

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİF TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT
ÜRETİMİNDE POLİMER ATIKLARIN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Buğra ÖNER

Haziran, 2013

İZMİR

**LİF TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT
ÜRETİMİNDE POLİMER ATIKLARIN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı**

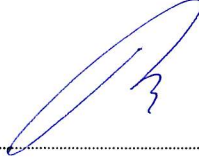
Buğra ÖNER

Haziran, 2013

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

BUĞRA ÖNER, tarafından Prof. Dr. BÜLENT BARADAN yönetiminde hazırlanan “LİF TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİNDE POLİMER ATIKLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

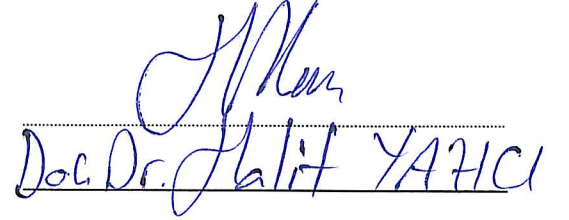


PROF. DR. BÜLENT BARADAN

Yönetici



Jüri Üyesi



Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca sahip olduğu bilgi birikimi ve güler yüzlü yaklaşımıyla bilim yolunda bana ışık tutan değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Bülent BARADAN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Deney Çalışmalarım süresince yardımını esirgemeyen ve farklı bakış açısıyla çalışmamda çıkmaza düştüğüm zamanlarda bana çıkış yolunu gösteren Sn. Doç. Dr. Halit YAZICI'ya şükranlarımı sunarım.

Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalı Öğretim Görevlileri Sn. Doç. Dr. Burak FELEKOĞLU, Sn. Yrd. Doç. Dr. Hüseyin YİĞİTER ve Sn. Ar. Gör. Çağlar YALÇINKAYA'ya çok teşekkür ederim. Deneysel Çalışmalarım süresince benden yardımlarını esirgemeyen ve değerli fikirleriyle yol gösteren Tepekule Yapı Denetim Şirketi sahipleri Sn. M. Nejat ÇALLI ve Sn. Mehmet KOCAGÖZOĞLU'na, deneyde kullandığım renkli agregaları temin ettiğim TOPAZ firması sahipleri ve çalışanlarına ve tezin yazımı aşamasında bana yardım eden Özge AYDIN' a teşekkür ederim.

Deneyde kullandığım PET malzemelerinin teminini sağlayan ve görüşlerine çok değer verdiğim babam Sn. MESUT ÖNER'e teşekkürlerimi sunarım.

Buğra ÖNER

LİF TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİNDE POLİMER ATIKLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZ

Pet (polietilentereftalat) günümüzde en çok kullanılan kökenli malzemelerden biridir. Bu durum sonucunda ortaya yüksek miktarlarda atık çıkmakta ve ancak kısıtlı bir kısmı geri dönüştürülebilmektedir. Doğada yüzyıllarca kaybolmayan, çevre kirliliğine yol açan bu atıkların ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi çok önemli bir sorundur. Bu çalışmada, geri dönüşüm tesislerinde eritilip sertleştirilmiş atık petleri çimentolu kompozit ürünlerinde kullanımı yoluyla inşaat sektöründe değerlendirilmesi planlanmıştır.

Pet atıkların geri dönüşüm işlemi sırasında, fabrika sisteminde oluşan hata sonucunda oluşan kusurlu eriyik petler, belirli bir haznede toplanmaktadır. Kusurlu petler, üretim sisteminde meydana gelen hatanın yerine göre iki farklı fiziksel yapıda olmaktadır. Petler soğutulup sertleştirildikten sonra kırıcılarla kırılarak küçük parçalara ayrılır ve bir kısmı tekrar üretim döngüsüne katılır. Geri dönüşüm tesislerinde ortaya çıkan farklı ürünler ve atıkların yapı malzemesi üretiminde değerlendirilmesi bu çalışmanın ana fikridir.

Tez kapsamında, farklı harç örnekleri hazırlanarak içerisine kusurlu pet atıklar agrega yerine farklı oranlarda karıştırılmıştır. Ayrıca bazı karışımlara pet lifler eklenerek üretilen karışımların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Yapılan çalışmanın sonucunda pet atıkların, geliştirilen kompozitlerin birim hacim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımlarını, ısı iletkenliğini düşürdüğü, buna karşılık harç içerisindeki doğal agregaya belirli oranında ikame yapılması eğilme ve basınç dayanımını düşürürken, taze hal işlenebilirliğini, tokluğunu, aşınma ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını arttırdığı ortaya çıkmıştır. Harç örneklerine yüksek fırın cürufu eklenmesi su emme oranını azaltırken taze hal işlenebilirliğini, zamana bağlı basınç ve eğilme dayanımını, aşınma direncini, donma-çözülme ve asit

dayanıklılığını arttırmıştır. Pet agregalar 80 derece ve daha yüksek sıcaklıklarda genleşerek harç örneklerini çatlatıp mekanik değerlerinde azalmaya neden olduğu için yapısal elemanlarda kullanılması sakınca arz etmektedir. Ancak yer karosu, kaldırım taşı gibi aşınmaya maruz kalan yerlerde kullanılabilme imkânını sağlar.

Anahtar sözcükler: Pet, agrega, lif, aşınma, yüksek sıcaklık, donma-çözülme, mikroyapı

THE EVALUATION OF POLYMER WASTE IN THE PRODUCTION OF FIBER REINFORCED CEMENT-BASED COMPOSITE

ABSTRACT

Nowadays, PET is one of the highest consumed plastic material in the world. This leads to accumulation of a great amount of waste materials. However, only a small proportion of this waste can be recycled. Health and environmental institutions state that in the coming years, there must be a restriction to the products which may cause health and environmental hazards. This research has been aimed of increasing the durability of cement composites by utilization of PET waste in cement based composite products.

During the recycling process of PET waste, A by-products accumulate in a tank as a result of a fault in the production. These PET wastes have two different physical structure. During the cooling and hardening period, the wastes are crushed by a cracker and a portion is feeded back to the production cycle.

This discarded PET wastes with undesired properties have been utilized in cement based composites as aggregates within the scope of this thesis.

As a general result of this test program; incorporation of waste PET decrease the bulk density, flexured, compressive strength and thermal conductivity of the composites. In case of fifty percent of replacement both flexural and compressive strength decreases. However workability, toughness, wear and chemical resistance properties increase. In case of high furnace slag incorporation porosity decreases parallel to the increase in workability, compressive and flexural strength, wear, freezing-thawing and acid resistance. Adding PET fibers to the mixture decreases the workability and compressive strength, but it also increases mid point deflection and toughness values. Since PET aggregates cause to a decrease in the mechanic properties by expanding and cracking at eighty centigrade, they may not be suitable

for high temperature resistant construction materials. However PET aggregates can be used as flooring tile and pavement production.

Keywords: Pet, aggregate, fiber, abrasion, high temperature, freezing-thawing, micro structure

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	v
ABSTRACT.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ..	xv
TABLolar LİSTESİ.....	xxvi
BÖLÜM BİR- GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ – POLİETİLEN TEREFTALAT	7
2.1 Polietilen Tereftalatın Yapısı.....	7
2.2 PET’in Üretim Sistemi	9
2.3 Geri Dönüşümde Kullanılan Plastiklerin Kodlanması	11
2.4 Atık Pet Plastiklerden Elyaf Üretim Sistemi ve Pet Agregaların Elde Edilmesi.....	11
BÖLÜM ÜÇ – HAFİF AGREGALI BETONLAR	16
3.1 Hafif Betonun Tanımı	16
3.1.1 Hafif Betonun Normal Betona Göre Avantaj ve Dezavantajları.....	17
3.2 Hafif Betonun Mekanik Özellikleri.....	18
3.2.1 İşlenebilirlik.....	18
3.2.2 Su Emme.....	18
3.2.3 Birim Hacim Ağırlık.....	19
3.2.4 Elastisite Modülü	19
3.2.5 Gerilme – Şekil Değişirme Özellikleri	20
3.3 Atık PET Şişelerin Hafif Agregası Olarak Kullanılması.....	21
3.3.1 İşlenebilirlik.....	21
3.3.2 Birim Hacim Ağırlık.....	24

3.3.3 Yüksek Sıcaklık	25
3.3.4 Basınç Dayanımı.....	27
3.3.5 Elastisite Modülü	32
3.3.6 Isıl İletkenlik.....	33
3.3.7 Su Emme.....	35
BÖLÜM DÖRT – LİFLİ BETONLAR.....	36
4.1 Betonda Kullanılan Lifler ve Özellikleri.....	36
4.2 Betonda Lif Kullanımının Etkisi	37
4.2.1 Betonda Lif Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları.....	38
4.3 Geri Dönüşüm PET Liflerin Özellikleri	38
4.3.1 İşlenebilirlik.....	39
4.3.2 Eğilme Dayanımı	40
4.3.3 Basınç Dayanımı.....	42
4.3.4 Donma – Çözülme Direnci	44
4.3.5 Kuruma Büzülmesine Etkisi	44
4.3.6 Kimyasal Etkilere Karşı Dayanıklılık.....	46
4.3.6.1 Alkali Etkisi	47
4.3.6.2 Tuz Etkisi	49
4.3.6.3 Sülfürik Asit Etkisi	50
BÖLÜM BEŞ – PUZOLANİK MALZEMELER	52
5.1 Puzolanın Tanımı	52
5.2 Puzolanik Aktivite.....	52
5.3 Silis Dumanı	53
5.3.1 Silis Dumanının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	53
5.3.2 Silis Dumanının Avantaj ve Dezavantajları	54
5.4 Yüksek Fırın Cürufu.....	54
5.4.1 Yüksek Fırın Cürufunun Avantaj ve Dezavantajları	55
5.5 Uçucu Kül.....	56

5.5.1 Uçucu Kül'ün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	57
5.5.2 Uçucu Kül Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları.....	58

BÖLÜM ALTI – DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 59

6.1 Giriş.....	59
6.2 Amaç	59
6.3 Deneysel Programın Tanıtılması	59
6.4 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	62
6.4.1 Deneyde Kullanılan Çimento, Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül ve Silis Dumanının Özellikleri	62
6.4.2 Deneyde Kullanılan Agregalar ve Özellikleri	63
6.4.3 Deneyde Kullanılan Kimyasal Katkılar ve Özellikleri.....	67
6.4.4 Deneyde Kullanılan PET lifler ve Özellikleri	67
6.5 Deneysel Tasarım	68
6.5.1 Harç Tasarımı ve Kapsam	69
6.5.2 Deneysel Yöntem.....	71
6.6 Taze Hal Deneyleri.....	72
6.6.1 Çökme – Yayılma Deneyi	72
6.7 Sertleşmiş Hal Deneyleri.....	73
6.7.1 Eğilme Deneyi	75
6.7.2 Basınç Deneyi.....	77
6.7.3 Aşınma Deneyi	80
6.7.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi	80
6.7.5 Donma- Çözülme Deneyi	80
6.7.6 Asit Deneyi	81
6.7.7 Su Emme Deneyi	81
6.7.8 Isı İletkenlik Deneyi	82
6.7.9 Alkali Etkisi	84
6.7.10 Bünyesel ve Kuruma Büzülmesi Etkisi	85
6.7.11 SEM Analizi	85

**BÖLÜM YEDİ – AGREGA YERİNE PET ATIKLARIN HARÇLARDA
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI..... 88**

7.1 Deney Sonuçlarının İncelenmesi.....	88
7.2 Takoz ve Agrom PET Agregalarının Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi.....	91
7.2.1 Takoz ve Agrom Karışımlarının İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları.....	91
7.2.2 Takoz ve Agrom Karışımlarının Hava Kurusu Birim Hacim Ağırlıkları.....	94
7.2.3 Takoz ve Agrom Karışımlarının Eğilme Deneyi Sonuçları	94
7.2.4 Takoz ve Agrom Karışımlarının Basınç Deneyi Sonuçları	96
7.2.5 Takoz ve Agrom Karışımlarının Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları.....	96
7.3 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi.....	99
7.3.1 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları	99
7.3.2 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların Hava Kurusu Birim Hacim Ağırlıkları	100
7.3.3 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların Eğilme Deneyi Sonuçları	101
7.3.4 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların Basınç Deneyi Sonuçları.....	102
7.4 Takoz, Agrom PET Agregası ve PET Lif Eklenen Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçları	103
7.4.1 Takoz, Agrom PET Agregası ve PET Lif Eklenen Harçların Taze ve İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları	103
7.4.2 Takoz, Agrom PET Agregası ve PET Lif Eklenen Harçların Hava Kurusu Birim Hacim Ağırlıkları	104
7.4.3 Takoz, Agrom PET Agregası ve PET Lif Eklenen Harçların Eğilme Deneyi Sonuçları	106
7.4.4 Takoz, Agrom PET Agregası ve PET Lif Eklenen Harçların Basınç Deneyi Sonuçları	109

7.4.5 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli Harçların Aşınma Deneyi Sonuçları.....	111
7.5 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli, Farklı Su/Çimento Oranında Hazırlanmış Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçları.....	112
7.5.1 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli, Farklı Su/Çimento Oranında Hazırlanmış Harçların İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları	112
7.5.2 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli, Farklı Su/Çimento Oranında Hazırlanmış Harçların Eğilme Deneyi Sonuçları	113
7.5.3 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli, Farklı Su/Çimento Oranında Hazırlanmış Harçların Basınç Deneyi Sonuçları.....	115
7.6 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli Karışımında Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi	117
7.6.1 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli Karışımında Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Taze Hal Deney Sonuçları	117
7.6.2 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli Karışımında Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Hava Kuru Birim Hacim Ağırlıkları.....	117
7.6.3 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli Karışımında Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Taze ve Sertleşmiş Eğilme Deneyi Sonuçları	118
7.6.4 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli Karışımında Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Basınç Deneyi Sonuçları.....	124
7.6.5 Takoz ve Agrom PET Agregalı İkameli Karışımında Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Aşınma Deneyi Sonuçları	129
7.7 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal – Kırma Agregalı, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi.....	132
7.7.1 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal – Kırma Agregalı, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları	132
7.7.2 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal – Kırma Agregalı, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Hava Kuru Birim Hacim Ağırlıkları.....	133

7.7.3 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal – Kırma Agregası, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Eğilme Deneyi Sonuçları.....	134
7.7.4 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal – Kırma Agregası, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Basınç Deneyi Sonuçları.....	136
7.7.5 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal – Kırma Agregası, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Aşınma Deneyi Sonuçları.....	137
7.8 Agregası Yerine PET Atıkların Kullanılması İle İlgili Yapılan Deney Sonuçlarına Göre Genel Değerlendirme	138

BÖLÜM SEKİZ – PET ATIKLARI İLE YER KAROSU ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

140

8.1 Tanım.....	140
8.2 Taze Hal Harçların Deney Sonuçları.....	142
8.2.1 İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları	142
8.3 Sertleşmiş Hal Deney Sonuçları.....	142
8.3.1 Hava Kuru Birim Hacim Ağırlıklarının Belirlenmesi.....	142
8.3.2 Eğilme Deneyi Sonuçları.....	144
8.3.3 Basınç Deneyi Sonuçları	148
8.3.4 Aşınma Deneyi Sonuçları	151
8.3.5 Donma – Çözülme Deneyi Sonuçları	155
8.3.6 Asit Deneyi Sonuçları.....	159
8.3.7 Su Emme Deneyi Sonuçları.....	162
8.3.8 Isıl İletkenlik Deneyi Sonuçları	163
8.3.9 Alkali Etkisi	165
8.3.10 Bünyesel ve Kuruma Büzülmesi	165
8.4 Pet Agregalı Karışımların Kullanım Alanları	167

BÖLÜM DOKUZ – MİKRO YAPI İNCELEMELERİ 171

9.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Sertleşmiş Harçlarda Mikro Yapı İncelemeleri..... 171

9.2 Sertleşmiş Harçlarda Asit Deneyi Sonrası Mikro Yapı İncelemeleri..... 186

BÖLÜM ON – SONUÇLAR ve ÖNERİLER 191

10.1 Sonuçlar..... 191

10.2 Öneriler..... 195

KAYNAKLAR 196

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Kabartılmamış sürekli lif (hds)	3
Şekil 1.2 Kabartılmış içi boş kısa li (hkk).....	3
Şekil 1.3 Düz sürekli lif (ds)	3
Şekil 1.4 1. deneyin yapılış yöntemi	4
Şekil 1.5 2. deneyin yapılış yöntemi	5
Şekil 1.6 3. deneyin yapılış yöntemi	5
Şekil 1.7 1. deney sonrası örnek görüntüleri.....	5
Şekil 1.8 2. deney örneklerinin eğilme sonrası yük-sehim eğrisi	6
Şekil 1.9 3. Deney örneklerinin eğilme deneyi sonrası yük-sehim eğrisi.....	6
Şekil 2.1 Pet'in kimyasal yapısı (Tayyar ve Üstün, 2009).....	7
Şekil 2.2 Pet'in polimerizasyon reaksiyonları (Anonim 2009).....	10
Şekil 2.3 Pet ürünleri (Anonim 2009).....	10
Şekil 2.4 Ambalaj atıklarının geri dönüşüme hazırlanması	12
Şekil 2.5 Atık petten geri dönüşüm ile elyaf elde edilmesi.....	13
Şekil 2.6 Takoz tipi pet agrega.....	14
Şekil 2.7 Agrom tipi pet agrega	15
Şekil 3.1 Normal (soldaki) ve hafif betonun (sağdaki) gerilme-şekil değiştirme grafiği (Uzbaş, 2008)	21
Şekil 3.2 Pet agreganın hafif betonun işlenebilirliğine etkisi (Albano, 2009).....	22
Şekil 3.3 240 °C de eritildikten sonra yüksek fırın cürufu ile karıştırılan pet agrega ve kesit görünüşü (Choi, 2009).....	23
Şekil 3.4 Pet agrega ikamesinin işlenebilirliğe etkisi (Choi, 1999).....	23
Şekil 3.5 28 günlük pet agregalı örneklerin kuru birim hacim ağırlıklarının karşılaştırılması (Akçaözoğlu, 2012)	24
Şekil 3.6 0 °C (solda yukarıda), 200 °C (sağda yukarıda), 400 °C (solda aşağıda) ve 600 °C (sağda aşağıda) yüksek sıcaklığa maruz kalan pet agregalı örnekler (Albano vd., 2009)	26
Şekil 3.7 Sıcaklığa maruz kalan pet agregalı örneklerin basınç dayanımlarındaki değişim (Kasselouri, 2009)	26

Şekil 3.8 250 °C'de 5 saat boyunca fırında kalan pet agregalı örneğin fırından çıktıktan sonraki görüntüsü (Kasselouri, 2009)	27
Şekil 3.9 Pet şişe parçalarının farklı boyutlarda kesilerek betona eklenmesinin basınç dayanımına etkisi (Albano vd., 2009)	28
Şekil 3.10 Büyük boyutlarda kesilmiş pet şişe parçalarının betonda oluşturduğu boşluklu yapı (Akçaözoğlu ve Atiş, 2012).....	28
Şekil 3.11 Farklı boyutlarda kesilmiş pet agregalı örneklerin 7, 28, ve 90 günlük basınç dayanımındaki değişim (Kasselouri, 2009)	29
Şekil 3.12 Pet agrega çimento matrisinin mikro yapı görüntüsü (a) (Kasselouri, 2009)	29
Şekil 3.13 Pet agrega ile matris ara yüzeyi (Kasselouri, 2009)	30
Şekil 3.14 Pet agrega ve çimento matrisinin mikro yapı görüntüsü (b) (Kasselouri, 2009)	31
Şekil 3.15 Farklı yöntem ile elde edilen cürufllu pet agreganın betondaki basınç dayanımına etkisi (Choi, 2005)	31
Şekil 3.16 Doğal (solda) ve pet (sağda) agregalı harç örneklerinin mikro yapı görüntüleri (Choi, 2005).....	32
Şekil 3.17 3 ve 28 günlük örneklerdeki iç yapı görüntüleri (Choi, 2005)	32
Şekil 3.18 Farklı boyutlarda pet şişeden kesilerek beton içerisinde agrega olarak kullanılan parçaların betonun elastisite modülüne etkisi (Albano, 2009).....	33
Şekil 3.19 Betonun içerisinde agrega olarak kullanılan kesilmiş pet parçalarının ısı kaybına etkisi (Yeşilata, 2008).....	34
Şekil 3.20 Beton içerisinde agrega olarak kullanılan kesilmiş pet parçalarının ısı iletkenlik değerine etkisi (b) (Akçaözoğlu, 2012).....	34
Şekil 3.21 Betonda kullanılan farklı boyutlardaki kesilmiş pet parçalarının su emme değerlerine etkisi (Albano vd., 2012).....	35
Şekil 4.1 Lif çeşitleri (Felekoğlu, 2012)	36
Şekil 4.2 Farklı çelik lif dozajlarının betonun yük-sehim davranışına etkisi (Felekoğlu, 2009)	37
Şekil 4.3 Pet lifin betonun işlenebilirliğine etkisi (Ochi vd., 2007).....	39
Şekil 4.4 Pet lifin betondaki eğilme dayanımına etkisi (Ochi vd., 2007)	40
Şekil 4.5 Pet lifin betondaki yük-sehim davranışına etkisi (a) (Ochi vd., 2007)	41

Şekil 4.6 Pet lifin betondaki yük-sehim davranışına etkisi (b) (Foti, 2011)	41
Şekil 4.7 Pet lif eklenmesinin beton basınç dayanımına etkisi (Kim vd., 2010)	42
Şekil 4.8 Farklı işlemle üretilen pet lifler (Kim vd., 2010).....	43
Şekil 4.9 Farklı yöntemle elde edilen pet lifin basınç dayanımına etkisi (Kim vd., 2010)	43
Şekil 4.10 Pet liflerin beton elastisite modülüne etkisi (Won vd., 2010).....	44
Şekil 4.11 Beton içerisinde kullanılan farklı dozajlardaki pet ve pp kökenli liflerin kuruma büzülmesi davranışına etkisi (Rebeiz vd., 1991)	45
Şekil 4.12 Beton içerisinde kullanılan farklı dozajlardaki pet ve pp kökenli liflerin kısıtlanmış kuruma büzülmesi davranışına etkisi (Rebeiz vd., 1991).....	46
Şekil 4.13 Farklı kimyasal etkilere maruz kalmış pet lif içeren örneklerin basınç dayanımlarındaki değişim (Won vd., 2010).....	47
Şekil 4.14 Alkali ortamda bekletilmiş farklı lif çeşitlerinin çekme dayanımlarındaki değişim (Ochi vd., 2009).....	48
Şekil 4.15 120 gün boyunca alkali ortamda kalan liflerin mikro yapı görüntüleri (Won vd., 2010)	49
Şekil 4.16 120 gün boyunca %3 NaCl ortamında kalan liflerin mikro yapı görüntüleri (Won vd., 2010)	50
Şekil 4.17 120 gün boyunca %3 H ₂ SO ₄ ortamında kalan liflerin mikro yapı görüntüleri (Won vd., 2010).....	51
Şekil 5.1 Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi (Koca, 1996)	53
Şekil 5.2 Yüksek fırın cürufunun mikro yapı görüntüsü (Newman vd., 2003)	55
Şekil 5.3 Elektron mikroskobunda çekilmiş uçucu kül.....	56
Şekil 6.1 Yer karosu için kullanılan renkli agrega ve karıştırılmış hali.....	64
Şekil 6.2 Kumun elek analizi	66
Şekil 6.3 Karıştırılmış renkli agreganın elek analizi.....	66
Şekil 6.4 Takoz tipi pet agreganın elek analizi	66
Şekil 6.5 Agrom tipi pet agreganın elek analizi.....	66
Şekil 6.6 Pet lifin optik mikroskopta çekilen görüntüsü	68
Şekil 6.7 Atık pet agregaların harç içerisinde kullanımı için yapılan deneylerde kullanılan kodların açılımı	70

Şekil 6.8 Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde kullanılan kodların açılımı.....	70
Şekil 6.9 Taze haldeki pet lifli harcın karıştırılması sırasında liflerin palet etrafında toplanması	72
Şekil 6.10 İşlenebilirlik deneyi için kullanılan yayılma tablası	73
Şekil 6.11 Deneylerde sertleşmiş haldeki örneklere yapılan deneylerin şematik gösterimi.....	75
Şekil 6.12 Sehim kontrollü üç noktalı yükleme deneyi aleti	76
Şekil 6.13 Tokluk değerlerinin belirlenmesinde kullanılan eğriler ve eğrinin altında kalan alanlar	76
Şekil 6.14 Yük kontrollü üç noktalı yükleme deneyi aleti.....	77
Şekil 6.15 Basınç deneyi aleti	78
Şekil 6.16 Modifiye los angeles aşınma deneyi aleti	79
Şekil 6.17 Dory yüzeysel aşınma deneyi aleti	79
Şekil 6.18 Yüksek sıcaklık deneyi aleti	80
Şekil 6.19 Su emme deneyi gösterimi.....	81
Şekil 6.20 Isı iletkenlik deneyi aleti.....	82
Şekil 6.21 Hot wire yönteminin çalışma prensibi	83
Şekil 6.22 Hot wire yönteminde ölçüm yapan cihazın probu	83
Şekil 6.23 Hot wire yönteminde örneklerin ısı iletkenlik değerlerinin ölçümü.....	84
Şekil 6.24 Bünyesel, kuruma ve alkali etkisinde bırakılacak örnekler	84
Şekil 6.25 Boy ölçümü gösterimi.....	85
Şekil 6.26 Sem ölçüm cihazı.....	86
Şekil 7.1 Agrom100 no'lu harcın deney sırasında yayılma davranışı	91
Şekil 7.2 Harç içerisine ikame edilen takoz ve agrom tipi pet agregaların yayılma değerleri.....	93
Şekil 7.3 Takoz ve agrom tipi pet agregaların kırma kuma ikame edildiği harçların hava kurusu b.h.a. değerleri	94
Şekil 7.4 Takoz ve agrom tipi pet agregaların ayrı ayrı kırma kuma ikame edilmesi sonucu eğilme dayanımları	95
Şekil 7.5 Takoz ve agrom tipi pet agregaların ayrı ayrı kırma kuma ikame edilmesi sonucu sertleşmiş harç örnek kesitleri	95

Şekil 7.6 Kırma kuma ayrı karışımlarda ikame edilen takoz ve agrom tipi pet agregalı harçların basınç dayanımı sonuçları.....	96
Şekil 7.7 Takoz tipi pet agreganın kırma kuma ikame edildiği sertleşmiş harcın 240 °C’de 10 saat kaldıktan sonraki görüntüsü.....	97
Şekil 7.8 Yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış takoz tipi pet agreganın kırma kuma ikame edildiği sertleşmiş harçların eğilme dayanımı sonuçları	98
Şekil 7.9 Yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış takoz tipi pet agreganın kırma kuma ikame edildiği sertleşmiş harçların basınç dayanımı sonuçları.....	98
Şekil 7.10 Takoz tipi pet agreganın kırma kuma ikame edildiği sertleşmiş harcın 120 °C’de 10 saat kaldıktan sonra harç örneklerinin yüzeyinde meydana gelen çatlaklar	99
Şekil 7.11 Pet agregalı harç içerisindeki takoz ve agrom tipi pet agrega oranlarının yayılma değerleri.....	100
Şekil 7.12 Sadece pet agregaların kullanıldığı harç karışımlarında agrom ve takozun karıştırılma sonrası hava kurusu birim hacim ağırlık değerleri	101
Şekil 7.13 Takoz ve agrom tipi pet agregaların belirli oranda karıştırılması ve kırma kuma ikame edilmesi sonucu eğilme dayanımları	102
Şekil 7.14 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi sonucu sertleşmiş harç örnek kesitleri	102
Şekil 7.15 Takoz ve agrom tipi pet agregaların farklı dozajlarda karıştırılması sonucu basınç dayanımları.....	103
Şekil 7.16 Takoz ve agrom karışımı pet agregaların kırma kuma ikame edilmesi ve pet lifin eklenmesi sonucu yayılma değerleri	105
Şekil 7.17 Pet agrega ikameli harç karışımlarına lif eklenmesi sonucu hava kurusu birim hacim ağırlık değerleri.....	105
Şekil 7.18 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi sonucu 7 günlük sertleşmiş harç örneklerinin yük-sehim grafikleri.....	106
Şekil 7.19 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi ve pet lif eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin yük-sehim grafikleri.....	107
Şekil 7.20 Takoz ve agrom tipi pet agrgaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi ve lif eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örnek kesitler.....	108

Şekil 7.21 Takoz ve agrom tipi pet agregaların belirli oranda karıştırılarak kuma ikame edilmesi sonucu basınç dayanımları.....	109
Şekil 7.22 Takoz ve agrom tipi pet agregaların belirli oranda karıştırılıp kuma ikame edilerek pet lif eklenmesi sonucu basınç dayanımları.....	110
Şekil 7.23 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımı harçlara lif eklenmesi sonucu basınç dayanımları	110
Şekil 7.24 Takoz ve agrom pet agrega karışımı örneklerin kırma kuma ikame yapılmasıyla 7 günlük dory yüzeysel aşınma değerleri	112
Şekil 7.25 0,3 su/çimento oranındaki takoz ve agrom karışımı harcın kırma kuma ikame edilmesiyle işlenebilirlik değerleri	113
Şekil 7.26 0,3 su/çimento oranında, takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin yük-sehim grafikleri.....	114
Şekil 7.27 Aynı karışıma sahip farklı su/çimento oranındaki örneklerin basınç değerlerinin karşılaştırılması.....	115
Şekil 7.28 Takoz ve agrom karışımı pet agregaların kırma kuma ikame edilmesi ve çimento yerine farklı puzolan eklenmesi sonucu yayılma değerleri.....	117
Şekil 7.29 Pet agrega ikameli harç karışımlarına puzolan ikamesinin hava kurusu birim hacim ağırlık değerleri.....	118
Şekil 7.30 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine yüksek fırın cürufu eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 7 günlük yük-sehim grafikleri	121
Şekil 7.31 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine yüksek fırın cürufu eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 28 günlük yük-sehim grafikleri	119
Şekil 7.32 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine yüksek fırın cürufu eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 56 günlük yük-sehim grafikleri	120
Şekil 7.33 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine uçucu kül eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 7 günlük yük-sehim grafikleri.....	121

Şekil 7.34 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine uçucu kül eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 28 günlük yük-sehim grafikleri.....	121
Şekil 7.35 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine uçucu kül eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 56 günlük yük-sehim grafikleri.....	121
Şekil 7.36 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine silis dumanı eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerin 7 günlük yük-sehim grafikleri.....	122
Şekil 7.37 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine silis dumanı eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 28 günlük yük-sehim grafikleri.....	123
Şekil 7.38 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine silis dumanı eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 56 günlük yük-sehim grafikleri.....	123
Şekil 7.39 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 7 günlük basınç dayanımları.....	125
Şekil 7.40 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 28 günlük basınç dayanımları.....	126
Şekil 7.41 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 56 günlük basınç dayanımları.....	127
Şekil 7.42 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve çimentoya yüksek fırın cürufunun ikame edildiği harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç değerleri.....	128
Şekil 7.43 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve çimentoya silis dumanının ikame edildiği harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç değerleri.....	129
Şekil 7.44 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve çimentoya uçucu kül edildiği harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç değerleri.....	129

Şekil 7.45 Takoz ve agrom pet agrega karışımı örneklerin kırma kuma ikame yapılması ve farklı puzolanların çimentoya ikame yapılmasıyla harç örneklerinin 28 günlük modifiye los angeles aşınma deneyi sonuçları.....	130
Şekil 7.46 Modifiye Los angeles aşınma deneyi öncesi sertleşmiş harçların görünümü.	131
Şekil 7.47 Modifiye los angeles aşınma deneyi sonrası sertleşmiş harçların görünümü.	131
Şekil 7.48 Takoz ve agrom karışımı pet agregaların renkli agregaya ikame edilmesi ve gri çimento yerine beyaz çimento eklenmesi sonucu yayılma değerleri.....	133
Şekil 7.49 Kırma kuma renkli doğal-kırma agrega ikamesinin hava kurusu birim hacim ağırlık değerleri	134
Şekil 7.50 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak renkli agregaya ikame edilmesi ve gri çimento yerine beyaz çimento kullanılması sonrası 7 günlük örneklerin yük-sehim grafikleri ve örnek kesitleri.....	135
Şekil 7.51 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının renkli agregaya ikame edildiği ve gri çimento yerine beyaz çimentonun kullanıldığı harçların 7 günlük basınç değerleri.....	136
Şekil 7.52 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının renkli agregaya ikame edildiği ve gri çimento yerine beyaz çimentonun kullanıldığı harçların 7 günlük modifiye los angeles aşınma deneyi sonuçları	137
Şekil 7.53 Modifiye los angeles aşınma deneyi sonrası takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının renkli agregaya ikame edildiği ve gri çimento yerine beyaz çimentonun kullanıldığı harçların görünümü.....	138
Şekil 8.1 Hazırlanan karışımların yayılma çapları	142
Şekil 8.2 Hazırlanan karışımların hava kurusu b.h.a değerleri	143
Şekil 8.3 Hazırlanan karışımların kuru b.h.a değerleri	143
Şekil 8.4 28 gün kür edilmiş karışımların yük-sehim grafikleri	145
Şekil 8.5 56 gün kür edilmiş karışımların yük-sehim grafikleri	146
Şekil 8.6 90 gün kür edilmiş karışımların yük-sehim grafikleri	147
Şekil 8.7 Hazırlanan karışımların 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri.	148
Şekil 8.8 Hazırlanan karışımların 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri .	151

Şekil 8.9 Hazırlanan karışımların 28 gün sonunda modifiye los angeles deneyi sonrası aşınma değerleri.....	152
Şekil 8.10 Hazırlanan karışımların 28 gün sonunda dory yüzeysel aşınma deneyi sonrası aşınma değerleri.....	153
Şekil 8.11 Hazırlanan karışımların 56 gün sonunda modifiye los angeles deneyi sonrası aşınma değerleri.....	153
Şekil 8.12 Hazırlanan karışımların 56 gün sonunda dory yüzeysel aşınma deneyi sonrası aşınma değerleri.....	154
Şekil 8.13 Hazırlanan karışımların 90 gün sonunda modifiye los angeles deneyi sonrası aşınma değerleri.....	154
Şekil 8.14 Hazırlanan karışımların 90 gün sonunda dory yüzeysel aşınma deneyi sonrası aşınma değerleri.....	155
Şekil 8.15 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi sonrasında ağırlık kayıpları.....	156
Şekil 8.16 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi sonrasında görünüşleri	156
Şekil 8.17 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi sonrasında eğilme deneyinde çizilen yük-sehim grafikleri.....	157
Şekil 8.18 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi öncesi ve sonrasında eğilme dayanımları.....	158
Şekil 8.19 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi sonrasında basınç dayanımları.....	158
Şekil 8.20 Hazırlanan karışımların asit etkisi sonrası görüntüleri	160
Şekil 8.21 Hazırlanan karışımların asit etkisi öncesinde yapılan eğilme deneyi sonucundayük-sehim grafikleri.....	160
Şekil 8.22 Hazırlanan karışımların asit etkisi sonrasında yapılan eğilme deneyi sonucunda yük-sehim grafikleri.....	161
Şekil 8.23 Hazırlanan karışımların kapiler yolla su emme oranları.....	162
Şekil 8.24 Hazırlanan karışımların su emme oranları.....	163
Şekil 8.25 Hot wire yöntemi ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri	164
Şekil 8.26 Alkali etkisine maruz kalan örneklerin boy değişimi	165
Şekil 8.27 Bünyesel büzülme etkisine bırakılan örneklerin boy değişimleri.....	166
Şekil 8.28 Kuruma büzülmesi etkisine bırakılan örneklerin boy değişimleri.....	167

Şekil 8.29 Pet50 karışımı kullanılarak hazırlanan yer karosu (a)	168
Şekil 8.30 Pet50 karışımı kullanılarak hazırlanan yer karosu (b)	169
Şekil 9.1 Doğal agreganın sem analizinde 30, 100, 500, 2000, 5000 kat büyütülmüş görüntüleri	172
Şekil 9.2 Doğal agrega üzerinde yapılan eds analizi sonucu	173
Şekil 9.3 Takoz tipi pet agreganın sem analizinde 30, 100, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri	173
Şekil 9.4 Agrom tipi pet agreganın sem analizinde 30, 100, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri	174
Şekil 9.5 Agrom tipi pet agreganın sem analizinde 100 kat büyütülmüş görüntüsü	175
Şekil 9.6 Pet lifin sem analizinde 30, 500, 2000, 5000 kat büyütülmüş görüntüleri	176
Şekil 9.7 Kontrol örneğinin sem analizinde parlak yüzeyde 100 ve 500 kat büyütülmüş görüntüleri	176
Şekil 9.8 Pet50 harcının sem analizinde parlak yüzeyde 30, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri	177
Şekil 9.9 Pet50 örneği üzerinde yapılan eds analizi sonucu	178
Şekil 9.10 Pet50 harcının içerisindeki agrom tipi pet agreganın sem analizinde parlak yüzeyde 30, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri	179
Şekil 9.11 Pet50 harcının içerisindeki doğal agreganın sem analizinde parlak yüzeyde 2000 kat büyütülmüş görüntüsü	181
Şekil 9.12 Pet50-yfc50 harcının içerisindeki sem analizinde kırık yüzeyde 33, 500, 2000,5000 ve 10000 kat büyütülmüş görüntüleri	182
Şekil 9.13 Pet50-yfc50 harcı üzerinde yapılan eds analizi sonucu	183
Şekil 9.14 Pet50-yfc50 harcının içerisindeki takoz tipi pet agreganın sem analizinde parlak yüzeyde 2000 kat büyütülmüş görüntüleri	183
Şekil 9.15 Pet50-yfc50 harcının içerisindeki agrom tipi pet agrega ile matrisin sem analizinde parlak yüzeyde 2000 kat büyütülmüş görüntüsü	184
Şekil 9.16 Pet50-yfc50-lif2 harcının sem analizinde kırık yüzeyde 30, 100, 500, 2000, 5000 kat büyütülmüş görüntüleri	185
Şekil 9.17 Asit etkisi sonrası kontrol harcının sem analizinde kırık yüzeyde 30, 500, 1000 ve 1500 kat büyütülmüş görüntüleri	186

Şekil 9.18 Asit etkisi sonrası pet50 harcının sem analizinde kırık yüzeyde 27, 1000, 2000 kat büyütülmüş görüntüleri ve eds analizi	187
Şekil 9.19 Asit etkisi sonrası pet50-yf50 harcının sem analizinde kırık yüzeyde 30 ve 1000 kat büyütülmüş görüntüleri ve eds analizi	189
Şekil 9.20 Asit etkisi sonrası pet50-yfc50-lif2 harcının sem analizinde kırık yüzeyde 27, 350, 500 ve 1500 kat büyütülmüş görüntüleri	190

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Ön deneyde hazırlanan karışımların m ³ miktarları	2
Tablo 2.1 Pet'in fiziksel ve kimyasal özellikleri (Anabal, 2007)	8
Tablo 2.2 Plastik ürünlerin sınıflandırılması (Tayyar ve Üstün, 2009)	11
Tablo 3.1 Ts en 206-1'e göre hafif betonun yoğunluk sınıflandırması	19
Tablo 4.1 Betonda kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Felekoğlu, 2009)	37
Tablo 5.1 Astm c 618 standardına göre uçucu külün sınıflandırılması.....	57
Tablo 6.1 Pet atıkların harçta kullanılması için yapılan taze ve sertleşmiş hal deneyleri.....	60
Tablo 6.2 Pet agregaların harç içerisinde kullanımı için yapılan deneylerde değişkenler ve belirlenen özellikler	60
Tablo 6.3 Yer karosu üretimi için yapılan sertleşmiş ve taze hal deneyleri	61
Tablo 6.4 Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde değişkenler ve belirlenen özellikler.....	62
Tablo 6.5 Deneylerde kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri	63
Tablo 6.6 Deneylerde kullanılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanının kimyasal özellikleri	64
Tablo 6.7 Yer karosu üretimi için kullanılan renkli agregaların kökenleri ve fiziksel özellikleri.....	65
Tablo 6.8 Deneylerde kullanılan pet agregaların fiziksel özellikleri	65
Tablo 6.9 Deneylerde kullanılan pet ve doğal agregaların elek analizleri.....	66
Tablo 6.10 Deneylerde kullanılan akışkanlaştırıcı katkının kimyasal özellikleri	67
Tablo 6.11 Deneylerde kullanılan pet liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	67
Tablo 7.1 Agregaya yerine pet atıkların harçlarda kullanımında yapılan deneyler, belirlenen özellikler ve örnek boyutları	89
Tablo 7.2 Hazırlanan karışımların kg/m ³ miktarları (a).....	92
Tablo 7.3 Hazırlanan karışımların kg/m ³ miktarları (b).....	100
Tablo 7.4 Hazırlanan karışımların kg/m ³ miktarları (c).....	104

Tablo 7.5 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi ve lif eklenmesi sonucu 7 günlük sertleşmiş harç örneklerinin eğilme dayanımları ve tokluk değerleri	108
Tablo 7.6 Karıştırılmış agrom ve takoz tipi pet agregaların kuma ikame edilerek pet lif eklenmesinin harç örneklerinin basınç dayanımlarına etkileri	111
Tablo 7.7 Hazırlanan karışımların kg/m^3 miktarları (d).....	112
Tablo 7.8 Farklı su/çimento oranında, takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi sonucu 7 günlük örneklerden elde edilen eğilme dayanımı ve toklukları.....	114
Tablo 7.9 Hazırlanan karışımların kg/m^3 miktarları (e).....	116
Tablo 7.10 Karıştırılmış agrom ve takoz tipi pet agregaların kırma kuma ikame edilmesi ve yüksek fırın cürufu ikameli sertleşmiş harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri.....	120
Tablo 7.11 Karıştırılmış agrom ve takoz tipi pet agregaların kırma kuma ikame edilmesi ve uçucu kül ikameli sertleşmiş harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri	122
Tablo 7.12 Karıştırılmış agrom ve takoz tipi pet agregaların kırma kuma ikame edilmesi ve silis dumanı ikameli sertleşmiş harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri	124
Tablo 7.13 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 7 günlük basınç dayanımları değerleri ve basınç dayanımlarında azalma oranları.....	125
Tablo 7.14 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 28 günlük basınç dayanımları değerleri ve basınç dayanımlarında azalma oranları.....	127
Tablo 7.15 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 56 günlük basınç dayanımları değerleri ve basınç dayanımlarında azalma oranları.....	128
Tablo 7.16 Hazırlanan karışımların kg/m^3 miktarları (f)	132
Tablo 7.17 Karıştırılmış agrom ve agrom tipi pet agregaların renkli agregaya ikame edilmesi ve gri çimento yerine beyaz çimento kullanılması sonucunda 7 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri.....	136

Tablo 8.1 Pet atıkları ile yer karosu üretimi ve özelliklerinin belirlenmesinde yapılan deneyler, belirlenen özellikler ve örnek boyutları.....	141
Tablo 8.2 Yer karosu imalatı için hazırlanan karışımların kg/m^3 miktarları	140
Tablo 8.3 Hazırlanan 28 gün kür edilmiş karışımların eğilme dayanımı ve tokluk değerleri.....	145
Tablo 8.4 56 gün kür edilmiş karışımların eğilme dayanımı ve tokluk değerleri	146
Tablo 8.5 90 gün kür edilmiş karışımların eğilme dayanımı ve tokluk değerleri	147
Tablo 8.6 28 gün kür edilmiş karışımların basınç dayanımı ve basınç dayanımında azalma oranları	148
Tablo 8.7 56 gün kür edilmiş karışımların basınç dayanımı ve basınç dayanımında azalma oranları	149
Tablo 8.8 90 gün kür edilmiş karışımların basınç dayanımı ve basınç dayanımında azalma oranları	150
Tablo 8.9 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi öncesi ve sonrası eğilme, basınç ve tokluk değerleri	159
Tablo 8.10 Hazırlanan karışımların asit etkisi öncesi ve sonrası eğilme, basınç ve tokluk değerleri	161

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Dünya nüfusunun her yıl hızla artması tüketimi ve tüketimi arttırmaktadır. Üretim ve tüketim sonucunda, değişik katı, sıvı ve gaz atıklarının ortaya çıkması ve tüketime bağlı olarak sürekli artış göstermesi, dünya çapında çevre kirliliğini günümüzde kritik seviyelere getirmiştir. Bu durum bilim adamları tarafından tehlikeli olarak kabul edilecek değerlere ulaştığı belirtilmektedir. Yapılan araştırmaların neticesinde çevre kirliliğinin %50 sinin son 35 yılda oluştuğu ortaya çıkmaktadır. Pet esaslı katı atıklar, dünyada toplanan katı atıkların ağırlıkça %8 ve hacimce %12'sini oluşturmaktadır (Tayyar ve Üstün, 2009). Gün geçtikçe artan miktarlarda ortaya çıkan atıklar üç yöntemle kontrol altına alınabilir;

- Daha az atık üretimi
- Atıkların geri kazanımı,
- Atıkların çevreye zarar vermeden yok edilmesi.

Atıkların geri kazanılması bu üç yöntemden en fazla fayda sağlayan olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin; Bir adet pet şişe üretimi için 1,2 kg ham petrol kullanılması ve ham petrolün kullanılması için yaklaşık 65 lt su kullanılması, buna ek olarak bir pet şişenin doğada 600 yılda hiç bozulmadan kalabilmesi büyük bir çevre sorunu yaratmaktadır. Bir ton pet şişenin kazanımında 14 bin kW/sa enerji tasarrufu yapılması ise atığın geri kazanılmasının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir (Anon, 2009).

Geri dönüşüm alanında yapılan çalışmaların büyük bölümü petrol esaslı plastikler üzerinedir. Plastik kökenli atıkların doğada kendiliğinden yok olması çok uzun yıllar sürmekte ve toplanıp geri dönüştürülmesi ise çok zor olmaktadır. Geri dönüştürülen organik ürünler ve atıklar insan sağlığına genelde zarar vermez iken plastik kökenli ürünlerin ve atıkların insan vücuduna temas halinde olmasının, insan sağlığını tehdit ettiği yapılan araştırmalar sonucunda ortaya çıkmıştır.

Petlerin geri dönüşümü sonucu elde edilen ürünlerin, tekstil, mobilya, otomotiv ve gıda sektörlerinde kullanıldığı bilinmektedir (Anonim, 2009).

Tez çalışmasında, PET atıkları harç içerisinde değerlendirerek beton özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Yapılan ön denemelerde, lif haline getirilmiş geri dönüşüm petlerin çimento esaslı bağlayıcılarla birlikte kullanılıp; hafif, dayanıklı ve ısı yalıtımı yüksek bir malzeme elde ederek yapı sektöründe kullanılması amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda pet liflerin maksimum oranda, homojen bir şekilde kalıba sığdırabilmek için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, farklı fiziksel yapıda olan lifler farklı yöntemlerle 25*60*310 mm boyutlarındaki kalıplara sığdırılmıştır. Hazırlanan harçlara eğilme deneyi yapılarak yük sehim davranışları çıkartılmıştır. Deneylerde tek bir harç karışımı hazırlanmış ve bütün serilerde aynı karışım kullanılmıştır. Karışımın su/çimento oranı 0,45'tir. Deneyde hazırlanan harç karışımının m³ miktarları Tablo 1.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1 Ön deneyde hazırlanan karışımların m³ miktarları.

Malzemeler	Karışım Miktarları (gr.)
Çimento (CEM I 42,5 R)	869
Kireçtaşı Tozu	869
Su	391
Süperakışkanlaştırıcı	17,3

Deneyde kullanılan pet lifler;

- Holo-düz-sürekli Lif (HDS): Su hortumuna benzer şekilde içinde boşluk bulunan kabartılmamış sürekli lif (Şekil 1.1).
- Holo-kabartılmış-kısa Lif (HKK): Kabartılmış, içi boş, üç santimetrelilik kısa liflerden oluşmaktadır (Şekil 1.2).
- Düz-sürekli Lif (DS): İçi dolu, sürekli pet lif (Şekil 1.3).



Şekil 1.1 Kabartılmamış sürekli lif (hds).



Şekil 1.2 Kabartılmış içi boş kısa lif (hkk).



Şekil 1.3 Düz sürekli lif (ds).

Yapılan deneyler;

1. Deney: HKK lifler hacimce %1, %3 ve %5 oranında kalıba önceden yerleştirildikten sonra, kalıptan dışarı çıkmaması için üzeri yeşil renkli sıva filtresi ile kapatılmıştır. Şerbet kıvamındaki; çimento, su, akışkanlaştırıcı katkı ve kireçtaşı tozlu karışım bu kalıba dökülerek liflerin içine emdirilmiştir (Şekil 1.4).
2. Deney: HKK lifler, çimentolu karışıma hacimce %5 oranında eklenmiş ve mikserde karıştırıldıktan sonra kalıba yerleştirilmiştir (Şekil 1.5).
3. Deney: Hacimce %5 HDS ve %6 DS lifler taze harç karışımına daldırılıp çıkarılarak aynı doğrultuda kalıba yerleştirilmiştir (Şekil 1.6).



Şekil 1.4 1. Deneyin yapılış yöntemi



Şekil 1.5 2. Deneyin yapılış yöntemi



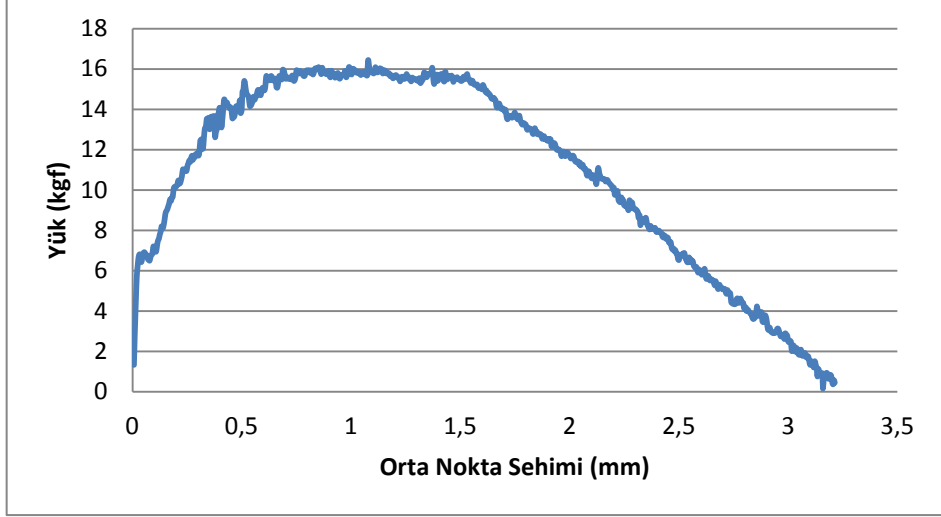
Şekil 1.6 3. Deneyin yapılış yöntemi

Hazırlanan karışımlarda, çimento harcının alabileceği en fazla lif miktarı eklenmiştir. Yedi gün su küründe bekletilmiş karışımlara iki eksenli deplasman kontrollü eğilme deneyi yapılarak yük-sehim grafikleri çizilmiştir. Deney sonuçlarında;

İlk deneyde, kalıba yerleştirilen liflere dökülen taze harç, liflerin içerisine tamamen nüfuz edememiş ve lif dozajı arttıkça bu durum daha çok belirginleşmiştir. Bu örneklere eğilme deneyi yapılamamıştır (Şekil 1.7).

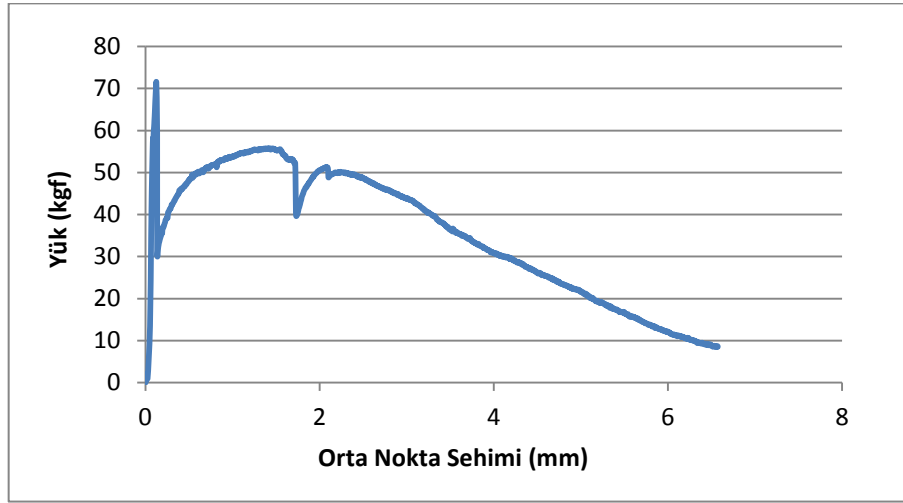


Şekil 1.7 1. deney sonrası örnek görüntüleri.



Şekil 1.8 2. deney örneklerinin eğilme deneyi sonrası yük-sehim eğrisi.

2. ve 3. deneyde, eğilme deneyi yapılan örnekler çok düşük yükte kırılmıştır (Şekil 1.8 ve Şekil 1.9).



Şekil 1.9 3. deney örneklerinin eğilme deneyi sonrası yük-sehim eğrisi.

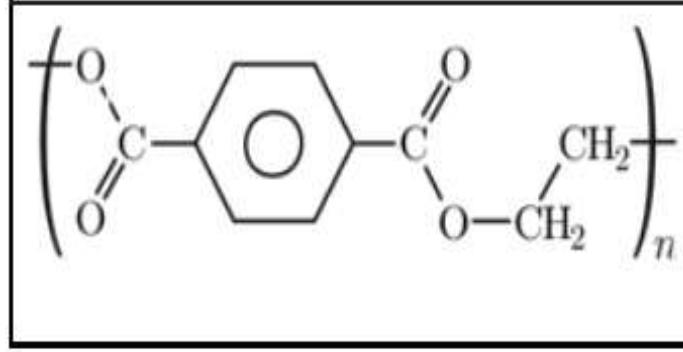
Yapılan bu ön çalışmada deney sonuçları göz önünde bulundurularak pet lifli karışımlardan dayanımı düşük örnekler elde edileceği ve sadece pet lif kullanılarak yapılacak çalışmanın yetersiz kalabileceği düşünülmüştür. Bu sonuçlar, tezin kapsamı ve işleyişine ışık tutmuştur. Daha sonra yapılacak deneylerde, atık pet agregalar ve pet lifler bir arada kullanılarak farklı bir yol izlenmiştir. Pet agregaların doğal agregalar yerine kullanılmasının getirdiği avantaj ve dezavantajlar incelenmiştir

BÖLÜM İKİ

POLİETİLEN TEREFTALAT

2.1 Polietilen Tereftalatın Yapısı

Molekül yapısı Şekil 2.1'de gösterilen PET' in açılımı polietilen tereftalattır. Polietilen tereftalat, termoplastik bir eriyiktir. Isıtıldığında yumuşayan, soğutulduğunda tekrar sertleşen zincir içinde kovalent, zincirler arasında wan der waals bağlarına sahiptir (Tayyar ve Üstün, 2009).



Şekil 2.1 Pet'in kimyasal yapısı (Tayyar ve Üstün, 2009).

Polietilentereftalat amorf yapıya sahiptir. Eritilme aşamasında iki kritik sıcaklık vardır. Sıcaklık 80°C' ye geldiğinde 'camsı geçiş' adı verilen faz değişimi olmaktadır. Ancak sıcaklık 175 °C ye gelene kadar sertliğini kaybetmez. PET' in fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir (Anabal, 2007).

PET farklı kimyasal yöntemlerle sentezlenebildiği gibi, sentez sonrası değişik ısı işlemlere tabi tutularak üretim yapılabilir. Termoplastik bir polimer olduğu için, üretimi takiben hangi fiziksel yapıya sahip olursa olsun, ek bir ısı işlemle bu yapıyı değiştirmek ve geliştirmek mümkündür. Amorf yapıya sahip olan pet, saydam (şeffaf) bir ürün oluştururken, içeriğindeki kristallerin boyutuna ve yapısına bağlı olarak yarı – kristal, saydam ya da opak olabilir. Amorf yapı elde etmek için üretim sırasında eriyik halde bulunan pet, hızla soğutularak zincirler düzensiz yapıda dondurulur. Bütün yarı-kristal polimerlerde olduğu gibi pet'in de sahip olabileceği belirli bir en yüksek kristal yapı oranı vardır. Ticari olarak sentezlenen pet en fazla

%60 oranında kristal yapıya sahip olabilir ve ortalama erime sıcaklığı 270°C civarındadır. 270°C gibi gayet yüksek bir erime noktasına sahip olan pet, bükülmesi zor ve sert bir zincir omurgasına sahiptir. Bu sebeple yüksek mukavemete, yüksek tokluğa ve 150°C'ye kadar yorulmaya karşı yüksek dirence sahiptir. Düşük özgül ağırlığa sahip olan pet, üretildiği kalınlığa göre yarı-sert ya da tam-sert olabilir. Sağlam bir plastik olan pet darbeye karşı da dayanıklıdır. İyi mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra gazlara, çözücü kimyasallara ve alkollere karşı iyi bir bariyerdir. Özellikle asitlere karşı çok dayanıklıdır. Ancak alkali ortama az da olsa duyarlıdır. Betonun kimyasal yapısı itibarıyla alkali ortama sahip olması polietilentereftalat için risk oluşturabilmektedir (Anabal 2007).

Tablo 2.1 Petin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Anabal 2007) .

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

Neme karşı bariyer özelliği o kadar iyi olmasa da diğer plastiklerin yanında yine de yeterli kalır. Geçirimsizlik özelliği sayesinde özellikle plastik şişelerde sıklıkla kullanılan PET, oksijen geçirgenliğinin kritik olduğu durumlarda ise poli(vinil alkol) ile kompozit oluşturularak daha iyi bir bariyer elde edilebilir (Anonim, 2013).

2.2 PET'in Üretim Sistemi

2001 senesindeki kayıtlara göre dünyada 30 milyon ton pet üretilmiştir. Sentezlenen plastiklerin %45'i elyaf yapımında kullanılmıştır. Pet elyafları kırışıklığa ve aşınmaya karşı çok dayanıklıdır. Ayrıca çapraz bağlanma ile işlenerek kışıklık önleyici özelliğe sahip olunur. Petin başarılı gaz bariyeri özelliği sayesinde, üretilen pet polimerlerin %10'u şişeleme başta olmak üzere yiyecek-içecek paketleme endüstrisinde kullanılır (Anonim 2013).

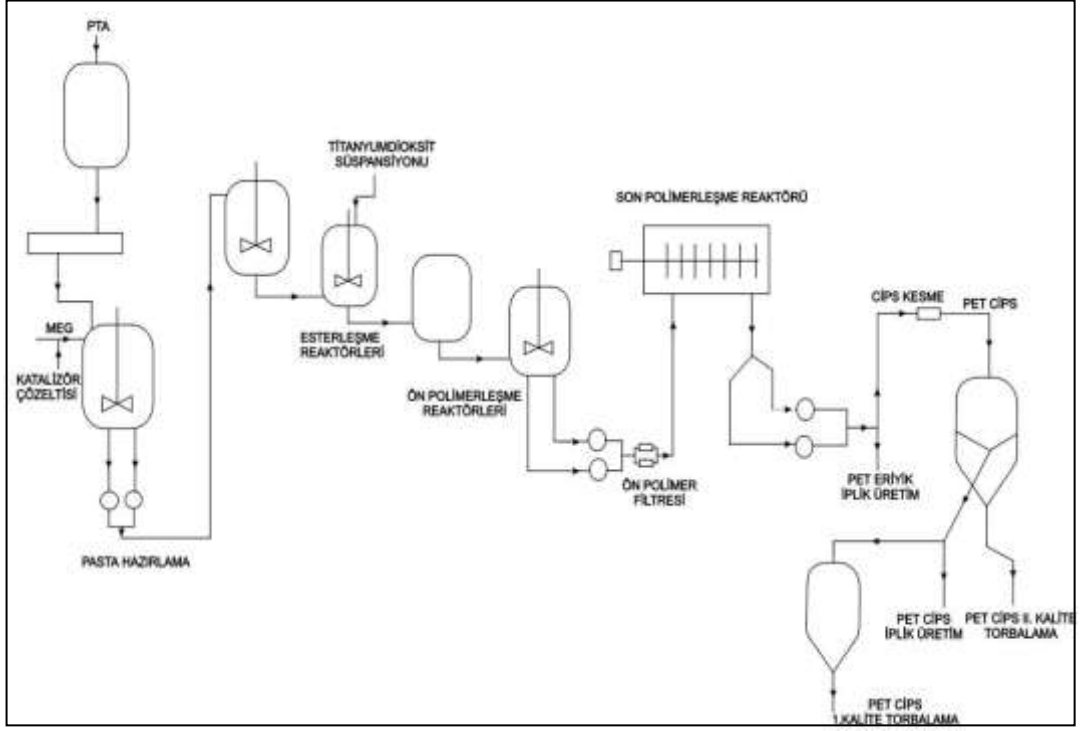
Şekil 2.2'de Petin plimerizasyon reaksiyonlarının aşamaları gösterilmektedir. Polietilen tereftalat, tereftalik asit veya dimetil tereftalatın monoetilen glikol ile reaksiyonu ile elde edilen bir polimerdir. Bu reaksiyon sıcaklık, katalizörler ve vakum altında gerçekleşen bir reaksiyon olup iki aşamalıdır.

Polimerizasyon reaksiyonunun birinci aşamasında esterleşme reaksiyonu için manganez asetat veya çinko asetat katalizör eşliğinde 200 °C'de reaksiyona sokulmuştur. Açığa çıkan metanol 700 mmHg – 900 mmHg arasında bir vakum oluşturularak ortamdaki uzaklaştırılır.

İkinci aşamada ortama antimon trioksit veya titanyum izopropoksit vb. bir katalizör eklenerek monomerlerin polimerizasyonu gerçekleştirilir. Ortam sıcaklığının 260 °C ile 290 °C arasında olduğu bu reaksiyonda ortama kademeli olarak vakum uygulanır (Anonim, 2013).

Ortam basıncının 0,1 barın altına düşmesi ile istenen molekül ağırlığına ulaşılan kadar polimerizasyona devam edilir. Molekül ağırlığının artmasının ölçütü eriyik polimerin karıştırıcıya gösterdiği mukavemettir.

Karıştırıcının akımölçerlerinden okunan değerler ile kalibre edilmiş standartlardan yola çıkılarak polimerizasyon süresine karar verilir. Çeşitli şekillerde ortaya çıkan pet ürünleri Şekil 2.3' de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Pet'in polimerizasyon reaksiyonları (Anonim, 2009).



Şekil 2.3 Pet ürünleri (Anonim, 2009).

2.3 Geri Dönüşümde Kullanılan Plastiklerin Kodlanması

1988 yılında plastik kaplar uluslararası bir düzenlemeyle yedi kategoride sınıflandırılmıştır. Bu numaralar plastik kabın altındaki üçgen şeklinin içinde yazmaktadır. Yazılan numaralar, plastik kabın hangi madde kullanılarak üretildiğini göstermektedir. Bu numaraların açıklaması Tablo 2.2’ de yapılmıştır (Tayyar ve Üstün, 2009).

Tablo 2.2 Plastik ürünlerin sınıflandırılması (Tayyar ve Üstün, 2009).

No	Kısaltma	Polimer	Kullanım
1	PETE-PET	Polietilen Tereftalat	Polyester fiberler, film, elyaf, şişe
2	YYPE-HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen	Taşınmaya elverişli kapların yapımı, şişe, çanta
3	PVC-V	Polivinil Klorür	Çit ve parmaklık malzemeleri, yiyecek dışı şişeler
4	LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen	Sera örtüsü, film, ambalaj, elektrik sanayi
5	PP	Polipropilen	Plastik şişe, mutfak eşyası
6	PS	Polistiren	Oyuncak, videokaset, tepsi, Yalıtım malzemesi
7	Diğer	Akrilik, polikarbonat, naylon ve diğer	

2.4 Atık Pet Plastiklerden Elyaf Üretim Sistemi ve PET Agregaların Elde Edilmesi

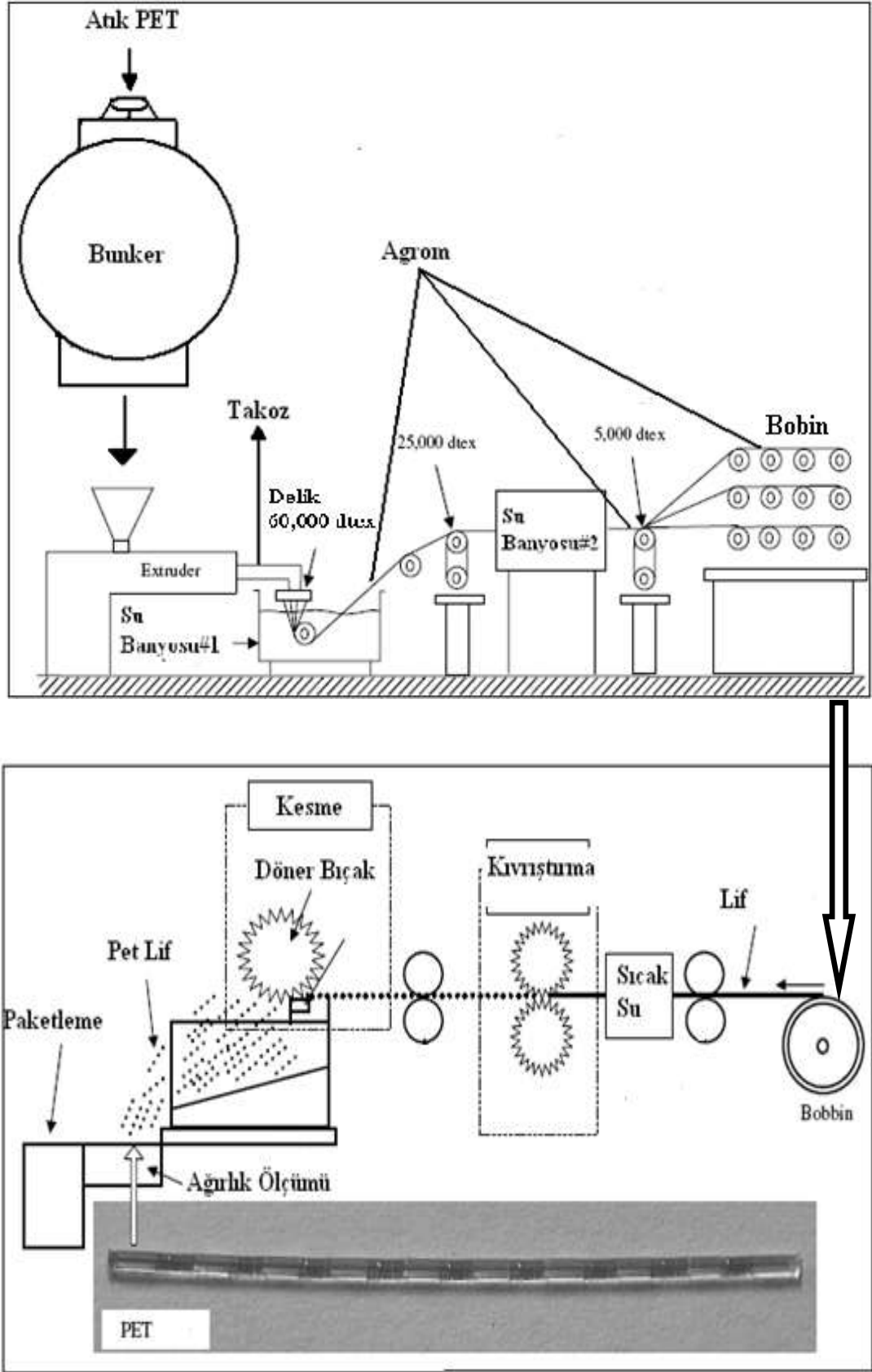
Çöpe atılarak çevre kirliliğine neden olan pet şişe ve ambalaj atıklarının toplanıp, geri dönüşüme hazırlanması Şekil 2.4’deki gibi olmaktadır. Çöpe atılan pet şişe ve pet ambalaj atıkları toplanıp ayrıştırılırken elektronik ya da manuel olarak pet dışındaki maddeler ayıklanır (pvc, kâğıt vs.). Atık petler ayrıştırıldıktan sonra kırma-yıkama tesislerinde küçük parçalara ayrılarak 90 °C’ deki su ile birlikte asedik asit ve kostik asitle temizlenir. Temizlenen petler daha sonrasında kurutma işleminden geçirilir. Ambalajlanan petler polyester işleme tesislerine nakledilir.



Şekil 2.4 Ambalaj atıklarının geri dönüşüme hazırlanması.

Geri dönüşüm tesisleri, pet atıkları üretim işlemlerine göre polyester lif, levha, ambalaj malzemesi olarak atık petleri tekrar geri dönüşüme kazandırmaktadırlar. Bu tip atık petlerden geri kazanım tesislerinde üretim hataları sonucu polyester atık malzemeleri çıkmaktadır. Bu atıklar, üretim aşamasında erimiş fakat istenilen özellikte olmayan polyesterin üretim aşamasındaki durumuna göre iki farklı tipte ortaya çıkmaktadır. Atık petleri elyaf haline getiren geri dönüşüm sisteminin şeması Şekil 2.5' de verilmiştir. Bu atıklar imalat sistemindeki üretim aşamasının durumuna göre iki farklı formda oluşurlar. Atıkların bir kısmı üretime tekrar dâhil edilir. Bir kısmı atık olarak depolanır. Polietilen tereftalat termoplastik bir malzeme olmasına rağmen her ısıl işlemde geçirildiğinde mukavemeti düşer, bu yüzden oluşan atıkların tamamı aynı zamanda geri dönüşüme katılamazlar.

Kırılıp-yıkanmış olan petler Şekil 2.5'de görülen 'bunker' adı verilen ön ısıtıcılarla 140-150 °C' de 6 saat boyunca ısıtılarak pet içerisindeki nem alınır. Nem alınmazsa pet 240 °C' de suyla reaksiyona girerek bozunur. Bunkerler aracılığıyla tamamen kurutulmuş petler 'extruder' adı verilen makinede 240 °C ile 280 °C arasında ısıtılarak akışkan hale getirilirler. Akışkan hale gelen pet eriyik filtreden geçirilerek yabancı maddelerden arındırılır. Yabancı maddelerden arındırılan eriyik petler ince lif haline getirilmek üzere 'nozıl' adı verilen mikron boyutunda çaplara sahip deliklerden basınçla geçirilerek lif haline getirilirler. Eriyik petlerin nozıla geçiş aşamasında, imalat hatası ya da filtreden ilk çıkan eriyik petlerin kusurlu olabileceği düşünülerek bir miktar eriyik pet boş kalıba doldurularak ayrılır. Bu aşamada Şekil 2.6'da gösterilen 'takoz' adı verilen atık pet ortaya çıkar (Anonim 2013).



Şekil 2.5 Atık petten geri dönüşüm ile elyaf elde edilmesi.

Eriyik petler basınçla geçirilip lif haline getirildikten sonra suyla soğutularak ortam sıcaklığına getirilir. Soğutulan lifler bobinlerden geçirilerek inceltir. İstenilen inceliğe ulaşan lifler kurutulup kesilerek satışa hazır hale getirilir. Nozıldan geçirilerek satış aşamasına kadarki imalat sürecinde meydana gelen hata sonucunda kullanışsız hale gelen pet lifler toplanıp eritilerek Şekil 2.7’ da gösterilen ‘agrom’ adı verilen imalat atığı oluşur.



Şekil 2.6 Takoz tipi pet agregası.

Elyaf üretim sistemine giren atık petlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre ürünlerin özellikleri de farklı olmaktadır. Buna bağlı olarak üretim atıklarından ortaya çıkan pet agregaların da sertlik, uzama gibi özellikleri farklı olmaktadır. Takoz pet agregaları boşluksuz yapıda, sert ve pürüzsüz yüzey yapısına sahip iken Agrom pet agregaları kırılkan, boşluklu ve pürüzlü yüzeye sahiptir.



Şekil 2.7 Agrom tipi pet agrega.

BÖLÜM ÜÇ

HAFİF AGREGALI BETONLAR

Betonarme yapılarda kullanılan betonlar yüksek dayanımlı ancak ağır ve yüksek ısı iletkenliğine sahiptirler. Bunun sonucunda binanın yükünü arttırmakta ve yapı elemanının taşıyıcı sisteminde kesit boyutlarında büyümeye neden olmaktadır. Bu yüzden yüksek yapılarda, yapının hafifletilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Betonun hafifletilmesi, içerisindeki agreganın hafifliğine bağlıdır. Agreganın hafif olması betonun birim hacim ağırlığını düşürmekte ancak mukavemetini azaltmaktadır.

Bilinen ilk taşıyıcı hafif betonlar pomza, cüruf ve tuf gibi volkanik malzemeler kullanılarak elde edilmiştir. Kullanılan bu agregaların bazıları aynı zamanda puzolanik etki göstererek betonun dayanım ve dayanıklılığını yükselttiği görülmektedir (Dikici, 2010).

3.1 Hafif Betonun Tanımı

ACI 213R-03'te birim hacim ağırlıkları 1840 kg/m^3 'ü geçmeyen ve 28 günlük silindirik basınç dayanımı 17 MPa 'ı aşan betonlar taşıyıcı hafif beton sınıfına girerler. Hafif betonların birim hacim ağırlıkları genellikle $300\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir (Postacıoğlu, 1986).

TS EN 206-1' de, etüv kurusu durumdaki birim hacim ağırlığı 800 kg/m^3 'ten büyük, 2000 kg/m^3 'ten küçük olan beton hafif beton olarak tanımlanmaktadır.

TS 2511'de, karakteristik basınç dayanımı 16 MPa 'dan daha büyük olan ve havada kurumuş haldeki birim hacim ağırlığı da en fazla 1900 kg/m^3 olan hafif agregalı betonlar taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır.

Hafif betonlar, sahip oldukları birim hacim ağırlıklarına göre kullanılabilceği alanlar şunlardır;

- Yalıtım Betonları: 300-800 kg/m³
- Orta Mukavemetli Hafif Betonlar: 800-1400 kg/m³
- Taşıyıcı Hafif Betonlar: >1400 kg/m³

Doğal Hafif Agregalar: Pomza taşı, volkanik tuf, volkanik cüruf

Doğal Malzemedен Üretilen Yapay Hafif Agregalar: Genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist, genleştirilmiş arduvaz, perlit, vermikülit gibi polimer esaslı malzemeler.

Endüstriyel Atıkların İşlenmesiyle Üretilen Hafif Agregalar: Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu kül.

3.1.1 Hafif Betonun Normal Betona Göre Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları:

- Birim hacim ağırlıkları düşük olduğu için yapının ağırlığının azalması sonucu yapı elemanı kesitlerinde azalma, bunun sonucunda yapı maliyetinin azalmasını sağlar.
- Düşey yükün azalması sonucunda yapıya etkiyen deprem yüklerinin azalmasını sağlar.
- Isı iletkenlik değeri düşük olduğu için ısı yalıtımını sağlar.
- Beton dökümünde kalıp hazırlama işçiliğini azaltır.

Dezavantajları:

- Dış yüklere karşı dayanımları düşüktür.
- Aşınmaya karşı dayanıksızdırlar.
- Büzülme ve sünme değerleri daha yüksektir.
- Hafif agregayı temin etmek daha zordur.
- Hafif agregalar normal agregalara göre daha pahalıdır.

- Homojen bir üretim yapmak zordur.
- Elastisite modüllerinin düşük olması sonucu fazla deformasyon yaparlar.

3.2 Hafif Betonun Fiziksel Özellikleri

3.2.1 İşlenebilirlik

Hafif agregalı betonlarda işlenebilirlik normal agregalı betonlara göre farklıdır. Düşük birim hacim özellikleri nedeniyle agregaya etkiyen yerçekimi kuvvetleri daha az olmakta ve bu durum da hafif betonun yayılma değerini olduğundan daha düşük değerlerde çıkmasına neden olmaktadır. Gerçekte ise hafif betonun karıştırılması ve işlenebilirliği normal betona göre daha kolay olmaktadır (Neville, 1995).

Hafif betonlarda yüksek vibrasyon, betonun ayrışmasına neden olabilmektedir. Hafif agregalardaki iri taneler vibrasyon etkisiyle yukarıya çıkar, daha ince tanelerse aşağıda kalır.

3.2.2 Su Emme

Betonun su emmesi, mekanik ve termik özelliklerini doğrudan etkileyen bir faktördür. Betonun gözenekli yapısıyla doğrudan ilişkili olan bu durum, betonun özelliklerini olumsuz yönde etkilediği için istenmeyen bir özelliktir. Hafif agregaların gözenekli yapıda olması, su emme değerini büyük ölçüde arttırmaktadır. Aynı agrega oranında fakat farklı agregalarla üretilen betonların su emme oranları da agregaların gözenek yapılarından dolayı farklı olmaktadır (Topçu ve Uygunoğlu, 2007).

Kılcal su emme değerleri de mekanik ve termik özelliklerini etkileyen bir faktördür. Kılcal su emme; harç, agrega çimento ara yüzeyi ve agregadaki kılcal boşluklar tarafından emilen su miktarı olup, betonun porozitesinden bağımsızdır. Direkt olarak kılcal boşluklarla ilgilidir (Uyan, 1975).

3.2.3 Birim Hacim Ağırlık

Hafif betonun yoğunluğu, sıkıştırma ve kür koşullarının dışında agreganın birim hacim ağırlığına, çimentonun dozajına, kimyasal ve mineral katkılara, agreganın tane dağılımı ve karışım oranıyla ilişkilidir.

TS EN 206-1 'e göre hafif betonların yoğunluğu Tablo 3.1' de verilmiştir. TS EN 206-01'e göre hafif betonun yoğunluğunu 800 ile 2000 kg/m³ arasında sınırlandırmıştır.

Tablo 3.1 TS EN 206-1'e göre hafif betonun yoğunluk sınıflandırması.

Yoğunluk Sınıfı	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Yoğunluk Aralığı (kg/m ³)	≥800 ve ≥1000	≥1000 ve ≥1200	≥1200 ve ≥1400	≥1400 ve ≥1600	≥1600 ve ≥1800	≥1800 ve ≥2000

3.2.4 Elastisite Modülü

Malzeme belirli bir yüke kadar şekil değiştirir ve yük kaldırıldığında eski haline geri döner. Buna elastik şekil değiştirme denir. Yükün artmasıyla beraber gerilme değeri de artar. Yükün kaldırılmasıyla malzeme ilk haline dönemez, buna plastik şekil değiştirme adı verilir. Orantı sınırı, elastik şekil değiştirmenin meydana geldiği en büyük gerilme değeri olarak tanımlanmaktadır. Orantılılık sınırı altındaki gerilmelerde, gerilmeler ve birim şekil değişimleri birbiriyle orantılıdır. Bu sabit orantıya elastisite modülü denir. Tek eksenli yüklemde bu bağıntı $\sigma = E \cdot \epsilon$ (Hooke Kanunu) olarak tanımlanır (Baradan 2006).

Basınç dayanımı ve elastisite modülü arasında kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır. Bugün betonarme ve çelik yapılarda uygulanmakta olan yönetmeliklerde elastisite modülünü basınç dayanımının fonksiyonu olarak ifade etmektedir. Basınç dayanımı etkileyen her etken elastisite modülünü de doğrudan etkilemektedir.

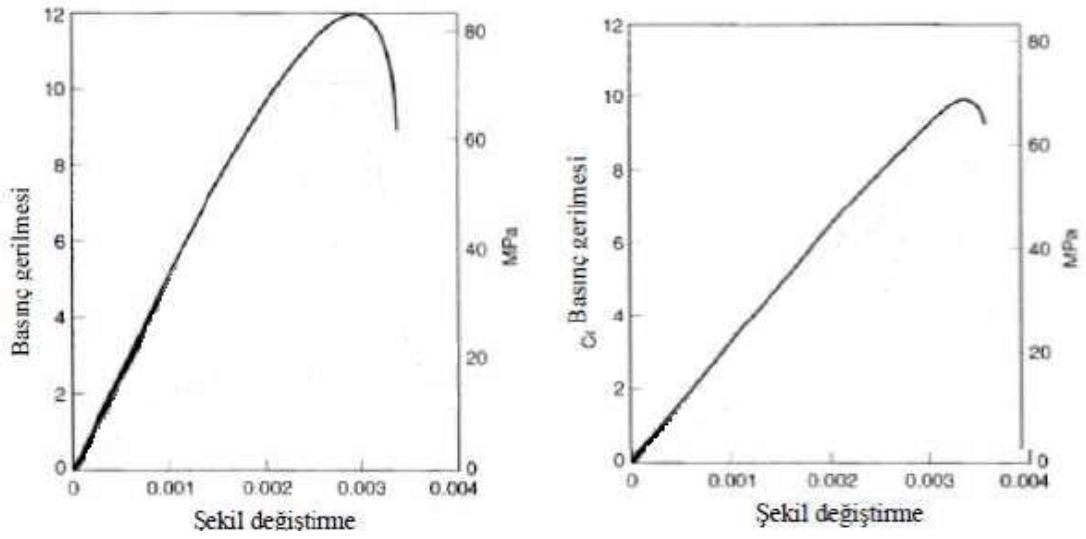
Betonun elastisite modülü, başta agregası tipi olmak üzere çimentonun elastisite modeline, su ve bağlayıcı oranına bağlıdır. Betonun basınç dayanımı azaldıkça oranı sınırı da azalmaktadır. Dolayısıyla elastisite modülü de düşmektedir. Düşük dayanımlı agregası kullanıldığında basınç dayanımı azalmakta ve elastisite modülü de düşmektedir. Dolayısıyla betonda hafif agregası kullanıldığında normal agregası kullanımına göre daha düşük elastisite değeri vermektedir (Haque, Al-Khaiat, Kayalı, 2004).

Basınç dayanımı ve birim hacim ağırlığı artmasıyla birlikte elastisite modülleri de artmaktadır. Hafif betonlardan elde edilen elastisite modüllerinin, eşdeğer küp dayanımı aynı olan normal ağırlıklı betonlar ile kıyaslandığında (TS 500 'deki karakteristik elastisite modülü değeri ile) %30-40 'ı oranlarında düşük olduğu ortaya çıkmaktadır. En büyük fark, en hafif betonda görülmüştür (Kadiroğlu, 2004).

3.2.5 Gerilme - Şekil Değişirme Özellikleri

Teorik olarak yapılan deneylerde malzemenin homojen davrandığı kabul edilir. Malzemeye etki eden yükün değerini malzemenin boyutlarından bağımsız hale getirmek için birim alana etkiyen kuvvet ve birim boydaki değişim göz önüne alınır. Birim alana etki eden kuvvete gerilme, birim boydaki değişim ise şekil değişirme olarak isimlendirilir (Onaran, 1991).

Şekil 3.1'de, basınç etkisi altındaki normal ve hafif betonun gerilme-şekil değişirme grafikleri verilmektedir. Normal betonda gerilme arttıkça şekil değişirme hafif betona göre daha az olmaktadır. Hafif beton normal betona göre daha sünek davranmaktadır. Normal betonda göçme olayı yaklaşık 0,003 civarında olurken hafif betonda 0,0035 civarında olduğu görülmektedir. Hafif betondaki gerilme-şekil değişirme grafiğinin normal betona göre daha doğrusal olduğu görülmektedir. Doğrusallığın dayanımın yaklaşık %90'ına kadar devam etmesi, hafif agregasının dış yüzeyinin pürüzlü olmasının matris ile arasındaki aderansı arttırdığı ve mikro çatlak oluşumunu engellemesine bağlı olduğu görülmektedir (Uzbaş, 2008).



Şekil 3.1 Normal (soldaki) ve hafif betonun (sağdaki) gerilme-şekil değiştirme grafiği (Uzbaş, 2008).

3.3 Atık PET Şişelerin Hafif Agrega Olarak Kullanılması

Çevre kirliliğinin nüfusa bağlı olarak artmasıyla birlikte atık plastiklerin inşaat sektöründe kullanımı üzerinde birçok çalışma yapılmaktadır. Betonun sudan sonra en çok kullanılan malzeme olması, araştırmacıların atık plastikleri beton içerisinde değerlendirme düşüncesine yönlendirmiştir.

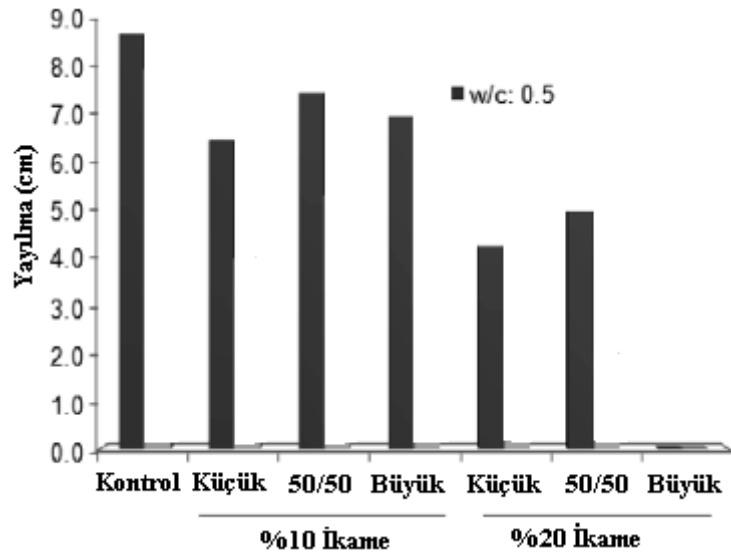
Araştırmalar, çoğunlukla atık pet şişelere fiziksel ve kimyasal işlem uygulanmadan, küçük parçalar halinde kesilerek beton içerisinde agrega olarak kullanılması üzerinde yapılmıştır. Pet şişeler ve atık plastikler üzerinde farklı deney yöntemleri kullanılmıştır. Bazı denemelerde pet agregalar rastgele beton içerisinde karıştırılırken, bazı deneylerde betonun ortasına düzlemsel şekilde yerleştirilmiştir. Deneylerde, betonda düşük birim hacim ağırlığı elde ederek hafif beton üretmek olmuştur. Değişik araştırmacılar elde edilen karışımların farklı fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmaların sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

3.3.1 İşlenebilirlik

Pomza gibi hafif agregalı betonlarda olduğu gibi pet agregalı betonlarda da işlenebilirlik normal betona göre daha düşük olarak ölçülmektedir. Hafif betonun birim hacim ağırlığı düşük olduğu için betona etkiyen yer çekimi kuvveti de daha az

olmaktadır. Bu durum hafif betonda işlenebilirliğin daha düşük değerler almasına neden olmaktadır. Hafif betonda işlenebilirlik daha düşük ölçülse de gerçekte kalıba ve sıkıştırma işlemleri normal betona göre daha kolay olmaktadır. Pet agregalı betonlarda da aynı durum söz konusudur (Albano, Camacho, Hernandez, Matheus, Gutierrez, 2009).

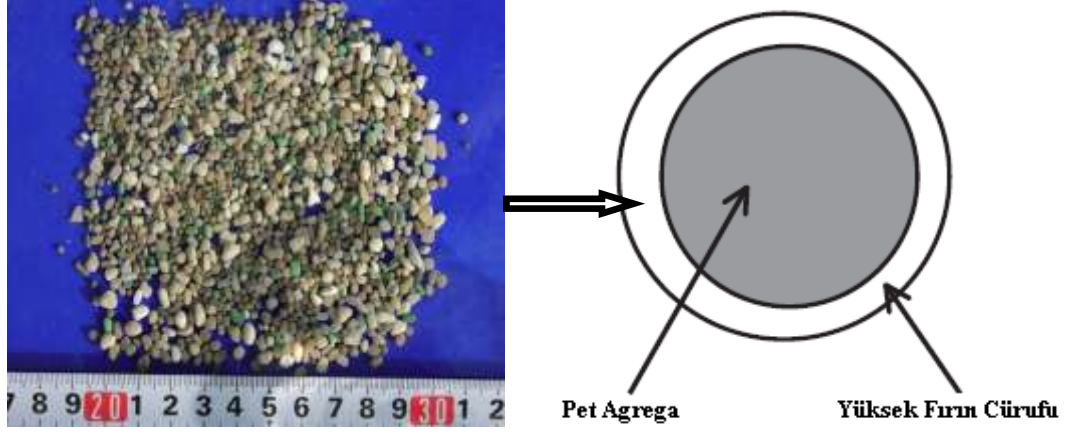
Birim hacim ağırlığın, taze haldeki hafif betonun işlenebilirliğini düşürdüğü (Albano ve diğer.,2009) tarafından deneylerde açıkça ortaya koyulmuştur. Şekil 3.2'ye bakıldığında beton içerisine 0,26 cm boyutlarında küçük ve 1,14 cm boyutlarında büyük pet parçaları kullanılmıştır. Deneyde; kontrol, tamamen küçük pet parçalı, Hacimce %50 küçük-%50 büyük pet parçalı ve tamamen büyük pet parçalı örnekler kullanılmıştır. Karışımın su/çimento oranı 0,5'tir. Pet agrega ikameli taze betonda kontrol karışımına göre daha az işlenebilirlik gözlenmiştir. Beton içerisinde kullanılan pet agrega ikamesi arttıkça işlenebilirlik azalmaya devam etmiştir. İri ve ufak pet parçalarının eşit hacimde kullanıldığı beton örneğinde ise işlenebilirlik aynı oranda farklı örneklere ikame edilen iri ve ufak pet agrega içeren örneklerden daha yüksek işlenebilirlik değeri göstermiştir.



Şekil 3.2 PET agreganın hafif betonun işlenebilirliğine etkisi (Albano, 2009).

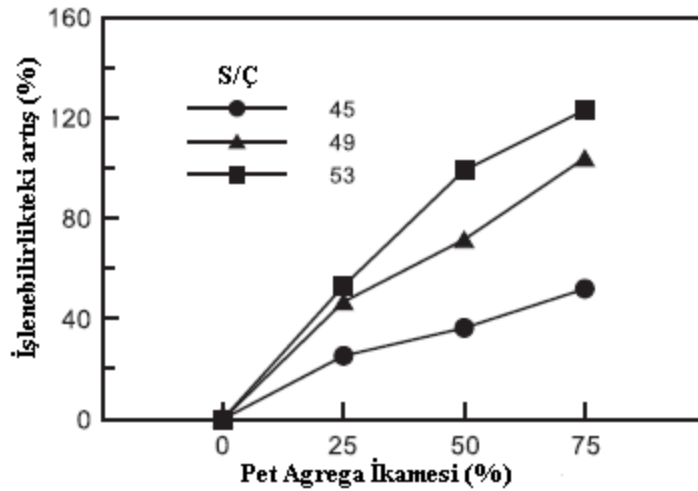
Pet şişe parçalarını farklı bir işlemde geçirip betonda kullanarak diğer araştırmalardan farklı bir yön izlemiştir. Atık pet parçalarını 240 °C'de eritip, eriyik

haldeyken yüksek fırın cürufu ile karıştırarak pet agreganın kesit görünüşü Şekil 3.3'de gösterildiği gibi geliştirmeye çalışmıştır (Choi, Moon, Chung, Cho, 2009).



Şekil 3.3 240 °C'de eritildikten sonra yüksek fırın cürufu ile karıştırılan pet agregası ve kesit görünüşü (Choi, 2009).

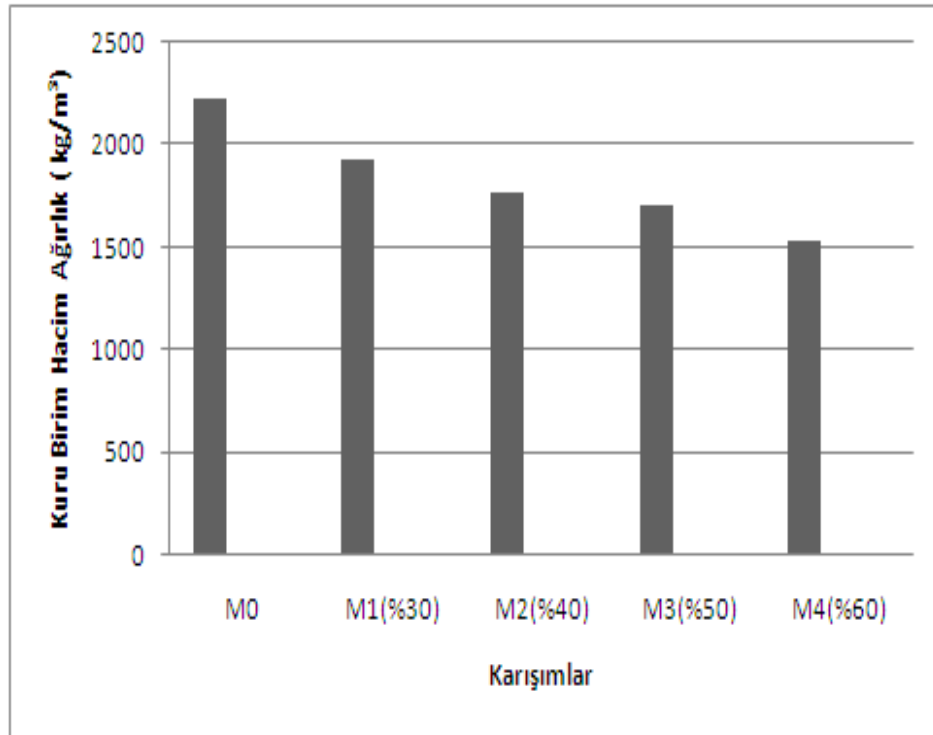
Choi ve diğer. (1999), eritip yüksek fırın cürufuyla karıştırdığı pet agregaları beton içerisinde hacimce %0, 25, 50, 75 oranında ince agregası olarak ikame yapılarak %45, %49, %53 S/Ç oranındaki ilenebilirliklerini ölçmüş ve Şekil 3.4'de göstermiştir. Şekil 3.4'e bakıldığında, pet agregası ikamesinin artışı, üç farklı S/Ç oranında da işlenebilirliği arttırmıştır. Betondaki pet agregası arttıkça işlenebilirliğin artması, diğer araştırmalarda ortaya çıkan sonuçlarla ters düşmektedir. Bunun nedeni olarak, pet agregası ikamesi arttıkça etrafını saran yüksek fırın cürufunun, taze betonun işlenebilirliğine olan olumlu etkisi gösterilmektedir (Choi ve diğer.,1999).



Şekil 3.4 PET agregası ikamesinin işlenebilirliğe etkisi (Choi, 1999).

3.3.2 Birim Hacim Ağırlık

Beton içerisine atık polietilen tereftalat ikamesi betonun birim hacim ağırlığını düşürerek hafif beton sınıfına girmesini sağlar. Akçaözoğlu ve Atış (2012)'nin yaptığı çalışmada işlem görmemiş 1-4 mm boyutlarındaki atık pet şişe parçalarını beton içerisine agrega olarak ikame yaparak birim hacim ağırlığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.5'de 28 günlük numuneler kurutulmuş birim hacim ağırlıkları ölçülmüştür. Şekil 3.5'de M0, M1, M2, M3 ve M4 karışımları sırasıyla, kontrol (%0), %30, %40, %50 ve %60 oranlarında pet agrega içeren karışımları ifade etmektedir.



Şekil 3.5 28 günlük pet agregalı örneklerin kuru birim hacim ağırlıklarının karşılaştırılması (Akçaözoğlu, 2012).

Şekil 3.5'de %40, 50, 60 pet agrega ikameli numuneler 1850 kg/m^3 değerinin altında ölçülerek ACI 213R'a göre yapısal beton sınıfına girebilmektedirler. Birim hacim ağırlıklarda meydana gelen düşüşün polietilen tereftalatın özgül ağırlığının yaklaşık $(1,4 \text{ g/cm}^3)$ olması ve bu değer doğal agreganın özgül ağırlığının $(2,5-2,6 \text{ g/cm}^3)$ çok altında olması sonucu meydana gelmektedir.

3.3.3 Yüksek Sıcaklık Etkisi

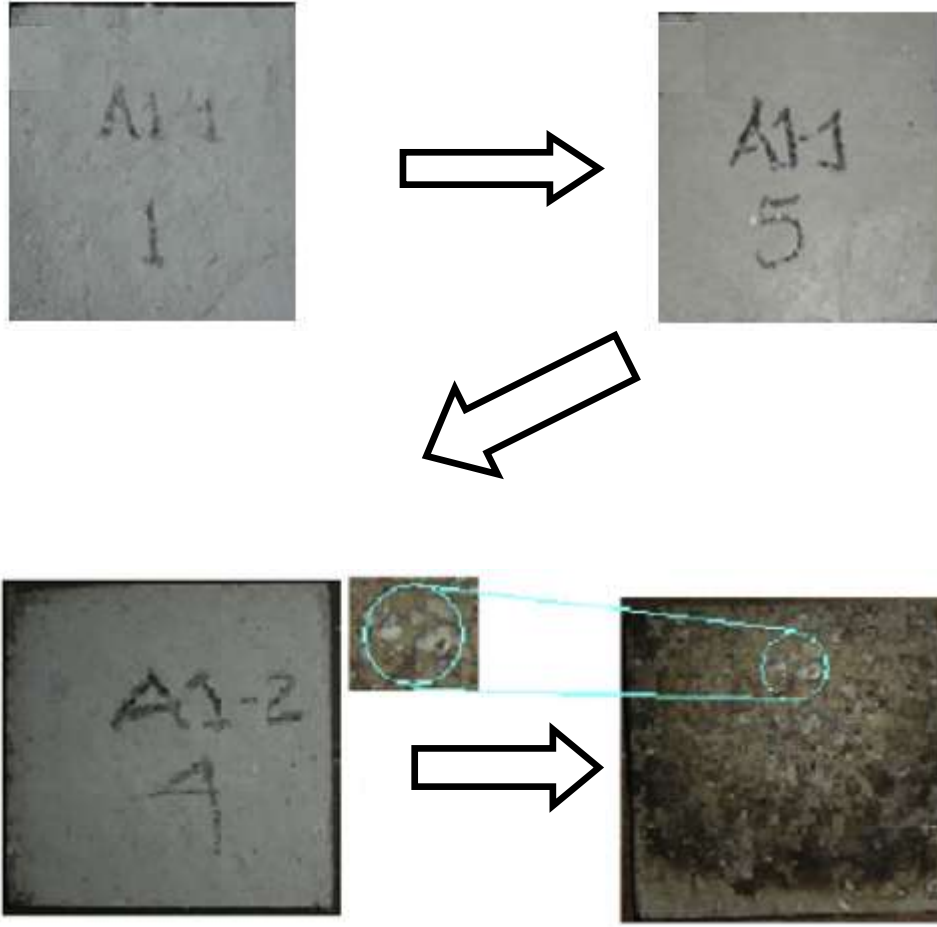
Pet polimerleri için yüksek sıcaklık 240 °C civarındadır. 80 °C polietilen tereftalat için camsı geçiş sıcaklığıdır. 240 °C de pet polimeri sertliğini kaybederek sıvı gibi davranmaya başlar ve taşıyıcı özelliği tamamen ortadan kalkar.

Albano ve diğer. (2009)'in yaptığı çalışmaya göre beton içerisine %10 ve %20 oranında pet agrega ikameli numuneler 200, 400 ve 600 °C sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan örnekler Şekil 3.6'da gösterilmiştir. 200 °C'ye maruz kaldıktan sonra pet agrega ikameli numunelerin yüzeyinde gözle görülür bir değişim olmamıştır. 400 °C ve üzerindeki sıcaklıkta betonun karakteristik rengi olan gri, kahverengi renge dönmüştür ve beton örneklerin yüzeyinden parçalar kopmaya başlamıştır. 600 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda beton örneklerinin yapısında belirgin bozunmalar ve büyük parça kopmaları meydana gelmiştir.

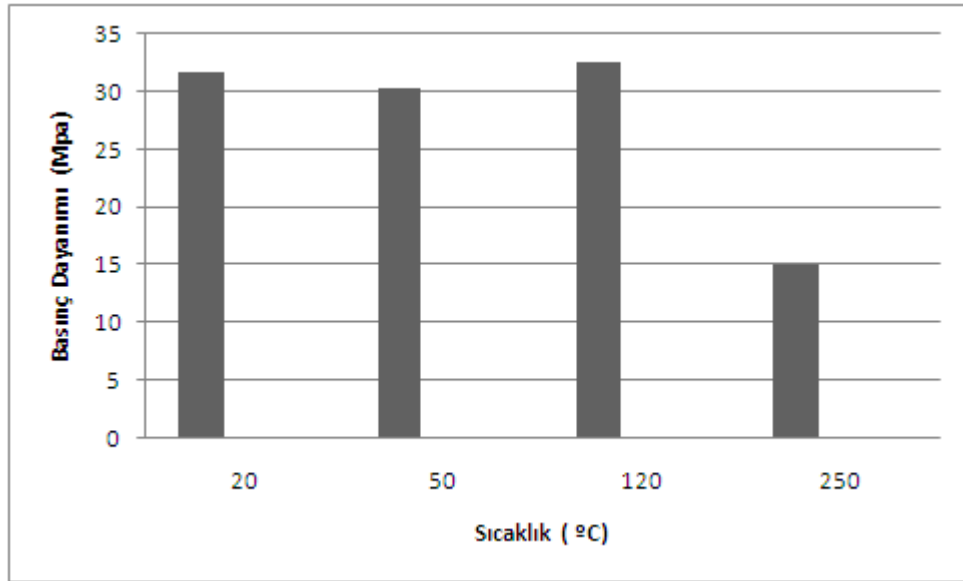
Fırında 200, 400 ve 600 °C de iki saat yakılan numunelerin basınç dayanımı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık sonrasında %10 ve %20 pet agrega ikameli numunelerin basınç dayanımlarında azalma olduğu görülmektedir. Genel olarak bakıldığında sıcaklık artışı pet agrega ikameli numunelerin dayanımında azalmaya neden olmaktadır. 200 °C ye maruz kalmış örneklerin dayanımında bir miktar artış gözlemlenmesi betonda kür etkisi yaratmış olabileceğinden bu artış göz önünde bulundurulmamalıdır.

Kasselouri, Rigopoulou, Gavela, Kolias (2009)'ın yaptığı çalışmada betona hacimce %20 oranında ikame edilen işlem görmemiş atık pet parçaları fırında beş saat boyunca 20, 50, 120 ve 250 °C deki sıcaklıklara maruz bırakılarak basınç dayanımlarındaki değişim Şekil 3.7'de gözlenmiştir.

120 °C ye kadar basınç dayanımında bir değişim gözlenmezken 250 °C'de belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu düşüşün nedeni pet agregaların yüksek sıcaklıkta mukavemetini kaybetmesi ve eriyen petlerin beton dışına çıkarak numune içerisinde boşluk oluşturmasıdır (Şekil 3.8).



Şekil 3.6 0 °C (solda yukarıda), 200 °C (sağda yukarıda), 400 °C (solda aşağıda) ve 600 °C (sağda aşağıda) yüksek sıcaklığa maruz kalan pet agregalı örnekler (Albano ve Diğer, 2009).



Şekil 3.7 Sıcaklığa maruz kalan pet agregalı örneklerin basınç dayanımlarındaki değişim (Kasselouri, 2009).



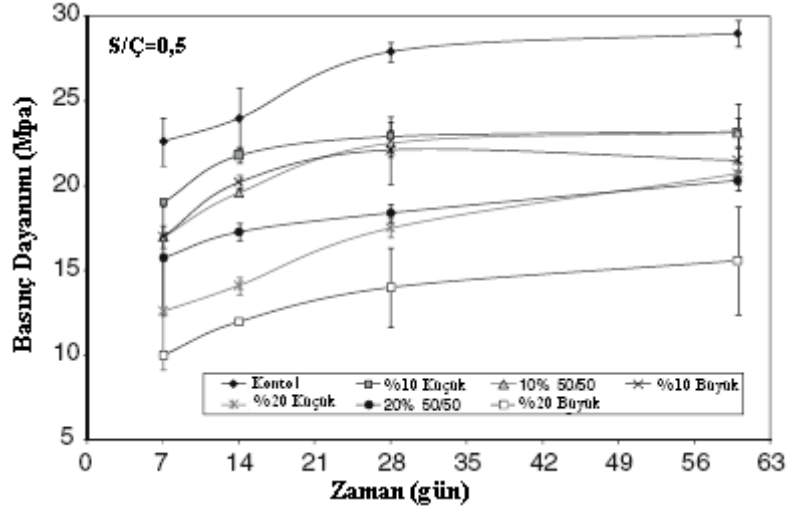
Şekil 3.8 250 °C'de 5 saat boyunca fırında kalan pet agregalı örneğin fırından çıktıktan sonraki görüntüsü (Kasselouri, 2009).

3.3.4 Basınç Dayanımı

Atık pet şişelerden kesilerek elde edilen pet parçalarının beton içerisine agrega olarak ikame edilmesi basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Albano ve diğer. (2009)'nin yaptığı çalışmada 0,5 su/çimento oranında, küçük ve büyük boyutlarda kesilen pet parçaları hacimce %10 ve %20 oranında kuma ikame edilerek basınç dayanımlarındaki değişim incelenmiştir. Albano ve diğer. (2009)'nin yaptığı çalışmaya göre beton içerisine ikame edilen pet agregalar basınç dayanımını Şekil 3.9'da görüldüğü gibi olumsuz yönde etkilemektedir.

Albano ve diğer. (2009)'nin yaptığı deneyde 0,5 S/Ç oranına sahip beton örneklerinde yapılan basınç deneylerinde en düşük dayanımı %20 oranında ikame edilen, 1,14 cm boyutlarında iri kesilmiş atık pet agregalı örnekler vermiştir. Numunelerdeki pet agrega ikamesi arttıkça dayanım da pet ikamesine bağlı olarak azalmıştır. İri kesilmiş pet parçalı örneklerin basınç dayanımının ince kesilmiş pet parçalı örneklere göre daha az olması, iri pet parçaların beton içerisinde Şekil 3.10'daki gibi bal peteği görünümünde boşluklu bir yapı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Kontrol numunesinden sonra en fazla dayanım veren, hem iri hem de ince parça bulunan pet agregalı numunelerdir. Beton içerisinde işlem

görmemiş pet parçalarının yüzeyinin pürüzsüz olması matris ile aderansının zayıf olmasına neden olmaktadır.



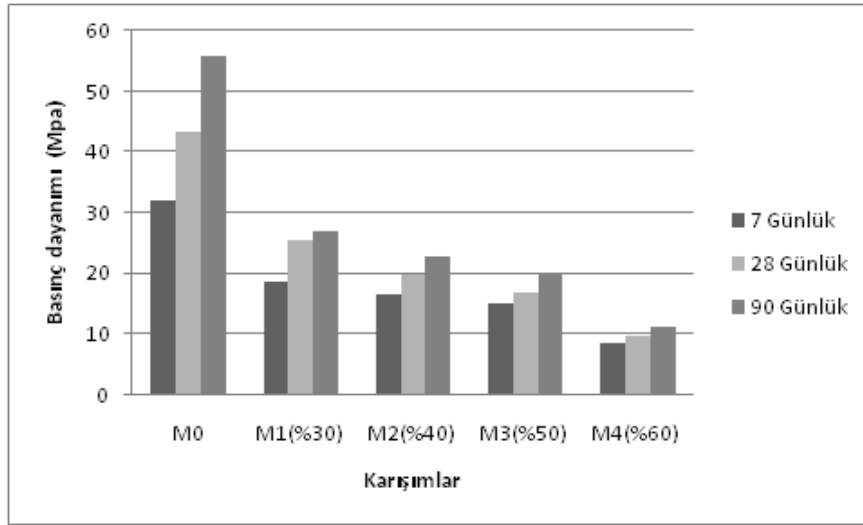
Şekil 3.9 PET şişe parçalarının farklı boyutlarda kesilerek betona eklenmesinin basınç dayanımına etkisi (Albano ve Diğer, 2009).

Akçaözoğlu ve Atiş (2012)'nin yaptığı çalışmada 1-4 mm boyutlarında kesilerek hazırlanan atık pet şişe parçalarını beton içerisinde agrega olarak hacimce %30, 40, 50, 60 oranında ikame yapmıştır. 7, 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımındaki değişim Şekil 3.11'de incelenmiştir.

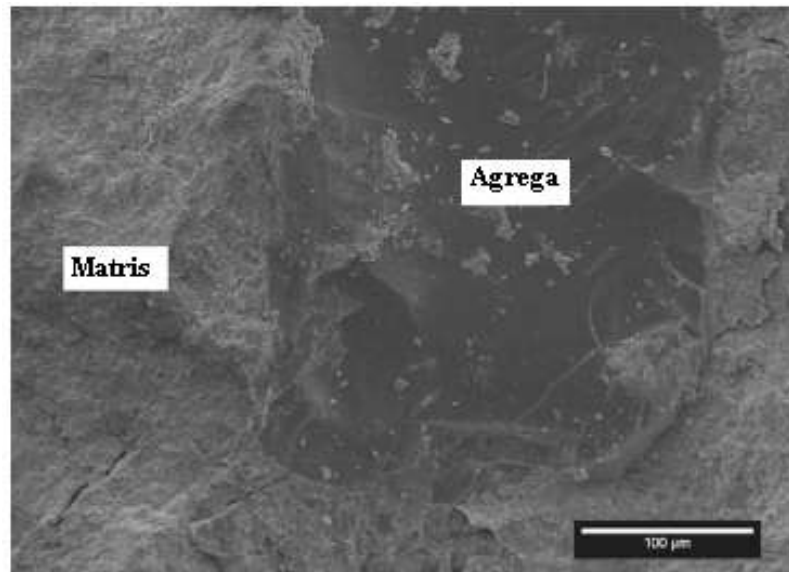


Şekil 3.10 Büyük boyutlarda kesilmiş pet şişe parçalarının betonda oluşturduğu boşluklu yapı (Akçaözoğlu ve Atiş, 2012).

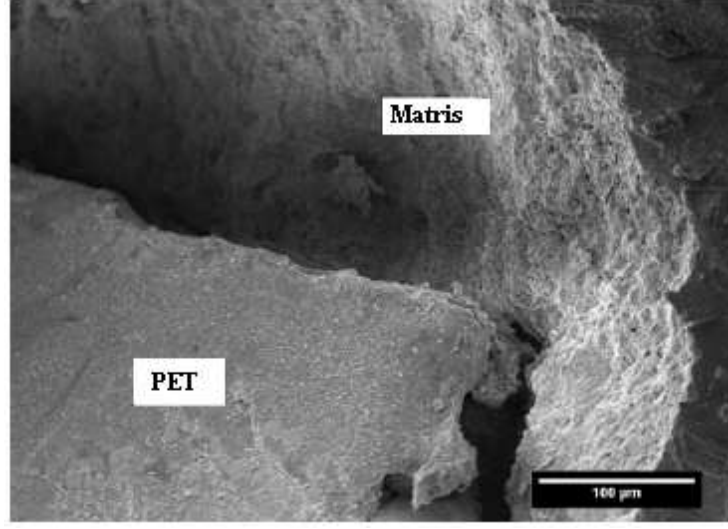
Şekil 3.11'e bakıldığında beton içerisindeki pet agrega ikamesi arttıkça dayanım azalmıştır. Kontrol numunesinin zamana bağlı dayanım kazanması çok hızlı bir artış gösterirken, pet agrega ikamesi arttıkça bu durum giderek yavaşlamıştır. Bu durum, çimento matrisi ile pet agrega arasındaki ara yüzeyin güçlü olmadığı ve zamanla dayanım da kazanmadığını göstermektedir. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de yapılan SEM incelemelerinde pet agrega ile matris ara yüzeyi arasındaki boşluk belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 3.11 Farklı boylarda kesilmiş pet agregalı örneklerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımdaki değişim (Kasselouri, 2009).



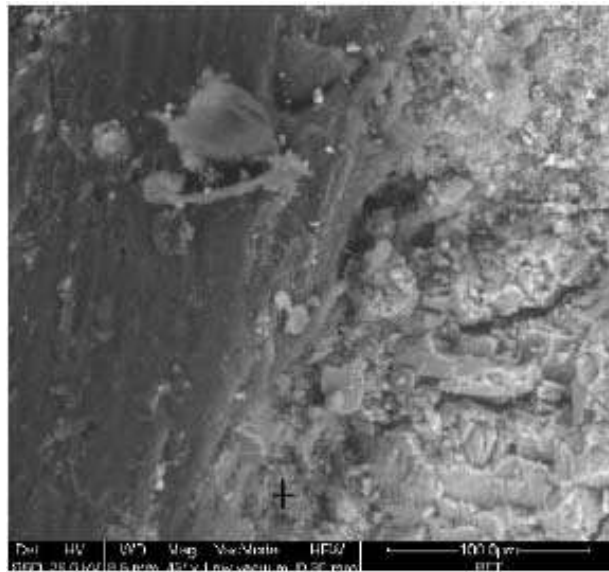
Şekil 3.12 PET agrega çimento matrisinin mikro yapı görüntüsü (a)(Kasselouri, 2009).



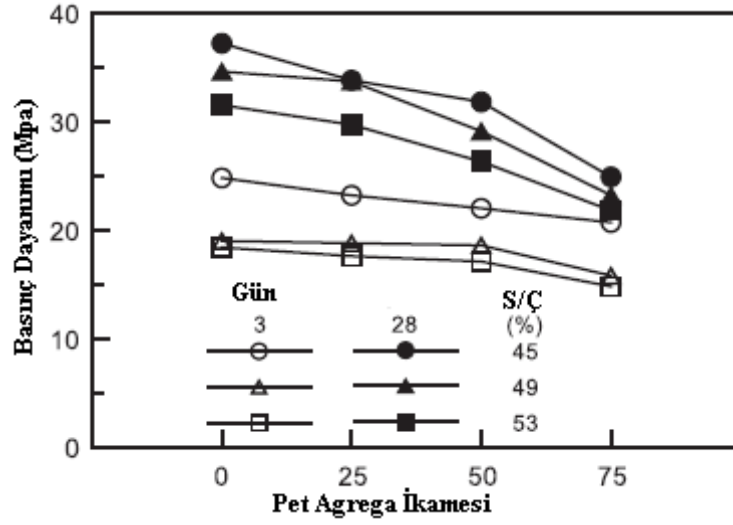
Şekil 3.13 PET agrega ile matris ara yüzeyi (Kasselouri, 2009).

Kasselouri ve diğer. (2009)'nın yaptığı çalışmada, hacimce %20 pet agregalı beton numunesine yaptığı SEM analizinde matris ile pet agrega ara yüzeyi Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

Choi ve diğer. (2005)'nin 240 °C eriyik halindeyken yüksek fırın cürufu ile karıştırarak hazırladığı polietilen tereftalat atıklarını, beton içerisine hacimce %25, 50, 75 oranında ince agrega olarak ikame yapmıştır. %45, 49, 53 S/Ç oranlarında hazırladığı örneklerin mekanik değerlerini Şekil 3.15'da ortaya koymuştur.



Şekil 3.14 PET agrega ve çimento matrisinin mikro yapı görüntüsü (b)(Kasselouri, 2009).



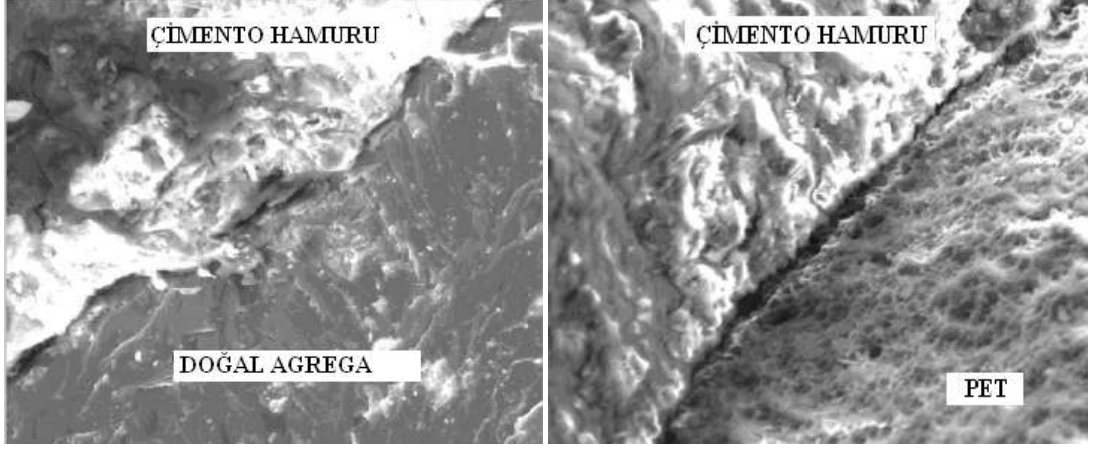
Şekil 3.15 Farklı yöntem ile elde edilen cürüflu pet agreganın betondaki basınç dayanımına etkisi (Choi, 2005).

Şekil 3.15’de cürüflu pet agregası ikamesinin basınç dayanımına olan etkisini göstermiştir. 3 günlük numunelerin basınç dayanımında çok fark yoktur. 28 günlük numunelerin basınç dayanımında, pet agregası ikamesine bağlı olarak azalma meydana geldiği görülmektedir. 28 günlük numunelerin basınç dayanımına bakıldığında, S/Ç oranı %45 olan örneklerde %75 pet agregası ikamesi, beton basınç dayanımında %33 lük azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca, çimento matrisinin daha güçlü olması basınç dayanımını çok fazla etkilememektedir. Bu durumun pet agregası ile çimento matrisi ara yüzeyinin zayıf olmasından kaynaklandığı görülmektedir.

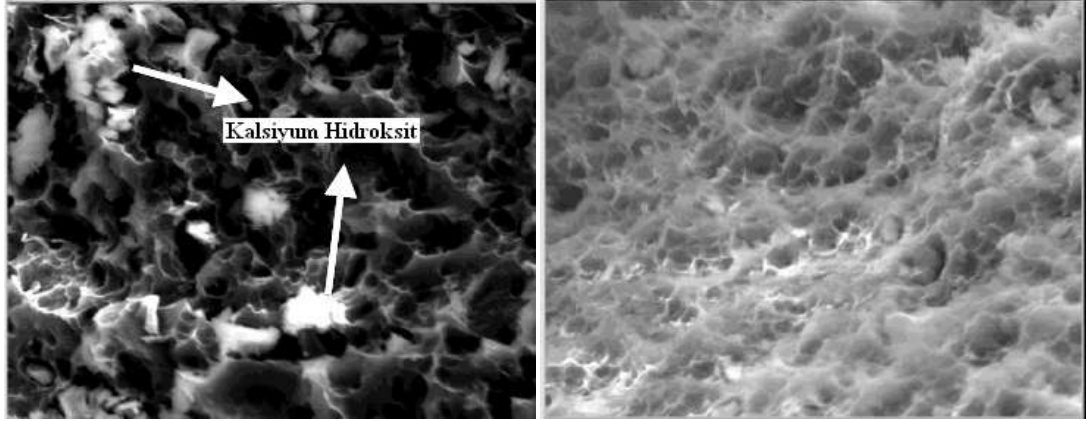
Şekil 3.16’de 28 günlük numunelerde çimento hamuru ile doğal ve pet agregaları arasındaki bölgeyi göstermektedir. Pet agregası ile çimento matrisi ara yüzeyi, doğal agregası ile matris ara yüzeyinden daha geniş olduğu görülmektedir. Bu durumun, pet agregasının pürüzsüz ve küresel yapısının bir sonucu olduğu belirtilmektedir (Choi ve diğer., 2005).

Şekil 3.17’de 3 ve 28 günlük pet agregası ikameli betonda agregasının yüzey mikro yapısı incelenmiştir (Choi ve diğer., 2005). 3 günlük numunelerde yüzeyde kireç (Ca(OH)_2) taneleri görünürken 28 gün sonra yüzeyde kireç taneleri görünmemektedir. Ara yüzeyi zayıflatan kireç, yapısında SiO_2 bulunan yüksek fırın

cürufuyla tepkimeye girerek, ara yüzeyin güçlenmesini sağlayan C-S-H yapısını oluştururlar.



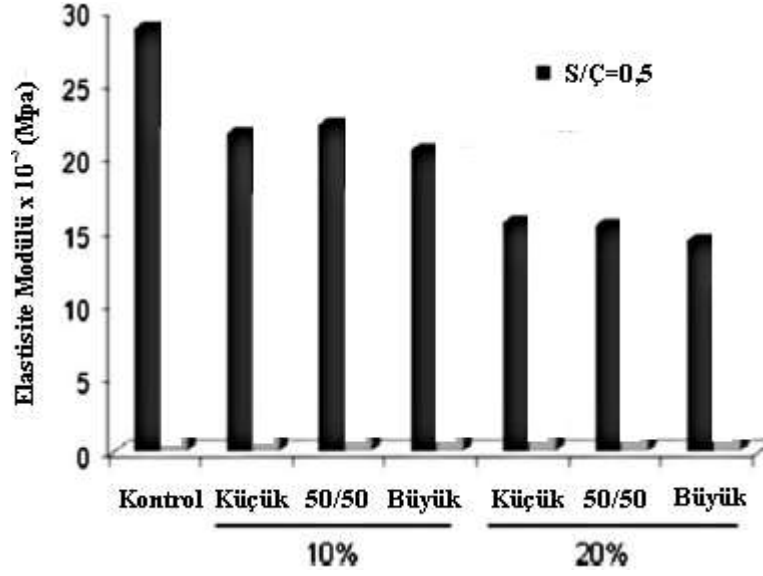
Şekil 3.16 Doğal (solda) ve pet (sağda) agregalı harç örneklerinin mikro yapı görüntüleri (Choi, 2005).



Şekil 3.17 3 ve 28 günlük örneklerdeki iç yapı görüntüleri (Choi, 2005).

3.3.5 Elastisite Modülü

Betonun elastisite modülü, içerisinde bulunan agregaya bağlıdır. Pet agreganın yük altındaki deformasyonu kuma göre daha fazladır (Albano ve diğer., 2009). Buna bağlı olarak pet agregaya ikameli numunelerde elastisite modülü, doğal agregaya göre daha az olmaktadır. Şekil 3.18’de 0,5 su/çimento oranına sahip harç karışımında %10 ve %20 oranındaki pet agregaya ikamesinin betonun elastisite modülünü azalttığı görülmektedir.



Şekil 3.18 Farklı boyutlarda pet şişeden kesilerek beton içerisinde agrega olarak kullanılan parçaların betonun elastisite modülüne etkisi (Albano, 2009).

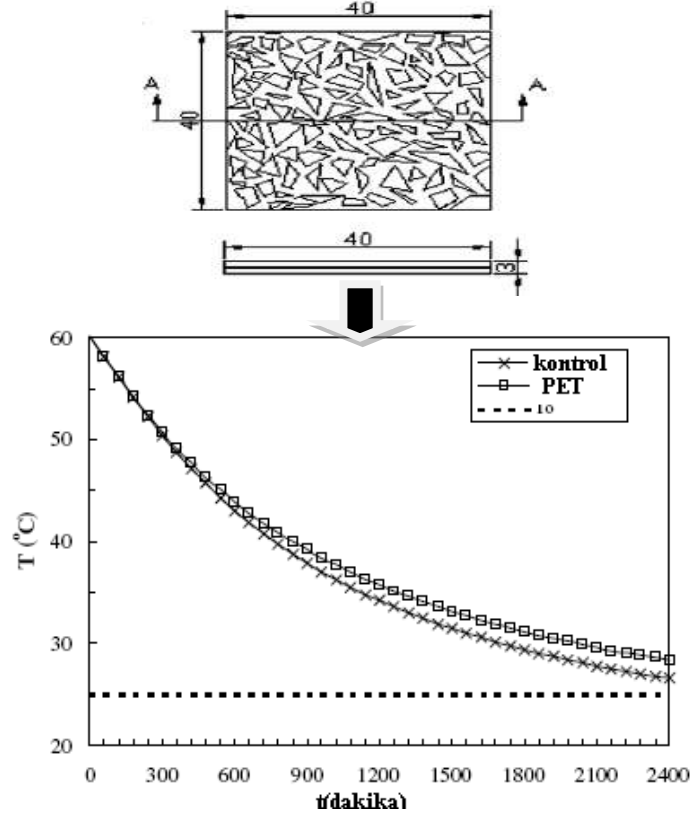
Betonun içerisindeki pet agrega oranı arttıkça elastisite modülü azalmaktadır. İri ve ince pet parçalarını eşit oranda karıştırarak elde edilen numunelerde elastisite modülünün daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak pet agrega boyutu elastisite modülünde belirgin değişimler yaratmamıştır.

3.3.6 Isıl İletkenlik

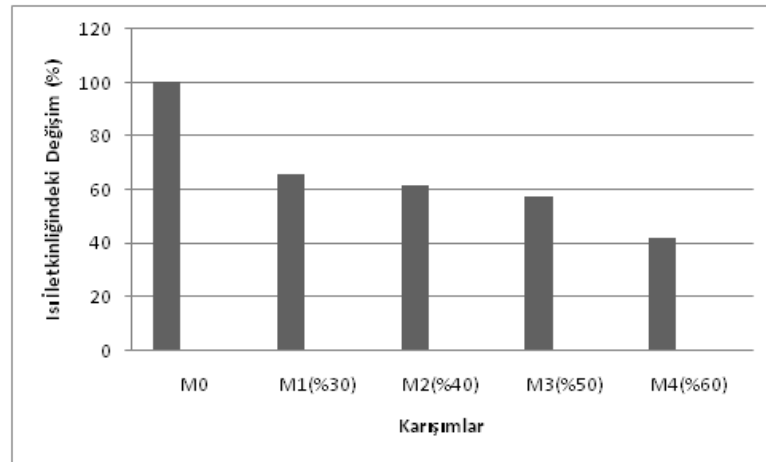
İşlem görmemiş atık pet parçalarının beton içerisinde kullanılması, normal agregalı betona göre daha az ısı iletkenlik değerine sahip olduğu Şekil 3.19'da görülmektedir. Deneyde adiabatik kutusu yöntemi kullanılmıştır. Betonun içerisinde %10-20 kullanılan kesilmiş petler, betonun ısı kaybını %10-17 oranında azalttığı yapılan deneylerle ortaya koyulmuştur (Yeşilata, Işiker, Turgut, 2008).

Betona yapılan pet agrega ikamesi oranında ısı iletkenliğinin düştüğü görülmektedir. Akçaözöglü ve diğer. (2012)'un yaptığı çalışmada beton içerisine hacimce %30, 40, 50, 60 oranında kesilerek elde edilmiş atık pet şişeler ikame edilerek ısı iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Şekil 3.20'de pet agrega ikamesinin betondaki ısı iletkenlik değerlerindeki değişim incelenmiştir. Şekil 3.20'e bakıldığında, betona hacimce ikame edilen pet agrega yüzdesi kadar betonun ısı

iletkenlik değeri düşmektedir. Bu durum, doğal agreganın ısı iletkenlik katsayısının 2 W/mK, pet agreganın ısı iletkenlik katsayısının 0,15 W/mK değerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Akçaözoğlu ve diğer. 2012).



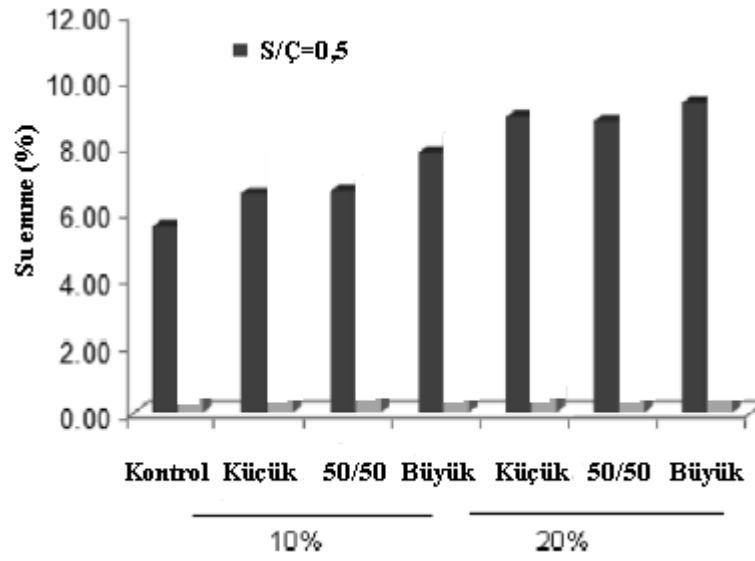
Şekil 3.19 Beton içerisinde agrega olarak kullanılan kesilmiş pet parçalarının ısı kaybına etkisi (Yeşilata, 2008).



Şekil 3.20 Beton içerisinde agrega olarak kullanılan kesilmiş pet parçalarının ısı iletkenlik değerine etkisi (b)(Akçaözoğlu, 2012).

3.3.7 Su Emme

Atık pet şişeden kesilerek hazırlanan pet agregalı beton örnekleri normal betona göre daha poroz yapıdadır. Albano ve diğer. (2009)'a göre beton içerisindeki pet agregası oranı arttıkça betonun su emme oranı da artmaktadır. Şekil 3.21'e bakıldığında beton içerisindeki pet agregalarının boyutu artınca sıkıştırma yetersizliğinden kaynaklanan boşluk oranına bağlı olarak su emme oranında da artış olduğu görülmektedir.



Şekil 3.21 Betonda kullanılan farklı boyutlardaki kesilmiş pet parçalarının su emme değerlerine etkisi (Albano vd., 2012).

BÖLÜM DÖRT

LİFLİ BETONLAR

Beton, yapısı itibariyle basınca dayanıklı fakat çekme ve eğilme kuvvetlerine karşı son derece zayıf bir malzemedir. Bu nedenle yapılarda beton içerisine çelik donatılar yerleştirilerek çekme ve eğilme yüklerine karşı direnç kazanmasını sağlar. Betonda dış yüklerin etkisiyle oluşan ve dayanım kaybına neden olan çatlakların dışında priz alma zamanında ve daha sonraki zamanlarda da betonun içerisindeki bünyesel ve kuruma büzülmesi nedeniyle çatlama eğilimi vardır. Beton içerisinde kullanılan lifler bu çatlakların ilerlemesinin önüne geçerek yapının ömrünü uzatmaktadır.

4.1 Betonda Kullanılan Lifler ve Özellikleri

Beton içerisinde; doğal, cam kökenli, çelik, karbon ve polimer kökenli lifler kullanılmaktadır. Her lifin kendine özgü mekanik (çekme mukavemeti, kopma uzaması) ve fiziksel (yoğunluk, erime sıcaklığı, renk) özellikleri bulunmaktadır. Şekil 4.1’de lif çeşitleri gösterilmiştir. Tablo 4.1’de beton içerisinde kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir (Felekoğlu, 2009).



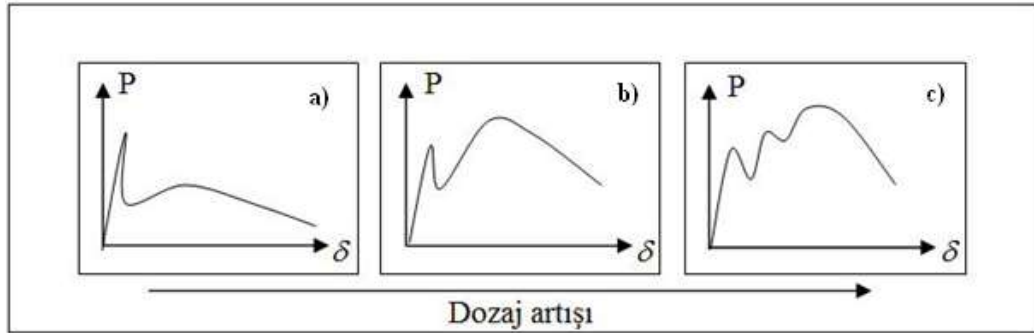
Şekil 4.1 Lif çeşitleri (Felekoğlu, 2009).

Tablo 4.1 Betonda kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Felekoğlu, 2009).

Lif Türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Elastisite modülü (Gpa)	Boy (mm)	Çap veya enkesit ayırıtı ile ilgili farklılıklar	
Mekanik lifler	Çelik	7.8	-	1000-2500	0-4	220-240	3-15	100-200 mikron, dikdörtgen kesitli olabilir, boykesit eksenine boyunca burulmuş olabilir (Kim, Nasman, El-Tawil, 2008)
Polimerik lifler	Polipropilen	0,9-1	160-165	300-700	10-50	3-5	5-15	-10-400 mikron arasında çaplı -dikdörtgen enkesitte (Santos ve diğer, 2005) -çoklu sarmal formda
	Yüksek yoğunluklu polietilen	0,97	-	2610-2770	2-4	80-120	10-15	
	Naylon	1,16-1,14	225-250	900		5-5,2	5-15	
	Polivinil alkol	1,3	230	1200	6-8	25-45	8-15	
Karbon lifler	1,6-1,8	-	400-5000	0,5-2	7-400	3-15	1-50 mikron	
Alkali dirençli cam lifleri	2,55-2,60	-	2500		80	3-10	1-5 mikron	

4.2 Betonda Lif Kullanımının Etkisi

Betonda kullanılan lifler, lifin türü, boyutu, beton içerisindeki dozajı beton üzerine etki eden yük-sehim davranışını etkilemektedir. Beton içerisine lif eklenmesi eğilme dayanımını etkilemez veya artırabilir. Ancak beton içerisine lif eklenmesi eğilme yükü altında sehimini, başka bir deyişle enerji yutma kapasitesini artırır. Lif dozajının artması eğilme dayanımını ve tokluğunu arttırmaktadır (Felekoğlu, 2009). Şekil 4.2’de çelik lif ikameli örneklerin, içindeki lifin dozajı arttıkça yük sehim grafiklerindeki değişim verilmiştir.



Şekil 4.2 Farklı çelik lif dozajlarının betonun yük-sehim davranışına etkisi (Felekoğlu, 2009).

Şekil 4.2'deki gibi sistemde ilk çatlak matraste olur. Lifsiz numune ilk çatlaktan sonra yük taşıyamaz hale gelir ve göçme gerçekleşir. İlk çatlaktan sonra beton içerisindeki lif miktarına bağlı olarak daha yüksek gerilmeleri taşıyabilmektedir. Beton içerisindeki lif miktarı kritik oranın altında olduğu zaman Şekil 3.3(a) daki gibi matrasteki ilk çatlağı oluşturan yükten daha azını taşıyabilir. Beton içerisindeki lif miktarı kritik oranın üstünde olduğu zaman ise Şekil 3.3(b) ve Şekil3.3(c) de olduğu gibi ilk çatlaktan sonra betonun davranışı liflerin kopma ve sıyrılma davranışı şeklinde olur. Bu şekilde ilk çatlak yükünden daha yüksek yükleri liflerin köprülemesi sayesinde taşıyabilirler.

4.2.1 Betonda Lif Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları

Beton içerisinde homojen şekilde dağılan lifler türüne ve kullanım oranına bağlı olarak betonda;

- Çatlak oluşumunu geciktirir.
- Oluşan çatlağın ilerlemesini geciktirir.
- Betonun enerji yutma kapasitesini, beton içerisindeki lif miktarına bağlı olarak % 100-1200 kat arttırır.
- Betonun darbe dayanımını %100-1200 oranında arttırır.
- Betonun çekme ve eğilme dayanımını dozajına bağlı olarak %25-100 oranında arttırır.
- Betonun erozyona karşı olan dayanımını %300 oranında arttırır.

Beton içerisine fazla miktarda lif eklendiğinde;

- Basınç dayanımını %20-25 oranında düşürebilir.
- Elastisite modülünü %20-25 oranında düşürebilir.

4.3 Geri Dönüşüm PET Liflerin Özellikleri

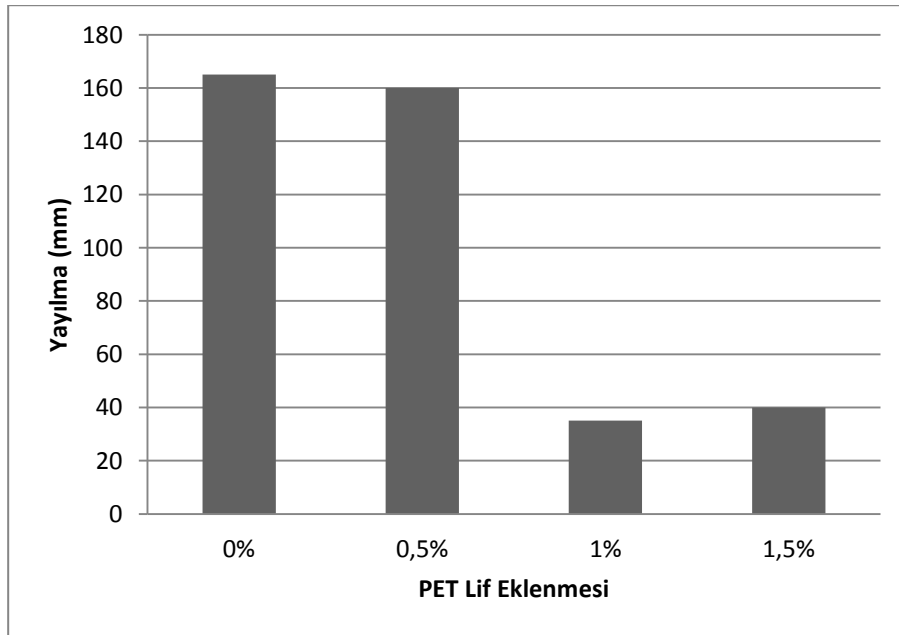
Dayanım, süneklik, tokluk ve dayanıklılık gibi özelliklere sahip yapı imal etme arayışı lifli ve yüksek performanslı beton gibi malzemelere olan ilginin artmasına neden olmuştur. Bu tür malzemelerin kullanım alanları günümüzde oldukça yaygınlaşmış ve kompozitlerin özelliklerini geliştirmek adına önemli adımlar atılmıştır. Dünyadaki plastik atıkların artması, belirli bir işlemde geçirilerek tekrar

kullanılmasına yönelik çalışmaları da hızlandırmıştır. Günümüzde geri dönüşüm polietilen tereftalat atıkları, eritilip lif haline getirilerek tekstil, otomotiv gibi birçok sektörde çokça kullanılmaktadır.

Pet lifleri elde etmenin birden fazla yolu vardır. Bazı araştırmalarda pet şişeler hiçbir işlemde geçmeden, kesilerek betona eklenirken bazı lifler farklı bir işlemle plaka şeklinde çıkarılıp daha sonra iplik şeklinde kesilerek elde edilmektedir (Kim, Yi,Song, 2010). Piyasada kullanılan lifler ise eritilip ekstrüzyon makinesinden geçirilip lif şeklinde biçimlendirilerek elde edilmektedir.

4.3.1 İşlenebilirlik

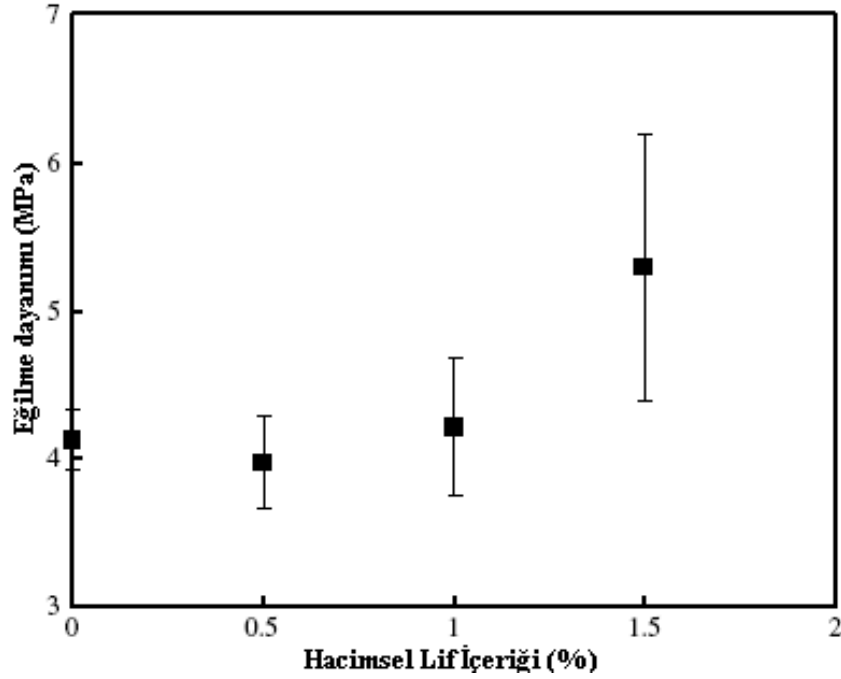
Geri dönüşüm pet lifler, bütün liflerde görüldüğü gibi işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Beton içerisinde lif ikamesi arttıkça işlenebilirlik de düşüş göstermektedir (Ochi, Okubo, Fukui, 2007). Şekil 4.3’de su/çimento oranı 0,65 olan bir karışımda %0, %0,5, %1, %1,5 oranında pet lif eklenmiştir. Şekilde, lif dozajının artmasının işlenebilirlik üzerindeki etkisi görülmektedir. Harç örneklerine hacimce %5 lif eklenmesi işlenebilirliği fazla değiştirmemiştir. Hacimce %1 ve %1,5 lif eklendiğinde işlenebilirlikte belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir.



Şekil 4.3 Pet lifin betonun işlenebilirliğine etkisi (Ochi vd., 2007).

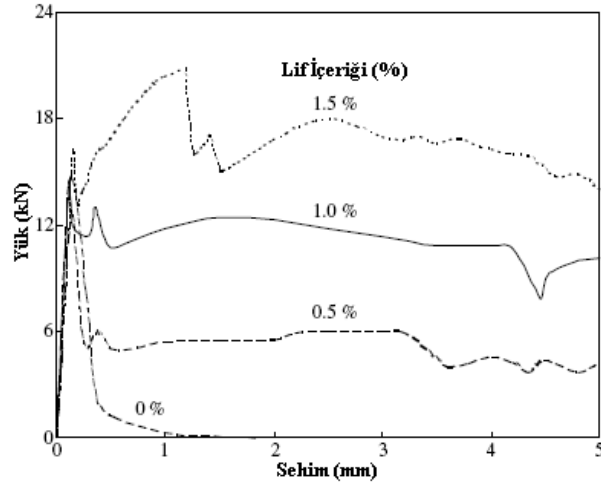
4.3.2 Eğilme Dayanımı

Beton içerisinde geri dönüşüm pet liflerin kullanımı dozajına bağlı olarak belirgin bir şekilde arttırmaktadır. Betona eğilme yükü etkideğinde lifler yükü homojen bir şekilde dağıtmaktadır. Çatlak oluştuğunda ise lif bu çatlakı köprüleyerek derinleşmesini engellemektedir. Şekil 4.4'e bakıldığında %60 su/çimento oranında hacimce %0,5, %1, %1,5 oranında geri dönüşüm pet lifi eklenmiş ve eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır (Ochi ve diğer., 2007). Harç örneğine %0,5'lik pet lif eklenmesi eğilme dayanımını biraz düşürmüştür. Bu durum liflerin, betonun sıkıştırılabilirliğini azaltmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. %1 ve %1,5 lif dozajlarında eğilme dayanımında belirgin bir şekilde artış görülmektedir.



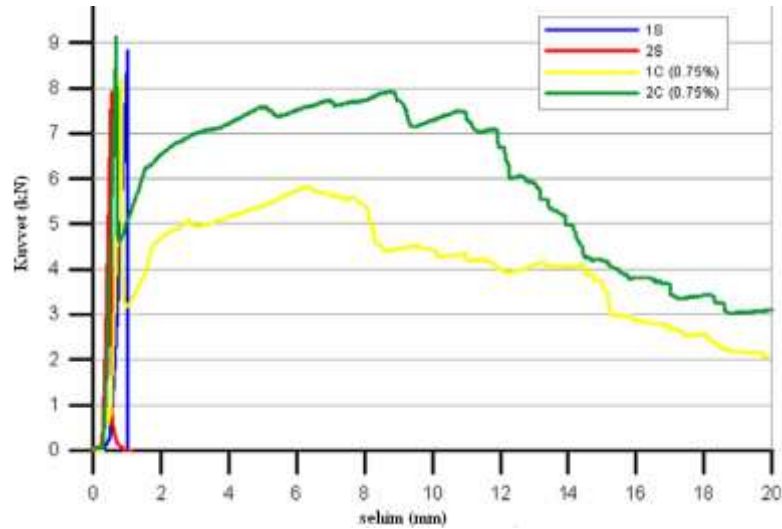
Şekil 4.4 Pet lifin betondaki eğilme dayanımına etkisi (Ochi vd., 2007).

Aynı örneklerin yük-sehim eğrileri de Şekil 4.5'de verilmiştir. %60 su/çimento oranındaki numunelere yapılan eğilme deneylerinde kontrol numunesindeki sehim 0,2 mm de ani kırılma gerçekleşmekte ve numune ikiye ayrılmaktadır. %1,5 lif dozajındaki numunede, yaklaşık 0,2 mm de çatlak oluşmuş ancak buna rağmen numuneye gelen yükü 21 kN'a kadar taşımıştır. 5 mm sehime kadar da yükü taşımaya devam etmiştir.



Şekil 4.5 Pet lifin betondaki yük-sehim davranışına etkisi (a) (Ochi vd., 2007).

Çeşitli araştırmalarda, atık pet şişeler hiçbir kimyasal işlem ya da ısıtma işleminden geçmeden, pet şişeler ince şerit şeklinde kesilerek beton içerisinde kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda, pet şişelerden kesilerek hazırlanan liflerin, betonun çatlak sonrası davranışını geliştirdiği ve sünekliğini arttırdığı ortaya çıkmıştır (Foti, 2011). Şekil 4.6'da pet şişeler kesilerek elde edilen liflerin ağırlıkça %0,75 oranında kullanıldığı beton numuneleri kontrol numuneleriyle karşılaştırılarak yük-sehim davranışları incelenmiştir. Kontrol karışımı ve lif içeren örneklerden ikişer örneğe (çalışmada S ve C olarak adlandırılmış) eğilme deneyi yapılmış ve sonuçlar grafikte gösterilmiştir. Lifler eğilme dayanımını az da olsa yükseltmiş ve enerji yutma kapasitesini belirgin bir biçimde arttırmıştır.

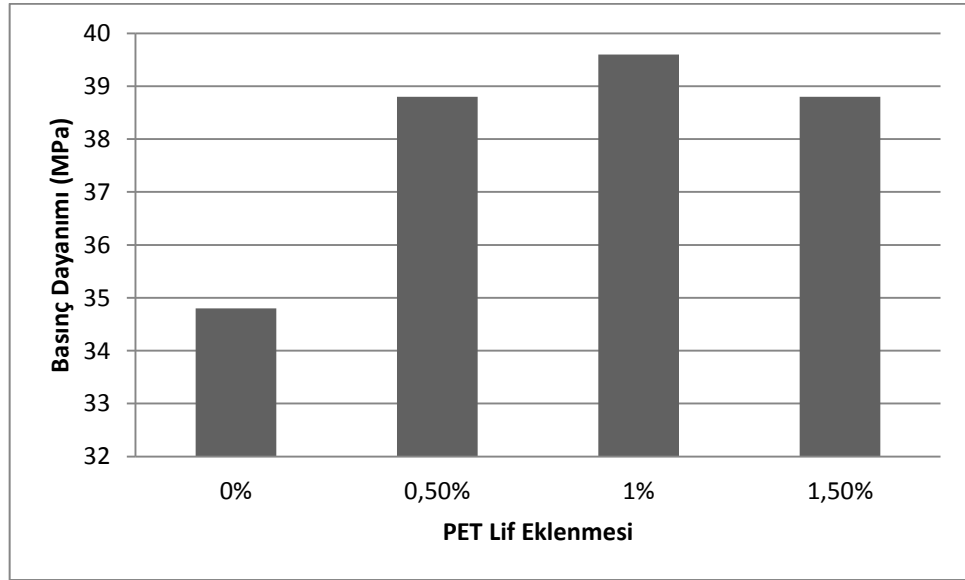


Şekil 4.6 Pet lifin betondaki yük-sehim davranışına etkisi (b) (Foti, 2011).

4.3.3 Basınç Dayanımı

Beton numunelerde belirli oranda pet lif dozajı arttıkça basınç dayanımında artış gözlemlenmektedir (Ochi ve diğer., 2007). Şekil 4.7’de %60 su/çimento oranındaki numunelerde hacimce %0,5, 1, 1,5 oranında betona karıştırılan liflerin basınç dayanımları gösterilmektedir. %1 lif dozajına kadar basınç dayanımı artarken %1 den sonra basınç dayanımında azalma görülmektedir. Lif dozajı arttıkça taze betonun yerleşebilirliğinin azalması ve sıkıştırımadaki zorluklar nedeniyle basınç dayanımında düşüş meydana gelmektedir.

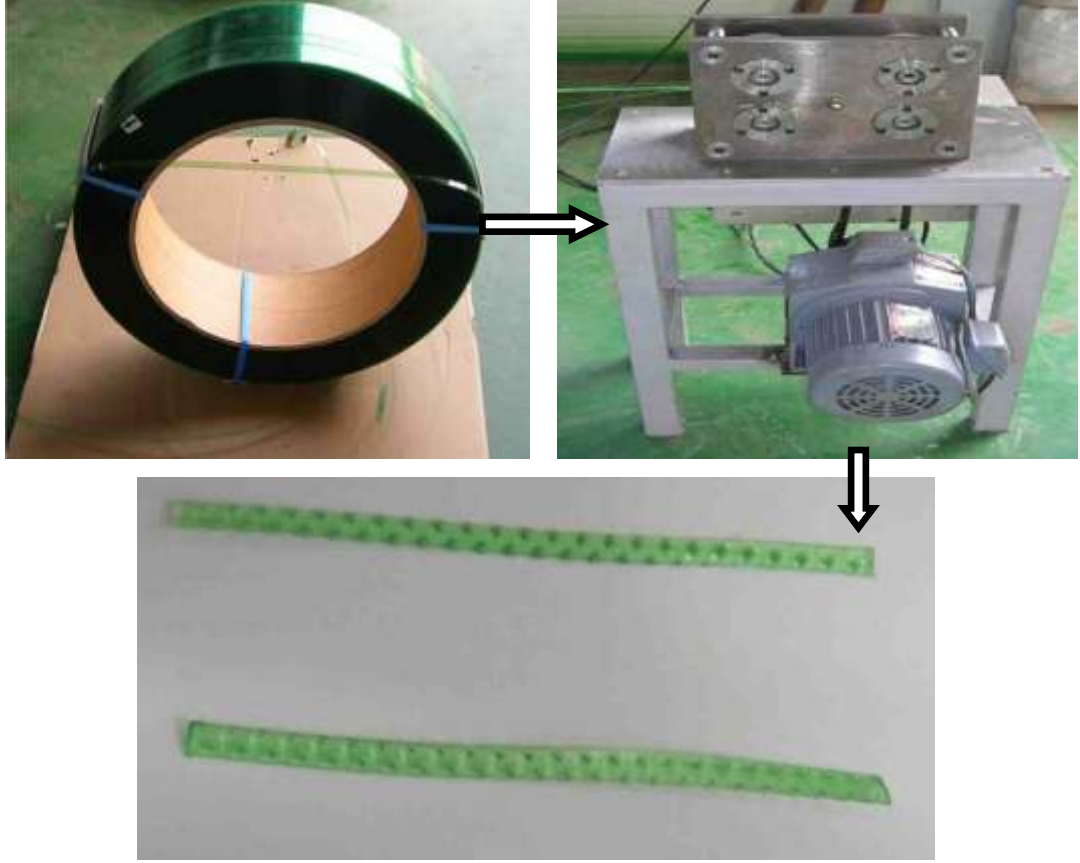
Farklı işlem teknikleriyle üretilen geri dönüşüm pet liflerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerinde de farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu durum yapılan her deneysel çalışmayı kendine özgü bir sonuca götürmektedir ancak elde edilen sonuçlar birbirine yakın olabilmektedir. Kim ve diğer. (2010), geri dönüşümle Şekil 4.8’de görüldüğü gibi ince plaka şeklinde üretilen petlerden kesilerek elde edilen pet lifleri %0, 0,5, 1, 1,5 oranında karışıma ekleyerek basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.9’da incelemiştir.



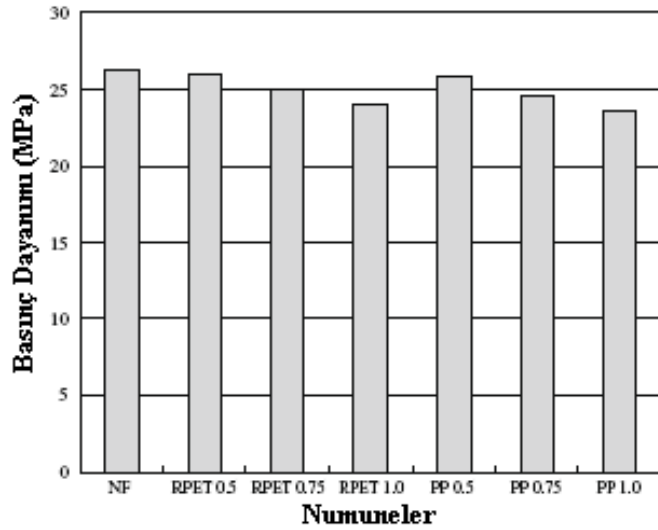
Şekil 4.7 Pet lif eklenmesinin beton basınç dayanımına etkisi (Kim vd., 2010).

Polipropilen ve pet lifli örnekler %0,75 ikameye kadar basınç dayanımında belirgin bir değişime neden olmamışlardır. %1 lif dozajında ise bir miktar düşüş

gözlemlenmiştir. Bu düşünün harç örneklerinin sıkıştırılabilirliğini azaltıp numune içerisine boşluk oluşturması sonucunda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (Kim ve diğer., 2010).



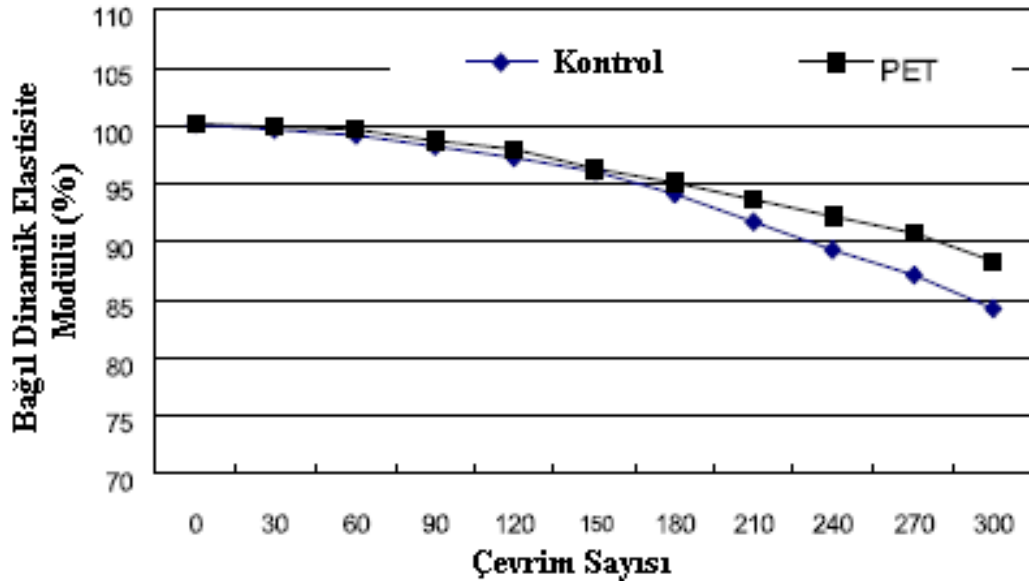
Şekil 4.8 Farklı işleme üretilen pet lifler (Kim vd., 2010).



Şekil 4.9 Farklı yöntemle elde edilen pet lifin basınç dayanımına etkisi (Kim vd., 2010).

4.3.4 Donma-Çözünme Direnci

Pet lif ikameli numuneler yüksek donma-çözünme direncine sahiptir (Won, Jang, Lee, Kim, 2010). Pet lifin donma-çözünme direnci, bağıl dinamik elastisite modülündeki değişim göz önünde bulundurularak Şekil 4.10'da incelenmiştir (Won ve diğer., 2010). 180 çevrime kadar kontrol ve pet numunelerinin elastisite modülünde herhangi bir değişim gözlenmezken 180 çevrimden sonra kontrol numunelerinin bağıl elastisite modülünde pet lifli örneklerle göre daha hızlı bir düşüş meydana gelmektedir. Pet lifler, betonun donma-çözünme direncini arttırmaktadır.



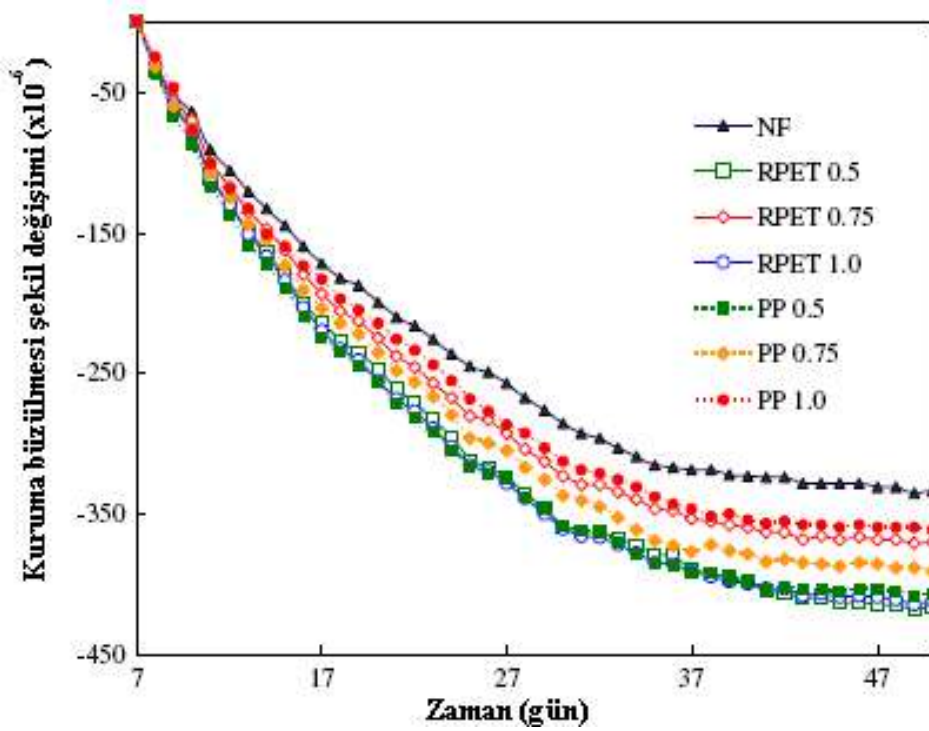
Şekil 4.10 Pet liflerin beton elastisite modülüne etkisi (Won vd., 2010).

4.3.5 Kuruma Büzülmesine Etkisi

Polipropilen, pet ve naylon gibi plastik lifler çelik lifler gibi yüksek çekme dayanımına sahip değildir. Polimer lifler genellikle saha betonlarında hafif yüklerin etkisini lif aracılığıyla yüzeye dağıtmak, yük etkisiyle meydana gelen çatlak oluşumunu geciktirmek ve büzülme nedeniyle meydana gelebilecek çatlak oluşumlarını engellemek için kullanılmaktadırlar. Ancak bazı araştırmacılar, lif kullanımının kuruma büzülmesini arttırdığını gözlemlemişlerdir (Kim ve diğer., 2010). Şekil 4.12'de %0,5, %0,75 ve %1 oranında polipropilen ve polietilen

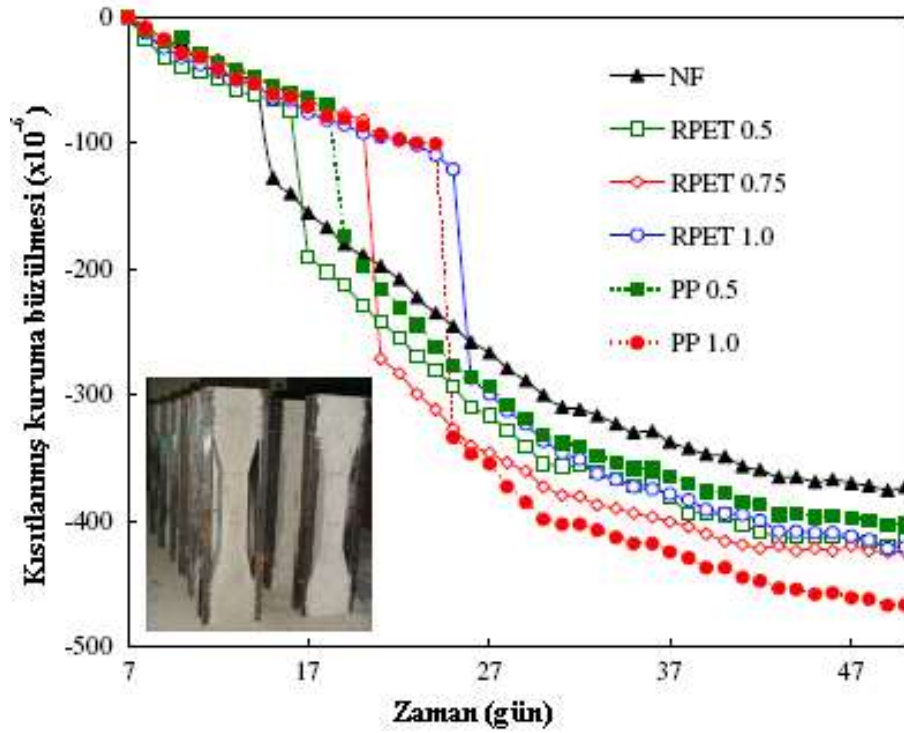
tereftalat lif ikameli numunelerin serbest kuruma büzülme değerleri gösterilmiştir. Lif içermeyen örnekler en az kuruma büzülmesi değerini gösterirken pp ve pet liflerle güçlendirilmiş örnekler 8-25% fazla şekil değişimi yapmışlardır.

Beton içerisinde lif kullanıldığında boşluklar oluşmakta ve boşluklu yapıda meydana gelen değişimin de büzülmeyi arttırdığı Rebeiz ve Fowler (1991) tarafından da doğrulanmıştır. Ancak beton içerisindeki lif dozajı arttıka büzülme değerlerinde azalma meydana gelmektedir. %0,5 pet lifli örneklerde en fazla büzülme gözlenirken pp liflerde lif dozajı arttıka büzülme azalmaktadır.



şekil 4.11 Beton içerisinde kullanılan farklı dozajlardaki pet ve pp kökenli liflerin kuruma büzülmesi davranışına etkisi (Rebeiz vd., 1991).

şekilde 4.12’de liffsiz, polipropilen lifli ve pet lifli örneklerin zamana bağlı kısıtlanmış kuruma büzülme değerleri gösterilmektedir. Kontrol örneklerinde 14. günde büzülme çatlağı oluşurken %1 pet lifli örneklerde 25. günde çatlak oluşmaktadır. Beton içerisinde lif kullanımının, kuruma büzülmesine bağlı çatlak kontrol kapasitesini arttırdığı ortaya çıkmaktadır.

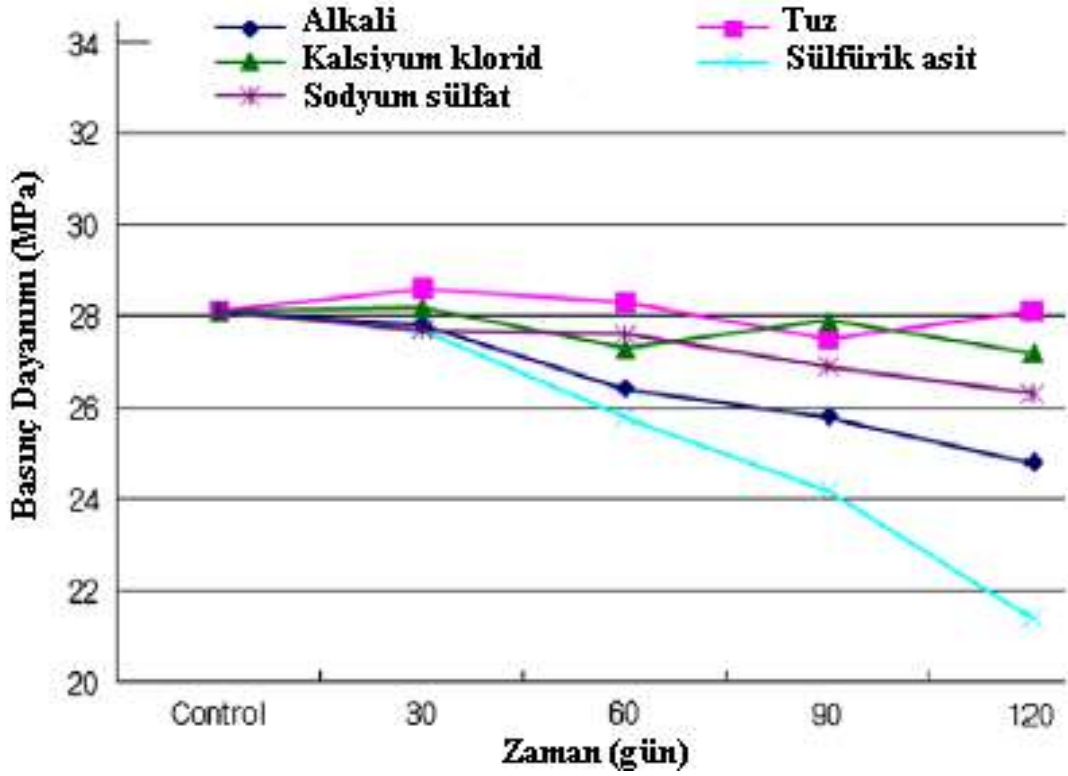


Şekil 4.12 Beton içerisinde kullanılan farklı dozajlardaki pet ve pp kökenli liflerin kısıtlanmış kuruma büzülmesi davranışına etkisi (Rebeiz vd., 1991).

4.3.6 Kimyasal Etkilere Karşı Dayanıklılık

Doğada 600 yıl boyunca bozunmadan kalabilen polietilen tereftalat fiziksel ve kimyasal etkilere karşı yüksek dayanıklılığa sahiptir. Çöp toplama tesislerinde toplanan pet şişeler kimyasal etkilere karşı dirençli oldukları için asedik asit ve kostik havuzunda yıkanarak temizlenmektedirler.

Ancak yapılan araştırmalarda bazı kimyasal etkilerin geri dönüşüm pet liflerin yapısını bozarak dayanımlarını düşürdüğü ortaya çıkmıştır. Şekil 4.13'de, 120 gün boyunca alkali, kalsiyum klorid, sodyum sülfat, tuz ve sülfürik asit etkisinde kalmış pet lif içeren harç örneklerindeki zamana bağlı dayanım değişimleri incelenmiştir (Won ve diğer., 2010). 120 gün boyunca sülfürik asit çözeltisinde kalan numunelerin basınç dayanımlarında belirgin bir düşüş gözlemlenirken alkali ortamdaki örneklerin basınç dayanımında 5 MPa'lık bir azalma gerçekleşmiştir. Sodyum sülfat etkisinde kalan pet lifli numuneler az da olsa ortamdaki etkilenmiştir. Kalsiyum klorid ve tuz çözeltisindeki örneklerde 120 gün boyunca dayanım kaybı görülmemiştir.



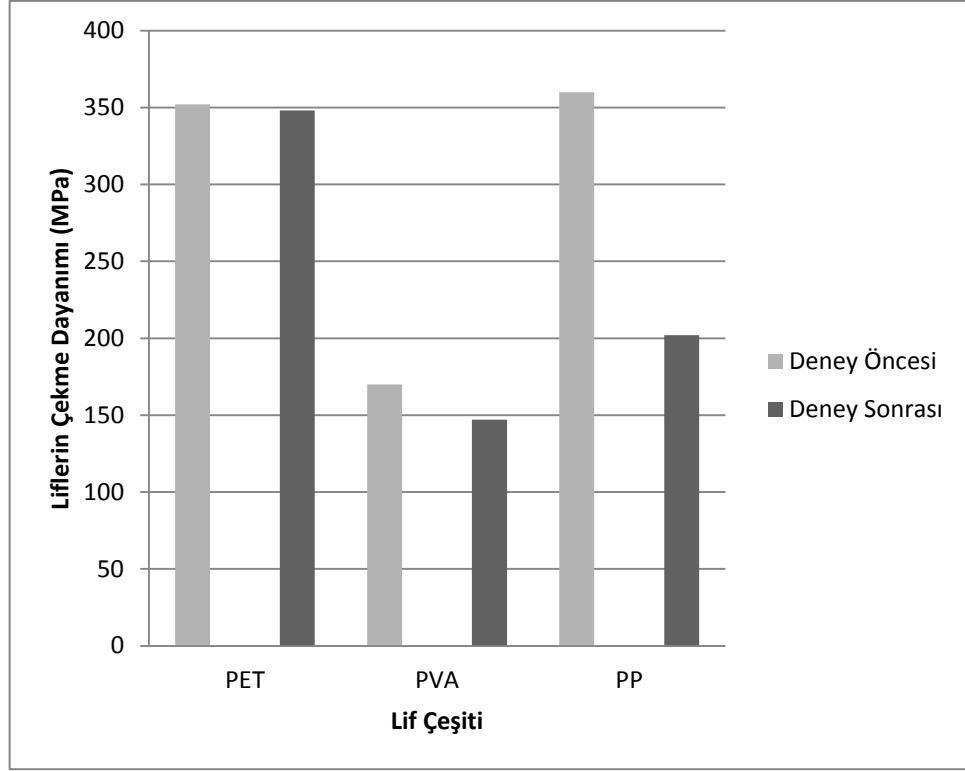
Şekil 4.13 Farklı kimyasal etkilere maruz kalmış pet lif içeren örneklerin basınç dayanımlarındaki değişim (Won vd., 2010).

4.3.6.1 Alkali Etkisi

Beton kimyasal olarak alkalinitesi yüksek bir ortama sahiptir. Beton içerisine eklenen liflerin de kimyasal ortama dayanıklı olması istenmektedir.

Ochi vd., pet liflerin alkali ortamdaki kalıcılığını araştırmak için 10 gr NaOH' i 1 dm³ suyun içine karıştırılarak pet, pva ve pp lifler suyun içine koyulmuş ve 120 saat 60 °C bekletilmiştir. 120 saat sonunda lifler sudan çıkarılmış ve çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Şekil 4.14'de pet, pva ve pp liflerin alkali ortama maruz kaldıktan sonraki çekme dayanımları karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.14'de, deney sonrasında en alkali ortamdaki en iyi performansı pet lifler göstermiştir. polivinil anilin %14, Polipropilen %44, polietilen tereftalatta ise sadece %1' lik çekme dayanımında kayıp olmaktadır. Bu deney, pet liflerin beton içerisinde uzun süre bozulmadan kalabileceğini göstermektedir (Ochi ve diğer., 2009).



Şekil 4.14 Alkali ortamda bekletilmiş farklı lif çeşitlerinin çekme dayanımlarındaki değişim (Ochi vd., 2009).

Pet lifler in alkali ortamda davranışlarını incelemek için Won ve diğer. (2010), %0,16 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, %1 NaOH ve %1,4 KOH karışımından oluşan çözeltiye pet lifleri bırakmış ve yüzey yapısındaki değişimi 120 gün boyunca incelemiştir. Şekil 4.15’de 120 gün boyunca alkali ortamda kalan liflerin yüzey yapısını göstermektedir. Bu durumda, pet liflerin alkali ortamda zamanla yüzeyden itibaren bozulmaya başladığı gözlemlenmiştir.



(a) Kontrol

(b) 30 gün



(c) 60 gün

(d) 90 gün

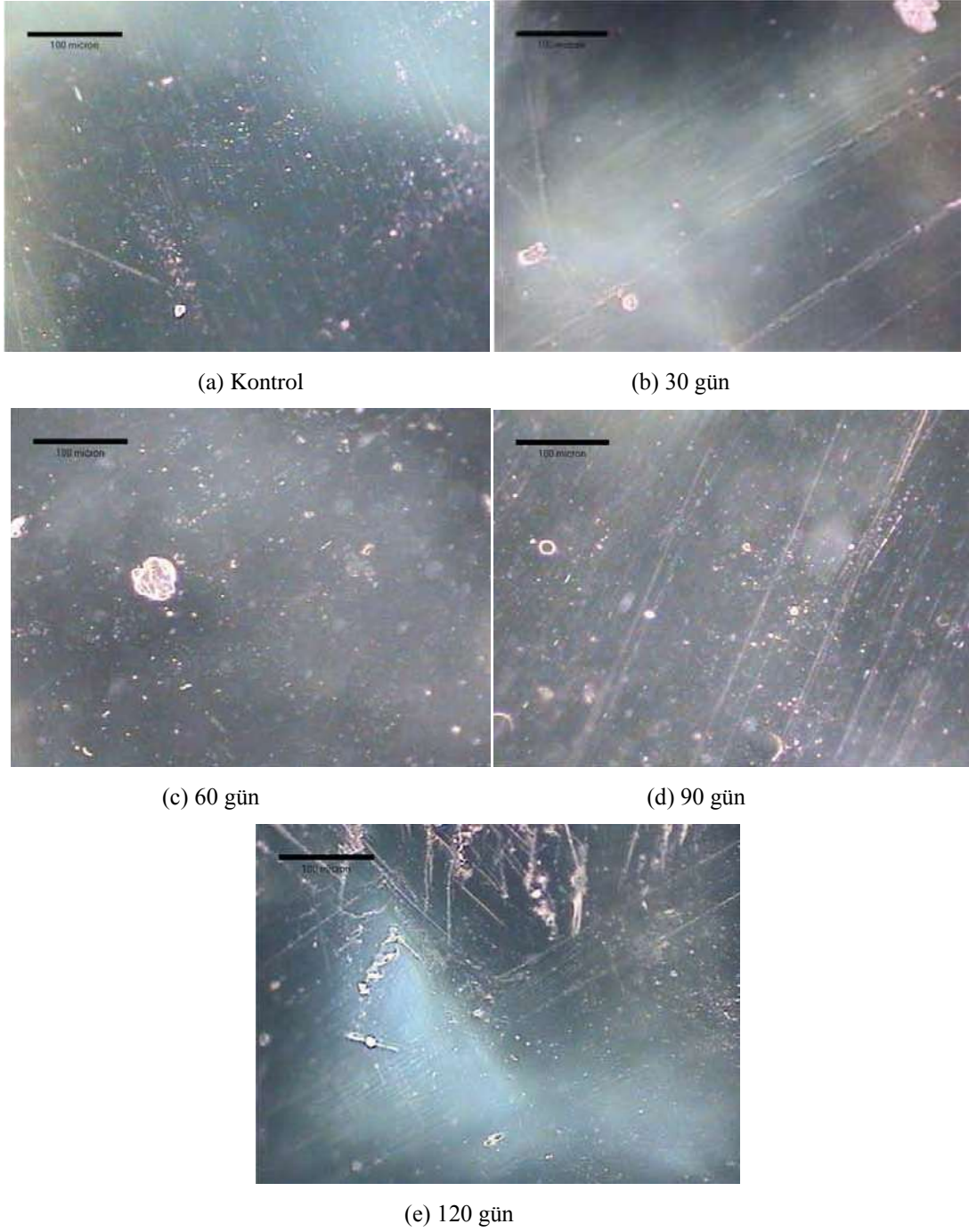


(e) 120 gün

Şekil 4.15 120 gün boyunca alkali ortamda kalan liflerin mikro yapı görüntüleri (Won vd., 2010).

4.3.6.2 Tuz Etkisi

Pet lifler tuz etkisine karşı yüksek dirence sahiptirler (Won ve diğer., 2010). %3 NaCl çözeltisine bırakılmış pet liflerin zamana bağlı grafiği şekil 4.16'da görülmektedir. Pet lifler 120 gün boyunca tuz etkisine bırakılmış ve yüzeydeki değişim şekil 4.16'da SEM ile incelenmiştir. Atık pet liflerin yüzeyinde 120 gün boyunca hiçbir bozunma görülmemiştir.

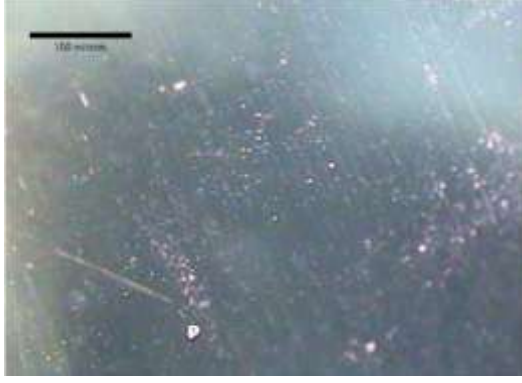


Şekil 4.16 120 gün boyunca %3 NaCl ortamında kalan liflerin mikro yapı görüntüleri (Won vd., 2010).

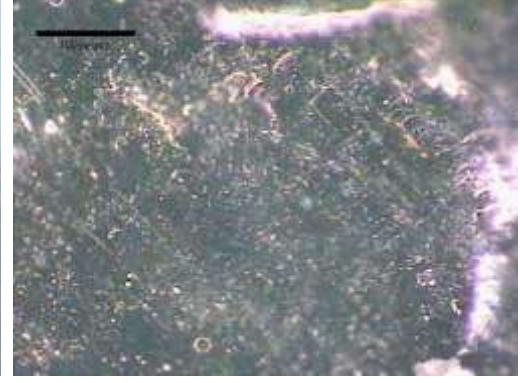
4.3.6.3 Sülfürik Asit Etkisi

Geri dönüşüm pet lifler sülfürik asit etkisine uzun süre maruz kaldıklarında dayanımlarını kaybederler (Won ve diğer., 2010). Pet liflere %3 H₂SO₄ çözeltisinde

120 gün bekletilmiş ve 30 gün arayla SEM analizleri yapılmıştır. Şekil 4.17’de asit etkisine maruz kalan pet liflerin yüzeyinde zamanla bozulmalar gerçekleşmiştir.



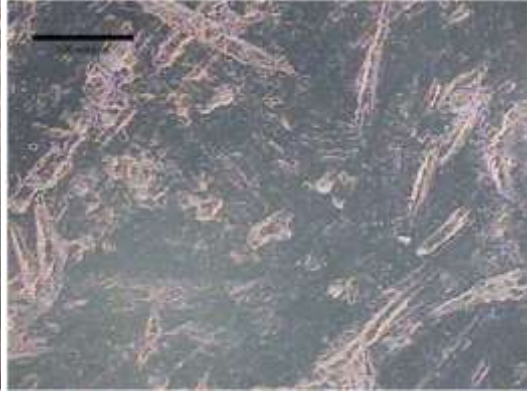
(a) Kontrol



(b) 30 gün



(c) 60 gün



(e) 90 gün



(e) 120 gün

Şekil 4.17 120 gün boyunca %3 H₂SO₄ ortamında kalan liflerin mikro yapı görüntüleri (Won vd., 2010).

BÖLÜM BEŞ

PUZOLANİK MALZEMELER

5.1 Puzolanın Tanımı

Puzolanlar, yalnız kullanıldıklarında bağlayıcı değeri olmayan ancak çimentoyla birlikte kullanıldıklarında matriste bulunan zayıf kalsiyum hidroksitle birleşerek C-S-H adı verilen güçlü yapıyı oluşturur.

Puzolanlar dayanım ve dayanıklılık sağlayan silisli veya alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan, 2003). Puzolanın yapısında silis ve alümin dışında karbon, demir ve kalsiyum oksit bulunmaktadır. Puzolanlar iki şekilde bulunur;

- Doğal Puzolanlar: doğada bulunan volkanik kökenli malzemeler (tuf, kül), ya da ısı işlem gören kil ve şeyler
- Yapay Puzolanlar: Demir çelik fabrikalarından elde edilen yüksek fırın cürufu, termik santralden elde edilen uçucu kül ve silis dumanı

5.2 Puzolanik Aktivite

Puzolanik malzemenin kireçle hangi oranda bağlanabileceğini belirten tanım olmaktadır. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteye sahip olabilmesi için ince taneli ve silis, alümin, demir oksit içermesi gerekmektedir (Dikici, 2010).

Puzolanik aktivite indeksi, dayanım aktivite indeksi olan aşağıdaki değer hesaplanarak elde edilebilmektedir.

$$\text{Dayanım Aktivite İndeksi} = (A/B) * 100$$

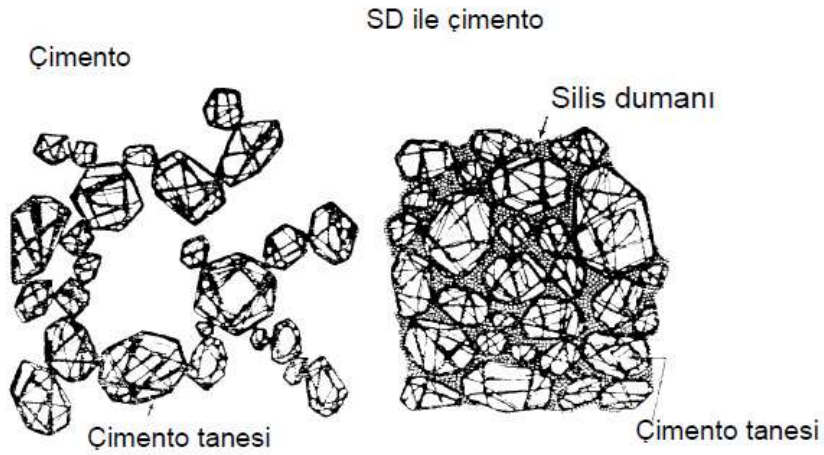
A= Puzolanlı sertleşmiş harçların ortalama basınç dayanımı.

B= Kontrol harçların ortalama basınç dayanımı.

5.3 Silis Dumanı

Silisyum alaşımlarının eritme yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen 1 µm den küçük, yüksek oranda SiO₂ moleküllerinden oluşan yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir (Koca, 1996).

Çimento kompozitli karışımlarda, çimento miktarının ağırlıkça %10'u kadar ikame yapılması uygun görülmektedir. Silis taneleri çok ince olduğundan puzolanik etkinin yanında Şekil 5.1'deki gibi boşluk doldurma etkisine de sahip oldukları için erken ve ileri yaşlarda beton dayanımını oldukça arttırmaktadır. Tanelerin çok ince olması, su ihtiyacını arttırdığı ve işlenebilirliği azalttığı için taze hal karışımına akışkanlaştırıcı katkı ilavesi gerekmektedir.



Şekil 5.1 Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi (Koca, 1996).

5.3.1 Silis Dumanının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Silis dumanının tanecik boyutları 0,1-0,2 µm arasındadır. Özgül ağırlığı 2,2-2,3 g/cm³ arasındadır. Özgül yüzey adsorpsiyon metodu ile tayin edilen silis dumanının özgül yüzeyi 200,000 cm²/g'dır. Silis dumanının inceliğini karşılaştırmak için aşağıdaki değerler verilmiştir.

- Tütün Külü: ~100,000 cm²/g

- Uçucu Kül: ~4000-7000 cm²/g
- Portland Çimentosu: 3000 cm²/g

5.3.2 Silis Dumanının Avantaj ve Dezavantajları

Silis dumanının çimento kompozitli malzemelere sağladığı avantaj ve dezavantajlar aşağıda verilmiştir (Erdoğan, 2003).

Avantajları

- Su geçirimsizliğini azaltır.
- Hidratasyon ısısının yükselmesini engeller.
- Betonun mekanik dayanımlarını artırır.
- Ayrışmayı azaltır.
- Sertleşmiş betonu alkali silika ve sülfat etkileri gibi dışarıdan gelen zararlı kimyasallara karşı korur.

Dezavantajları

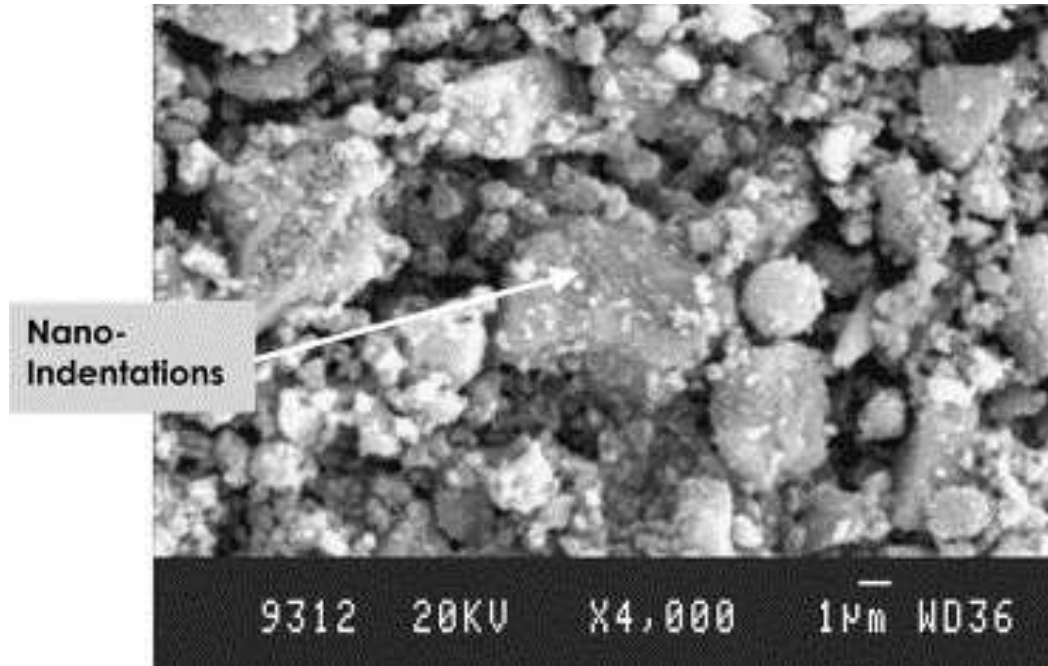
- Silis dumanı ikameli karışımlar hazırlanırken yüksek miktarda su ihtiyacı vardır. Bu nedenle işlenebilirlik oldukça düşer, akışkanlaştırıcı katkı ilavesi gerekmektedir.
- Silis dumanı ikameli karışımlarda sertleştikten sonra plastik büzülme çatlakları oluşabilmektedir.

5.4 Yüksek Fırın Cürufu

İşlenmemiş demir üretimi sırasında oluşan atık maddelerden elde edilir. Cürufun elde edildiği üretim tesisine göre cürufun kalitesi değişmektedir.

Cürufu malzemeler içerisinde en çok kullanılanı yüksek fırın cürufudur. Demir-çelik üretiminde en çok kullanılan kömür kok kömürüdür. Yanma sırasında kok kömüründeki karbon, demir cevherindeki O₂ ile birleşerek CO ve CO₂ olarak fırından çıkar. Fırında geriye eriyik haldeki demirle beraber kireç, kül, silis, alümin, fosfor,

karbon, sülfür, mangan gibi maddeler bulunmaktadır. Bu maddelerin tamamına 'cüruf' adı verilmektedir. Eriyik durumda demir ve cüruf arasında yoğunluk farkı olması nedeniyle demir ve cüruf ayrılarak farklı bölgelerde toplanır (Bilim 2006). Cüruflar fırın çıkışında yaklaşık 1600 °C sıcaklığında olurlar. Soğutulma sırasında soğutmanın süresine bağlı olarak cürufun özellikleri de değişmektedir. Cürufun beton içerisinde kullanılabilir hale gelebilmesi için granüle edilmesi gerekmektedir. Cürufun kullanılabilmesi için camsı ve düzensiz bir yapıda olması gerekmektedir. Bu nedenle cürufun hızlı soğutulması gerekmektedir. Cüruf yavaş bir şekilde soğutulursa kullanışsız kristal yapı oluşmaktadır (Newman ve Choo, 2003). Uygun şekilde soğutulduktan sonra öğütülen yüksek fırın cürufları $\text{Na}(\text{OH})_2$ ya da $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile birleşerek bağlayıcı özellik kazanır. Bu nedenle yüksek fırın cürufu çimento kompozitli malzemelerde puzolan olarak kullanılabilmektedir. Yüksek fırın cürufu Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Yüksek fırın cürufunun mikro yapı görüntüsü (Newman vd., 2003).

5.4.1 Yüksek Fırın Cürufunun Avantaj ve Dezavantajları

Yüksek fırın cürufunun betona sağladığı avantaj ve dezavantajlar aşağıda verilmiştir (Erdoğan, 2003).

Avantajları

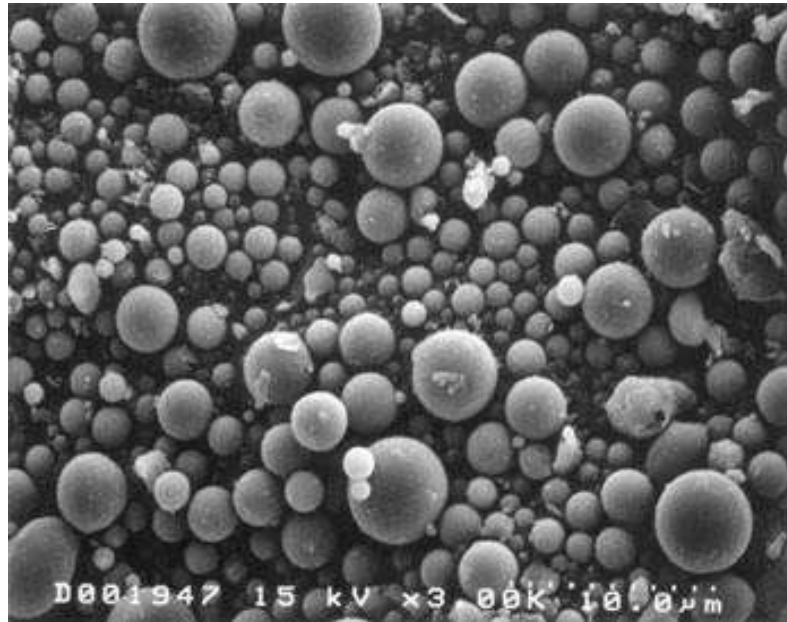
- Taze haldeki karışımın işlenebilirliğini arttırmaktadır.
- Betonda meydana gelen terlemeyi azaltmaktadır.
- Taze Betondaki priz süresini uzatmaktadır.
- Betonun hidrasyon ısisını düşürmektedir.
- Sertleşmiş haldeki betonun su geçirimsizliğini, aynı zamanda kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını arttırmaktadır.

Dezavantajları

- Betonun priz alma süresini uzattığı için kalıp alma süresini uzatmaktadır.
- Betonun zamanla dayanımını arttırdığı için başlarda dayanımı kontrol karışımına göre düşük olmaktadır.

5.5 Uçucu Kül

Termik santral gibi çok miktarda kömür kullanılan tesislerde, toz halindeki kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan silis ve alümino-silis yapılı toz halindeki kalıntıdır (TS 609). Şekil 5.3’de uçucu külün yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Elektron mikroskobunda çekilmiş uçucu kül.

Termik santrallerde yakılan taş kömürünün %10-15'i, linyit kömürünün ise %35 - 40'ından uçucu kül elde edilebilmektedir (Dikici, 2010).

Beton içerisinde çimento yerine ikame edilerek kullanılabilen uçucu kül, agrega yerine de ikame edilerek kullanılabilir. Çimentonun üretimi sırasında klinker içerisinde karıştırılarak uçucu küllü çimento da elde edilebilmektedir. Uçucu külün sahip olduğu özgül yüzey alanı çimentodan daha fazla olduğu için çimentodan tasarruf amaçlı kullanılabilir. Uçucu kül çimento içerisine %20 oranında kullanıldığında basınç dayanımını arttırdığı görülmüştür (Sümer, 1994).

5.5.1 Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu kül parçacıklarının boyutları 1- 150 µm aralığında bulunmaktadır. Ortalama özgül ağırlıkları 2,14 g/cm³ civarındadır. Uçucu küllerde silis ve alümin bulunduğu için puzolanik etkiye sahiptirler. Çimentolu kompozitin yapısında bulunan Ca(OH)₂ ile birleşerek C-S-H oluştururlar. Kazanda yanan kömürün cinsi ve yanma şekline bağlı olarak özellikleri değişmektedir. Karbon oranı fazla olan küller koyu gri renkte, demir oranı fazla olan küller açık gri renge sahiptirler (Dikici, 2010).

ASTM C 618 standardına göre iki farklı tip uçucu kül bulunmaktadır. Bu uçucu küller kömür cinsine göre 'C' ve 'F' isimleriyle sınıflandırılmışlardır. ASTM C 618'e göre sınıflandırma Tablo 5.1'deki gibi olmaktadır.

Tablo 5.1 ASTM C 618 standardına göre uçucu külün sınıflandırılması.

Sınıf	Tanım
F	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ ³ >% 70 bitümlü veya antrasit (parlak kömürden elde edilen uçucu küller). Yalnızca puzolanik özelliğe sahip.
C	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ ³ >% 50 linyit kömüründen elde edilen uçucu kül. Kireç (CaO) içeriği %10'dan fazla olabilir. (Yüksek Kireçli Uçucu Kül). Puzolanik ve bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahip.

5.5.2 Uçucu Kül Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları

Uçucu külün betonda kullanımının avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir.

Avantaj

- İşlenebilirliği arttır.
- Betonda meydana gelen terlemeyi azaltır.
- Hidratasyon ısısını düşürür.
- Zamana bağlı dayanım artışı sağlar.
- Çimentoya ikame edildiğinde ekonomik olur.
-

Dezavantaj

- Betonun priz alma süresini uzattığı için kalıp alma süresini uzatmaktadır.
- Betonun zamanla dayanımını arttırdığı için başlarda dayanımı kontrol karışımına göre düşük olmaktadır.

BÖLÜM ALTI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Giriş

Bu çalışmada geri dönüşüm atığı olan pet agrega ve pet lifler standart harç karışımlarına farklı oranlarda karıştırılmıştır. Örneklerin işlenebilirlik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kapiler yolla su emme, aşınma dayanımına etkisi ile asit etkisine dayanıklılığı, yüksek sıcaklık direnci, donma-çözülme direnci gibi özellikleri araştırılmıştır.

6.2 Amaç

Atık petleri geri dönüştürerek elyaf haline getiren fabrikadaki üretim sisteminin farklı bölgelerinde meydana gelen üretim hatalarından dolayı ‘takoz’ ve ‘argom’ adı verilen plastik atıklardan toplanıp kırılarak elde edilen pet agregalar, harç içerisinde değerlendirilerek yeni bir kompozit geliştirilmesi ve bu şekilde çevre kirliliğini azaltarak dayanım/ağırlık oranı yüksek malzeme üretimi hedeflenmiştir. Farklı harç karışımları hazırlanarak elde edilen numunelerin yüksek aşınma direncine, düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olması ve pet lifle güçlendirilmiş örneklerde nispeten yüksek tokluğa sahip hafif beton üretilmesi amaçlanmıştır.

6.3 Deneysel Programın Tanıtılması

Takoz ve agrom adı verilen pet atıkları harç içerisinde agrega olarak kullanılması ve uygun pet lif dozajının belirlenmesi için ilk aşamada denemeler yapılarak en uygun karışım miktarları belirlenmiştir. Bu çalışmada, takoz ve agrom pet agregalarının harç içerisinde kırma kum yerine ikame yapılmış, bu iki pet atığın ve pet lifin değerlendirilmesi için harç örneklerinde işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve aşınma deneyleri yapılarak en uygun takoz ve agrom pet agregası ve lif dozajı belirlenmiştir. Pet Karışımın yer karosu üretiminde kullanılabileceği düşüncesiyle yapılan deneylerin ikinci aşamasında görsellik göz önünde

bulundurularak beyaz çimento, renkli doğal ve kırma agregalar kullanılmıştır. Bu deneyler için toplam 12 farklı karışım hazırlanmıştır. Yapılan deneyler Tablo 6.1’de özetlenmiştir.

Tablo 6.1 Pet atıkların harçta kullanılması için yapılan taze ve sertleşmiş hal deneyleri.

Taze Hal Deneyleri	Sertleşmiş Halde Deneyler
<ul style="list-style-type: none"> • Yayılma Deneyleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Üç Noktalı Eğilme Deneyi • Tek Eksenli Basınç Deneyi • Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Deneyi • Aşınma Deneyi

Dökülen harç serilerinde çimento tipi, takoz ve agrom adı verilen pet agregalar, lifler, puzolanlar, renkli doğal ve kırma agregalar değişkendir. Bu değişkenlere bağlı özellikler Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2 Pet agregaların harç içerisinde kullanımı için yapılan deneylerde değişkenler ve belirlenen özellikler.

Değişkenler	Belirlenen Özellikler
<ul style="list-style-type: none"> • Takoz ve Agrom Pet Agregası • Lif Dozajı • Çimento Tipi • Puzolan İkamesi • Renkli Doğal ve Kırma Agregalar 	<ul style="list-style-type: none"> • Yayılma Çapı (D_{ort}) • Basınç Dayanımı (f_c) • Eğilme Dayanımı (f_{eg}) • Tokluk (G_f) • Aşınma Direnci (%) • Yüksek Sıcaklık Direnci

Agrom ve takoz adı verilen pet atıkların her ikisinin de uygun miktarlarda harç örneklerine ikame yapmak amacıyla sadece agrega ikameleri değiştirilerek uygun karışım bulunmuştur. Daha sonra bu karışımlarda yüksek fırın cürufu, silika dumani ve uçucu kül kullanılarak uygun puzolan çeşidi belirlenmiştir. Aynı zamanda pet

agrega ikame oranı belirlenmiş örneklerde farklı pet lif dozajları kullanılarak uygun lif dozajı belirlenmiştir. Bu deneylerde elde edilen verilerle yer karosu üretimi için deneyler yapılmış ve yapılan deneyler Tablo 6.3’de gösterilmiştir.

Tablo 6.3 Yer karosu üretimi için yapılan sertleşmiş ve taze hal deneyleri.

Taze Hal Deneyleri	Sertleşmiş Halde Deneyler
<ul style="list-style-type: none"> • Yayılma Deneyleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Hava Kuru B.H.A Tayini • Kuru B.H.A Tayini • Üç Noktalı Eğilme Deneyi • Tek Eksenli Basınç Deneyi • Kılcal-Toplam Su Emme Deneyi • Los Angeles ve Dory Yüzeysel Aşınma Deneyi • HCl asit Deneyi • Donma-Çözülme Deneyi • Isı İletkenlik Deneyi • Alkali Deneyi • Otojen ve Kuruma Büzülmesi Deneyleri

Tablo 6.3’de gösterilen deneylerde dört farklı tip karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlar, hacimce %50 pet agrega ikamesine (%50 pet agrega içerisinde %75 takoz ve %25 agrom bulunmaktadır.) ağırlıkça %50 granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve hacimce %2 pet lif eklenerek Tablo 6.4’de belirlenen fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılarak kimyasal etkilere karşı gösterdikleri dirençler incelenmiştir.

Hazırlanan karışımlar sırasıyla, Kontrol, PET50, PET50-YFC50-PET50-YFC50-LİF2 isimleri ile adlandırılmışlardır. Bu karışımlar kullanılarak yer karosu üretilmeye çalışılmıştır.

Tablo 6.4 Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde değişkenler ve belirlenen özellikler.

Değişkenler	Belirlenen Özellikler
<ul style="list-style-type: none"> Pet Lif Eklenmesi Yüksek Fırın Cürufu İkamesi Pet Agrega İkamesi 	<ul style="list-style-type: none"> Yayıma Çapı (D_{ort}) Kuru B.H.A Tayini Basınç Dayanımı (f_c) Eğilme Dayanımı (f_{eg}) Kırılma Enerjisi (G_f) Aşınma Direnci HCl Asit Etkisine Dayanıklılık Donma-Çözünme Etkisine Dayanıklılık Boşluk Oranı (p) Mikro Yapı İncelemesi Isıl İletkenliğinin Belirlenmesi (λ) Alkali Direncinin Belirlenmesi Otojen ve Kuruma Büzülmesine Etkisi

6.4 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu kısımda, harç örneklerinde kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, malzemelerin miktarları, deneysel yöntemler ve deneysel çalışmalar anlatılmıştır.

6.4.1 Deneyde Kullanılan Çimento, Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül ve Silis Dumanının Özellikleri

Deneysel çalışmada iki farklı tip çimento kullanılmıştır. Atık pet agregaların harç içerisinde kullanılması için yapılan deneylerde Denizli Çimento fabrikasından alınan CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu ve Batı Çimento'da üretilen beyaz renkli CEM II/A-LL 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. İleri deneylerde ise harç örneklerinde

görsellik kazandırabilmek için Batı Çimento’da üretilen beyaz renkli CEM II/A-LL 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Her iki çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6.5’de verilmiştir.

Tablo 6.5 Deneyleerde kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri.

Kimyasal Bileşim	CEM I 42,5 R	CEM II/A-LL 42,5 R
SiO ₂ (%)	19,65	19,03
Al ₂ O ₃ (%)	4,38	4,31
Fe ₂ O ₃ (%)	3,49	2,45
TiO ₂ (%)	-	0,12
CaO (%)	62,5	60,57
MgO (%)	2,39	2,64
SO ₃ (%)	2,84	3,02
Na ₂ O (%)	-	0,35
K ₂ O (%)	-	0,95
Cl (%)	0	0,05

Atık pet agregaların harç içerisinde kullanımının araştırılması için yapılan deneyleerde puzolan olarak BASF firmasının ürünü olan silis dumanı, İskenderun Demir-Çelik firmasının ürünü olan granüle yüksek fırın cürufu ve SOMA Termik Santrali’nin ürünü olan uçucu kül kullanılmıştır. Yer karosu imalatı için yapılan deneyleerde ise deneysel çalışmanın amacına uygun olarak yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kullanılan puzolanların fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6.6’da verilmiştir.

6.4.2 Deneyleerde Kullanılan Agregalar ve Özellikleri

Deneysel çalışmalarda üç tip agrega kullanılmıştır. Kireçtaşı kökenli 0-5 mm kırma kum, dökülen harç örneklerine görsellik kazandırmak için Topaz Firması’ndan alınan 7 çeşit renkli, doğal ve kırma agrega kullanılmıştır. Renkli agregalar Şekil 6.1’de görüldüğü üzere karıştırılarak kullanılmıştır. Kullanılan renkli agregaların cinsi ve fiziksel özellikleri Tablo 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6.6 Deneylerde kullanılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanının kimyasal özellikleri.

Kimyasal Bileşim	YFC	UK	SD
SiO ₂ (%)	37,89	42,14	92,26
Al ₂ O ₃ (%)	10,29	19,38	0,89
Fe ₂ O ₃ (%)	2,95	4,64	0,97
CaO (%)	35,86	26,96	0,49
MgO (%)	7,38	1,78	0,96
SO ₃ (%)	-	2,43	0,33
Na ₂ O (%)	0,25	-	0,42
K ₂ O (%)	0,90	1,13	0,31
Cl (%)	-	0,001	0,09



Şekil 6.1 Yer karosu için kullanılan renkli agrega ve karıştırılmış hali.



Şekil 6.1 Yer karosu için kullanılan renkli agrega ve karıştırılmış hali (devamı).

Tablo 6.7 Yer karosu üretimi için kullanılan renkli agregaların kökenleri ve fiziksel özellikleri.

Agrega Rengi	Kökeni	Boyut(mm)	Özgül Ağırlıklar	Su Emme(%)
Siyah	Kireçtaşı	5,5	2,65	2,2
Yeşil	Bazalt	3-10	2,85	5,6
Ege Pembe	Kireçtaşı	3-10	2,6	1,9
Açık Bej	Kireçtaşı	0-2	2,7	3,8
Koyu Siyah	Kireçtaşı	3-10	2,6	1,2
Beyaz	Dolomit	0-1	2,5	1,2

Gold Elyaf Firması'ndan alınan, geri dönüşüm tesisinin farklı imalat aşamalarında meydana gelen hata sonucu atık haline gelen farklı yapıda takoz ve agrom adı verilen renkli pet agregalar kullanılmıştır. Firmadan alınan pet agregaların genel özellikleri Tablo 6.8'de gösterilmiştir.

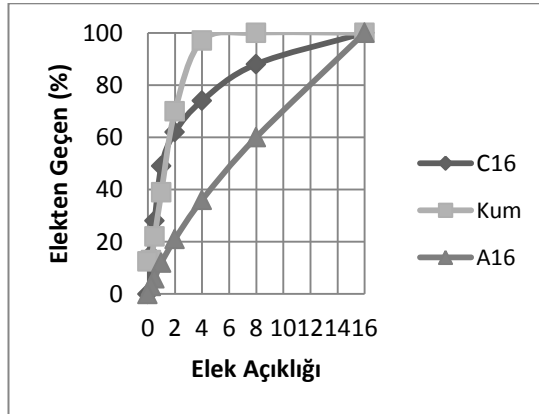
Tablo 6.8 Deneyleerde kullanılan pet agregaların fiziksel özellikleri.

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	1,40
Su Emme (%)	0,0
Basınç Dayanımı (Mpa)	70
Çekme Dayanımı (MPa)	1700

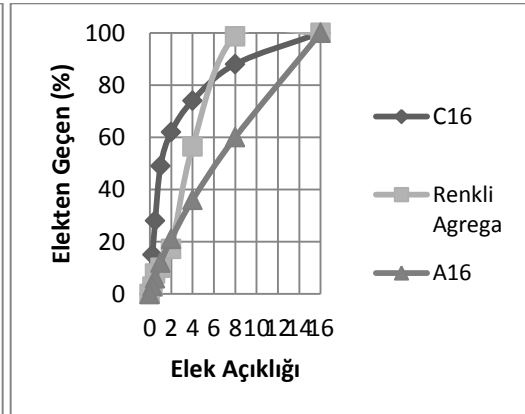
Kullanılan kırma kum, karıştırılmış renkli agrega ve pet agregaların elek analizleri sırasıyla Tablo 6.9’da gösterilmekte olup, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de elek analizlerinin grafiksel gösterimi ve kabalık incelik sınırları verilmiştir.

Tablo 6.9 Deneylerde kullanılan pet ve doğal agregaların elek analizleri.

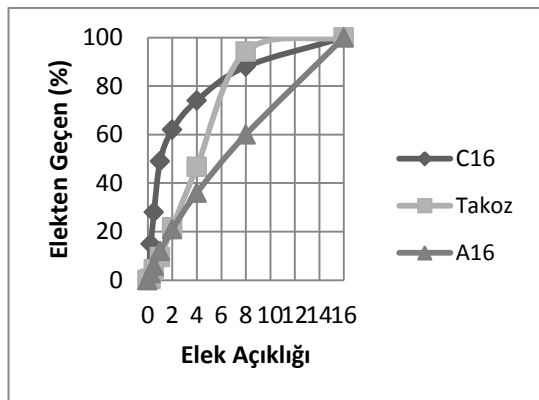
Açıklık (mm)	% Geçen			
	Kırma Kum	Renkli Doğal Agrega	Agrom	Takoz
16	100,00	100,0	100,0	100,0
8	100,00	98,6	92,1	94,2
4	97,000	56,5	59,5	46,7
2	70,000	17,2	32,8	21,8
1	39,000	10,0	14,4	9,5
0,5	22,000	7,8	5,4	4,5
0,25	13,000	2,8	0,4	0,5
0,0	12,500	0,0	0,0	0,0



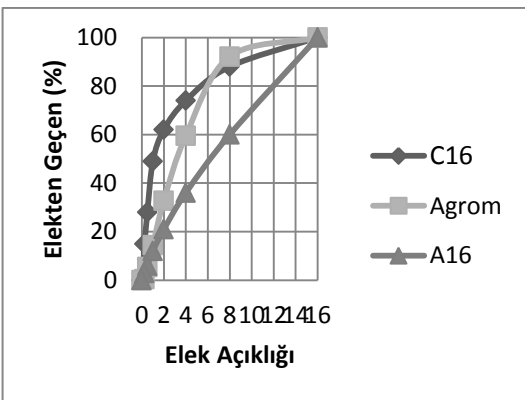
Şekil 6.2 Kumun elek analizi.



Şekil 6.3 Karıştırılmış renkli agreganın elek analizi.



Şekil 6.4 Takoz tipi pet agreganın elek analizi.



Şekil 6.5 Agrom tipi pet agreganın elek analizi.

6.4.3 Deneyde Kullanılan Kimyasal Katkılar ve Özellikleri

Atık pet agregaların harç içerisinde kullanımının araştırılması için yapılan deneylerde BASF Firması'na ait TS EN 934-2 ve ASTM-C 494 Tip G standartlarına uygun Rheobuild 561 isimli naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan katkının özellikleri Tablo 6.10'da verilmiştir.

Tablo 6.10 Deneylerde kullanılan akışkan katkının kimyasal özellikleri.

Malzemenin Yapısı	Naftalin Sülfonat Esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk (kg/Lt)	1,142-1,202
Klor İçeriği (%)	<1
Alkali İçeriği (%)	<5

Karışım suyu için İzmir İli, Buca İlçesi'ne ait içme suyu kullanılmıştır.

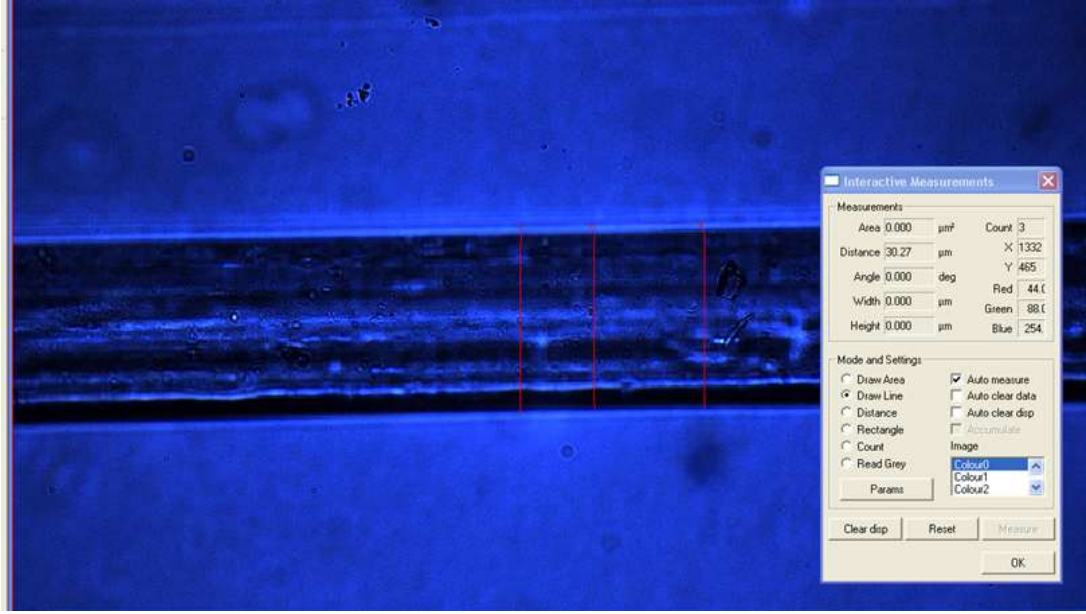
6.4.4 Deneyde Kullanılan PET Lifler ve Özellikleri

Deneyde kullanılan pet lifler Dazkırı'da bulunan Gold Elyaf Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Kullanılan pet lifin fiziksel özellikleri Tablo 6.11'de gösterilmiştir.

Tablo 6.11 Deneylerde kullanılan pet liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellikler	Değerler
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1,40
Çap (μ)	40
Uzunluk (mm)	20-30
Çekme Dayanımı (Mpa)	240
Uzama Oranı (%)	47

Dokuz Eylül Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvar'ında incelenen lifin optik mikroskoptaki görüntüsü Şekil 6.6'da verilmiştir. Şekilde pet lifin çapının 30 μm olduğu görüntü analizi yoluyla gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Pet lifin optik mikroskopta çekilen görüntüsü.

6.5 Deneysel Tasarım

Pet atıkların harç içerisinde kullanımının araştırılmasında, en uygun pet agrega cinsi ve dozajını belirlemek üzere kırma kum içerisinde hacimce %0, 25, 50, 75, 100 oranında takoz ve agrom adı verilen pet agregalar birbiri içerisinde karıştırılmadan 9 farklı karışım hazırlanarak 7 günlük deney sonuçları incelenmiştir. Deneysel çalışmanın amaç ve doğrultusunda iki tip pet agreganın da değerlendirilmesi için matris içerisinde agrega olarak sadece pet agrega kullanılmış ve iki farklı pet agrega da kendi içerisinde hacimce %25, %50 ve %75 oranında değiştirilerek hangi tip pet agreganın hangi dozajlarda kullanılabileceği belirlenmiştir. Deney sonuçlarına bakılarak belirlenen sabit kırma kum ve pet agrega dozajlarına karışım ve işlenebilirlik göz önünde bulundurularak hacimce %2 pet lif eklenip aynı dozajdaki lifsiz örneklerle karşılaştırılmıştır. Pet agregaların harç içerisinde kullanımı için yapılan çalışmada, ağırlıkça %10 silis dumanı, %50 granüle yüksek fırın cürufu ve %50 uçucu kül belirlenen karışım içerisinde çimentoya ikame edilerek 28 ve 56 günlük dayanım sonuçları karşılaştırılmıştır.

Pet agregaların harç içerisinde kullanımı için yapılan çalışmanın diğer bir aşamasında harç örneklerine görsellik kazandırmak için kırma kum yerine Topaz

Firması'ndan alınan 7 farklı cins renkli doğal ve kırma agregası kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak beyaz çimento tercih edilmiştir. Kırma kum yerine renkli agregası kullanılan, pet agregalı harç örneklerinin 7 günlük dayanım değerleri kırma kum pet agregası kullanılan harç örneklerinin dayanım değerleriyle karşılaştırarak renkli agregası kullanımının dayanıma olan etkisi incelenmiştir.

Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde; beyaz çimento, renkli agregası, pet agregası, granüle yüksek fırın cürufu ve lif ikameli 4 farklı harç karışımının 28, 56 ve 90 günlük dayanım ve dayanıklılık değerleri incelenmiştir.

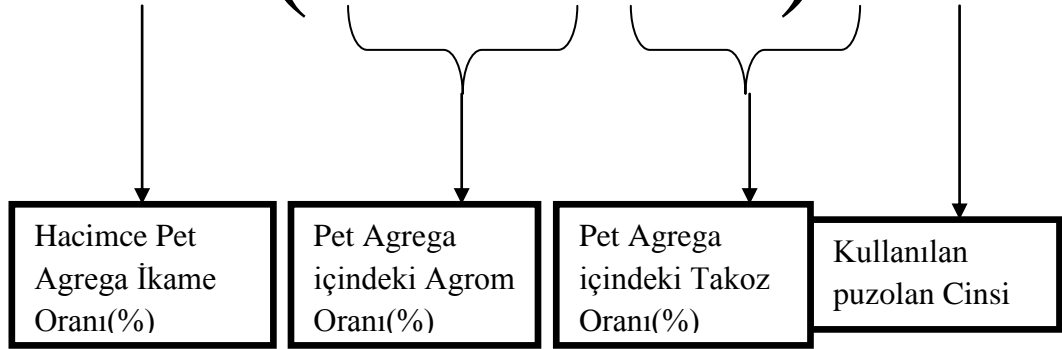
6.5.1 Harç Tasarımı ve Kapsam

Yapılan bütün karışımlarda 'standart harç' karışımı adı verilen 3 birim kum, 1 birim çimento ve 0,5 birim su bulunmaktadır. Ancak atık petlerin agregası olarak kullanılması alanında yapılan çalışmaların bir tanesinde, düşük su/çimento oranında pet agregalı harçların fiziksel ve mekanik davranışını incelemek amacıyla 0,3 su/çimento oranında karışım hazırlanmıştır.

Pet agregalarının harç içerisinde kullanımının araştırılması kapsamında işlenebilirlik göz önünde bulundurularak minimum dozajda akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmıştır. Yer karosu üretimi için yapılan çalışmada en uygun karışımlar üzerinden deney yapıldığı için akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmamıştır. Karışımlarda puzolan cinsini belirlemek için uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı çimento yerine ikame yapılarak dayanım sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneylerde, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu külle yapılan çalışmalardan elde edilen en uygun dozajlar seçilerek kullanılmıştır.

Yer karosu üretimi için gerekli malzeme dozajları belirlenirken, pet agregalarının harç içerisinde kullanımı için yapılan deneylerin işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve aşınma sonuçları değerlendirilmiş ve bunun sonucunda en uygun dozajlar kullanılmıştır. Atık pet agregalarının harç içerisinde kullanımının için yapılan deneylerde kullanılan isimlendirmeler Şekil 6.7'de gösterilmiştir.

Pet50(25A-75T)YFC

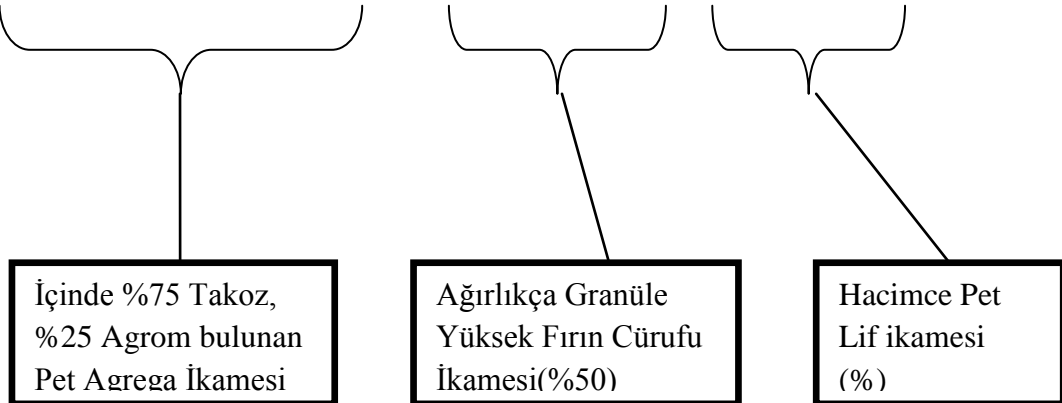


Şekil 6.7 Atık pet agregaların harç içerisinde kullanımı için yapılan deneylerde kullanılan kodların açılımı.

Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde kullanılan isimlendirmelere örnek olarak Şekil 6.8’de gösterilmiştir.

Karışımlar hazırlanırken işlenebilirliğin çok azaldığı durumlar deney esnasında fark edilmiş ve işlenebilirliğin belirli ölçüde artması için minimum dozajda akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmıştır.

PET50-YFC50-LİF2



Şekil 6.8 Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde kullanılan kodların açılımı.

6.5.2 Deneysel Yöntem

Atık pet agrega ve pet lifler, Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvar'ı bünyesindeki araç ve gereçlerden yararlanılarak harç örnekleri içerisinde kullanılmıştır. Harç örneklerini hazırlamak için laboratuvarında bulunan 3 dm³ kapasiteli 'Hobart' isimli dikey karıştırıcı kullanılmıştır.

Atık pet agregalar, inşaat sektöründe daha önceden kullanılmayan bir malzeme olduğu için ileri deneylerdeki karışım miktarlarını belirlemek üzere 34 farklı karışım hazırlanmış ve deney sonuçlarına bakılarak en uygun dozajlar belirlenmiştir.

Karışım hazırlanırken öncelikle agregalar ve çimento kuru durumda 1 dakika süreyle karıştırılmıştır. Lif içeren karışımlar hazırlanırken agrega, çimento ve lif kuru olarak karıştırılmıştır. Ancak karıştırma esnasında lifler karıştırıcının paletlerine dolanıp, toplandığı için karıştırma esnasında karıştırıcı durdurularak paletlerin etrafında toplanan lifler tekrar karıştırıcının içerisinde dağıtılmaktadır. Kuru halde karıştırılan malzemelere ölçülmüş su eklenerek 4 dakika daha karıştırılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkı eklenmesi gereken örneklerde ise katkının 1/3 suya, suyun 1/3 katkıya karıştırılarak iki aşamada eklenmiştir.

Akışkanlaştırıcı katkı eklenen karışımlarda yüzeyde su kuma durumu görülmemiştir. Lifli harç örneklerinde lifler suya temas ettiğinde karıştırıcının paletlerine yapıştığı için karıştırma esnasında Şekil 6.9'daki gibi zaman zaman karıştırıcı durdurularak lifler paletlerin etrafından alınıp karıştırıcının içine dağıtılmaktadır.

4 dakikanın sonunda hazırlanan karışımlar kalıplara iki aşamada yerleştirilmiştir. Her sıkıştırma vibrasyonla beraber 20 tokmak darbesi uygulanmıştır. Örnekler her sıkıştırma 20 saniye boyunca sarsma tablasında vibrasyon etkisi altında kalmıştır. Taze harç karışımları kalıplara yerleştirilerek üzeri perdahlanmış ve bir gün boyunca nemli ortamda bekletilmiştir. Bir gün sonra kalıptan çıkarılarak hava kurusu birim hacim ağırlıkları ölçülmüştür.



Şekil 6.9 Taze haldeki pet lifli harcın karıştırılması sırasında liflerin palet etrafında toplanması.

6.6 Taze Hal Deneyleri

Tez kapsamında hazırlanan taze haldeki bütün karışımlara yayılma tablası kullanılarak yayılma deneyi yapılmıştır.

6.6.1 Çökme - Yayılma Deneyi

Deneylerde hazırlanan bütün harç karışımlarının işlenebilirlikleri tayin edilirken aynı adımlar izlenmiştir. Karışımların işlenebilirlikleri tayin edilirken Şekil 5.10'da gösterilen yayılma tablası kullanılmıştır.

Harç, yayılma hunisine 3 aşamada koyulmuş ve her aşamada 20 tokmak darbesiyle sıkıştırılmıştır. Huni tamamen doldurulduğunda üzeri perdahlanmıştır. Perdahlandıktan sonra huni kaldırılarak 10 düşürme yapılmış ve harç örneğinin yayılma çapı okunmuştur.



Şekil 6.10 İşlenebilirlik deneyi için kullanılan yayılma tablası.

6.7 Sertleşmiş Hal Deneyleri

Atık pet agregaların sertleşmiş haldeki harçta kullanılmasının araştırılması kapsamında deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında, puzolan kullanılmayan harç örneklerinde 7 günlük eğilme ve basınç dayanımları incelenmiştir. Eğilme ve basınç dayanımını belirlemek için 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik örnekler hazırlanmıştır. Puzolan ikameli örneklerde 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik örneklerin 7, 28 ve 56 günlük mekanik dayanımları ölçülmüştür. Puzolan ikameli örneklerde yüzeysel aşınma için 7,1x7,1x7,1 cm boyutlarında küp örnekler ve Modifiye Los Angeles Aşınma Deneyi için 4x4x4 cm boyutlarında küp örnekler hazırlanarak 28 ve 56 günlük mekanik dayanım değerleri ölçülmüştür. Ayrıca Takoz0, Takoz50, Takoz75 ve Takoz100 isimli 4x4x16 cm boyutlarındaki örnekler 10 saat boyunca 240 °C, 120 °C, 80 °C ve 60 °C sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Örneklerin eğilme ve eğilme sonrası basınç dayanımları incelenmiştir.

Yer karosu üretimi için yapılan çalışmada ise 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik örnekler hazırlanarak 28, 56 ve 90 gün su küründe bekletilmiştir. Örnekler kurutularak eğilme ve eğilme sonrası basınç, donma-çözülme, asit ve ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır. 28, 56 ve 90 günlük numunelere üç noktalı eğilme deneyi yapılarak yük-sehim grafikleri çıkarılmış ve tokluk değerleri belirlenmiştir. Eğilme deneyinden sonra, aynı örneklere basınç deneyi yapılarak basınç dayanımları bulunmuştur. Donma çözülme ve asit deneyi için örnekler 28 gün suda bekletildikten sonra donma-çözülme ve HCl (hidroklorik asit) etkisine bırakılmıştır. Zararlı etkilere maruz kalan örneklerdeki dayanım kaybını karşılaştırmak amacıyla eşlenik numuneler hazırlanmış ve kırım zamanına kadar suda bekletilmiştir.

Yer karosu üretimi için hazırlanan her bir seriden 5x2,5x10 cm boyutlarındaki örnekler 28 gün suda bekletildikten sonra kurutularak Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Termodinamik Laboratuvarı'nda bulunan 'hotwire' cihazı yardımıyla ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır.

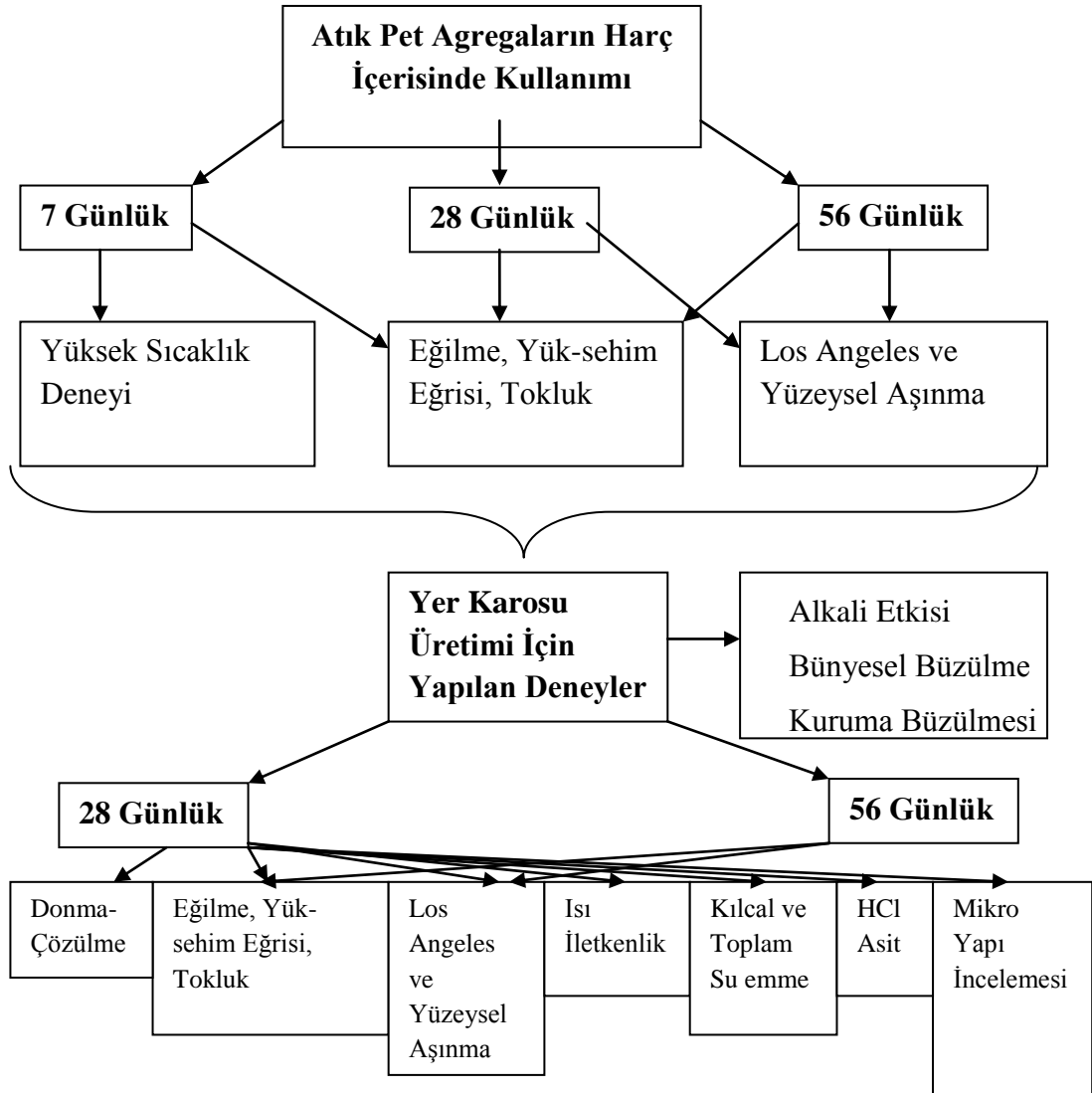
Deney kapsamında 28 günlük kuru 4x4x16 cm'lik prizmatik numunelerde kılcal ve toplam su emme değerlerini belirlemek için kapiler yolla su emme deneyleri yapılmıştır.

2,5x2,5x28,5 cm boyutlarındaki örneklerle alkali, bünyesel ve kuruma büzülmesi deneyleri yapılmıştır.

7,1x7,1x7,1 cm boyutlarında küp örnekler hazırlanarak 28, 56 ve 90 günlük yüzeysel aşınma deneyleri yapılmış ve dayanımları ölçülmüştür. 4x4x4 cm boyutlarında örnekler hazırlanarak 28, 56 ve 90 günlük örneklerde Modifiye Los Angles Aşınma Deneyi yapılmış ve ağırlık kayıpları ölçülmüştür.

Pet agrega ikamesinin basınç ve eğilme dayanımlarındaki değişimlerin ara yüzey kalınlığıyla olan etkisi ve kullanılan malzemelerin yüzey özelliklerini belirlemek amacıyla İçyapı incelemeleri için yapılmıştır. Her bir seri türünden 28 gün sonunda örnekler alınarak parlak ve kırık yüzey örneklerinde mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

Yapılan deneyler şematik olarak şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 Deneylerde sertleşmiş haldeki örneklere yapılan deneylerin şematik gösterimi

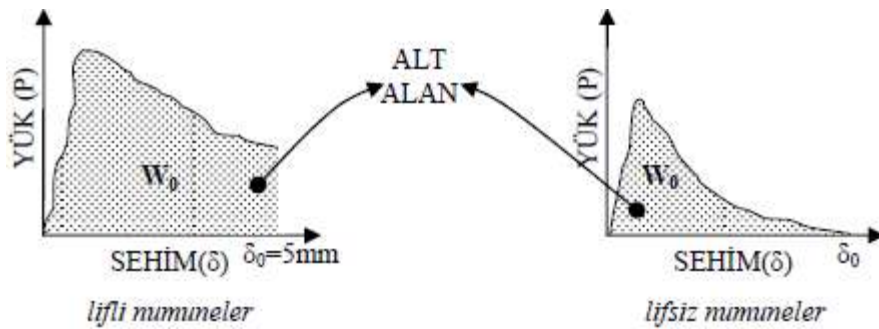
6.7.1 Eğilme Deneyi

Deneylerde 7, 28, 56 gün su küründe kalan 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik örneklere 3 noktalı eğilme deneyi yapılarak eğilme dayanımı ve tokluk gibi değerleri belirlenmiştir. Şekil 6.12’de görünen deplasman kontrollü eğilme cihazında yapılan deneylerde yük, örnek dakikada 0,05 mm sehim yapacak şekilde ayarlanmıştır. Mesnetler arası açıklık 13 santimetreye ayarlanmıştır. Numunenin altında duran okuyucu ile orta noktadaki sehim ölçülebilmektedir. Her bir serideki 3 farklı

örnekten elde edilen yük sehim eğrisinin ortalaması alınarak yük-sehim grafiği çizilmiştir. Eğilme deneyinde, cihaz tarafından hangi yükte kaç mm sehim yaptığı belirlenip excel formatında sonuçlar çıkmaktadır. Harç örneğinin tokluğunu belirlemek için Şekil 6.13’de gösterilen yük-sehim eğrisinin altındaki alan hesaplanmaktadır. Hesaplama sırasında eğrinin altındaki birbirini takip eden iki yük ve sehim değerleri arasında kalan alan yamuk şeklini oluşturduğu için yamuğun alan hesabından bu değer hesaplanır. Excel yardımıyla bütün okuma değerlerindeki alanlar toplanır. Sonuç örneklerin kırılma enerjilerini vermektedir.

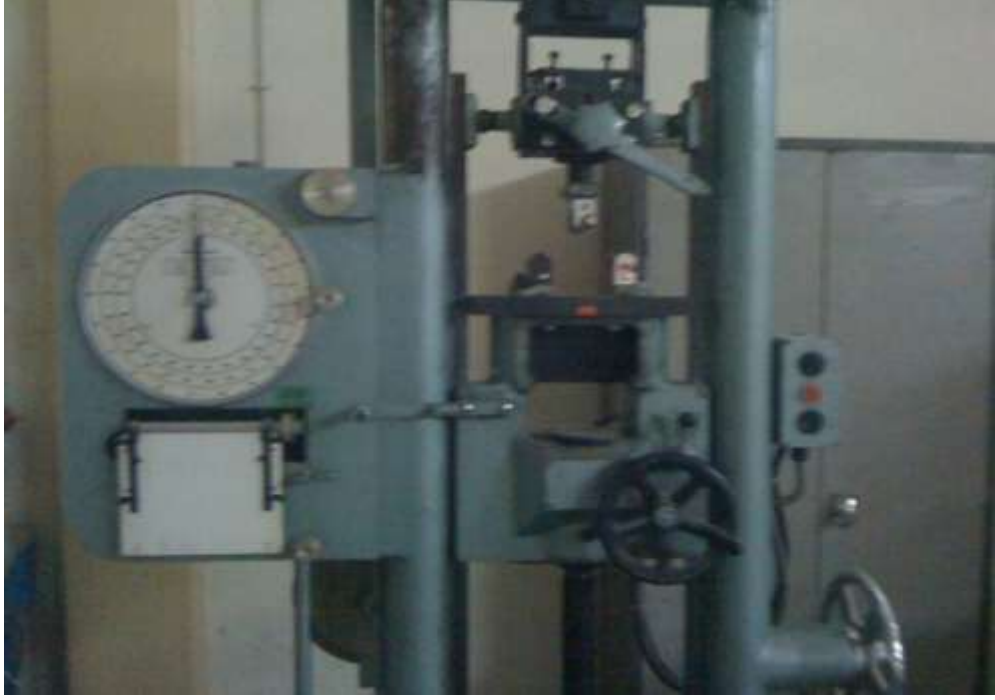


Şekil 6.12 Sehimsiz kontrollü üç noktalı yükleme deneyi aleti.



Şekil 6.13 Tokluk değerlerinin belirlenmesinde kullanılan eğriler ve eğrinin altında kalan alanlar.

Ancak atık pet agregaların harç içerisinde kullanılması için yapılan deneyler kapsamında hazırlanan Takoz0, 25, 50,75, 100, Agrom25, 50, 75, 100 ve takoz-agrom karışımı serilerde Şekil 6.14’deki üç noktalı eğilme deneyi yapılmış ve sadece kırılma yükleri belirlenmiştir. Bu deney 0,02 mm/dk deplasman hızında gerçekleşmiş ve mesnet açıklıkları 13 santimetreye sabitlenmiştir.



Şekil 6.14 Yük kontrollü üç noktalı yükleme deneyi aleti.

Eğilme dayanımı hesaplanırken aşağıdaki teorik formül izlenmiştir.

$$f_{eğ} = 3.F.L/2.d_1.d_2^2$$

$$f_{eğ} = \text{Eğilme dayanımı, MPa}$$

$$F = \text{Örmeğin Taşıyabildiği En büyük yük, N}$$

$$L = \text{Mesnet açıklığı, mm}$$

$$d_1 d_2 = \text{Örneğin en kesit boyutları, mm}$$

6.7.2 Basınç Deneyi

Eğilme deneyinde iki parçaya ayrılan numuneler üzerinde basınç deneyi yapılmıştır. Basınç deneyleri, Şekil 6.15’de gösterilen 300 ton kapasiteli ELE marka yük kontrollü, hidrolik sistemle çalışan pres makinesinde yapılmıştır. Basınç deneyi yapılırken basınç, 240 kgf/s yükleme yapacak şekilde ayarlanmıştır. Deneylerde hazırlanan örneklerin basınç dayanımları bu şekilde bulunmuştur.

Örneklerin basınç dayanımı, her seriden eğilme deneyi sonrası ikiye ayrılan 6 parçanın 5 tanesi kırılıp ortalaması alınarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı aşağıdaki formül kullanılarak bulunmuştur.

$$f_c = F/A_c$$

$f_c =$ Basınç Dayanımı (N/mm^2), MPa

$F =$ Kırılma yükü, N

$A_c =$ Basınç etkisi altındaki örneğin alanı, mm^2



Şekil 6.15 Basınç deneyi aleti.

6.7.3 Aşınma Deneyi

Çalışma kapsamında iki çeşit aşınma deneyi yapılmıştır. Deneylerde Los Angeles Aşınma aleti ve yüzeysel aşınma dayanımlarını belirlemek için Dory Yüzeysel Aşınma Aleti kullanılmıştır.

Los Angeles Deneyi, agregaların aşınma değerlerini belirlemek için kullanılan deney yöntemidir (Şekil 6.16). Tambur içerisine koyulan çelik bilyeler ve agregalarla birlikte ayarlanan devirde döner ve ağırlık kayıpları kaydedilerek ölçülür. Bu deney yöntemi çimento bazlı kompozit malzemeler için uygun olmayacağı öngörülerek içerisindeki bilyeler çıkarılmış ve tambur 500 devire ayarlanmıştır. Kuru tartılan örnekler 500 devir sonrasında numuneler tamburdan çıkarılarak kuru ağırlıkları tartılmış ve ağırlık kaybı diğer serilerle karşılaştırılmıştır.

Yüzeysel aşınma deneyi Şekil 6.17’de gösterilen TS 213’teki standartlara uygun Dorry yüzeysel aşınma aleti kullanılarak yapılmıştır. Yüzeysel aşınma deneyinde, aşınma tablasının muhafazasına uygun 7,1x7,1 cm boyutlarında küp örnekler

hazırlanmıştır. Deneyden önce örnekler 3 gün boyunca 40 °C de kurutularak bütün kenarları hassas olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Deney esnasında örnek muhafazaya yerleştirildikten sonra üzerine 300 N'luk kuvvet uygulanmış ve aşındırmak için ince korund malzeme kullanılmıştır. Tek yüzeyde uygulanan bu işlem aynı yüzey aşınacak şekilde saat yönü veya tersi yönde döndürülerek aşındırılmıştır. Tabla her çalıştığında 21 devir yapmaktadır. Örnek, tabla her 21 devir yaptığında aynı yüzey aşınacak şekilde döndürülmektedir. Bu işlem, her bir yüzey 4 defa aşındırılarak yapılmıştır. Bu durumda her yüzeyde aşındırma tablası 84 devir yapmış olmaktadır. Toplamda tabla 336 devir yapmış olmaktadır. Deney bittikten sonra ağırlıkları ve bütün kenarları yeniden ölçülerek ağırlık ve hacim kayıpları hesaplanmıştır.



Şekil 6.16 Los angeles aşınma deneyi aleti.



Şekil 6.17 Dory yüzeysel aşınma deneyi aleti.

6.7.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi

Atık pet agregaların harç içerisinde kullanımının araştırılması sırasında pet agrega ikameli örneklerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarını incelemek amacıyla 7 günlük pet agrega ikameli örnekler kurutulmuş ve Şekil 6.18’de gösterilen yüksek sıcaklık fırınında 240, 120, 80 °C sıcaklıkta 10 saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç deneyi yapılarak dayanım kayıpları incelenmiştir.



Şekil 6.18 Yüksek sıcaklık deneyi aleti.

6.7.5 Donma-Çözülme Deneyi

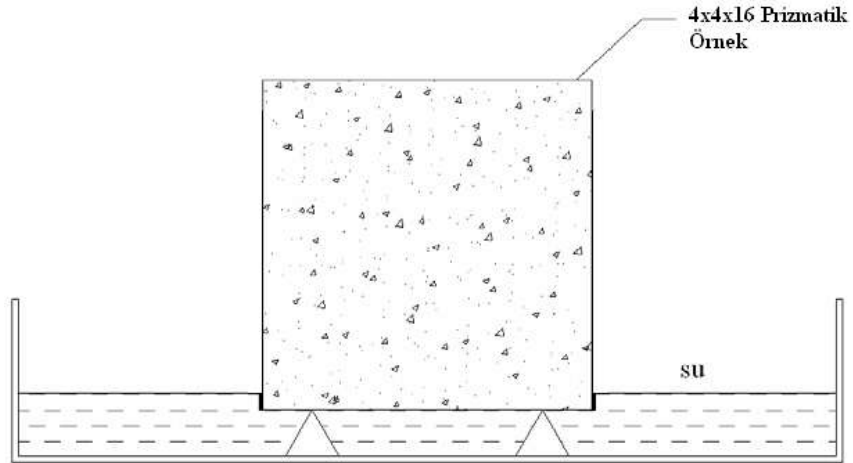
Donma-çözülme çevrimleri Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi laboratuvarında bulunan donma-çözülme kabininde yapılmıştır. Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde hazırlanan 4x4x16 cm boyutlarındaki örnekler 28 gün su küründe bekletildikten sonra donma-çözülme kabinine koyulmuş ve 270 donma çözülme çevrimi yapılmıştır. ASTM C666 standardına uygun olarak yapılan deneyde örnekler 3 saat içinde 5 ± 2 °C den -18 ± 2 °C ye kadar havada soğutulmuş ve 1 saat içinde suda 5 ± 2 °C ye ısıtılmıştır. 270 çevrim sonunda numuneler kabinden çıkarılarak kurutulmuş ve kuru ağırlıkları ölçülerek ağırlık kayıplarına bakılmıştır. Eğilme deneyi yapılabilecek, bozulmamış örneklerde eğilme deneyi yapılmıştır. Bütün örneklerde basınç deneyi yapılmıştır.

6.7.6 Asit Deneyi

Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde hazırlanan örnekler 28 gün suda bekletildikten sonra su içerisinde %5 hidroklorik asit (HCl) karıştırılmış çözelti havuzunda 56 gün süreyle bekletilmiştir. Hazırlanan karışımın Ph derecesi 0,17 olarak ölçülmüştür. Her seriden üçer adet örnek alınmış ve asit havuzuna konulmuştur. 56 gün sonunda asit havuzundan çıkarılan örnekler yıkanıp kurutularak ağırlık kaybı ölçülmüş ve basınç deneyi yapılmıştır. Asit havuzunda bekleyen numunelere eşlenik numuneler hazırlanmış ve örnekler asit havuzundan çıkarılana dek 20 ± 5 °C su küründe bekletilmiştir.

6.7.7 Su Emme Deneyi

Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde hazırlanan örnekler için yapılan bu deneyde, 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik örnekler 28 gün suda normal sıcaklıkta kür edildikten sonra 40 °C de 5 gün boyunca kurutulup ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra Şekil 6.19'daki gibi boş bir hazneye örnekler dikine yerleştirilmiş ve örneklerin alt yüzeyinden itibaren 3 mm yüksekliğe kadar suyla doldurulmuştur. Dışarıya nem çıkışını engellemek amacıyla örneklerin konulduğu kap kapalı tutulmuştur. 30, 60, 90, 120, 240, 360, 720, 1440, 2880. dakikalarda örnekler tartılarak ağırlık artımları ölçülmüştür. Örnekler daha sonra tamamen suya batırılarak 24 saat beklenmiş ve toplam su emme değerleri ölçülmüştür.



Şekil 6.19 Su emme deneyi gösterimi.

6.7.8 Isı İletkenlik Deneyi

Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde hazırlanan 5x10x2,5 cm boyutlarında 28 gün su küründe kalmış örnekler, 5 gün 40 °C de tamamen kurutulmuş ve Şekil 6.20’de gösterilen hot wire cihazıyla ölçüm yapılmıştır.



Şekil 6.20 Isı iletkenlik deneyi aleti.

Hot wire yönteminde ısıl iletkenlik katsayısı yaklaşık olarak,

$$k = \frac{q \cdot \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{4 \cdot \pi \Delta T} \text{ Formülüyle hesaplanır. Burada;}$$

q = Örnek malzemenin merkezinden geçen telin ısı akışı, kcal/h.m

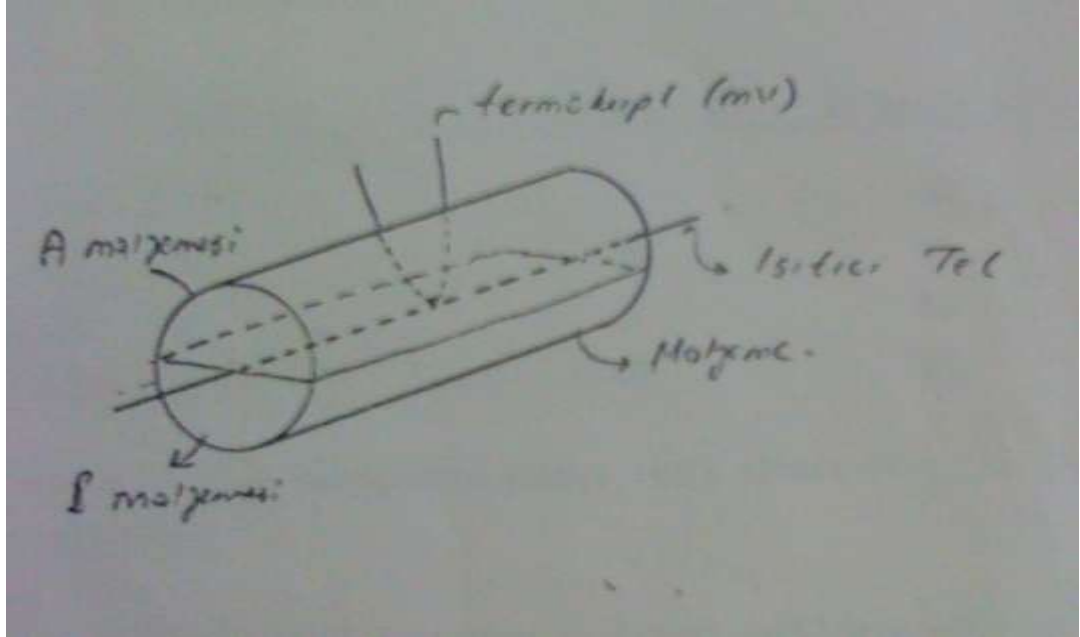
t = Zaman, h

Δt = Sıcaklık farkı, °C ($t_2 - t_1$)

Hot wire yönteminde, Şekil 6.21’de gösterilen ısıtıcı tel iki örnek arasına yerleştirilir. Eğer örneklerden biri ısı iletkenliği bilinen iyi yalıtılmış bir malzeme ise diğer plakanın ısı iletkenliği verilen formülle hesaplanır.

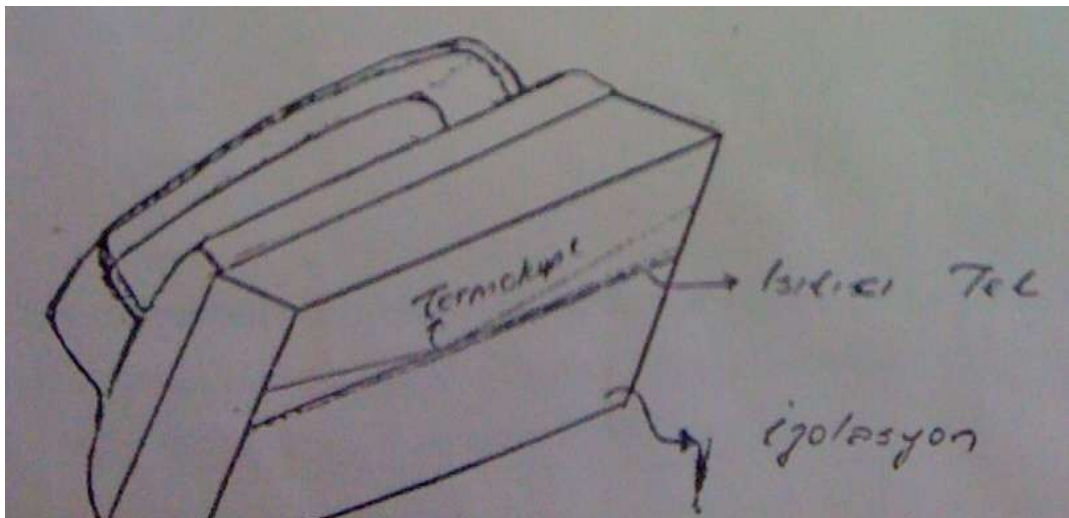
Ölçüm yapılırken cihaz üzerindeki ‘Heater’ düğmesi 0,5’e getirilerek cihazın ısınması için 45 dakika beklenir. ‘Mode’ düğmesi ‘Cal’ durumuna getirilerek sıfır

ayar yapılır. Kullanılan probun K ve M sabitleri cihaz üzerinde ayarlanır. Ölçüm yapılacak malzemenin ısı iletkenlik katsayısı değeri tahmin edilerek modu ayarlanır. Bu arada ölçüm yapılacak malzemenin yüzeyi pürüzsüz olmalıdır. Şekil 6.23'de görüldüğü gibi prob malzemenin üzerine koyularak 2 dakika bekletilir ve cihaz çalıştırılır ve ölçüm yapılır.



Şekil 6.21 Hot wire yönteminin çalışma prensibi.

Ölçüm yapan cihazın probu Şekil 6.21'de gösterilmiştir.



Şekil 6.22 Hot wire yönteminde ölçüm yapan cihazın probu.



Şekil 6.23 Hot wire yönteminde örneklerin ısı iletkenlik değerlerinin ölçümü.

6.7.9 Alkali Etkisi

Pet atıkların çimentolu kompozit yapımında agrega olarak kullanılması yönünde yapılan çalışmalarda alkali etkisine karşı duyarlı olduğu konusu geçmiştir. Bu durum göz önünde bulundurularak 2,5x2,5x285 mm boyutlarındaki örnekler ASTM C 1260 standardına uygun şekilde 1N NaOH çözeltisine bırakılmıştır. Kalıptan çıkarılan örnekler bir gün boyunca 40 °C sıcaklıkta kür edilmiştir. Ancak standartta yer alan 80 °C sıcaklığın pet agrega içeren örneklerde hasar oluşturabileceği göz önünde bulundurularak 40 °C seçilmiştir. Kürden sonra boyu ölçülerek 40 °C'de NaOH çözeltisine bırakılmış ve 21 gün boyunca boy değişimleri incelenmiştir (Şekil 6.24).



Şekil 6.24 Bünyesel, kuruma ve alkali etkisinde bırakılacak örnekler.

6.7.10 Bünyesel ve Kuruma Büzülmesi Etkisi

Pet agreganın, harç örneklerinin bünyesel ve kuruma büzülmesine etkilerini araştırmak üzere 25x25x285 boyutlarındaki harç çubukları hazırlanarak bünyesel ve kuruma büzülmeleri için uygun ortam hazırlanmış ve boy ölçümleri incelenmiştir. Bünyesel büzülme için, kalıptan çıkarıldıktan sonra harç örneklerinin boyları ölçülmüş ve 24 gün boyunca 20 °C’de ortalama %90 nemde bırakılarak 1, 3, 7, 12, 24. Günlerde boy ölçümleri kayıt altına alınmıştır. Kuruma büzülmesi için, bünyesel kuruma büzülmesine benzer şekilde 30 °C’de %50 nem ortamında bırakılarak boy ölçümleri yapılmıştır (Şekil 6.25).



Şekil 6.25 Boy ölçümü gösterimi.

6.7.11 SEM Analizi

DeneySEL çalışmada, Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Laboratuvarı’nda bulunan Şekil 6.26’da gösterilen SEM’ de (taramalı elektron mikroskobu) ileri deneylerde hazırlanan karışımların parlak ve kırık yüzeyleri incelenmiş ve belirli noktalardan EDS (enerji dağıtım spektrometresi) analizi yapılmıştır.

SEM incelemelerinde kırık yüzeyler için ikincil elektron (SE), parlak yüzeyler için geri sekmeli electron (BE) modunda çalışılmıştır. Bazı durumlarda, parlak

yüzeyde ayrıntıların görülebilmesi için SEI moduna da geçilmiştir. Elektron kaynağı tungsten filamenttir. Deneyde, örnekler üzerine 10-15 kV hızlandırıcı voltaj uygulanmıştır.

Yer karosu üretimi için yapılan deneylerde hazırlanan karışımlar 28 gün suda kür edildikten sonra, her seriden birer adet parlak ve kırık yüzey için örnekler alınmıştır. Aynı karışımların asit deneyi sonrasında da kırık yüzey analizi için örnekler alınmıştır. Ayrıca deneyde kullanılan doğal renkli agrega, takoz ve agrom tipli pet agrega, pet liften örnekler alınarak kırık yüzey analizi yapılmıştır.



Şekil 6.26 Sem ölçüm cihazı.

Parlak yüzeyde SEM analizi yapabilmek için örnekler kesme makinesinde kesilerek 3 gün boyunca 40 °C'de kurutulmuştur. Kurutulan örnekler epoksi reçine ile kaplanarak reçine kuruyana kadar bekletilmiştir. Reçine kuruduktan sonra No: 220, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 zımparalarla zımparalanarak polyester numune yüzeyinden kazınıp pürüzsüz bir yüzey oluşturulmuştur. Son aşamasında elmas pasta ile parlatılan örnekler kurutulup vakumlanarak altınla kaplanmış ve analize hazır hale getirilmiştir.

Kırık yüzey analizi için örneklerden ufak parçalar koparılarak kurutulmuş ve levha üzerine yapıştırılıp vakumlanarak altınla kaplanmıştır.

Örneklere agrega ile matris arasındaki ara yüzey (ITZ), parlak yüzeyde daha net görülebilmektedir. Ancak matris, agrega ve liflerin geometrisi kırık yüzeyde belirginleşmektedir.

BÖLÜM YEDİ

AGREGA YERİNE PET ATIKLARIN HARÇLARDA KULLANIMININ

ARAŞTIRILMASI

7.1 Deney Sonuçlarının İncelenmesi

Agrega yerine pet atıkların harçlarda kullanımının araştırılması kapsamında, pet agregaların harç içerisindeki davranışlarını incelemek için farklı karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan sertleşmiş harçların pet agregaya ikamesi sonucunda fiziksel ve mekanik dayanımlarına olan etkiler incelenmiştir.

Deneyde iki farklı tip pet agregaya bulunmaktadır. Atıkların geri dönüştürülmesi kapsamında iki farklı tip pet agregaya da harçlarda kullanılması amaçlanmıştır. Bu tip pet agregaların inşaat sektöründe daha önceden yapılan çalışmalarda kullanılmaması, tezin kapsamını daha fazla detaylandırmıştır. Bu nedenle deneysel çalışmada işlenebilirlik, birim hacim ağırlık, eğilme, tokluk, basınç, aşınma, yüksek sıcaklık gibi parametreler incelenerek en uygun pet karışımının bulunması amaçlanmıştır.

Deneyde kullanılan örnek boyutları genellikle 4x4x16 cm'dir. Deneyde eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri yapıldığı için bu boyutta harç örnekleri hazırlanmıştır. Ancak yüzeysel aşınma deneyi için 7,1x7,1x7,1 cm boyutlarında harç örnekleri, Modifiye Los Angeles aşınma deneyi için 4x4x4 cm boyutlarında harç örnekleri hazırlanmıştır.

Çalışmanın bu aşamasında genellikle yedi gün su küründe bekletilen örneklerin dayanımları incelenirken, puzolan ikameli karışımlarda 28 ve 56 günlük dayanımlar incelenmiştir.

Bu kapsamda incelenen konular, yapılan deneyler, belirlenen özellikler ve deneyde kullanılan örnek boyutları Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1 Agregaya yerine pet atıkların harçlarda kullanımında yapılan deneyler, belirlenen özellikler ve örnek boyutları.

KONU	YAPILAN DENEYLER	BELİRLenen ÖZELLİKLER	ÖRNEK BOYUTLARI (cm)
Takoz ve Agrom PET agregaların Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi	Yayılma	İşlenebilirlik	
	Hava Kurusu B.H.A Tayini	Hava Kurusu B.H.A	4x4x16
	Eğilme Deneyi (Yük Kontrollü Eğ. Deney Aleti)	7 Günlük Eğilme Dayanımı	4x4x16
	Eğilme Sonrası Basınç deneyi	7 Günlük Basınç Dayanımı	4x4x4
	Yüksek Sıcaklık Deneyi (240, 120, 80 °C)	7 Günlük Eğilme ve Basınç Dayanımı	4x4x16
Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi	Yayılma	İşlenebilirlik	
	Hava Kurusu B.H.A Tayini	Hava Kurusu B.H.A	4x4x16
	Eğilme Deneyi (Yük Kontrollü Üç Noktalı Eğ. Deney Aleti)	7 Günlük Eğilme Dayanımı	4x4x16
	Eğilme Sonrası Basınç deneyi	7 Günlük Basınç Dayanımı	4x4x4
Takoz, Agrom PET Agregaya ve PET Lif Eklenen Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçları	Yayılma	İşlenebilirlik	
	Hava Kurusu B.H.A Tayini	Hava Kurusu B.H.A	4x4x4
	Eğilme Deneyi (Sehim Kontrollü Üç Noktalı Eğ. Deney Aleti)	7 Günlük Eğilme Dayanımı, Yük-Sehim Eğrileri, Tokluk Değerleri	4x4x16
	Eğilme Sonrası Basınç deneyi	7 Günlük Basınç Dayanımı	4x4x4
	'Dory' Yüzeysel Aşınma Deneyi	7 Günlük Aşınma Direnci	7,1x7,1x7,1
Takoz ve Agrom PET Agregaya İkameli, Farklı Su/Çimento Oranında Hazırlanmış Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçları	Yayılma	İşlenebilirlik	
	Eğilme Deneyi (Sehim Kontrollü Üç Noktalı Eğ. Deney Aleti)	7 Günlük Eğilme Dayanımı, Yük-Sehim Eğrileri, Tokluk Değerleri	4x4x16
	Eğilme Sonrası Basınç deneyi	7 Günlük Basınç Dayanımı	4x4x4

Tablo 7.1 Agregaya yerine pet atıkların harçlarda kullanımında yapılan deneyler, belirlenen özellikler ve örnek boyutları (Tablo 7.1 Devam)

KONU	YAPILAN DENEYLER	BELİRLenen ÖZELLİKLER	ÖRNEK BOYUTLARI (cm)
Takoz ve Agrom PET Agregaya İkameli Karışımda Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi	Yayılma	İşlenebilirlik	
	Hava Kurusu B.H.A Tayini	Hava Kurusu B.H.A	4x4x16
	Eğilme Deneyi (Yük Kontrollü Eğ. Deney Aleti)	7, 28, 56 Günlük Eğilme Dayanımı, Yük-Sehim Eğrileri, Tokluk Değerleri	4x4x16
	Eğilme Sonrası Basınç deneyi	7,28, 56 Günlük Basınç Dayanımı	4x4x4
	'Los Angeles' Aşınma Deneyi	28 Günlük Aşınma Direnci	4x4x4
Kırma Kum Yerine Renkli Doğal-Kırma Agregaya, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL Çimentosu Kullanımının Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi	Yayılma	İşlenebilirlik	
	Hava Kurusu B.H.A Tayini	Hava Kurusu B.H.A	4x4x16
	Eğilme Deneyi (Yük Kontrollü Üç Noktalı Eğ. Deney Aleti)	7 Günlük Eğilme Dayanımı	4x4x16
	Eğilme Sonrası Basınç deneyi	7 Günlük Basınç Dayanımı	4x4x4
	Modifiye Los Angeles Aşınma Deneyi	7 Günlük Aşınma Direnci	4x4x4

Hazırlanan harç karışımlarının m³ dizaynları ve mekanik dayanımları birlikte verilecektir.

7.2 Takoz ve Agrom PET Agregalarının Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi

Deney, takoz ve agrom tipi pet agregaların kırma kum yerine ayrı ayrı ikame edilmesinin harç örnekleri üzerindeki etkilerini incelemek üzerine yapılmıştır. Deneyde, iki farklı tip pet agrega aynı dozajlardaki farklı karışımlarda kullanılmıştır. Tablo 7.2’de kullanılan malzeme miktarları gösterilmiştir.

7.2.1 Takoz ve Agrom Karışımlarının İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları

Pet agregaların özgül ağırlıkları 1,40 g/cm³ olduğu için hafif agrega sınıfına girmektedirler. Hafif betonlarda görülen işlenebilirlik sorunları pet agregalı harç örneklerinde de görülmektedir. Taze harç karışımlarında pet agrega ikame oranı arttıkça daha kolay karıştırılabilmesine rağmen hafif agregalara etkiyen yer çekimi kuvvetinin daha az olması nedeniyle yayılma deneyinde daha düşük sonuçlar vermektedir. Şekil 7.1’de ‘Agrom100’ isimli sadece takoz pet agregaların bulunduğu taze harç, 10 düşürme sonrasında bile yayılmamıştır.



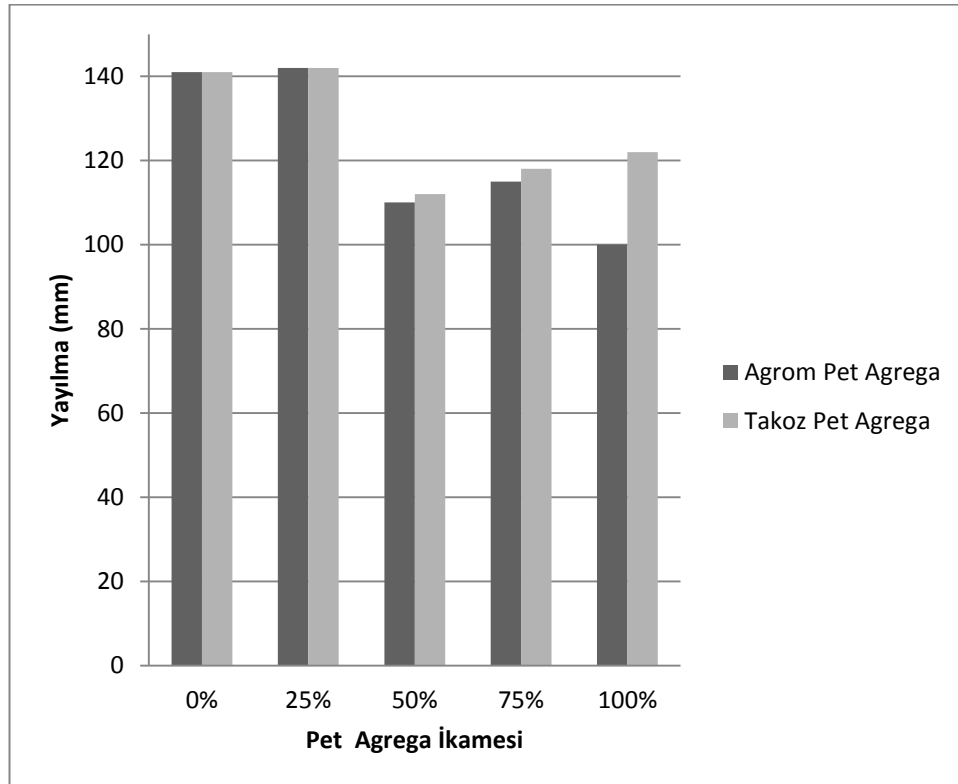
Şekil 7.1 Agrom100 no’lu harcın deney sırasında yayılma davranışı.

Tablo 7.2 Hazırlanan karışımların kg/m³ miktarları (a).

Malzemeler	KNT	Takoz25	Takoz50	Takoz75	Takoz100	Agrom25	Agrom50	Agrom75	Agrom100
Çimento (CEM I 42,5 R)	511	511	511	511	511	511	511	511	511
Uçucu Kül	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Silis Dumanı	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yüksek Fırın Cürufu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kırma Kum	1536	1151	768	384	-	1151	768	384	-
Pet Agregası (Takoz)	-	203	405	608	811	203	405	608	811
Pet Agregası (Agrom)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pet Lif	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Su	256	256	256	256	256	256	256	256	256
Toplam	2303	2121	1940	1759	1578	2121	1940	1759	1578

Takoz ve agrom isimli iki farklı yapıdaki pet agreganın S/Ç oranı 0,5 olan taze hal işlenebilirliğe olan etkileri Şekil 7.2’de incelenmiştir. Şekilde, agrom ve takoz pet agregaların %75 ikameye kadar birbirlerine yakın yayılma değerleri ölçülmüştür. Takoz tipi pet agregalar pürüzsüz yüzeye sahipken, agrom tipi agregalar ise pürüzlü ve düzensiz yüzey yapısına sahiptir. Yayılma deneyi yapılırken takoz tipi pet agregalar birbirleri üzerinden kolayca kayabildiği için takoz pet agrega ikameli taze harç örnekleri, agrom pet agregası kullanılan örneklere göre daha fazla yayılma göstermiştir.

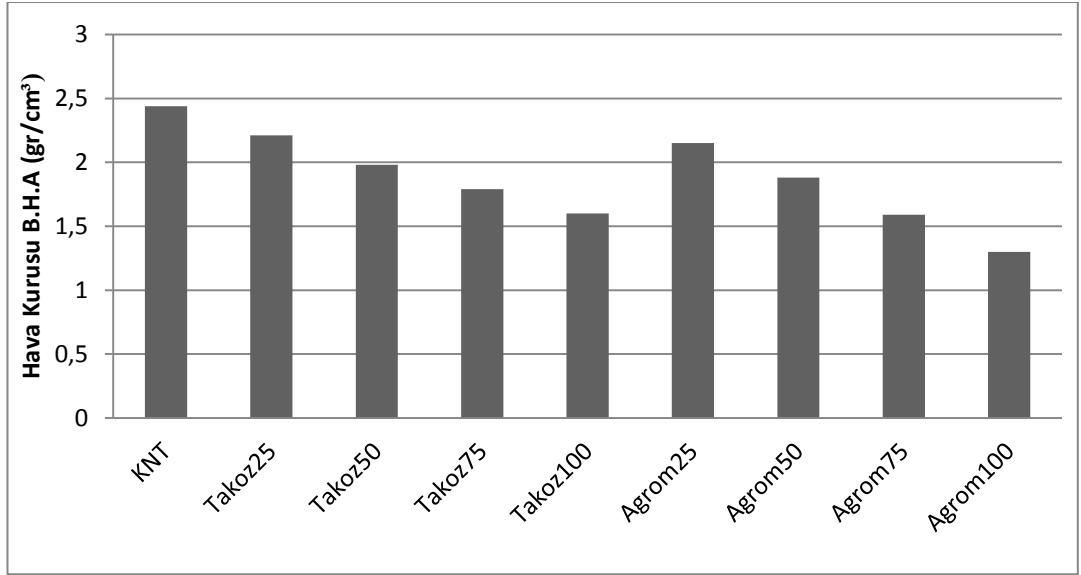
Pet agrega kullanılmayan örneğe bakıldığında, hacimce %25 pet agrega ikamesinin işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemediği, bir miktar artış olduğu gözlemlenmiştir. Pet agregaların su tutma oranının sıfır olması, daha sulu karışım oluşturmakta ve yayılmayı arttırmaktadır. Pet agregaların özgül ağırlığının doğal agregalara veya kırma kuma göre yarı yarıya düşük olması, pet agregalara etkiyen yerçekimi kuvvetinin yarı yarıya azalmasına, bu durumun da yayılmanın daha düşük ölçülmesine neden olmaktadır.



Şekil 7.2 Harç içerisinde ikame edilen takoz ve agrom tipi pet agregaların yayılma değerleri.

7.2.2 Takoz ve Agrom Karışımlarının Hava Kuruğu Birim Hacim Ağırlıkları

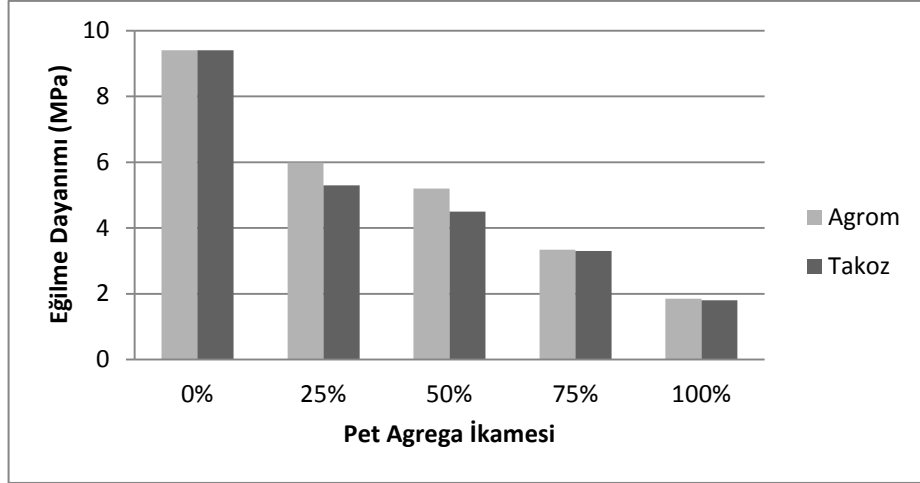
Deneşlerde hazırlanan takoz ve agrom tipi pet agregaların ayrı ayrı ikame edildiği karışımların hava kuruğu birim hacim ağırlıkları Şekil 7.3'de gösterilmiştir. Pet agrega ikamesi birim hacim ağırlığı azaltmaktadır. Aynı pet agrega ikame oranında, agrom tipi pet agrega ikameli sertleşmiş harç örneklerinin birim hacim ağırlıkları takoz ikameli örneklerden daha düşüktür. Bu durum, agrom tipi pet agregaların boşluklu yapıda olması nedeniyle daha fazla hacim kaplamasına, bunun da birim hacim ağırlığını azaltmasına neden olması olarak açıklanabilmektedir.



Şekil 7.3 Takoz ve agrom tipi pet agregaların kırma kuma ikame edildiği harçların hava kuruğu b.h.a değerleri.

7.2.3 Takoz ve Agrom Karışımlarının Eğilme Deneyi Sonuçları

Şekil 7.4'deki deney sonuçlarına göre pet agrega kullanılmamış harç örnekleri en fazla eğilme dayanımını göstermiştir. Pet agrega ikamesiyle orantılı olarak harç örneklerinin dayanımı düşmektedir. Agrom tipi pet agrega içeren karışımlar takoz pet agregalı karışımlara oranla daha yüksek dayanım göstermiştir. Takoz tipi pet agregalar boşluksuz ve daha rijit bir yapıya sahip olmalarına rağmen agrom tipi pet agregaların yüzeyi çok daha pürüzlü ve karmaşık yapıda olması eğilme dayanımındaki artışı özetlemektedir.



Şekil 7.4 Takoz ve agrom tipi pet agregaların ayrı ayrı kırma kuma ikame edilmesi sonucu eğilme dayanımları.

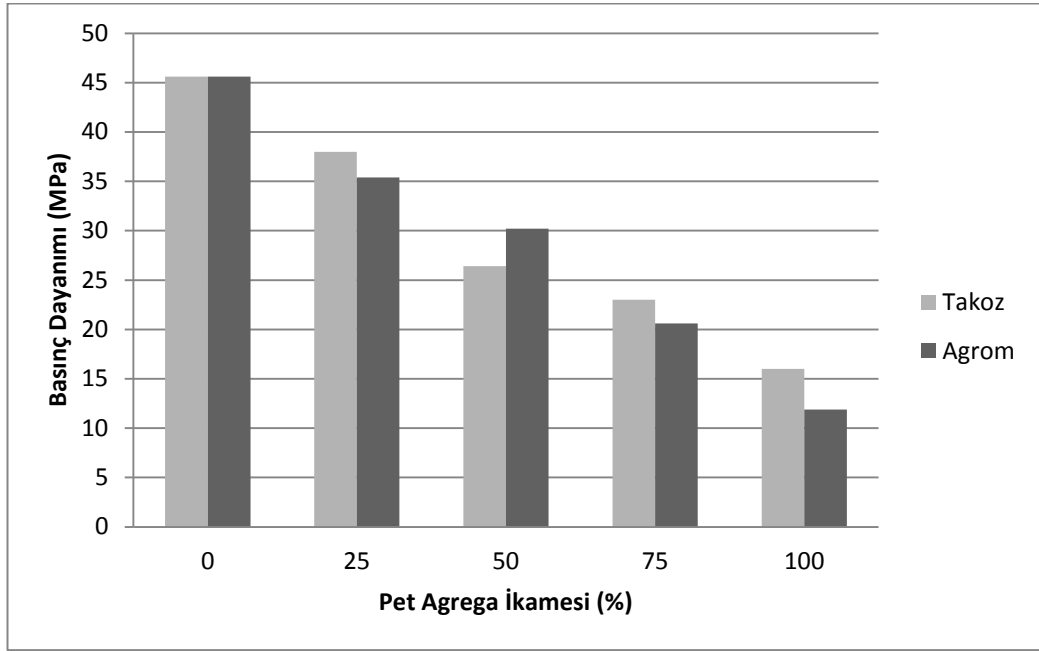
Şekil 7.5’de takoz ve agrom tipi pet agregalar kullanılarak hazırlanan karışımların kesitleri görünmektedir. Kesitlere bakıldığında kontrol örneklerinin kırılma yüzeyinin pürüzsüz olduğu, agrom tipi pet agregası kullanılan örneklerde daha pürüzlü kırılma yüzeyi olduğu, en fazla pürüzlü kırılma yüzeyinin ise, sadece takoz tipi pet agregaların kullanıldığı sertleşmiş harç örneklerinde meydana geldiği açıkça görülmektedir. Takoz tipi pet agregaların agrom tipi pet agregalara göre daha sert, kırma kumdan daha esnek yapıda olması, agreganın kırılmasını imkânsız hale getirmektedir.



Şekil 7.5 Takoz ve agrom tipi pet agregaların ayrı ayrı kırma kuma ikame edilmesi sonucu sertleşmiş harç örnek kesitleri.

7.2.4 Takoz ve Agrom Karışımlarının Basınç Deneyi Sonuçları

Takoz ve agrom tipi pet agregaların, sertleşmiş harçların basınç dayanımlarına etkisini incelemek amacıyla, 7 günlük takoz ve agrom tipi pet agrega ikameli örneklere eğilme sonrası basınç deneyi yapılarak Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Pet agrega ikame oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü yapılan deneyde ortaya çıkmıştır. %50 pet agrega ikamesinin dışındaki bütün dozajlarda, takoz tipi pet agregalı harç örneklerinin agrom tipi pet agregalı harç örneklerine göre daha fazla basınç dayanımına sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Takoz tipi pet agregaların pürüzsüz bir yüzeye sahip olması, eğilme dayanımını olumsuz yönde etkilediği gibi basınç dayanımını da olumsuz yönde etkilemiştir.



Şekil 7.6 Kırma kuma ayrı karışımlarda ikame edilen takoz ve agrom tipi pet agregalı harçların basınç dayanımı sonuçları.

7.2.5 Takoz ve Agrom Karışımlarının Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları

Pet agregalar 240 °C de eriyik haline dönüşmektedirler. Sıcaklık etkisinin pet agregalı kompozitler üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla takoz tipi pet agrega ikameli sertleşmiş harç örnekleri 7 gün su küründe bekletildikten sonra yüksek sıcaklık fırınında 10 saat süresince, 80 °C, 120 °C ve 240 °C de bekletilmiştir.

Yüksek sıcaklık fırınından çıkarılan örneklere eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri yapılmıştır.

Fırında 240 °C sıcaklığa maruz bırakılan takoz tipi pet agrega ikameli bütün örnekler Şekil 7.7’de gösterildiği gibi tamamen kömürleşmiş, içerisinde bulunan pet agregalar eriyerek boşluk oluşturmuş ve el ile ufalanacak kadar zarar görmüştür. Bu örnekler üzerinde deney yapılamamıştır.

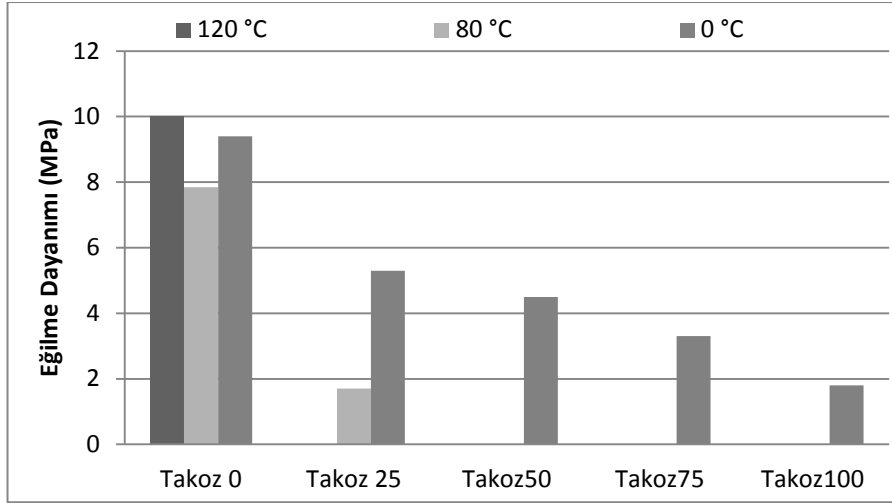


Şekil 7.7 Takoz tipi pet agreganın kırma kuma ikame edildiği sertleşmiş harcın 240 °C de 10 saat kaldıktan sonraki görüntüsü.

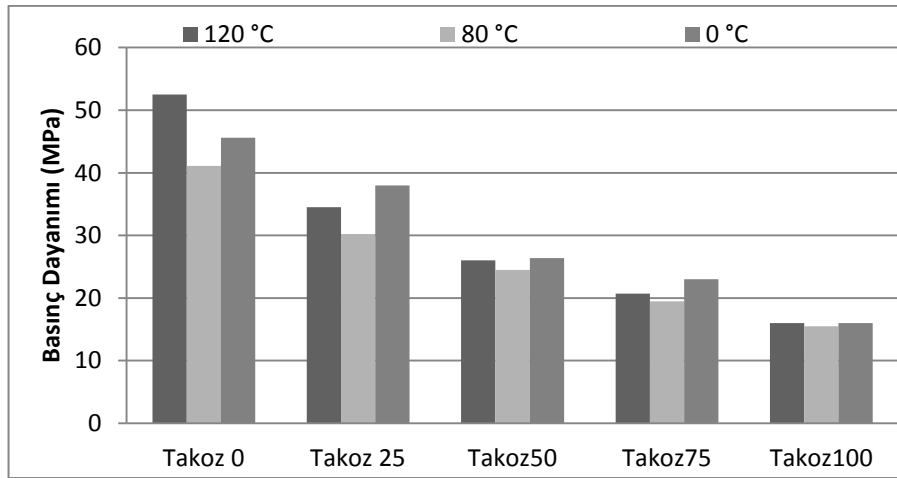
Aşağıda 80, 120 °C sıcaklığa maruz kalan ve sıcaklık görmemiş (Şekil 7.8) harç örneklerin eğilme ve eğilme sonrası basınç dayanımları gösterilmiştir.

Fırında 120 °C sıcaklığa maruz kalan örneklere eğilme ve eğilme sonrası basınç dayanımları sırasıyla Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da gösterilmiştir. Dayanımlar incelendiğinde pet agregasız kontrol karışımında dayanım kaybı olmadığı, aksine dayanımında bir miktar artış gözlenmiştir. Pet agrega ikameli örnekler elle ikiye ayrılabilirdi için eğilme dayanımı tespit edilememiştir. Basınç dayanımları, pet

agrega ikamesine bağılı olarak azalmıştır. %25 pet agrega ikameli örnekte 80 °C'de 1,7 MPa eğilme dayanımı bulunmuştur. Ancak 120 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda örnekler çok düşük yüklerde kırılmıştır. Yüksek sıcaklık fırınında kalan örneklerde harita görünümünde çatlaklar oluşmuştur. Şekil 7.10'de çatlakların üzeri kalemle çizilerek belirgin hale getirilmiştir. Pet agrega ikamesi arttıkça oluşan çatlak sayısında da artış meydana gelmiştir. Polietilen tereftalatın camı geçiş sıcaklığı olan 80 °C'de yumuşayarak genişmesi, sertleşmiş harçtaki hareketini kısıtlamaktadır. Bu durumun sonucunda sertleşmiş harçta, pet agregada meydana gelen genişmeyi engelleyemeyerek çatlak oluşmaktadır.



Şekil 7.8 Yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış takoz tipi pet agreganın kırma kuma ikame edildiği sertleşmiş harçların eğilme dayanımı sonuçları.



Şekil 7.9 Yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış takoz tipi pet agreganın kırma kuma ikame edildiği sertleşmiş harçların basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 7.10 Takoz tipi pet agreganın kırma kuma ikame edildiği sertleşmiş harcın 120 °C de 10 saat kaldıktan sonra harç örneklerinin yüzeyinde meydana gelen çatlaklar.

7.3 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi

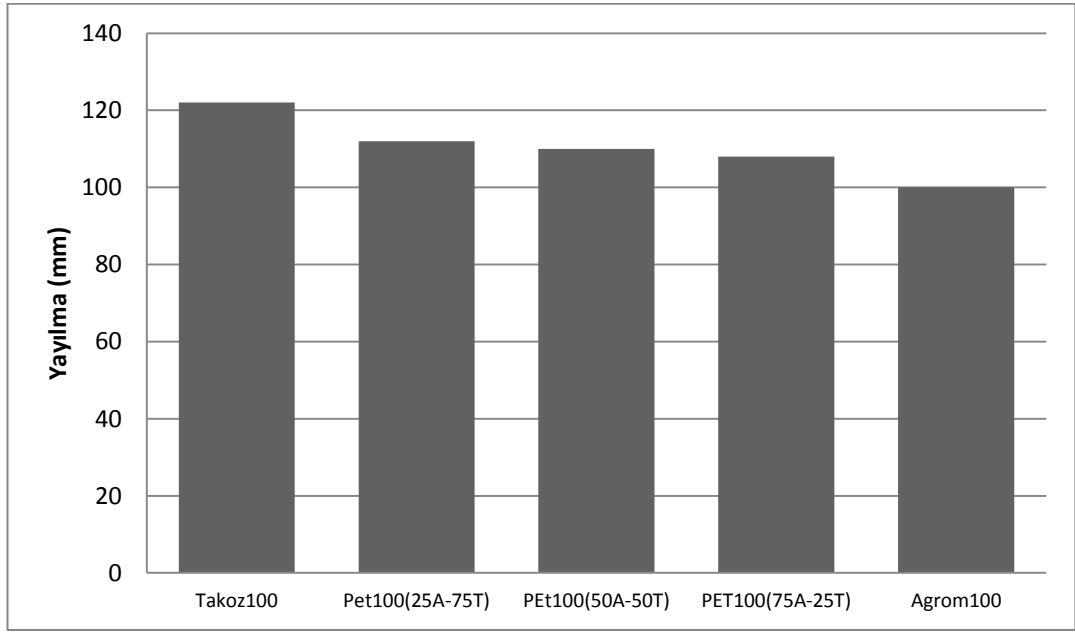
Deneysel çalışmada, her iki tip atık Pet agreganın değerlendirilmesi amacı ile takoz ve agrom tipi pet agregalar karıştırılmıştır. En uygun karışımı bulmak için kırma kum kullanılmadan, sadece Pet agregalar kullanılmıştır. Tablo 7.3'de karışımların m³ dizaynları verilmiştir. Karışımlarda kırma kum kullanılmadan, tamamen iki farklı tip Pet agreganın harç içerisindeki ikame oranları değiştirilerek hazırlanmıştır.

7.3.1 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları

Harç içerisinde tamamen takoz ve agrom tipi Pet agrega kullanılan karışımların taze hal yayılma değerleri Şekil 7.11'de gösterilmektedir. Hazırlanan karışımda, agrom tipi Pet agrega ikame oranı arttıkça işlenebilirliğin azaldığı görülmektedir.

Tablo 7.3 Hazırlanan karışımların kg/m³ miktarları (b).

Malzemeler	Pet100(25A-75T)	Pet100(50A-50T)	Pet100(75A-25T)
Çimento (CEM I 42,5 R)	511	511	511
Uçucu Kül	-	-	-
Silis Dumanı	-	-	-
Yüksek Fırın Cürufu	-	-	-
Kırma Kum	-	-	-
Pet Agregası (Takoz)	608	406	203
Pet Agregası (Agrom)	203	406	608
Pet Lif	-	-	-
Su	256	256	256
Süperakışkanlaştırıcı	-	-	-

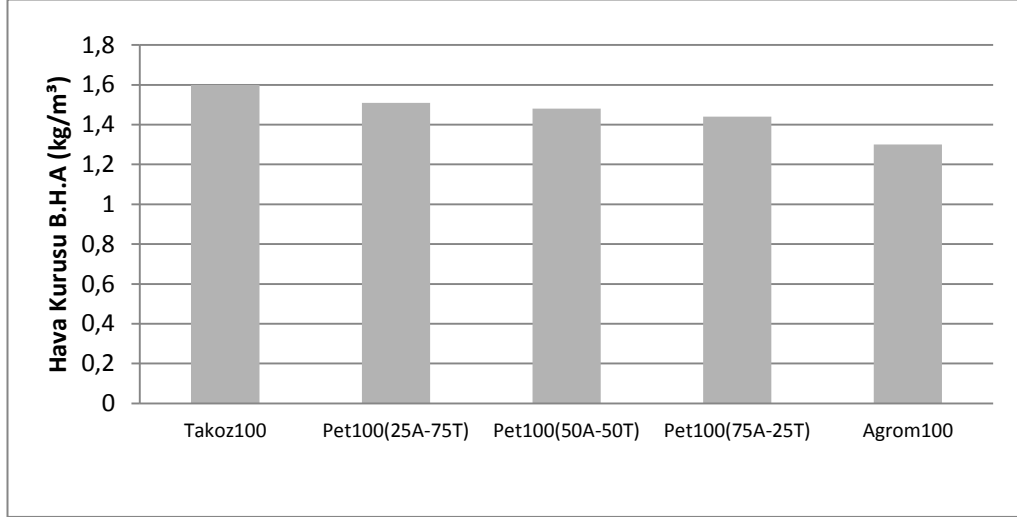


Şekil 7.11 PET agregalı harç içerisindeki takoz ve agrom tipi pet agregası oranlarının yayılma değerleri.

7.3.2 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların Hava Kuru Birim Hacim Ağırlıkları

Şekil 7.12’de, harçların hava kuru birim hacim ağırlıkları gösterilmektedir. Agrom pet agregası ikamesi arttıkça birim hacim ağırlığın azaldığı görülmektedir.

Agrom pet agreganın daha boşluklu yapıya sahip olması birim hacim ağırlığı azaltmaktadır.



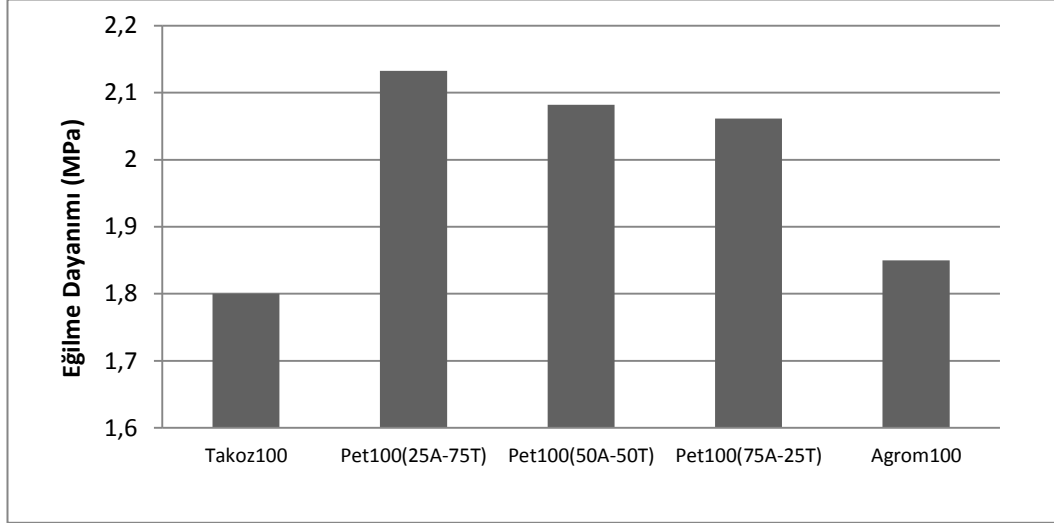
Şekil 7.12 Sadece pet agregaların kullanıldığı harç karışımlarında agrom ve takozun karıştırılma sonrası hava kuru birim hacim ağırlık değerleri.

7.3.3 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların Eğilme Deneyi Sonuçları

Deneysel çalışmanın amacı doğrultusunda %100 takoz tipi pet agreganın olduğu karışıma %25, %50 ve %75 agrom tipi pet agrega ikame edilerek 7 günlük eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır. Eğilme dayanımlarının sonuçları Şekil 7.13’de gösterilmektedir.

Şekil 7.14 incelendiğinde, %100 takoz tipi pet agrega kullanılan harç örneğinde %25 oranında agrom pet agregası ikame edildiğinde dayanımda artış olduğu ve agrom pet agreganın ikame oranı arttıkça bu değer azaldığı görülmektedir. Bu durum; agrom tipi pet agreganın matrisle aderansının yüksek olduğu, ancak boşluklu ve zayıf yapısı nedeniyle takoz tipi pet agreganın mukavemetinden daha az dayanıma sahip olduğu, aynı zamanda agrom dozajının yüksek olması işlenebilirliği azaltmasının sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Eğilme dayanımı sonrası örnek kesitleri Şekil 7.14’de gösterilmiştir. Sonuçlar göz önünde bulundurularak bu deneyden sonra

hazırlanan bütün karışımlarda pet agrega miktarının içerisinde %75 takoz, %25 agrom kullanılmıştır.



Şekil 7.13 Takoz ve agrom tipi pet agregaların belirli oranda karıştırılması ve kırma kuma ikame edilmesi sonucu eğilme dayanımları.

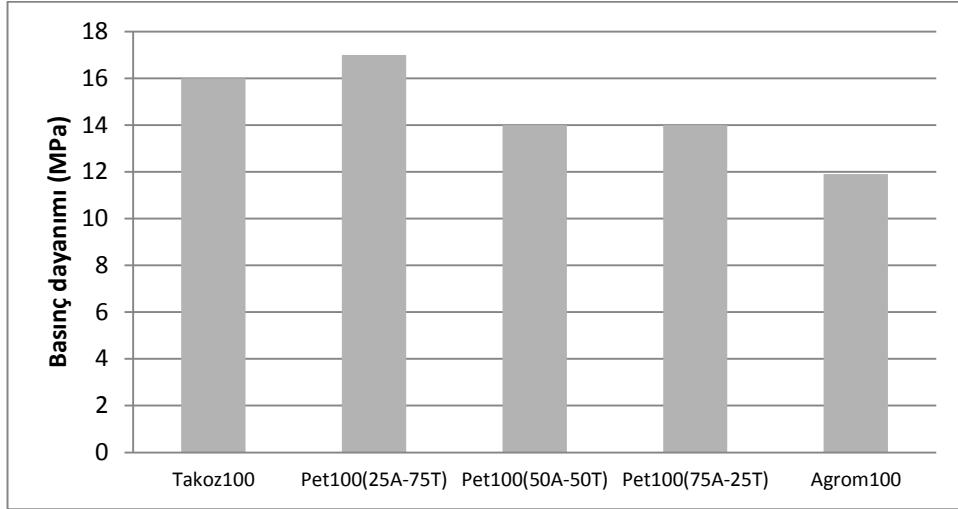


Şekil 7.14 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi sonucu sertleşmiş harç örnek kesitleri.

7.3.4 Aynı Karışımda Kullanılan Takoz ve Agrom PET Agregalı Harçların Basınç Deneyi Sonuçları

Deneysel çalışmanın amacı doğrultusunda %100 takoz tipi pet agreganın olduğu karışıma %25, %50 ve %75 agrom tipi pet agrega ikame edilerek 7 günlük eğilme sonrası basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Basınç dayanımlarının sonuçları Şekil 7.15'de gösterilmektedir. Takoz tipi pet agregaya hacimce %25 oranında agrom tipi

pet agregaya ikame edildiğinde eğilme dayanımına benzer şekilde basınç dayanımında da artış görülmektedir. Deneylerin ilerleyen aşamalarında pet agregaya olarak %75 takoz, %25 agrom tipi pet agregaya kullanılmıştır.



Şekil 7.15 Takoz ve agrom tipi pet agregaların farklı dozajlarda karıştırılması sonucu basınç dayanımları.

7.4 Takoz, Agrom PET Agregaya ve PET Lif Eklenen Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçları

Yapılan deney sonuçlarında en uygun takoz ve agrom tipi pet agregaya oranı belirlendikten sonra yapılacak bütün deneylerde takoz ve agrom tipi pet agregalar sırayla ağırlıkça %75 ve %25 oranında karıştırılmış ve kırma kuma bu şekilde ikame edilmiştir. Daha sonra hazırlanan karışımlara hacimce %2 pet lif eklenerek deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Tablo 7.4’de bu karışımların m³ dizaynları verilmiştir.

7.4.1 Takoz, Agrom PET Agregaya ve PET Lif Eklenen Harçların İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları

Karıştırılmış atık pet agregaların taze harcın işlenebilirliğine olan etkisi Şekil 7.16’da gösterilmiştir. Deneyin amacına uygun şekilde serilerde harç içerisine %2 pet lif eklenerek işlenebilirliği araştırılmıştır. İçerisinde kırma kum bulunan harç içerisine hacimce %2 pet lif dozajı sabit tutularak %75 takoz ve %25 agrom tipi pet

agrega karışımı kırma kuma %0, 50, 100 oranında ikame edilmiştir. Hacimce %50 atık pet agrega ikamesinde taze harç örneğinin yayılmasında artış gözlemlenmiştir. Ancak hacimce %100 pet agrega ikamesinde işlenebilirlik düşmüştür. Taze haldeki karışımda lifler işlenebilirliği çok düşürdüğü ve harcın kalıba yerleştirilmesini imkânsızlaştırdığı için 15 kg/m³ oranında yüksek kabul edilebilecek miktarda akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmıştır.

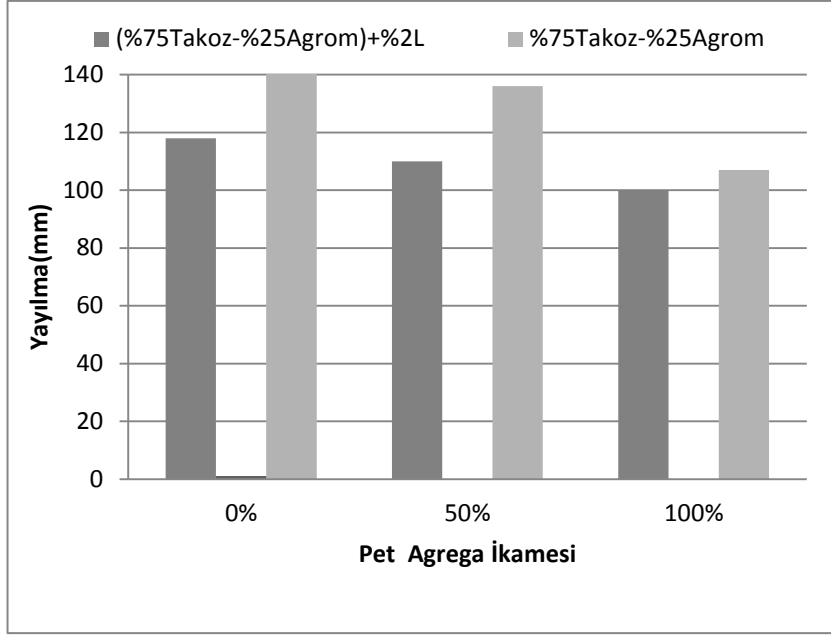
Şekil 7.16’da bu serideki yayılma deneyi sonucu yayılma değerleri gösterilmiş ve lifsiz karışımla karşılaştırılmıştır. Harç örneklere lif ikamesinin işlenebilirliği düşürdüğü görülmektedir. Sadece %100 pet agrega ve %2 pet lif bulunan örnek yayılma deneyinde yayılmamıştır.

7.4.2 Takoz, Agrom PET Agrega ve PET Lif Eklenen Harçların Hava Kuru Birim Hacim Ağırlıkları

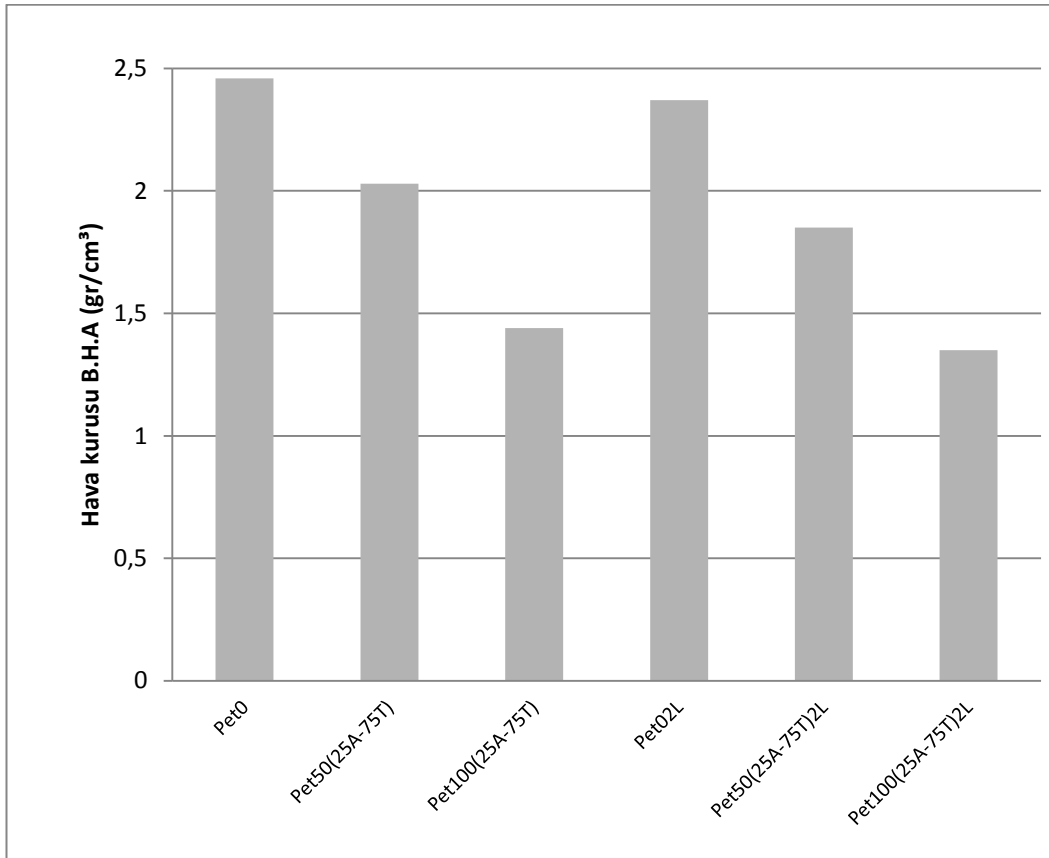
Şekil 7.17’de lif içeren ve içermeyen karışımların hava kuru birim hacim ağırlıkları gösterilmiştir. Lif içeren sertleşmiş harçların birim hacim ağırlıkları lif içermeyen karışımlardan daha az olduğu görülmektedir. Harç içerisine eklenen liflerin boşluklu bir yapı oluşturduğu ve birim hacim ağırlığı azalttığı yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır.

Tablo 7.4 Hazırlanan karışımların kg/m³ miktarları (c).

Malzemeler	Kontrol	Pet50(75A-25T)	Pet100(25A-75T)	Pet02L	Pet50(25A-75T)2L	Pet100(50A-50T)2L
Çimento (CEM I 42,5 R)	511	511	511	505	505	505
Kırma Kum	1536	763	-	1518	759	-
Pet Agrega (Takoz)	-	300	203	-	300	401
Pet Agrega (Agrom)	-	100	608	-	100	401
Pet Lif	-	-	-	16	16	16
Su	256	256	256	253	253	253
Süperakışkanlaştırıcı	-	-	-	15	15	15



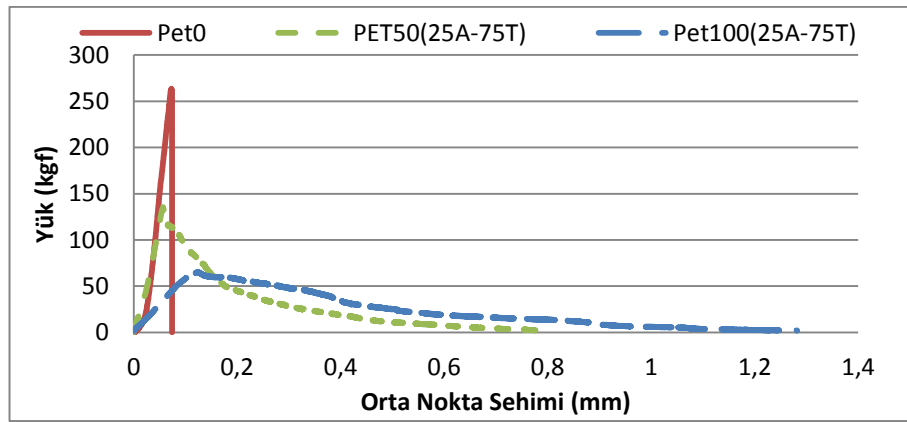
Şekil 7.16 Takoz ve agrom karışımı pet agregaların kırma kuma ikame edilmesi ve pet lifin eklenmesi sonucu yayılma değerleri.



Şekil 7.17 Pet agregası ikameli harç karışımlarına lif eklenmesi sonucu hava kuru birim hacim ağırlık değerleri.

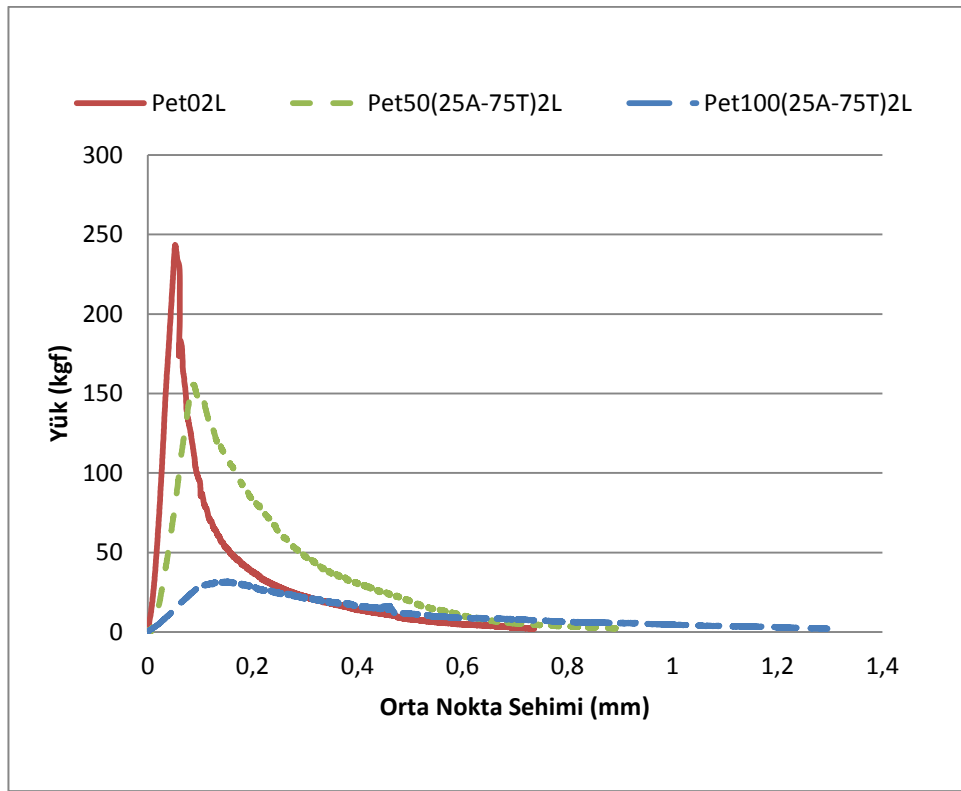
7.4.3 Takoz, Agrom PET Agregaları ve PET Lif Eklenen Harçların Eğilme Deneyi Sonuçları

Takoz ve agrom tipi pet agregaların harç içerisindeki uygulanabilir dozajları belirlendikten sonra kırma kum yerine, içerisinde %75 takoz ve %25 agrom pet karıştırılmış agregaları %0, 50 ve 100 oranında ikame edilmiştir. 7 günlük örneklerin deplasman kontrollü eğilme cihazında yük-sehim eğrileri çıkartılarak eğilme dayanımları ve tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 7.18’de karışımların yük-sehim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 7.18’de gösterilen yük-sehim eğrilerinde kontrol karışımı en fazla kırılma yüküne sahipken pet agregalı örneklerde alışılmadık dışında yük-sehim davranışı görülmektedir. Pet agregalı örnekler, karışım içerisinde hiçbir lif olmamasına rağmen, yük etkisi altında lif içeren kompozitlere benzeyen sehim davranışı sergilemektedirler. Takoz tipi pet agregalarda kırılma söz konusu değildir. Çatlak, esnek bir yapıya sahip olan pet agregaları kırılmayarak etrafından dolaşır. Yük etkisi altındayken kontrol örneği çatlak oluşumundan sonra sert bir şekilde kırılarak yük taşıyamaz duruma gelir. Pet agregalar ise, esneyerek çatlakların kendi etrafından geçmesini sağlar ve tamamen kırılana kadar da yük taşımaya devam etmektedir. Yukarıdaki şekilde, %50 pet agregası içeren harç örneklerinde kırılma yükü ikame oranı kadar düşmektedir. %100 pet agregası içeren karışımda 0,2 mm sehimde çatlak oluşmuş fakat 1,2 mm’ye kadar yük taşımaya devam etmiştir. Bu örneklerin eğilme dayanımları ve toklukları lifli örneklerle karşılaştırmalı olarak sonraki sayfalarda gösterilecektir.



Şekil 7.18 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi sonucu 7 günlük sertleşmiş harç örneklerinin yük-sehim grafikleri.

Daha sonra harç karışımları %2 pet lifle güçlendirilmiş ve eğilme deneyi ile yük-sehim davranışı Şekil 7.19’da incelenmiştir. Kontrol karışımı da dâhil olmak üzere bu serinin bütün karışımlarına %2 lif eklenmiştir. Lif eklenmesi, örneklerin karıştırma ve sıkıştırabilirliğini zorlaştırması neticesinde Pet02L ve Pet100(25A-75T)2L serilerinin eğilme dayanımını bir miktar düşürmüş olsa da tokluğunu arttırmıştır. %100 pet agregalı örneklerde %2 lif eklenmesi taze haldeyken yerleştirme ve sıkıştırmayı imkânsız hale getirmektedir. Şekil 7.20’de bu durum açıkça görülmektedir.

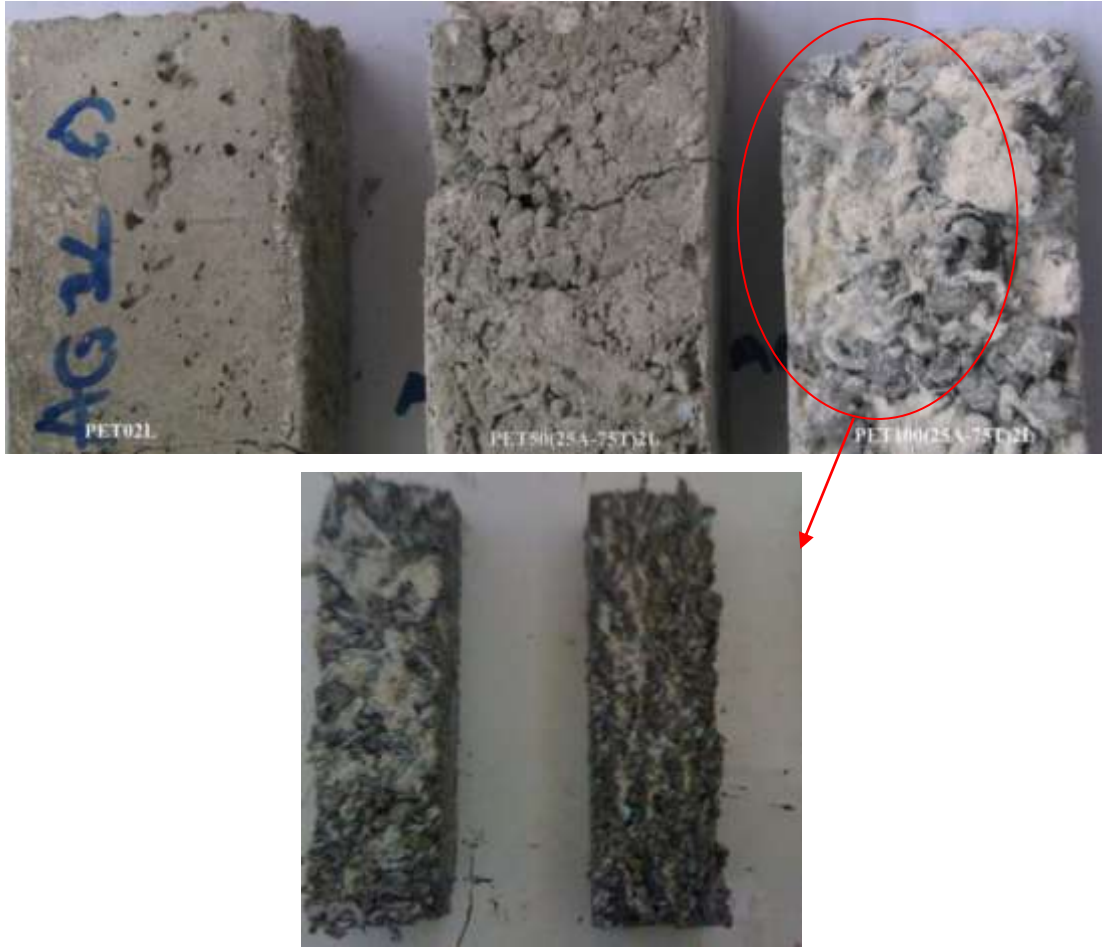


Şekil 7.19 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi ve pet lif eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin yük-sehim grafikleri.

Lifli ve liffsiz karışımların 7 gün sonunda eğilme dayanımları ve tokluk değerleri Tablo 7.5’de verilmektedir. Yapılan karşılaştırmada lifli ve lif içermeyen serilerde %50 pet agrega ikameli örnekler en fazla tokluk değerine sahiptir. %50 pet agrega ikameli örneklere lif eklenmesi eğilme dayanımını da arttırmaktadır. Harç örneklerinde tokluk, liffsiz kontrol harçlarına göre, %50 pet agrega ikameli ve lifli örnekte beş kat artmıştır.

Tablo 7.5 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi ve lif eklenmesi sonucu 7 günlük sertleşmiş harç örneklerinin eğilme dayanımları ve tokluk değerleri.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Tokluk (N.mm)
Pet02L	2	7,2	251,7
Pet50(25A-75T)2L	2	4,7	341,5
Pet100(25A-75T)2L	2	1,3	149,1
Pet0	0	7,9	72,1
Pet50(25A-75T)	0	4,0	235,1
Pet100(25A-75T)	0	2,13	292,3

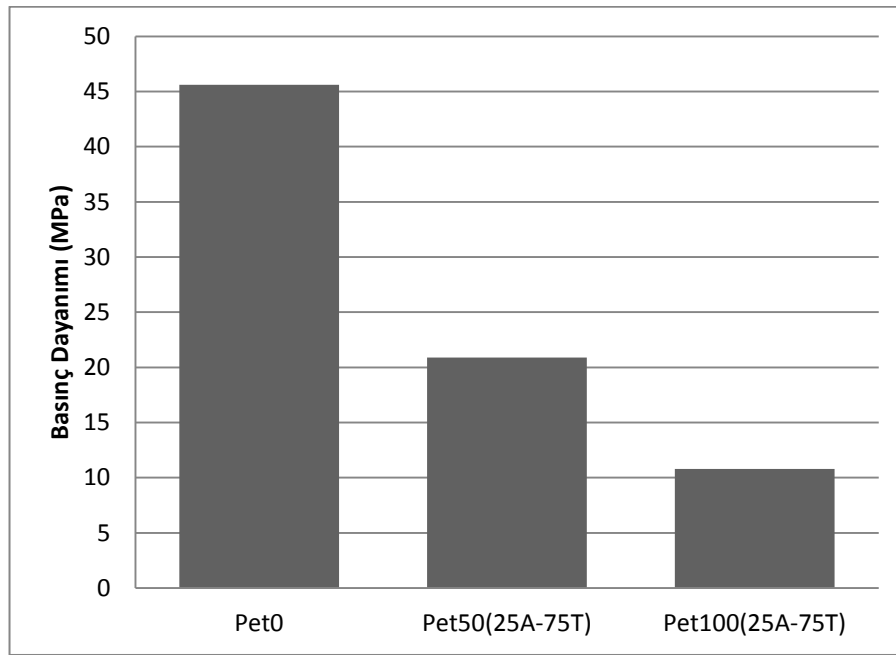


Şekil 7.20 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi ve lif eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örnek kesitleri.

7.4.4 Takoz, Agrom PET Agregaları ve PET Lif Eklenen Harçların Basınç Deneyi Sonuçları

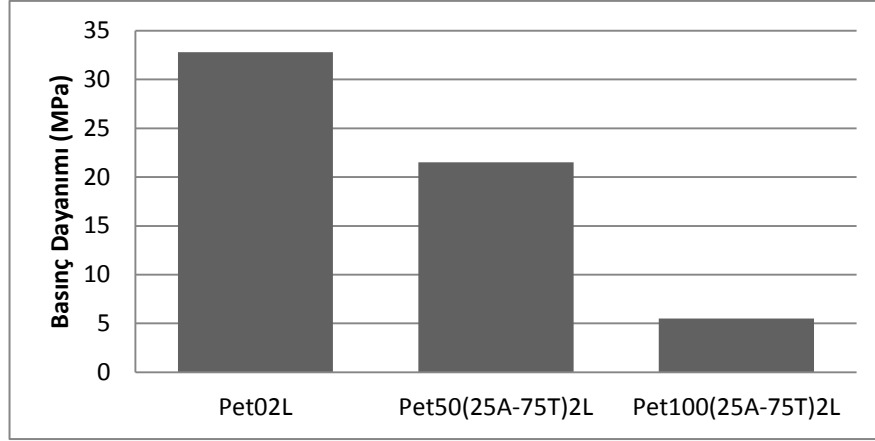
Takoz ve agrom tipi pet agregaların harç içerisindeki uygulanabilir dozajları belirlendikten sonra kırma kum yerine, içerisinde %75 takoz ve %25 agrom pet karıştırılmış agregaları %0, 50 ve 100 oranında ikame edilerek eğilme sonrası basınç dayanımları karşılaştırılmıştır.

Şekil 7.21'e bakıldığında, pet agregası ikame oranı arttıkça basınç dayanımının ikame oranı kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Bu karışımların basınç dayanımlarının sayısal değerleri ve kontrol örneğine göre basınç dayanımlarındaki değişim oranları lifli örneklerle karşılaştırılmıştır (Bkz. Tablo 7.5).



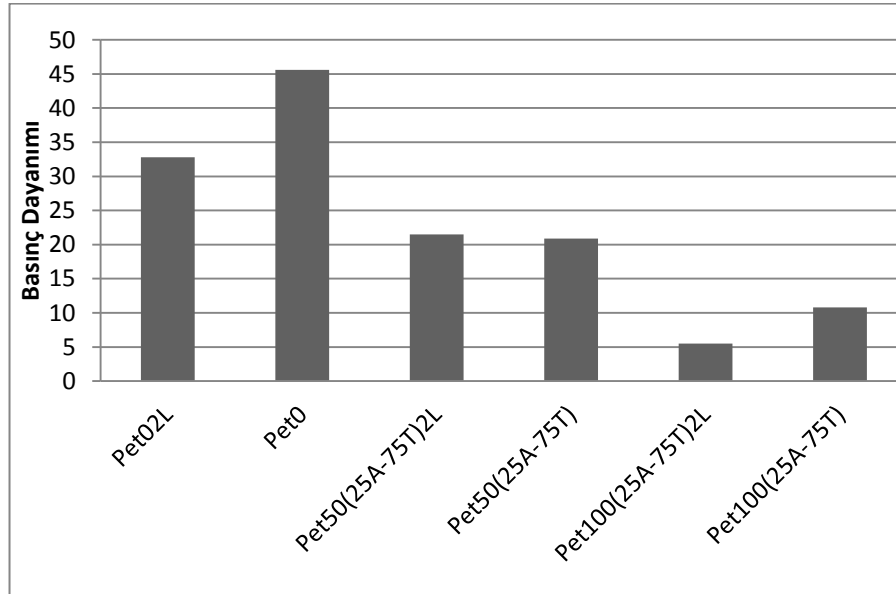
Şekil 7.21 Takoz ve agrom tipi pet agregaların belirli oranda karıştırılarak kuma ikame edilmesi sonucu basınç dayanımları.

Deneyde harç karışımları %2 pet lifle güçlendirilmiş ve eğilme sonrası basınç dayanımları Şekil 7.22'de incelenmiştir. Kontrol karışımı da dâhil olmak üzere bu serinin bütün karışımlarına %2 lif eklenmiştir. %100 pet agregası ikame oranında %2 lif eklenmesi işlenebilirliği olumsuz şekilde etkilediği için basınç dayanımını da oldukça düşürmüştür.



Şekil 7.22 Takoz ve agrom tipi pet agregaların belirli oranda karıştırılıp kuma ikame edilerek pet lif eklenmesi sonucu basınç dayanımları.

Şekil 7.23’de aynı pet agrega ve kırma kum içeren pet lifli ve pet lifsiz sertleşmiş harçların basınç dayanımları değerleri verilmektedir. %50 pet agregalı örnekler dışında, pet lifler basınç dayanımlarını azaltmıştır.



Şekil 7.23 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımı harçlara lif eklenmesi sonucu basınç dayanımları.

Tablo 7.6’da aynı agrega ikame oranında lifli ve lifsiz örneklerin kontrol karışımlarına göre basınç dayanımları ve basınç dayanımlarındaki azalma değerleri verilmiştir. Kontrol karışımına %2 oranında lif katılması basınç dayanımını %28,1 azaltırken %50 pet agrega ikameli karışımlara lif katılması dayanımını olumsuz

yönde etkilememiştir. %100 pet agregaya ikameli örnekler lif katılması işlenebilirliği imkânsızlaştırdığı için basınç dayanımını da %51 azaltmıştır.

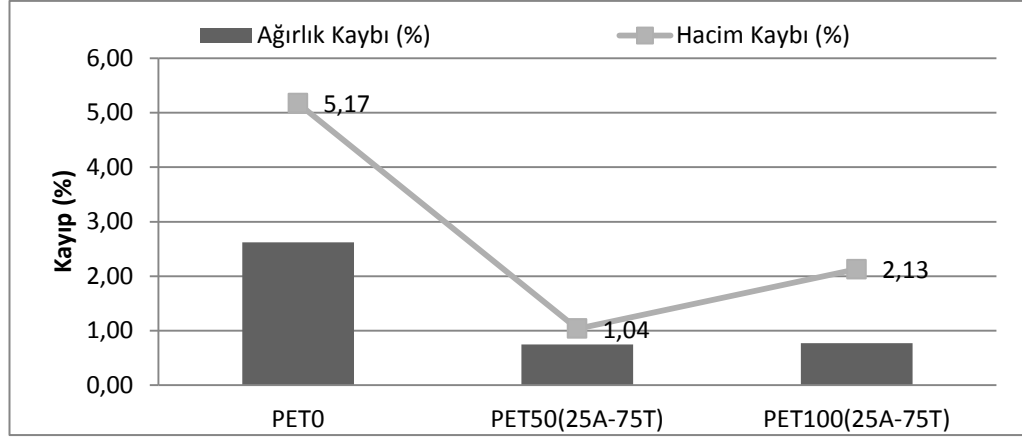
Tablo 7.6 Karıştırılmış agrom ve takoz tipi pet agregaların kuma ikame edilerek pet lif eklenmesinin harç örneklerinin basınç dayanımları.

Deney Elemanları	Lif Dozajı(%)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımında Değişim (%)
Pet02L	2	32,8	-28,1
Pet50(25A-75T)2L	2	21,5	+3
Pet100(25A-75T)2L	2	5,5	-51
Pet0	0	45,6	100
Pet50(25A-75T)	0	20,9	100
Pet100(25A-75T)	0	10,8	100

7.4.5 Takoz ve Agrom PET Agregaya İkameli Harçların Aşınma Deneyi Sonuçları

Pet agregaların aşınma dayanımını incelemek amacıyla, hacimce %0, %50, %100 oranında kırma kuma pet agregaya ikamesiyle elde edilen yedi günlük örnekler ‘Dory’ aleti ile yüzeysel aşınma deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyde ağırlık ve hacim kayıpları hesaplanarak, örneklerin aşınma dirençleri ölçülmüştür.

Şekil 7.24’de deney sonuçları gösterilmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, aşınma sonrası kontrol örnekleri ortalama ağırlıklarının yüzde %2,6’sını kaybederken hacimlerinin %5,2’sini kaybetmişlerdir. %50 pet ikameli örnekler hacimce %1’ünü kaybederek en fazla aşınma direncini göstermiştir. Pet agreganın su tutmaması su/çimento oranını etkilediği düşünülerek pet agregaya ikamesinin arttıkça daha zayıf bir matris oluştuğu, bu yüzden aşınma dayanımının olumsuz etkilendiği düşünülmektedir.



Şekil 7.24 Takoz ve agrom pet agrega karışımı örneklerin kırma kuma ikame yapılmamasıyla 7 günlük dory yüzeysel aşınma değerleri.

7.5 Takoz ve Agrom PET Agregası İkameli, Farklı Su/Çimento Oranında Hazırlanmış Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçları

Deneyel çalışmada hazırlanan karışımların tamamında su/çimento oranı 0,5 olarak hazırlanmıştır. Çalışmanın bu aşamasında, %75 takoz ve %25 agrom karışımı pet agregaların 0,3 su/çimento oranında karıştırılarak taze ve sertleşmiş hal deney sonuçları incelenmektedir. Hazırlanan karışımların m³ dizaynları Tablo 7.7'de verilmektedir. Karışımda hacimce %0 ve %50 pet agrega ikamesi kullanılmıştır.

Tablo 7.7 Deneylerde hazırlanan karışımların kg/m³ miktarları (d).

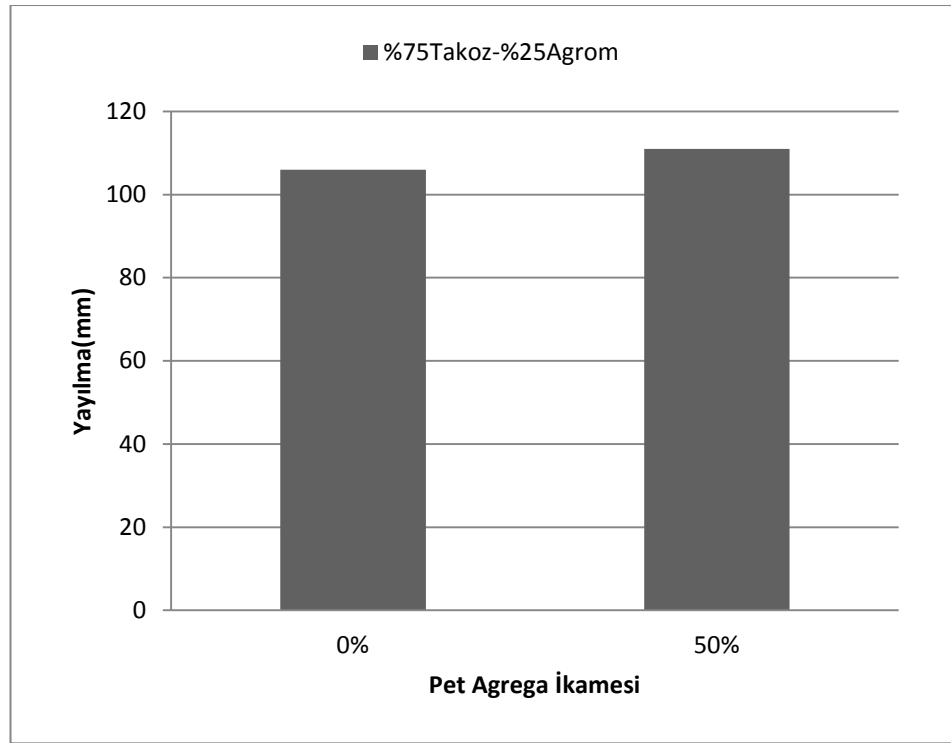
Malzemeler	Pet0(25A-75T)*	Pet50(25A-75T)*
Çimento (CEM I 42,5 R)	511	511
Kırma Kum	1536	763
Pet Agregası (Takoz)	-	300
Pet Agregası (Agrom)	-	100
Su	153	153
Süperakışkanlaştırıcı	20	20

7.5.1 Takoz ve Agrom PET Agregası İkameli, Farklı Su/Çimento Oranında Hazırlanmış Harçların İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları

Atık pet agregaların su emme oranının sıfır olması nedeniyle S/Ç oranı 0,3 olan karışım hazırlanarak yayılma çapları incelenmiştir. Karışım hazırlanırken

işlenebilirliğin çok düşmesi yüksek oranda akışkanlaştırıcı katkı ilavesi gerektirdiği için 20 kg/m^3 katkı eklenmiştir. Şekil 7.25’de harç içerisindeki pet agrega hacminin %75’i takoz, %25’i agrom olan karışımın deney sonucu yayılma çapları karşılaştırılmıştır. Karışımda kırma kuma yerine hacimce %50 pet agrega ikame edildiğinde işlenebilirlikte artış olmuştur.

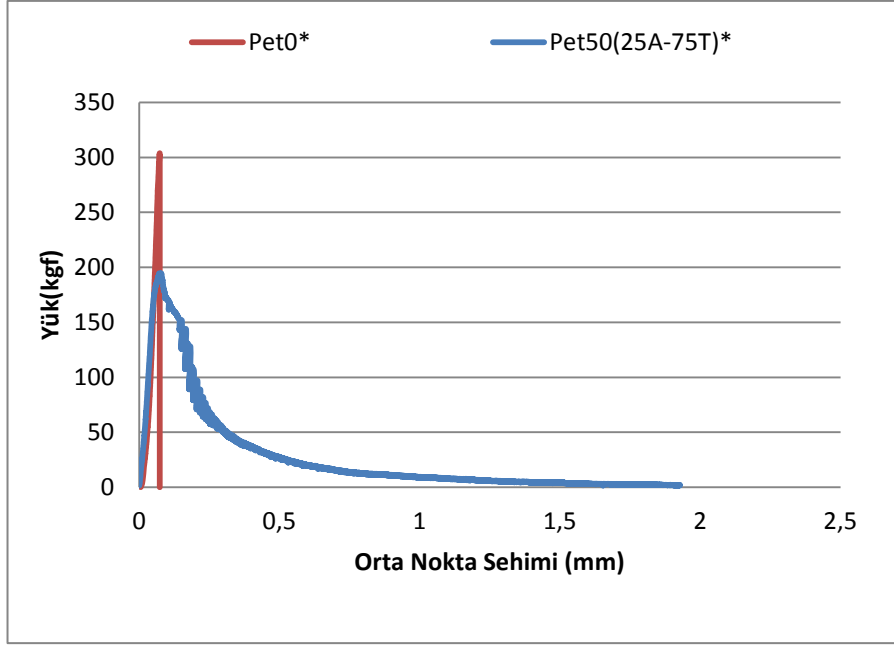
Ancak %50 pet agrega ikamesinde ölçülen yayılma çapı, S/Ç oranı 0,5 olan aynı dozajda pet agrega bulunan karışımla karşılaştırıldığında daha düşük yayılma göstermektedir.



Şekil 7.25 0,3 su/çimento oranındaki takoz ve agrom karışımını harcın kırma kuma ikame edilmesiyle işlenebilirlik değerleri

7.5.2 Takoz ve Agrom PET Agregası İkameli, Farklı Su/Çimento Oranında Hazırlanmış Harçların Eğilme Deneyi Sonuçları

Şekil 7.26’da %0 ve %50 pet agrega ikame oranlarında, sadece su/çimento oranı 0,3 olacak şekilde yeni karışımlar hazırlanarak üç noktalı eğilme deneyinde 7 günlük yük-sehim eğrileri çıkarılmıştır. Şekil 7.27’de yük-sehim grafikleri verilmiştir.



Şekil 7.26 0,3 su/çimento oranında, takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin yük-sehim grafikleri.

Tablo 7.8’de ise aynı dozajlarda kullanılan kırma kum ve pet agreganın farklı su/çimento oranlarındaki serilerin eğilme dayanımları ve toklukları karşılaştırılmıştır. Tablo 7.8 incelendiğinde, su/çimento oranının düşmesi hem kontrol karışımında hem de %50 pet agrega ikameli karışımında eğilme dayanımı ve tokluğunu arttırmıştır. Su/çimento oranının 0,3’e düşürülmesi %50 pet agrega ikameli örneğin tokluğunu, aynı pet agrega ikameli 0,5 su/çimento oranına sahip örneğe göre 2 kat arttırdığı, aynı zamanda kontrol serilerinin tokluğuna oranla 7 kat arttığı görülmektedir.

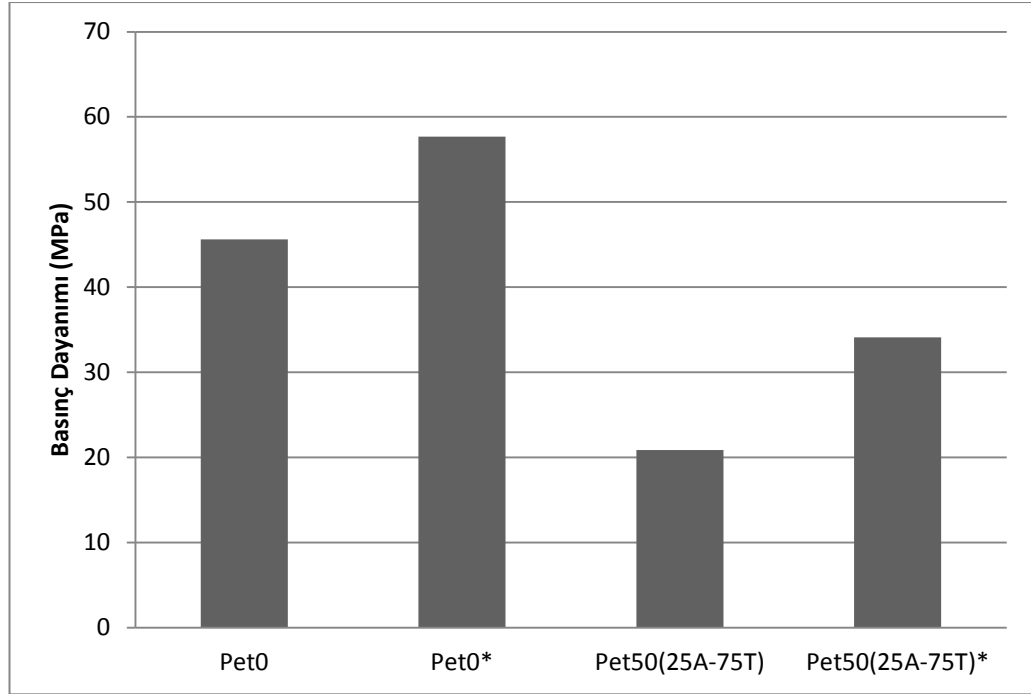
Tablo 7.8 Farklı su/çimento oranında, takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi sonucu 7 günlük örneklerden elde edilen eğilme dayanımı ve toklukları.

Deney Elemanları	Lif Dozajı(%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Tokluk(N.mm)
Pet0	0	7,9	72,1
Pet50(25A-75T)	0	3,96	235,1
Pet0*	0	9,3	78,4
Pet50(25A-75T)*	0	5,9	553,7

*Su/çimento oranı 0,3 olan karışım.

7.5.3 Takoz ve Agrom PET Agregası İkameli, Farklı Su/Çimento Oranında Hazırlanmış Harçların Basınç Deneyi Sonuçları

%0 ve %50 pet agregası ikame oranlarında, sadece su/çimento oranı 0,3 olacak şekilde yeni karışımlar hazırlanarak 7 günlük eğilme sonrası basınç deneyi yapılmıştır. Şekil 7.27'de agregası ikame oranlı aynı, farklı su/çimento oranına sahip numunelerin basınç dayanımları gösterilmiştir. Basınç deneyi sonuçları karşılaştırıldığında su/çimento oranının düşmesi basınç dayanımlarında artış sağlamıştır.



Şekil 7.27 Aynı karışıma sahip farklı su/çimento oranındaki örneklerin basınç değerlerinin karşılaştırılması.

7.6 Takoz ve Agrom PET Agregası İkameli Karışımda Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi

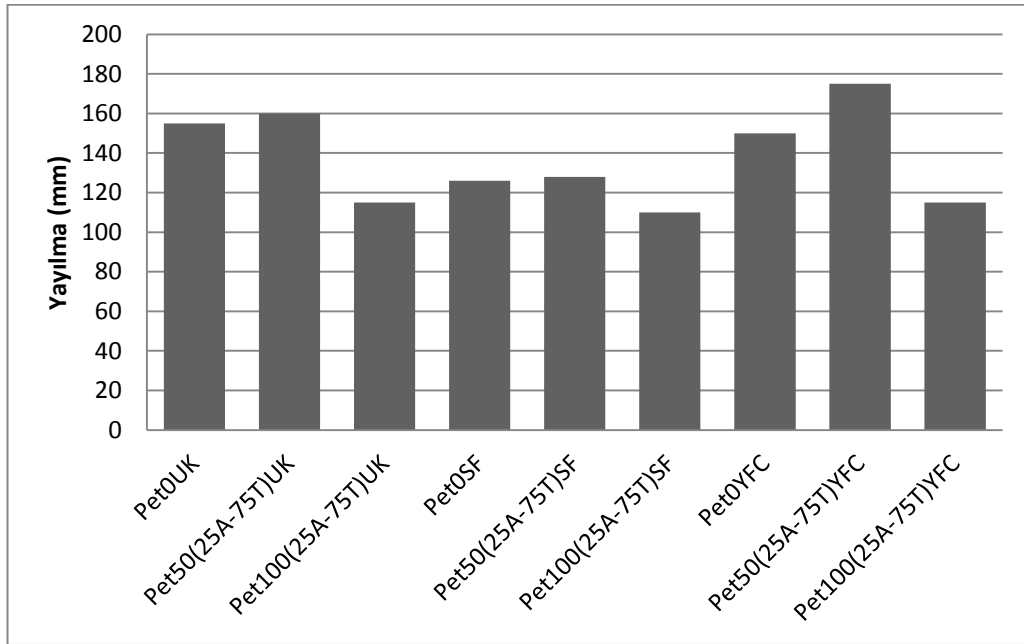
Yapılan deney kapsamında belirlenen PET agregası ve kırma kum karışımında çimento yerine ağırlıkça %10 silis dumanı, %50 yüksek fırın cürufu ve %50 uçucu kül ikamesi yapılarak dayanım ve işlenebilirlik özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan karışımların m^3 dizaynları Tablo 7.9'de gösterilmiştir.

Tablo 7.9 Hazırlanan karışımların kg/m³ miktarları (e).

Malzemeler	Pet0SF	Pet50(25A-75T)SF	Pet100(50A-50T)SF	Pet0YFC	Pet50(25A-75T)YFC	Pet100(50A-50T)YFC	Pet0UK	Pet50(25Y-75S)UK	Pet100(50Y-50S)UK
Çimento (CEM I 42,5 R)	457	457	457	254	254	254	254	254	254
Uçucu Kül	-	-	-	-	-	-	254	254	254
Silis Dumanı	51	51	51	-	-	-	-	-	-
Yüksek Fırın Cürufu	-	-	-	254	254	254	-	-	-
Kırma Kum	1527	764	-	1527	764	-	1527	764	-
Pet Agregası (Takoz)	-	302	403	-	302	403	-	302	403
Pet Agregası (Agrom)	-	101	403	-	101	403	-	101	403
Pet Lif	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Su	254	254	254	254	254	254	254	254	254
Süperakışkanlaştırıcı	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Toplam	2294	1934	1573	2294	1934	1573	2294	1934	1573

7.6.1 Takoz ve Agrom PET Agregası İkameli Karışımda Çimento Yerine Puzolan İkamelinin Taze Hal Deney Sonuçları

Yapılan çalışmada uygun puzolan çeşidini belirlemek amacıyla %10 silis dumanı, %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu çimento yerine ikame yapılarak harç örnekleri hazırlanmış ve taze hal işlenebilirliklerini incelemek amacıyla yayılma deneyi yapılmıştır. Yayılma deneyi sonuçları Şekil 7.28’de gösterilmiştir. Puzolan ikamesi işlenebilirliği bir miktar düşürdüğü için 5 kg/m^3 oranında akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmıştır. Puzolan ikameli örneklerde silis dumanı işlenebilirliği olumsuz yönde etkilerken en iyi işlenebilirliği yüksek fırın cürufu ikameli örnekler göstermiştir. En fazla yayılma çapını, kırma kumlu kontrol karışımı yerine %50 pet agregası ikameli örnekler göstermiştir.

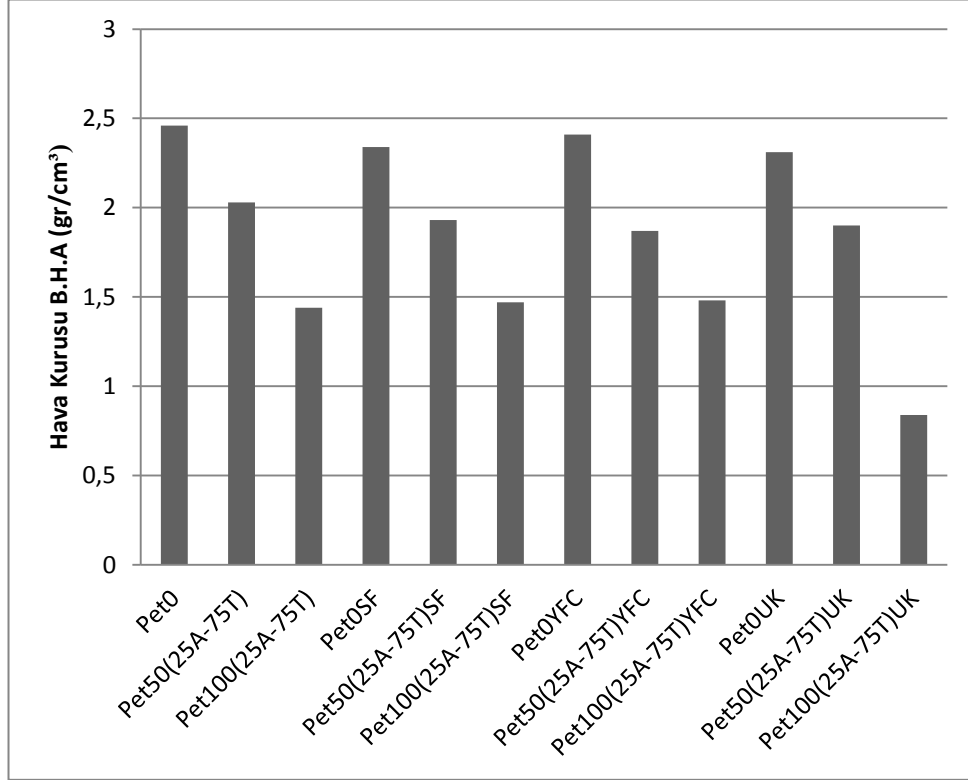


Şekil 7.28 Takoz ve agrom karışımı pet agregalarının kırma kuma ikame edilmesi ve çimento yerine farklı puzolan eklenmesi sonucu yayılma değerleri.

7.6.2 Takoz ve Agrom PET Agregası İkameli Karışımda Çimento Yerine Puzolan İkamelinin Hava Kuru Birim Hacim Ağırlıkları

Şekil 7.29’da silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikameli karışımların hava kuru b.h.a’ları gösterilmiştir. Puzolan ikamesinin birim hacim ağırlıkları

düşürdüğü ancak puzolansız harçlara göre çok fazla bir değişim olmadığı gözlenmiştir.



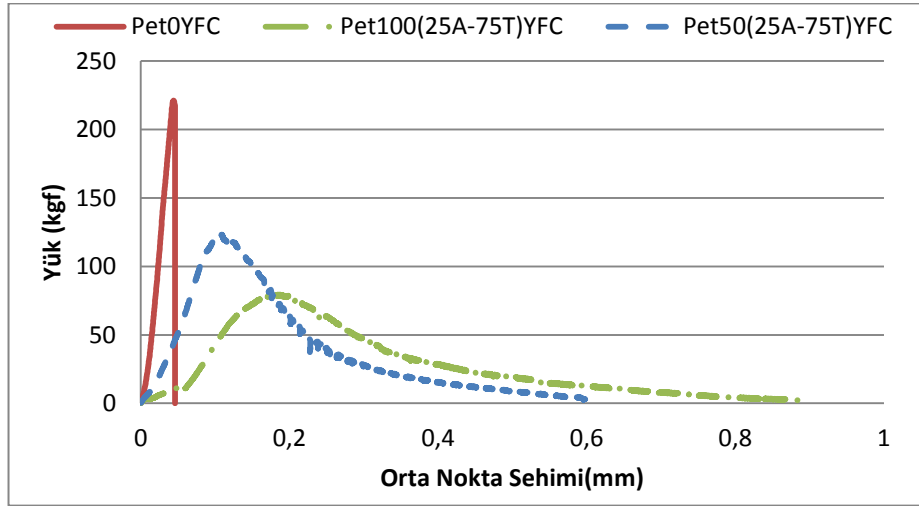
Şekil 7.29 Pet agrega ikameli harç karışımlarına puzolan ikamesinin hava kuruğu birim hacim ağırlık değerleri.

7.6.3 Takoz ve Agrom PET Agrega ikameli Karışımda Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Eğilme Deneyi Sonuçları

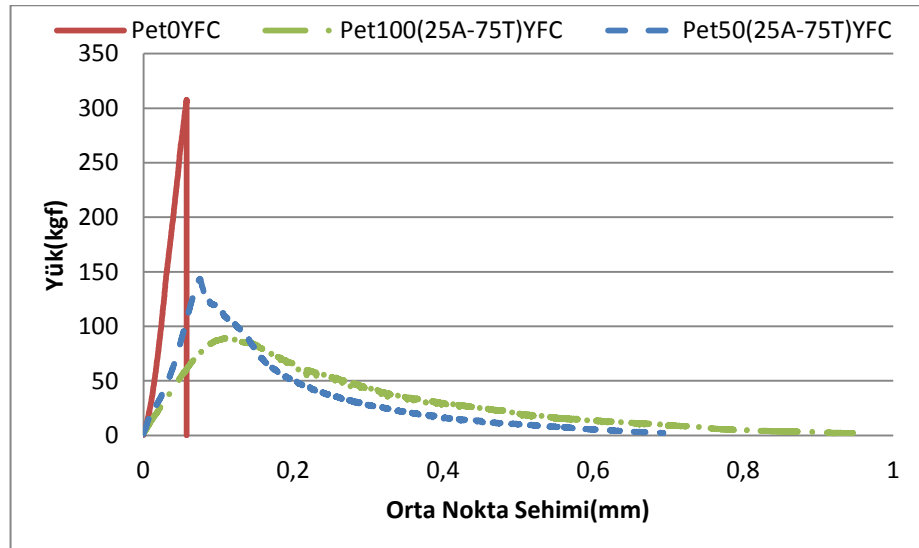
Daha önce yapılan deneylerde belirlenen karışımda çimento yerine yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül ikame edilerek 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri incelenmiştir.

Puzolan ikameli örneklerin 7, 28 ve 56 günlük yük-sehim grafikleri birlikte verilecektir. Şekil 7.30, Şekil 7.31 ve Şekil 7.32'de yüksek fırın cürufu örneklerin 3 noktalı eğilme deneyi sonrası yük-sehim grafikleri gösterilmektedir. Yüksek fırın cürufu ikameli örneklerin 7, 28, 56 günlük yük-sehim eğrilerinde, harçların su küründe kalma süresi arttıkça kırılma yüklerinin de arttığı görülmektedir. Ancak en

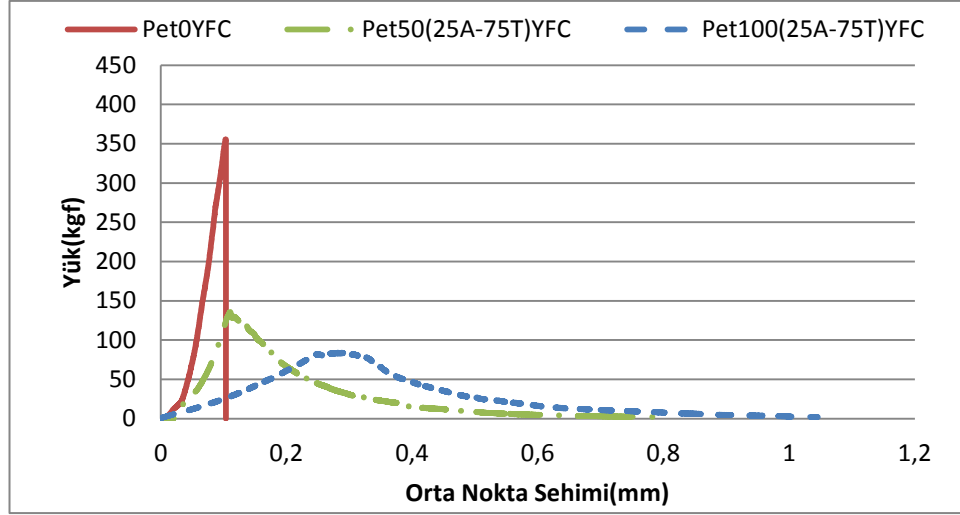
fazla dayanım artışı, içerisinde pet agrega bulunmayan kontrol örneklerinde meydana gelmiştir. Yüksek fırın cürufu ikamelerin 7, 28 ve 56 günlük dayanımları ve tokluk değerleri Tablo 7.10’da verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında yüksek fırın cürufu ikamesinin pet agrega ile matris arasındaki ara yüzeyi büyük ölçüde geliştirmedeği, ancak %50 pet agrega ikameli örneklerde, karışım içerisindeki doğal agregaların ara yüzeyini güçlendirdiği için eğilme dayanımında artış olduğu düşünülmektedir



Şekil 7.30 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine yüksek fırın cürufu eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 7 günlük yük-sehim grafikleri.



Şekil 7.31 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine yüksek fırın cürufu eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 28 günlük yük-sehim grafikleri.

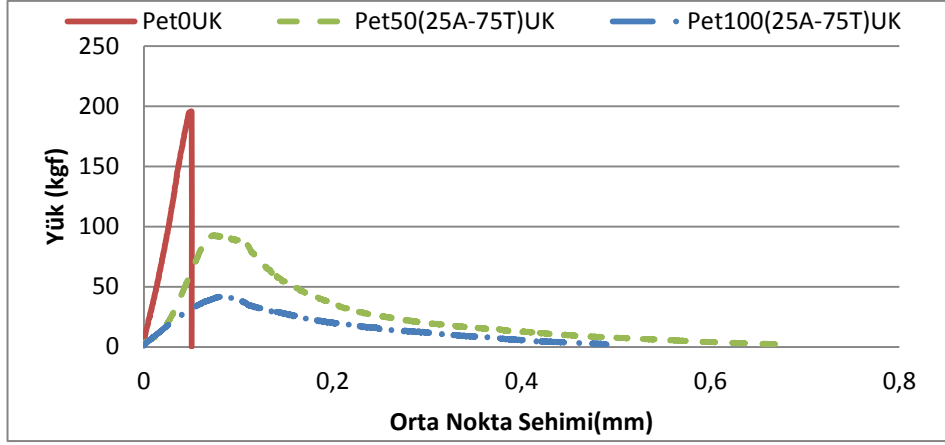


Şekil 7.32 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi çimento yerine yüksek fırın cürufu eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 56 günlük yük-sehim grafikleri.

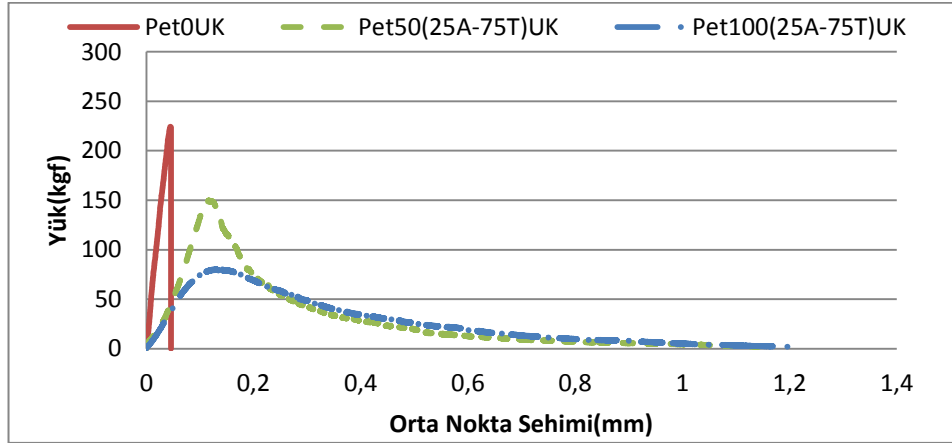
Uçucu kül ikame edilmiş karışımların 7, 28 ve 56 günlük yük-sehim eğrileri Şekil 7.33, Şekil 7.34 ve Şekil 7.35’de verilmiştir. Uçucu kül ikameli örneklere ait yük sehim eğrilerinde, su küründe kalma süresine bağlı olarak kırılma yüklerinde belirgin bir artış görülmüştür. Yüksek fırın cürufu ikameli örneklere oranla toklukları daha düşük değerlerde olmasına rağmen, pet agregalı örneklerde zamana bağlı dayanım artışının daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Uçucu kül ikameli örneklerde zamana bağlı olarak yük-sehim kuyruğundaki uzama miktarında da artış meydana gelmiştir. Tablo 7.11’de uçucu kül ikameli örneklerin 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımı ve tokluk değerleri verilmiştir. Uçucu külün pet agregalı örneklerin ara yüzeylerini geliştirdiği ortaya çıkmaktadır.

Tablo 7.10 Karıştırılmış agrom ve takoz tipi pet agregaların kırma kuma ikame edilmesi ve yüksek fırın cürufu ikameli sertleşmiş harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri.

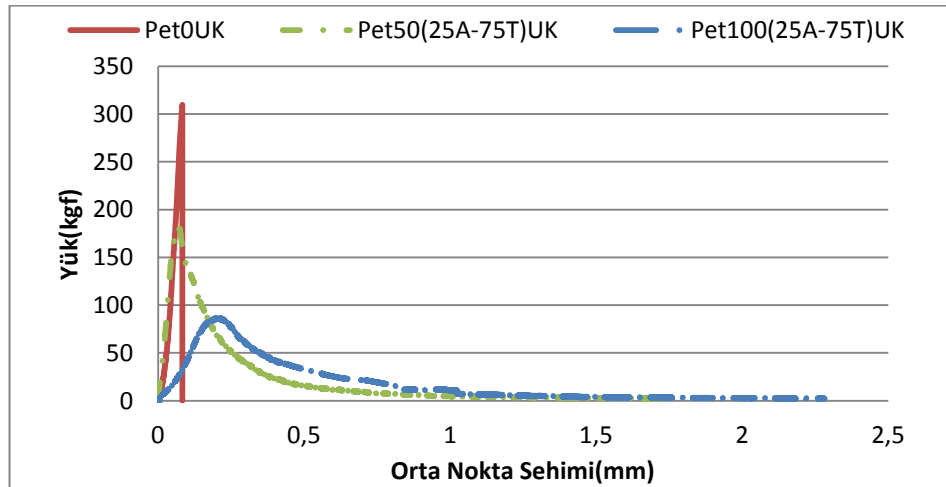
Deney Elemanları	7 günlük Ortalama Eğilme D. (MPa)	28 Günlük Ortalama Eğilme D. (MPa)	56 Günlük Ortalama Eğilme D. (MPa)	7 Günlük Tokluk (N.mm)	28 Günlük Tokluk (N.mm)	56 Günlük Tokluk (N.mm)
Pet0YFC	6,7	7,5	10,8	47	79	120
Pet50(25A-75T)YFC	3,7	3,9	4,4	230	235	233
Pet100(25A-75T)YFC	2,4	2,7	2,6	236	279	283



Şekil 7.33 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi çimento yerine uçucu kül eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 7 günlük yük-sehim grafikleri.



Şekil 7.34 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi çimento yerine uçucu kül eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 28 günlük yük-sehim grafikleri.

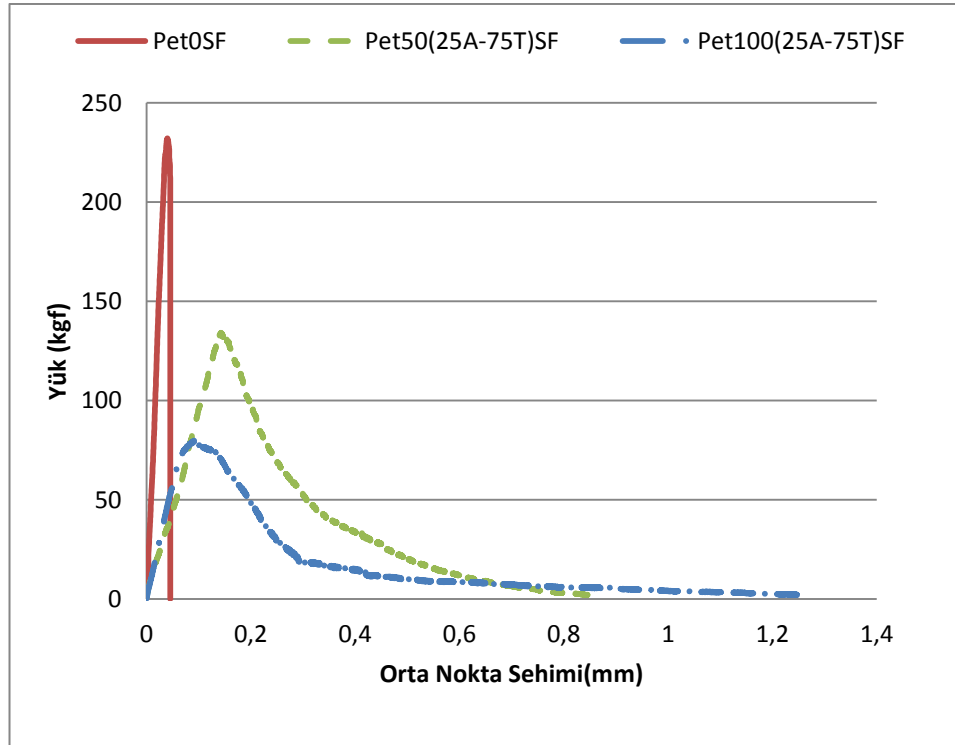


Şekil 7.35 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi çimento yerine uçucu kül eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 56 günlük yük-sehim grafikleri.

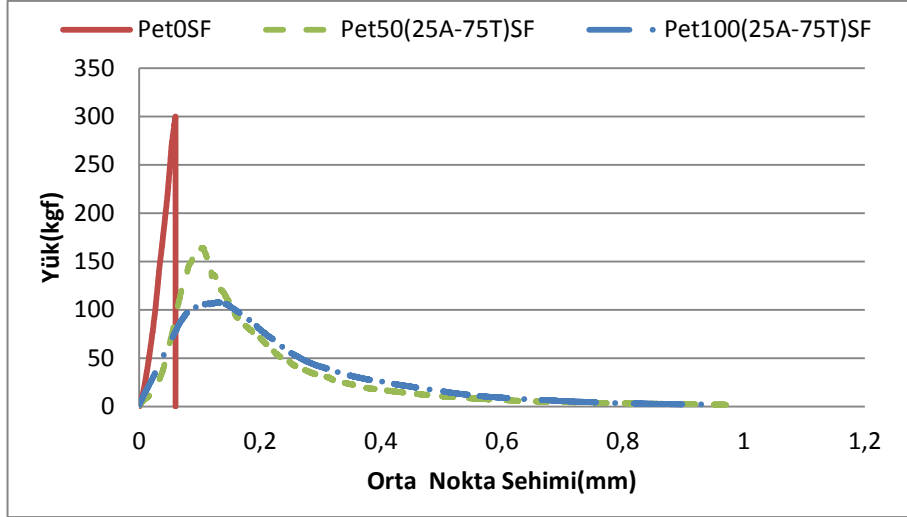
Tablo 7.11 Karıştırılmış agrom ve takoz tipi pet agregaların kırma kuma ikame edilmesi ve uçucu kül ikameli sertleşmiş harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri.

Deney Elemanları	7	28	56	7 Günlük Tokluk (N.mm)	28 Günlük Tokluk (N.mm)	56 Günlük Tokluk (N.mm)
	günlük Ortalama Eğilme D. (MPa)	Günlük Ortalama Eğilme D. (MPa)	Günlük Ortalama Eğilme D. (MPa)			
Pet0UK	5,9	6,8	9,4	50	55	97,1
Pet50(25A-75T)UK	2,8	4,6	5,5	170	330	385
Pet100(25A-75T)UK	1,2	2,4	2,7	82	310	391

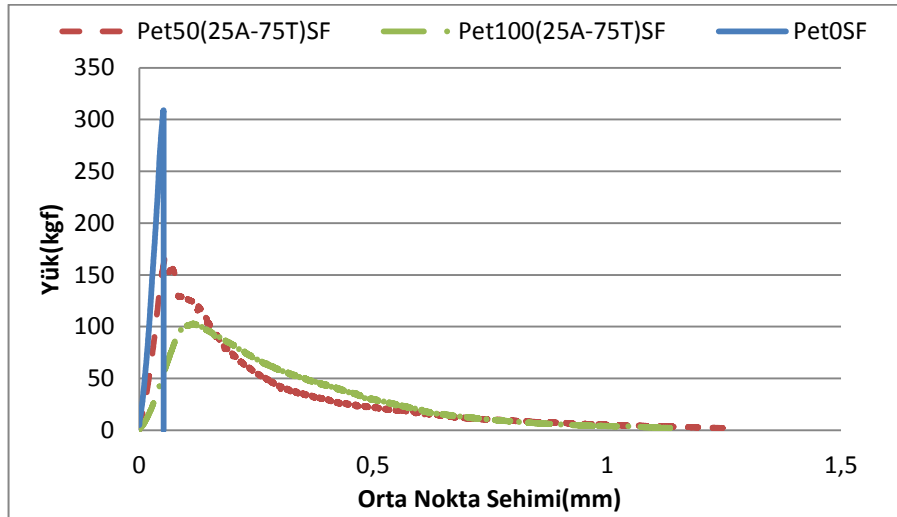
Silis dumanı ikameli örneklerin su küründe bekletildikten sonra eğilme deneyi sonucu bulunan yük-sehim eğrileri Şekil 7.36, Şekil 7.37 ve Şekil 7.38'de gösterilmiştir. Silis dumanı içeren örneklerin 28 günlük eğilme deneyi sonuçlarında belirgin bir artış görüldüğü, ancak örneklerin 56 günlük eğilme dayanımlarındaki artış çok fazla olmamıştır.



Şekil 7.36 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine silis dumanı eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 7 günlük yük-sehim grafikleri.



Şekil 7.37 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi çimento yerine silis dumanı eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 28 günlük yük-sehim grafikleri.



Şekil 7.38 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak kırma kuma ikame edilmesi, çimento yerine silis dumanı eklenmesi sonucu sertleşmiş harç örneklerinin 56 günlük yük-sehim grafikleri.

Tablo 7.12’de silis dumanı ikameli örneklerin 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri verilmiştir. Örneklerin kürede kalma süresi arttıkça eğilme dayanımında bir miktar artış olduğu, ancak örneklerin dayanım kazanması gevrekleşmeye neden olması sonucunda tokluk değerlerinde artış gözlenmemiştir. Puzolan ikamesinin bir sonucu olarak harç örneklerinin eğilme dayanımlarında zamana bağlı artış görülmektedir. Pet100 örneklerinde 28 ve 56 günlük örneklerde birbirine yakın eğilme dayanımı sonuçları çıkmıştır. Bu durum puzolanın, pet

agrega-matris ara yüzeyini beklenildiği oranda geliştirmedeği sonucunu ortaya koymaktadır.

Tablo 7.12 Karıştırılmış agrom ve takoz tipi pet agregaların kırma kuma ikame edilmesi ve silis dumanı ikameli sertleşmiş harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri.

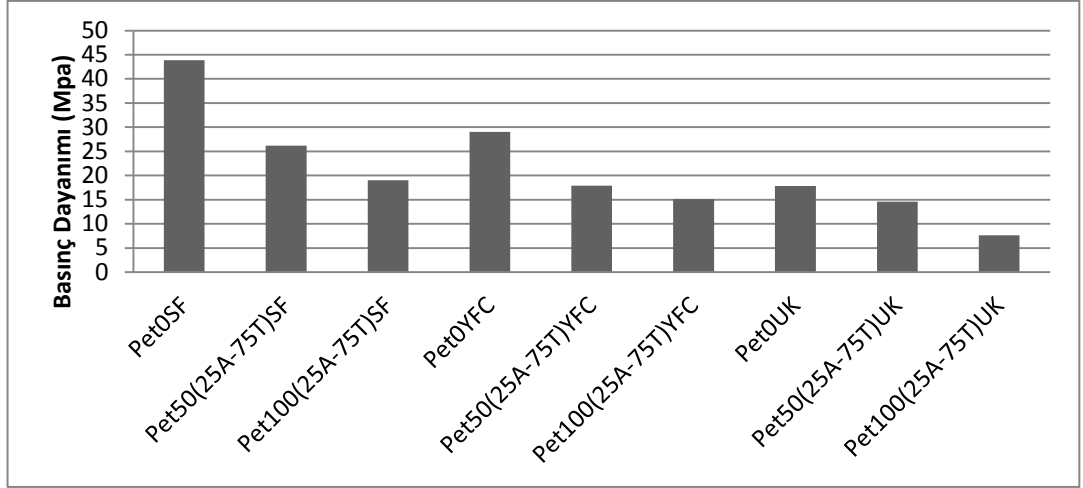
Dene Elemanları	7	28	56	7 Günlük Tokluk (N.mm)	28 Günlük Tokluk (N.mm)	56 Günlük Tokluk (N.mm)
	Günlük Ortalama Eğilme D. (MPa)	Günlük Ortalama Eğilme D. (MPa)	Günlük Ortalama Eğilme D. (MPa)			
Pet0SF	7,0	7,9	9,4	61	77,35	74
Pet50(25A-75T)SF	4,0	4,7	5,1	327	390	388,5
Pet100(25A-75T)SF	2,4	3,2	3,1	217	294,5	362

7.6.4 Takoz ve Agrom PET Agregası ikameli Karışımında Çimento Yerine Puzolan İkamelinin Basınç Deneyi Sonuçları

Hazırlanan pet agrega ikameli karışımlara çimento yerine yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül ikame edilerek 7, 28 ve 56 günlük eğilme sonrası basınç dayanımları karşılaştırılmıştır.

Şekil 7.39’da çimento yerine ağırlıkça %10 silis dumanı, %50 yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikameli karışımların 7 günlük eğilme sonrası basınç değerleri yer almaktadır. 7 gün su küründe kalmış örneklere yapılan basınç deneyi sonuçlarında en fazla basınç dayanımını silis dumanı ikameli örnekler göstermiştir. Uçucu kül ikamesi, 7 günlük örneklerin basınç dayanımında diğer puzolanlar kadar etkili olamamıştır.

Tablo 7.13’de puzolan ikameli örneklerin 7 gün sonunda basınç deneyi sonuçları ve pet agrega ikamesiyle dayanımdaki azalma oranları gösterilmiştir. Tablo 7.13 incelendiğinde, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu örneklerde pet agrega ikamesiyle meydana gelen dayanımdaki azalmanın birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 7.39 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 7 günlük basınç dayanımları.

Tablo 7.13 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 7 günlük basınç dayanımları değerleri ve basınç dayanımında azalma oranları.

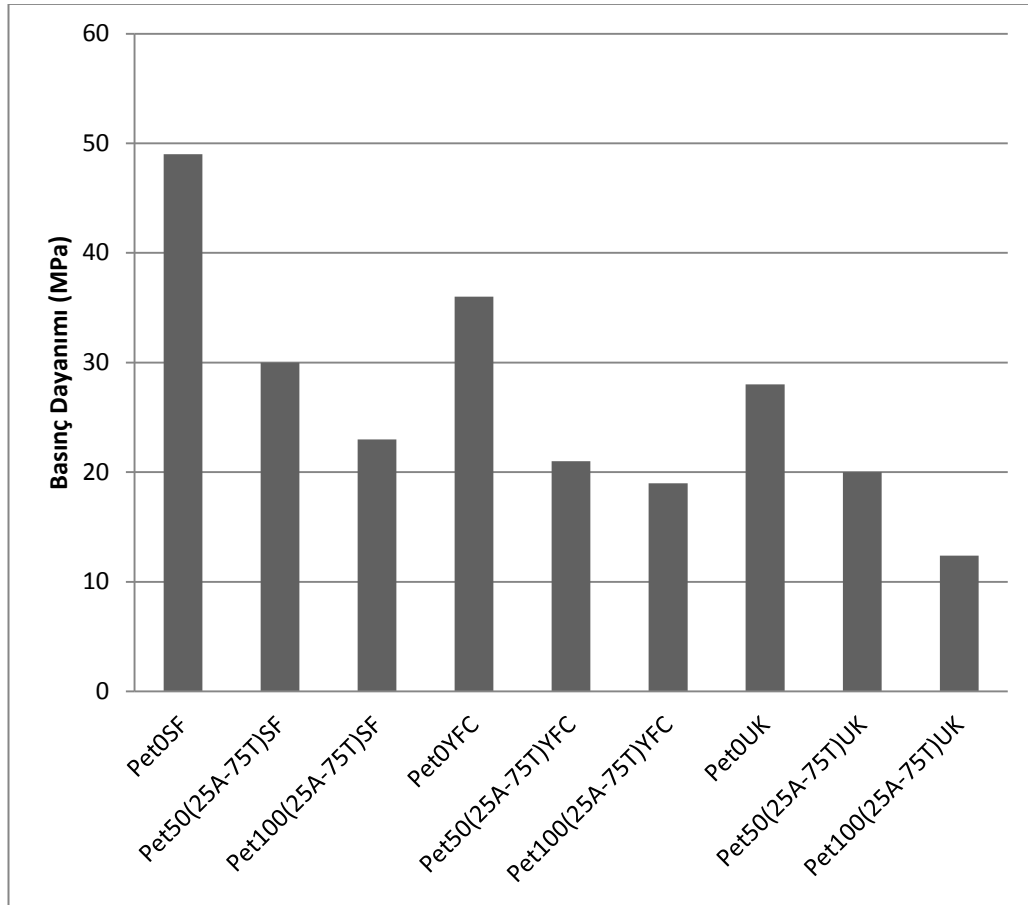
Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımında Azalma (%)
Pet0SF	0	43,9	100
Pet50(25A-75T)SF	0	26,2	60
Pet100(25A-75T)SF	0	19	43
Pet0YFC	0	29	100
Pet50(25A-75T)YFC	0	17,9	62
Pet100(25A-75T)YFC	0	15,1	52
Pet0UK	0	17,8	100
Pet50(25A-75T)UK	0	14,6	82
Pet100(25A-75T)UK	0	7,6	43

Puzolan ikameli örneklerin 28 gün sonra elde edilen basınç dayanımları Şekil 7.40'da gösterilmektedir. 28 gün su küründe bekletildikten sonra yapılan basınç deneyinde puzolan ikameli örneklerin tamamının dayanımı artmıştır. Yüksek fırın cürufu ve diğer puzolanların çimento yerine ikamesi, %100 pet agrega ikameli örneklerin basınç dayanımını ve %50 pet agrega ikameli örneklerin basınç

dayanımına yaklaştırmıştır. Bu durum, puzolanların, pet agrega ile matris ara yüzeyini güçlendirmesinin kanıtı olarak gösterilebilmektedir.

Tablo 7.14’de puzolan ikameli örneklerin 28 gün sonunda basınç deneyi sonuçları ve pet agrega ikamesiyle dayanımdaki azalma oranları gösterilmiştir.

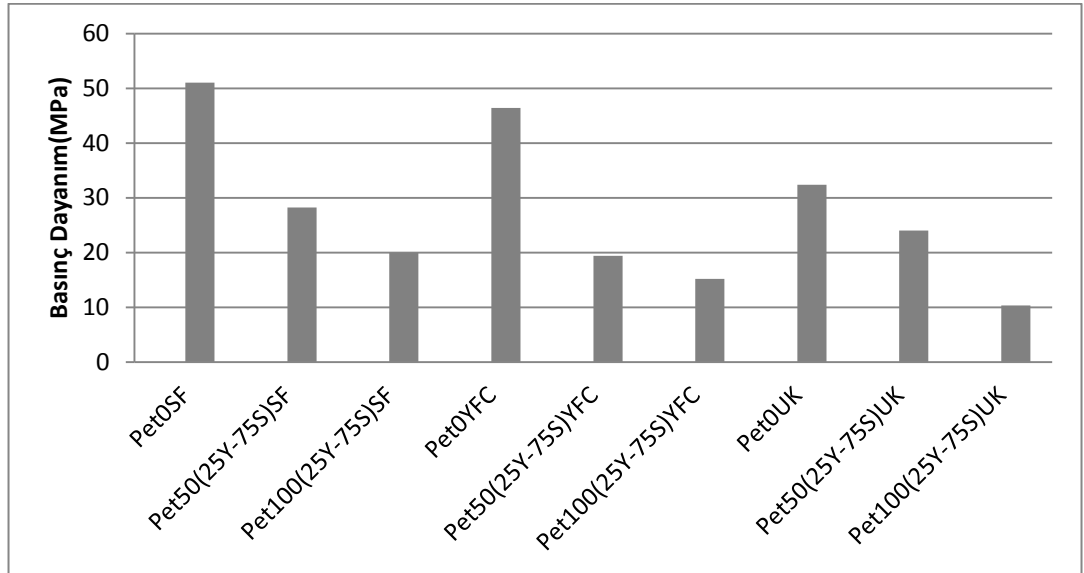
Puzolan ikameli örneklerin 56 gün sonra elde edilen basınç dayanımları Şekil 7.41’de gösterilmektedir. 56 gün su küründe bekletildikten sonra yapılan basınç deneyinde silis dumanı ikameli örneklerin basınç dayanımı artmıştır. 56 gün sonunda kontrol numunelerinin basınç dayanımları, pet agrega ikameli örneklerin basınç dayanımlarından daha fazla oranda artış olduğu fark edilmiştir. Ancak uçucu kül ikameli örneklerde %50 pet agrega ikameli örneklerin kontrol örneklerinin basınç dayanımlarına yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 7.40 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 28 günlük basınç dayanımları.

Tablo 7.14 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 28 günlük basınç dayanımları değerleri ve basınç dayanımında azalma oranları.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımında Azalma (%)
Pet0SF	0	49	100
Pet50(25A-75T)SF	0	30	61
Pet100(25A-75T)SF	0	23	47
Pet0YFC	0	36	100
Pet50(25A-75T)YFC	0	21	58
Pet100(25A-75T)YFC	0	19	53
Pet0UK	0	28	100
Pet50(25A-75T)UK	0	20	71
Pet100(25A-75T)UK	0	12,4	44



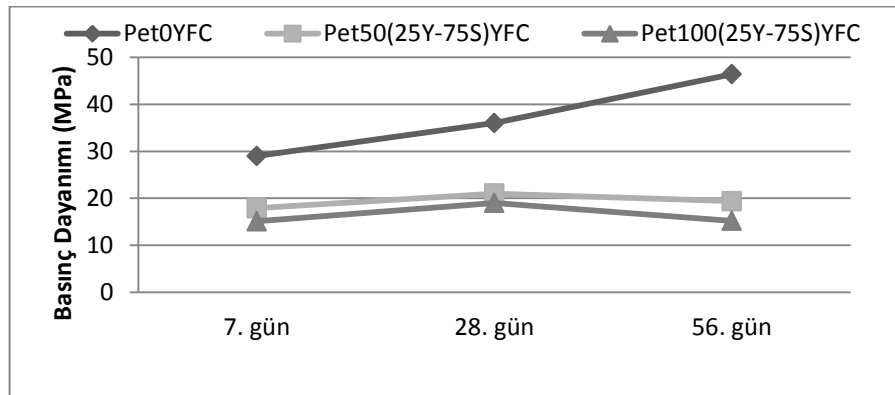
Şekil 7.41 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 56 günlük basınç dayanımları.

Tablo 7.15’de puzolan ikameli örneklerin 56 gün sonunda basınç deneyi sonuçları ve pet agrega ikamesiyle dayanımdaki azalma oranları gösterilmiştir.

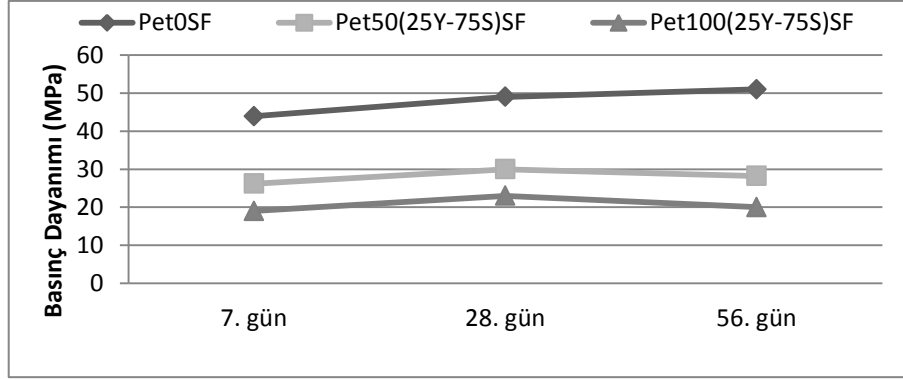
Tablo 7.15 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve farklı puzolan çeşitlerinin çimento yerine ikame edildiği karışımların 56 günlük basınç dayanımları değerleri ve basınç dayanımında azalma oranları.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımında Azalma (%)
Pet0SF	0	51	100
Pet50(25A-75T)SF	0	28,2	55
Pet100(25A-75T)SF	0	20	39
Pet0YFC	0	46,4	100
Pet50(25A-75T)YFC	0	19,4	42
Pet100(25A-75T)YFC	0	15,2	33
Pet0UK	0	32,4	100
Pet50(25A-75T)UK	0	24	74
Pet100(25A-75T)UK	0	10,3	32

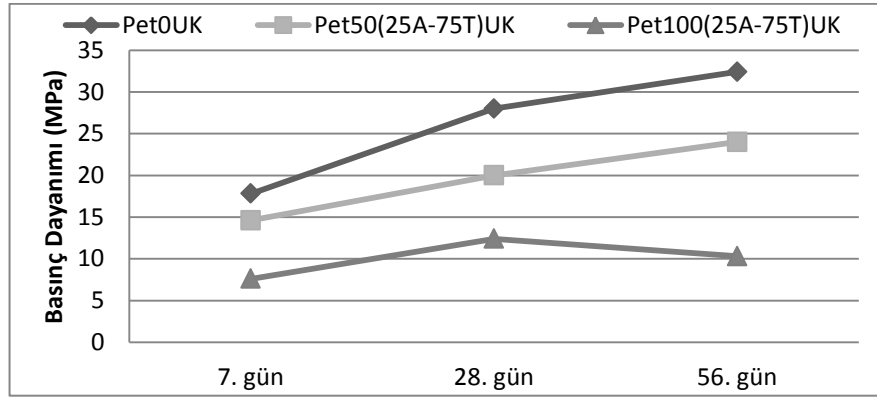
Şekil 7.42 , Şekil 7.43, ve Şekil 7.44’de puzolan ikameli örneklerin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafiklerin geneline bakıldığında, pet agregalı örneklerde 56 günlük basınç değerlerinde bir miktar artış olduğu, ancak 90 günlük basınç dayanımlarında, uçucu kül içeren örnekler hariç, artışın durduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, puzolan ikamesinin pet agreganın ara yüzeyini beklediği ölçüde güçlendirmede sonucunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7.42 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve çimentoya yüksek fırın cürufunun ikame edildiği harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç değerleri.



Şekil 7.43 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve çimentoya silis dumanının ikame edildiği harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç değerleri.



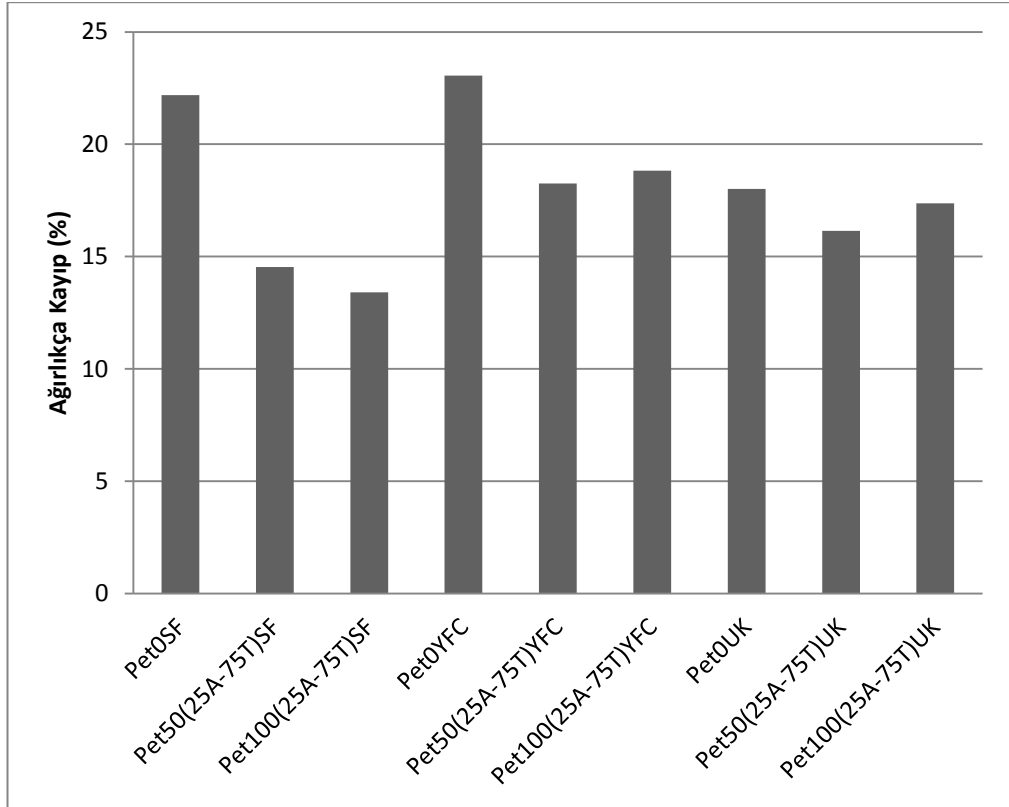
Şekil 7.44 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının kuma ikame edildiği ve çimentoya uçucu külün ikame edildiği harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç değerleri.

7.6.5 Takoz ve Agrom PET Agrega ikameli Karışımında Çimento Yerine Puzolan İkamesinin Aşınma Deneyi Sonuçları

Deneyde, 28 gün boyunca su küründe bekletilen puzolan ikameli örneklerin aşınma dirençlerini bulabilmek için agregaların aşınma tayininde kullanılan Modifiye Los Angeles deneyi yapılmıştır. Deneyden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak pet agregaların ve puzolanın yüzeysel aşınmaya olan etkileri araştırılmıştır.

Çimento yerine yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül ikameli 28 gün su küründe kalan sertleşmiş harç örneklerine yapılan Modifiye Los Angeles Aşınma Deneyi sonuçları Şekil 7.45'de gösterilmiştir. En yüksek aşınma dayanımını silis dumanı ve %100 pet agrega ikameli sertleşmiş harç örnekleri göstermiştir. Pet agrega

ikamesiz, silis dumanı ikameli kontrol örneklerinde aşınma deneyi sonucunda ağırlıklarının ortalama %21'ini kaybederek düşük aşınma direnci göstermişlerdir. En düşük aşınma direncini yüksek fırın cürufu ikameli karışımlar göstermektedir. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikameli örneklerde aşınma direnci için en uygun karışım %50 pet agrega ikameli örnekler olmuştur.



Şekil 7.45 Takoz ve agrom pet agrega karışımı örneklerin kırma kuma ikame yapılması ve farklı puzolanların çimentoya ikame yapılmasıyla harç örneklerinin 28 günlük modifiye los angeles aşınma deneyi sonuçları.

Modifiye Los Angeles deneyinden önce ve sonra örneklerin durumu Şekil 7.46 ve Şekil 7.47'de gösterilmiştir. Deney sırasında kontrol örneklerinin köşeleri daha pürüzsüz bir şekilde aşınırken, pet agrega ikameli örneklerin köşe kısımlarında pürüzlü bir aşınma gerçekleşmiştir. Takoz tipi pet agregaların kırılma ya da parçalanma ihtimali, yapılan aşınma deneyi sırasında mümkün olmaması sonucunda köşe kısımlardaki pet agregalar bütün halde kopmuş ve köşelere denk gelen kısımlarda çukurlar oluşmuştur. Deney sonrası aynı puzolan ikameli örnekler resimde karşılaştırıldığında daha az aşınan karışım gözle seçilebilmektedir.



Şekil 7.46 Modifiye los angeles aşınma deneyi öncesi sertleşmiş harçların görünümü.



Şekil 7.47 Modifiye los angeles aşınma deneyi sonrası sertleşmiş harçların görünümü.

7.7 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal-Kırma Agregası, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Taze ve Sertleşmiş Hal Deney Sonuçlarına Etkisi

Yer karosu ve kaldırım taşı gibi yerlerde kullanılması amaçlanan PET agregalı harç örneklerine görsellik kazandırmak amacıyla kırma kum yerine renkli doğal-kırma agregası, gri çimento yerine beyaz olan CEM II A-LL 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Yapılan bu değişikliklerin harç dayanımlarına olan etkisini incelemek amacıyla işlenebilirlik ve mekanik deneyler yapılmıştır. Karışım miktarları Tablo 7.16'da verilmektedir.

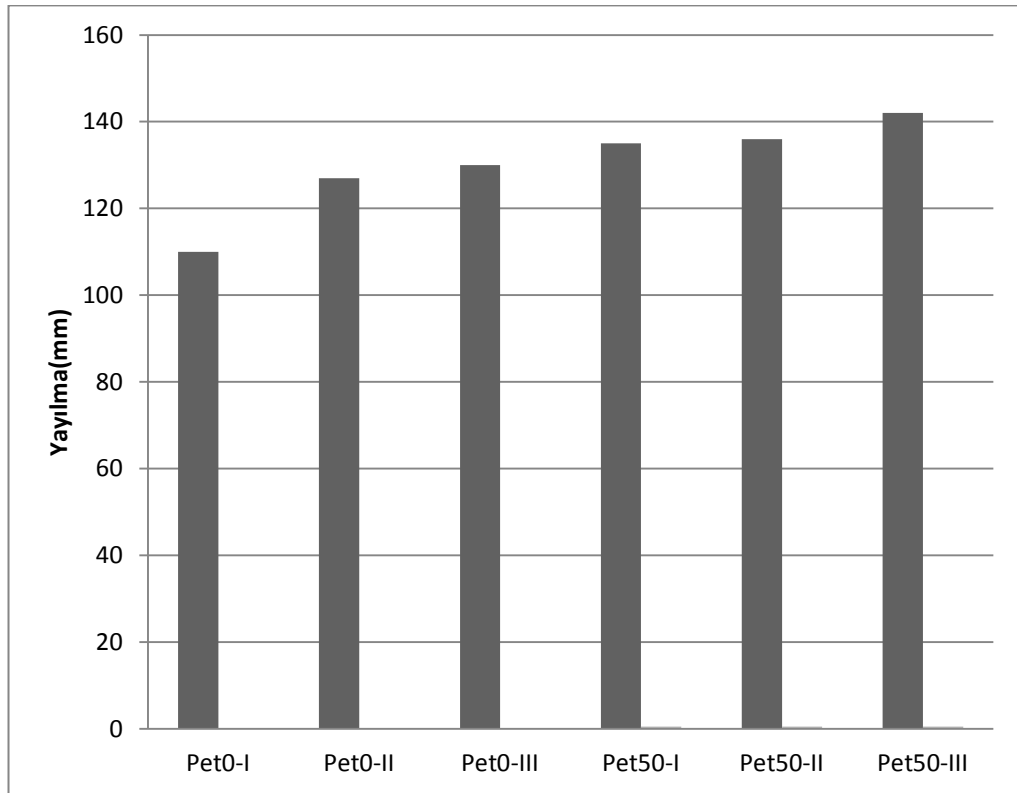
Tablo 7.16 Hazırlanan karışımların kg/m³ miktarları (f).

Malzemeler	Pet0-I	Pet0-II	Pet0-III	Pet50-I	Pet50-II	Pet50-III
Çimento (CEM II A-LL 42,5 R)	511	511	511	511	511	511
Renkli Agregası	-	769	1536	-	382	763
Kırma Kum	1536	769	-	763	382	-
Pet Agregası (Takoz)	-	-	-	300	300	300
Pet Agregası (Agrom)	-	-	-	100	100	100
Su	256	256	256	256	256	256
Süperakışkanlaştırıcı	5	5	5	5	5	5

7.7.1 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal-Kırma Agregası, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları

Yer karosu yapımında agregası olarak kullanılmak üzere kırma kum yerine renkli doğal ve kırma agregası kullanılması tasarlanmıştır. Taze haldeki karışımlarda işlenebilirliği arttırmak için 5 kg/m³ oranında akışkanlaştırıcı katkı ilavesi

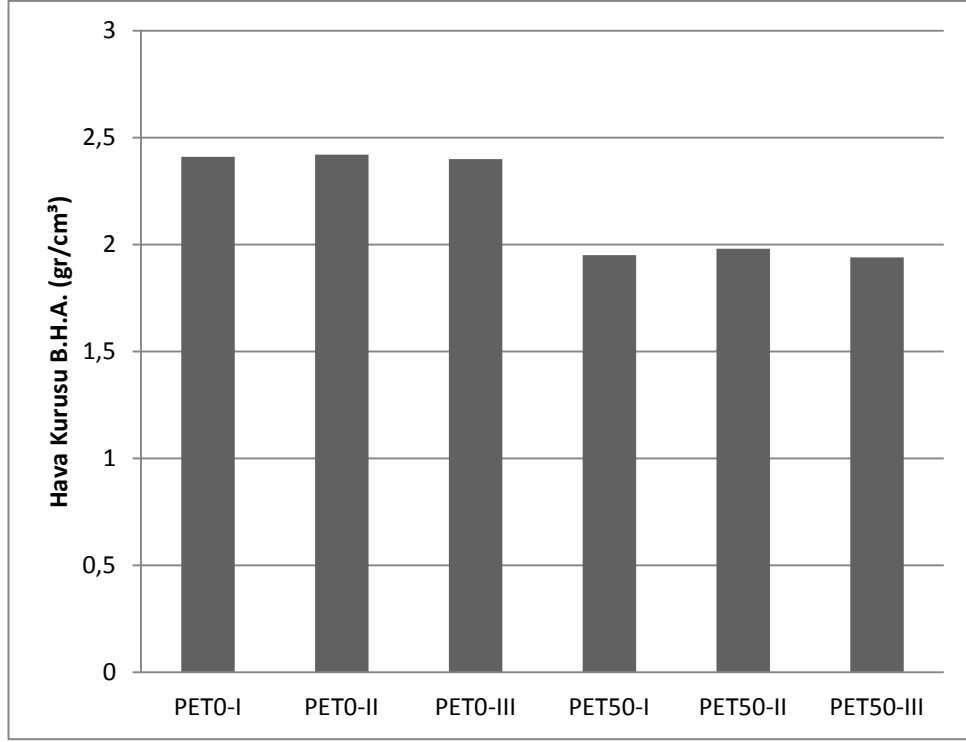
yapılmıştır. Renkli agregaların işlenebilirliğe olan etkisi Şekil 7.48’de gösterilmektedir. Renkli doğal ve kırma agrega kırma kuma %0, 50, 100 oranında ikame edilmiş ve Pet agrega (%75 takoz-%25 agrom) da harç karışımına %0, 50 oranında ikame edilmiştir. Yayılma çapları incelendiğinde, renkli doğal-kırma agrega ikame oranı arttıkça yayılma çapı da artmaktadır. Hazırlanan karışımlara Pet agrega ikamesinin de yayılma çapını arttırdığı açıkça görülmektedir.



Şekil 7.48 Takoz ve agrom karışımı pet agregaların renkli agregaya ikame edilmesi ve gri çimento yerine beyaz çimento eklenmesi sonucu yayılma değerleri.

7.7.2 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal-Kırma Agregaya, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Hava Kuruğu Birim Hacim Ağırlıkları

Şekil 7.49’da, kırma kuma renkli doğal-kırma agreganın ikame edilmesi sonucu hava kuruğu birim hacim ağırlıklarındaki değişim incelenmiştir. Yapılan hava kuruğu b.h.a tayininde renkli doğal-kırma agreganın harç örneklerinin birim hacim ağırlığını etkilemedikleri ortaya çıkmıştır.

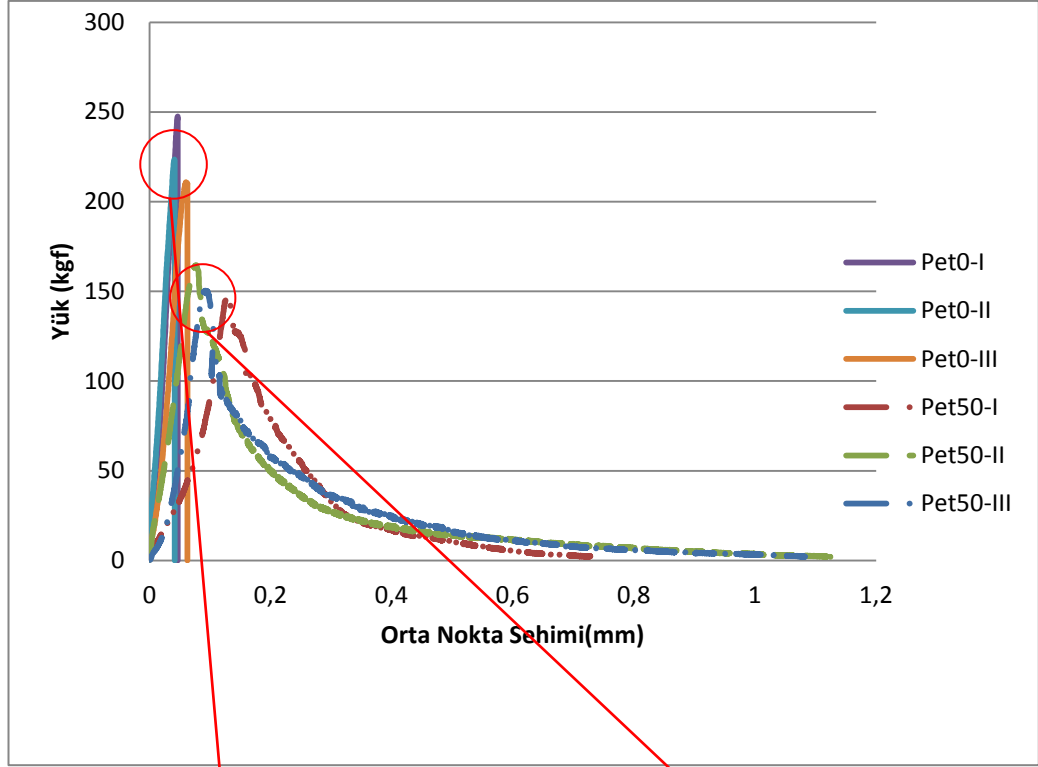


Şekil 7.49 Kırma kuma renkli doğal-kırma agrega ikamesinin hava kurusu birim hacim ağırlık değerleri.

7.7.3 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal-Kırma Agrega, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Eğilme Deneyi Sonuçları

Deneysel çalışmanın bu aşamasında gri çimento yerine beyaz çimento, kırma kum yerine yer karosu yapımında kullanılan doğal ve kırma renkli agrega ikame edilerek 7 günlük yük-sehim davranışları, eğilme dayanımı, tokluk değerleri gibi parametreleri belirlenmiştir.

Şekil 7.50’de, %0 ve %50 pet agrega ikameli serilerde renkli doğal ve renkli agregalar kırma kumun yerine %0, %50 ve %100 oranında ikame yapılmıştır. Şekil 7.50’de 7 günlük örneklerin yük-sehim grafikleri gösterilmektedir. Yük-sehim davranışları incelendiğinde, pet ikamesi yapılmayan örnekler ile %50 pet ikamesi yapılan örneklerin, farklı renkli agrega kullanımından belirgin ölçüde etkilenmediği görülmektedir. Bu durumla beraber, çimento tipinin de dayanımı önemli ölçüde değiştirmedeği ortaya çıkmıştır.



Şekil 7.50 Takoz ve agrom tipi pet agregaların karıştırılarak renkli agregaya ikame edilmesi ve gri çimento yerine beyaz çimento kullanılması sonrası 7 günlük örneklerin yük-sehim grafikleri ve örnek kesitleri.

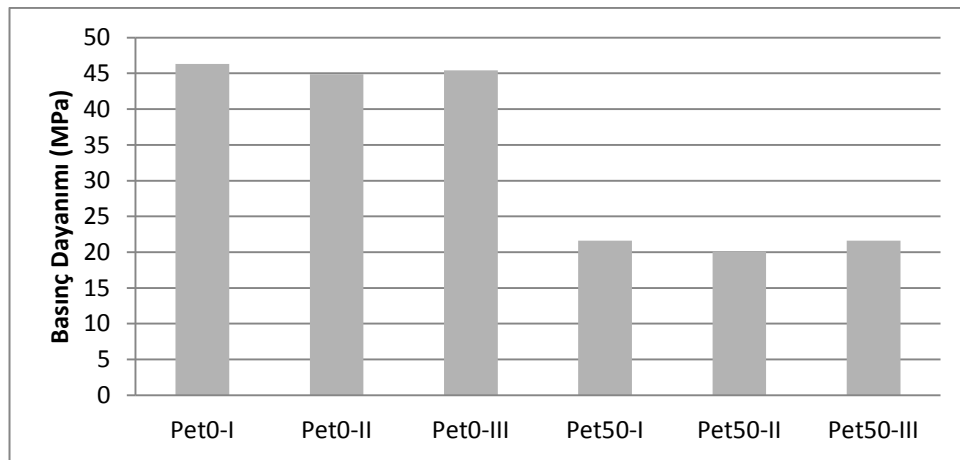
Tablo 7.17’de %0 ve %50 pet agrega ikamesi içerisinde kırma kum yerine renkli agrega ikame edilen sertleşmiş harç karışımlarının eğilme dayanımları ve tokluk değerleri verilmiştir. Eğilme dayanımları ve tokluklar incelendiğinde, pet agrega ikamesiz örneklerde belirgin bir fark görülmesine de renkli agrega ikame oranı arttıkça dayanımın düştüğü görülmektedir. En fazla eğilme dayanımı renkli doğal ve pet agrega içermeyen örnekler gösterirken en fazla tokluğu sadece renkli doğal ve pet agrega içeren örnekler göstermektedir.

Tablo 7.17 Karıştırılmış agrom ve takoz tipi pet agregaların renkli agregaya ikame edilmesi ve gri çimento yerine beyaz çimento kullanılması sonucunda 7 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri.

Deney Elemanları	Eğilme Dayanımı (MPa)	Tokluk (N.mm)
Pet0-I	7,5	60,5
Pet0-II	6,8	48,2
Pet0-III	6,4	64,4
Pet50-I	4,5	247,1
Pet50-II	5,0	248
Pet50-III	4,6	281

7.7.4 Kırma Kum Yerine Renkli Doğal-Kırma Agregası, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Basınç Deneyi Sonuçları

Hazırlanan karışımlara 7 günlük eğilme sonrası basınç deneyi yapılmıştır. Şekil 7.51’de basınç dayanımı sonuçları gösterilmiştir. Kırma kum yerine kullanılan renkli agregaların basınç dayanımını etkilemediği yapılmış olan deney sonrasında ortaya çıkmıştır. %0 ve %50 pet agregası ikamelerinden oluşan karışımda kırma kum yerine %25, %50 ve %100 oranında yapılan renkli agregası ikamesi sonucunda örnek dayanımlarında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.

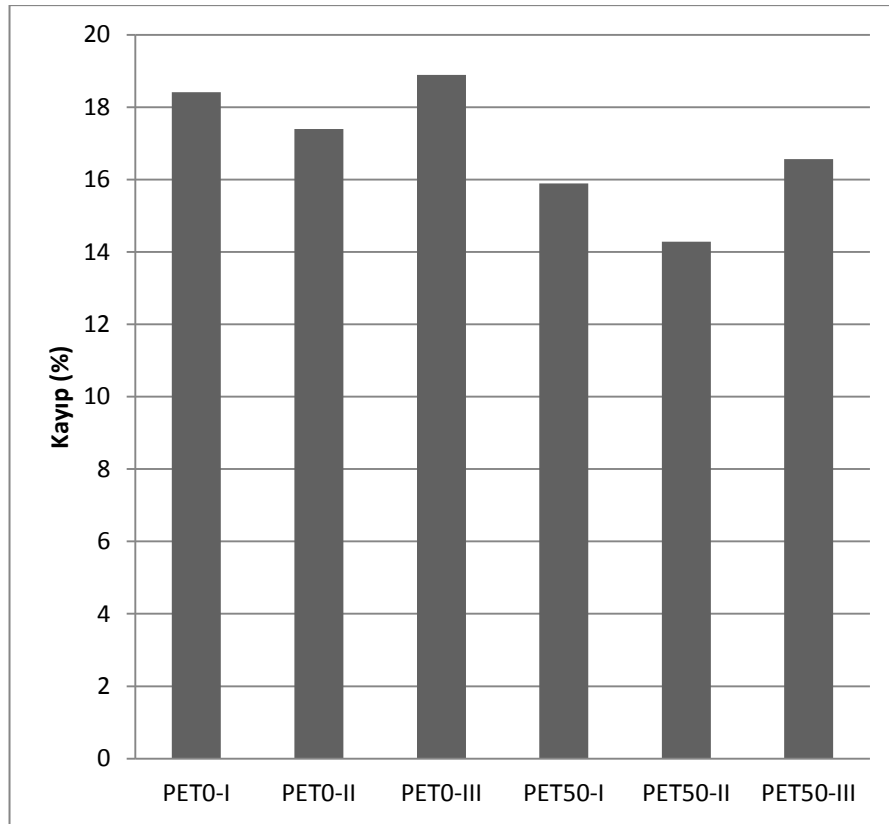


Şekil 7.51 Takoz ve agrom tipi pet agregası karışımının renkli agregaya ikame edildiği ve gri çimento yerine beyaz çimentonun kullanıldığı harçların 7 günlük basınç değerleri.

7.7.5 Kıırma Kum Yerine Renkli Doğal-Kırma Agrega, CEM I 42,5 R Çimento Yerine CEM II A-LL 42,5 R Çimentosu Kullanımının Harçların Aşınma Deneyi Sonuçları

CEM I 42,5R çimentosu yerine CEM II/A-LL 42,5R tipi beyaz çimento, kırma kum yerine renkli doğal ve kırma agrega kullanımının aşınmaya olan etkisini incelemek amacıyla beyaz çimentolu renkli agregalı karışıma pet agrega ikame yapılarak 7 günlük örneklere Modifiye Los Angeles Aşınma Deneyi yapılmıştır.

Yapılan deney sonuçları Şekil 7.52’de gösterilmiştir. Renkli agregaların kırma kuma ikame edildiğinde aşınma değerlerinde belirgin bir değişim olmadığı görülmekle beraber %50 kırma kum-%50 renkli agrega bulunan pet agregalı ya da pet agregasız karışımların aşınma değerlerinin diğer karışımlardan daha iyi olduğu görülmektedir. Deney sonrası örnekler Şekil 7.53’de gösterilmiştir.



Şekil 7.52 Takoz ve agrom tipi pet agrega karışımının renkli agregaya ikame edildiği ve gri çimento yerine beyaz çimentonun kullanıldığı harçların 7 günlük modifiye los angeles aşınma deneyi sonuçları.



Şekil 7.53 Modifiye los angeles aşınma deneyi sonrası takoz ve agrom tipi pet agregası karışımının renkli agregaya ikame edildiği ve gri çimento yerine beyaz çimentonun kullanıldığı harçların görünümü.

7.8 Agregası Yerine PET Atıklarının Kullanılması İle İlgili Yapılan Deney Sonuçlarına Göre Genel Değerlendirme

Taze hal işlenebilirlikler karşılaştırıldığında, kırma kuma %25 agrom veya takoz tipi PET agregası ikamesi işlenebilirliği artırırken daha fazla PET agregası ikamesi işlenebilirliği düşürmüştür. En uygun takoz ve agrom tipi PET agregası karışımı; hacimce %75 takoz, %25 agrom kullanılan PET agregası karışımıdır. Karışıma hacimce %2 PET lif eklenmesi işlenebilirliği düşürmüştür. %100 PET agregası ikameli örneklerde %2 lif eklenerek yapılan işlenebilirlik deneyinde taze haldeki harç yayılmamıştır. Karışımlarda çimento yerine puzolan ikamesi işlenebilirliği artırırken en fazla yayılmayı yüksek fırın cürüflü harç örnekleri göstermiştir. Kırma kum yerine renkli doğal-kırma agregası kullanımı işlenebilirliği arttırmıştır.

Harç içerisinde pet agregası kullanımı eğilme dayanımını düşürmektedir. Sadece pet agregalarının kullanıldığı karışımlarda en fazla eğilme dayanımını hacimce %75 takoz ve %25 agrom tipi pet agregasının karıştırılarak kullanıldığı sertleşmiş harç

örnekleri göstermiştir. Harç karışımlarına %2 pet lif eklenmesi eğilme dayanımı ve tokluklarını arttırmıştır. 0,3 su/çimento oranında hazırlanan harç karışımlarının eğilme dayanımları ve toklukları 0,5 su/çimento oranında hazırlanan harç örneklerinden daha yüksektir. Puzolan kullanılan karışımların eğilme dayanımları zamana bağlı artış göstermektedir. Kıırma kuma renkli doğal-kırma agrega ikamesi eğilme dayanımını bir miktar düşürmektedir.

PET agregalar 80 °C'de form değiştirdikleri ve 240 °C'de tamamen eridikleri için sertleşmiş harç örneklerinde 80 °C-240 °C kritik sıcaklıklardır.

Aşınma deneyi sonuçlarına göre en uygun karışım %50 PET agrega ikameli karışım olmaktadır. Puzolan ikameli örneklerde yapılan Modifiye Los Angeles aşınma deneyinde silis dumanı ikameli örnekler sertleşmiş harçta en yüksek aşınma direncini göstermiştir. Renkli agrega ikamesi sertleşmiş harçların aşınma direncini etkilememiştir.

BÖLÜM SEKİZ
PET ATIKLARI İLE YER KAROSU ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ

8.1 Tanım

Deneylerin bu aşamasında, yer karosu üretmek için yapılan deneyler ve sonuçları yer almaktadır. Deneyde dört farklı karışım kullanılmaktadır. Bunlar; KNT, PET50, PET50-YFC50, PET50-YFC50-LİF2'dir. Yapılacak her deneyde, bu dört karışım kullanılmıştır. Yapılan çalışma, karıştırılmış takoz ve agrom pet agrega ikameli harçların kontrol harçlarına göre avantaj ve dezavantajları ve yüksek fırın cürufu, pet lif eklenmesinin harçların mekanik davranışlarına olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler ve belirlenen özellikler Tablo 8.1'de gösterilmiştir.

Hazırlanan karışımların m³ miktarları Tablo 8.2' de gösterilmiştir.

Karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı ilavesi, pet agregalarda ayrışma yapabileceği göz önünde bulundurularak yapılmamıştır.

Tablo 8.2 Yer karosu imalatı için hazırlanan karışımların kg/m³ miktarları.

Malzemeler	KNT	Pet50	Pet50-YFC50	Pet50-YFC50-Lif2
Çimento (CEM II A-LL 42,5 R)	511	512	256	252
Yüksek Fırın Cürufu	-	-	256	252
Renkli Agregası	1536	763	763	756
Kırma Kum	-	-	-	-
Pet Agregası (Takoz)	-	300	300	296
Pet Agregası (Agrom)	-	100	100	99
Pet Lif	-	-	-	16
Su	256	256	256	252
Süperakışkanlaştırıcı	-	-	-	-
Toplam	2303	1931	1931	1923

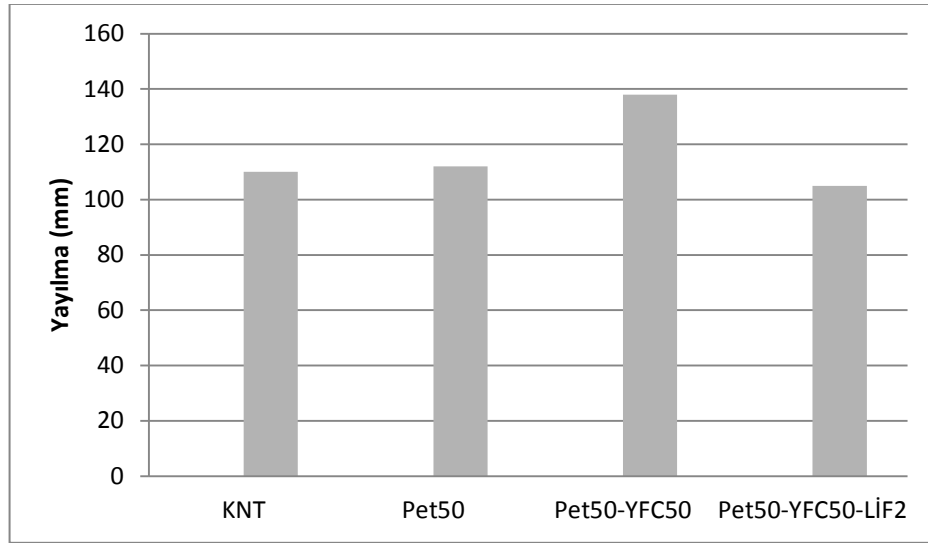
Tablo 8.1 Pet atıkları ile yer karosu üretimi ve özelliklerinin belirlenmesinde yapılan deneyler, belirlenen özellikler ve örnek boyutları

KONU	YAPILAN DENEYLER	BELİRLENEN ÖZELLİKLER	ÖRNEK BOYUTLARI (cm)
PET Atıkları İle Yer Karosu Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi	Yayıma	İşlenebilirlik	
	Hava Kuru B.H.A Tayini	Hava Kuru B.H.A	4x4x16
	Kuru B.H.A Tayini	Kuru B.H.A	4x4x16
	Eğilme Deneyi (Yük Kontrollü Üç Noktalı Eğ. Deney Aleti)	28, 56, 90 Günlük Eğilme Dayanımı	4x4x16
	Eğilme Sonrası Basınç deneyi	28, 56, 90 Günlük Basınç Dayanımı	4x4x4
	'Los Angeles' Aşınma Deneyi	28, 56, 90 Günlük Aşınma Direnci	4x4x4
	'Dory' Yüzeysel Aşınma Deneyi	28, 56, 90 Günlük Aşınma Direnci	7,1x7,1x7,1
	Donma-Çözülme Deneyi (270 Çevrim)	Ağırlık Kaybı, Eğilme ve Basınç Dayanımı	4x4x16
	Asit Deneyi (HCl Asit'de 56 Gün Bekletildi.)	Ağırlık Kaybı, Eğilme ve Basınç Dayanımı	4x4x16
	Su Emme Deneyi	Kapiler Su Emme Oranı, Porozite	4x4x4
	Isı İletkenlik Deneyi	Isı İletkenlik Katsayısı	2,5x5x10
	Alkali Deneyi	21 Günlük Alkali Direnci	2,5x2,5x28,5
	Bünyesel Büzülme Deneyi	24 Günlük Bünyesel Büzülme	2,5x2,5x28,5
	Kuruma Büzülmesi Deneyi	24 Günlük Kuruma Büzülmesi	2,5x2,5x28,5

8.2 Taze Hal Harçların Deney Sonuçları

8.2.1 İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları

Taze haldeki harçlara yayılma deneyi yapılarak işlenebilirlikleri karşılaştırılmıştır. Kontrol örneklerinde renkli, doğal ve kırma agrega kullanılmıştır. Pet agrega ikameli örneklerde hacimce %50 pet agrega kullanılmış ve pet agreganın içerisinde, ön denemeler sonucunda karar verilen takoz tipi agregadan %75, agrom tipi pet agregadan %25 karıştırılmıştır. Karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanılmamıştır. Serilere ait taze harç karışımlar üzerine yapılan işlenebilirlik deneyi Şekil 8.1’de gösterilmektedir. Deney sonucunda en fazla yayılmayı yüksek fırın cürufu ikameli örnekler göstermiştir. Pet50 örneklerde yayılma çapı kontrol örneklerine göre daha fazla olurken, lifli örnekler neredeyse hiçbir yayılma göstermemiştir.



Şekil 8.1 Hazırlanan karışımların yayılma çapları.

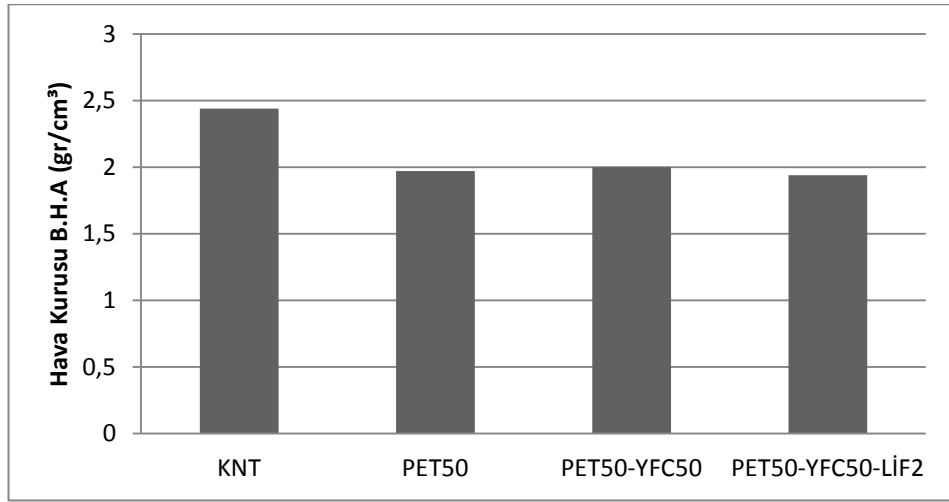
8.3 Sertleşmiş Hal Harçların Deney Sonuçları

8.3.1 Hava Kurusu ve Kuru Birim Hacim Ağırlıklarının Belirlenmesi

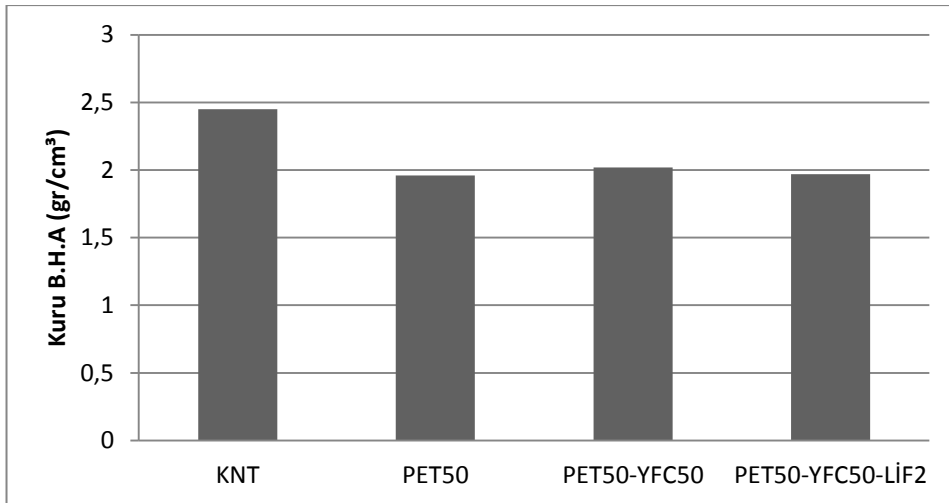
Yer karosu imalatı için yapılan deneysel çalışmada hazırlanan harç örneklerinin hava kurusu ve kuru birim hacim ağırlıkları ölçülmüştür.

Şekil 8.2’de hava kurusu birim hacim ağırlıkları verilmiştir. KNT serisine ait örnekler diğer serilerden daha fazla birim hacim ağırlık değerine ulaşmıştır. Yüksek fırın cürufu ikameli PET50-YFC50 örnekleri pet agrega ikameli örnekler içerisinde en yüksek birim hacim ağırlık değerine sahiptir. Yüksek fırın cürufunun daha boşluksuz harç elde edilmesinde rol oynadığı görülmektedir.

Şekil 8.3’de 28 gün suda kür edilen örnekler etüvde kurutulduktan sonra birim hacim ağırlıkları ölçülmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde hava kurusu birim hacim ağırlık değerlerine yakın değerler elde edilmiştir. KNT serisine ait örnekler diğer serilerden daha fazla birim hacim ağırlık değerine ulaşmıştır.



Şekil 8.2 Hazırlanan karışımların hava kurusu b.h.a değerleri.



Şekil 8.3 Hazırlanan karışımların kuru b.h.a değerleri.

8.3.2 Eğilme Deneyi Sonuçları

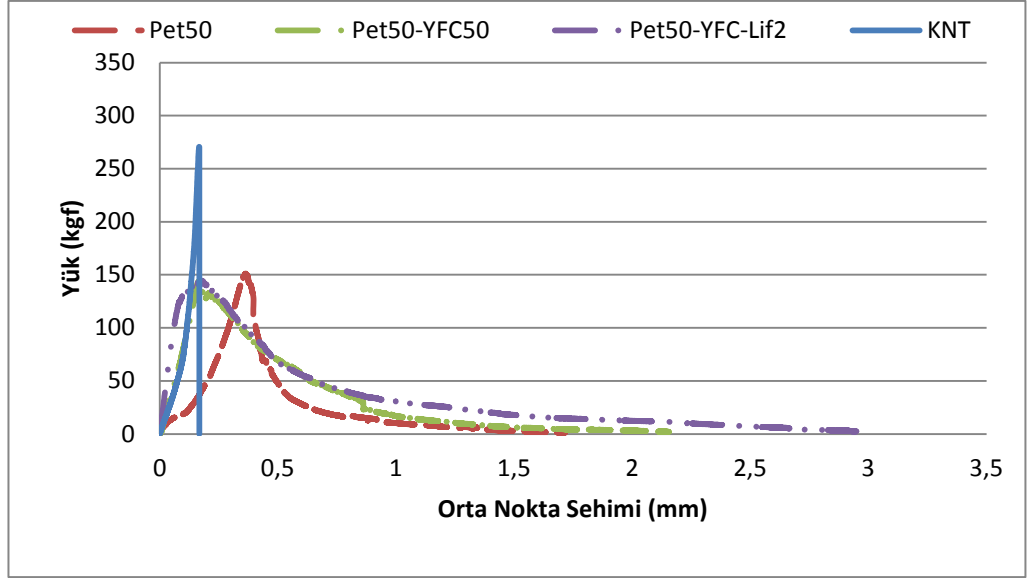
Bu deneyde kontrol, %50 pet agrega, %50 pet agrega ve yüksek fırın cürufu, %50 pet agrega, yüksek fırın cürufu ve %2 lif bulunan 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik örnekler hazırlanıp üç noktalı eğilme deneyi yapılarak 28, 56 ve 90 günlük yük-sehim grafikleri, eğilme dayanımları ve tokluk değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 8.4'de hazırlanan serilerin 28 günlük yük-sehim eğrileri çizilmiştir. 28 günlük eğilme deneyi sonuçlarındaki yük-sehim eğrileri incelendiğinde, kontrol örneklerinin en fazla kırılma yüküne ulaştığı ortaya çıkmaktadır. %50 pet agrega ikameli örneklerde, kontrol örneklerinin kırılma yükünün yarısında kırıldığı ancak, eğilme sırasında oluşan çatlak boyunun, pet agregaların etrafından dolaşması nedeniyle uzaması yük-sehim eğrisinde kuyruk oluşturduğu fark edilmiştir. Yük-sehim eğrilerinde kuyruk oluşması durumu, genelde sadece lif içeren örneklerde gözlemlenirken, pet agrega içeren lifsiz örneklerde de kuyruk bölgesinin oluşumu gözlemlenmektedir.

Sadece %50 pet agregalı örneklerin yük-sehim eğrisinin yüksek fırın cürufu ikameli serilerin yük-sehim eğrileriyle karşılaştırıldığında ilk çatlak yüküne kadar doğrusal kabul edilebilecek bölgenin eğiminin daha az olduğu gözlemlenmektedir. Yüksek fırın cürufu ikameli örneklerin doğrusal bölgeye kadar aynı açıyla artması yüksek fırın cürufu etkisinin bir belirtisi olduğunu ispatlar niteliktedir. Bu durumun yüksek fırın cürufu ikamesiyle daha boşluksuz karışım elde edildiğinin sonucu olarak yorumlanabilir.

Lifli serilerde, eğilme deneyi sırasında orta noktada 3 mm sehim değerine kadar yük taşıyabilmesine rağmen çoklu çatlak gelişimi olmamıştır. Bu duruma ek olarak en fazla tokluk değerine sahip örnekler lifli örneklerdir.

Serilerin eğilme dayanımları ve tokluk değerleri Tablo 8.3'de gösterilmiştir. Tablo 8.2 incelendiğinde lifli örneklerin enerji yutma kapasitesinin kontrol numunesine göre 10 kat arttığı görülmektedir.

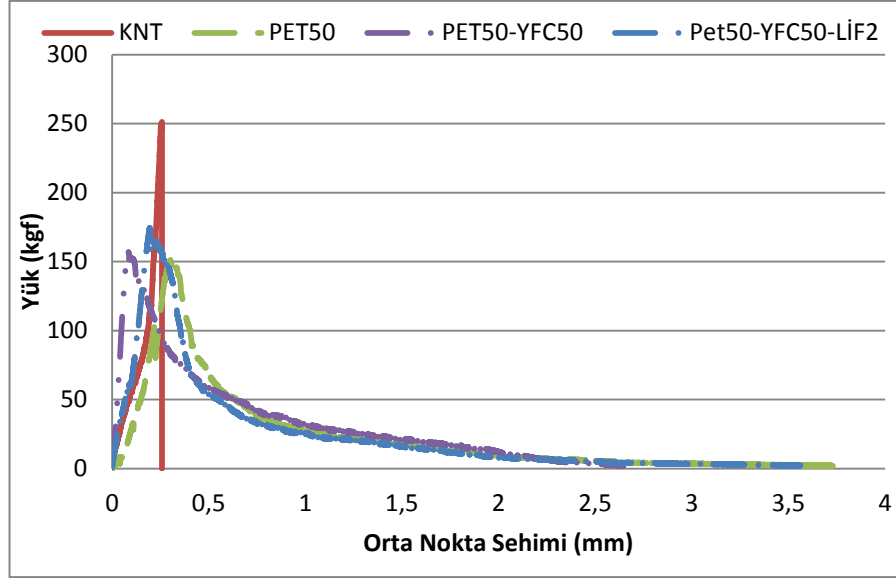


Şekil 8.4 28 gün kür edilmiş karışımların yük-sehim grafikleri.

Tablo 8.3 Hazırlanan 28 gün kür edilmiş karışımların eğilme dayanımı ve tokluk değerleri.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Tokluk (N.mm)
KNT	0	8,2	136
Pet50	0	4,6	456
Pet50-YFC50	0	4,3	706
Pet50-YFC50-Lif2	2	4,4	999

Hazırlanan karışımlar 56 gün su küründe kalmış örneklerin yük-sehim davranışları Şekil 8.5’de gösterilmiştir. Diğer yük-sehim davranışlarına benzer şekilde kontrol numunesi kırılana kadar doğrusal bir davranış gösterip kırılma yükünden sonra dik bir düşüş yapmaktadır. 28 günlük yük-sehim eğrilerine bakıldığında pet agrega ikameli örneklerin tamamı aynı yük değerlerinde kırılırken 56 gün sonunda yapılan eğilme deneyinde lifli seriler agregalı seriler içerisinde en fazla kırılma yüküne sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun, yüksek fırın cürufunun dayanıma olan olumlu etkisinin sonucunda kırılma yüklerindeki artışa bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu duruma ek olarak 56 günlük örneklerdeki yük-sehim eğrilerinin kuyruk bölgelerindeki uzamalarda artış olduğu gözlemlenmiştir.



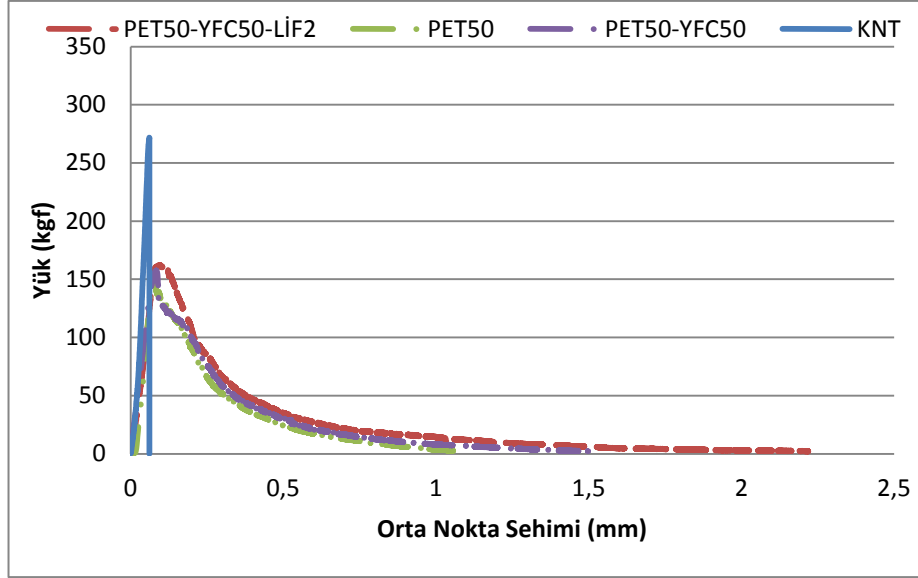
Şekil 8.5 56 gün kür edilmiş karışımların yük-sehim grafikleri.

Tablo 8.4’de 56 gün kürde bekleyen örneklerin eğilme dayanımları ve tokluk değerleri gösterilmiştir. Serilerin toklukları karşılaştırıldığında yüksek fırın cürufu ikamesinin harcın tokluğunu arttırdığı, pet lifin ise eğilme dayanımını arttırdığı ancak tokluğunu aynı oranda arttıramadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 8.4 56 gün kür edilmiş karışımların eğilme dayanımı ve tokluk değerleri.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Tokluk (N.mm)
KNT	0	7,6	214
Pet50	0	4,6	500
Pet50-YFC50	0	4,8	922
Pet50-YFC50-Lif2	2	5,2	930

Serilen 90 gün su küründe kalmış örneklerinin yük-sehim davranışları Şekil 8.6’da gösterilmiştir. Kontrol örnekleri en fazla yükte kırılırken, pet agrega ikameli örnekler yaklaşık olarak aynı yükte kırılmışlardır. Ancak pet agrega ikameli örneklerde maksimum yükte çatlama gerçekleşmesine rağmen, sehim yaparak yük taşımaya devam etmişlerdir. Pet lif ikameli örnekler 2,2 mm sehime kadar yük taşıyabilmişlerdir.



Şekil 8.6 90 gün kür edilmiş karışımların yük-sehim grafikleri.

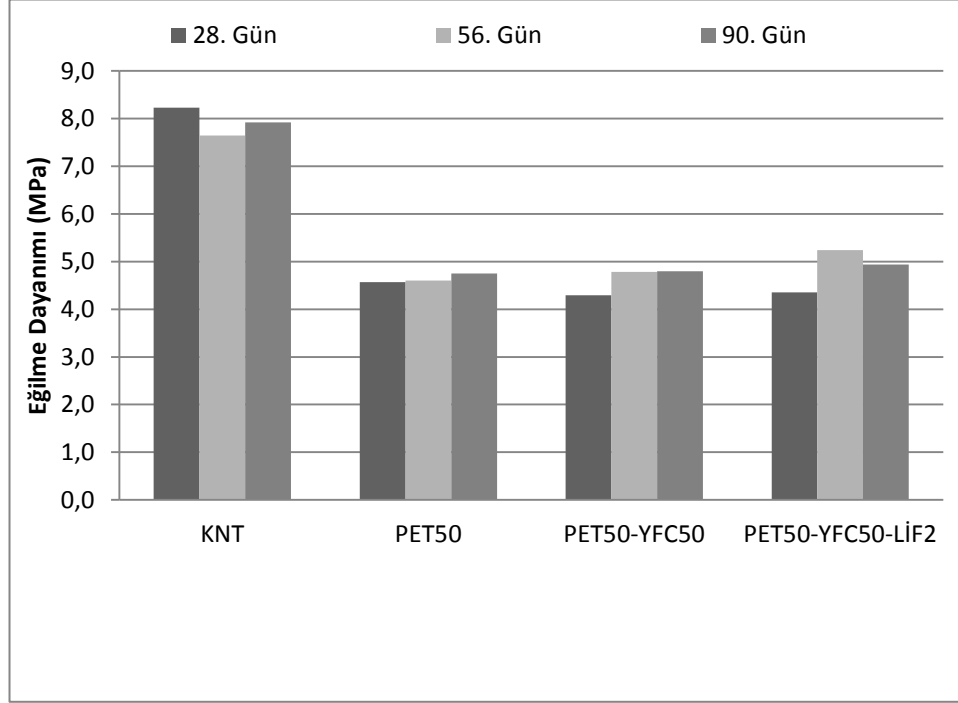
90 gün su küründe kalan örneklerin ortalama eğilme dayanımları ve tokluk değerleri Tablo 8.5’de gösterilmiştir. En tokluk değeri lif içeren örneklere aittir. Kontrol örneklerinden yaklaşık 8 kat daha fazla tokluğa sahiptir.

Tablo 8.5 90 gün kür edilmiş karışımların eğilme dayanımı ve tokluk değerleri.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama Tokluk (N.mm)
KNT	0	7,9	70
Pet50	0	4,8	390
Pet50-YFC50	0	4,8	470
Pet50-YFC50-Lif2	2	4,9	583

Hazırlanan karışımlara 28, 56 ve 90 gün sonunda yapılan eğilme deneyleri sonucunda eğilme dayanımları Şekil 8.7’de karşılaştırılmıştır. Kontrol ve PET50 serilerinin 90. Güne kadar ölçülen eğilme dayanımlarında zamana bağlı bir artış gözlenmemiştir. Cüruf içeren örneklerde ilk 56 günde belirgin bir artış olmuş, ancak 56 günden sonra bu artış yavaşlamış ve 90. günde neredeyse sabitlenmiştir. Cürufli

örneklerin eğilme dayanımlarındaki artış, cürufun ara yüzeyi (ITZ) geliştirmesinin bir sonucu olarak yorumlanmaktadır.



Şekil 8.7 Hazırlanan karışımların 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri.

8.3.3 Basınç Deneyi Sonuçları

Yer karosu üretimi için beyaz çimento, renkli agrega ve pet agregalar kullanılarak yapılan karışımlarda 28, 56 ve 90 gün su küründe kalmış örneklere eğilme sonrası basınç deneyi yapılmıştır. Bölüm 7’de belirlenen dozajlarda malzemeler kullanılarak hazırlanan serilerin 28 günlük eğilme sonrası basınç dayanımları ölçülmüştür. 28 günlük dayanım sonuçlarında en fazla basınç dayanımını kontrol numuneleri göstermiştir. %50 pet agrega ikameli karışıma yüksek fırın cürufu ikamesi basınç dayanımını bir miktar düşürmüştür. Karışıma lif eklenmesi, taze haldeyken sıkıştırma sırasında harç içerisinde meydana gelen boşluklar nedeniyle basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur.

Tablo 8.6’da 28 gün sonundaki basınç dayanımının değerleri ve kontrol örneğine göre azalma oranları verilmiştir.

Tablo 8.6 28 gün kür edilmiş karışımların basınç dayanımı ve basınç dayanımında azalma oranları.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımında Azalma (%)
KNT	0	56,2	100
Pet50	0	34,6	62
Pet50-YFC50	0	30,8	55
Pet50-YFC50-Lif2	2	28,3	50

Deneylerde, 28 günlük basınç dayanımları belirlenen serilerin, 56 gün su küründe kaldıktan sonra eğilme sonrası basınç deneyleri yapılmış ve basınç dayanımı sonuçları karşılaştırılmıştır. Kontrol ve pet agregalı karışımların basınç dayanımında belirgin bir artış gözlenmezken yüksek fırın cürufu ikameli örneklerin basınç dayanımlarında zamana bağlı olarak artış gözlemlenmektedir.

Tablo 8.7’de 56 gün suda kür olan sertleşmiş harçların basınç dayanımlarının sayısal değerleri ve kontrol karışımına göre dayanımda azalma oranları verilmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarıyla karşılaştırıldığında yüksek fırın cürufu ikameli örneklerde belirgin bir artış söz konusudur. Pet agrega ile çimento matrisi arasındaki ara yüzeyin zamana bağlı olarak geliştiği düşünülmektedir.

Tablo 8.7 56 gün kür edilmiş karışımların basınç dayanımı ve basınç dayanımında azalma oranları.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımında Azalma (%)
KNT	0	56,5	100
Pet50	0	35	62
Pet50-YFC50	0	33,2	59
Pet50-YFC50-Lif2	2	29,5	52

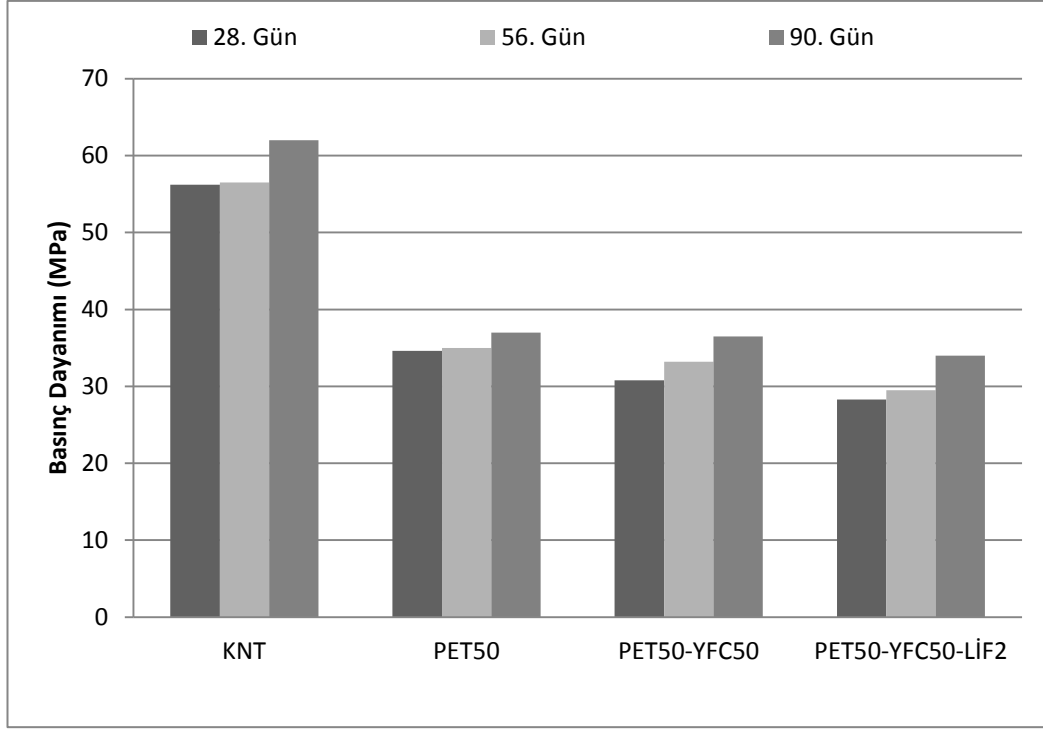
Karışımlar 90 gün boyunca suda kür edildikten sonra eğilme sonrası basınç deneyi yapılmıştır. Basınç deneyi sonuçları Tablo 8.8’de verilmiştir. Yüksek fırın cürufllu örneklerin basınç dayanımı cürufsuz örneklerin basınç dayanımına ulaşmıştır. Buna rağmen pet agrega ikameli hiçbir örnek kontrol karışımlarının basınç dayanımına yetişememişlerdir. 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarıyla karşılaştırıldığında, cürufllu örneklerde dayanım artışı olmakta ve buna bağlı olarak kontrol örneklerine göre basınç dayanımlarındaki azalma oranında da düşüş meydana gelmiştir.

Şekil 8.8’de, hazırlanan serilerin 28, 56 ve 90 gün sonunda basınç dayanımlarındaki değişimler gösterilmiştir. Zamana bağlı olarak bütün örneklerde artış meydana gelmiştir.

Ancak cüruf içeren karışımlarda zamana bağlı olarak düzenli ve daha yüksek oranda artış olması cürufun örneklerin dayanımına olan olumlu etkisi olarak gösterilebilmektedir. Buna rağmen pet agrega ikameli örneklerde, cürufllu örnekler 90. günde cüruf bulunmayan PET50 serisine ait örneklerin basınç dayanımına çıkabilmiştir. Pet lif içeren cürufllu örnekler, lifsiz cürufllu örneklerin basınç dayanımlarından daha düşük değerlerde kırılmışlardır.

Tablo 8.8 90 gün kür edilmiş karışımların basınç dayanımı ve basınç dayanımında azalma oranları.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımında Azalma (%)
KNT	0	58	100
Pet50	0	37	60
Pet50-YFC50	0	36,5	60
Pet50-YFC50-Lif2	2	34	55



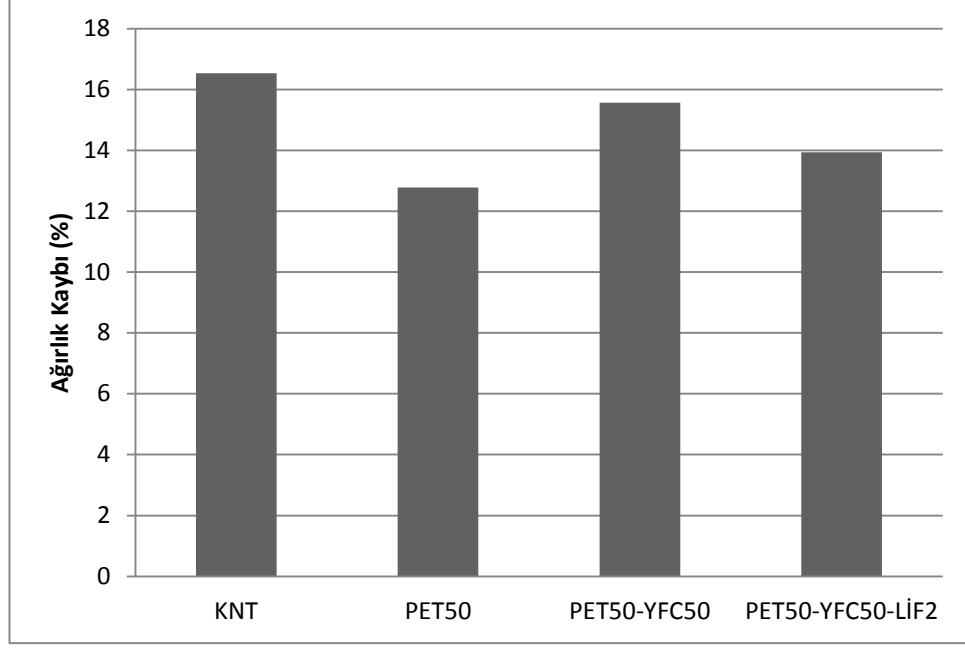
Şekil 8.8 Hazırlanan karışımların 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri.

8.3.4 Aşınma Deneyi Sonuçları

Su küründe 28, 56 ve 90 gün beklenen örnekler üzerinde Modifiye Los Angeles ve Dory Yüzeysel Aşınma Deney'leri yapılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Hazırlanan karışımlara 28 gün sonunda Modifiye Los Angeles ve Dory Aşınma Deneyleri yapılmıştır. Modifiye Los Angeles Deneyi sonuçları Şekil 8.9'da gösterilmektedir. 28 günlük kontrol örnekleri en düşük aşınma direncini göstermektedir. %50 pet agregalı örnekler en fazla aşınma direncini gösterirken, hacimce %50 pet agregalı karışıma ağırlıkça %50 yüksek fırın cürufu ve pet lif eklenmesi aşınma dayanımını bir miktar azaltmıştır.

Yüksek fırın cürufunun zamana bağlı dayanım kazanması 28 günlük örneklerin dayanımlarının, cürufsuz pet agregalı örneklerin aşınma dayanımına yetişememesine neden olmuştur. Lif ikamesi aşınma dayanımını cürufu ikameye göre %2 arttırsa da sadece pet agregalı örneklerin aşınma dayanımına yetişememiştir.

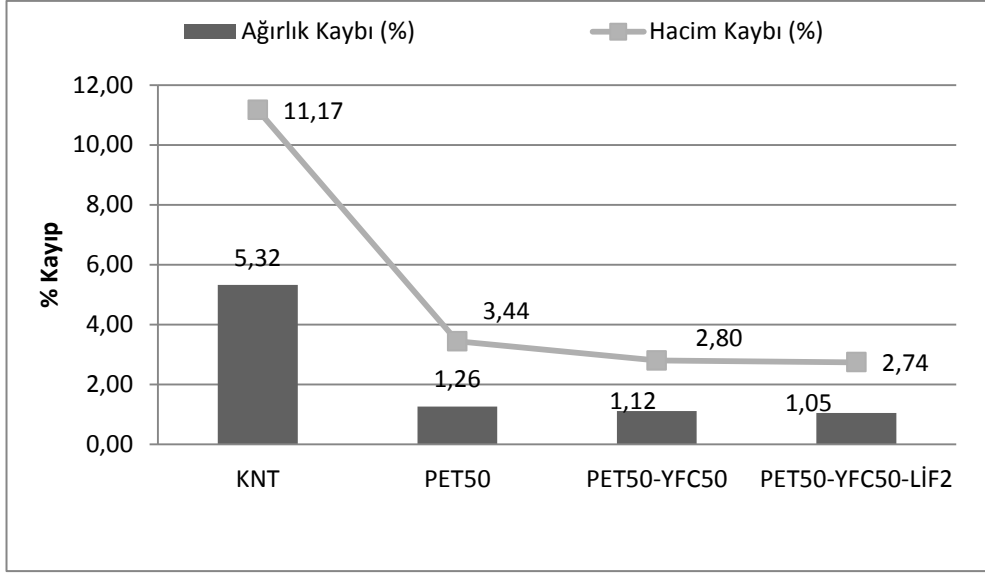


Şekil 8.9 Hazırlanan karışımların 28 gün sonunda modifiye los angeles deneyi sonrası aşınma değerleri.

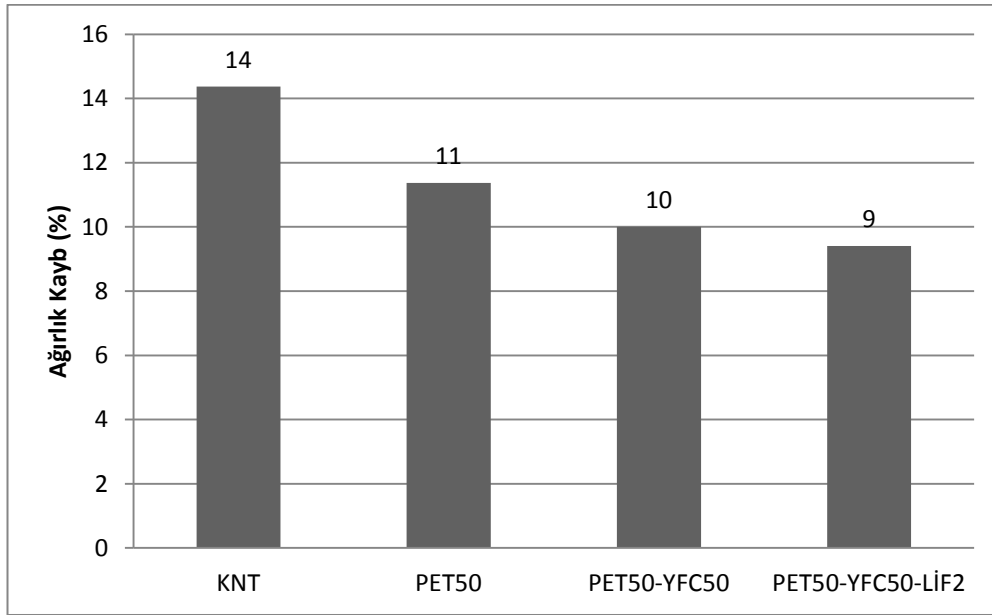
Aynı karışımların 28 gün sonunda yapılan yüzeysel aşınma deneyinin sonuçları Şekil 8.10'da gösterilmiştir. Yapılan yüzeysel aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde Modifiye Los Angeles deney sonuçlarını destekleyecek veriler elde edilmiştir. Pet agreganın aşınma dayanımına olan etkisi açıkça görülmektedir. Yüzeysel aşınma deneyi sonuçlarında cürufun aşınma üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmektedir.

Hazırlanmış olan karışımlara 56 gün sonra Modifiye Los Angeles ve yüzeysel aşınma deneyleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları Şekil 8.11'de gösterilmektedir.

Kontrol ve cürufsuz karışımların aşınma dayanımlarında belirgin bir değişim gözlenmezken, yüksek fırın cürufu ikameli örneklerin aşınma dayanımlarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Yüksek fırın cürufunun, matris ara yüzeyini zamana bağlı olarak güçlendirmesi örneklerin aşınma dayanıklılığını arttırmıştır. Cüruf ikameli serilere eklenen pet lifler matrisi bir arada tutarak, deney sırasında harç örneklerinden parça kopmalarını azaltmıştır.

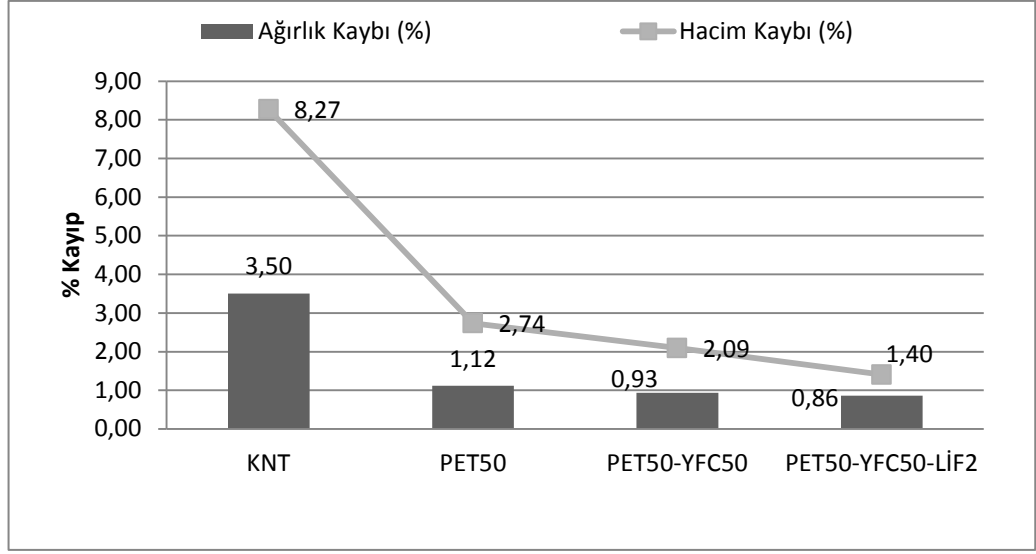


Şekil 8.10 Hazırlanan karışımların 28 gün sonunda dory yüzysel aşınma deneyi sonrası aşınma değerleri.



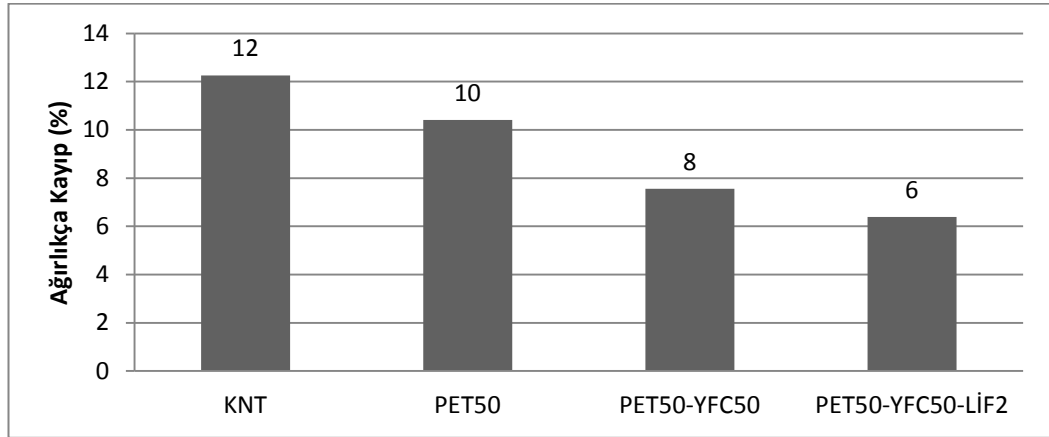
Şekil 8.11 Hazırlanan karışımların 56 gün sonunda modifiye los angeles deneyi sonrası aşınma değerleri.

56 gün su küründe bekletilen sertleşmiş harçların yüzeyel aşınma deneyi sonuçları Şekil 8.12’de gösterilmiştir. Yüzeyel aşınma deneyi sonucunda kontrol örnekleri hacimlerinin %8,27’ sini kaybederken pet agrega, cüruf ve pet lif ikameli örnekler hacimlerinin sırayla %2,1 ve 1,4’ünü kaybetmiştir. Pet agregalı karışım içerisine cüruf ve pet lif eklenmesi aşınma dayanımını arttırmıştır.



Şekil 8.12 Hazırlanan karışımların 56 gün sonunda dory yüzysel aşınma deneyi sonrası aşınma değerleri.

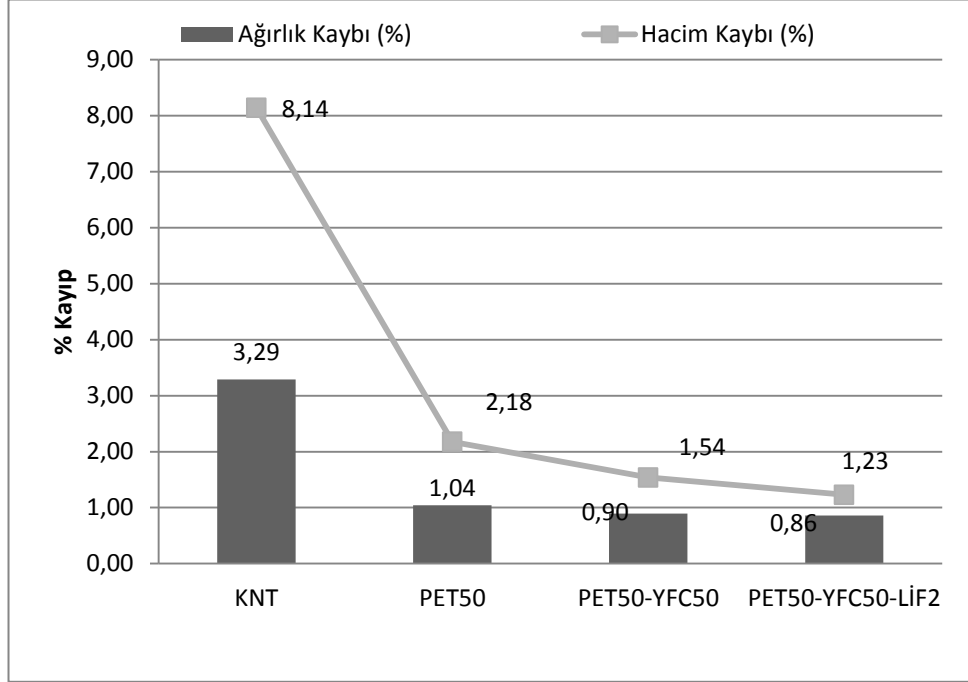
Hazırlanan karışımlara 90. gün sonunda Modifiye Los Angeles ve Dory Yüzeysel Aşınma Deney'leri yapılmıştır. Modifiye Los Angeles deney sonuçları Şekil 8.13'de gösterilmiştir. Cürüflü örneklerde 28 ve 56 günlük aşınma deney sonuçlarıyla benzer şekilde en az aşınma gerçekleşmiştir. Lifler aşınma dayanımını arttırmıştır.



Şekil 8.13 Hazırlanan karışımların 90 gün sonunda modifiye los angeles deneyi sonrası aşınma değerleri.

Yukarıda 90 günlük Modifiye Los Angeles Aşınma Deneyi sonuçları verilen serilerin yüzeysel aşınma deneyi sonuçları Şekil 8.14'de verilmiştir. Kontrol ve PET50 örneklerinde zamana bağlı aşınma dirençlerinde çok fazla değişim

gözlenmezken yüksek fırın cürufu içeren örneklerin aşınma dayanımlarında belirgin artış meydana gelmiştir.

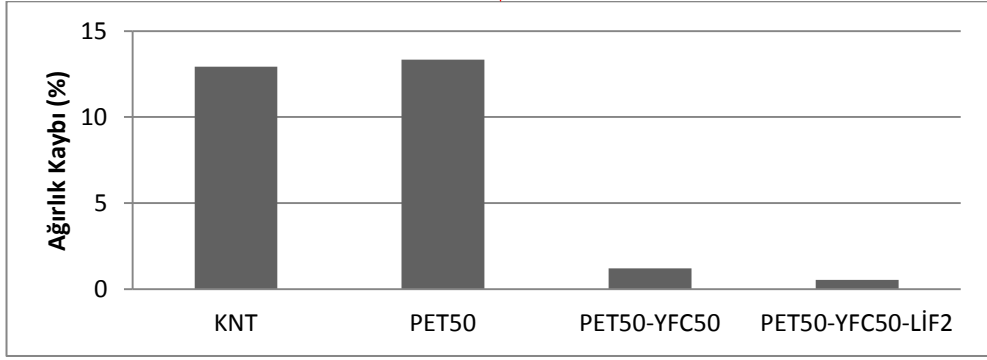
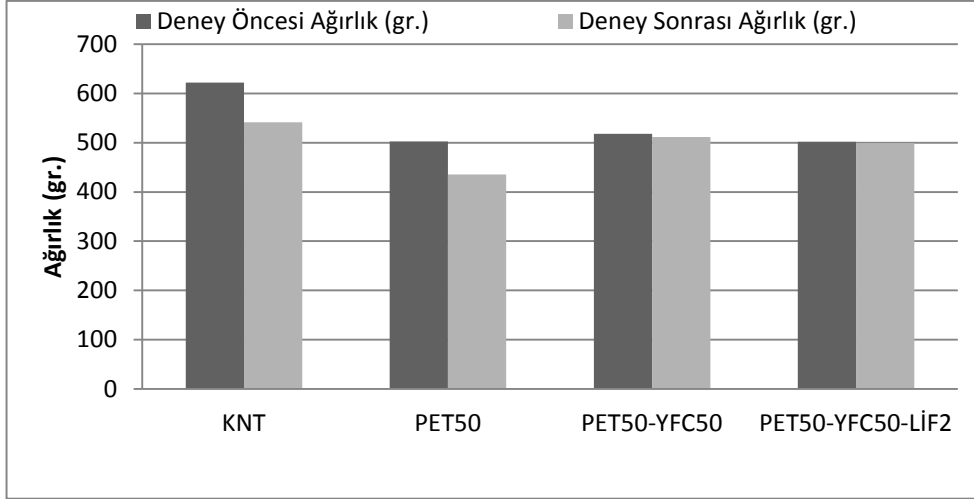


Şekil 8.14 Hazırlanan karışımların 90 gün sonunda dory yüzysel aşınma deneyi sonrası aşınma değerleri.

8.3.5 Donma- Çözülme Deneyi Sonuçları

Ege üniversitesi yapı malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan donma-çözülme kabininde yapılan deney sonrasında örnekler kurutularak ağırlık kaybı ölçülmüş, deney yapılabilecek durumda olan örnekler eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları yapılaş sırasına göre gösterilmiştir.

Donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrasında aynı serideki örnek ağırlıkları tartılarak ortalaması alınmıştır. Şekil 8.15'de serilerin deney öncesi ve deney sonrası kuru ağırlıkları tartılarak ortalaması alınmıştır. Donma-çözülme deneyi sonrasında örneklerin durumları Şekil 8.16'da gösterilmiştir. Donma-çözülme sonrasında kontrol örnekleri ve %50 pet agrega ikameli örneklerde parçalanma ve ufalanma gözlenirken, yüksek fırın cürufu ikameli ve lif içeren örneklerde gözle görülür hiçbir bozulma olmamıştır.

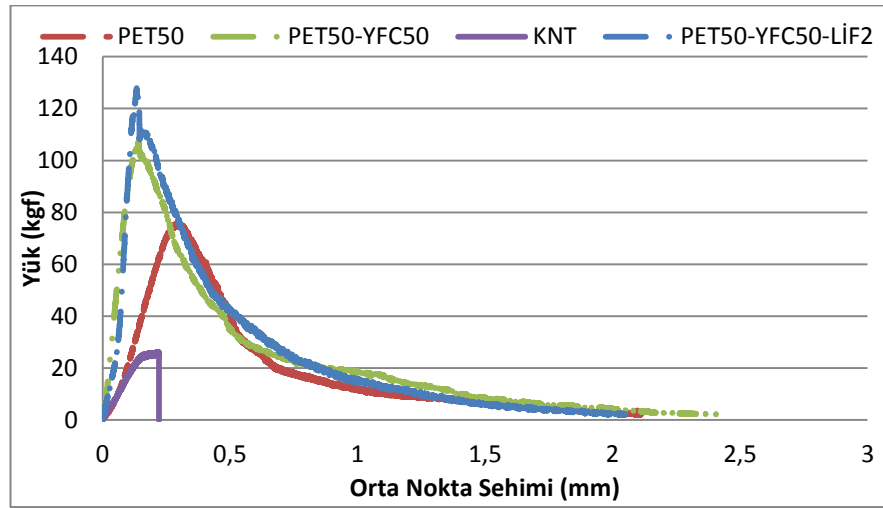


Şekil 8.15 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi sonrasında ağırlık kayıpları.



Şekil 8.16 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi sonrasında görünüşleri.

Donma-çözülme deneyi yapıldıktan sonra eğilme deneyi yapılabilecek durumda olan örneklere eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri yapılmıştır. Zarar görmüş örneklerin deney sonrası yük-sehim eğrileri çizilerek Şekil 8.17’de gösterilmiştir. Kontrol örneklerinde çok düşük yükte kırılırken %50 pet agrega içeren örnekler daha yüksek yüklerde kırılmaktadırlar. Lifli ve cürufllu örnekler en yüksek yükte kırılmışlardır.

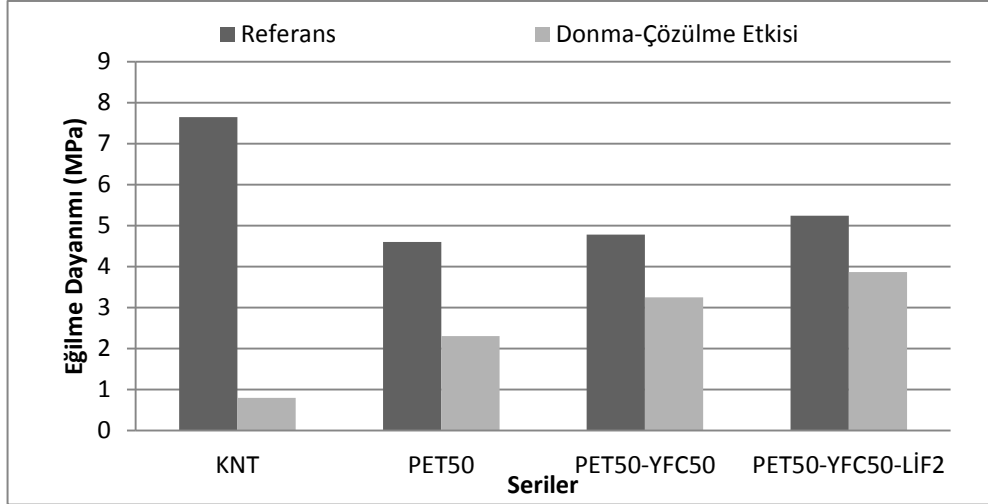


Şekil 8.17 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi sonrasında eğilme deneyinde çizilen yük-sehim grafikleri.

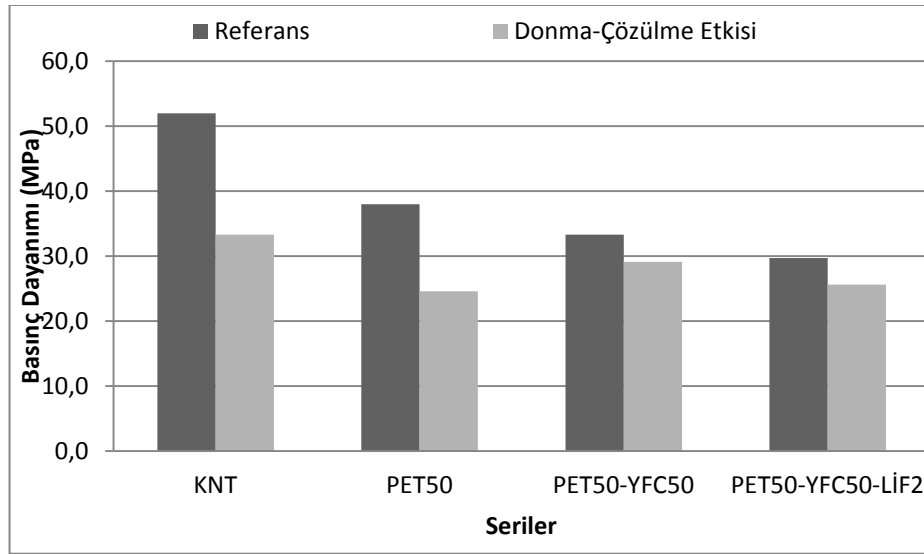
Şekil 8.18’de donma-çözülme olayı etkisinde kalmış ve aynı süre içerisinde su küründe bekletilen referans örneklerinin eğilme dayanımları gösterilmiştir. Donma-çözülme etkisinden en çok etkilenen kontrol örnekleri olmuştur. Pet agregalı örneklerde de dayanım kaybı olmasına rağmen kontrol örneklerindeki kadar büyük bir düşüş gözlenmemiştir. Yüksek fırın cürufu ikameli örnekler örneklerin durabilitesini arttırdığı için donma-çözülme etkisinden çok az oranda etkilenmişlerdir. Cürufllu örneğe lif eklenmesi donma-çözülme hasarını daha da azaltmış ve az miktarda eğilme dayanım kaybıyla en iyi performansı göstermiştir.

Donma-çözülme etkisinde kalan ve referans örneklerine eğilme sonrası basınç deneyleri yapılmıştır. Şekil 8.19’da basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlarla eğilme deneyi sonuçları arasında orantı mevcuttur. Ancak aynı serilerin basınç dayanımı kaybı, eğilme dayanımındaki kayıp oranından daha az

olmuştur. Bu durumun, eğilme deneyi sırasında yük altındaki örnek üzerinde oluşan tek bir çatlakın göçmeye daha hızlı ulaşmasına neden olurken, basınç deneyi sırasında oluşan çatlakın göçmeyi çok etkilemediği, çatlakların çoğalması sonucu göçme olduğu sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 8.18 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi öncesi ve sonrasında eğilme dayanımları.



Şekil 8.19 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi sonrasında basınç dayanımları.

Tablo 8.9’da donma-çözülme çevrimi sonrasında zarar gören ve referans örneklerine yapılan eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri sonucunda eğilme dayanımları, toklukları, basınç dayanımları ve kayıp oranları gösterilmiştir. Donma-çözülme sonrasında kontrol örneklerinin referans örneklerine göre eğilme

dayanımlarının %90'ı, basınç dayanımlarının %36'sını kaybetmiştir. Eğilme dayanımında en iyi performansı lifli ve cürüflü örnekler, basınç dayanımında ise cürüflü örnekler göstermiştir.

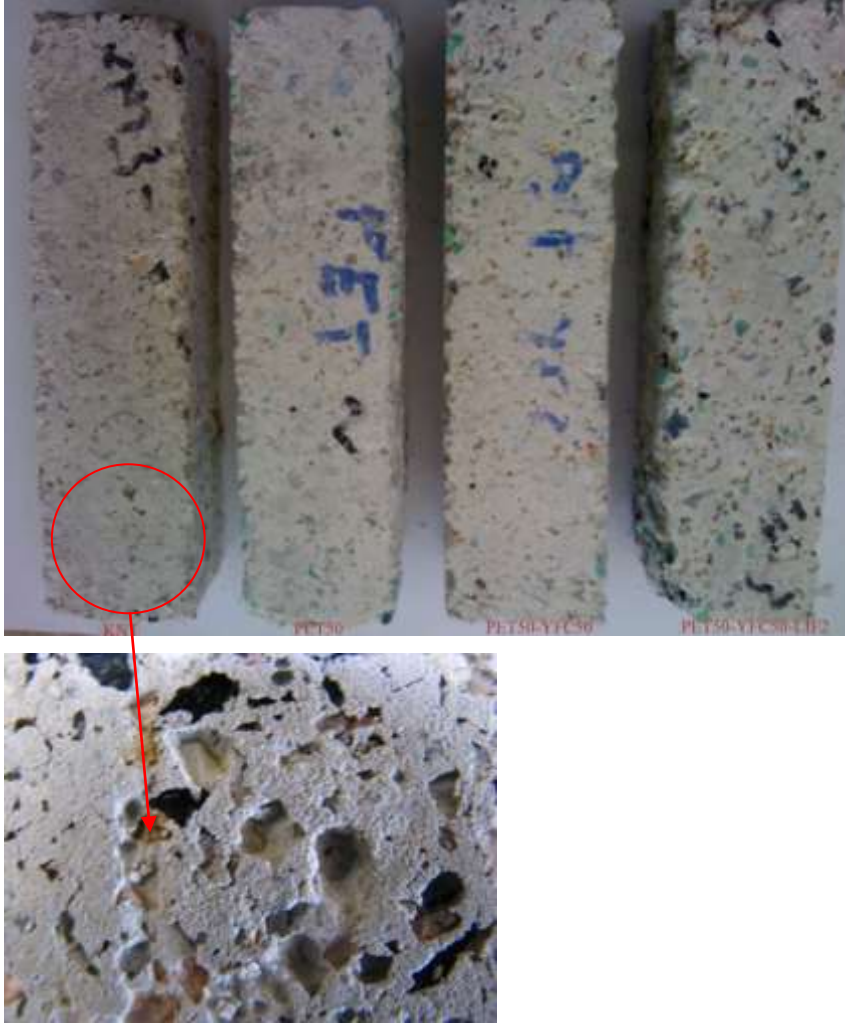
Tablo 8.9 Hazırlanan karışımların donma-çözülme etkisi öncesi ve sonrası eğilme, basınç ve tokluk değerleri.

Seriler	Deney Öncesi Eğilme D. (MPa)	Deney Sonrası Eğilme D. (MPa)	Eğilme D. Azalma (%)	Deney Öncesi Basınç D. (MPa)	Deney Sonrası Basınç D. (MPa)	Basınç D. Azalma (%)	Deney Öncesi Tokluk (N.mm)	Deney Sonrası Tokluk (N.mm)
KNT	7,6	0,8	89,6	52,0	33,3	36,0	214	36,1
Pet50	4,6	2,3	49,9	38,0	24,6	35,3	500	396
Pet50-YFC50	4,8	3,3	32,0	33,3	29,1	12,6	922	520
Pet50-YFC50-Lif2	5,2	3,9	26,2	29,7	25,6	13,8	930	534,7

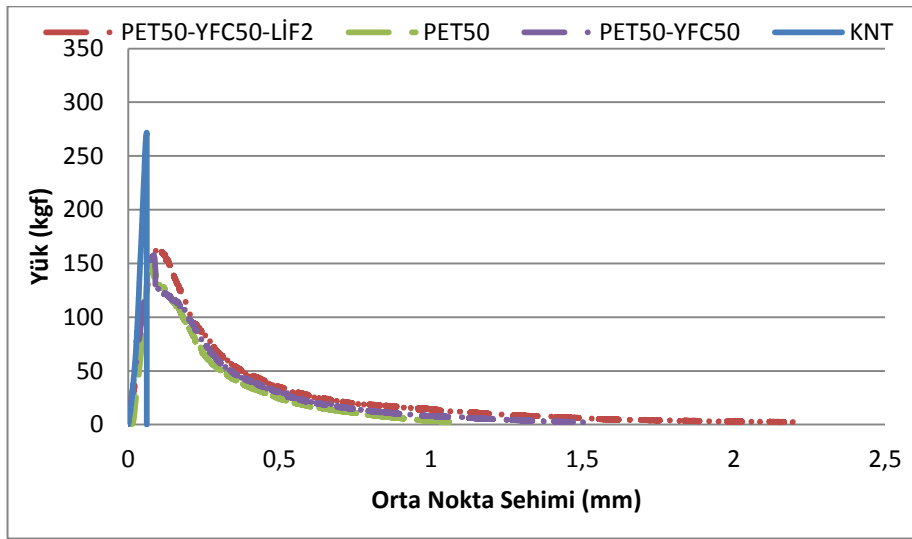
8.3.6 Asit Deneyi Sonuçları

Pet (polietilen tereftalat), asit etkilerine karşı dayanıklı olduğu bilinmektedir. Bu durumun, harç örnekleri üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla 28 gün suda kür olan örnekler, 56 gün boyunca %5 hidroklorik asit çözeltisinin içerisine bırakılmıştır. 56 günün sonunda örnekler yıkanıp kurutulularak eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri yapılmıştır. Dayanım kayıplarını belirlemek amacıyla deney örnekleri ile birlikte referans örnekleri hazırlanmış ve aynı zamanda kırım yapılmıştır. Deney sonrası örneklerin görüntüleri Şekil 8.20'de gösterilmiştir.

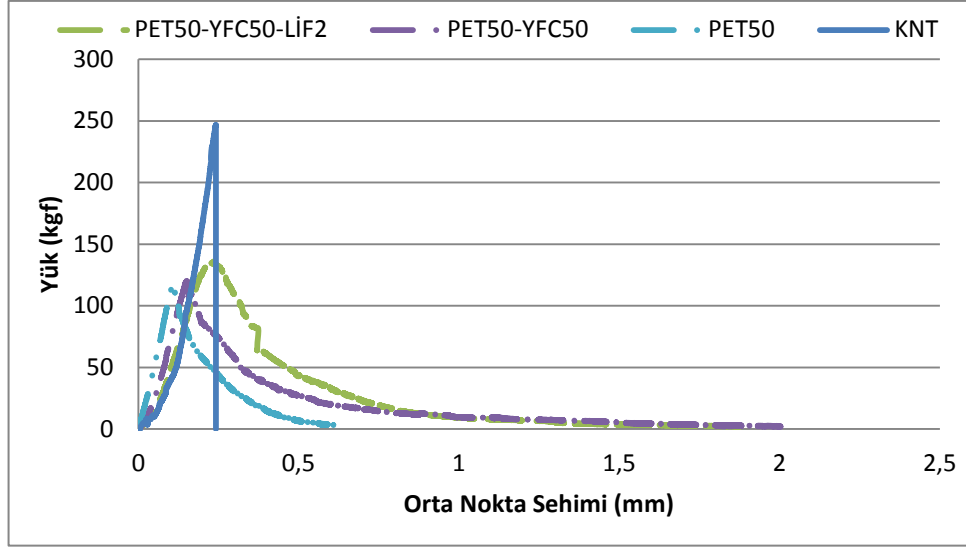
Asit saldırısına maruz kalan ve referans örneklerinin eğilme deneyi sonucunda bulunan yük-sehim eğrileri Şekil 8.21 ve Şekil 8.22'de gösterilmiştir. Asit deneyi sonrasında bütün örneklerde kırılma yüklerinin düştüğü ve yük-sehim eğrilerinin yataylaştığı görülmektedir



Şekil 8.20 Hazırlanan karışımların asit etkisi sonrası görüntüleri.



Şekil 8.21 Hazırlanan karışımların asit etkisi öncesinde yapılan eğilme deneyi sonucunda yük-sehim grafikleri.



Şekil 8.22 Hazırlanan karışımların asit etkisi sonrasında yapılan eğilme deneyi sonucunda yük-sehim grafikleri.

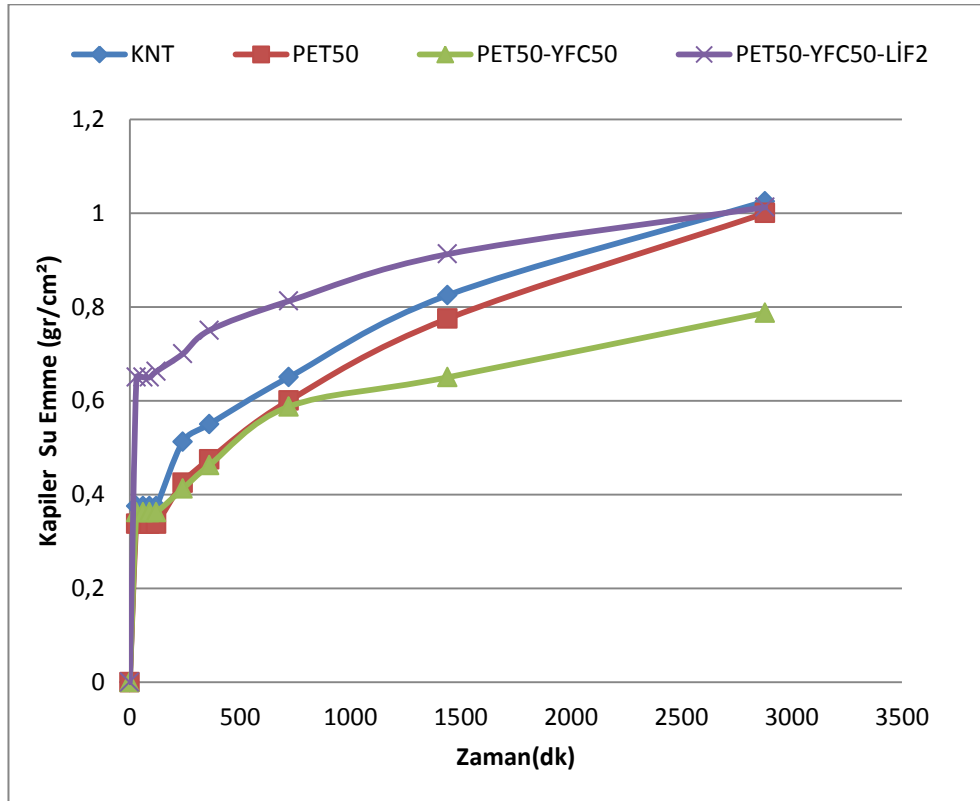
Asit etkisinde kalan ve referans örneklerinin eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 8.10’da karşılaştırılmıştır. Asit sonrası örneklerin eğilme ve basınç dayanımları azalırken, sadece kontrol örneklerinin tokluğu artmıştır. Bu durumun, asit deneyi sonrasında matris ve doğal agreganın asitle temas eden kısmının çözülmesi ve yumuşaması sonucunda yük-sehim eğrisinin yataya yaklaşması sonucunda tokluğun bir miktar artmasına neden olmuştur. Eğilme dayanımları karşılaştırıldığında kontrol örnekleri en iyi performansı göstermiştir. Yüksek fırın cürufunun asit etkisine etkisi olmamakla beraber lifler asit etkisinden sonra bile matrisi bir arada tutarak eğilme dayanımını geliştirmiştir.

Tablo 8.10 Hazırlanan karışımların asit etkisi öncesi ve sonrası eğilme, basınç ve tokluk değerleri.

Deney Elemanları	Lif Dozajı (%)	Deney Öncesi Eğilme D. (MPa)	Deney Sonrası Eğilme D. (MPa)	Eğilme D. Azalma (%)	Deney Öncesi Basınç D. (MPa)	Deney Sonrası Basınç D. (MPa)	Basınç D. Azalma (%)	Deney Öncesi Tokluk (N.mm)	Deney Sonrası Tokluk (N.mm)
KNT	0	7,9	7,5	5,2	62,0	41	36,3	70	193
Pet50	0	4,8	3,6	25,0	37,0	28	24,3	390	214,5
Pet50-YFC	0	4,8	3,7	23,6	36,5	25,2	31,0	470	405
Pet50-YFC50-Lif2	2	4,9	4,1	16,0	34,0	24,7	27,4	583	514,5

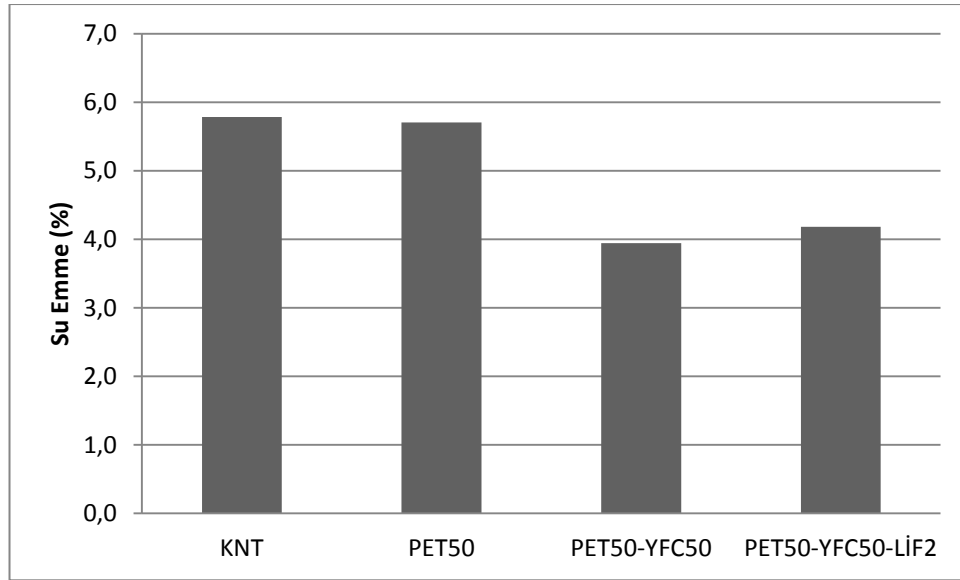
8.3.7 Kapiler Yolla Su Emme Deneyi Sonuçları

Hazırlanan karışımlar 28 gün boyunca su küründe bekletildikten sonra kapiler yolla su emme deneyi için belirli seviyeye kadar su dolu kapta, sadece numune tabanı suyla temas edecek şekilde bırakılarak 48 saat boyunca belirli zamanlarda ağırlık ölçümleri alınmıştır. Serilerin kapiler su emme değerleri Şekil 8.23’de gösterilmektedir. İlk 30 dakikada pet lif içeren cürufli örneklerin kılcal yolla su emme miktarı diğer örneklerden oldukça yüksektir. Ancak 48 saatin sonunda diğer örneklerin su emme miktarlarına yaklaştığı görülmüştür. Bu durumun, karışım sırasında pet liflerin harçta oluşturduğu boşluklu yapı neticesinde meydana geldiği görülmektedir. Pet agrega ve curuf ikameli PET50-YFC50 örneklerinin 12 saat sonunda diğer serilerden daha az miktarda su emmesi, cürufun sertleşmiş harçtaki kılcal boşlukların azalmasını sağladığını ortaya çıkarmaktadır. KNT ve PET50 örneklerinin birbirlerine yakın miktarlarda su emmesi, pet agreganın kılcal boşlukların oluşmasında etken olmadığını göstermektedir.



Şekil 8.23 Hazırlanan karışımların kapiler yolla su emme oranları.

48 saat sonunda örnekler tamamen suya batırılmış ve 24 saat su içerisinde bekletilmiştir. 24 saat sonra kuru yüzey ağırlıkları tartılarak kapiler yolla su emme değerleri % olarak bulunmuş ve Şekil 8.24'de gösterilmiştir. Curuf ikamesinin su emmeyi azalttığı deney sonucunda belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Lif içeren örneklerdeki boşluk miktarının fazla olduğunu kapiler yolla su emme deneyi ile belirlenmesinin üzerine su emme oranının KNT ve PET50 örneklerinden daha düşük çıkması çimentodan daha ince taneli cürufun boşlukları daha iyi doldurmasının bir sonucu olduğunu göstermektedir. Kontrol ve PET50 örneklerinin su emme değerleri yakındır. Bu nedenle pet agregaların, kapiler yolla su emmesi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını ortaya koymaktadır.

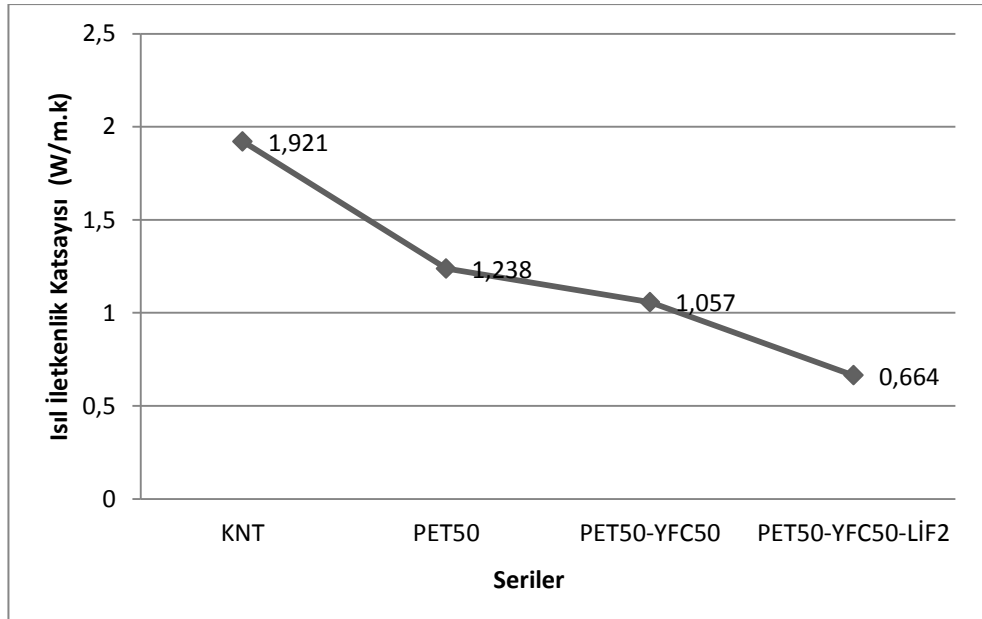


Şekil 8.24 Hazırlanan karışımların su emme oranları.

8.3.8 Isıl İletkenlik Deneyi Sonuçları

Deney kapsamında hazırlanan 5x10x2,5 cm boyutlarındaki prizmatik örnekler 28 gün boyunca su küründe bekletildikten sonra 40 °C de 3 gün boyunca kurutularak Şekil 8.25'de gösterilen hotwire yöntemiyle ısı iletkenlik katsayısı değerleri ölçülmüştür. Her seriye ait ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır. İçerisinde pet agregası bulunmayan kontrol karışımının ısı iletkenlik katsayısı değeri 1,9 W/m.k iken %50 pet agregası ikame yapıldığında ısı iletkenlik katsayısı %36 azalarak 1,24

W/m.k değeri elde edilmektedir. %50 pet agrega ikameli karışıma çimento yerine ağırlıkça %50 oranında yüksek fırın cürufu ikame yapılması ısı iletkenlik katsayısı değerini %45 azaltmıştır. Pet agrega ve cürufu örneğe hacimce %2 pet lif eklenmesi ısı iletkenlik katsayısını %66 azaltmıştır. Pet agrega, yüksek fırın cürufu ve pet lif ısı iletkenlik katsayısını düşüren etkenlerdir.

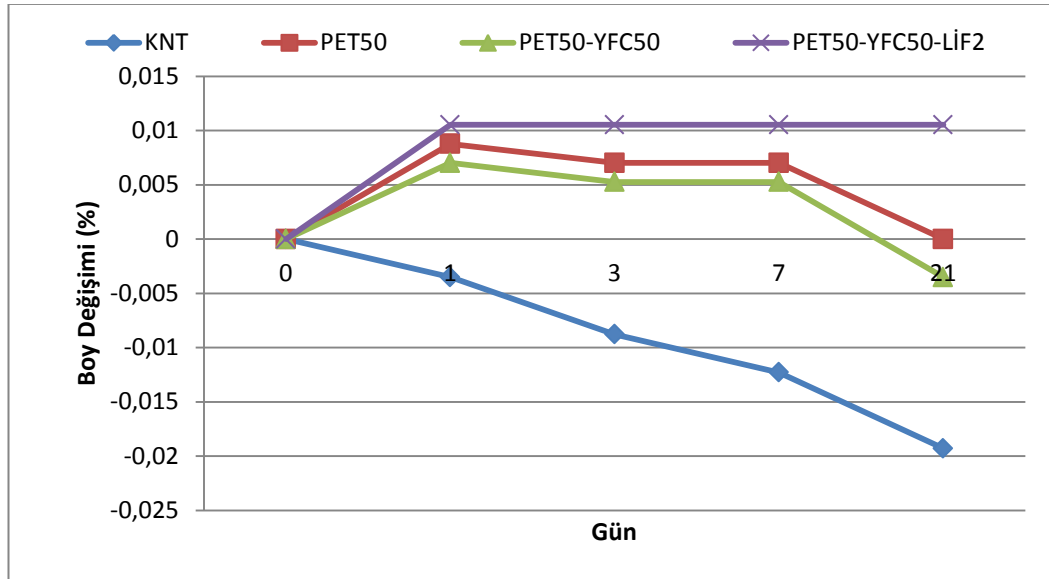


Şekil 8.25 Hot wire yöntemi ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri.

Serilerin ısı iletkenlik katsayılarının farklı olması, karışımda kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarıyla doğru orantılı olarak değişmektedir. Doğal ve kırma agreganın ısı iletkenlik değeri Pet'in (polietilen tereftalat) ısı iletkenlik katsayısının üzerindedir. Bunun sonucunda doğal agregalı harç karışımının ısı iletkenlik katsayısı diğer serilerinden daha yüksektir.

8.3.9 Alkali Etkisi

Alkali etkisine maruz bırakılan örneklerin ölçüm sonuçları Şekil 8.26'da gösterilmektedir. Kontrol örneklerinde bir miktar büzülme gözlenirken, pet agregalı örneklerde az miktarda genişleme meydana gelmektedir. Pet agregalı örneklerde büzülme olmazken tam tersine bir miktar genişlemektedir. Uzun dönem büzülme değerleri okunarak daha sağlıklı sonuçlar alınması gerekmektedir.

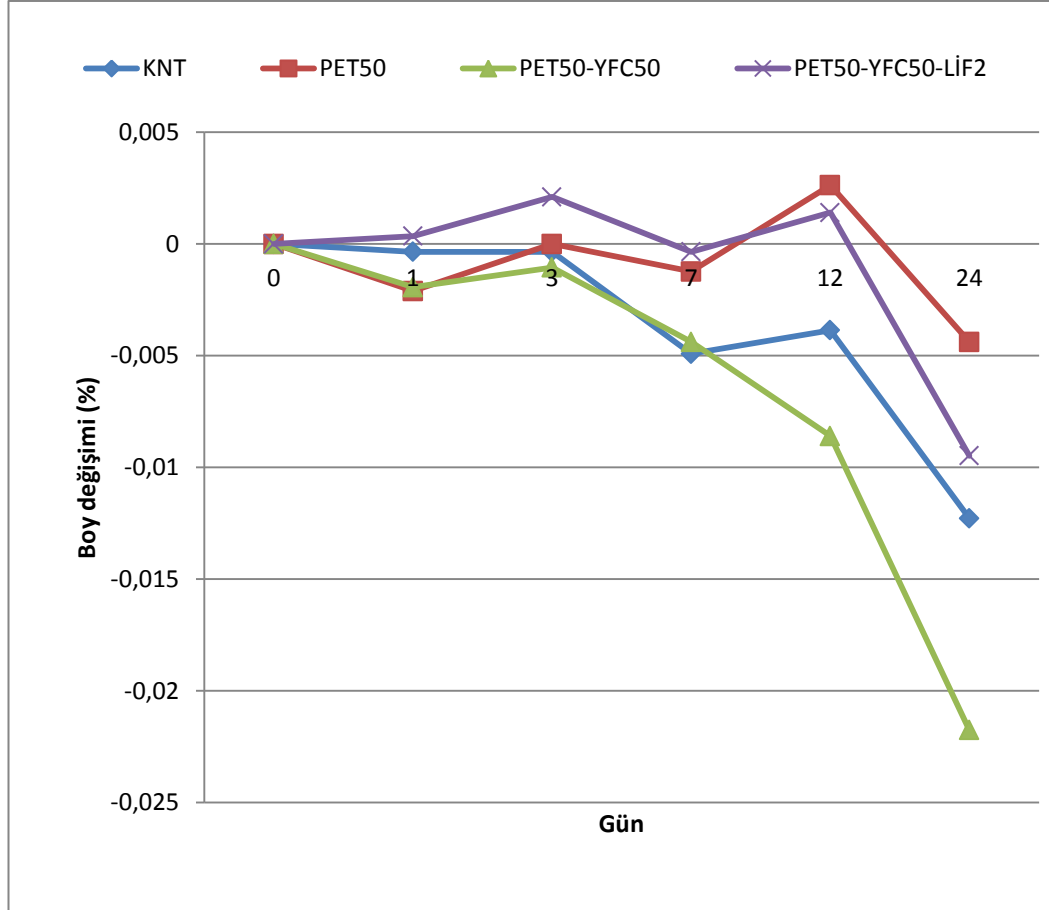


Şekil 8.26 Alkali etkisine maruz kalan örneklerin boy değişimi.

8.3.10 Bünyesel ve Kuruma Büzülme

Pet agreganın, harçların bünyesel ve kuruma büzülmesine etkisini araştırmak için yapılan deney sonuçları gösterilmektedir. Bünyesel büzülme için 20 °C'de %90 nem ortamında bulunan örneklerin boy değişimleri Şekil 8.27'de gösterilmektedir. Bünyesel büzülme ortamında, pet agreganın boy değişimlerine önemli bir etkisi

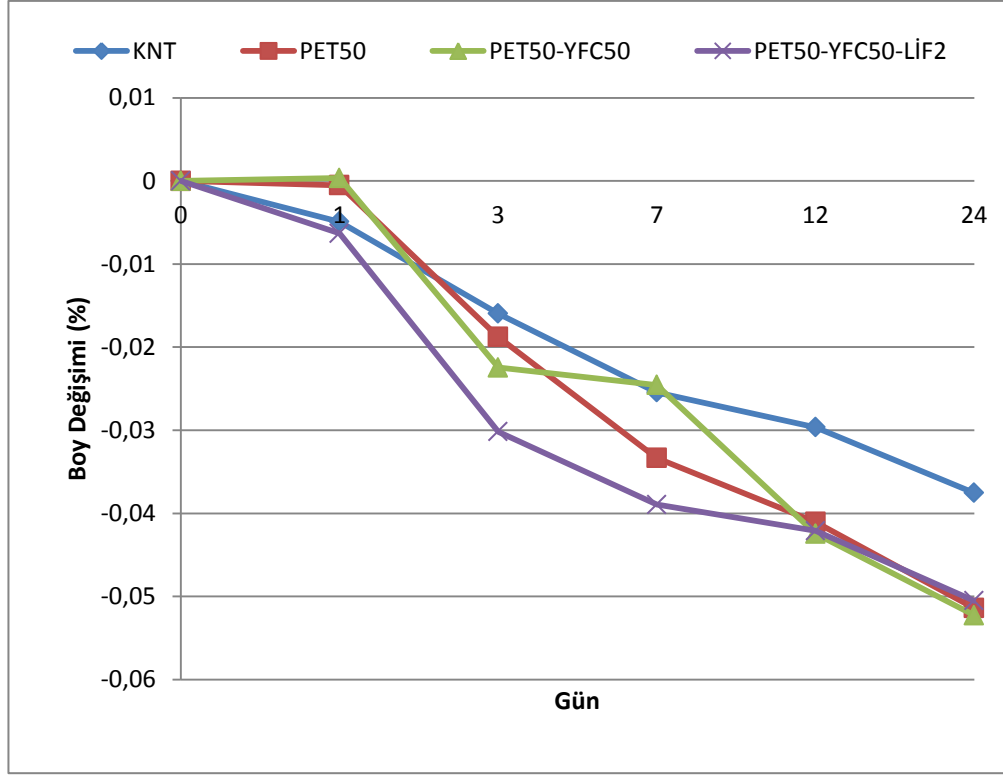
gözlenmemiştir. En fazla büzülmeyi %0,02 oranla cüruf ikameli örnekler gösterse de risk grubunda olmadığı düşünülmektedir. Cürufllu örneklerin daha fazla büzülmesi, yüksek fırın cürufunun daha ince olması ve özgül ağırlığının düşük olması nedeniyle daha fazla bağlayıcı hacminin olması nedeniyle gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 8.27 Bünyesel büzülme etkisine bırakılan örneklerin boy değişimleri

Pet agregaların kuruma büzülmesine olan etkilerini araştırmak için harç çubukları 30 °C'de %50 nem ortamında bırakılarak 1, 3, 7, 12, 24. günlerde boy ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 8.28'de gösterilmektedir.

En az büzülmeyi kontrol örnekleri gösterirken, pet agrega ve pet lif ikamesi kuruma büzülmesi değerini az da olsa arttırmıştır. Bu durumun, pet agrega ve lif ikamesinin daha boşluklu bir harç meydana getirdiği ve harcın içerisindeki reaksiyona girmeyen bağımsız suyun yer değiştirmesi sonucunda büzülmenin gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 8.28 Kuruma büzülmesi etkisine bırakılan örneklerin boy değişimleri.

8.4 Pet Agregalı Karışımların Kullanım Alanları

Pet agregalar geri dönüşüm atığı olması nedeniyle, beton içerisinde kullanılmasının çevre kirliliğinin önüne geçmek için uygun bir kullanım alanı olabileceği düşünülmektedir. Ancak takoz ve agrom tipi pet agregalar belirli bir oranda, geri dönüşümden imalat yapan fabrikalarda tekrar kullanılabilir. Ayrıca boya sanayilerinde, plastik boya üretiminde de kullanıldığı bilinmektedir.

Gold Elyaf Fabrikası'ndan alınan bilgilere göre takoz ve agrom tipi pet agregaların piyasa değerinin 1000-1500 TL/ton arasında satıldığı bilinmektedir. Bu fiyatın, piyasada satılan doğal-kırma renkli agrega fiyatlarından 1,5-3,0 kat daha fazla olması, çimentolu kompozit üretiminde kullanılabilirliği konusunda ekonomik olmayabileceğini düşündürmektedir. Ancak, PET agregaların özgül ağırlıklarının, doğal agregaların özgül ağırlıklarının yarısına eşit olması, ton başına iki kat daha fazla miktarda pet agrega olması anlamına gelmektedir. Buna ek olarak pet agreganın değişik renklerde bulunabilmesi, ısı iletkenlik değerinin düşük olması ve yüksek

aşınma direncine sahip olması, çimentolu kompozit üretiminde kullanılabilirliğini desteklemektedir. Bu konuda fizibilite çalışmaları yapılabilir.

Ancak deneylerle ispatlanan 80 °C hacim sabitliğinin bozulması ve 240 °C'de erimesi, pet agregaların taşıyıcı sistemde kullanılabilirliğini imkânsız kılmaktadır.

Çeşitli renklerde bulunabilmesi, yüksek aşınma direnci ve düşük ısı iletkenliği nedeniyle parke, bordür, kilit taşı ve çimento kompozitli kaldırım ve peyzaj işlerinde kullanılabilmesi bu elemanlarda avantaj sağlayacaktır.

Dokuz Eylül Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda PET50 tipi karışım oranları kullanarak 30x30x2,5 cm boyutlarında kare plak dökülerek üzeri zımparalanmış ve cilalanmış yer karosu hazırlanmış ve Şekil 8.29 ve Şekil 8.30'da gösterilmiştir.



Şekil 8.29 Pet50 karışımı kullanılarak hazırlanan yer karosu (a).



Şekil 8.30 Pet50 karışımı kullanılarak hazırlanan yer karosu (b).

Yer karosu, bordür taşı ve yüzey kaplamalarında pet agrega kullanımının avantaj ve dezavantajları şunlardır:

Avantajları;

- Pet agregaların düşük özgül ağırlıklarına sahip olması ile daha hafif kaplama malzemeleri üretilebilir. Bu durum yapıya gelen düşey yükleri azaltır ve taşıyıcı sistemin kesitlerini azaltır. Ayrıca taşıma maliyetini de azaltır.
- Pet agregalar yüksek aşınma direncine sahiptirler ve renkte bulunabilirler. Yüksek aşınma etkisine maruz kalan yerlerde pet agregalı yer karolarının kullanılması, bakım maliyetini azaltır ve canlı bir görünüm kazandırır.
- Kaldırım taşlarında pet agregaların kullanılması tokluğu artırır. Bu şekilde her hangi bir darbe sonucunda enerjinin bir kısmını sönümler. Bu durum kaldırım taşlarındaki parçalanmayı azaltır, bakım maliyetini düşürür.
- Pet agregalı harçların düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olması, ısı kaybını azaltır, enerji tasarrufu sağlar.
- Pet agregalar geri dönüşüm atığı olduğu için, kaplama malzemelerinde kullanılması çevre kirliliğini azaltır.

- Pet agregaların kimyasal etkilere dayanıklılığı, doğal agregalardan daha fazla olduğu için kimyasal etkilere maruz kalan kaplamalarda kullanılması, bakım maliyetini azaltır.
- Pet agregaların su emme değeri sıfır olduğu için daha düşük su/çimento oranında kolayca karıştırılabilirler.

Dezavantajları

- 80 °C ve üzeri sıcaklıklara maruz yerlerde kullanımı sakıncalıdır.
- Pürüzsüz yüzey yapısına sahip olan pet agrega ikameli harç ya da betonlar, doğal agregalı örneklerine göre daha az dayanıma sahiptirler.
- Pet agregaların birim maliyeti, doğal agregalardan daha fazladır.

BÖLÜM DOKUZ

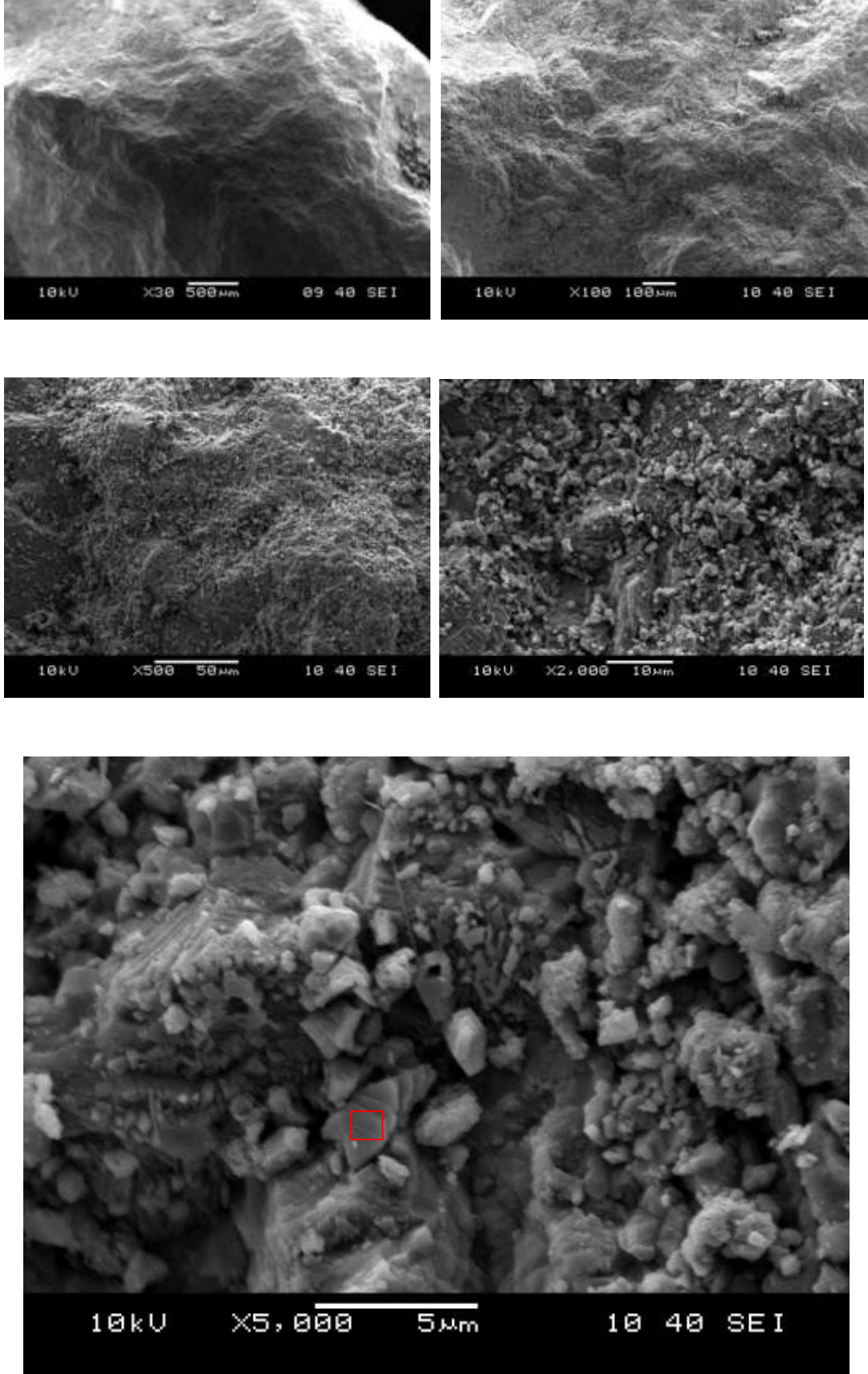
MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

9.1 Deneide Kullanılan Malzemeler ve Sertleşmiş Harçlarda Mikro Yapı İncelemeleri

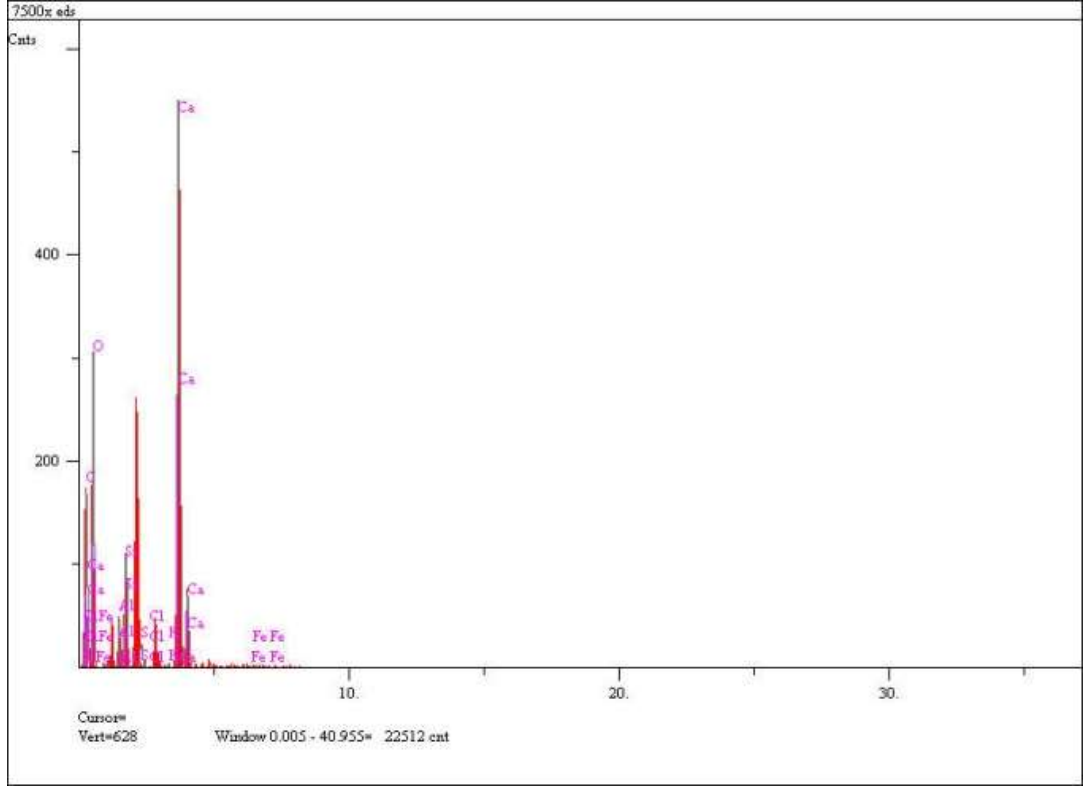
Mikro yapı incelemeleri kapsamında, serilere ait sertleşmiş harçlardan alınan örnekler ve karışımlara dâhil edilen renkli doğal-kırma agregası, takoz ve agrom tipi pet agregası, pet liflerin mikro yapısı incelenmiştir.

Deneilerde kullanılan yedi çeşit renkli doğal-kırma agregaların tamamına sem analizi yapmak ekonomik açıdan mümkün olmadığı için kireçtaşı kökenli beyaz agreganın mikro yapısı incelenmiştir. Şekil 9.1’de kırık yüzeyde incelenen agreganın 30, 100, 500, 2000 ve 5000 kat büyütülmüş görüntüleri yer almaktadır. 30 ve 100 kat büyütmede, girinti ve çıkıntıları olan engebeli bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. 500 ve 2000 kat büyütmede ise pürüzlü bir yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu pürüzlerin daha belirgin görüntüsünü elde etmek için 5000 kat büyütülmüş ve pürüzlü yapıyı oluşturan taneciklerden EDS analizi yapılmıştır. Yapılan analiz Şekil 9.2’de gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucunda renkli agregaların CaCO₃ kökenli olduğu belirlenmiştir.

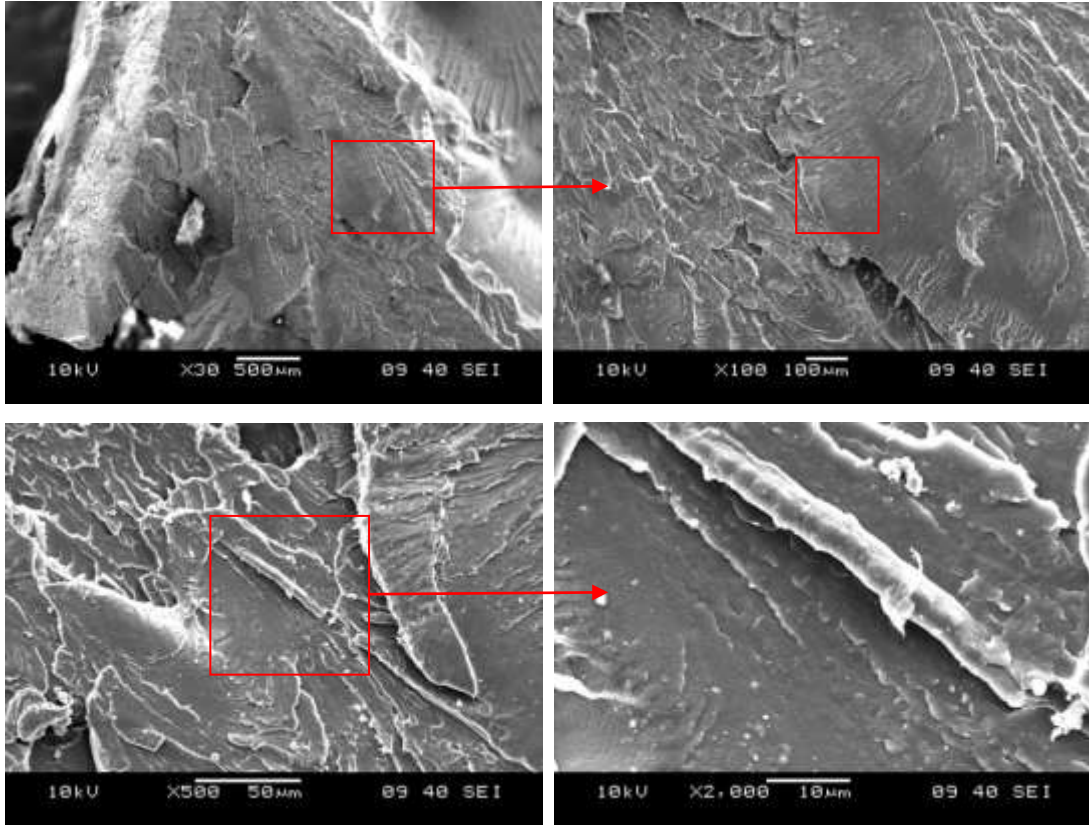
Takoz tipi pet agreganın mikro yapısı Şekil 9.3’de gösterilmektedir. 30, 100, 500, 2000 kat büyütülen görüntülerde takoz tipi pet agreganın yüzey özellikleri belirgin şekilde ortaya çıkmıştır. İmalat sırasında bir bütün halinde bulunan pet granül haline getirilmek için kırılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü kırım esnasında meydana gelmektedir. Bütün takoz tipi petin kesici aletle kesilmesinden kaynaklanan yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. SEM görüntüleri dikkatli bir şekilde incelendiğinde, takoz tipi pet agreganın yüzeyinde meydana gelen pürüzlü yapının, kesici aletin kesim yönü doğrultusunda oluştuğu açıkça görülmektedir. Doğal agregaya kıyasla daha pürüzsüz bir yapıya sahiptir. Bu durum, takoz tipi pet agregası içeren sertleşmiş harçlardaki dayanım kaybını açıklamaktadır.



Şekil 9.1 Doğal agreganın sem analizinde 30, 100, 500, 2000, 5000 kat büyütülmüş görüntüleri.

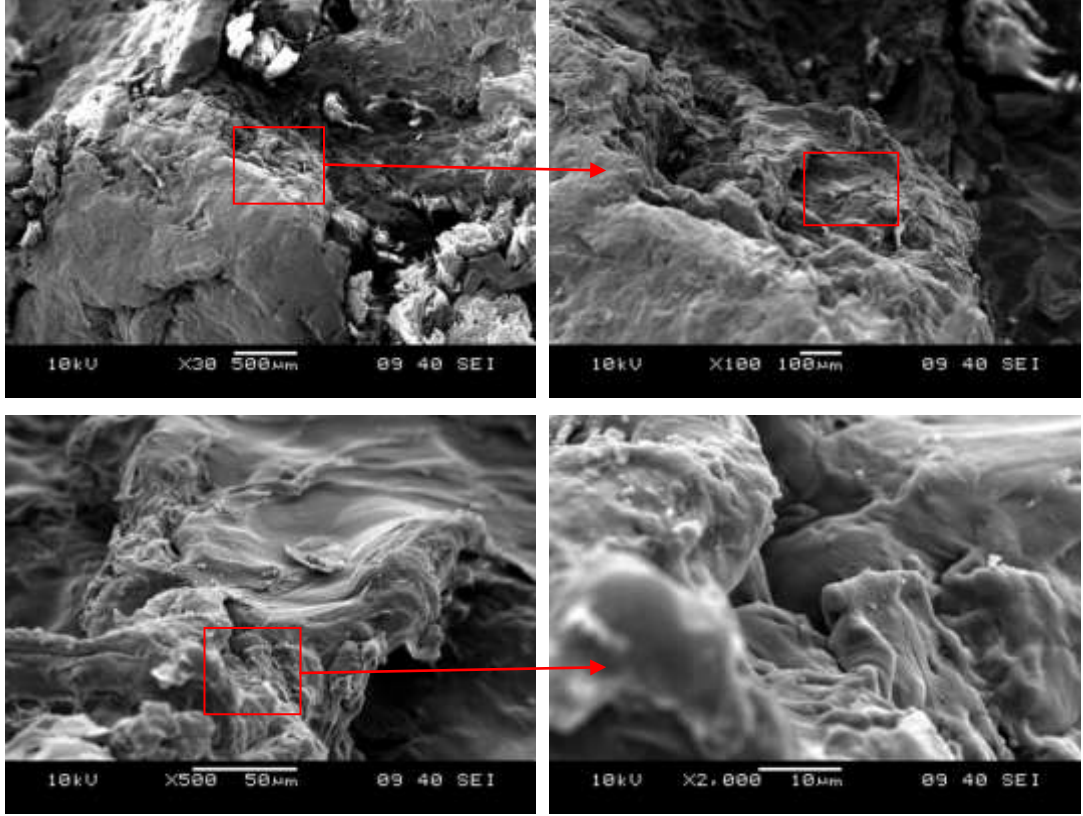


Şekil 9.2 Doğal agrega üzerinde yapılan eds analizi sonucu.



Şekil 9.3 Takoz tipi pet agreganın sem analizinde 30, 100, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri.

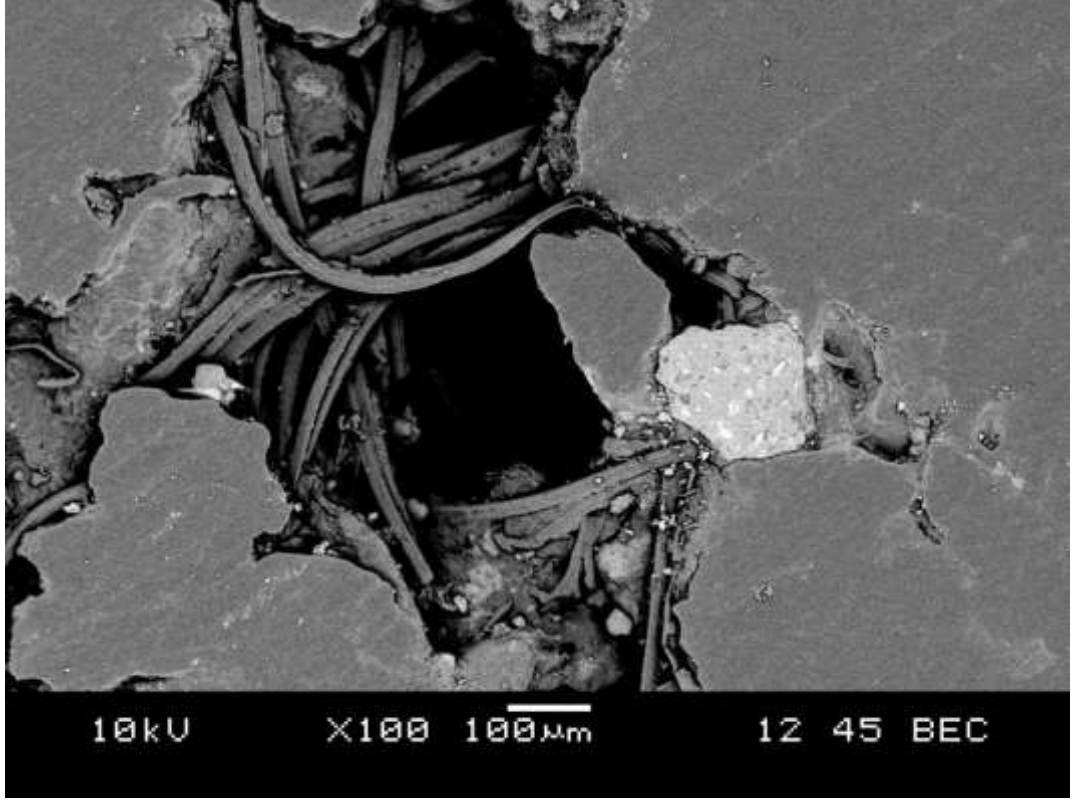
Agrom tipi pet agreganın mikro yapısı Şekil 9.4’de gösterilmektedir. 30, 100, 500, 2000 kat büyütülerek çekilen görüntülerde, takoz tipi pet agreganın oldukça karışık ve pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 9.4 Agrom tipi pet agreganın sem analizinde 30, 100, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri.

Agromun yapısı, matrisle agrega arasındaki aderansın artmasına ve buna bağlı olarak dayanım artışını da sağlamaktadır. Ancak agrom tipi pet agrega, kusurlu liflerin eritilip soğutulması sonucunda elde edildiği için boşluklu ve zayıf bir yapıya sahiptir. Bu durum, agrom tipi pet agreganın takoz tipi pet agregaya göre daha zayıf olmasını ve çatlağın agrom tipi pet agreganın içinden geçmesini açıklamaktadır.

Şekil 9.5’de argomun kesitinin parlak yüzey görüntüsü BEC modunda 100 kat büyütülerek çekilmiştir. Agreganın içerisinde erimeyen lifler ve liflerin boşluklu bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Boşluklu yapının 150-200 μm çapında olduğu görülmektedir. Agreganın içerisinde rastgele meydana gelen bu genişlikteki bir boşluğun, agreganın dayanımını olumsuz yönde etkilediği görülmektedir.

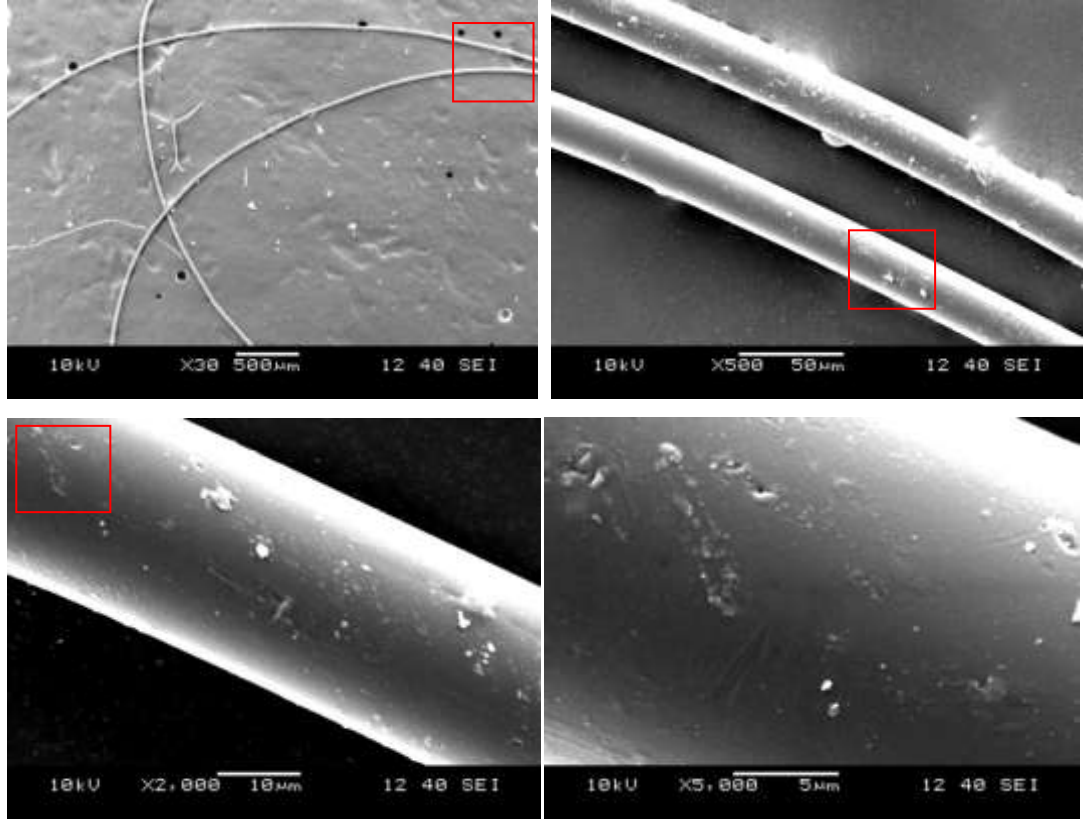


Şekil 9.5 Agrom tipi pet agreganın sem analizinde 100 kat büyütülmüş görüntüsü.

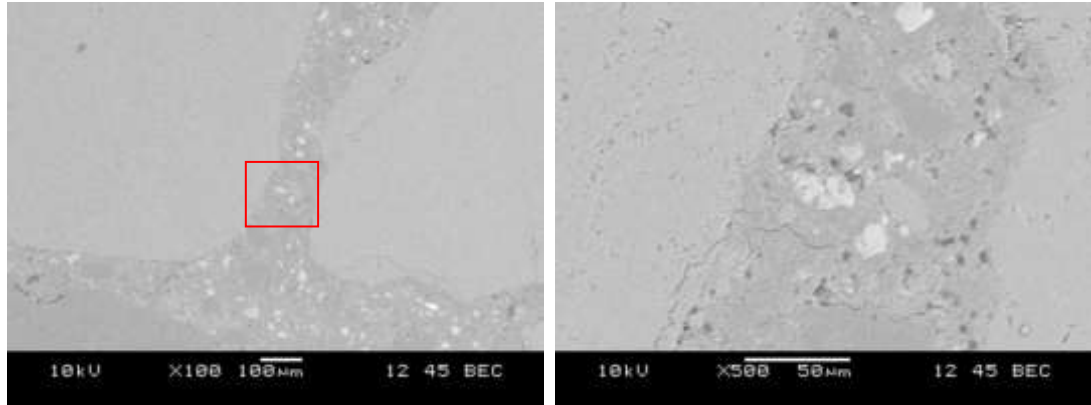
Pet lifin 30, 500, 200 ve 5000 kat büyütülerek çekilen görüntüleri Şekil 9.6'da yer almaktadır. Pet lifin pürüzsüz yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Liflerin kalınlığı yaklaşık olarak 40 µm kadardır.

Hazırlanan karışımlar 28 gün su küründe bekletildikten sonra parlak ve kırık yüzeyde SEM analizi yapılarak doğal agrega ve pet agregaların matrisle ara yüzeyi ve cürufun ara yüzeye olan etkisi araştırılmış, kontrol ve pet agrega içeren serilerden EDS analizi yapılmıştır.

28 gün su küründe kalmış kontrol örneklerinden parçalar alınarak kırık ve parlak yüzey analizi yapılmıştır. Şekil 9.7'de parlak yüzeyde 100 ve 500 kat büyütülerek çekilen görüntüleri bulunmaktadır. 2000 kat büyütülerek çekilen görüntüleri bulanık çıktığı için tezde kullanılamamıştır. Yüzeyde görülen çatlakların örnek alma sırasında oluştuğu düşünülmektedir. 500 kat büyütme ile çekilen fotoğrafta matris ile agrega arasındaki zayıf ara yüzey (ITZ) bölgesinin çok az olduğu görülmektedir. Bu durum dayanım artışını sağlamaktadır.



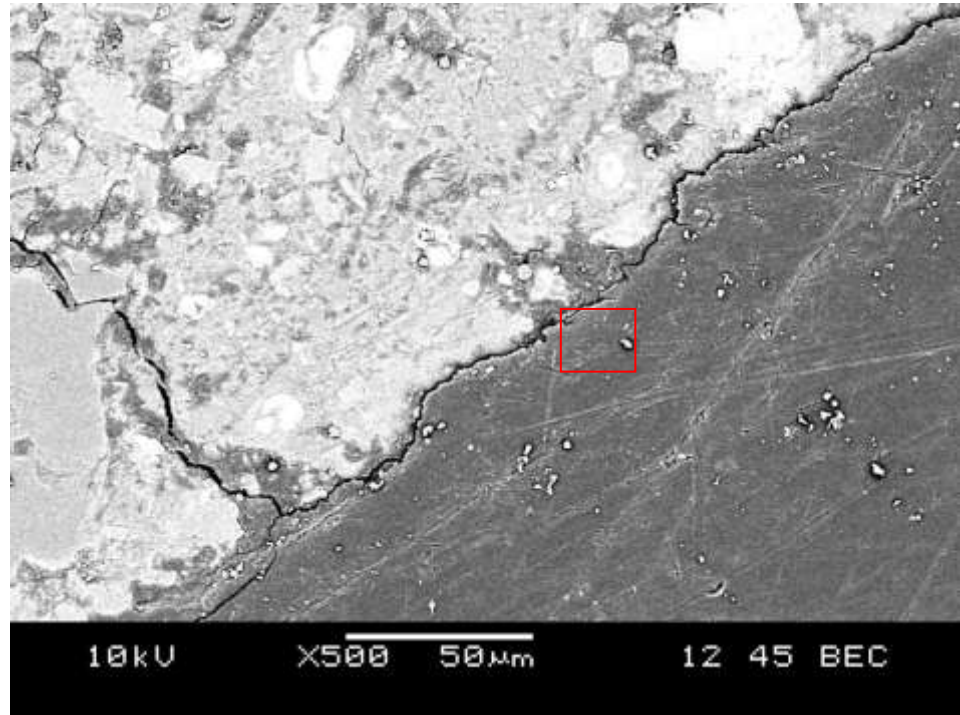
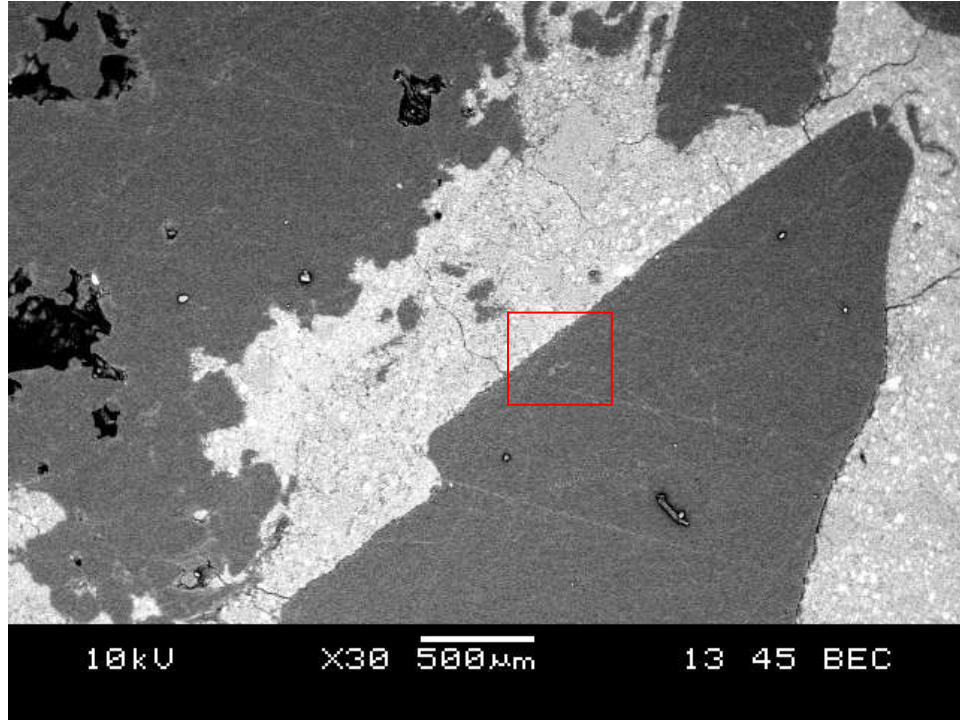
Şekil 9.6 Pet lifin sem analizinde 30, 500, 2000 ve 5000 kat büyütülmüş görüntüleri.



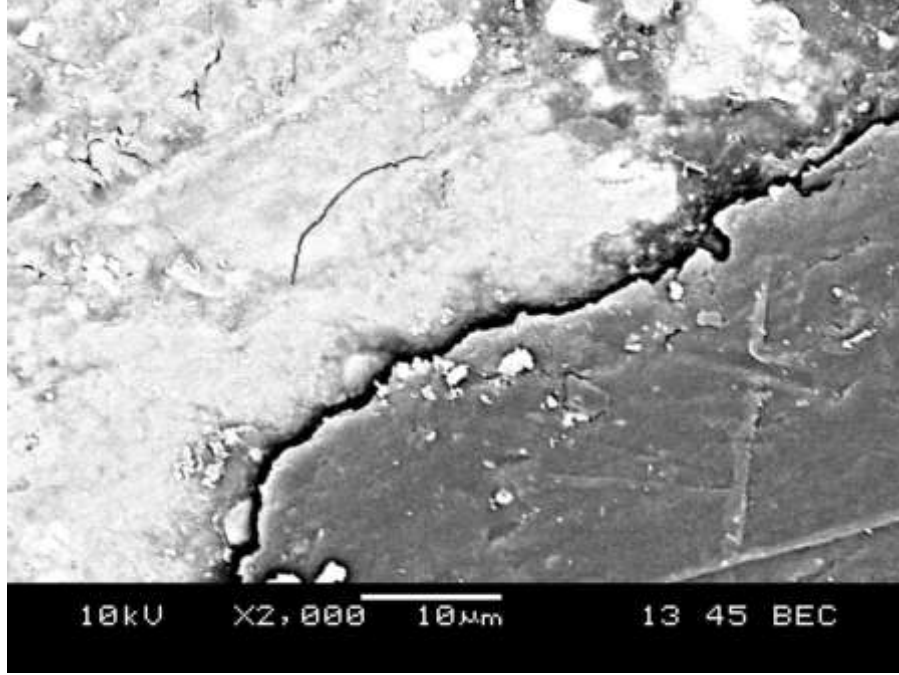
Şekil 9.7 Kontrol örneğinin sem analizinde parlak yüzeyde 100 ve 500 kat büyütülmüş görüntüleri.

Şekil 9.8’de PET50 tipi karışımın 30 kat büyütmedeki görüntüsü gösterilmiştir. Şeklin sol üst köşesinde agrom tipi pet agrega, sağ alt köşesinde ise takoz tipi pet agrega bulunmaktadır. Agrom tipi pet agreganın boşluklu bir yapıya sahip olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir. İşaretli bölgenin 500 kat büyütülmesiyle elde edilen görüntüde matris ile takoz tipi pet agrega arasındaki ara yüzey geçiş bölgesi belirgin bir şekilde görülmektedir. 2000 kat büyütüldüğünde, 2-3 µm kalınlığında ara

yüzey geçiş bölgesinin (ITZ) olduğu gözlemlenmiştir. Takoz tipi pet agreganın ara yüzey geçiş bölgesinin kalınlığı doğal agreganın ara yüzey geçiş bölgesinin kalınlığından daha fazla olduğu görülmektedir.

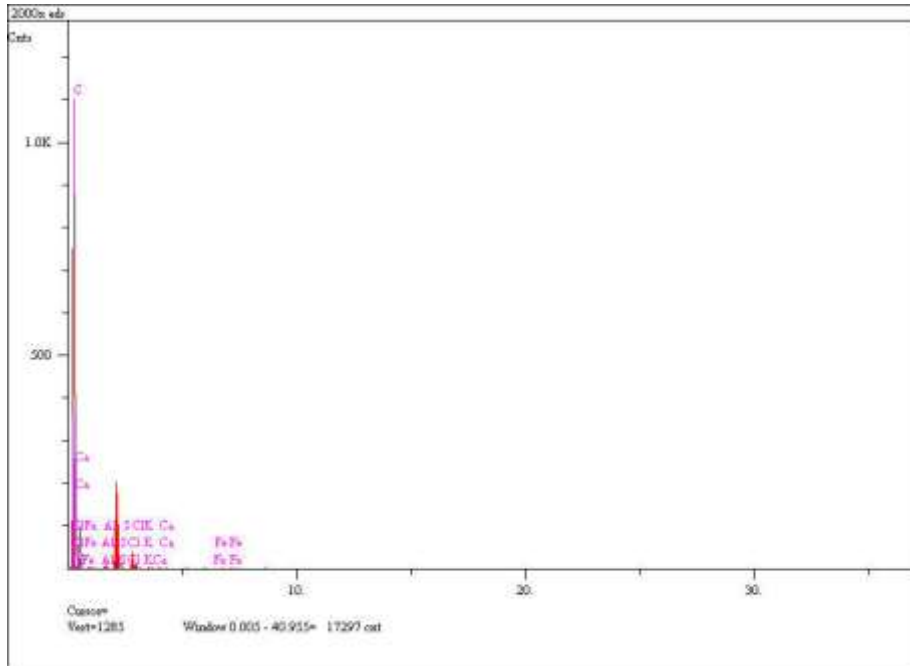


Şekil 9.8 PET50 harcının sem analizinde parlak yüzeyde 30, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri.



Şekil 9.8 PET50 harcının sem analizinde parlak yüzeyde 30, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri (devamı).

Yukarıdaki şekilde takoz tipi pet agrega üzerinde EDS analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 9.9’da yer almaktadır. Analiz sonucunda pet agregada yoğun miktarda karbon atomuna rastlanmıştır.

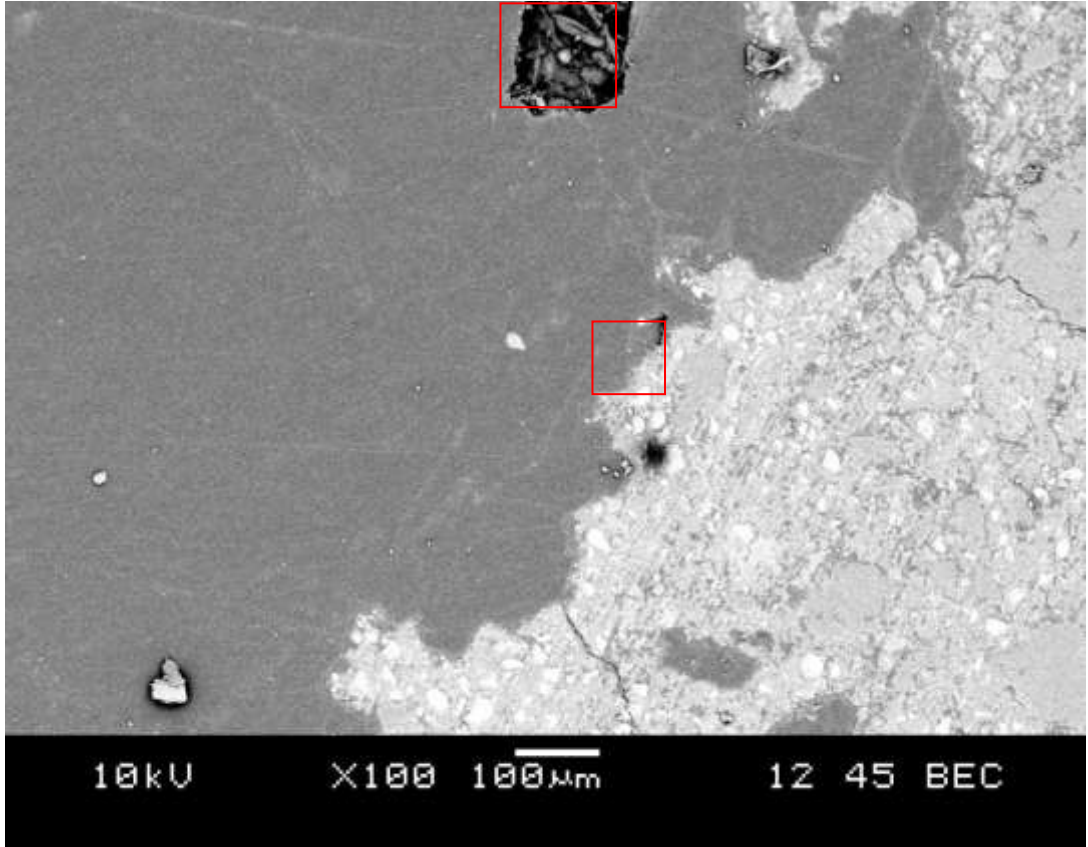


Şekil 9.9 PET50 örneği üzerinde yapılan eds analizi sonucu.

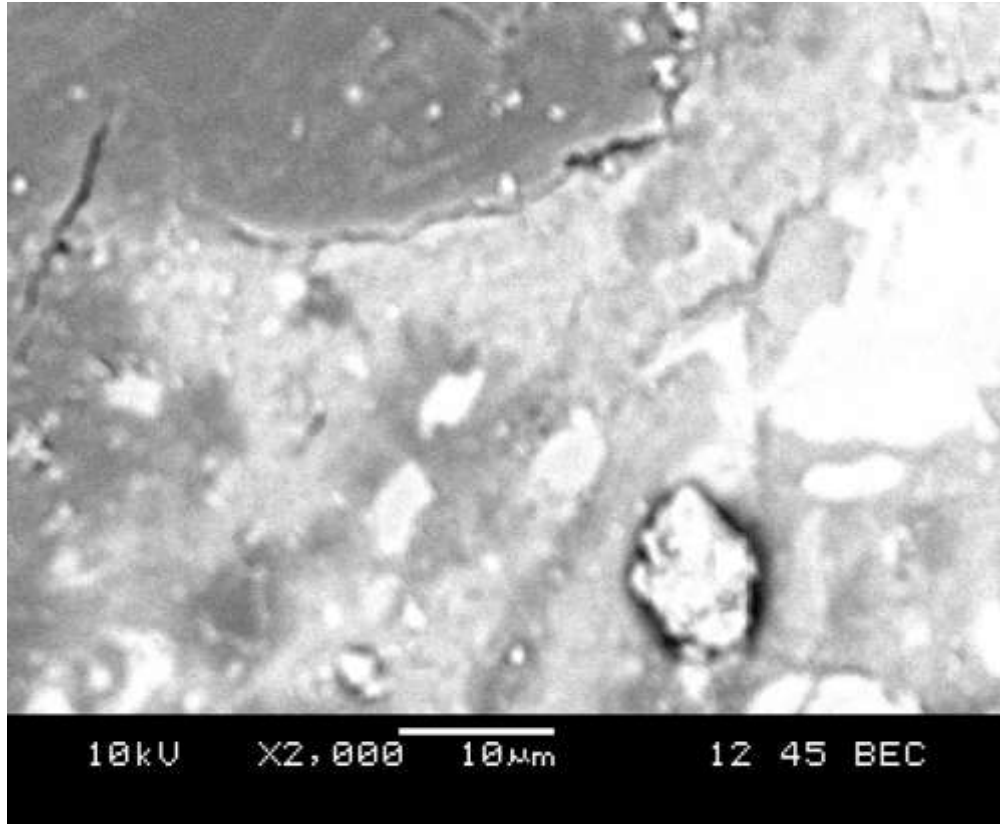
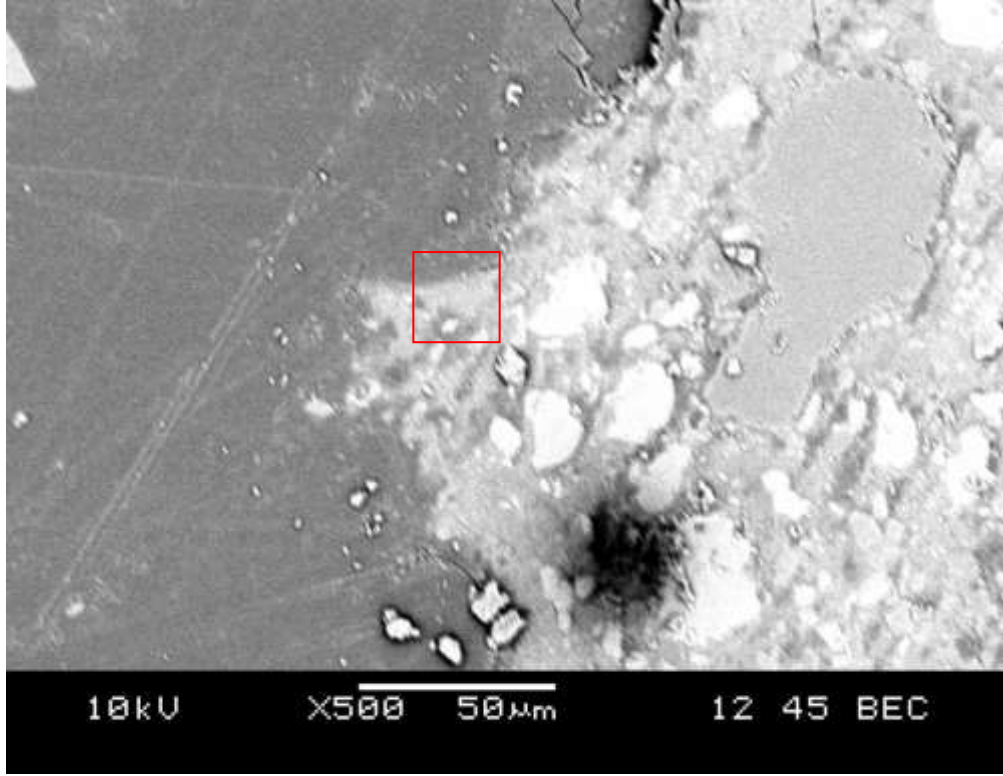
Takoz tipi pet agregası ve agrom tipi pet agregasının ara yüzey kalınlıkları karşılaştırıldığında Şekil 9.10'da 100, 500, 2000 kat büyütülerek gösterilen agrom tipi pet agregasının ara yüzeyinin takoz tipi pet agregası ara yüzeyinden daha ince olduğu görülmüştür. Agrom tipi pet agregasının eritilen liflerin birleştirilerek elde edildiğinin kanıtı aşağıdaki ilk resmin işaretli kısmında görülmektedir. Agrom pet agregasının pürüzlü yapısı, daha ince bir ara yüzey oluşumunu sağlamıştır.

Şekil 9.11'de PET50 karışımında bulunan renkli doğal agregasının ara yüzeyinin 2000 kat büyütülmüş görüntüsü bulunmaktadır.

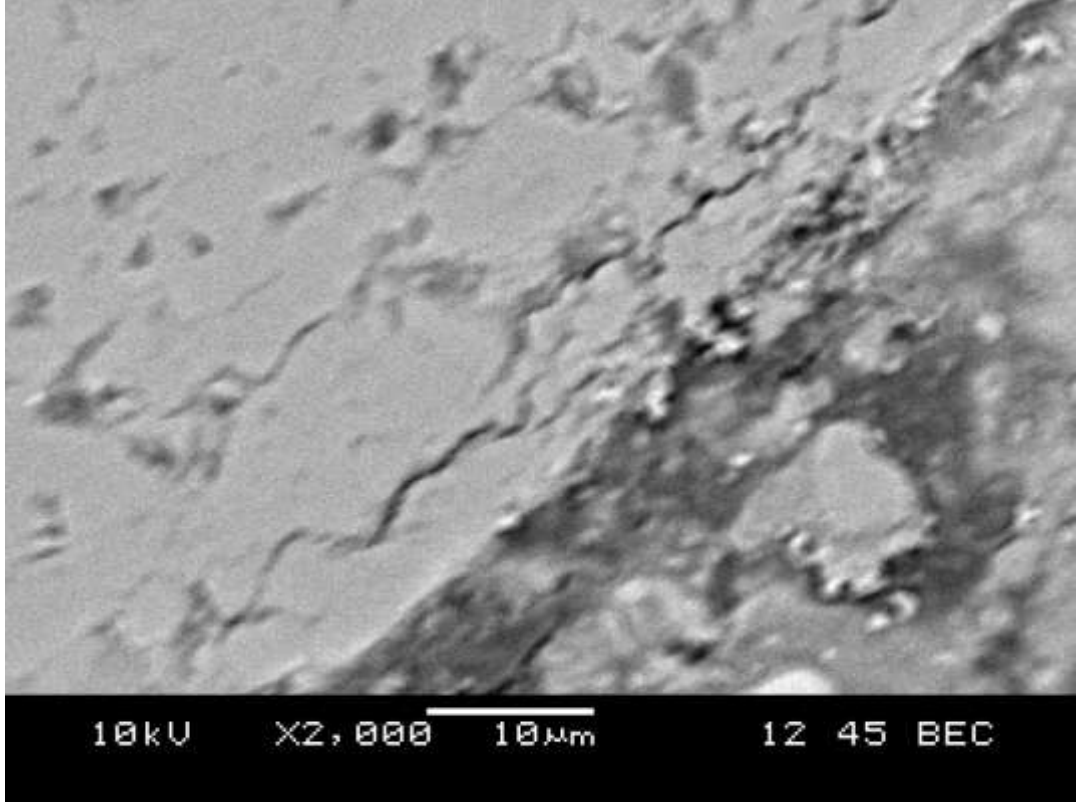
Doğal agregası ile matris ara yüzey kalınlığının çizgisel şekilde görünmesi, zayıf ara yüzeyin çok ince olduğunu göstermektedir. Bu durum matris ile agregası arasındaki aderansın pet agregası ile matris aderansından daha fazla olduğu, bu durumun da serilerin mekanik dayanımlarının farklı olmasını açıklamaktadır.



Şekil 9.10 PET50 harcının içerisindeki agrom tipi pet agregasının sem analizinde parlak yüzeyde 30, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri.



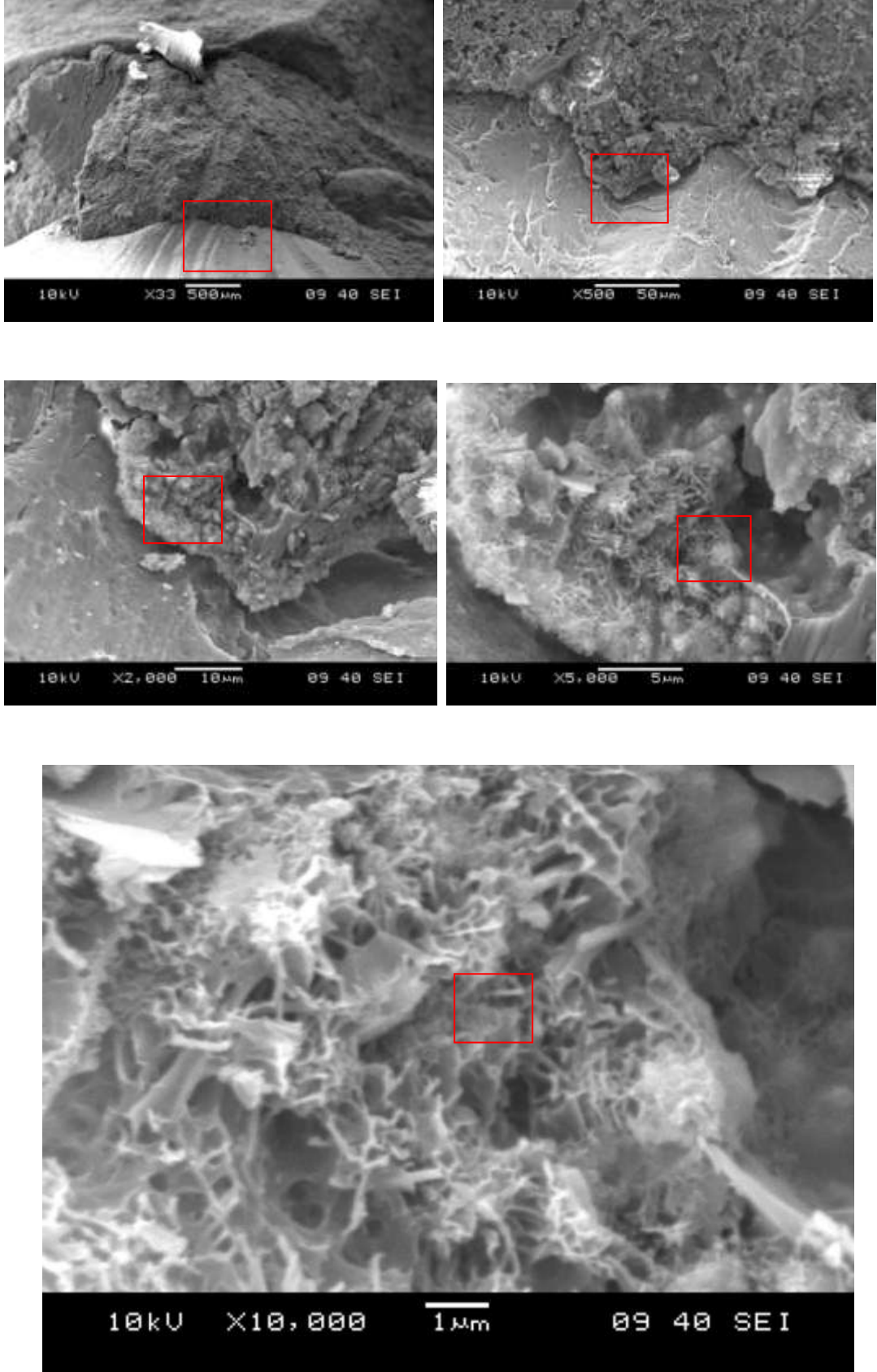
Şekil 9.10 PET50 harcının içersindeki agrom tipi pet agreganın sem analizinde parlak yüzeyde 30, 500 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri (devamı).



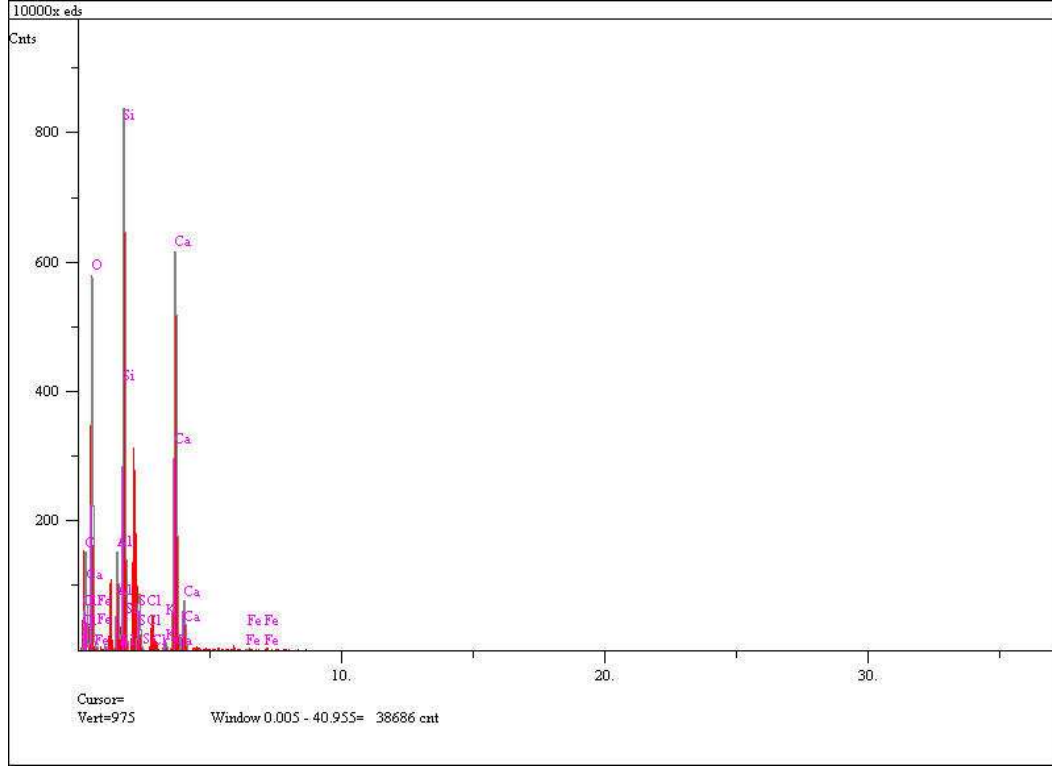
Şekil 9.11 PET50 harcının içersindeki doğal agreganın sem analizinde parlak yüzeyde 2000 kat büyütülmüş görüntüsü.

Yüksek fırın cürufu içeren PET50-YFC50 serilerinden alınan, 28 gün su küründe kalmış örneklerinden alınan parçalarda kırık ve parlak yüzeyde SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Şekil 9.12’de kırık yüzeyde 33, 500, 2000, 5000 ve 10000 kat büyütülerek yapılan analizlerde takoz tipi pet agrega ile matris arasındaki geniş boşluklar daha net görülmektedir. Ancak C-S-H yapısının oluştuğu 5000 ve 10000 kat büyütülerek çekilen görüntülerde belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Şekil 9.13’de 10000 kat büyütülen görüntülerde yapılan EDS analizi sonucunda oluşan formun C-S-H olduğu kesinleşmiştir.

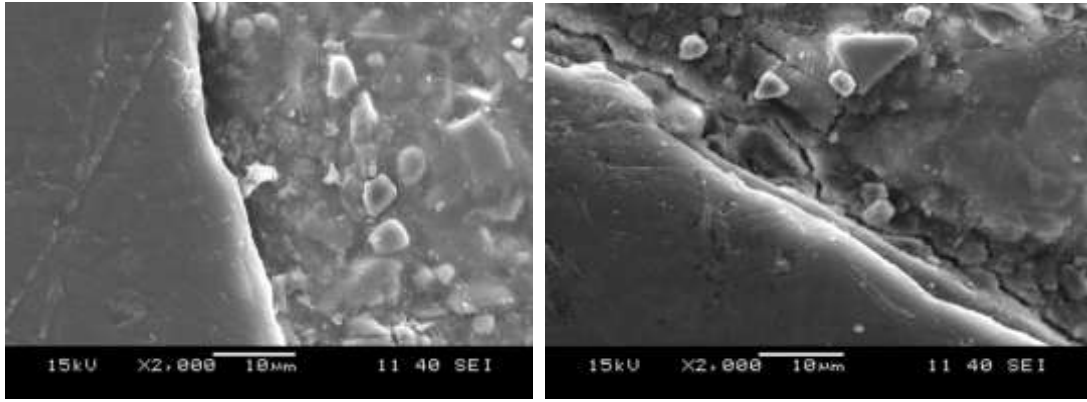
Yüksek fırın cürufu PET50-YFC50 serilerine ait örneklerden alınan parçalara yapılan parlak yüzey SEM analizinde, takoz tipi pet agrega ile çimento matrisi ara yüzeyinin 2000 kat büyütülerek çekilmiş görüntüleri Şekil 9.14’de gösterilmektedir. Cürufu karışımlarda, cürufsuz karışımdaki takoz tipi pet agrega ile matris ara yüzeyi (ITZ) kalınlığından daha az bir ara yüzey oluşumu görülmektedir. Çalışmayı geliştirmek için örnekler üzerinde daha fazla SEM analizi yapılması gerekmektedir.



Şekil 9.12 PET50-YFC50 harcının içerisindeki sem analizinde kırık yüzeyde 33, 500, 2000, 5000 ve 10000 kat büyütülmüş görüntüleri.

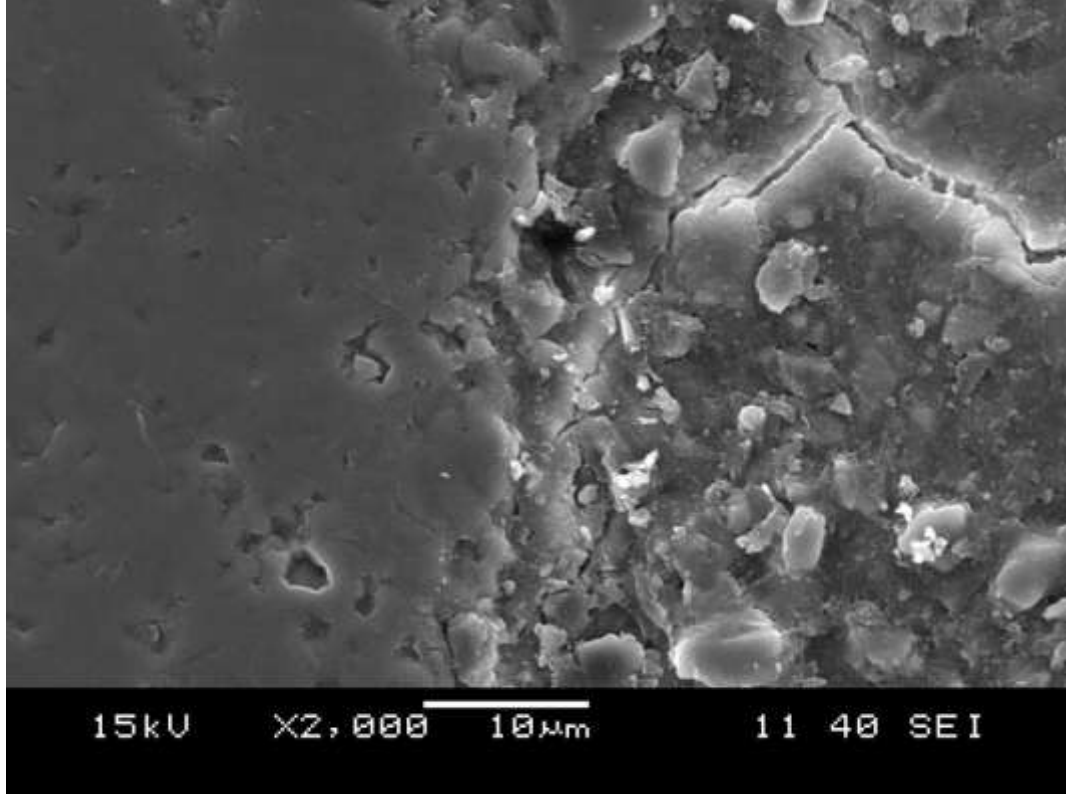


Şekil 9.13 PET50-YFC50 harcı üzerinde yapılan eds analizi sonucu.



Şekil 9.14 PET50-YFC50 harcının içersindeki takoz tipi pet agreganın sem analizinde parlak yüzeyde 2000 kat büyütülmüş görüntüleri

Cürufllu karışımlarda agrom tipi pet agregası ile matris arasındaki ara yüzey kalınlığı, takoz tipi pet agregasının matrisle olan ara yüzeyinden çok daha düşük olduğu Şekil 9.15’de gösterilmektedir. Agrom tipi pet agregasının pürüzlü yüzeyi aderansı büyük ölçüde arttırmaktadır. Matris ile agregası ara yüzeyi, bu görüntüde neredeyse belli olmamaktadır. Yapılan SEM analizinde, agrom pet agregasının matris ile aderansı, yüksek fırın cürufu ikamesiyle daha da arttığı sonucuna götürmektedir.

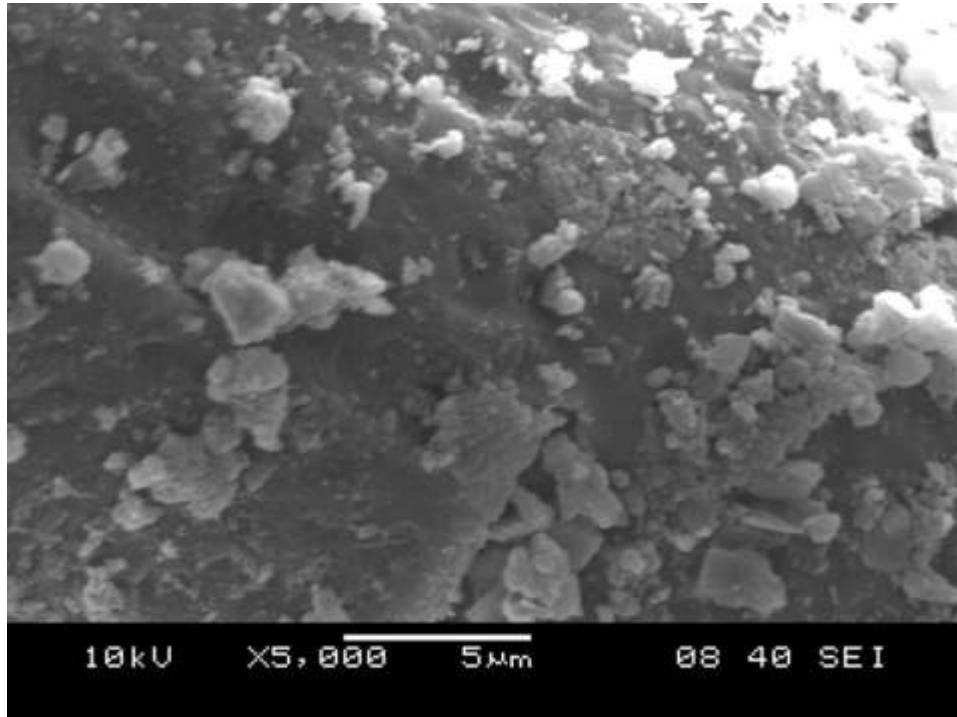
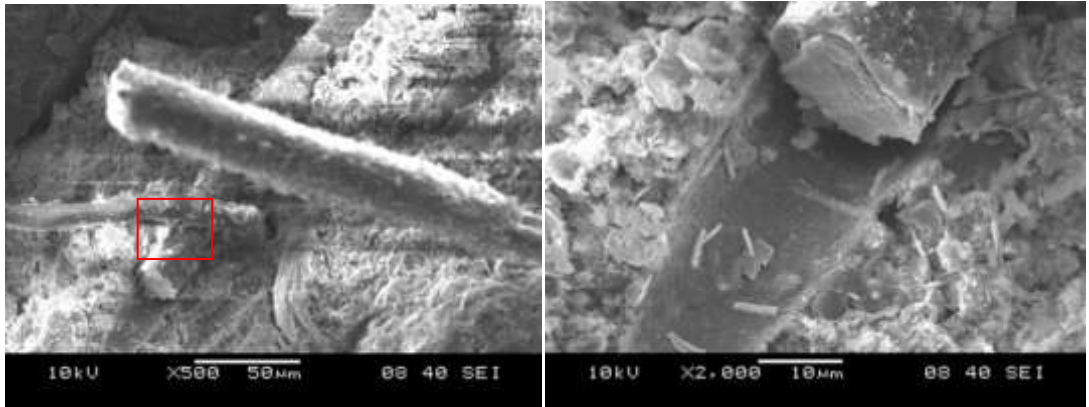
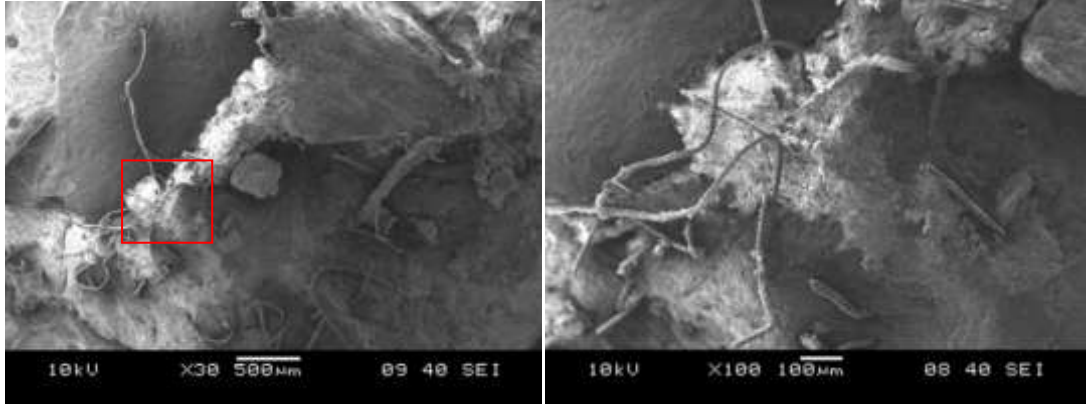


Şekil 9.15 PET50-YFC50 harcının içerisindeki agrom tipi pet agrega ile matrisin sem analizinde parlak yüzeyde 2000 kat büyütülmüş görüntüsü.

28 gün su küründe kalan PET50-YFC50-LİF2 serisine ait, cüruflu ve lif eklenmiş seriden alınan parçalar ile parlak ve kırık yüzey üzerinde SEM analizi yapılarak liflerin harç içerisindeki dağılımı ve matris ile aderansı SEM analizinde örnek yüzeyi 30, 100, 500, 2000 ve 5000 kat büyütülerek Şekil 9.16’da incelenmiştir.

Yapılan SEM analizinde, liflerin harç içerisinde homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. 2000 kat büyütülmüş görüntülerde, lifin matristen sıyrıldığı açıkça görülebilmektedir. Ancak 5000 kat büyütülmüş görüntülerde liflerin yüzeyinde çukurcuklar olduğu gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılmayan pet lifin yüzeyi ile karşılaştırıldığında, harç örneğinin içinde bulunan liflerde çukurcuklar görülmekte olup, belirgin bir deformasyon söz konusudur. Bu durumun, pet lifin alkali ortamdan etkilendiği sonucunu ortaya koymaktadır.

Çalışmaların devamında, pet lif içeren örneklerin alkali etkisindeki değişimi SEM analiziyle takip edilmeli, incelenmelidir.

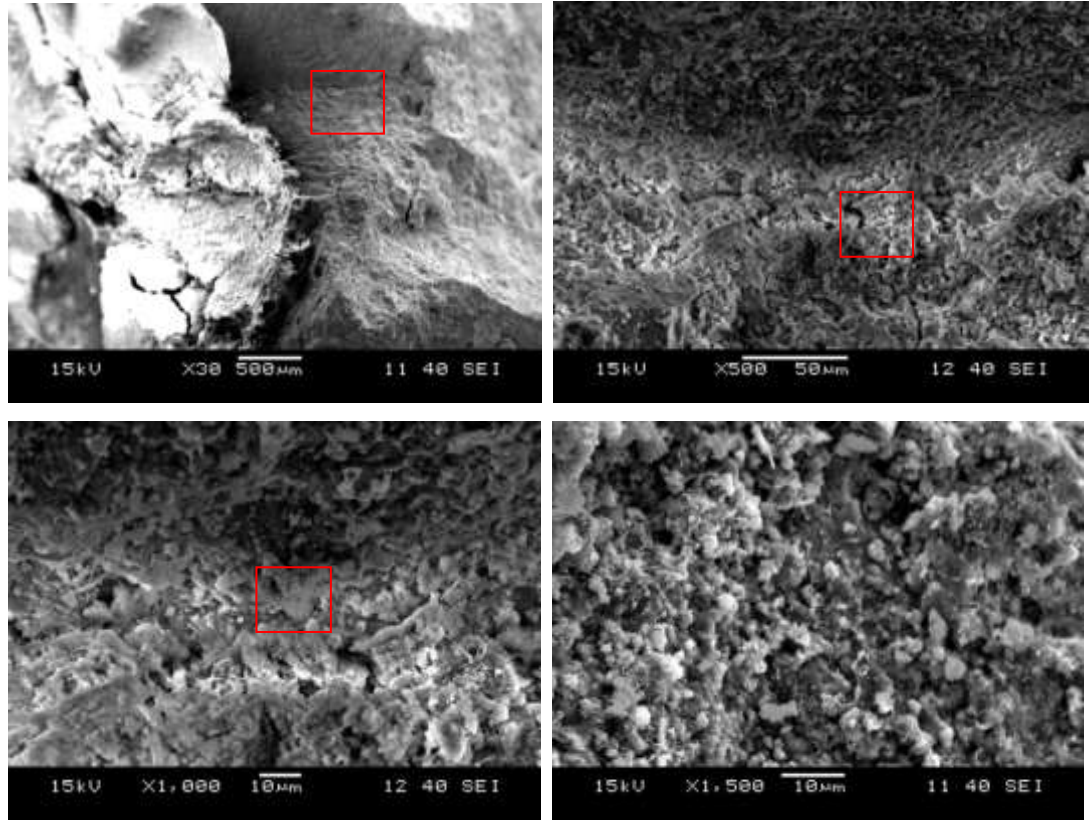


Şekil 9.16 PET50-YFC50-LİF2 harcının sem analizinde kırık yüzeyde 30, 100, 500, 2000, 5000 kat büyütülmüş görüntüleri.

9.2 Sertleşmiş Harçlarda Asit Deneyi Sonrası Mikro Yapı İncelemeleri

İleri deneylerde hazırlanan karışımlar 56 gün boyunca %5 HCl asit çözeltisinde bekletilmiş ve örnekler kurutulduktan sonra kırık yüzeyde SEM analizi yapılmış ve belirli noktalardan EDS analizi yapılmıştır.

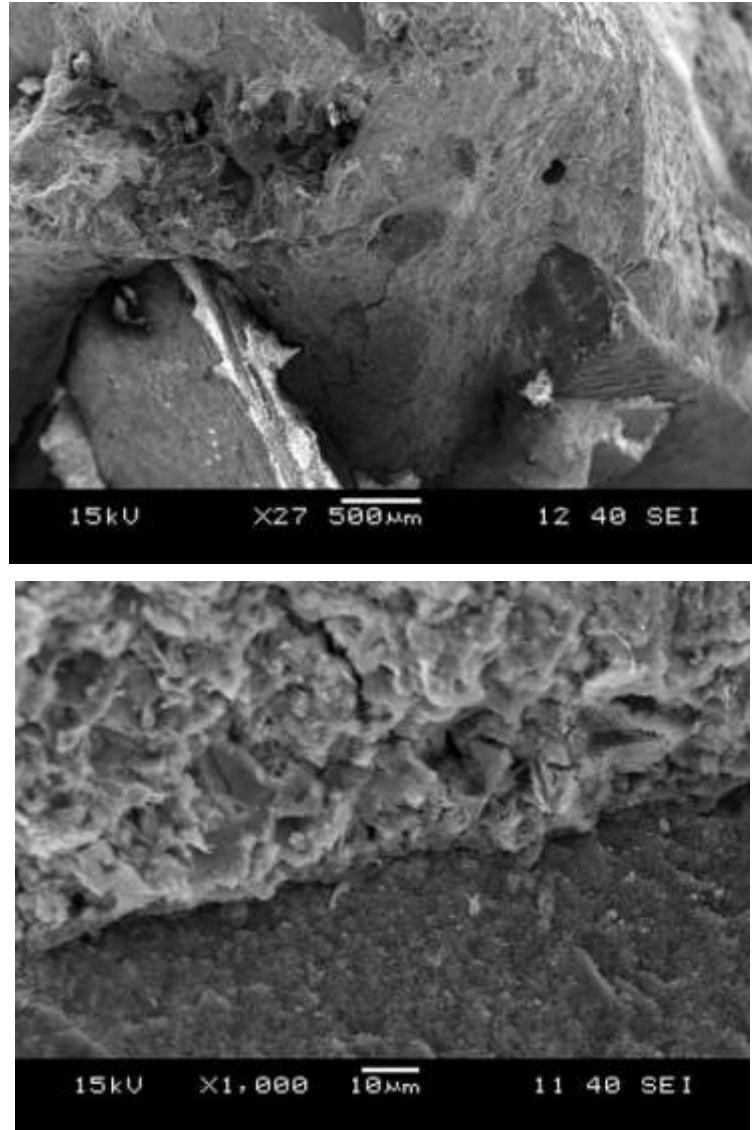
Şekil 9.17’de kontrol örneği üzerinde yapılan SEM analizinde 30, 500, 1000 ve 1500 kat büyütülerek gözlemlenmiştir. HCl asit ile temas halinde olan agregata ve matris yüzeyinde bozunmalar gerçekleştiği, matris ile agregata arasındaki mesafenin de arttığı gözlemlenmiştir.



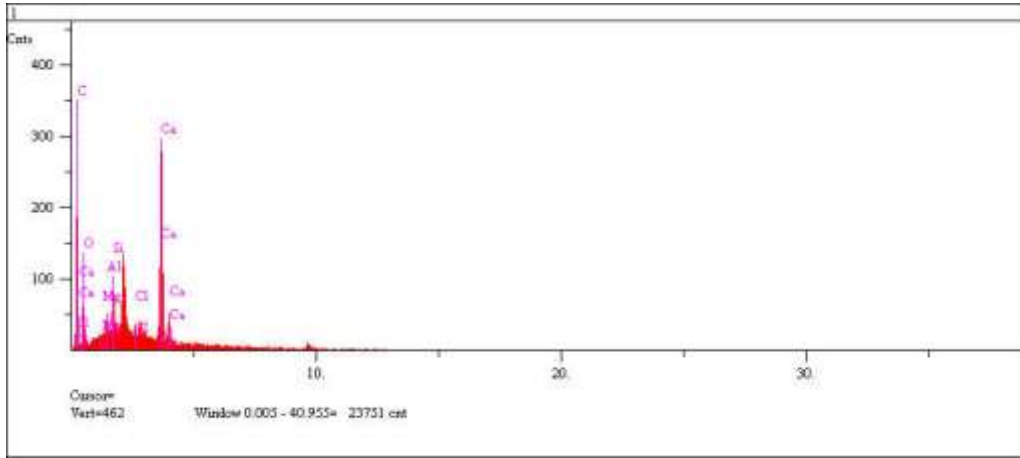
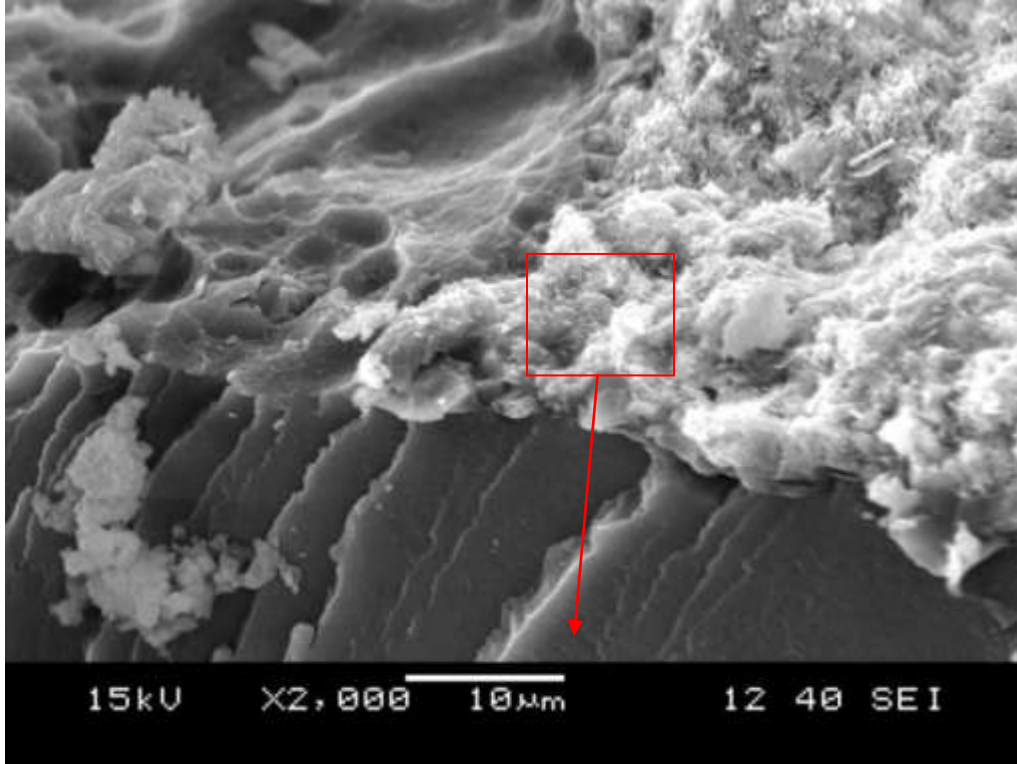
Şekil 9.17 Asit etkisi sonrası kontrol harcının sem analizinde kırık yüzeyde 30, 500, 1000 ve 1500 kat büyütülmüş görüntüleri.

PET50 serisi örneklerin asit deneyi sonucunda kırık yüzey üzerinde SEM ve EDS analizi yapılarak 27, 1000 ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri Şekil 9.18’de gösterilmektedir. Şekilde takoz tipi pet agreganın matris ile ara yüzeyine odaklama

yapılmıştır. Bu durumda hem takoz tipi pet agreganın hem de çimento matrisinin asit etkisinden sonra fiziksel durumları incelenebilmiştir. Şekil 9.18’de görüldüğü üzere matris kontrol karışımındaki matrise benzer şekilde yüzeyden itibaren bozulma gerçekleşmiştir. Ancak takoz tipi pet agreganın yüzeyinde doğal agregaya oranla daha az hasar oluşmuştur. Ara yüzey, matris ve pet agregayı kapsayacak şekilde yapılan SEM analizinde pet agreganın yapısında bulunan karbon (C), ara yüzeyde yoğun miktarda bulunan kirecin yapısındaki kalsiyum (Ca) ve C-S-H’ın yapısında bulunan silisyumdan (Si) az miktarda bulunmaktadır. HCl asit etkisi nedeniyle yüzeyde kalan bir miktar Cl da yapılan EDS analizinde ortaya çıkmıştır.



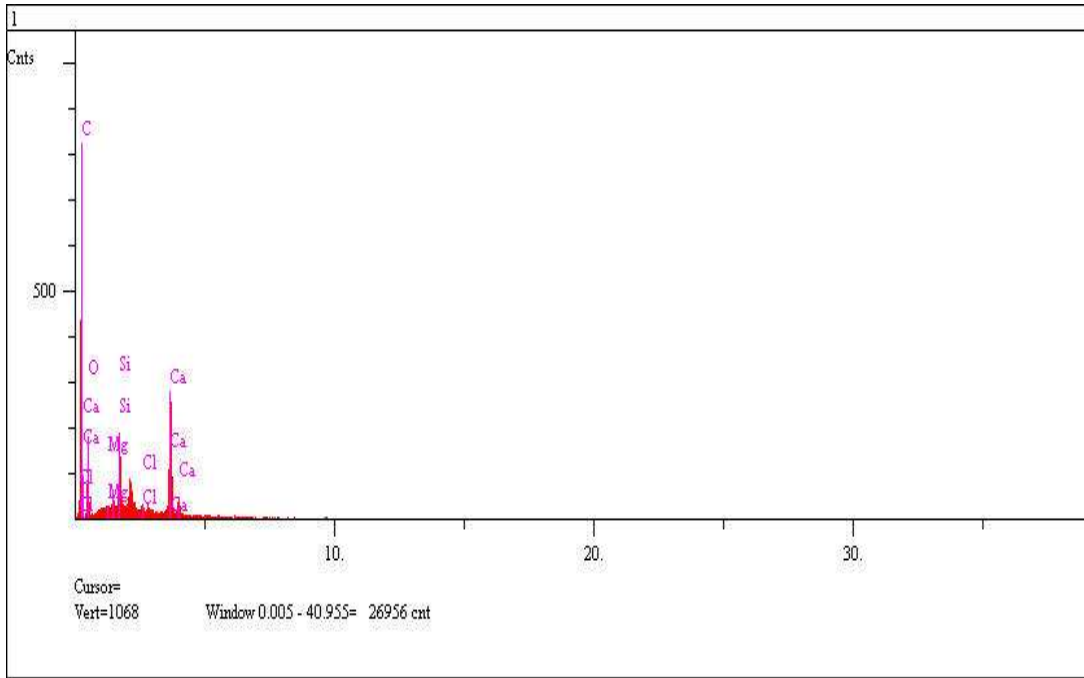
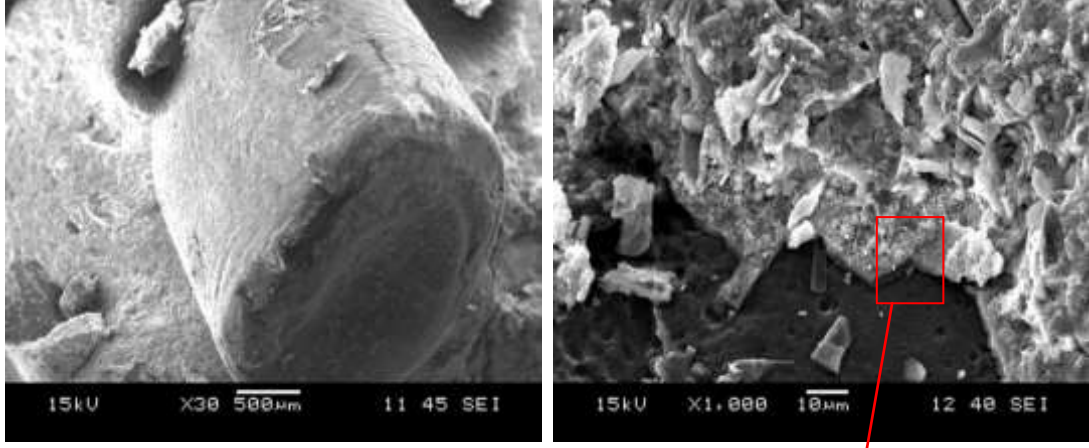
Şekil 9.18 Asit etkisi sonrası PET50 harcının sem analizinde kırık yüzeyde 27, 1000, ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri ve eds analizi.



Şekil 9.18 Asit etkisi sonrası PET50 harcının sem analizinde kırık yüzeyde 27, 1000, ve 2000 kat büyütülmüş görüntüleri ve eds analizi (devamı).

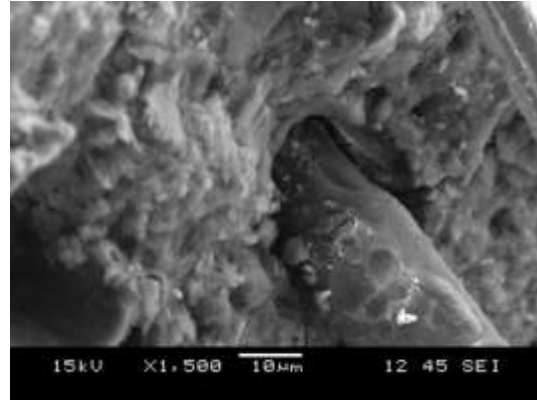
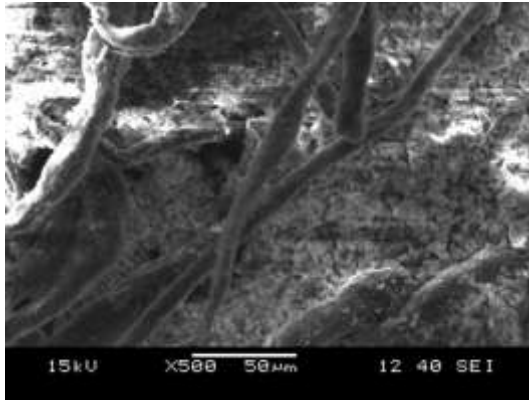
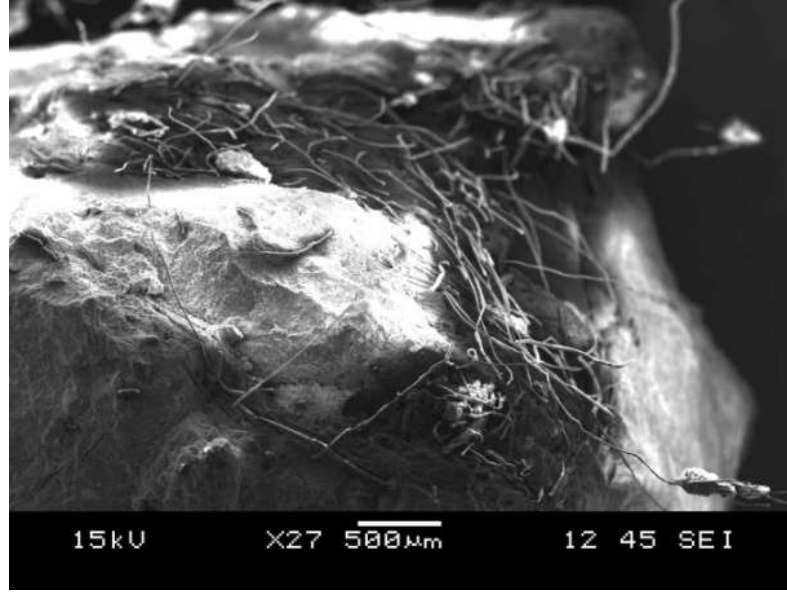
Cüruflu örneklerden alınan parçalarla hazırlanan kırık yüzey üzerinde yapılan SEM ve EDS analizleri Şekil 9.19’da verilmiştir. 30 ve 1000 kat büyütülerek çekilen görüntülerde matris ve takoz tipi pet agreganın yüzeyinin asit etkisi sonucunda bozulduğu gözlemlenmiştir. Ancak çimento matrisindeki bozunma daha fazladır. Şekilde, ara yüzeyi de kapsayacak biçimde gösterilen kısımda yapılan EDS analizi

sonucunda pet agregadan gelen karbon, ve matrisin yapısında bulunan Silis ve oksijen asit etkisi sonucunda klor varlığı ortaya çıkmıştır.



Şekil 9.19 Asit etkisi sonrası pet50-yfc50 harcının sem analizinde kırık yüzeyde 30 ve 1000 kat büyütülmüş görüntüleri ve eds analizi.

Asit etkisinden sonra PET50-YFC50-LİF2 serilerinde yapılan SEM analizi sonuçları Şekil 9.20’de gösterilmiştir. 27, 350, 500 ve 1500 kat büyütülmüş görüntüleri bulunmaktadır. Asit etkisiyle pet liflerin bozulduğu ve yüzeyinde çukurcuklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bazı liflerin matristen sıyrıldığı da açıkça görülmektedir.



Şekil 9.20 Asit etkisi sonrası PET50-YFC50-LİF2 harcının sem analizinde kırık yüzeyde 27, 350, 500 ve 1500 kat büyütülmüş görüntüleri.

BÖLÜM ON

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

10.1 Sonuçlar

Çevre kirliliğini azaltmak için PET atıkların değerlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar son zamanlarda oldukça sıklaştıkça, PET atıkların değişik yöntemlerle çimento kompozitleri içerisinde kullanılması gündemde olan bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmalar çevre kirliliğinin azaltılması yönünde büyük adımlar atılmasına yardımcı olmaktadır.

DeneySEL çalışmanın amacı, atıkların geri kazanımı olduğu için, ileri deneylerde üretim atığı olan yüksek fırın cürufu puzolan olarak kullanılmıştır. Çimentolu kompozitlerde puzolan kullanımının betonun dayanımı ve durabilitesini uzun dönemde arttırması nedeniyle eğilme, basınç ve aşınma deneyleri 28, 56 ve 90 gün su küründe kalan örnekler üzerinde yapılmıştır. İleri deneylerde beyaz çimento ve renkli doğal-kırma agregalar, renkli PET agregalarla beraber kullanımının görselliği arttırabileceği düşüncesiyle seçilmiştir. Bütün atıkların değerlendirilmesi amaçlandığı için deneylerde her iki farklı tip PET agrega birlikte kullanılmıştır. Örneklerin eğilme dayanımı ve tokluğunu arttırabileceği düşünülerek deneylerde hacimce %2 oranında PET lif kullanılmıştır.

Taze hal işlenebilirlik sonuçlarına göre, takoz ve agrom tipi PET agreganın kırma kuma ya da renkli doğal agregaya hacimce %50 oranında ikame edilmesi işlenebilirliği etkilemezken, çimentoya yüksek fırın cürufu ikamesi işlenebilirliği %25 arttırmıştır. Taze haldeki harç karışımına PET lif eklenmesi işlenebilirliği düşürmüştür.

Renkli doğal-kırma kum içeren harç karışımına karıştırılmış takoz ve agrom tipi PET agregaların hacimce %50 ikame edilmesi, eğilme dayanımını %50 oranında düşürmüştür. %50 PET agrega ikameli karışıma yüksek fırın cürufu eklenmesi 28 gün su küründe kalmış örneklerin eğilme dayanımını cürufsuz örneklere göre

düşürürken 56 ve 90 gün su küründe kalan örneklerde yüksek fırın cürüflü örneklerin eğilme dayanımları artmıştır. PET lifler, 28 günlük örneklerin eğilme dayanımlarını geliştirmezken 56 ve 90 günlük örneklerin eğilme dayanımlarını arttırmaktadır. Bu durumun, yüksek fırın cürufunun PET liflerle matris ara yüzeyini geliştirdiği ve liflerin matrisle olan aderansını arttırdığı için eğilme dayanımlarında artış olduğu düşünülmektedir.

PET agregaların esnek yapısı, özellikle takoz tipi PET agregaların kırılmaması eğilme yükü etkisinde kalan harç örneklerinde oluşan çatlakların, PET agregalarının etrafından geçmesini zorlamakta ve bu da PET agrega ikameli örneklerin tokluğunu arttırmaktadır. Yer karosu üretimi için yapılan deney kapsamında 28, 56 ve 90 günlük örnekler üzerinde yapılan eğilme deneylerinde kontrol örneklerinin tokluğu çok düşük değerde kalırken PET50 serilerinin tokluk değerlerinin kontrol serilerinden üç kat daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır. Yüksek fırın cürufu ikameli örneklerin tokluğu PET50 örneklerinden 1,5 kat daha fazla olduğu anlaşılmıştır. En fazla tokluğun PET lifli örnekler olduğu ortaya çıkmıştır. 28 ve 56 günlük örneklerin toklukları zaman bağlı olarak artarken 90 günlük örneklerde serilerin tokluklarında azalma meydana gelmiştir. Bu azalmanın, zamanla harç örneklerinin gevrekleşmesi, yük-sehim grafiklerinin dikeyleşmesi sonucu ortaya çıktığı görülmektedir.

Yer karosu üretimi için hazırlanan karışımların basınç dayanımları karşılaştırıldığında, PET agrega ikamesinin harç örneklerinin basınç dayanımlarını düşürdüğü açıkça görülmektedir. 28 günlük örneklerde yüksek fırın cürufu ikameli örneklerin basınç dayanımı cüruf ikamesiz örneklerden daha düşük olmasına rağmen, zamana bağlı olarak basınç dayanımı da artmış ve cürufsuz örneklerin basınç dayanımına yetişmiştir. Harç örneklerine PET lif eklenmesi basınç dayanımını düşürmüştür.

28, 56 ve 90 günlük sertleşmiş harç örnekleri üzerinde yapılan aşınma deneylerinde en düşük aşınma direncini PET agrega ikamesiz kontrol örnekleri göstermektedir. Dory yüzeysel aşınma deneyi sonuçlarına göre PET50-YFC50 ve PET50-YFC50-LİF2 örnekleri PET50 örneklerinden daha yüksek aşınma direnci gösterirken Modifiye Los Angeles Deney sonuçlarında 28 günlük PET50 serisine ait

örneklerin aşınma direnci PET50-YFC50 ve PET50-YFC50-LİF2 serilerinin aşınma direncinden yüksek durumdayken, 56 ve 90 günlük örneklerde PET50-YFC50 ve PET50-YFC50-LİF2 serileri daha yüksek aşınma direnci göstermişlerdir. Bu durum, yüksek fırın cürufunun aşınma direncini arttırması sonucunda meydana gelmiştir. PET lif içeren 28, 56 ve 90 günlük örnekler cürufllu ve lifsiz örneklerden daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. Bu durumun, PET liflerin aşınma sırasında matrisi bir arada tutarak parçalanmayı ve aşınmayı azalttığı sonucunu ortaya koymaktadır.

Yer karosu üretimi için donma-çözülme kabineye yerleştirilen örneklerin 270 çevrim sonrasında ağırlıkları ölçülerek eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri yapılmıştır. Deney sonunda KNT ve PET50 karışımlarında parçalanma ve ufalanma meydana gelirken cüruf içeren serilerde gözle görülür bir bozulma meydana gelmemiştir. Çevrim sonrası yapılan eğilme deneylerinde en fazla dayanım kaybı kontrol örneklerinde meydana gelirken, en az dayanım kaybı PET lif içeren PET50-YFC50-LİF2 örneklerinde olmuştur.

Donma-çözülme çevrimi sonrası basınç deneyi sonuçlarına göre, en fazla dayanım kaybını kontrol serisi örnekleri gösterirken curuf içeren örnekler donma-çözülme etkisinden en az etkilenen örnekler olmuştur. PET agregalar sertleşmiş harçların donma-çözülme direncini geliştirdiği deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır.

Yer karosu üretimi için hazırlanan karışımların %5 HCl asit etkisine 56 gün boyunca maruz kaldıktan sonra eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri yapılmıştır. Eğilme deneyi sonucunda bütün serilere ait örneklerin eğilme dayanımlarında düşüş meydana gelirken kontrol serisine ait örneklerin eğilme ve basınç dayanımlarındaki düşüş diğer serilere kıyasla daha az olmuştur. PET agregalar her ne kadar HCl asit etkisine dayanıklı olsa da çimento matisinin dış yüzeyden itibaren bozulması sertleşmiş harcı asit etkisine karşı dayanıksız hale getirmiştir. Aynı şekilde yüksek fırın cürufu ikamesi de asit etkisine karşı olumlu bir etki yaratamamıştır.

Kılcal ve toplam su emme deney sonuçlarına göre PET agregaların su emme değerlerini etkilemediği, yüksek fırın cürufu ikamesinin kılcal ve toplam su emme değerlerini azalttığı ortaya çıkmıştır. PET lif ikamesinin kılcal ve toplam su emmeyi arttırmasına rağmen matrisin cüruf içermesi, cürufsuz serilerden daha az toplam su emme değerlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Isıl iletkenlik deneyi sonuçlarına göre Pet agrega ikamesi harç örneklerinin ısıl iletkenliğini azaltmıştır. Yüksek fırın cürufu içeren örnekler, cürufsuz örneklerden daha az ısıl iletkenlik değerine sahiptir. Pet lif içeren PET50-YFC50-LİF2 serisine ait örnekler kontrol serisine ait örneklerinden 1/3 daha az ısıl iletkenlik katsayısı ölçülmüştür. Bu duruma en büyük etken harç örneklerindeki liflerin ve pet agregaların ısıl iletkenlik katsayısını düşürmesidir.

Pet agregaların yüksek alkalili ortamda davranışlarını incelemek için yapılan deneyde, belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Ancak kontrol örneğinin büzülme davranışı göstermesine rağmen pet agrega ikameli örneklerin az miktarda genleşmesi uzun dönem boy ölçümleri incelenerek karar verilebilecek bir durum özelliğini kazanmıştır.

Pet agreganın kısa dönem bünyesel ve kuruma büzülmelerine belirgin bir etki yaratmadığı görülmüştür.

Mikro yapı incelemelerinde yapılan kırık ve parlak yüzey analizlerinde takoz tipi Pet agreganın matrisle ara yüzeyi (ITZ), agrom tipi Pet agrega matris ara yüzeyinden daha kalın olduğu ortaya çıkmıştır. Takoz tipi pet agregaların ikame edildiği harç karışımlarının mekanik dayanımlarının düşük çıkmasındaki önemli etkenlerden biri olduğunu açıklamaktadır. Cürufsuz örneklerde yapılan analizlerde ara yüzeyde kireç kristallerine rastlanırken cürufllu örneklerde daha az olduğu görülmektedir. HCl asite maruz kalmış örneklerde yapılan analizde matris, doğal agrega ve Pet agrega yüzeylerinde bozunma gerçekleştiği gözlemlenmiştir. PET'in HCl asite dayanıklı olduğu bilinmesine rağmen, agrega ve lif yüzeyinde gözlemlenen bozulmalar göze çarpmaktadır.

10.2 Öneriler

Bu çalışmanın konusu olan yer karosunun kullanımı doğrultusunda, pet agrega ikameli karoların derz malzemeleriyle uyumu araştırılmalıdır.

Bu deneyler kapsamında, pet agrega ikameli örneklerin ses yalıtımı özelliği incelenememiştir. Ses yalıtımı, yer karosu üretimi için önemli bir etken olması nedeniyle çalışmanın devamında bu özellik araştırılmalıdır.

Pet agregaların UV ışık altında renk değişimi incelenmelidir.

Pet agrega ikameli örneklerin elastisite modülünün basınç dayanımıyla olan ilişkisi deney kapsamında yapılamamıştır. Çalışmanın devamında incelenmesi gereken bir konu olmaktadır.

Bünyesel, kuruma büzülmesi ve alkali etkisindeki harç çubuklarının boy ölçümleri gözlemlenmeye devam edilerek uzun dönemde meydana gelen değişiklikler tespit edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Akçaözöğlü, S. Akçaözöğlü, K. ve Duran Atiz, C. (2012). Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste pet lightweight aggregate (wlpa). *Composites, Part B*, 3-7
- Albano, C. Camacho, N. Hernandez, M. Matheus, A. ve 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.
- Anabal, F.Y. (2007). *Pet atıkların endüstride değerlendirilmesi*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Bilimleri Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Anonim (2009). 20 Mart 2013. <http://www.cevreonline.com/atik/geri%kazanım.htm>
- Anonim (2013). 15 Nisan 2013. <http://www.polimernedir.com/kutuphane/polietilen-tereftalat/>
- Baradan, B. (2006). *İnşaat mühendisleri için malzeme bilgisi (2. Baskı)*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi.
- Choi, Y. Moon, D. Chung, J. ve Cho, S. (2005). Effects of waste pet bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35, 776-781.
- Dikici, T. (2010). *Taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İzmir.
- Erdoğan, Y.T. (2003). *Beton*. 1. Baskı, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim Anonim Şirketi.

- Felekoğlu, B. (2009). *Yüksek performanslı beton tasarımı*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İzmir.
- Foti, D. (2011). Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles pet fibers. *Construction and Building Materials*, 25, 1906-1915.
- Fraternali, F. Ciancia, V. Chechile, R. Rizzano, G. Feo, L. ve Incarnato, L. (2011). Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled pet fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*, 93, 2368-2374.
- Frigione, M. (2010). Recycling of pet bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30, 1101-1106.
- Haque, M.N., Al-Khaiat, H., ve Kayali, O. (2004). Strength and durability of lightweight concrete, *Cement & Concrete Composites*, 26, 307-314.
- Jo, B. Park, S. ve Park, J. (2008). Mechanical properties of polymer concrete made with recycled pet and recycled concrete aggregates. *Science Direct*, 22, 2281-2291.
- Kadiroğlu, İ. (2004). *Kendiliğinden yerleşen normal dayanımlı hafif beton üzerine deneysel bir çalışma*. Batıçim Batı Anadolu Çimento Sanayii Anonim Şirketi, İzmir.
- Kasselouri, V. Rigopolou, S. ve Gavela, S. Use of polimeric wastes in the concrete production. *National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, 9 Heroon Polytechniou Str, 15773, Zografou, Greece*.
- Koca, C. (1996). Yüksek performanslı beton üretiminde mikrosilis, curuf, klinker karışımı çimento kullanımı. 4. *Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.381-394.

- Luiz, A. Joao, P. ve Castro, G. (2011). Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 25, 1712-1717.
- Newman, J., ve Choo, B. S. (2003). *Advanced concrete technology*. Constituent Materials, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete (4th ed.)*. Wesley Longman Limited, Essex, England.
- Ochi, T. Okubo, S. ve Fukui, K. (2007). Development of recycled pet fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29, 448-455.
- Postacıoğlu, B. (1986). *Yapı malzemesi*. İstanbul: İTÜ Matbaası Gümüşsuyu.
- Sung Bae, K. Na Hyun, Y. Hyun Yong, K. Jang-Ho Jay, K. ve Young-Chul, S. (2009). Material and structural performans evaluation of recycled pet fiber reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*, 32, 232-240.
- Siddique, R. Khatib, J. ve Kaur, I. (2007). Use of recycled plastic in concrete. *Waste Managemement*, 28, 1835-1852.
- Sönmez, R. Demir, M ve. Erim, H. (b.t). *Stiropor hafif agregalı beton*. 20 Mayıs 2013, [http://www.dogateknik.com.tr/Teknik-Belgeler/Stiropor-hafif-agregalı beton.pdf](http://www.dogateknik.com.tr/Teknik-Belgeler/Stiropor-hafif-agregalı-beton.pdf)
- Sümer, M. (1994). Uçucu kül atıklarının beton üretiminde değerlendirilmesi, *I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu, Salihli, Bildiriler Kitabı*, 179-185.

- Tayyar, E. ve Üstün, S. (2009). Geri kazanılmış petin kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 16, 53-62.
- Topçu, İ.B., ve Uygunoğlu, T. (2007). Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete. *Building and Environment*, 42, 4108-4116.
- Uyan, M. (1975). *Beton ve harçarda kılcallık olayı*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi.
- Uzbaş, B. (2008). *Çimento esaslı malzemelerin tek eksenli yük altındaki davranışının mezo düzey modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Won, J. Jang, C. Lee, S. Lee, S. ve Kim, H. (2010). Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 24, 660-665.
- Yeşilata, B. Isıker, Y. ve Turgut, P. (2009). Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials* 23, 1878-1882.