2 MPa olan beton olarak tanımlanmıştır Birim ağırlıkları genellikle 800 kg/m^3 'ten az olan betonlar, düşük dayanımlı yalıtım veya dolgu betonu olarak ifade edilmektedir (Neville, 1999).

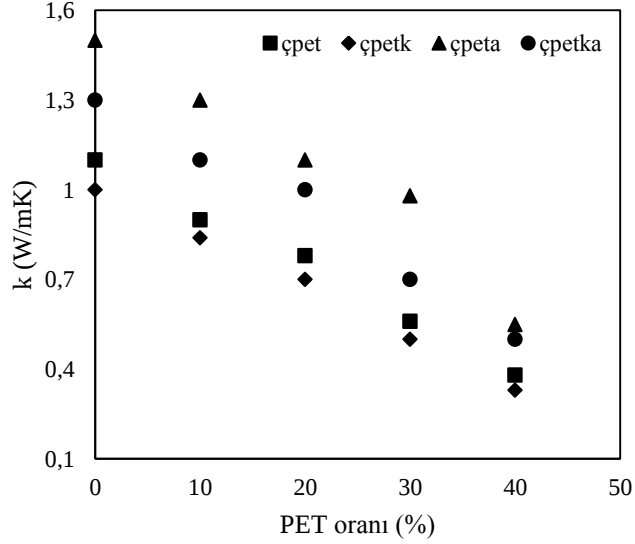
6.2. Isı İletim Katsayısı

Polimerik atıkların yeniden endüstriye kazandırılması ile ilgili pek çok araştırma yapılmaktadır. Depolanması veya bertaraf edilmesi zor ve maliyetli işlemlerdir. Kendiliğinden yok olmadığı göz önünde bulundurulduğunda önemli çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Polimerik malzemelerin ısı iletim katsayıları oldukça düşüktür

bu sebeple yalıtım amaçlı olarak binalarda kullanımı mümkün görülmektedir (Yeşilata vd. 2006). Betonların ısı iletkenlik katsayısının deney sonuçları Şekil 6.3 ve 6.4’de görülmektedir.



Şekil 6.3. Çimento/plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkı ı numunelerinde ısı iletkenlik katsayısının plastik oranı ile değişimi



Şekil 6.4. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkı ı numunelerinde ısı iletkenlik katsayısının PET oranı ile değişimi

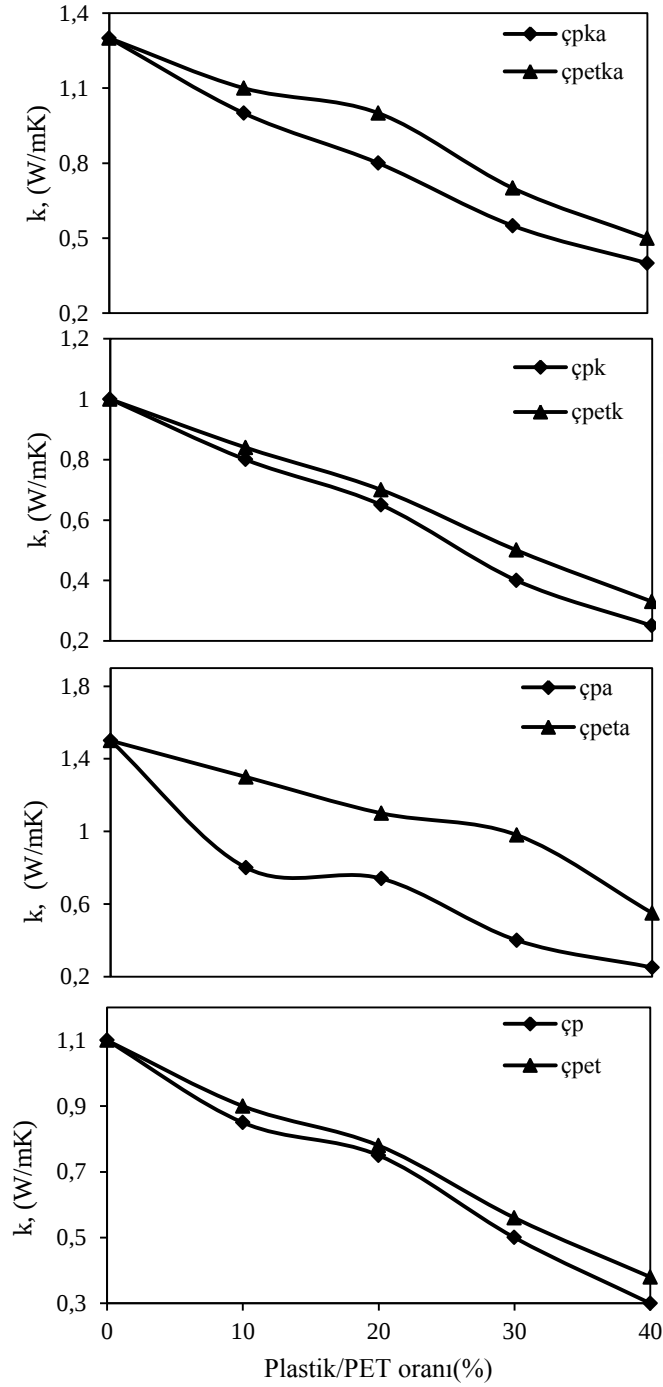
Şekil 6.3-4’te plastik ve PET ilave edilmiş beton numunelerin ısı iletim katsayılarındaki değişimler görülmektedir. Gerek PET ve gerekse plastik atıkların katılım yüzdeleri arttıkça ısı iletim katsayıları küçülmektedir. Bu küçülme; numunelerin 28 günlük

kuruma sürecinde bünyesindeki absorbe ederek aldığı suyu kaybetmesinden ileri gelmektedir. Ayrıca betondan daha düşük ısı iletim katsayısına sahip plastik ve PET ilavesi de bu durumun sebeplerinden bir diğeridir. Grafiklerin incelenmesi halinde en küçük ısı iletim katsayıları %40 oranında PET/Plastik katkılı numunelerde olduğu görülmektedir. Buna ilave olarak kum ilavesinin de ısı iletim katsayısını düşürdüğü görülmüştür. Akışkanlaştırıcı ilavesi ile yapılan deneyler sonucu hazırlanan numunelerde de ısı iletim katsayısının düştüğü ama bu düşüşün akışkanlaştırıcı eklenmeyen numunelere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun akışkanlaştırıcı ilavesiyle azalan su oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan ölçümlerde PET ilaveli gözeneksiz kuru haldeki betonun en düşük ısı iletim katsayısı 0.33 W/mK ve plastik ilaveli betonun ise 0.25 W/mK olarak ölçülmüştür.

Daha önce yapılan çalışmalarda, kontrol numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları kullanılan çimento dozajı, agrega, mineral katkılara bağlı olarak 0.3-2.9 W/mK değerleri arasında değişmektedir. Poröz agregalarla birlikte mineral katkı kullanımının söz konusu olduğu çalışmalarda 0.1472 W/mK iletkenlik değeri perlit ve uçucu külün birlikte kullanımı ile mümkün olmuştur. Isı yalıtım malzemelerinin iletkenlik mertebelerinin incelendiği çalışmalar ise betonun kimyasal yapısında değişim yapmaktansa, daha çok betonun birim hacim ağırlığının değiştirilmesi ile mümkün olmuştur. 200 kg/m³ yoğunluk değerlerinde 0.06 W/mK olan iletkenlik değeri, 100 kg/m³ mertebelerinde ise 0.04 W/mK'e kadar düşmüştür. Bu durumda betonun taşıyıcılığından ziyade yalıtımsal özellikleri ön plana çıkmaktadır (Yeşilata, 2009; Köseoğlu, 2015). Farklı agregalar kullanılarak elde edilen hafif beton üzerine yapılan pek çok çalışma da mevcuttur.

Kan ve Demirboğa, geleneksel agrega kısmen EPS ile değiştirilerek üretilen betonun ısı iletkenliğinin 0.60 W/mK olarak belirlemişlerdir. Şengül, geleneksel agreganın %60 perlit ile yer değiştirerek betonda 0.35 W/mK ısı iletkenlik değeri elde etmiştir. Kim vd., EPS ve vermokolit karışımı düşük yoğunluklu betonların ısı iletkenliğini, normal betona göre 7 kat küçük çıktığını göstermişlerdir. Bu çalışmada %65 hafif agrega ihtiva eden betonun ısı iletkenliği %55 hafif agregalı betonun ısı iletkenliğinden daha küçük çıkmıştır. Kısmi vd., kısmen geleneksel agrega yerine genleştirilmiş kil ve polistiren karışımı kullanarak, düşük ısı iletkenlik değerleri elde etmişlerdir. Shafigh vd., yapmış oldukları çalışma ile düşük yoğunluklu betonun ısı iletkenliğinin normal betonun yarı

değerine kadar küçüldüğünü göstermişlerdir. Sarıışk ve Sarıışık, EPSli betonda ısı iletkenliği 0.33 W/mK olarak elde etmiştir.



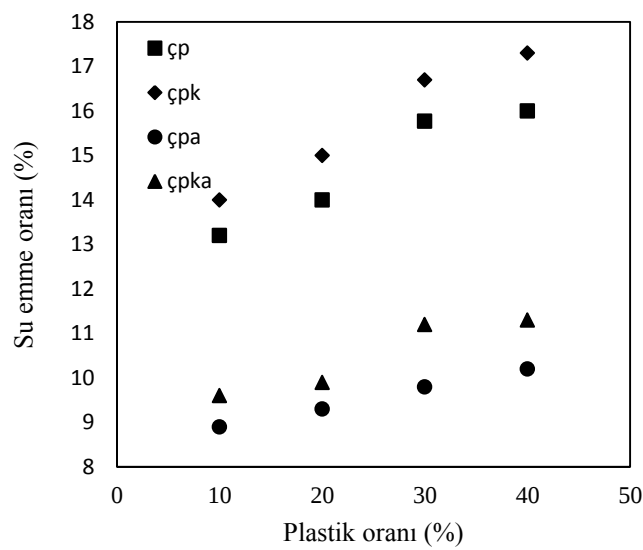
şekil 6.5. Aynı şartlarda hazırlanan Çimento/kum/akışkanlaştırıcı katkı iletkenliğinin PET ve plastik oranı ile değişimi

Şekil 6.5. incelendiğinde, hafif agregalar olarak plastik atıkların kullanıldığı beton için ısı iletkenliğin daha düşük olduğu saptanmıştır. Literatür değerlerine bakıldığında bu sonucun literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

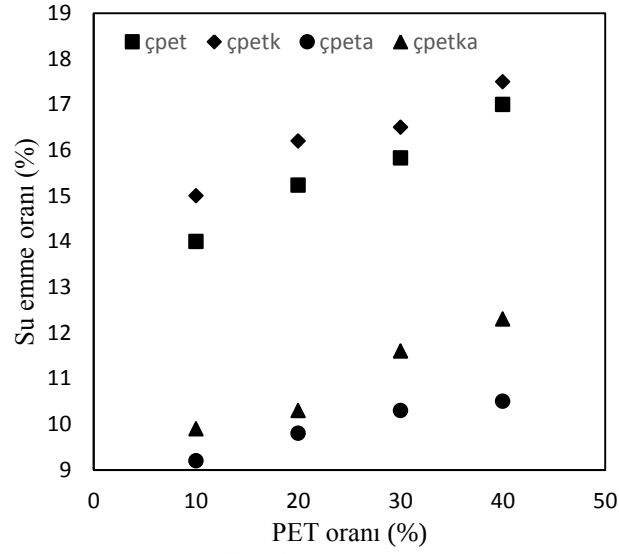
6.3 Su Emme Deneyi

Sertleşmiş betonun su emme oranı tayini TS 3624'e göre yapılmıştır. Hazırlanan beton örneklerin etüv kurusu değerleri ve suya doygun ağırlıkları tespit edilmiştir. Bu değerler (5.3) bağıntısında yerine konarak betonların su emme oranları hesaplanmıştır. Su emme miktarı hafif betonlar için dikkatle incelenmesi gereken özelliklerden biridir. Hafif agreganın su tutma oranı betonun su emme oranını etkilemektedir. Gözenek hacmi yüksek olan agregaların su tutma oranları daha yüksektir. Türkmen ve Kantarcı, hafif agregalar katkılı betonların kapilerite katsayısı ve porozitelerini inceledikleri çalışmalarında, betona eklenen hafif agregalar miktarı arttıkça hafif agregalar katkılı betonların kapilerite katsayısı ve porozitelerinin arttığını belirlemişlerdir. Kullanılan PET ve plastik hafif agregalar olarak değerlendirilmesine rağmen gözenekli bir yapıya sahip olmayışı nedeniyle su emme oranındaki artış çok daha az olmuştur, bu durum literatür ile uyumludur (Türkmen ve Kantarcı, 2006; Albano vd.,2009; Sadrmomtazi,2016).

Su emme oranı, üretilen taze betonların işlenebilirlik, birim ağırlık ve sertleşmiş betonların ise birim ağırlık, ısı yalıtımı ve donma direnci özelliklerini etkilemektedir.



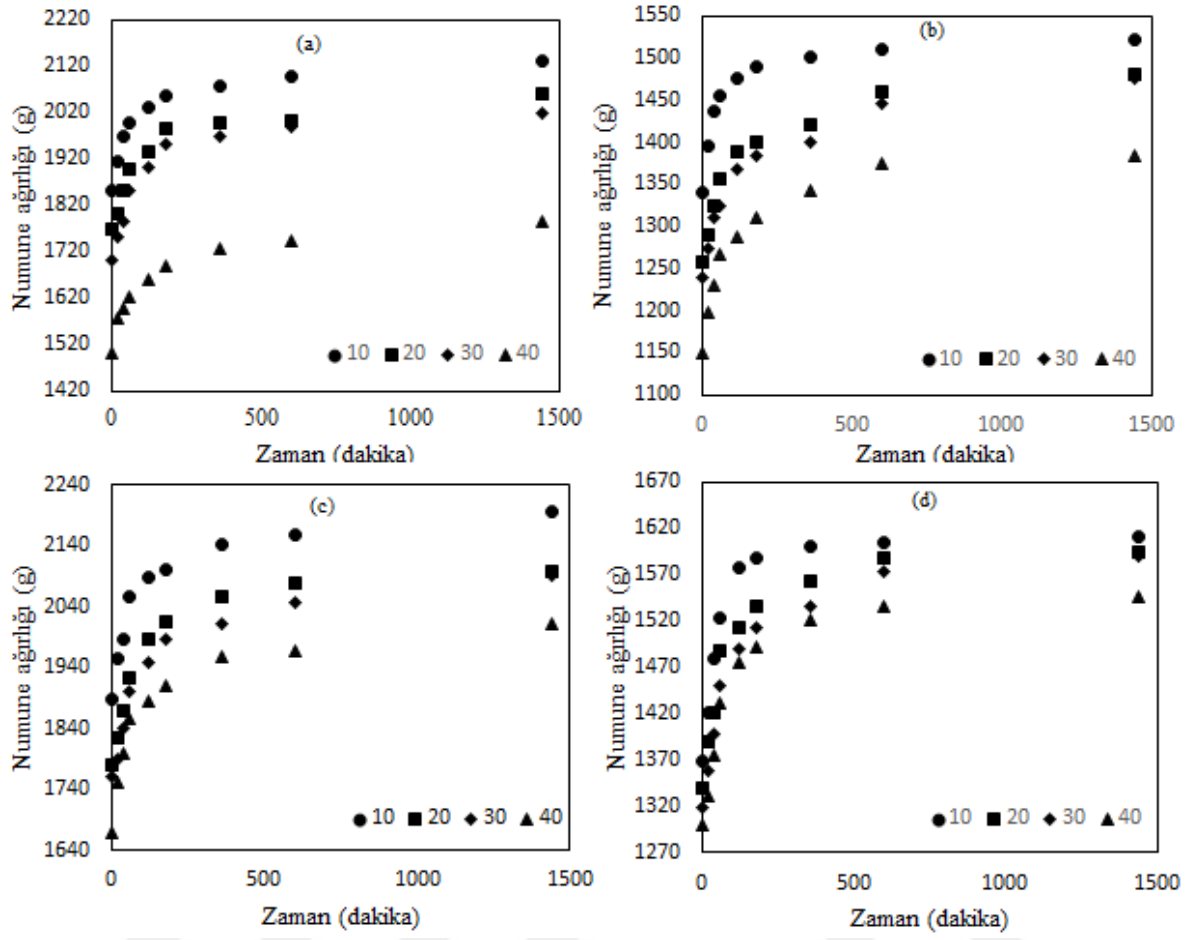
Şekil 6.6. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde su emme oranının plastik oranı ile değişimi



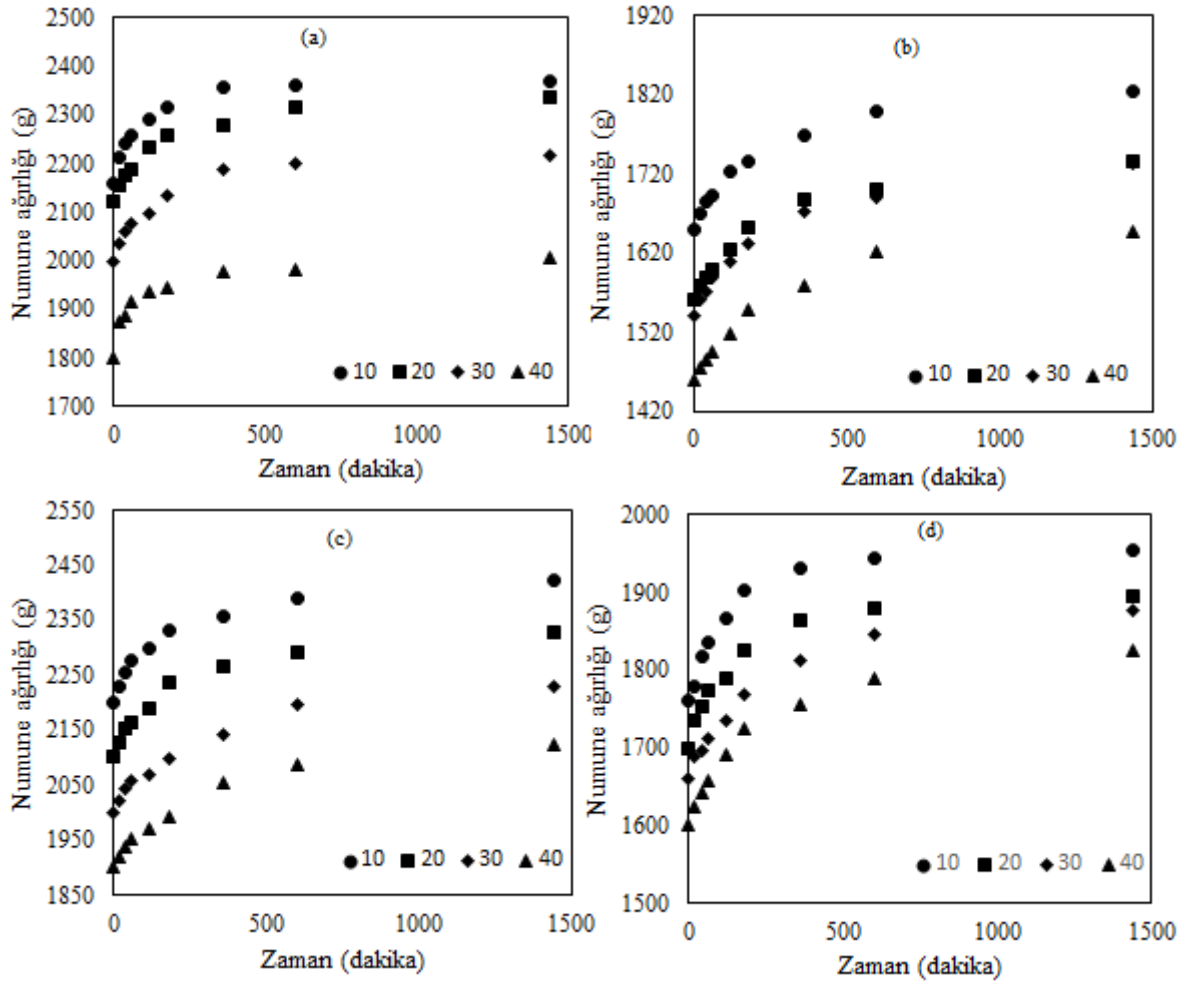
Şekil 6.7. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde su emme oranının PET oranı ile değişimi

Gerek PET katkılı ve gerekse plastik katkılı numunelerin su emme oranı %30 değerinin altında çıkmıştır. Dolayısıyla bu tür çimento betonlarının su ile direkt ilişkili yerlerde kullanılabilirliğini ve 0°C altındaki sıcaklıklarda donma, çatlama ve dağılma risklerinin olmayacağını gösterir. Şekil 6.8 ve 6.9’da su emme deneyi sırasında akışkanlaştırıcı ilave edilmeden hazırlanan örnekler ve akışkanlaştırıcı ilave edilerek hazırlanan örnekler için numune ağırlığının zamanla değişimi verilmiştir. Buna göre akışkanlaştırıcı ilave edilmeden hazırlanan örneklerde ilk 5-6 saat içerisinde, akışkanlaştırıcı ilave edilerek hazırlanan örnekler için ise yaklaşık 8 saat sonunda işlemin tamamlandığı söylenebilir. Akışkanlaştırıcı ilave edilen örneklerde yüzeyin daha gözeneksiz ve pürüzsüz olması su alma kapasitesini azaltmıştır.

Numunelerin bünyesine su kılcal kanallar vasıtasıyla emilir. Başlangıç anında tamamen kuru olan numune, su ile teması sağlandığında, hızlı bir şekilde suyu emerek ağırlığı artacaktır. Sonra süreç ilerledikçe numune suya doyacağı için su emme hızı da yavaşlayacaktır (Kaya, 2015; Kaya, 2016).



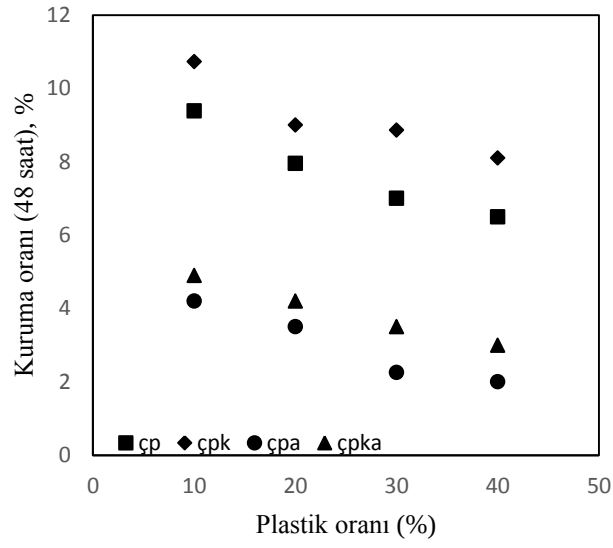
Şekil 6.8. Çimento/PET-plastik/kum katkılı numunelerde su emme esnasında numune ağırlığının zamanla değişimi (a)çp (b)çpk (c)çpet (d)çpetk



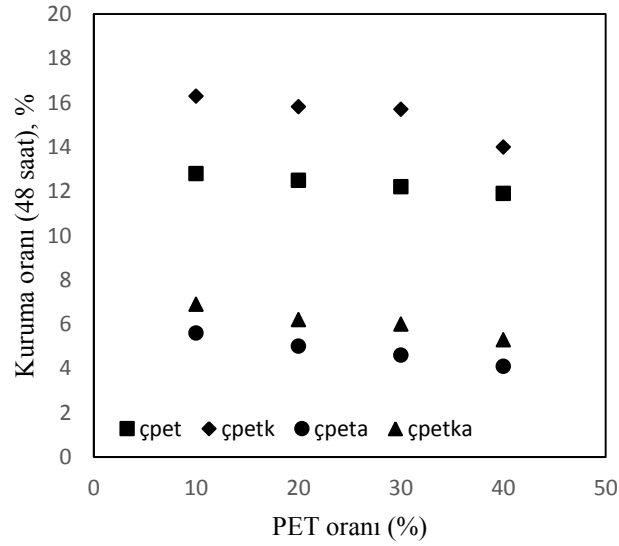
Şekil 6.9. Çimento/PET-plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde su emme esnasında numune ağırlığının zamanla değişimi (a)çpa (b)çpka (c)çpeta (d)çpetka

6.4. Kuruma Oranı

Numunelerin teneffüs kabiliyeti hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla yapılan deneylerin sonuçları Şekil 6.10-13'te verilmiştir. Sonuçlar PET/Plastik oranına karşılık, numunelerin 48 saatteki kuruma oranlarının değişimini göstermektedir.

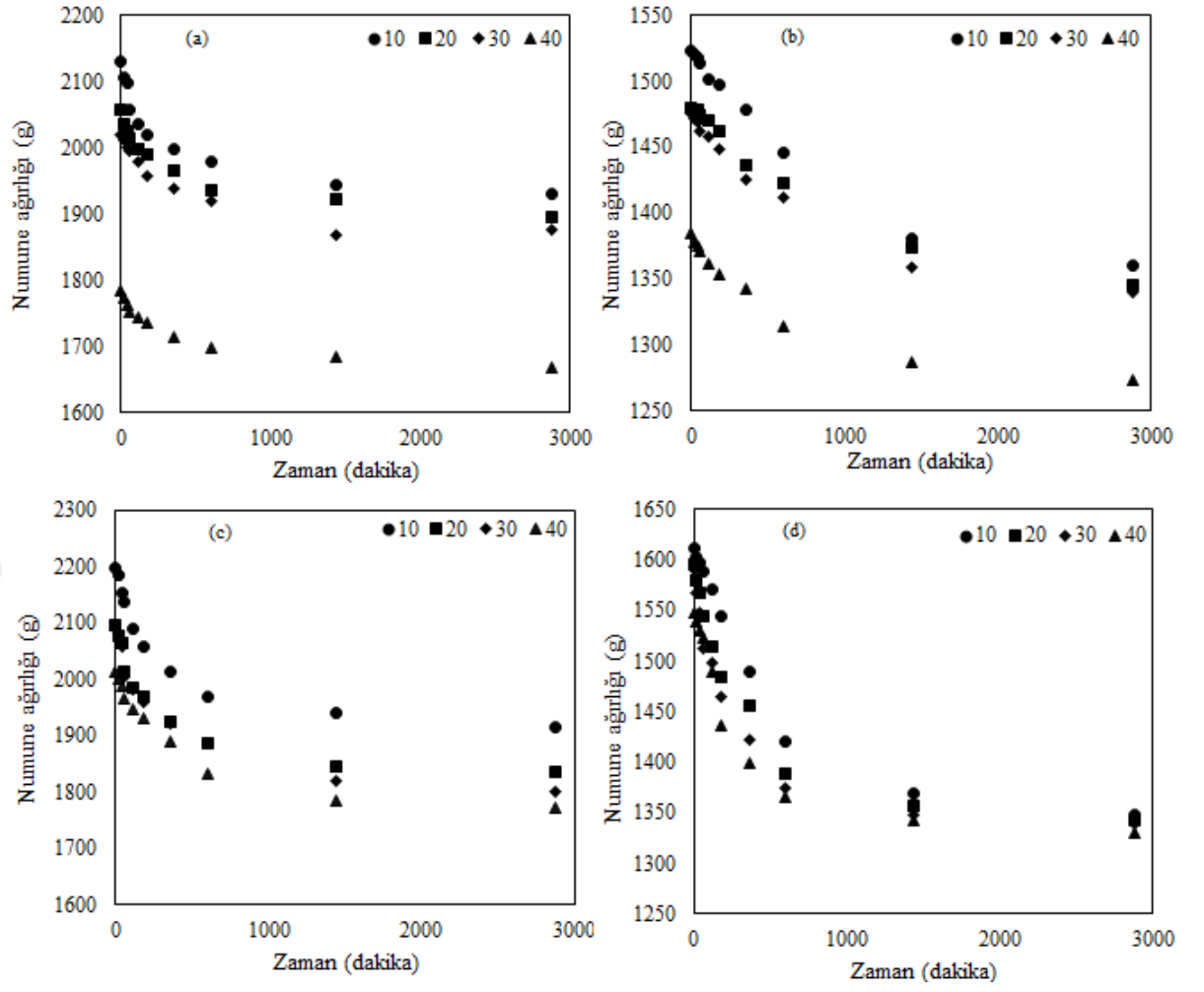


Şekil 6.10. Çimento/Plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde kuruma oranının plastik oranı ile değişimi

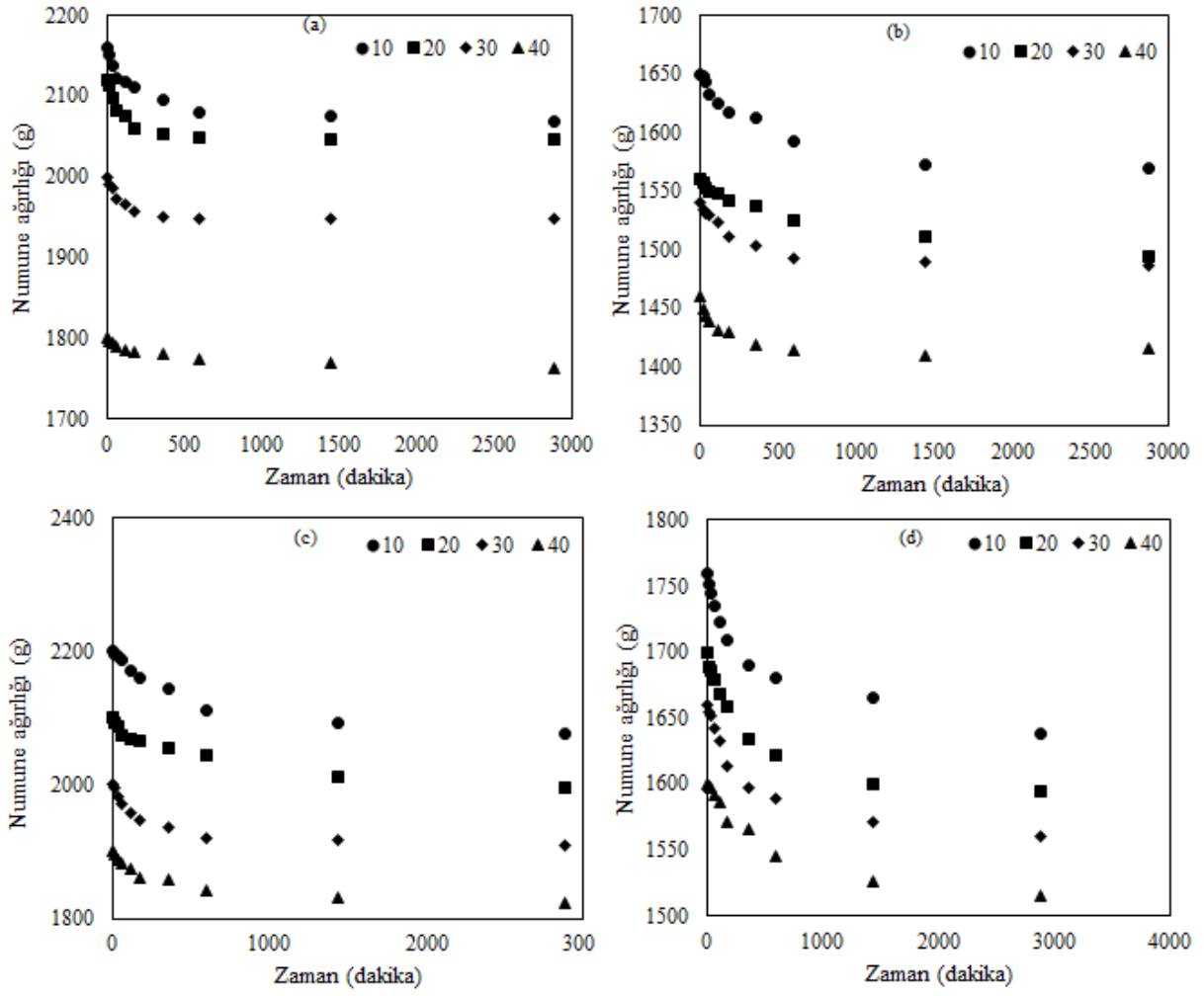


Şekil 6.11. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde kuruma oranının PET oranı ile değişimi

Şekillerin incelenmesi halinde, farklı karışımlarla hazırlanan numunelerin PET katılım oranları arttıkça kuruma oranlarının küçüldüğü görülmektedir. Çünkü PET'in su emme kabiliyeti yoktur. Bünyesindeki su, sadece bağlayıcı bölgede olup, bu nedenle PET oranı arttıkça bağlayıcı oranı küçülmekte ve uzaklaşabilecek su oranı azaldığından kuruma oranı da düşmektedir. Akışkanlaştırıcı ilave edilen örneklerin kuruma hızlarının daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum akışkanlaştırıcı ilavesi ile su oranındaki azalmadan kaynaklanmaktadır.



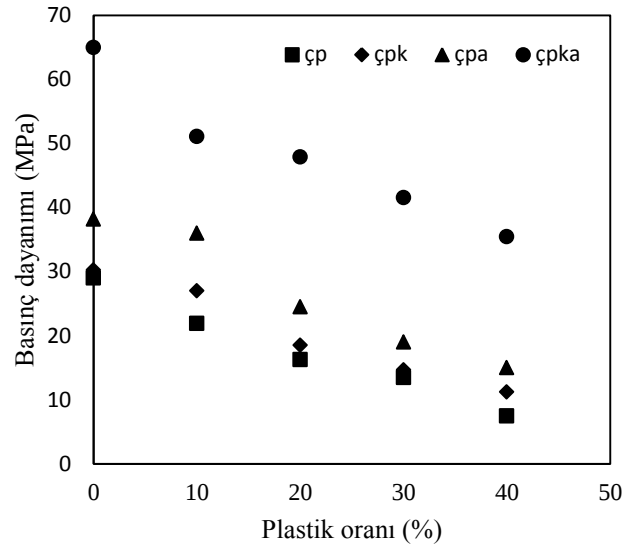
Şekil 6.12. Çimento/PET-plastik/kum katkılı numunelerde kuruma esnasında numune ağırlığının zamanla değişimi (a)çp (b)çpk (c)çpet (d)çpetk



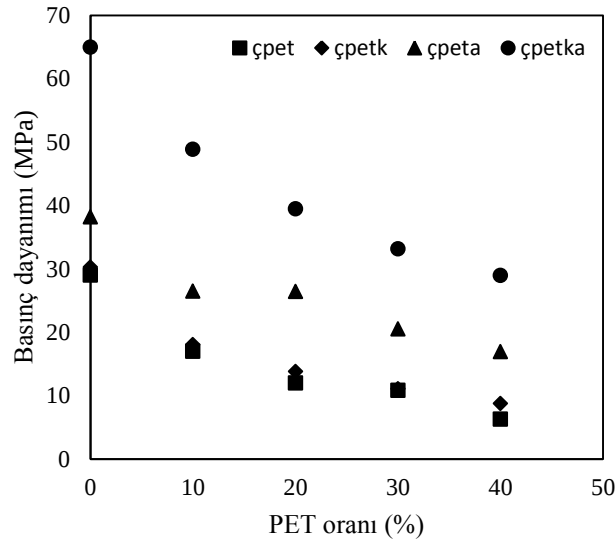
Şekil 6.13. Çimento/PET-plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde kuruma esnasında numune ağırlığının zamanla değişimi (a)çp (b)çpk (c)çpet (d)çpetk

6.5. Basınç Dayanımı

Beton numunelerin mekanik özellikleri üzerine PET ve Plastik atıkların etkisini belirleyebilmek amacıyla yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar Şekil 6.14-15'te verilmiştir. Verilen değerler 28 günlük kür süresi sonundaki değerlerdir.



Şekil 6.14. Çimento/Plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde basınç dayanımının plastik oranı ile değişimi



Şekil 6.15. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde basınç dayanımının PET oranı ile değişimi

Basınç dayanımının PET ve plastik oranı ile değişimini gösteren şekiller incelendiğinde hem PET hemde plastik katkılı betonların basınç dayanımının artan PET/plastik oranı ile düştüğü görülmektedir. Akışkanlaştırıcı kullanılarak elde edilen betonların basınç dayanımları daha yüksektir. Azalan su oranına bağlı olarak daha sıkı bir yapının oluşması ile dayanım artmıştır.

Plastik katkılı hazırlanan beton örnekleri için 28 günlük küp basınç dayanımı en yüksek 51.08 MPa, PET katılarak hazırlanan serisinde ise 48.85 MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler, her iki seri hafif betonun da ACI 213R-87’de, hava kurusu birim

hacim ağırlığı 1440 ile 1850 kg/m³ arasında olan taşıyıcı hafif betonlar için belirtilen 17.2 MPa dayanım değerinin oldukça üzerindedir. Birim ağırlık başına düşen basınç dayanımları dikkate alındığında, Çimento/plastik/kum/akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerden %10 plastik içeren örneğin %0.031 MPa/kg değeri ile normal ve hafif betonlar içinde en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir.

Benazzouk ve ark. , çimentoya sırasıyla %30, 40, 50 oranında lastik parçaları karıştırılarak hazırlanan numunelerde 0.625, 0.516, 0.470 g/cm³ yoğunluk ve 23.30, 16.00, 10.50 MPa basınç dayanımı değerleri elde etmişlerdir. Sezer ve Yazıcı, farklı kür koşullarının polimer katkılı harçların eğilme ve basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir ve harçlarda çimento yerine kullanılan polimer oranının artmasına bağlı olarak tüm kür koşullarında basınç ve eğilme dayanımlarının düştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuç mevcut çalışmanın sonuçları ile uyum içindedir.

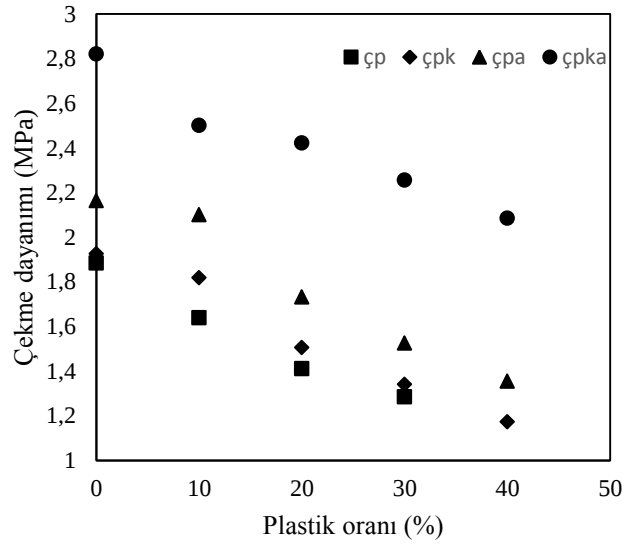
Betona kolay işlenebilmesi için katılan su miktarı betonda kılcal boşluklara sebep olarak betonun mukavemet değerinin azalmasına neden olmaktadır. Ancak betondaki bu olumsuz etkileri azaltmak için bir takım önlemler alınması gerekmektedir. Beton içerisindeki fazla suyu sonradan almak veya çimento tanelerini homojen bir şekilde dağıtan bir takım akışkanlaştırıcılarla su/çimento (s/ç) oranını düşürmek bu önlemlerden bir kaçıdır. Beton üretiminde kullanılan karışım suyu miktarı, mukavemet üzerine çok büyük etki yapmaktadır. Betona konulan su, öncelikle çimentonun hidrasyonunu sağlar, sonra agrega tanelerini ıslatır ve taze betonun kalıba yerleştirilmesini kolaylaştırır. Belli bir değerdan sonra su miktarı artıkça beton mukavemetinde önemli azalmalar görülür.

6.6. Çekme Dayanımı

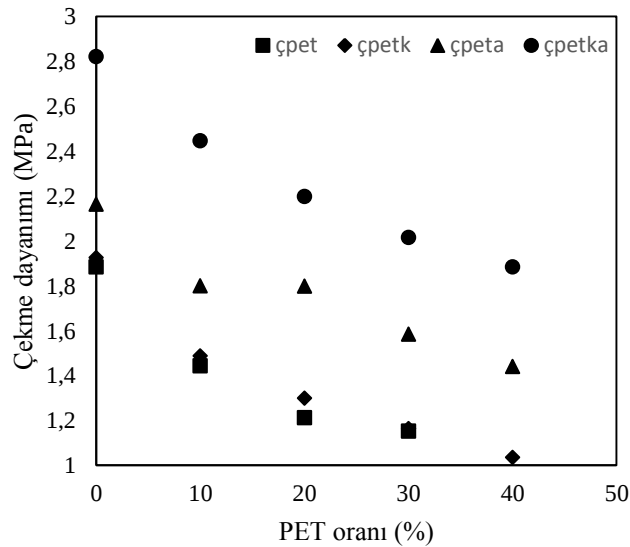
Yapıların tasarım hesaplamalarında genellikle basınç dayanımı sonuçları kullanılır. Ancak, gevrek bir malzeme olan betonun, çekme dayanımı çok düşük olduğundan, beton içerisindeki çatlaklar çekmeden dolayı oluşmaktadır. Bu nedenle, betonun çekme dayanımının bilinmesi, çatlakların ve yapı ile ilgili analizlerin yapılabilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır.

Kütle betonlarında, su depolarında, nükleer santrallerde, hava alanlarında, öngerilmeli betonlarda ve yol yapımlarında çatlak oluşmaması için çekme dayanımını bilmek büyük bir önem taşımaktadır.

Basınç dayanımı sonuçları, TS500 standardına göre (5.1) bağıntısı kullanılarak çekme dayanımına dönüştürülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.16-17’de verilmiştir.



Şekil 6.16. Çimento/Plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde çekme dayanımının plastik oranı ile değişimi



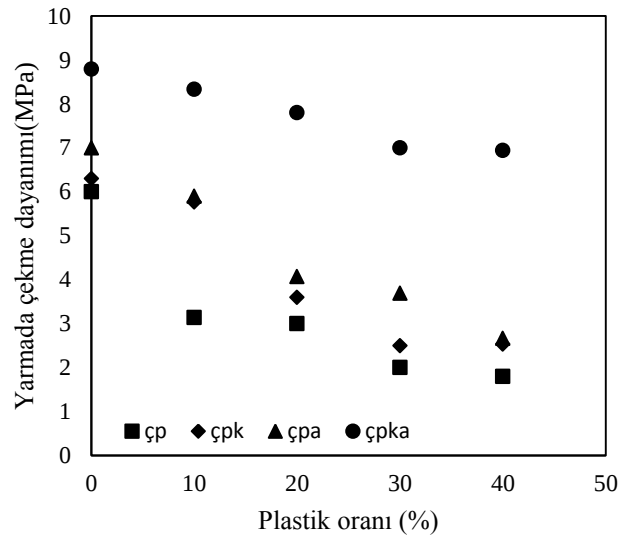
Şekil 6.17. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde çekme dayanımının PET oranı ile değişimi

Şekil 6.16-17 incelendiğinde yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Çekme dayanımları kullanılarak yapılan hesaplama sonucu elde edilen veriler grafiğe geçirilmiştir.

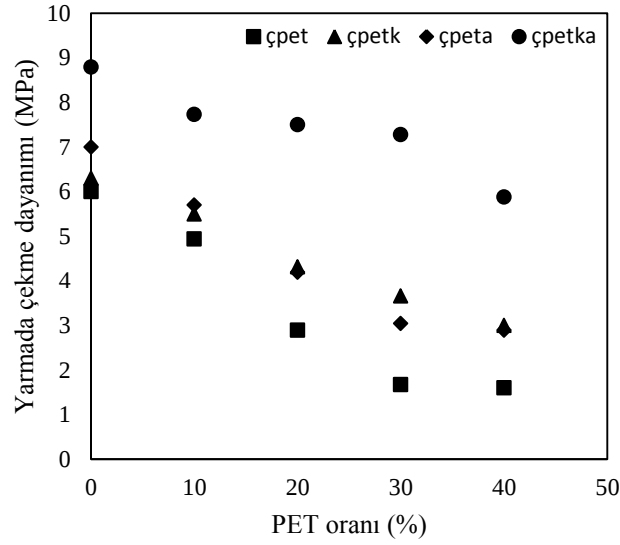
Agrega olarak PET kullanılarak hazırlanan hafif betonların çekme dayanımlarında plastiğe göre daha fazla düşme olduğu gözlenmiştir. Bu durum plastik atıkların boyutlarının büyük olmasından kaynaklanmış olabilir. PET ve plastik ilave edilmeden hazırlanan numunelerin çekme dayanımları daha yüksektir.

6.7. Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı, beton ve betonarmede yukarıdan gelen noktasal ve doğrultu olarak düşünülebilecek yükler altında betonun ayırmaya karşı direncini göstermektedir. Yarmada çekme dayanımı, normal ağırlıklı betonlara göre hafif betonlarda kullanılan agrega fiziksel ve mekanik özelliklerinin daha zayıf olmasından dolayı daha az olmaktadır.



Şekil 6.18. Çimento/plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yarmada çekme dayanımının plastik oranı ile değişimi



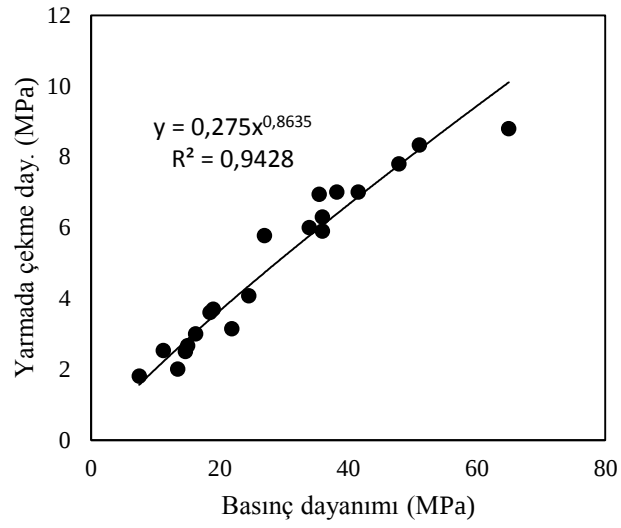
Şekil 6.19. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yarmada çekme dayanımının PET oranı ile değişimi

Yarmada çekme deneyleri sonucu elde edilen veriler incelendiğinde PET/plastik oranındaki artma ile azaldığı görülmektedir. Plastik ilaveli betonların yarmada çekme dayanımları PET ilaveli olanlara göre azda olsa yüksek çıkmıştır. Akışkanlaştırıcı ilavesi ile elde edilen beton örneklerin yarmada çekme dayanımları daha yüksek çıkmıştır.

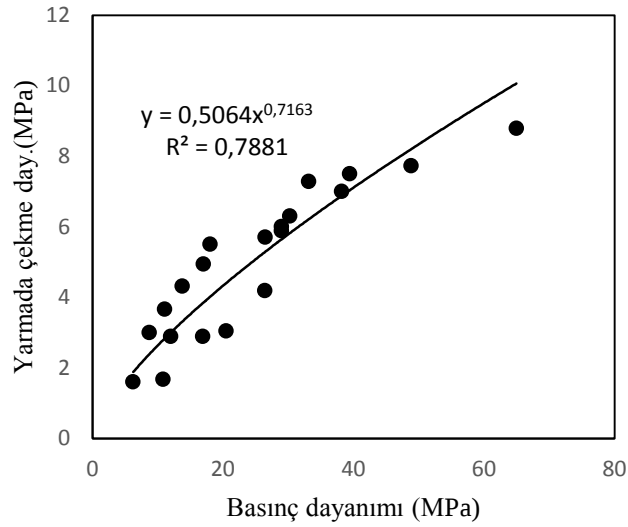
Lee (2002), uçucu küllü betonların yarmada çekme dayanımlarını, basınç dayanımlarının yaklaşık %12'si olarak bulmuştur. Normal betonlarda bu oranın %8-10 arasında olduğunu, uçucu küllü betonların çekme dayanımlarına önemli bir değişiklik yapmadığını belirtmiştir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneyde ise 28 günlük yarmada çekme dayanımları basınç dayanımlarının %13-20 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Koçkal (2008), hafif betonların yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranlarının normal betonunkilerle benzer özellik gösterdiğini belirtmiştir.

Ayrıca hazırlanan beton numunelerinin basınç ve yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişki de Şekil 6.20-21'de verilmiştir.



Şekil 6.20. Çimento/Plastik/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yarmada çekme dayanımının basınç dayanımı ile değişimi



Şekil 6.21. Çimento/PET/kum/akışkanlaştırıcı katkılı numunelerde yarmada çekme dayanımının basınç dayanımı ile değişimi

Hazırlanan betonların basınç dayanımlarına göre yarmada çekme dayanımlarının tahminine yönelik bağıntılar aşağıda verilmiştir.

Agrega olarak atık plastik kullanılan beton için;

$$f_{cky} = 0,275f_{ck}^{0,8634} \quad R^2 = 0.9428$$

ve agrega olarak atık PET kullanılan beton için;

$$f_{cky} = 0.506f_{ck}^{0,7163} \quad R^2 = 0.7881$$

olarak bulunmuştur.

Daha önce, köpük betonlar için basınç dayanımlarına göre yarmada çekme dayanımlarının tahminine yönelik bir araştırma yapılmış ve ilişkinin üstel olduğu bulunmuştur (Davraz, vd., 2015).



7. SONUÇLAR

Agrega olarak atık PET ve plastiğin kullanıldığı kumlu ve kumsuz olarak hazırlanan hafif betonlar için fiziksel ve mekanik özellikler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Ayrıca karışımların su oranını düşürmek amacıyla aynı örnekler süprerakışkanlaştırıcı kullanılarak ta hazırlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre;

- Sonuçlar, plastik ve PET oranının artması ile yoğunluk değerlerinin azaldığını göstermektedir. Bu küçülme plastik atıkların yoğunluğunun yaklaşık 1.1 g/cm^3 ($0.9-1.4 \text{ g/cm}^3$) olmasından kaynaklanmaktadır. PET'in yoğunluğu ise $1.30-1.38 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Akışkanlaştırıcı ilave edilerek hazırlanan numunelerin yoğunluk değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, su oranının düşmesiyle birlikte artan çimento ve kum miktarından kaynaklanmaktadır.
- Gerek PET ve gerekse plastik atıkların katılım yüzdeleri arttıkça ısı iletim katsayıları küçülmektedir. Bu küçülmenin sebeplerinden biri betondan daha düşük ısı iletim katsayısına sahip plastik ve PET ilavesidir. Grafiklerin incelenmesi halinde en küçük ısı iletim katsayılarının %40 oranında PET/Plastik katkılı numunelerde olduğu görülmektedir. Buna ilave olarak kum ilavesinin de ısı iletim katsayısını düşürdüğü görülmüştür. Akışkanlaştırıcı ilavesi ile yapılan deneyler sonucu hazırlanan numunelerde de ısı iletim katsayısının düştüğü ama bu düşüşün akışkanlaştırıcı eklenmeyen numunelere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Bu durumun akışkanlaştırıcı ilavesiyle azalan su oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan ölçümlerde PET ilaveli gözeneksiz kuru haldeki betonun en düşük ısı iletim katsayısı 0.33 W/mK ve plastik ilaveli betonun ise 0.25 W/mK olarak ölçülmüştür. Ayrıca, Plastik ve PET kullanılarak hazırlanan örneklerin aynı oranlar için karşılaştırması yapılmış ve hafif agregada olarak plastik atıkların kullanıldığı beton için ısı iletkenliğinin daha düşük olduğu saptanmıştır.
- Gerek PET katkılı ve gerekse plastik katkılı numunelerin su emme oranı %30 değerinin altında çıkmıştır. Dolayısıyla bu tür çimento betonlarının su ile direk ilişkili yerlerde kullanılabileceği ve 0°C altındaki sıcaklıklarda donma, çatlama ve dağılma risklerinin olmayacağını gösterir. Su emme deneyi sırasında

akışkanlaştırıcı ilave edilmeden hazırlanan örnekler ve akışkanlaştırıcı ilave edilerek hazırlanan örnekler için numune ağırlığının zamanla değişimi incelendiğinde akışkanlaştırıcı ilave edilmeden hazırlanan örneklerde ilk 5-6 saat içerisinde, akışkanlaştırıcı ilave edilerek hazırlanan örnekler için ise yaklaşık 8 saat sonunda işlemin tamamlandığı söylenebilir. Akışkanlaştırıcı ilave edilen örneklerde yüzeyin daha gözeneksiz ve pürüzsüz olması su alma kapasitesini azaltmıştır.

- Kuruma oranlarının tespit edilmesine yönelik yapılan deneyler sonunda, farklı karışımlarla hazırlanan numunelerin PET katılım oranları arttıkça kuruma oranlarının küçüldüğü görülmektedir. Çünkü PET'in su emme kabiliyeti yoktur. Bünyesindeki su, sadece bağlayıcı bölgede olup, bu nedenle PET oranı arttıkça bağlayıcı oranı küçülmekte ve uzaklaşabilecek su oranı azaldığından kuruma oranı da düşmektedir. Akışkanlaştırıcı ilave edilen örneklerin kuruma hızlarının daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum akışkanlaştırıcı ilavesi ile su oranındaki azalmadan kaynaklanmaktadır.
- Basınç dayanımının PET ve plastik oranı ile değişimini gösteren şekiller incelendiğinde hem PET hemde plastik katkılı betonların basınç dayanımının artan PET/plastik oranı ile düştüğü görülmektedir. Akışkanlaştırıcı kullanılarak elde edilen betonların basınç dayanımları daha yüksektir. Azalan su oranına bağlı olarak daha sıkı bir yapının oluşması ile dayanım artmıştır.
- Yarmada çekme deneyleri sonucu elde edilen veriler incelendiğinde PET/plastik oranındaki artma ile yarmada çekme dayanımının azaldığı görülmektedir. Plastik ilaveli betonların yarmada çekme dayanımları PET ilaveli olanlara göre azda olsa yüksek çıkmıştır. Akışkanlaştırıcı ilavesi ile elde edilen beton örneklerin yarmada çekme dayanımları daha yüksek çıkmıştır.

Enerji kaynakları açısından büyük ölçüde dışa bağımlı olan ülkemiz için, tasarruf büyük bir önem taşımaktadır. Düşük ısı iletkenliği, düşük kuru yoğunluğu, üretimin amaçlanan ürüne göre esnetilebilmesi, hemen her bölgede kolayca ve yerel kaynaklara dayalı olarak üretilebilir olması farklı agregalar kullanılarak üretilen hafif betonu ülkemiz açısından önemli kılmaktadır.

KAYNAKLAR

Abdel-Azım A. Abdel-Azım, 1996. “Unsaturated Polyester Resins From Poly (Ethylene Terephthalate) Waste For Polymer Concrete”, Polymer Engineering And Science, December 1996, 36(24), 2973-2977.

ACI 213R-87., 1987. ACI Manual of Concrete Practice. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete.

ACI 318-95, 1996. Building Code Requirements of Structural Concrete, Use of Concrete in Buildings-Design, Specifications and Related Topics, ACI Manual of Concrete Practice Part 3, Detroit, Michigan.

ACI 363R-92, Materials and General Properties of Concrete, 1994. State of The Art Report on High Strength Concrete, ACI Manual of Concrete Practice Part 1, Detroit, Michigan.

ACI Committee 213, 1970. Guide for structural lightweight aggregate concrete, Paris. aggregates in concrete Construction and Building Materials.

Aiad, I., 2003. “Influence of Time of Addition of Superplasticizer on the Rheological Properties of Fresh Cement Pastes”, Cement and Concrete Research, 33, 1229-1234.

Aitcin, P.C., 1998. High-Performance Concrete. E and FN SPON, 650 p, London

Aitcin, P.C., 2004. High Performance Concrete, E.&F.N. SPON, New York.

Akbaba, H., 2007. Agrega Türünün Hafif Blokların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Afyonkarahisar Kocatepe Üniv. Fen Bilimleri Entitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim dalı Yüksek Lisans Tezi. 105.

Akman, M. S., 1996. ‘Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması’, 4. Ulusal beton kongresi.

Akman, M.S., 1990. “Yapı Malzemeleri”, İ. T. Ü. Yayın No.: 1408, İstanbul.

Akman, S., 1999. “Role of Admixtures on the Properties of Fresh High Performance Concrete, RILEM Symposium, Mexico.

Aksoy, S.H., 1995, “Hafif Betonların Dayanım Dayanıklılık ve Ekonomik Yönden Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 28.

Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., Gutierrez, A., 2009. “Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios”, Waste Management 29, 2707–2716.

Al-Maneer, A.A., Dala, T.R., 1997. Concrete Containing Plastic Aggregates. Concrete International, 19(8), 47-52.

Anabal, F.Y., 2007. Pet atıkların endüstride değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Bilimleri Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Anonim, 1979. ACI 213R-79, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete.

Anonim, 1997. TS EN 932-1, Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler, Kısım 1, Numune Alma Metotları. TSE, Ankara. Şimşek, O., (2012), Beton ve Beton Teknolojisi, 4. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Anonim. 2001. Plastik Ürünleri Sanayii, DPT, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.

Anwar Hossain, K.M., 2004. Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete. Cement and Concrete Research, 34, 283-291.

Aruntaş, H.Y. 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri. Gazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Der., 21:193-203.

Asakura, E., Yoshida, H., Nakae, H., 1992. “Influence of Superplasticizer on Fluidity of Fresh Cement Paste with Different Clinker Phase Composition”, 9th Int. Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, Vol. IV, 570-576.

ASTM C 125, 1994. Standart Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C330-69, “Standart Specification for lightweight aggregates for structures concrete”.

ASTM, Standard Specifications for Chemical Admixtures for Concrete (ASTM C494-C494M-99), 2002 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04-02, Concrete and Aggregates.

Awaja, F. and Pavel, D. 2005. Recycling of PET. European Polymer Journal Volume:41, pp. 1453-1477.

Babu, D. S., Babu, G. K., 2003. “Behaviour of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete Containing Silica Fume”, Cement and Concrete Research, 33, 755-762.

Babu, D. S., Babu, G. K., Tiong-Huan, W., 2005. Properties of Lightweight Expanded Polystyrene Aggregate Concretes Containing Fly Ash. Cement and Concrete Research, 35, 1218-1223.

Balaban, A., ve Şen, E., 1988. Tarımsal Yapılar, A.Ü.Ziraat Fakültesi, Yayın No:845.

Basile, F., Biagini, S., Ferrari, G., Collepari, M., 1989. “Influence of Different Sulfonated Polymers on the fluidity of Cement Paste”, ACI SP-119, 209-220.

Bonen, D., Sarkar, S.L., 1995. “The Superplasticizer Adsorption Capacity of Cement Pastes, Pore Solution Composition and Parameters Affecting Flow Loss”, Cement and Concrete Research, Vol. 25:1423- 1434.

Boragafio, J.R., Macias, A., 1992. “Rheological Properties of Cement Mixes Containing Different Organic Dispersants”, 9th Int. Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, Vol. IV, 557-563.

Chandra, S. and Berntsson, L., 2003. Lightweight Aggregate Concrete. 430 p, Noyes Publications, USA.

Chandra, S., Björnström, J., 2002. “Influence of Cement and Superplasticizer Type and Dosage on the Fluidity of Cement Mortars-Part I”, Cement and Concrete Research, Vol.32, 1605-1611.

Chen, B., Liu, N., 2013. “A Novel Lightweight Concrete-Fabrication and Its Thermal and Mechanical Properties”, Construction and Building Materials, 44, 691-698.

Choi, Y.W., Moon, D.J., Chung, J-S, Cho, S.K., 2005. Effects Of Waste Pet Bottles Aggregate On The Properties Of Concrete. Cement And Concrete Research 35, Pp.776-781.

Collepari, M., 2005. “Admixtures-Enhancing Concrete Performance”, 6th Int. Congress on Global Construction and Ultimate Concrete Opportunities, Dundee.

Collepari, M., Corradi, M., Valenti, M., 1981. “Influence of Polymerization of Sulfonated Naphthalene Condensate and Its Interaction with Cement”, ACI SP-86, 485-498. Concrete International, 2, 33-62.

Corinaldesi, V., Mazzoli, A., Siddique, R., 2016. Characterization of Lightweight Mortars Containing Wood Processing by-Products Waste. Construction and Building Materials, 123, 281-289.

Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., Kuru, M., 2015. Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri, 9. Ulusal Beton kongresi, Nisan.

Demirboğa, R., 1999. Silis Dumanı ve Uçucu Külün Perlit ve Pomza İle Üretilen Hafif Beton Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Diler, S., 1994. “Tarımsal Yapılarda Isı Yalıtımı ve Yapı Malzemelerinin Isı İletkenliklerinin Ölçülmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 26-58.

Eastman, C. 1995. Drying eastapack “PET polyester for use in preforms for bottles and containers”. Publication TRC-91, Eastman Chemical Company, Kingsport, TN, USA.

Ekmekyapar, T. ve Örüng, İ., 1993. İnşaat Malzeme Bilgisi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Ders Yayınları No:145, Erzurum.

Elzafraney, M. , Soroushian, P., Deru, M., 2005. Development Of Energy-Efficient Concrete Buildings Using Recycled Plastic Aggregates. Journal Of Architectural Engineering, 11(4), 122-130.

Erdoğan, T. Y., (1995), Betonlu oluşturan malzemeler, Agregalar, Türkiye Hazır Beton Birliği, Ankara.

Erdoğan, T. Y., (1997), Admixtures for Concrete, Middle East Tecnical University, Ankara, Türkiye.

Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., 2007. ‘Puzolanik Mineral Katkılar Ve Tarihi Geçmişleri’, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara.

Erdoğan, T., 2003. Beton, 1. Baskı, ODTÜ Geliřtirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.

Erdoędu, Ş. ve Kurbetçi, Ş., 2003. ‘Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri’, TMH Türkiye Mühendislik Haberleri, [426 (2003-4): 115-120.

Etcheberria, M., Pacheco, C., Meneses, J. M., Berridi, I., 2010. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates, Construction and Building Materials, 24, 1594–1600.

European Aggregates Association (UEPG), UEPG annual review 2012.

European Ready Mixed Concrete Organization (ERMCO), http://www.ermco.eu/documents/ermco-documents/ermco-statistics-2012_final.pdf, 02, 02, 2014.

Flatt, R.J., 1997. “Interaction of Superplasticizers with Model Powers in High Alkaline Medium” 5th CANMET/ACI Int. Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Rome, 743-762.

Flatt, R.J., Houst, Y.F., 2001. “A Simplified View on Chemical Effects Perturbing the Action of Superplasticizers”, Cement and Concrete Research, 31, 1169-1176.

Galvão, j. C. A., Portella, K. F., Joukoski, A., Mendes, R., Ferreira, E. S., 2010. Use of Waste

Gavela, S., Karakosta C., Nydriotis, C., Kaselouri–Rigopoulou, V., Kolas, S., Tarantılı, P. A., Magoulas, C., Tassios, D., Andreopoulos, A., 2004. A Study of Concretes Containing Thermoplastic Wastes as Aggregates. Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, Spain.

Ghaemy, M. and Mossaddegh, K., 2005. 'Depolymerisation of poly(ethylene terephthalate) fibre wastes using ethylene glycol', Polymer Degradation and Stability, 90, 570-576.

Gönen, B.C., 2012. Hazır Beton Üretiminde Kaliteyi Etkileyen Parametrelerin Spss Yöntemiyle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gregorova, V., Ledererova, M., Stefunkova, Z., 2016. Investigation of Influence of Recycled Plastics from Cable, Ethylene Vinyl Acetate and Polystyrene Waste on Lightweight Concrete Properties. Procedia Engineering, 195,127-133.

Griesser, A., 2002.Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures, PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

Gül, R. ve Geçten, O., 1994. Hafif agregalı betonun kullanılabilirliği, DSİ Teknik Bülteni, sayı 81, sayfa 31-36, Ankara.

Güler, Ç., Çobanoğlu, Z. 1997. Plastikler. Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi. Sağlık Bakanlığı TSH Genel Müdürlüğü. No: 46. ISBN: 975-8088-51-3, Ankara.

Hanna, E., Luke, K., Perraton, D., Aïtcin, P.C., 1989. “Rheological Behavior of Portland Cement in the Presence of Superplasticizer”, ACI SP-119, 171-188.

Hassani, A., Ganjidoust, H., Maghanaki, A.A., 2005. “Use Of Plastic Waste (Poly-Ethylene Terephthalate) In Asphalt Concrete Mixture As Aggregate Replacement”, Waste Management & Research, 23, 322-327.

Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., Ghorbel, E., 2010. Use of waste marble Polymers in Concrete for Repair of Dam Hydraulic Surfaces, Construction and Building Material.

Heufers, H., ve Wiering, 1976. Leichter Normalbeton, (lightweight normal concrete), Betonwerk Fertigteil Technik, 11, 525-528.

Houst, Y.F., Flatt, R.J., Brown, P., Hofmann, H., Widmer, J., Sulser, U., Maeder, U., Burge, T.A., 1999. “Influence of Superplasticizer Adsorption on the Rheology of Cement Pastes” Int. RILEM Conference on the Role of Admixtures in High Performance Concrete, France, 387- 402.

Hsu, K.C., Chiu, J.,J., Chen, S.D., Tseng, Y.C., 1999. ”Effect of Addition Time of Superplasticizer on Cement Adsorption and on Concrete Workability”, Cement and Concrete Composites, 21, 425-430.

Hsu, K.C., Chen, S.D., Su, N., , 2000. “Water-Soluble Sulfonated Phenolic Resins. III. Effects of Degree of Sulfonation and Molecular weight on Concrete Workability”, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 76 1762-1766.

İnt.Kyn.1, http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/beton/3.HTM, 21.05.2016.

Jansen, D.C., Kiggins, M.L., Swan, C.W., Malloy, R. A., Kashi, M.G., Chan, R.A., Javdekar, C., Siegal, C., Weingram, J., 2001. Lightweight Fly Ash-Plastic Aggregates İn Concrete Transportation Research Record, N 1775, 44-52.

Jiang, S., Kim, B.G, Aİtcin, P.C., 1999. “Importance of Adequate Soluble Alkali Content to Ensure Cement/Superplasticizer Compatibility”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 71-78.

Kan, A., Demirboğa, R., 2009. “A novel material for lightweight concrete production” *Cement & Concrete Composites*, 31, 489–495.

Katkı Üreticileri Birliği (KÜB), <http://www.kub.org.tr/genel.html>, 2014.

Kaya, A., Kar, F., 2015. “An insulation plaster with waste expanded polystyrene”, 19th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), 7-10 July, Budapest, Hungary.

Kaya, A., Kar, F., 2016. “Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin” *Construction and Building Materials*, 105, 572-578.

Kim, B.G., 2000. Compatibility Between Cements and Superplasticizers in High Performance Concrete: Influence of Alkali Content in Cement and of the Molecular weight of PNS on the Properties of Cement Pastes and Concretes, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Canada.

Koçkal, N.U., Özturan, T., 2008. "Farklı Hafif Uçucu Kül Agregaları İle Üretilen Taşıyıcı Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *Beton 2008: Hazır Beton Kongresi, İstanbul, Türkiye*, 19-21 Haziran, 176-186.

Koide, H., Tomon, M., Sasaki T., 2002. Investigation Of The Use Of Waste Plastic As An Aggregate For Lightweight Concrete. *Sustainable Concrete Construction*, London, Pp. 177-186.

Kong, Y., Hay, J.N., 2003. Multiple melting behaviour of poly(ethylene terephthalate), *Polymer*, 44, 623–633.

Kosmatka S.H and Panarese WC (1992). *Design and Control of Concrete Mixture*. Portland Cement Association Publication, Illinois, USA.

Köseoğlu, K., Üzümlü, O., Andiç, Ö., Çakır, 2015. Beton Yapı Bileşenlerinin Isıl Yalıtım Özellikleri Yönünden İncelenmesi: Bir Derleme, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji* GU J Sci Part:C 3(3):545-553

Lee, W.K.W, van Deventer, J. S. J., 2002. The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements, *Cement and Concrete Research*, 32(4), 577-584.

Liu, N., Chen, B., 2014. “Experimental Study of The Influence of EPS Particle Size on The Mechanical Properties of EPS Lightweight Concrete”, *Construction and Building Materials*, 68, 227-232.

- Luke, K., Aİtcin, P.C., 1990.** “Effect of Superplasticizer on Ettringite Formation”, *Advances in Cementitious Materials*, American Ceramic Society, 16, 1042-1122.
- Mahmoud, A., Halim, A.-G., 2004.** Structural Material From Waste Plastic. *Journal Of Applied Polymer Science*, 91, 2543–2547.
- Malhotra, V.M., 1976.** No-Fines Concrete-Its properties and applications, *ACI Journal*, November, 628-644.
- Malloy, R., Desai, N., Wilson, C., Swan, C., Jansen, D., Kashi, M., 2001.** High Carbon Fly Ash / Mixed Thermoplastic Aggregate for Use in Lightweight Concrete. *Society of Plastics Engineering, Annual Technical Conference*, Dallas, TX, 47, 2743-2751.
- Manuel CEB-FIB., 1980.** Beton de Grenulats Legers, *Annales de l’ITBTP beton* no: 195.
- Mesci, B., Ergun, O. N., 2007.** Çakıroğlu, M., Bakır Endüstri Atıklarının Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, 2. Yapılarda Kimyasal katkılar Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 299-309.
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D., 2003.** *Concrete*, Prentice-Hall, Pearson Education Inc., Second Edition, 644..
- Mohammed, A.A., 2017.** Modelling The Mechanical Properties of Concrete Containing PET Waste Aggregate. *Construction and Building Materials*, 150, 595-605.
- Mouka, M., Youn, D., Hassanali, M., 1993.** ”Effect of Degree of Polymerization of Water Soluble Polymers on Concrete Properties”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp. 122-130.
- Nakajima, Y., Yamata, K., 2004.** “The Effect of the Kind of Calcium Sulfate in Cements on the Dispersing Ability of Poly α -Naphthalene Sulfonate Condensate Superplasticizer”, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, 839-844.
- Nawa, T., Eguchi, H., 1992.** “Effect of Cement Characteristics on the Fluidity of Cement Pastes Containing an Organic Admixture”, 9th Int. Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, Vol. IV, 597-603.
- Nawa, T., Ichiboji, H., Kinoshita, M., 2000.**”Influence of Temperature on Fluidity of Cement Paste Containing Superplasticizer with Polyethylene Oxide Graft Chains”, 6th CANMET/ACI Int. Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, 195-210.
- Nebiogulları, M.A., 2010.** Metakaolin, Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Katkısının Beton Hidratasyon Sıcaklığına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Neville, A.M., 1975.** *Properties of Concrete*, Pitmann Publishing, London.
- Neville, A.M., Brooks, J.J., 1993.** *Concrete Technology*. Longman Scientific and Technical, USA, 438.

Nikbin, İ.M., Rahimi, S.R., Allahyari, H., Fallah, F., 2016. Feasibility Study of Waste Poly Ethylene Terephthalate (PET) Particles as Aggregate Replacement for Acid Erosion of Sustainable Structural Normal and Lightweight Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 126,108-117.

Nursyamsi, Zebua, W.S.B., 2016. The Influence of Pet Plastic Waste Gradations as Coarse Aggregate Towards Compressive Strength of Light Concrete. *Procedia Engineering*, 171, 614-619.

Okuroğlu M. ve Delibaş L.,1986. Hayvan Barınaklarında Uygun Çevre Koşulları, Hayvancılık Sempozyumu, Tokat.

Özcan, A., 2006. Endüstriyel Atıklar ve Polipropilen Lif İçeren Saha Betonlarının Özelliklerinin Araştırılması, Karaelmas Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak.

Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M. ve Uyan, M., 1999. Her Yönüyle Beton. Türkiye Hazır Beton Birliği, Aralık.

Öztok, İ., 1997. High Strength Lightweight Natural Aggregate Concrete. The Middle East Technical University, Department of Civil Engineering, Master Thesis, Ankara.

Öztürk Ö., Çelikkol M. ve Erkan M., 2007. ‘Türkiye Agrega Sektör Raporu’, Hazır Beton (84): 52-56.

Paci, M. and La Mantia, F.P. 1998. Competition between degradation and chain extension during processing of reclaimed poly(ethylene terephthalate). *Polymer Degradation Stability*, Vol.61: pp.417–20

Pehlivan, E., Ünal, S., Tunçsiper, B., 2004. Plastik Ambalaj Malzemelerinin Hayatımızdaki Yeri Ve Bunların Geri Kazanılması Ve Azaltılmasında Çağdaş Yöntemler. Polsem 2004, Polimer İşleme Ve Geri Kazanımı Sempozyumu, Mersin, S.114-128.

Pehlivan, E., Ünal, S., Tunçsiper, B., 2004. Polimer İşleme ve Geri Kazanımı Sempozyumu Bildiri Kitabı, 114-127, Mersin.

Postacıoğlu, B., 1975. Beton, (Bağlayıcı Maddeler, Agregalar ve Beton), İstanbul Teknik Üniversitesi Marbaası, 177-402, İstanbul.

Price,W.H. and Cordan, W.A., 1949. Test of Lightweight-Aggregate Concrete, *ACI Journal*, Proceedings, Vol.45, No.8, April, pp.581-600.

Prince, W., Edward-Lajnet, M., Aİtcin, P.C., 2002. “Interaction Between Ettringite and a Polynaphthalene Sulfonate Superplasticizer in a Cementitious Paste”, *Cement and Concrete Research*, Vol.32, 79-85.

Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M.H.A., Allahyari, H., Nikbin, I.M., 2013. “On The Mechanical Properties of Concrete Containing Waste PET Particles”, *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308.

Ramachandran, V.S., 1995. Concrete Admixtures Handbook, Noyes Publications, New Jersey, 1158.

Rebeiz, K.S., Fowler, D.W., Paul, D.R., 1991-a. Making Polymer Concrete with Recycled PET. *Plastics Engineering*, 47(2), 33-34.

Rebeiz, K.S., Fowler, D.W., Paul, D.R., 1991-b. Time and Temperature Dependent Properties of Polymer Concrete Made With Resin Using Recycled PET. Annual Technical Conference - Antec, Conference Proceedings, 37, In Search of Excellence, 2146-2149.

Rebeiz, K. S., Serhal, S.P., Fowler, D.W., 1994-b. Structural Behavior of Polymer Concrete Beams Using Recycled Plastic. *Journal of Materials In Civil Engineering*, 6(1), 150-165.

Rebeiz, K.S., 1994. Construction Use of Polyester Composite Using Recycled PET, Proceedings of The Materials Engineering Conference, N 804, Infrastructure: New Materials and Methods of Repair, 80-87.

Rebeiz, K.S., 1995. Time-Temperature Properties of Polymer Concrete Using Recycled Pet, *Cement & Concrete Composites*, 17(2), 119-124.

Rebeiz, K.S., 1996-a. Strength And Durability Properties Of Polyester Concrete Using PET and Fly Ash Wastes. *Advanced Performance Materials*, 3(2), 205-214.

Rebeiz, K.S., 1996-b. Precast Use of Polymer Concrete Using Unsaturated Polyester Resin Based on Recycled PET Waste. *Construction and Building Materials*, 10(3)215-220.

Rebeiz, K.S., Fowler, D.W., 1996. Flexural Strength of Reinforced Polymer Concrete Made with Recycled Plastic Waste. *Acı Structural Journal*, 93(5), 524-530.

Saçak, M. 2003. Polimer Kimyası, Gazi Kitabevi Tic. Ltd., Ankara.

Sadrmomtazi, A., Milehsara, S.D., Omran, O.L., Nik, A.S., 2015. The Combined Effects of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Particles and Pozzolanic Materials on The Properties of Self-Compacting Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112(4), 2363-2373.

Saikia, N., Brito, J., 2013. “Mechanical Properties and Abrasion Behaviour of Concrete Containing Shredded PET Bottle Waste as A Partial Substitution of Natural Aggregate”, *Construction and Building Materials*, 52, 236-244.

Saruşık, A., Saruşık, G., 2010. Yeni Üretim Prosesi İle Pomza Agregali Hafif Beton Ve Eps Köpüklü İzolasyon Blok Üretimi, Standartlara Uygunluğu Diğer Duvar Yapi Elemanları İle Karşılaştırılması, *Madencilik*, 49(2), 27-39.

Scheirs, J. 1998. Polymer recycling, science, technology and application. John Wiley and Sons Ltd. USA

Schroeder, R., 1994. The Use Of Recycled Materials İn Highway Construction. Public Roads, 58, 2, 32-41.

Shehata, I., Shahram, V., Elsayy, A., Fahmy, M., 1996. The Use of Solid Waste Materials as Fine Aggregate Substitutes in Cementitious Concrete Composites. Semisequicentennial Transportation Conference Proceedings, Iowa State University, Iowa, 5.

Short, A. and Kinniburgh, W., 1978. Lightweight concrete. Third Edition, Printed in Great Britain by Gallord (printers) Ltd. Great Yormouth, chapter 4, pp 42- 54.

Shulman, D., M., 1996. Lightweight Cementitious Compositions And Methods Of Their Production And Use. United States Patent, Patent Number 5580378.

Silva, D.A., Betioli, A.M., Gleize, P.J.P., Roman, H.R., Gomez, L.A., Ribeiro, J.L.D., 2005. “Degradation Of Recycled Pet Fibers İn Portland Cement-Based Materials”, Cement and Concrete Research 35, 1741-746.

Şahin, R., Demirboğa, R., Uysal, H. and Gül, R., 2003. The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete. Cement and Concrete Research, 33, 1245-1249.

Şahin, S., Karaman, S., Örüng, İ., 2007. Atık PVC Katkılı Hafif Betonların Özellikleri ve Tarımsal Yapılarda Kullanım Olanakları, Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi (Journal of Tekirdag Agricultural Faculty), 4 (2), 137-144.

Şengül, Ö., 2000. Agrega türünün normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şimşek, O., (2012), Beton ve Beton Teknolojisi, 4. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Tan, E. Tarakçılar, A. ve Yurtseven, R., 2002. Plastik geri kazanımları ve plastik atıklardan plastik üretim teknolojileri. Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

Tanaka, I., Suzuki, N., Ono, Y., Koishi, M., 1998. “Fluidity of Spherical Cement and Mechanism for Creating High Fluidity”, Cement and Concrete Research, Vol.28, 63-74.

Taşdemir, M.A., 1982. Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları. Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Tawfik, M. E., Eskander, S. B., 2006. Polymer Concrete From Marble Wastes And Recycled Poly(Ethylene Terephthalate). Journal Of Elastomers And Plastics, 38, 65-79.

Tayyar, E. ve Üstün, S., 2009. Geri kazanılmış petin kullanımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 16, 53-62.

Topçu İ. B., Canbaz M. ve Karakurt C., 2006. Beton Üretiminde Kimyasal Katkı Kullanımı, Politeknik, Cilt:9(1).

Torres, N., Robin, J.J., Bountvin, B. 2000. Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding. Eur Polym J., 36, 2075–2080.

Toydemir N., 1986. Yalıtım Kavramında Gelişme ve Malzeme, Dizayn Konstrüksiyon Dergisi,(86)8.

Toydemir, N., Gürdal, E., Tanaçan, L., 2000. ‘‘Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme’’, Literatür Yayınevi, İstanbul, 94-103.

TS 11222/Şubat 2001 - Beton – Hazır Beton – Sınıflandırma, Özellikler, Performans, Üretim ve Uygunluk Kriterleri.

TS EN 197-1, 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. TSE, Ankara.

TS EN 197-1, 2009. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 934-2, 2011. Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için – Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları –Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB), <http://www.thbb.org/>, 02, 02, 2014.

Türkmen İ., ve Kantarcı A., 2006. Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete, Building and Environment.

Uysal, H., 1999. ‘‘Kocapınar Pomzası ile Üretilen Hafif Betonun Isı Geçirgenliğinin Araştırılması’’, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 21-28.

Ünal O. ve Uygunoğlu T., 2007. Diatomitin Hafif Beton Üretiminde Kullanılması. İMO Teknik Dergisi. 1: 4025-4034.

Villain, F., Coudane, J., Vert, M. 1995. Thermal degradation of polyethylene terephthalate, study of polymer stabilization. Polym Degradation Stability Vol.49: pp.393–7

White, D.J., 2000. ‘‘Microstructure Of Composite Material From High-Lime Fly Ash and RPET’’ Journal Of Materials İn Civil Engineering, V 12, N 1, 60-65.

Yardımcı, A., 2005. Santral çıkışı ile şantiye şartlarında C 20/25 ve C 25/30 hazır beton mukavemetinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 34-36.

Yeşilata, B., Turgut, P., Işiker, Y., 2006. "Atık Polimerik Malzeme Katkısıyla Betonun Yalıtım Özelliğinin İyileştirilmesi", Türk Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi (TIBTD), Cilt 26(1), 15-20.

Yeşilata B., Işiker Y., Turgut P., 2009. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. Construction and Building Materials 23, 1878–1882.

Yoshika, K., Tazawa, E., Kawai, K., Enohata, T., 2002.”Adsorption Characteristics of Superplasticizers on Cement Component Minerals”, Cement and Concrete Research, 32, 1507-1513.

Zoorob, S.E., Suparma, L.B., 2000. Laboratory Design and Investigation of The Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt). Cement & Concrete Composites 22, pp.233-242.



ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Elazığ/Merkez’de doğan Merve GÜL, ilk ve orta öğrenimini Elazığ Ortaokulunda, liseyi Atatürk Anadolu Lisesi’nde tamamlamıştır. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümüne girmiştir. 2013 yılında mezuniyetini tamamlayıp, 2015 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı’nda lisansüstü eğitime başlamıştır. 2017 yılında Fırat Üniversitesi Eğitim Fakültesi bünyesinde verilmiş olan Pedagojik Formasyon Eğitimi Sertifikası almıştır. Aynı zamanda Anadolu Üniversitesi Açıköğretim İktisat Fakültesi son sınıfta okumaktadır.

