

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇAPRAZ BAĞLI POLİETİLEN (XLPE) ATIKLARIN
PREKAST KOMPOZİT BETON BORDÜR ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA ÇOLAK

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ÇAPRAZ BAĞLI POLİETİLEN (XLPE) ATIKLARIN
PREKAST KOMPOZİT BETON BORDÜR ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA ÇOLAK

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Mustafa ÇOLAK

ÖZET

**ÇAPRAZ BAĞLI POLİETİLEN (XLPE) ATIKLARIN PREKAST
KOMPOZİT BETON BORDÜR ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUSTAFA ÇOLAK
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. CEMAL MERAN)

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

Plastik atıkların çevresel etkileri her geçen gün önemini artırmaktadır ve bu sorunun çözümüne çareler aranmaktadır. Plastik atıklarda olduğu gibi geri dönüşümü pek mümkün olmayan çapraz bağlı polietilen (XLPE) plastik atıkların da değerlendirilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmada XLPE'nin prekast beton bordürlerde değerlendirilmesi incelenmiştir.

Prekast olarak üretilen beton bordürlerde, granül haline getirilmiş XLPE atıkların ince agregaya yerine belirli oranlarda ikame edilmesiyle oluşan kompozit beton bordür özellikleri incelenmiştir. Toplam agregaya miktarına oranla %0, %5, %10 ve %15 XLPE içerikli beton karışım reçeteleri dizayn edilmiştir. XLPE içerikli ve XLPE içermeyen beton küp numuneler oluşturularak ön deneyler yapılmış olup basınç dayanımı ve çökme (slump) deneyleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında beton bordürlerde kullanılabilecek XLPE oranları tayin edilmiştir ve TS EN 1340 standardına uygunluğu bilinen prekast beton bordürün, beton karışım reçetesinde ince agregaya yerine %0, %3 ve %5 oranlarında XLPE ikamesiyle nihai deneyler yapılmıştır. Nihai deneylerde XLPE içerikli ve XLPE içermeyen beton bordür numuneler ve yine beton küp numuneler oluşturulmuştur. Beton küp numunelerde ve beton bordür numunelerde kullanılan toplam agregaya miktarına oranla %0, %3 ve %5 XLPE içerikli beton harçlarına çökme (slump), beton küp numunelere basınç dayanımı, beton bordür numunelere eğilme dayanımı ve su emme tayini deneyleri yapılmış olup elde edilen değerler TS EN 1340 standardı ışığında kıyaslanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) Atık, Kompozit Beton Bordür

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF CROSSLINKED POLYETHYLENE (XLPE) WASTE IN THE PRODUCTION OF PRECAST COMPOSITE CONCRETE CURBS

MSC THESIS

MUSTAFA ÇOLAK

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: PROF. DR. CEMAL MERAN)

DENİZLİ, AUGUST 2024

The environmental impacts of plastic waste are increasing day by day and solutions are being sought to solve this problem. Various studies are being conducted to evaluate cross-linked polythlene (XLPE) plastic waste. In this study, the evaluation of XLPE in precast concrete curb was examined.

The properties of composite concrete curbs formed by substituting granulated XLPE waste in certain proportions instead of fine aggregate in precast concrete curbs were examined. Concrete mixture recipes with %0, %5, %10 and % 15 XLPE content were designed in proportion to the total aggregate amount. Preliminary experiments were carried out by creating concrete cube samples with and without XLPE content, and compressive strength and slumps tests were performed. In the light of information obtained, the XLPE ratios that can be used in concrete curbs were determined. And final tests were carried out by substituting XLPE at the rates of %0, %3 and %5 instead of fine aggregate in the concrete mixture recipe of the precast concrete curb, which is known to comply with TS EN 1340 standard. In the final experiments, concrete curb samples and concrete cube samples with and without XLPE were created. Slump tests were carried out on concrete mortars with %0, %3 and %5 XLPE content in proportion to the total aggregate amount used in concrete cube samples and concrete curb samples, compressive strength tests on concrete cube samples, bending strength tests on concrete curb samples and water absorption tests were carried out and obtained values were compared according to the TS EN 1340 standard.

KEYWORDS: Crosslinked Polyethylene (XLPE) Waste, Composite Concrete Curb

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL ve KISALTMALAR LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Amaç	7
2. POLİMERLER ve ÇAPRAZ BAĞLI POLİETİLEN (XLPE)	9
2.1 Polimerler	9
2.1.1 Polimerlerin sınıflandırılması	10
2.2 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE)	15
2.2.1 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) Özellikleri	16
2.2.2 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) Kullanım Alanları.....	17
2.3 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) Atıklar	18
3. PREKAST BETON BORDÜR, ÜRETİM SÜRECİ ve KOMPOZİT	
PREKAST BETON BORDÜR	24
3.1 Beton Bordür	24
3.1.1 Prekast Beton Bordür	25
3.1.2 Prekast Beton Bordür Çeşitleri.....	26
3.1.3 Deneyde Kullanılacak Prekast Beton Bordür Özellikleri.....	27
3.2 Prekast Beton Bordür Üretim Süreci	28
3.2.1 Hazır Beton Üretimi	29
3.2.2 Kalıplara Döküm.....	30
3.2.3 Kalıplardan Söküm ve İstifleme.....	30
3.2.4 Prekast Beton Bordürlere Uygulanan Deneyler.....	31
3.3 XLPE Katkılı Prekast Kompozit Beton Bordür	40
4. MATERYAL ve METOT	42
4.1 Materyaller	42
4.1.1 0–5 Agrega, 5–12 Agrega ve 12–19 Agrega Özellikleri	42
4.1.2 Çimento (CEM I 42,5 R)	42
4.1.3 Su.....	43
4.1.4 Priz Hızlandırıcı Katkı.....	43
4.1.5 Süper Akışkanlaştırıcı Katkı.....	43
4.1.6 0–2 mm XLPE Granül.....	44
4.1.7 0–5 mm XLPE Granül.....	44
4.1.8 0–2 mm ve 0–5 mm XLPE Granül Karışım	45
4.2 Deney Ekipmanları	46
4.2.1 Hassas Teraziler	46
4.2.2 Kantar	46
4.2.3 Elekler.....	46
4.2.4 Beton Küp Numune Kalıbı	47
4.2.5 Betonyer.....	48

4.2.6	Beton Bordür Kalıbı	49
4.2.7	Dâhili Beton Vibratörü	49
4.2.8	Kür Havuzu	50
4.2.9	Etüv.....	50
4.3	Ölçüm Araçları	51
4.3.1	Çökme (Slump) Deney Düzeneği	51
4.3.2	Basınç Dayanımı Test Cihazı.....	53
4.3.3	Eğilme Dayanımı Test Cihazı.....	54
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	56
5.1	Deney Metodolojisi ve Numune İsimlendirme	57
5.2	Ön Deneyler	60
5.2.1	Bordür Betonunu Reçete Dizaynları	60
5.2.2	R0, R1, R2, R3 Numune Grubu Deneyleri.....	73
5.2.2.1	Çökme (Slump) Deneyi	73
5.2.2.2	Basınç Dayanımı Deneyi.....	74
5.3	Nihai Deneyler.....	76
5.3.1	Bordür Betonunu Reçete Uyarlama Dizaynları	76
5.3.2	RU0, RU1, RU2 Numune Grubu Deneyleri.....	81
5.3.2.1	Çökme (Slump) Deneyi	81
5.3.2.2	Basınç Dayanımı Deneyi.....	82
5.3.2.3	Eğilme Dayanımı Deneyi.....	83
5.3.2.4	Su Emme Tayini	87
6.	DENEY SONUÇLARI ve İRDELEMELER.....	89
6.1	Ön Deneyler İrdelemesi	89
6.1.1	Çökme (Slump) Deneyi Sonuçları İrdelemesi	89
6.1.2	Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları İrdelemesi	90
6.2	Nihai Deneyler İrdelemesi	92
6.2.1	Çökme (Slump) Deneyi Sonuçları İrdelemesi	93
6.2.2	Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları İrdelemesi	94
6.2.3	Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları İrdelemesi.....	97
6.2.4	Su Emme Tayini Sonuçları İrdelemesi.....	109
6.3	XLPE ikamesiyle Oluşan Nakliye ve Hammadde Bazlı Kazançlar ..	110
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	113
8.	KAYNAKLAR	116
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	121

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Etilen monomerinin polietilen polimerini oluşturmasının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.2: Polimerlerin sınıflandırılması	10
Şekil 2.3: Kopolimer çeşitleri ve homopolimer şematik gösterimi	11
Şekil 2.4: Orta gerilim enerji kablosunda XLPE	17
Şekil 2.5: Yapılarda izolasyon malzemesi olarak XLPE	18
Şekil 2.6: Boru tesisatlarında XLPE	18
Şekil 2.7: Plastikler için geri dönüşüm adımları	20
Şekil 2.8: Petkim polietilen ve türevlerinin üretimi.....	22
Şekil 2.9: Türkiye’de proses tiplerine göre polietilen kullanımı	23
Şekil 3.1: Beton bordür	25
Şekil 3.2: Prekast beton bordür	26
Şekil 3.3: Ön dökümlü (prekast) sulu döküm ve pres bordür çeşitleri	27
Şekil 3.4: Prekast beton bordür ölçüleri.....	28
Şekil 3.5: Eğilme testi bordür konumu	36
Şekil 3.6: Aşındırma cihazı çalışma prensibi	37
Şekil 3.7: Pandüllü sürtünme deney donanımı	39
Şekil 4.1: 0-2 mm XLPE granülleri.....	44
Şekil 4.2: 0–5 mm XLPE granülleri	45
Şekil 4.3: Elek analizi deneyinde kullanılan elekler.....	47
Şekil 4.4: Basınç testinde kullanılan beton küp numune kalıbı.....	48
Şekil 4.5: Prekast beton bordür üretiminde kullanılan kalıp	49
Şekil 4.6: Şişe tip (dâhili) beton vibratörü	50
Şekil 4.7: Etüv cihazı	51
Şekil 4.8: Çökme (Slump) deneyinde kullanılan deney düzeneği.....	52
Şekil 4.9: Basınç dayanımı deneyinde kullanılan test cihazı	54
Şekil 4.10: Eğilme dayanımı deneyinde kullanılan test cihazı.....	55
Şekil 5.1: R0, R1, R2 ve R3 numune grubu agrega granülometreleri.....	67
Şekil 5.2: R0, R1, R2 ve R3 numune grubu beton küp numuneleri basınç dayanımları.....	75
Şekil 5.3: RU0, RU1 ve RU2 numune grubu agrega granülometreleri.....	78
Şekil 5.4: RU0, RU1 ve RU2 numune grubu beton küp numuneleri basınç dayanımları.....	83
Şekil 5.5: RU0, RU1 ve RU2 numune grubu bordür eğilme dayanımı kırılma yükleri	85
Şekil 5.6: Bordür kesiti ağırlık merkezi ölçüleri	86
Şekil 6.1: Ön deneyler kütlece % XLPE oranına bağlı çökme miktarları	90
Şekil 6.2: R deney grubu numunelerin ağırlıkları	91
Şekil 6.3: R deney grubu numunelerin basınç dayanımları	91
Şekil 6.4: XLPE oranına bağlı R deney grubu ortalama basınç dayanımları....	92
Şekil 6.5: RU1 ve RU2 numune grubu bordür numuneleri dış görünüşleri ...	92
Şekil 6.6: Nihai deneyler kütlece % XLPE oranına bağlı çökme miktarları....	93
Şekil 6.7: RU deney grubu numunelerin ağırlıkları.....	94
Şekil 6.8: RU deney grubu numunelerin basınç dayanımları.....	94
Şekil 6.9: XLPE oranına bağlı RU deney grubu ortalama basınç dayanımları.....	95

Şekil 6.10: XLPE oranına bağlı R ve RU deney grupları ortalama basınç dayanımları.....	96
Şekil 6.11: Tüm numune gruplarında birim kütle başına ortalama basınç dayanımları.....	96
Şekil 6.12: XLPE oranına bağlı R ve RU deney grupları birim kütle başına ortalama basınç dayanımları.....	97
Şekil 6.13: RU1 grubu bordür numuneleri kırılma kesiti görüntüleri	98
Şekil 6.14: RU2 grubu bordür numuneleri kırılma kesiti görüntüleri	98
Şekil 6.15: RU1–2 bordür numunesi kırılma kesiti görüntüsü.....	99
Şekil 6.16: RU2–3 bordür numunesi kırılma kesiti görüntüsü.....	99
Şekil 6.17: Bordür kesitinde yapısal değişebilen ölçüler	100
Şekil 6.18: Bordür numuneleri ağırlıkları	103
Şekil 6.19: Nominal ölçülere göre eğilme dayanımları	103
Şekil 6.20: Gerçek ölçülere göre eğilme dayanımları.....	104
Şekil 6.21: XLPE oranlarına bağlı nominal ve gerçek ölçülere göre ortalama eğilme dayanımları	105
Şekil 6.22: Nominal ve gerçek ölçülere göre birim kütle başına eğilme dayanımları.....	106
Şekil 6.23: XLPE oranına göre birim kütle başına ortalama eğilme dayanımları	106
Şekil 6.24: Bordürlerin ve parçalarının su emme değerleri	109
Şekil 6.25: Ortalama basınç dayanımları ve ortalama su emme oranları	110

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Polietilen ve XLPE özellikleri karşılaştırması.....	17
Tablo 2.2: Petkim PE üretimi ve PE çeşitlerinin toplam PE üretimi içindeki yüzdeleri.....	22
Tablo 3.1: Beton bordürlere uygulanan deneyler	32
Tablo 3.2: Kütlece su emme oranları.....	34
Tablo 3.3: Buz çözücü tuz etkisiyle birlikte donma çözülme etkisine direnç...34	34
Tablo 3.4: Eğilme dayanımı sınıfları.	35
Tablo 3.5: Aşınmaya direnç sınıfları	37
Tablo 5.1: Çalışmada uygulanan deney metotları	58
Tablo 5.2: Numune isimlendirme metodu.....	59
Tablo 5.3: 0–2 mm XLPE elek analizi.....	61
Tablo 5.4: 0–5 mm XLPE elek analizi.....	62
Tablo 5.5: 0–5 mm agrega elek analizi.....	63
Tablo 5.6: 5–12 mm agrega elek analizi	64
Tablo 5.7: 12–19 mm agrega elek analizi	65
Tablo 5.8: Ön deneyler XLPE granül ve agrega sınıfları incelik modülleri	65
Tablo 5.9: Ön deneyler XLPE granül ve agrega oranları	66
Tablo 5.10: Ön deneyler numune grupları incelik modülleri.....	66
Tablo 5.11: α katsayısının belirlenmesi	67
Tablo 5.12: Beton sınıfına göre hedef basınç dayanımının belirlenmesi.....	68
Tablo 5.13: Su / Çimento oranının seçilmesi	69
Tablo 5.14: Ön deneyler numune grupları KYD hammadde miktarları.....	71
Tablo 5.15: R0, R1, R2 ve R3 numune grupları reçete dizaynı	72
Tablo 5.16: Ön deneyler (R deney grubu) çökme (slump) miktarları	73
Tablo 5.17: Ön deneyler beton küp numune ağırlık ve basınç dayanımları	74
Tablo 5.18: Nihai deneyler XLPE granül ve agrega sınıfları incelik modülleri77	77
Tablo 5.19: Nihai deneyler XLPE granül ve agrega oranları.....	77
Tablo 5.20: Nihai deneyler numune grupları incelik modülleri.....	77
Tablo 5.21: Nihai deneyler numune grupları KYD hammadde miktarları	79
Tablo 5.22: RU0, RU1 ve RU2 numune grupları reçete dizaynı	80
Tablo 5.23: Nihai deneyler (RU deney grubu) çökme (slump) miktarları.....	82
Tablo 5.24: Nihai deneyler beton küp numune ağırlık ve basınç dayanımları..	82
Tablo 5.25: Bordür ağırlıkları ve kırılma yükleri.....	84
Tablo 5.26: RU0 numune grubu eğilme dayanımları (Nominal boyut).....	86
Tablo 5.27: RU1 numune grubu eğilme dayanımları (Nominal boyut).....	87
Tablo 5.28: RU2 numune grubu eğilme dayanımları (Nominal boyut).....	87
Tablo 5.29: Su emme oranları	88
Tablo 6.1: Çökme (Slump) deneyi kıvam sınıfları	89
Tablo 6.2: Ön deneyler kıvam sınıfları.....	90
Tablo 6.3: Nihai deneyler kıvam sınıfları	93
Tablo 6.4: Bordür numuneleri kesit gerçek boyutları.....	101
Tablo 6.5: RU0 numune grubu eğilme dayanımları (Gerçek boyut).....	101
Tablo 6.6: RU1 numune grubu eğilme dayanımları (Gerçek boyut).....	102
Tablo 6.7: RU2 numune grubu eğilme dayanımları (Gerçek boyut).....	102
Tablo 6.8: XLPE kullanım oranları ve brüt beton ağırlığı.....	107

Tablo 6.9: Üretim kapasitesine göre agregadan ve nakliyeden tasarruf miktarları	112
---	-----

SEMBOL ve KISALTMALAR LİSTESİ

XLPE	:	Çapraz Bağlı Polietilen
TS	:	Türk Standardı
EN	:	European Norm (Avrupa Normu)
CEM	:	Cement (Çimento)
PET	:	Polietilen Tereftalat
PPF	:	Polipropilen Fiber
PC	:	Polikarbonat
PE	:	Polietilen
PVC	:	Polivinil Klorür
C₂H₄	:	Etilen
(C₂H₄)_n	:	Polietilen
YYPE	:	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
AYPE	:	Alçak Yoğunluklu Polietilen
HCl	:	Hidroklorik Asit
NH₃	:	Hidrojen Nitrür (Amonyak)
-OH	:	Hidroksil
-NH₂	:	Amino Radikali
-COOH	:	Karboksil
H₂O	:	Hidrojen Oksit (Su)
CH₃COOH	:	Asetik Asit
CO₂	:	Karbondioksit
ICI	:	Imperial Chemical Industries
PEX	:	Çapraz Bağlı Polietilen
XPE	:	Çapraz Bağlı Polietilen
g/cm³	:	Gram / Santimetreküp
MPa	:	Megapaskal
°C	:	Santigrat Derece
AYPE-T	:	Alçak Yoğunluklu Polietilen Tubuler
mm	:	Milimetre
dm³	:	Desimetreküp
NaCl	:	Sodyum Klorür
mm²	:	Milimetrekare
kg	:	Kilogram
M1	:	Deney Numunesi Islak Durum Kütlesi (kg)
M2	:	Deney Numunesi Kuru Durum Kütlesi (kg)
Wa	:	Su Emme Oranı (%)
kg/m²	:	Kilogram / Metrekare
T	:	Eğilme Dayanımı (MPa)
F	:	Kırılma Yüğü (N)
Lo	:	Mesnetler Arası Mesafe
y	:	Kesit Ağırlık Merkezi–Yük Etkime Düzlemi Mesafesi (mm)
I	:	Atalet Momenti (mm ⁴)
MPa/s	:	Megapaskal / Saniye
mm³	:	Milimetreküp
USRV	:	Unpolished Slip Resistance Value (Cilâlanmamış Kayma Direnci Değeri)
kg/dm³	:	Kilogram / Desimetreküp

g	:	Gram
ISO	:	International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
rpm	:	Revulation Per Minute (min^{-1})
kN	:	Kilonewton
W	:	Watt
BS	:	British Standard (İngiliz Standardı)
ASTM	:	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
R	:	Ön Deneyler Deney Grubu Ön Eki
RU	:	Nihai Deneyler Deney Grubu Ön Eki
Dmax	:	Agrega Maksimum Tane Boyutu
q	:	Elek Üstü Yığılımlı Ağırlık (%)
p	:	Elek Altı Yığılımlı Ağırlık (%)
k	:	İncelik Modülü
α	:	İncelik Modülüne Bağlı Su Miktarı Bağıntısı Katsayısı
S	:	Su Miktarı (kg)
Ç	:	Çimento Miktarı (kg)
C	:	Concrete (Beton Sınıfı Belirtir)
f_{ck}	:	Karakteristik Basınç Dayanımı (MPa)
f_{cm}	:	Hedef Basınç Dayanımı (MPa)
σ	:	Standart Sapma (MPa)
P.H.K.	:	Priz Hızlandırıcı Katkı
S.A.K.	:	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı
kg/m³	:	Kilogram / Metreküp
V_a	:	Agrega Hacmi (dm ³)
V_s	:	Su Hacmi (dm ³)
V_ç	:	Çimento Hacmi (dm ³)
V_k	:	Katkıların Hacmi (dm ³)
V_h	:	Hava Hacmi (dm ³)
ρ_a	:	Karışım Agregası Özgül Ağırlığı (kg/dm ³)
$\rho_{0-2 X}$:	0-2 XLPE Granül Özgül Ağırlığı (kg/dm ³)
$\rho_{0-5 X}$:	0-5 XLPE Granül Özgül Ağırlığı (kg/dm ³)
$\rho_{0-5 A}$:	0-5 Agregası Özgül Ağırlığı (kg/dm ³)
$\rho_{5-12 A}$:	5-12 Agregası Özgül Ağırlığı (kg/dm ³)
$\rho_{12-19 A}$:	12-19 Agregası Özgül Ağırlığı (kg/dm ³)
%X_{0-2 X}	:	Toplam Agregası Miktarında Kütlece 0-2 mm XLPE Yüzdesi
%X_{0-5 X}	:	Toplam Agregası Miktarında Kütlece 0-5 mm XLPE Yüzdesi
%X_{0-5 A}	:	Toplam Agregası Miktarında Kütlece 0-5 mm Agregası Yüzdesi
%X_{5-12 A}	:	Toplam Agregası Miktarında Kütlece 5-12 mm Agregası Yüzdesi
%X_{12-19 A}	:	Toplam Agregası Miktarında Kütlece 12-19 mm Agregası Yüzdesi
KYD	:	Kuru Yüzey Doygun
T_{ort}	:	Eğilme Dayanımı (MPa)
Tt	:	Bordür Taban Genişliği (mm)
H	:	Bordür Yüksekliği (mm)
h	:	Bordür Ön Yüz Yüksekliği (mm)
t	:	Bordür Orta Genişliği (mm)
L	:	Bordür Tam Boyu (mm)
A	:	Bordür Kesit Alanı (mm ²)

ÖNSÖZ

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca bana destek olan aileme, tez çalışmasında yapmış olduğum çalışmalarda manen destek olan eşime, deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Nexans Türkiye Endüstri ve Tic. A.Ş. Denizli Fabrika AR-GE Merkezi Müdürü Ömer Eren Bey'e ve öğretim hayatımda bilgi ve önerileriyle her zaman mühendislik bakış açımaya ışık tutan değerli hocam tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Cemal Meran'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Plastik atıkların değerlendirilmesi, dünya nüfusunun ve plastik endüstriyel ürünlere talebin artışına bağlı olarak oluşan atık miktarının artması sebebiyle önemini her geçen gün arttırmaktadır. Özellikle kablo imalatında yoğun miktarlarda kullanılan bir plastik çeşidi olan çapraz bağlı polietilen (XLPE) yapısı gereği geri dönüşüme uygun olmayan bir ürün olup proses sonunda oluşan XLPE atıklarının değerlendirilmesi hem çevresel açıdan hem de XLPE atık oluşturan işletmeler açısından faydalar sağlayabilecektir. Bu sebeple bu çalışmada çapraz bağlı polietilen atıkların prekast beton bordürlerde ince agrega yerine kullanılması araştırılmıştır.

Granül haline getirilmiş XLPE atıklarının beton ve beton harcı içinde davranışını gözlemek için ön deneyler yapılmıştır. Bu sebeple beton hammadde karışım dizaynı oluşturulmuştur ve ince agrega yerine XLPE ikamesiyle numuneler oluşturulmuştur. Numunelerin beton harcına çökme (slump) ve beton küp numunelere basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır.

Ön deneylerden elde edilen gözlemler sonucunda nihai deneyler yapılmıştır. Doğruluğu bilinen bir prekast beton bordür hammadde karışım dizaynında ince agrega yerine XLPE granülleri ikamesiyle XLPE içerikli beton küp numuneler ve bordür numuneler oluşturulmuştur. Numunelerin beton harcına çökme (slump) testi, beton küp numunelere basınç dayanımı, bordür numunelere eğilme dayanımı ve su emme tayini testi uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçları ile XLPE içerikli ve XLPE içeriksiz numuneler arasında kıyaslama yapılmıştır. XLPE atıkların prekast beton bordürlerde kullanımını TS EN 1340 standardı ışığında incelenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Araştırmacılar çapraz bağlı polietilen atıklar ve çeşitli plastik atıklarla beton karışımları oluşturmuş taze ve sert beton özelliklerini incelemişlerdir. Plastik atıkların farklı oranlarda beton harcında kullanılmasında çoğunlukla mukavemet değerlerinde azalma, gerek agrega yapısından, gerek plastik atıkların fiziksel ve

geometrik yapılarından kaynaklı olarak taze beton özelliklerinde çeşitli sonuçlar gözlemlenmiştir.

Literatürdeki bir çalışmada iki farklı çimento tipi (CEM II/B-M (P-LL) 32.5 N ve CEM I 42.5 R) kullanılarak hazırlanmış sabit su/çimento oranına sahip beton karışımlarında polipropilen fiberlerin (PPF) yerine polietilen tereftalatların (PET) kullanılabilirliği incelenmiş olup 1 m³ beton hacmi karışımına 300, 600 ve 900 gram atık PET ilavesi yapılarak hazırlanan numunelerin, polipropilen fiber katkılı numuneler ve plastik katkısız kontrol numuneleri ile basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve çökme (slump) değerleri sonuçları kıyaslanmıştır. Karışımlarda PET miktarı arttıkça CEM II/B-M (P-LL) 32.5 N tipi çimento kullanılan A tipi numunelerde plastik katkısız numunelere göre 20 cm'den 6 cm'e kadar işlenebilirlikte iyileşme, CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılan B tipi numunelerde plastik katkısız numunelere göre 22 cm'den 9 cm'e kadar işlenebilirlikte iyileşme gözlemlenmiştir. A tipi plastik katkısız numunelerdeki eğilme dayanımının 4,8 MPa'dan PET ilavesi artışıyla 3,6 MPa kadar düştüğü, B tipi plastik katkısız numunelerdeki eğilme dayanımının 5,3 MPa'dan PET ilavesi artışıyla 4,8 MPa kadar düştüğü, yine A tipi numunelerde PET ilavesiyle basınç dayanımında 28 MPa dan 16 MPa kadar, B Tipi numunelerde PET ilavesiyle basınç dayanımında 39 MPa dan 22 MPa kadar düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Her iki numune tipinde %0,6 oranında PET kullanımı %0,6 PPF kullanımına göre basınç ve eğilme dayanımında daha iyi sonuçlar vermiştir. Genel olarak PET oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir (Özel ve diğ. 2011).

Çapraz bağlı polietilenler (XLPE) 0–2 mm, 2-8 mm ve 8-16 mm boyutlarında çimento kütlelerinin %8'i oranına kadar ve 0,42 sabit su/çimento oranında çeşitli numuneler hazırlanarak yapılan deneylerde; XLPE boyutları arttıkça basınç dayanımı ve eğilme dayanımının azaldığını gözlemlenmiştir. Sabit su/çimento oranında XLPE oranı artmasıyla yine basınç dayanımı ve eğilme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. XLPE boyutlarının karışımlarda küçük boyutlarda tutulmasının daha avantajlı olduğu belirtilmiştir. XLPE oranı artışıyla birim beton ağırlığının XLPE'nin özgül ağırlığının agrega ve çimentonun özgül ağırlığından düşük olması sebebiyle azaldığı görülmüştür (Zéhil ve Esad 2019).

0,45, 0,49 ve 0,53 sabit su/çimento oranlarında ince agrega yerine %25, %50 ve %75 oranında PET ilavesiyle elde edilen numunelerin kontrol numuneleriyle kıyasla basınç dayanımını azaldığı gözlemlenmiştir. Hazırlanan taze beton karışımlarında PET miktarı oranı arttıkça çökme (slump) miktarı artmakta olduğu ve bunun sebebinin su/çimento oranlarından bağımsız olarak karışıma ilave edilen PET parçacıklarının yuvarlak yapılarından kaynaklandığı gözlemlenmiştir (Choi ve diğ. 2009).

Betona dolgu (kum ve çakıl) miktarının %10'u, %15'i ve %20'si miktarında reçine ilavesiyle ve elektronik plastik atık miktarının dolgu (kum ve çakıl) miktarına göre %0, %5, %15 ve %25 oranla karıştırılmasıyla elde edilen 12 adet numune tipinde yapılan deneylerde basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımının plastik oranı artışına bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Reçine oranının artmasının basınç dayanımını arttırdığı fakat eğilme ve yarmada çekme dayanımlarına pozitif veya negatif etki etmediği gözlemlenmiştir (Bulut ve Şahin 2017).

0,44 ve 0,55 sabit su/çimento oranlarında ve hacmen %34, %35 ve %45 oranlarında poliüretan köpük ilavesiyle oluşturulan numuneler üzerinde yapılan deneylerde basınç dayanımları 8–16 MPa arasında değişim göstermiştir. Poliüretan köpük içermeyen numuneler ile kıyaslandığında basınç dayanımında ciddi miktarda düşüş gözlemlenmiştir (Fraj ve diğ. 2009).

0,45 ve 0,55 su/çimento oranlarında ve çimentonun 7 ve 4,8 katı oranlarında agrega içeren numuneler ile yapılan deneylerde 28 günlük basınç dayanımında az miktarda azalma gözlemlenmiştir. 360 günlük basınç dayanımı değerlerinde 28 günlük basınç dayanımına göre artış devam etmiş fakat referans beton numunelere göre basınç dayanımındaki azalma miktarı yaklaşık olarak 28 günlük basınç dayanımlarına göre korunmuştur (Frigione 2010).

Kendiliğinden yerleşen betonda kısmi olarak kum yerine plastik atık ikamesiyle oluşturulan numunelerde CEM I 42,5 R tipinde çimento kullanılmıştır. %0, %2,50 %5, %7,5, %10 ve %12,5 oranlarında kum yerine plastik atık ikamesiyle oluşturulan beton harçlarına atık plastikler ince, kaba ve ince-kaba boyutlarda ilave edilmiş ve karışımlarda plastik atık miktarının artmasıyla basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Beton karışımlarında kullanılan atık plastik boyutlarının

artmasıyla basınç dayanımlarında bir miktar daha düşüş olduğunu gözlemlemiştir (Hama ve Hilal 2017).

İnce agrega yerine ağırlıkça ince boyutlu plastik agregalar %10, %15 ve %20 oranlarında ilave edilmiş ve her ince agrega değişim miktarının %15'i, %20'si ve %25'i oranında kaba agrega kaba boyutlu plastik agregalar ile değiştirilerek hazırlanan karışımlara çimento miktarının %0,3'ü oranında çelik fiber ilave edilmiştir. Basınç dayanımı için 60 adet beton küp numune, yarmada çekme dayanımı için 60 adet silindirik numune ve eğilme dayanımı için 40 adet prizmatik numune oluşturulmuş 7 ve 28 günlük dayanım deneyleri yapılmıştır. Plastik agrega ve çimento arasındaki zayıf bağ nedeniyle mukavemetlerde azalma olduğu gözlemlenmiştir (Jaivignesh ve Sofi 2017).

Kendiliğinden yerleşen beton harcının içinde kullanılan kum miktarının poşet/torba üretiminde kullanılan PET atıklar ile kum ağırlığının %10'u, %20'si, %30'u ve %50'si oranında ikamesiyle oluşturulan numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri irdelenmiştir. Karışımda plastik atık miktarı oranı arttıkça çökme (slump) miktarı artış göstermektedir. Yaklaşık %20 oranına kadar porozite ve su emme miktarı azalmakta ve %50 oranına kadar yükseldiği gözlemlenmektedir. 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda yapılan basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerinde PET ilavesiyle mukavemette düşüş olduğu gözlemlenmiştir. %20 ila %50 oranında plastik atık içeren numunelerde basınç dayanımındaki azalmanın %15–%33 arasında olduğu belirtilmiştir (Safi ve diğ. 2013).

Kum yerine %3, %10, %20 ve %50 oranında maksimum tane boyutu 5 mm olan polikarbonat (PC) plastik ikamesiyle oluşturulan numunelerin deneylerinde %50 oranına kadar çökme (slump) miktarında artış görülmüştür. Bunun sebebinin silisli kuma göre polikarbonat plastiklerin daha az su emmesine dayandırılmıştır (Hannawi ve Prince-Agbodjan 2014).

0–4 mm, 0–8 mm ve 8–32 mm boyutlarında polietilen (PE) ve polivinil Klorür (PVC) plastik atıklar PE, PVC ve PE+PVC olarak %0, %2,5, %5, %10 ve %20 oranlarında karışım harcı ve beton numuneler oluşturulmuştur. Karışım harçlarında CEM IV/B (V) 32,5 N tipi, beton numunelerde CEMII/AV 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Plastik atık miktarının artmasına dayalı olarak yoğunluğun

her numunede azaldığı görülmüş ve plastik atık miktarının artışıyla gözenekliliğin ve karbonatlaşma derinliğinin arttığı belirtilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımlarının plastik atık miktarının oranının artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. 28 gün basınç dayanımı %5 PE içeren numunelerde %5 PVC içeren numunelere göre daha iyi çıkmıştır fakat %2,5, %10 ve %20 PVC içeren numunelerde PE içerikli numunelere göre daha iyidir. 28 günlük eğilme dayanımı değerleri tüm PVC içerikli numunelerde sadece PE içerikli numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. 28 günlük basınç dayanımı değerleri %10 PE+PVC içerikli numunelerde %10 PE ve %10 PVC içerikli numunelere göre daha iyi sonuç vermiştir. PE ve PVC içerikli numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri sadece PE içerikli numunelere göre daha yüksek, sadece PVC içerikli numunelere göre daha düşük çıkmıştır (Ruiz-Herrero ve diğ. 2016).

Kum yerine PVC atıklarının %25, %50 ve %100 oranında ikamesiyle PVC içermeyen kontrol numunelerine göre PVC oranının artmasıyla eğilme dayanımının azaldığı ve %50 oranında PVC ikamesi hariç basınç dayanımının genel itibariyle azaldığı gözlemlenmiştir. PVC oranının artmasıyla ısı yalıtım davranışının olumlu yönde desteklendiği ve eğilme dayanımının önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir (Aciu ve diğ. 2018).

Yapılan literatür taramasında betonlarda plastik agrega ikamesiyle işlenebilirlik davranışının plastik agregasının boyut ve şekline bağlı olarak iki farklı yönde eğilim gösterdiği belirtilmiştir. Plastik agregasının pulumsu ve gözenekli yapısının işlenebilirliği azaltma yönünde, yuvarlaksı yapısının ise işlenebilirliği artırma yönünde olduğu belirtilmiştir. Betonlara plastik agrega eklenme oranının artmasıyla basınç dayanımında oluşan azalma oranının eğilme ve yarmada çekme dayanımı azalma oranından daha fazla olduğu belirtilmiştir (Saikia ve Brito 2012).

Nehir kumu yerine farklı oranlarda (%0, %5, %15, %30 ve %45) PVC atık ilavesi ile numuneler oluşturulmuş ve PVC ilavesinin artmasıyla betonda daha düşük yoğunluk elde edilmesinin olumlu sonuçları yanında beton harcının işlenebilirliğinin ve beton numunelerin basınç ve yarmada çekme dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca elastisite modülünün azaldığı poisson oranının artış gösterdiği bu sebeple sünekliğin arttığı belirtilmiştir (Kou ve diğ. 2009).

0,5 ve 0,6 sabit su/çimento oranlarında ve hacmen %0, %10 ve %20 oranında PET atıkları ilavesiyle oluşturulan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre PET hacminin artmasıyla ve PET parçacık boyutunun artmasıyla basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve ultrasonik darbe hızında azalma olduğu gözlemlenmiştir. PET hacminin ve PET parçacık boyutlarının artmasının su emme miktarını arttırdığını gözlemlemişlerdir bu durumun sebebini gözenek miktarının artmasına dolayısıyla PET miktarı ve boyutunun işlenebilirliği güçleştirmesine bağlamaktadır. Farklı su/çimento oranına sahip beton harçlarına farklı boyutta PET parçacıkları ilavesiyle ve PET oranı artırılmasıyla, kontrol betonu harcına göre çökme (slump) değerlerinin azaldığı dolayısıyla işlenebilirliğin azaldığı gözlemlenmiştir (Albano ve diğ. 2009).

0,45 su/çimento oranında ve 0,5 PET/(çimento ve yüksek fırın cürufu) oranında ince agrega yerine PET ve PET+Kum içerikli numuneler hazırlanarak yapılan deneylerde çimento miktarının %50'si oranında yüksek fırın cürufu kullanılarak tasarruflu bir beton elde edilmek istenmiştir. 28 günlük basınç dayanımı deneylerinde yüksek fırın cürufu numunelerin basınç dayanımı, yüksek fırın cürufu içermeyen çimento bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımından daha yüksek çıkmıştır. PET ve kumun birlikte kullanıldığı numunelerin beton harcı birim ağırlıkları, ince agrega ikamesinde sadece PET içeren numunelerin beton harcı birim ağırlığından daha yüksek çıkmıştır. PET+Kum agregasının birlikte kullanıldığı beton numunelerin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerleri, ince agrega ikamesinde sadece PET içeren numunelerin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerlerinden daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir (Akçaözoğlu ve diğ. 2010).

Yapılan çalışmada iri (kaba) agrega miktarı ve sabit su/çimento oranının sabit tutulduğu %0 ila %30 oranına kadar farklı oranlarda PET ilavesiyle oluşturulan numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının %10'a kadar, 28 günlük eğilme dayanımlarının %15'e kadar PET ilavesiyle artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Beton harcına ilave edilen PET miktarı oranının artmasıyla 28 günlük elastisite modülünün azaldığını gözlemlemişler ve bu azalışın %12 oranında PET ilavesi yapılmasıyla atık PET içermeyen numunelere göre %50 oranında olduğu gözlemlenmektedir (Azhdarpour ve diğ. 2016).

Modifiye edilmiş atık polistiren köpük plastiklerin ince ve kaba agrega biçiminde ikamesiyle beton harcı ve beton numunelerinde denemeler yapılmış ve modifiye edilmiş atık polistiren köpük plastik oranının artmasıyla donma direncinin iyileştiği gözlemlenmiştir (Kan ve Demirboğa 2009).

Yapılan literatür araştırmasında plastik agregaların düzensiz yapısı sebebiyle hava içeriğinin arttığı sonucuna varılmıştır. Plastik agregalı betonların eğilme ve yarmada çekme dayanımlarında genellikle azalma olduğu saptanmış ve %20'den az plastik kullanımlarında eğilme ve çekme mukavemetlerinde artış elde edilebildiği gözlemlenmiştir. %50'ye kadar betonlara plastik ilavesinin işlenebilirliği artırdığı gözlemlenmiş olup plastik agreganın tane şekli, boyutu, pürüzlülüğü ve su/çimento oranı gibi etkenlerin işlenebilirliğin artışında veya azalışında etkili olduğu belirtilmiştir (Babafemi ve diğ. 2018).

Farklı mevsimsel zamanlarda geri kazanım tesislerinden elde edilen plastik atıklar ile yapılan çalışmada betonun basınç dayanımı, ısıl iletkenlik, yoğunluk ve su emiciliği gibi özellikleri incelenmiş gelişmiş ısı yalıtımı ve su emiciliği olan malzemeler üretmenin uygun olduğu ve beton agregasının %20'sine kadar tüketici kullanımı sonrası elde edilen atık plastiklerle ikame edilebileceği belirtilmiştir (Jacob-Vaillancourt ve Sorelli 2018).

1.2 Amaç

Çapraz bağlı polietilen (XLPE) plastikler güç iletim elemanlarında mükemmel elektriksel, termal ve mekanik özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat XLPE plastikler prosesler sonunda geri dönüştürülemede ve üretim prosesleri için atık durumuna gelmektedir. Atık haline gelen XLPE'nin çevresel etkileri ve stoklama problemlerinden dolayı işletmelerin proses etkinliğinde sorunlar açığa çıkabilmektedir. Stoklarda uzun süre bekletilen atıklar, belirli bir süre sonunda işletmelerin projesel iyileştirme çalışmalarında hareket kısıtlılığı anlamına gelmektedir. Bu hareket kısıtlılığı işletmenin dinamizmine negatif etki yapar hatta iş sağlığı güvenliği problemlerine yol açabilir. Bu stoklama sorunları işletmedeki prosesler için de gözle görülmez yani istatistiği tutulmaz ilave enerji ve zaman kayıplarına da yol açabilmektedir.

XLPE atıkların yoğun miktarlarda oluşması bu malzemenin herhangi bir proseste değerlendirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. XLPE atıkların başka bir üretim prosesinde değerlendirilmesi, XLPE atık oluşturan işletmeler için de pozitif bir durum oluşturabilir. Bu sebeple çapraz bağlı polietilenin proseslerde kullanımıyla ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Çapraz bağlı polietilen plastik atıklar yapısı gereği geri dönüşüme pek uygun olmayan bir plastik çeşidi olması sebebiyle granül haline getirilerek diğer olası imalat proseslerinde kompozit katkı bileşeni olabileceği düşünülmektedir. XLPE'nin kütlece yoğun miktarlarda oluşmasından ötürü bu malzemenin yine kütlece yoğun miktarlarda üretim yapılan yapı sektöründe dolayısıyla beton karışımlarında değerlendirilmesi fikrini akla getirmektedir. Özellikle orta ve yüksek gerilim enerji kablosu imalatçılarında oluşan XLPE atıkların stoklama sorununa yardımcı olabilmek ve bu malzemeyi belirli boyutlara getirerek mukavemetin çok fazla hayati önem taşımadığı yol ve bahçe düzenlemelerinde kullanılan beton bordürlerin üretiminde kullanmak akla mantıklı gelmektedir. Granül hale getirilmiş XLPE atıkların beton bordür üretiminde kullanılabilme durumu araştırılarak mümkün olabilecek pozitif sonuçlara ulaşmak böylelikle prekast beton bordürlerde hafifliğe ve hammadde maliyetine pozitif katkı sağlamak dolayısıyla XLPE atıkların sürdürülebilir bir yöntemle çevresel etkilerini ve stoklama problemlerini en aza indirmek hedeflenmiştir.

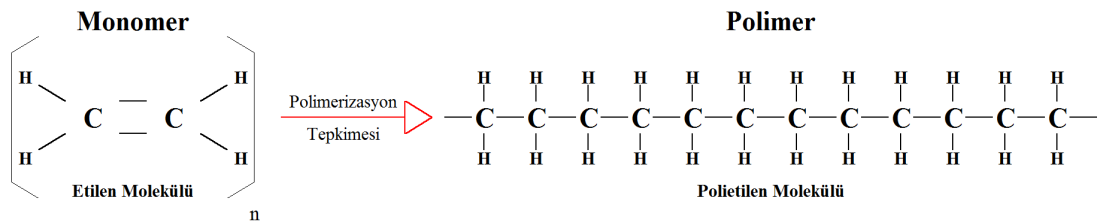
Bu çalışmada XLPE atıkların prekast beton bordür üretiminde katkı maddesi olarak kullanımı araştırılmıştır. Granül haldeki XLPE atıklar prekast beton bordür üretiminde ince agrega sınıfına dahil edilmiştir. XLPE granüllerinin prekast beton bordür üretiminde belirli oranlarda kullanılması beton harcındaki su gereksinimini azaltacağı dolayısıyla su ve çimento oranını azaltarak beton mukavemet değerlerinde ve hammadde maliyetini indirgemede pozitif etkisi olabileceği öngörülmektedir.

XLPE atıklarının prekast beton bordür üretiminde kullanılmasıyla hem XLPE atık oluşturan işletmeler için hem de prekast beton bordür üretimi yapan işletmeler için karşılıklı faydalar oluşturulması amaçlanmaktadır.

2. POLİMERLER ve ÇAPRAZ BAĞLI POLİETİLEN (XLPE)

2.1 Polimerler

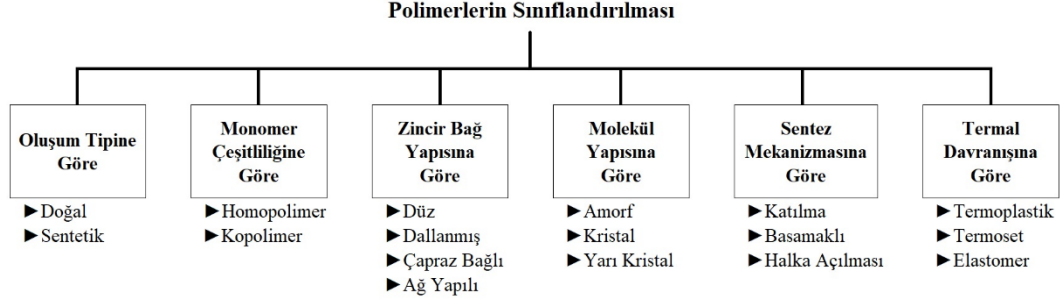
Polimerler, monomer adı verilen küçük moleküllü yapıların birbirlerine kimyasal bağlarla bağlanması sonucu oluşan yüksek molekül ağırlıklı ve uzun zincirimsi bir yapıya sahip olan bileşikler olarak nitelendirilebilir. Monomerlerin uygun koşullar altında kimyasal bağlarla bir araya gelerek polimeri oluşturmaya polimerizasyon (polimerleşme) denmektedir. Örneğin etilen (C_2H_4) bir monomer iken etilen molekülünün bir araya gelmesi sonucu oluşan polietilen (PE) (C_2H_4)_n bir polimerdir. Polimer molekülü yapısı içinde bulunan monomer molekülünün miktarı arttıkça yani tekrar eden monomer molekülünün sayısı arttıkça polimerlerin molekül ağırlığı artmaktadır. Polimer içinde tekrar eden bir çeşit monomer varsa bu polimere homopolimer, eğer birden çok çeşit monomer varsa bu polimerlere kopolimer denir. Genel olarak monomerleri oluşturan elementler ametallerdir. Polimerler doğada doğal şartlarda oluşabilir ve polimerlerin yapay olarak elde edilmesi de mümkündür. Polimerler canlı yapılarından, gündelik hayatta kullandığımız malzemelere kadar birçok maddenin içinde bulunmaktadır. Şekil 2.1 de etilen monomerinin polietilen polimerine dönüşümü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Etilen monomerinin polietilen polimerini oluşturmalarının şematik gösterimi

2.1.1 Polimerlerin sınıflandırılması

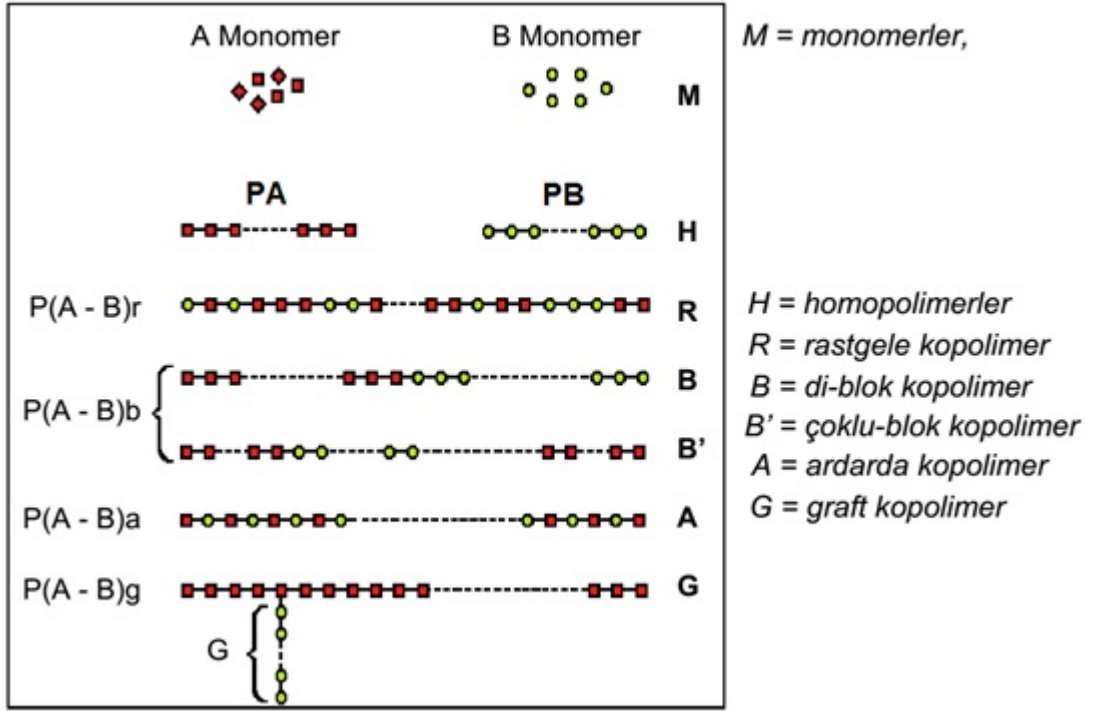
Polimerlerin incelenmesi için sınıflandırma ihtiyacı oluşmuş ve polimerlerin çeşitli özelliklerine göre sınıflandırmalar yapılmıştır. Şekil 2.2’de polimerlerin sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Polimerlerin sınıflandırılması

Oluşum tiplerine göre polimerler, doğada kendiliğinden bulunan ve canlı yapılarda sentezlenerek oluşan doğal polimerler, doğada kendiliğinden bulunmayan uygun koşullarda ek işlemlerle elde edilen polimerler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Doğal polimerlere örnek olarak kauçuk, selüloz, nişasta ve reçine sayılabilir. Bazı durumlarda doğal polimerlere ilave özellikler kazandırmak, polimerin işleme kolaylığı özelliğini iyileştirmek gibi sebeplerle polimerlere katkı maddeleri katılabilmekte ve yarı sentetik olarak nitelendirilebilecek bir polimer oluşturulabilmektedir. Yarı sentetik polimerlere örnek selüloz nitrat, selüloz asetat ve türevleri sayılabilir. Sentetik polimerler genellikle petrol kaynaklı olup çeşitli kimyasal ve fiziksel işlemlerin ardından elde edilmektedir. Örnek olarak ticari plastikler sayılabilir. Sentetik polimerlere de ilave özellikler kazandırmak amacıyla katkı maddeleri katılabilmektedir.

Monomer çeşitliliği bakımından polimerler, homopolimer ve kopolimer olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Homopolimerler tek tip monomerlerden meydana gelmektedir. Kopolimerler ise birden çok monomerden meydana gelmekte olup yine bu monomerlerin polimer zincirine diziliş ve bağlantı biçimine göre 5 alt gruba ayırmak mümkündür. Kopolimerler, rastgele (düzensiz) kopolimer, di-blok kopolimer, çoklu blok kopolimer, ardarda (ardışık) kopolimer ve graft (aşılı) kopolimer olarak nitelendirilebilir. Şekil 2.3'te kopolimer çeşitlerine ve homopolimere ait şematik yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Kopolimer çeşitleri ve homopolimer şematik gösterimi (Beşergil 2008)

Polimer tipine göre diğer bir tabirle zincir şekillerine göre polimerleri, doğrusal (düz) polimer, dallanmış polimer, çapraz bağlı polimer ve ağ yapılı polimer olmak üzere dört ana gruba ayırmak mümkündür.

Doğrusal polimerler monomerlerin yan yana tek bir zincir oluşturacak biçimde bağlanmasıyla oluşan polimerlere doğrusal (düz) polimerler denir. Bu polimerler uygun çözücülerde çözünürler ve eritilerek tekrar kullanılabilirler.

Doğrusal polimer zincirine yan dallar bağlanmasıyla oluşan ve dal biçiminde zincire benzeyen polimerlere dallanmış polimerler denir. Dallanmış polimerler genelde doğrusal polimerlere yakın özellik gösterirler. Örneğin yüksek yoğunluklu polietilende (YYPE) zincirler tamamen doğrusal iken düşük yoğunluklu polietilende (AYPE) zincirler kısa yan dallar içerir.

Çapraz bağlı polimerde ana zincirlere bağlı yan zincirler yine diğer ana zincirlere bağlanarak oluşturdukları ara zincirler ile karmaşık bir ağ yapısı oluşturur. Birçok elastik kauçuk, vulkanizasyon işlemiyle çapraz bağlı hale getirilmektedir. Çapraz bağlı polimerler çözücüde çözünmezler sadece uygun çözücülerde belli oranda şişirilebilirler (URL 1).

Ağ yapılı polimerlerde üç boyutlu ağ yapacak şekilde, üç veya dört aktif kovalent bağa sahiptir. Yoğun şekilde çapraz bağa sahip polimerlere de ağ yapılı polimerler denir. Ağ yapılı polimer grubuna ait epoksi, poliüretan ve fenolformaldehit gibi malzemeler kendine özgü mekanik özelliklere ve ısı özelliklerine sahiptirler (URL 1).

Molekül yapısına göre polimerler amorf yapılı, kristal yapılı ve yarı kristal yapılı diye sınıflandırılmaktadır.

Amorf polimerler, düzenli molekül yapısına sahip ve biçimlendirilmiş bir forma sahip olan kristal yapılı polimerlerin aksine, rastgele ve düzensiz bir molekül yapısına sahiptir. Amorf yapılı polimerler, kristalli bir yapıya sahip olmadıklarından daha esnektirler. Bu malzeme grubu; şeffaflık, esneklik ve darbe direncinin önemli olduğu uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Kristalli yapıya sahip olmadıkları için ışığı dağıtmazlar böylece lensler veya ekranlar gibi optik netliğin önemli olduğu uygulamalarda kullanım alanı bulurlar. Amorf polimerlerin düzensiz moleküler yapısı, düşük sertlik direnci, erime noktası ve mekanik dayanıklılık, yavaş kristallenme eğilimi gibi özelliklerinden dolayı işlenmeleri kristal polimerlere göre daha zor olabilmektedir. Amorf yapılı polimerler, kristal yapılı polimerlerden daha düşük erime noktalarına sahip olduklarından, yüksek sıcaklıklarda deformasyon ve erime sorunları ile karşılaşmak mümkündür (Kılınç ve Toplan 2023).

Uzun dallanma yapısına sahip veya fonksiyonel gruplar içeren polimer zincirleri serttir, hacimli yan gruplar eğilip bükülmeye veya katlanarak yeterli derecelerde sıkı bir düzene girmeye olanak vermez. Bu tür maddeler ‘amorf’ polimerler olarak tanımlanır. Amorf polimerlerin düzgün bir içyapıları yoktur (spagettiye benzer), moleküler düzenlenme rastgeledir, dolaşık ip veya sarım şeklindedir; büzülme özelliği zayıftır, kimyasal maddelere ve aşınmaya dayanıklılıkları orta dereceldedir (Beşergil 2009).

Doğrusal yapılı polimer zincirleri eğilip bükülerek şekil verilmeye ve sıkışık bir düzen içine girmeye eğilimlidir; bu tür yapılarda ‘kristalin’ düzende (sıkı ve düzenlenmiş veya paketlenmiş) bölgeler meydana gelir. Kristalinite seviyesi %0–90 arasında değişebilir. Düzgün paketlerin fazlalığı yüksek kristaliniteyi gösterir; bu tür ürünlere bazen ‘kristal’ polimer denir. %100 kristal yapılı bir polimer doğada yoktur.

Yarı kristalin polimerler opak renkli veya yarı saydamdır, büzülme özellikleri yüksektir, kimyasal maddelere ve aşınmaya dayanıklıdırlar. Polietilen, polipropilen, asetaller, naylonlar ve termoset poliesterlerin çoğu yarı kristalin polimerler grubunda yer alabilmektedir. Ayrıca tipik yarı kristalin polimerler arasında polibütilen tereftalat, poliamidler, polimetilpenten, polifenilen sülfür, polietereterketon sayılabilir (Beşergil 2009).

Polimerleri, polimerlerin sentezlenme yani polimerizasyon mekanizmasına göre, katılma (zincir) ve basamaklı (kondenzasyon) ve halka açılması sentezleri olmak üzere üç gruba ayırarak incelemek mümkündür.

Katılma (Zincir) polimerizasyonda monomerler doğrudan birbirlerine katılarak büyük polimer zincirini oluştururlar. Katılma polimerizasyonunda genellikle yapısında pi (π) bağları bulunan monomerler kullanılır. Bu polimerizasyon yöntemi ile kısa sürede yüksek molekül ağırlığına sahip polimer zinciri oluşmuş olur. Katılma polimerizasyonu serbest radikaller, iyonlar veya koordinasyon kompleks sistemler üzerinden yürüyebilir (Duman 2018). Eklenen monomerler her zaman aynı monomer yapısına veya çoklu bileşenlerinden oluşmaktadır.

Katılma (zincir) reaksiyonlarında bir başlatıcı veya katalizör yardımıyla reaksiyon başlatılır ve çok sayıda doymamış monomer yapısı birbirine eklenerek uzun zincirli polimer yapılarını oluştururlar. Katılma polimerizasyonunda aktif merkez oluşturmak amacı ile bir başlatıcı katalizör kullanılır (Mısır 2011).

Basamaklı (kondenzasyon) polimerizasyon fonksiyonel gruplar taşıyan moleküller arasında adım adım ilerler. Polimerizasyon ortamında bulunan her büyüklükteki molekül birbiriyle tepkimeye girebilir ve polimerin mol kütlesi yavaş yavaş, uzunca bir süre boyunca artar. Kondenzasyon tepkimeleri $-OH$, $-NH_2$, $-COOH$ türü fonksiyonel gruplar taşıyan moleküller arasında gözlemlenir. Basamaklı polimerizasyonda genellikle su açığa çıkmaktadır. Alkol, HCl , NH_3 gibi moleküller de açığa çıkabilmektedir (URL 2).

En az iki adet fonksiyonel grup içeren monomerlerin, kovalent bağlarla birbirine bağlanarak basit moleküllerin ayrılması sonucu gerçekleşen polimerleşmeye

kondenzasyon polimerizasyonu adı verilir. $-OH$, $-NH_2$, $-COOH$ gibi fonksiyonel gruplar taşıyan moleküller arasında gözlenir. Kondenzasyon polimerizasyonunun gerçekleşebilmesi için en az iki noktadan kondenzasyona girebilecek monomere ihtiyaç vardır. Kondenzasyon tepkimelerinin bu noktalardan itibaren ardarda ilerlemesiyle (polikondenzasyon) polimer zincirleri oluşur. Kondenzasyon polimerizasyonunda genellikle H_2O , HCl , NH_3 , CH_3COOH , CO_2 gibi küçük moleküller açığa çıkmaktadır (Mısıır 2011).

Halkalı yapıdaki eterle, asetaller, esterler, amidler ve siloksanlar halka açılması polimerizasyonu ile polimerleşme gerçekleşir. Polimerizasyon iyonik ve moleküler katalizörlerle başlatılabilir ve halka açılması ile yeni bir başlatıcı tür oluşur. Çoğalma reaksiyonu, monomer moleküllerinin başlatıcıya art arda katılması ile gerçekleşir. Hangi tip polimerizasyon ile incelenebileceğini kinetik veriler gösterebilir. Halka açılması polimerizasyonlarının genelinde polimerizasyon–depolimerizasyon dengelerinin olması sebebiyle karmaşık bir mekanizma oluşmaktadır (URL 3).

Termal davranışına göre polimerleri termoplastik polimerler, termoset polimerler ve elastomer polimerler olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür.

Termoplastik polimerler, özelliklerinde önemli değişiklikler olmadan defalarca ısıtılarak yeniden şekillendirilebilirler. Bunların çoğu birbirine kovalent bağlı çok uzun karbon atomları zincirlerine sahiptir. Bazen azot, oksijen ya da kükürt atomları da ana molekül zincirlerine kovalent bağ ile bağlanırlar. Isı ve basınç altında yumuşayarak akıcı hale gelmektedirler bu sebeple termoplastiklere istenen biçimlerde form vermek mümkündür. Termoplastikler doğrusal yapıdadırlar ve uygun çözücülerde çözünebilir ve “çözücü döküm” adı verilen yöntemlerle çeşitli şekillere dönüştürülebilirler. Örnek olarak PE, Nylon, PVC verilebilir (Mergen 2012).

Termoset polimerler, kalıcı bir biçimde şekillendirilip kimyasal bir tepkimeyle olgunlaştıktan veya sertleştikten sonra artık ısıtılarak yeniden yumuşatılamaz veya yeniden işlem görüm başka bir forma dönüştürülemezler. Yüksek sıcaklıklarda termosetler mevcut yapısını kaybederek bozulurlar. Yani termoset plastikler, termoplastiklerin aksine yeniden üretim döngüsüne giremezler. Termoset plastiklerin ısıtılarak yeniden kullanımı mümkün değildir. Termosetlerin

diğer bir isimlendirmesi de 'ısı sert'dir. Bu ifadenin nedeni, plastiğın kalıcı olarak şekillendirilebilmesi için ısıya ihtiyaç olması ve sertleştikten sonra sıcaklık değişimi ile sertlik özelliğini kaybetmemesidir (Mergen 2012).

Elastomerler, çapraz bağ ile birbirine bağlı olan uzun polimer zincirlerini içermektedirler. Elastomerler diğer polimerlerden iki ana karakteristik özellikleriyle ayrılırlar. Bunlar yüksek elastikiyet göstermesinin yanı sıra herhangi bir dış etki (basma, çekme, burma, elastomerin elastikiyet özelliklerini yitirmeden değişen sıcaklık v.b.) ortadan kaldırıldığında bir önceki formuna dönebilmesidir. Bu gibi üstün özellikleri sebebiyle elastomerler mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez malzemeleridir. Elastomerler, endüstriyel makinelerdeki hidrolik ve pnömatik contalar gibi sıklık ve gevşekliğin bir arada olmasını gerektiren uygulamalar ve hassas farmasötik kalıplamalara kadar birçok uygulamada kendine yer bulmaktadır (Birinci 2020).

2.2 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE)

Polietilen, günümüz plastikleri içinde en fazla üretilen plastik tipidir. Polietilen uygulamalarda kullanılan plastik ürünlerin içinde %40'a yakın bir oranla başı çekmektedir. Alçak, orta, yüksek ve çok yüksek yoğunluk tiplerinde polietilenler üretilmekte olup alçak ve yüksek yoğunluklu polietilen tipleri en çok kullanılan tiplerdir. Çok çeşitli üretim proseslerinde kullanılabilen polietilen; granül, film, levha, profil vb. formlarda piyasaya arz edilen ve yurdumuzda da üretilen bir termoplast plastiktir. Petrol kaynaklı etilenden elde edilen polietilen, ilk defa ICI-İngiltere laboratuvarlarında sentez edilmiş, 1936'da Fawcet tarafından tanımlanmıştır. Günümüzde polietilen kolay üretilmesi, geri dönüştürülebilmesi, uygulama kolaylığı ve ucuz bir ürün olması sebebiyle dünya plastik piyasalarının önemli bir plastiğidir. Türkiye'de Petkim firması tarafından "Petilen" adıyla üretilmektedir (Yaşar 2001).

Polietilenin çapraz bağlı formu olan XLPE, PEX ve XPE olarak da adlandırılmaktadır. XLPE, polietilen polimerlerine ısı, basınç ve katalizör kimyasal katkılar eklenerek molekül yapısının değişikliğe uğratılması ile elde edilir.

Polietilenlerde çapraz bağlanma ile polimer zincirleri üç boyutlu ağ yapısına sahip bir yapı oluşturur böylece çözünmesi mümkün olmayan ve eritmeye elverişli olmayan polimerler oluşur. Çapraz bağlanma (curing) işlemi, polimer zincirleri arasında çeşitli fonksiyonel gruplar ile reaksiyon üzerinden gerçekleşmektedir. Bu fonksiyonel gruplar termoplastiklerin termoset haline gelmesine sebep olarak kimyasal bağların oluşmasına sebep olmaktadır. Termoplastiklerde çapraz bağlanma denince özellikle yüksek molar kütleli termoplastiklerin termoset haline dönüştürülmesi olarak düşünülebilir (Khonakdar ve diğ. 2003), (Tamboli ve diğ. 2004), (Oliveira ve Costa 2010), (Sibeko 2012).

Çapraz bağlanma, aynı veya farklı polietilen zincirlerinin karbon atomlarının üç boyutlu ağ yapısını oluşturmak üzere birleştirildiği bir işlemdir. Çapraz bağlanma karbon atomları arasında oluşan ve polimer zincirleri birbirine bağlayan kimyasal bir bağlanma tipidir. Termoplastik polimer ve çapraz bağlı polimerler arasındaki belirgin fark; erime noktasının üstündeki sıcaklıklarda çapraz bağlı polimer elastomer davranışı gösterirken, termoplastik polimerlerin yumuşak bir davranış göstermesidir. Bu sebeple çapraz bağlanma polimerlerde, darbe direncini, sünme direncini ve yüzey gerilimi çatlama direncini iyileştirir fakat eriyik indisini ve kopma uzamasını azaltmaktadır. Polietilen polimerlerinde oluşan çapraz bağlanma ile polietilen plastiklerin yoğunluğu arasında pek fark olmaz (Tamboli ve diğ. 2004), (Oliveira ve Costa 2010), (Hameed 2012).

2.2.1 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) Özellikleri

XLPE çapraz bağlı yapısı sayesinde yüksek fiziksel ve mekanik dayanım özelliklerine sahiptir. Darbelere karşı yüksek mukavemet gösterir. Kapalı hücre yapısına sahip olması sebebiyle su geçirmez özelliğindedir. Yine çapraz bağ yapısı sebebiyle kimyasallara karşı dayanımı yüksektir. Çapraz bağlı hale gelmiş polietilen yani XLPE ile polietilen arasında yoğunluk farkı olmadığı Tablo 2.1'de görülmektedir. XLPE, PE ile karşılaştırıldığında daha iyi özelliklere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 2.1: Polietilen ve XLPE özellikleri karşılaştırması (URL 4)

Özellik	Polietilen (PE)	Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE)
Özgül Ağırlık	0,935 g/cm ³	0,935 g/cm ³
Çekme Dayanımı (@ 50 °C)	11,77 MPa	14,71 MPa
Uzama (Min.-Max.)	500% 700%	500% 600%
Çalışma Sıcaklığı	70 °C	90 °C
Azami Sıcaklık	90 °C	130 °C
Müsaade Edilir Asgari Sıcaklık	-60 °C	-60 °C

2.2.2 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) Kullanım Alanları

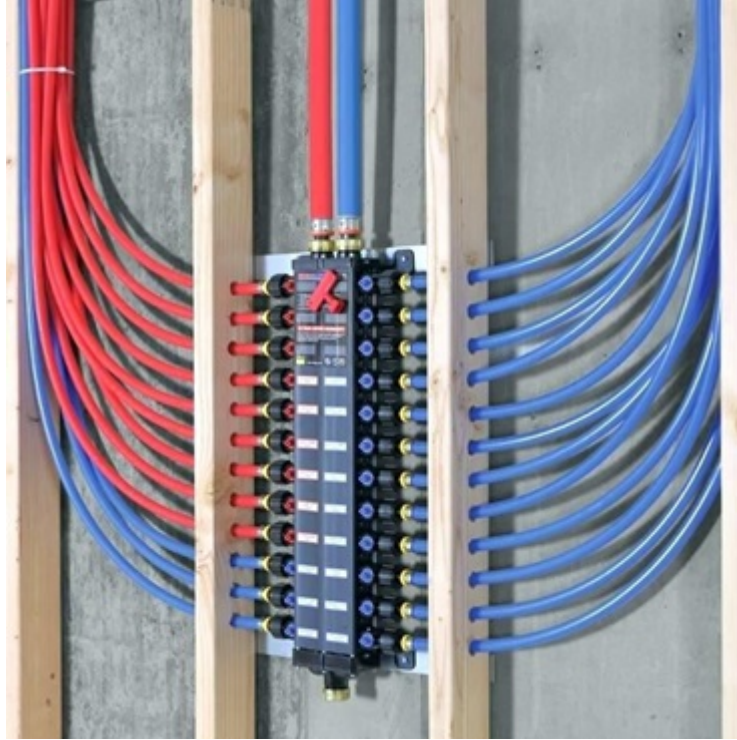
Çapraz bağlı polietilen (XLPE) yüksek fiziksel, mekanik dayanım, kimyasallara direnç ve yalıtım özelliklerine sahip bir polimerdir. Bu sebeple orta gerilim ve yüksek gerilim kablolarında, yerden ısıtma tesisatlarında, yapılarda yalıtım malzemesi olarak, tıp sektöründe protez yapımında kullanılır. Ayrıca XLPE kablolar korozyon dayanımı, aşınma direnci ve darbe dayanımı özellikleri sayesinde yeraltı ve açık deniz kablolama projelerinde sıkça kullanılmaktadır. XLPE polimerleri hafifliği ve elastikiyeti sebebiyle de birçok uygulamada kendine kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da XLPE kullanımlarına bazı örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Orta gerilim enerji kablosunda XLPE (URL 5)



Şekil 2.5: Yapılarda izolasyon malzemesi olarak XLPE (URL 6)



Şekil 2.6: Boru tesisatlarında XLPE (URL 7)

2.3 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) Atıklar

Bazı çevrelerce atık yönetimi hiyerarşik olarak sınıflandırılmış ve atıkların önlenmesi için sınıflandırmalar yapılmıştır. Gün geçtikçe artış gösteren atık miktarlarının azaltılması atık oluşturabilecek endüstriyel ürünlerin tasarım aşamasında başlamaktadır. Tasarım aşamasında mümkün olduğunca atık miktarının hafifletilerek azaltılması ve atık durumuna düşmeyecek ve ister aynı işlevle aynı amaçla benzer ürünlerin (örneğin standartlaştırılmış bir saklama/bidon/plastik tank kabının kapağı) ister yeniden başka bir amaçla da kullanılacak ürün tasarımlarının yapılması (örneğin yiyecek kabının saksı olarak kullanılabilmesi) atık yönetimin ilk adımı olan önleme ve yeniden kullanım basamağını oluşturmaktadır. Geri kazanım ise geri dönüşümü de içine alan, mekanik-fiziksel geri kazanım,

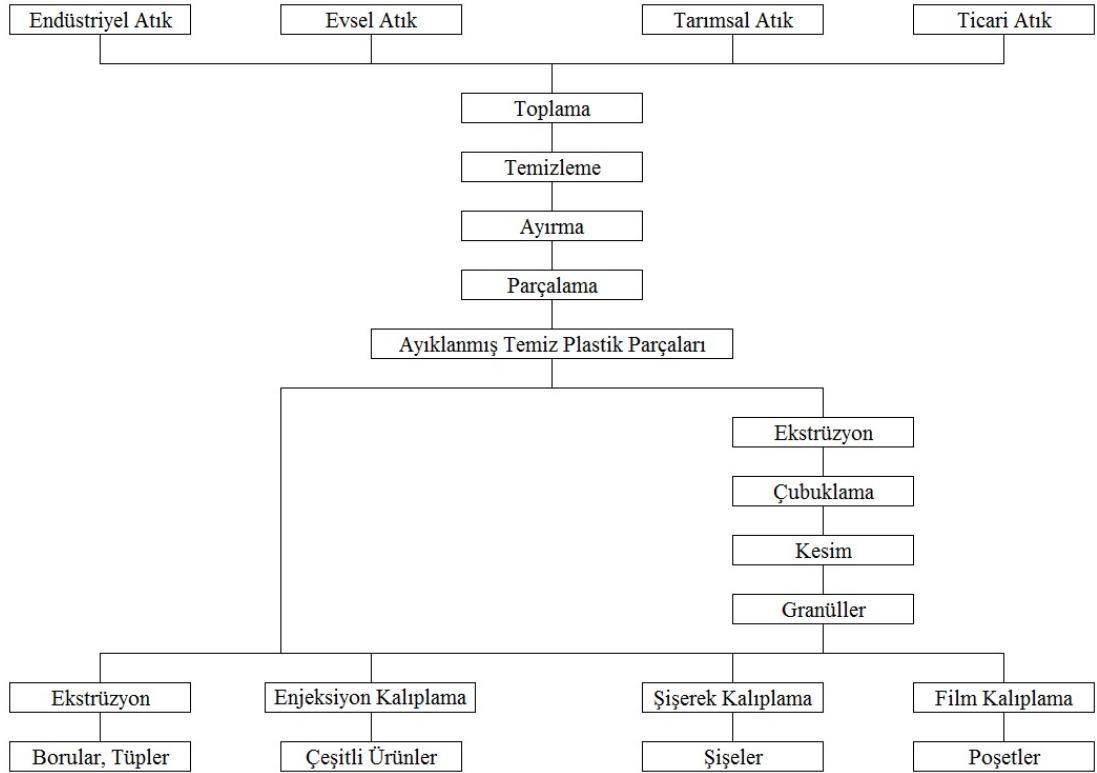
kimyasal geri kazanım ve enerji geri kazanımı gibi alt başlıkları içeren bir kavramdır. Geri dönüşüm geri dönüştürülmesi mümkün ürünlerin yeniden işlenerek benzer hammadde üretimlerinde kullanılmasıdır. Mekanik ve fiziksel geri kazanım, geri dönüşümün pek mümkün olmadığı ürünlerin mekanik ve fiziksel yöntemlerle işlenerek başka bir hammaddeye/ürüne/kompozit malzemeye ilave edilmesiyle değerlendirilmesidir. Kimyasal geri kazanım, geri dönüşüm ve mekanik-fiziksel geri kazanım yöntemleriyle değerlendirilmesi pek mümkün olmayan ürünlerin çeşitli kimyasal yöntemlerle başka bir yarı mamule dönüştürülmesidir. Enerji ve kompost geri kazanımı ise atıkların çeşitli yöntemlerle işlenerek enerji elde edilmesi ve ayrıştırılması zor olan organik atıkların (örneğin yiyecek artıkları) ziraat alanında değerlendirilmesini kapsar. Geri kazanımı mümkün olmayan atıkların yakılması, kontrolü depolanması ve kontrollü çürütülmesi bertaraf olarak tanımlanabilir. Atık yönetiminde bertaraf en son, önleme ve yeniden kullanım ilk düşünülecek aşama olmalıdır. Atık yönetimini şu başlıklar altında sıralayabiliriz.

- Önleme ve Yeniden Kullanım
- Geri Kazanım
 - Geri Dönüşüm
 - Geri Kazanım (Mekanik-Fiziksel)
 - Geri Kazanım (Kimyasal)
 - Geri kazanım (Enerji ve kompost elde edilmesi)
- Bertaraf (Depolama/Yakma/Çürütme)

Plastik atıkların geri dönüştürülmesi, mekanik-fiziksel, kimyasal ve enerji elde edilmesi için geri kazanılmasından önce düşünülmesi gerekmektedir ve geri dönüşüme uygun plastik hammaddeler kullanmak gerekmektedir. Geri dönüşümü mümkün olmayan termoset gibi malzemeler mekanik-fiziksel geri kazanım, yöntemleriyle dolgu malzemesi olarak kullanılması uygundur. Atıkların etkin geri dönüşüm ve geri kazanımı açısından tüketici ve tedarikçiler açısından 4 genel adıma uyulması gerekmektedir bunlar; toplama, ayrıştırma, işleme ve bir sonraki tüketiciye arz etmedir.

Geri dönüştürülebilir plastiklerin, geri dönüşüm aşamasında izlenmesi gereken adımlar Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Geri dönüşümü mümkün olmayan

plastiklerde ayıklanmış temiz plastik parçaları olarak geri dönüştürülebilir plastikler için izlenen toplama, temizleme, ayırma ve parçalama aşamalarından geçmelidir.



Şekil 2.7: Plastikler için geri dönüşüm adımları (Şentürk 2014)

Ayrıca geri dönüştürülmüş plastiklerin kalitesini artırmak için, içinde farklı tipte polimerleri ihtiva eden plastikler birbirlerinden ayrılmalıdır aksi takdirde içinde farklı polimerler barındıran geri dönüştürülmüş plastiklerin özellikleri, ilk kez üretilmiş plastiklere kıyasla çok düşüktür. Bir sonraki kullanıcı memnuniyeti açısından iyi bir ayırıştırma önem kazanmaktadır (Merrington 2011).

Dünyada en çok kullanılan plastik tipi olan polietilenin çapraz bağlar oluşturmasıyla elde edilen XLPE'nin termoplastik yapıda olan polietilenden farklı olarak çapraz bağları sebebiyle termoset gibi davranmaktadır. Termoplastikler eritilerek yeniden şekillendirilebilirken termoset plastikler ilave kimyasal yöntemler olmadıkça ısı etkisi ile yeniden şekil vermeye uygun plastikler değildirler. Bu sebeple geri dönüşüme pek uygun olmadığından geri kazanım yöntemleriyle endüstriyel ürünlerde kullanımı yoluna gidilebilir. Geri kazanım için belirli boyutlara getirilen termoset malzemeler kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılması iyi bir yöntem olarak düşünülebilir. Termoset plastiklerin mekanik

yöntemlerle ufak boyutlara getirilmesi, kimyasal yöntemlerle geri dönüştürülmesinin avantajlı olmadığı durumlarda düşünülmelidir.

Geri dönüşümü pek mümkün olmayan termoset gibi malzemelerin daha küçük boyutlara getirilerek granüller haline dönüştürülmesine mekanik geri kazanım diye adlandırabiliriz. Termoset malzemelere yeniden şekil verilebilmesinin zorluğu ve kompozit malzemelerde termoset malzemelerin takviye elemanı olarak kullanılmasında homojen dokulu bir yapı elde etmenin tasarımsal kısıtlılığı sebebiyle bu tür termoset davranışlı plastiklerin granül olarak kompozit yapı içine takviye edilmesi mantıklıdır.

Ayrıca XLPE gibi termoset yapı gösteren plastik atıkların stoklanması ve XLPE'nin geri kazanımı için proseslerinde kullanacak işletmelere nakliye ve uygulama kolaylığı olması açısından da XLPE'nin granül haline getirilmesi gerekmektedir.

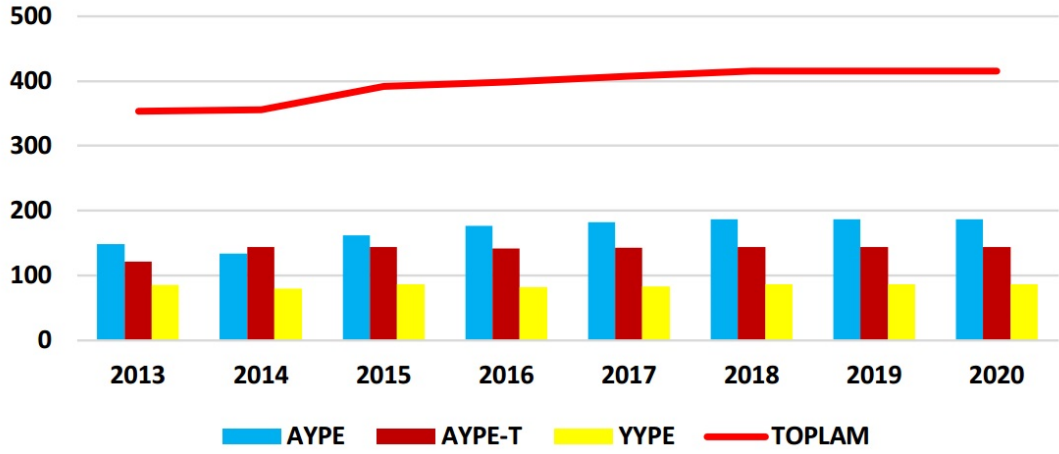
Türkiye'de polietilen üreten tek tesis PETKİM olup, mevcut üretim kapasitesi yılda 446 bin ton polietilen üretebilecek seviyededir. PETKİM'in 446 bin ton kurulu kapasitesinin 350 bin tonu AYPE (Alçak Yoğunluklu Polietilen 160 bin tonu AYPE–T) ve 96 bin tonu da YYPE (Yüksek yoğunluklu polietilen) üretimi yapacak düzeydedir (URL 8).

PETKİM, 1985 yılında 44 bin ton/yıl kapasite ile YYPE üretimine başlamış ve 1993 ve 2001 yıllarında gerçekleştirdiği tevsi yatırımları ile YYPE üretim kapasitesini 96 bin ton/yıla çıkarmıştır. PETKİM tarafından üretilen YYPE'nin başlıca kullanım alanlarını ev eşyası, oyuncak, ambalaj filmi, basınçlı su ve doğal gaz borusu, deterjan ve kozmetik şişesi (şeffaf olmayan), su, gaz vs. bidonu, levha, kasa kâğıt, kumaş ve metal kaplamada, rotasyonel kalıplama maddeleri oluşturmaktadır (URL 8).

PETKİM'in 2016 – 2021/4 döneminde gerçekleştirdiği tahmini polietilen üretimi türler itibariyle Tablo 2.2'de ve grafik olarak Şekil 2.8'de verilmiş olup, firmanın polietilen üretiminin son 3 yıldır toplam olarak 416 bin ton civarında gerçekleştiği ve 2020 yılında toplam polietilen üretiminin içinde AYPE %43, AYPE–T %35 ve YYPE de %22 pay aldığı tahmin edilmektedir (URL 8).

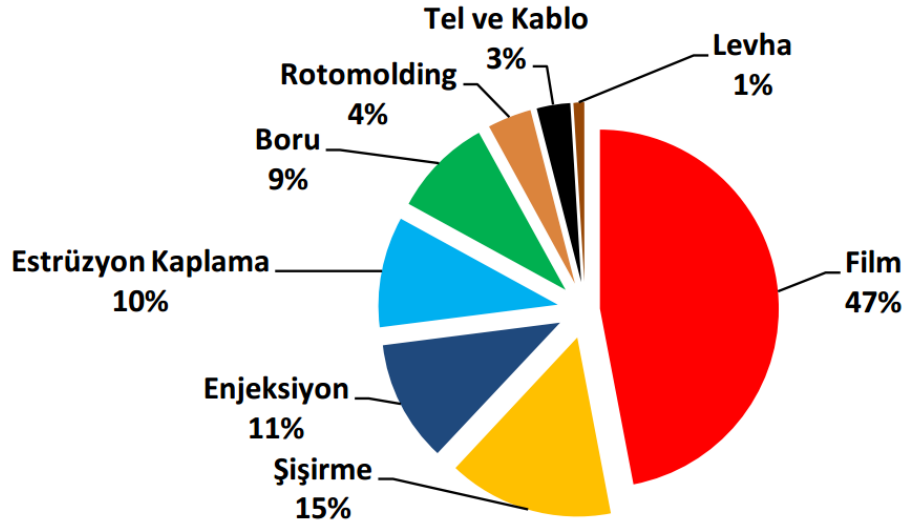
Tablo 2.2: Petkim PE üretimi ve PE çeşitlerinin toplam PE üretimi içindeki yüzdeleri (URL 8)

Petkim PE Üretimi							
YIL	Yıllık Üretim Miktarları (Ton)				Toplam PE İçindeki Oranı (%)		
	AYPE	AYPE-T	YYPE	Toplam	AYPE	AYPE-T	YYPE
2016	176.000	141.000	81.000	398.000	44	35	21
2017	182.000	142.000	83.000	407.000	44	35	21
2018	186.000	144.000	86.000	416.000	43	35	22
2019	186.000	144.000	86.000	416.000	43	35	22
2020	186.000	144.000	86.000	416.000	43	35	22
2021/4	62.000	48.000	29.000	139.000	43	35	22



Şekil 2.8: Petkim polietilen ve türevlerinin üretimi (1000 Ton) (URL 8)

Türkiye’de toplam polietilen tüketiminin proses tiplerine göre tüketiminde film %47 ile en büyük payı oluşturmaktadır. Şişirme %15 ile ikinci, enjeksiyon %11 ile üçüncü, ekstrüzyon kaplama %10 ile dördüncü ve boru da %9 ile beşinci büyük proses tipini oluşturmaktadır. Rotomolding, tel – kablo ve levha ise tüketimden sırası ile %4, %3 ve %1 pay almaktadır (URL 8).



Şekil 2.9: Türkiye’de proses tiplerine göre polietilen kullanımı (URL 8)

Tablo 2.2’ye bakıldığında yıllık ortalama 400.000 ton civarında polietilen üretimi gerçekleştiği ve Şekil 2.9’a bakıldığında da üretilen polietilenin %3’lük kısmının da oldukça XLPE atık oluşturan kablo imalatında kullanıldığı görülmektedir. Bu miktarda yaklaşık 12.000 ton polietilen kullanımı demek olur ki bu da sadece kablo imalatı yapan işletmelerde proses sonunda oluşan atık XLPE miktarının bir hayli fazla olabileceğini ifade etmektedir.

3. PREKAST BETON BORDÜR, ÜRETİM SÜRECİ ve KOMPOZİT PREKAST BETON BORDÜR

3.1 Beton Bordür

Bordür, yol ve kaldırım düzlemleri gibi farklı kotlardaki düzlemleri birbirinden ayırt etmeye yarayan yol ve kaldırım bitişiğinde kullanılan ekseriyetle betondan imal edilen taş olarak nitelendirilebilir. Betonun, düşük maliyetli, uzun yıllar kullanıma uygunluğu ve kolay temin edilebilen bir malzeme olmasından dolayı beton bordürler sıklıkla uygulamalarda kullanılır. Beton bordür taşları bölgesel ve ulusal standartlarla tip ve özellikleri tarif edilen yapı elemanlarıdır.

Bordür kullanımı ilk olarak M.S.79'da Vezüv Yanardağı'nın patlamasıyla volkanik kül ve pomzanın altında kalan İtalya'nın Pompeii şehrinde keşfedilmiştir. Bordür taşlarının ana işlevi yol kenarlarına yapısal destek sağlamak ve yağmur suyunun uzaklaştırılmasına yardımcı olmaktır. Bordürlerin etkili biçimde drenaj sağlamasıyla kaldırımda oluşabilecek çatlakları, yüzey ve yapısal kusurları azaltır ve kaldırımın kullanım ömrünün etkin bir şekilde uzamasını sağlar. Bordürlerin bozulması, çoğu zaman kaldırım yapısına aşırı nem girmesine yol açar ve kaldırım malzemelerinin yumuşamasına sebep olur. Bu durumda yolun yapısal performansını önemli ölçüde etkileyebilir ve bakım onarım maliyetini artırır. Bordürler ayrıca toprak erozyonu riskini azaltmaya yardımcı olur, sürücülerin kaldırım alanına park etmesini ve yürüyüş yollarında araç kullanmasını engeller. Yavaş giden araçların yönlendirilmesine olanak sağlar. Bordürler yolların estetik görünmesini sağlar ve yol işaretleri olarak kullanılabilmesi mümkündür. Bazı durumlarda bordürler, sınırlama ve peyzaj için ekstra alan elde etmek ve yol ortasında yayalar için bir sığınak ada oluşturmak için uzatılabilir. Bordürler şekillerine, işlevlerine, malzemelerine ve yüksekliklerine göre farklı kategorilere ayrılabilir. Bir bordürün faydalı ömrünün 40 ila 100 yıl arasında olduğu düşünülmektedir (Momotaz ve diğ., 2022).

Bordürler yol ve kaldırımların birbirinden ayırt edilmesine ve kot farkının estetik görünmesine olanak sağlar. Bordürler, sokak, cadde, park ve oyun alanları

gibi yerlerde sıklıkla karşımıza çıkar ve kent yaşam alanlarının vazgeçilmez yapı elamanlarıdır. Genel olarak bordürler ayrı bir tesiste üretim yapılarak daha sonra uygulanacağı bölgeye sevk edilirler. Bordürler prekast dökümle imal edilebileceği gibi uygulama yerinde de imal edilebilir. Şekil 3.1’de uygulama alanında oluşturulmuş beton bordür görülmektedir. Ayrıca bu bordürde bitişik oluk düzlemi de bulunmaktadır.



Şekil 3.1: Beton bordür (URL 9)

3.1.1 Prekast Beton Bordür

Prekast betonlar, seri üretim için tekrarlı kullanıma uygun kalıplara dökülerek üretimi kontrol altında yapılan kullanıma uygun mukavemet özelliklerine ulaşıncaya uygulanacağı alana sevk edilen modüler beton yapı elemanlarıdır. Beton bordürlerde önceden tesiste kalıplar içinde üretildiği ve modüler yapı elemanları olduğu için prekast beton bordür olarak nitelendirilebilir.

Yerinde imal edilen beton bordürlerin imalat ve uygulama süreçleri esnasında oluşabilecek problemleri kontrol etmek zorlaşır. Bu sebeple uygun ortamda ve serilikte fabrika ortamında modüler bordürler üretilerek uygulama alanına sonradan modüler bordürleri götürmek avantajlıdır. Ayrıca belirli mukavemet özelliklerini almış modüler prekast bordürler uygulama yapılan alanda yaya ve araç trafiğine

yolun daha erken açılmasına imkân tanır. Yol bakım uygulamalarında da hasar görmüş bordür yapısının onarımı modüler tipte olan prekast beton bordürler ile yerinde yapılan beton bordürlere nazaran daha kolaydır. Şekil 3.2’de prekast beton bordür tipi görülmektedir.



Şekil 3.2: Prekast beton bordür (URL 10)

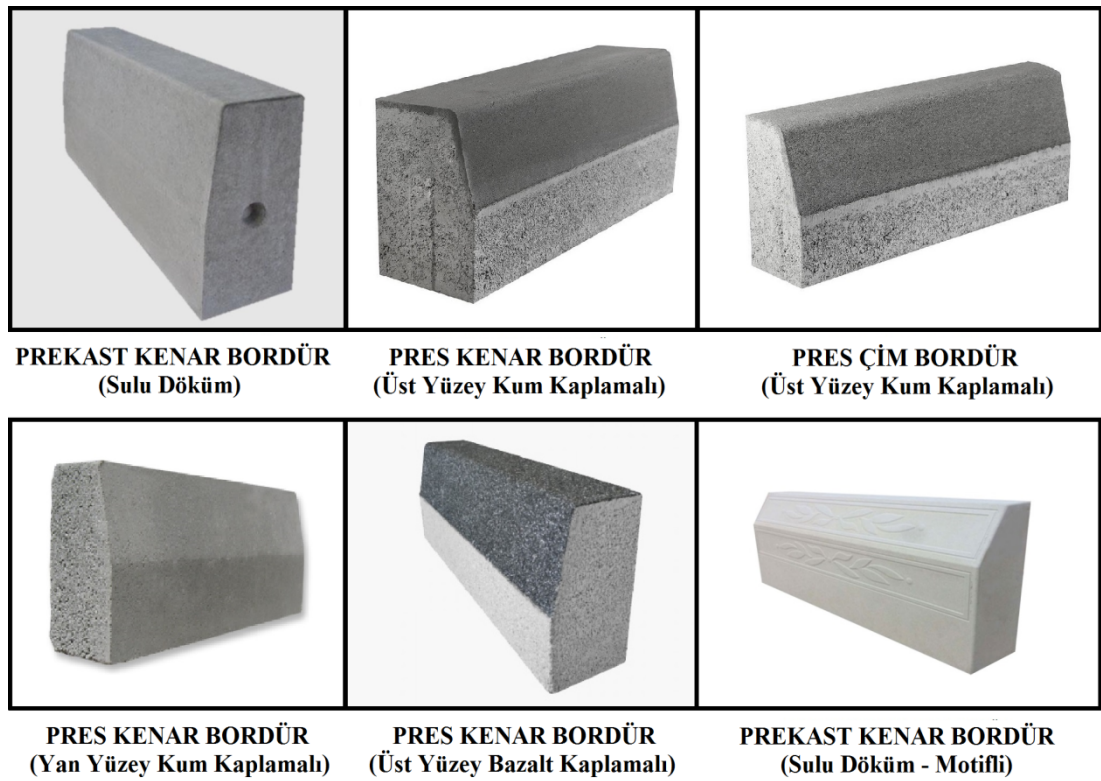
3.1.2 Prekast Beton Bordür Çeşitleri

Ön dökümlü (prekast) beton bordürler sulu döküm yöntemiyle ve pres baskı yöntemiyle üretilir. Sulu döküm yönteminden farklı olarak pres baskı yöntemiyle üretilen bordürlerde daha az su ve çimento oranıyla üretim yapmak mümkündür. Ayrıca sulu döküm yönteminde bordür dolgusu her yerinde aynı özelliği gösterirken pres baskı yöntemiyle yüzey kaplamalı bordürler üretmek mümkündür. Pres baskı yöntemiyle üretim yapacak bordür tesislerinde beton üretim tesisine ek olarak baskı makinesine ihtiyaç olmaktadır.

İster pres baskı yöntemiyle, ister sulu döküm yöntemiyle üretilen beton bordürlerde değişik ebatlarda ve formlarda ürünler yapmak mümkündür. Yine de her iki yöntemde de bazı kısıtlayıcı unsurlar bulunmaktadır. Pres baskı yönteminde kısıtlayıcı unsurlardan biri, pres makinesinin kalıp çalışma yüksekliğinin kısıtlı olması sebebiyle pres baskı yöntemi sulu döküm yöntemine göre daha küçük ebatlarda ürünler imal etmeye imkan tanır. Diğerisi ise pres baskı makinesinde

kullanılan kalıbın çalışma prensibine uygun ürün tasarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde pres sonrası ürün yüzeyinde bozulmalar, kalıptan çıkamama, baskı sonrası ürünlerin toplanması ve istiflenmesinde sorunlarla karşılaşmak muhtemeldir. Sulu döküm yönteminde ise yüzey kaplama gibi işlemleri gerçekleştirmek ek donanıma ihtiyaç duyulmasına sebebiyet vereceğinden pek tercih edilmez ve sulu döküm imalatının seriliğine olumsuz yönde etki eder.

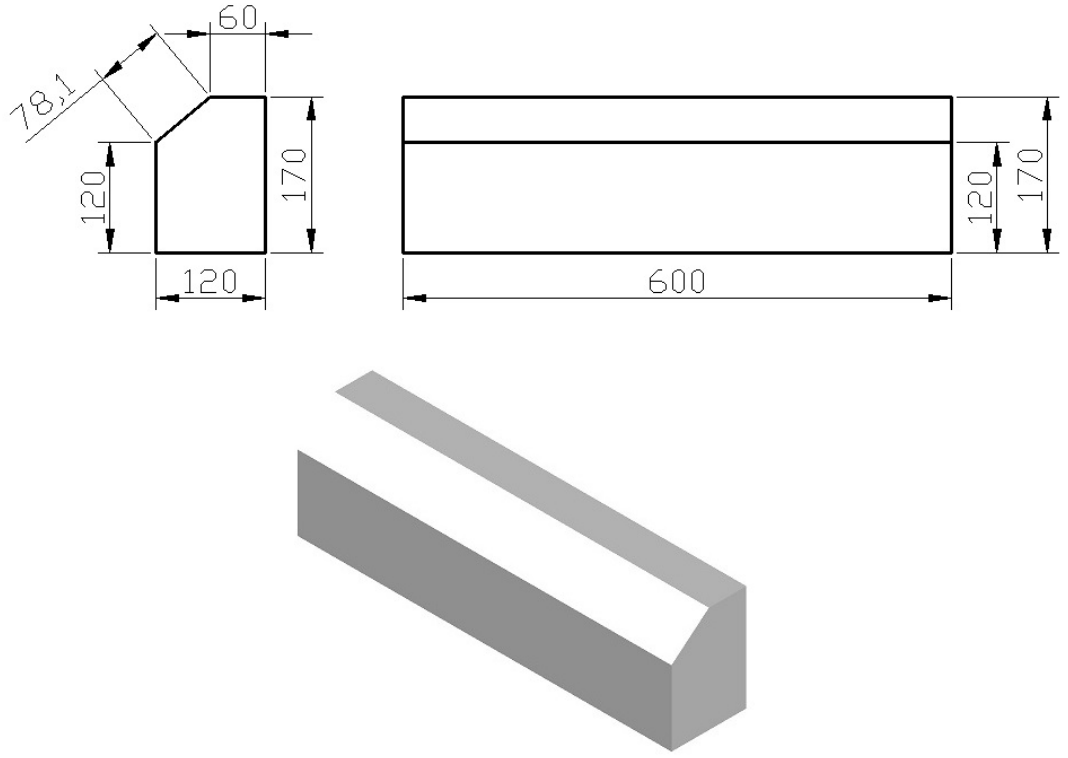
Şekil 3.3'te sulu döküm ve pres baskı yöntemiyle üretilmiş ön dökümlü (prekast) bordür çeşitleri görülmektedir.



Şekil 3.3: Ön dökümlü (prekast) sulu döküm ve pres bordür çeşitleri

3.1.3 Deneyde Kullanılacak Prekast Beton Bordür Özellikleri

Deneyde kullanılacak bordür boyutları, laboratuvar test cihazında eğilme deneyi yapmaya uygun boyutta seçilmiştir. Bordür sulu döküm yöntemiyle üretilen bordür tipi olup her yerinde aynı dolgu yapısını ihtiva etmektedir. Deneyde kullanılacak bordür boyutları Şekil 3.4'te gösterilmiştir. **En:**120 mm x **Boy:**170 mm x **Uzunluk:** 600 mm'dir. Bordür hacmi 11,34 dm³tür.



Şekil 3.4: Prekast beton bordür ölçüleri

3.2 Prekast Beton Bordür Üretim Süreci

Prekast beton bordür üretim süreci; hazır beton üretimi, kalıplara döküm, kalıplardan söküm-istifleme ve ürün kontrolleri olmak üzere dört ana başlık altında incelenebilir. Hazır beton santralinde bordür mukavemetlerini karşılayabilecek ve gerekli bordür özelliklerine haiz reçeteye uygun hazırlanan beton harcı, gerek transmikser ile gerek nakliye hatları ile bordür kalıplarının bulunduğu alana sevk edilerek beton dökümü işlemi gerçekleştirilir. Söküm için gerekli mukavemeti almış beton bordürler kalıplardan ortam şartlarına bağlı olarak döküm işleminden 6–24 saat sonra sökülebilir ve istiflenir. Üretilen bordürlerin istif alanında ve laboratuvarında görsel, boyutsal, fiziksel ve mekanik kontrolleri yapılır.

3.2.1 Hazır Beton Üretimi

Prekast beton dökümü yapan tesisler kullanacakları ıslak beton harcını genellikle işletme içinde ya da işletmeye yakın yerlerdeki hazır beton santrallerinden temin ederler. Bordür, bariyer ve benzeri prekast ürünleri üreten işletmeler de beton harcı ihtiyacını hazır beton santrallerinden temin ederler.

Beton santralleri, kum, çakıl, kırmataş gibi agregaların, su, çimento ve gerektiğinde kimyasal katkılarla karıştırılarak, üretilen beton harcının, beton harcı nakil araçlarına (transmikserler, kamyonlar v.b.) yüklendiği tesistir. Beton santralleri genel olarak agrega bunkerleri, agrega tartım konveyörü ve nakil konveyörleri, çimento ve katkı siloları, santralin komuta edildiği otomasyon sistemi ve odasından oluşur. Beton santralleri proses açısından kuru tip veya ıslak tip olarak nitelendirilebilirler. Islak tip beton santrallerinde ek olarak karıştırıcı mikser grubu bulunmaktadır. Kuru tip proseslerde beton harcı nakil araçlarına su ilavesi olmadan nakledilebilir böylece uzak mesafelere beton harcı sertleşmeden, işlenebilirliğini yitirmeden sevk edilebilir. Islak tip proseslerde ise beton harcına su ilavesi tesiste yapılır fakat betonun sertleşmesi gibi nedenlerden ötürü beton harcı nakil araçları belirli bir süre içinde betonu dökmek zorundadır.

Yapılacak hazır beton üretiminin uygulanması açısından çeşitli beton santrali tipleri geliştirilmiştir. Uygulama yerinin uzaklığı, proje uygulama süresi ve kurulum yatırım – nakliye giderlerinin minimize edilmesi gibi nedenlerden dolayı değişik tip, boyut ve proseslerde (kuru proses, ıslak proses) çeşitli beton santralleri mevcuttur. Aşağıda 4 tip beton santrali çeşidi belirtilmiştir.

Mobil beton santralleri: Kısa vadeli projelerde, hızlı ya da sık lokasyon değişimi olan projelerde örneğin parçalı yol yapım projelerinde tercih edilen beton santrali tipidir. Montaj ve demontajının kolay olması, sabit tesislerdeki gibi beton temel yapılmasına ihtiyacı olmaması gibi nedenlerden dolayı tercih edilir.

Sabit beton santralleri: Yoğun beton harcı ihtiyacının olduğu bölgesel projelerin beton ihtiyacını yüksek üretim kapasitesi, verimlilik, güvenilir beton spesifikasyonlarının istendiği durumlarda ve uzun vadeli projelerin olduğu durumlarda tercih edilir.

Kuru beton santralleri: Düşük kurulum-işletme maliyeti ve beton harcının su ilavesinin beton santralinde yapılmaması sebebiyle uzak mesafelere nakliye edilebilme özelliğinden dolayı tercih edilen beton santrali tipidir. Beton harcı suyunun uygulama yapılacak sahada eklenmesi ve karıştırılması sebebiyle zayı beton harcı diğer santrallere nazaran daha az olmaktadır ve bu özellik kuru beton santrallerinde diğer beton santrali tiplerine göre hammadde ihtiyacında tasarruf sağlar. Diğer beton santrali çeşitlerinden farklı olarak kuru beton santralinden elde edilen beton harcının karıştırılması transmiksör araçlarında yapılır.

Kompakt beton santralleri: Konteynırlar gibi araçlar üzerinde taşınabilme özelliği olması sebebiyle, kolay kurulum ve düşük ilk yatırım maliyetleri olması açısından tercih edilen beton santrali tipidir. Kurulum yapıldığı yerde fazla alan kaplamaz bu sebeple dar alanlarda rahatlıkla tesis işletilebilmesine olanak sağlar.

3.2.2 Kalıplara Döküm

Tekrarlı kullanıma uygun genellikle metal kalıplara yapılacak beton dökümü öncesi kalıpların iç kısımları tel fırça ve spatula yardımıyla temizlenir ve beton bordürün kalıptan rahat çıkması için kalıp ayırıcı yağ kullanılır. Yağ pülverize püskürtme düzenekleri yardımıyla kalıp iç yüzeylerinde ince bir yağ film tabakası oluşturacak biçimde kaplanır. Beton harcı kalıplara dökülür 1-3 saniye şişe vibratörleme işlemi yapılarak beton harcı içindeki hava kabarcıklarının sayısı ve boyutları minimize edilir. Kalıplara beton harcı dökümü yapıldıktan sonra kalıp üst yüzeyindeki beton seviyesi mala yardımıyla düzlenir. Betonların kalıplardan vinç tertibatıyla sökümü için önceden şekil verilmiş tel ankraj yerleştirilir ve beton prizini alıncaya dek kurumaya bırakılır.

3.2.3 Kalıplardan Söküm ve İstifleme

Prizini alan beton bordürler vinç tertibatıyla kalıplardan sökülür ve istifleme için paletlere yerleştirilir. Paletlerdeki bordürlerden numuneler alınarak boyut, ağırlık ve nitel özellikler üretim aşamasında kontrol edilir. Bordürlerin mukavemet değerleri

ise 7–28 gün şartlarına bağlı olarak işletme laboratuvarı tarafından kontrol edilir. Kontrolleri geçen üretim partileri uygulama yapılacak alana sevke hazır hale gelir.

Eğer istifleme alanlarında bekleyen bordürler 28 gün öncesinden sevk edilmek istenirse ya da bu tür durumlar oluşuyorsa bordürlerin deney periyodu 2 güne ya da 7 güne indirilerek erken dayanım deneyleri yapmak mümkündür.

Bordürler istifleme alanında üretim tarihlerini belirtir ibareler olacak biçimde düzgün bir şekilde istiflenmelidir. Üretim tarihleri en eski olan ve laboratuvar testlerini geçmiş ürünler sevk edilmelidir. Aksi takdirde örneğin 28 günlük dayanım deneyleri yapılmış ve gerekli dayanım değerine ulaşmış bu sebeple gönderim için en az 28 gün bekletilmesi gereken bordür ürünlerin bu süre zarfından önce döşeme yapılacak uygulama alanına sevk edilmesi durumunda, sevk esnasında ve uygulama esnasında henüz mukavemetini almamış bordür ürünlerinde zayırlarla karşılaşmak muhtemeldir.

3.2.4 Prekast Beton Bordürlere Uygulanan Deneyler

Beton bordürlerin belirli kalite standardında üretilmesini sağlamak amacıyla bazı bölgesel, ulusal ve uluslararası standartlar mevcuttur. Bu çalışmada yapılan deneylerde TS EN 1340 standardı baz alınmıştır.

TS EN 1340 standardı, taşıtlara açık alanlar ve çatı kaplamasında kullanılan, donatısız, çimento bağlayıcılı ön dökümlü beton bordür taşı birimlerin, kanalların ve tamamlayıcı parçalarının malzemelerini, özelliklerini, sahip olması gerekli şartları ve deney metotlarını kapsar.

TS EN 1340 standardında ön dökümlü (Prekast) beton bordürlerde fiziksel ve mekanik özellikler için uygulanan deneyler ve kapsamaları Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

Tablo 3.1: Beton bordürlere uygulanan deneyler

Eğilme Dayanımı Deneyi	
Hava Etkileri Nedeniyle Yıpranmaya Karşı Direnç	*Su Emme Tayini
	*Buz Çözücü Tuz Etkisiyle Birlikte Donma/Çözölmeye Karşı Direncin Tayini
Aşınmaya Direnç	
Kaymaya/Kızaklamaya Karşı Direnç	
Yangın Performansı	*Yangına Direnç
	*Harici Yangın Performansı
	*Isıl İletkenlik

- **Genel**

Bordür taşı tamamlayıcı parçalarının, biçimleri nedeniyle bu standarda göre deneye tâbi tutulamaması hâlinde, bu parçalar, en az bu standarda uygun beton bordür taşında kullanılan betona eşdeğer kalitede betondan imal edilmiş olmaları hâlinde, bu standarda uygun olduğu kabul edilir (TS EN1340 standardı).

- **Hava etkileri nedeniyle yıpranmaya karşı direnç**

Buz çözücü tuz etkisiyle birlikte donma/çözölmeye karşı direncin tayini ve toplam su emmenin tayini deneylerini kapsar.

Mamulün piyasaya sürüldüğü ülkede kullanım için, mamulün o ülke şartlarında dayanıklılığını garanti altına almak üzere gerekli hava etkileri nedeniyle yıpranmaya karşı direnç sınıfı ile ilgili öneriler (şartnameler) o ülkeye mahsus olarak tesis edilebilir.

Numune ön şartlandırmaya tâbi tutulduktan sonra 28 gün süreyle, yüzeyi % 3'lük NaCl çözeltisi ile kaplanmış şekilde, donma-çözölmeye çevrimlerine maruz

bırakılır. Donma-çözülme etkisiyle pullanma sonucu numuneden ayrılan parçalar toplanarak tartılır ve sonuç, numunenin metre karesi başına kilogram cinsinden gösterilir.

Numune, donma çözülme etkisine maruz bırakılacak üst yüzeyi 7500 mm²'den küçük, 25000 mm²'den daha büyük olmamalı ve kalınlığı en fazla 103 mm olmalıdır. Numune, bu ölçüler sağlanacak şekilde beton bordür taşı birimden alınacaksa, numune alınacak bordür taşı en az 20 günlük olmalıdır.

Su emme tayini deneyinde numune, (20 ± 5) °C sıcaklıktaki ortamda şartlandırıldıktan sonra, sabit kütleye ulaşıncaya kadar suya batırılır ve daha sonra da kurutulurak değişmez kütleye ulaşması sağlanır. Kütle kaybı, numunenin kuru kütlesine oranla yüzde olarak gösterilir.

Öncelikle beton bordür taşının her iki ucundan birer numune alınır. Numuneler testere ile kesilerek veya karot almak suretiyle alınır. Alınan her bir numunenin kütlesi 2,5 kg'dan az, 5,0 kg'dan daha fazla olmamalıdır. Bordür taşının iki farklı beton karışımından meydana gelmesi halinde, bu karışımların beton bordür taşında kullanılan oranları, numuneye de aynen yansıtılmış olmalıdır.

Deney öncesi beton bordür taşından alınan parçaların yüzeyinden toz partikülleri ve gevşek beton parçaları temizlenir. Numuneler önce 20 ± 5 °C sıcaklıkta kür havuzunda en az 3 gün tutulur ve 24 saat arayla yapılan numune tartım işlemlerinde kütle farkı %0,1'den daha düşük oluncaya yani sabit kütleye ulaşıncaya kadar bekletilir. Tartım öncesi numune yüzeylerindeki fazlalık su nemli bir bezle silinerek alınır. Daha sonra numunenin en az 1 gram hassasiyetli terazide tartımı yapılarak ıslak durum kütlesi belirlenmiş olur.

Kuru durum kütlesinin belirlenmesi için numune en az 3 gün etüv içinde 100 ± 5 °C sıcaklıkta tutulur. Ve 24 saat arayla yapılan numune tartım işlemlerinde kütle farkı %0,1'den daha düşük oluncaya yani sabit kütleye ulaşıncaya kadar bekletilir. Tartım işleminden önce numuneler oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilir kuru durum kütlesi belirlenmiş olur.

$$W_a = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (3.1)$$

M_1 =Deney Numunesi Islak Durum Kütlesi (g)

M_2 =Deney Numunesi Kuru Durum Kütlesi (g)

W_a =Su Emme Oranı (%)

Eşitlik (3.1) vasıtasıyla her bir bordür taşından (her bir bordür taşı üzerinde 2 adet numune kesilmek şartıyla) elde edilen değerlerin ortalaması alınarak beton bordür taşlarının su emme değeri bulunur. Tablo 3.2’de TS EN 1340 standardında tanımlanan tabloya göre sınıflandırılır.

Tablo 3.2: Kütlice su emme oranları

Sınıf	İşaretleme	Kütlice Su Emme Oranı (Ortalama %)
1	A	Performans ölçülmez
2	B	≤ 6

Deneye tabi tutulan bordürlerden alınan numunelerde su emme değerleri ortalaması %6 ve daha az değerde olursa ‘B’ işaretli 2. sınıf olarak adlandırılır. Ortalama %6 su emme değerinin üzerinde bir sonuç çıkarsa A işaretli 1. sınıf olarak adlandırılır (TS EN 1340 standardı).

Tablo 3.3: Buz çözücü tuz etkisiyle birlikte donma çözülme etkisine direnç

Sınıf	İşaretleme	Donma Çözülme Deneyinden Sonra Kütle Kaybı (kg/m ²)
3	D	$\leq 1,0$ (ortalama olarak) Tek numune sonuçlarından hiçbirisi 1,5’den büyük olmamalıdır

Tablo 3.3’te TS EN 1340 standardında donma çözülme etkisine göre yapılan sınıflandırma / işaretleme gösterilmiştir. Deney sonrası deney numunelerinin ortalama kütle kaybı 1 kg/m² ’den az ve herhangi bir deney numunesinin kütle kaybı 1,5 kg/m² ’yi geçmiyorsa 3. Sınıf ‘D’ harfi işaretli sayılır. Bu çalışmada referans alınan prekast beton bordür, ılıman iklim koşullarında kullanılan ve hava etkileri nedeniyle donma çözülmeye uygunluk belirten bir sınıfta olmadığı için donma çözülme deneyi irdelenmesine gerek yoktur.

- **Eğilme dayanımı**

Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulan numuneler ‘Karakteristik eğilme dayanımı’ ve ‘En küçük eğilme dayanımı’ kriterlerini sağlaması gerekmektedir. Tablo 3.4’te TS EN 1340 standardında tanımlanan karakteristik ve en küçük dayanım aralıkları ve bu aralıkların sınıfları ve işaretleme harfleri belirtilmiştir.

Tablo 3.4: Eğilme dayanımı sınıfları.

Sınıf	İşaretleme	Karakteristik Eğilme Dayanımı (MPa)	En Küçük Eğilme Dayanımı (MPa)
1	S	3,5	2,8
2	T	5,0	4,0
3	U	6,0	4,8

Karakteristik eğilme dayanımı; deneye tabi olan aynı üretim partisinde hazırlanmış tüm bordür dayanımlarının ortalamasıdır. En küçük eğilme dayanımı ise deneye tabi olan aynı üretim partisinde hazırlanmış tüm bordürlerin içinde en küçük eğilme dayanımı gösteren bordürün eğilme dayanım değeridir. Hem karakteristik, hem en küçük eğilme dayanım değerlerinin ilgili tablodaki referans sınır değerlerin üzerinde olması durumuna göre deneyleri yapılan bordürlerin sınıfı belirlenir. Eğilme dayanımları sonuçları sınır değer şartlarının hangisini sağlıyorsa o sınıf bordür eğilme dayanım sınıfı olarak belirlenir.

Bu çalışmada referans alınan prekast beton bordür, ‘U’ harfi ile işaretlendirme yapılan 3. sınıftadır. Yani Karakteristik eğilme dayanımı 6,0 MPa ve en küçük eğilme dayanımı 4,8 MPa’dır.

Dayanımının sürekliliği düşünüldüğünde Tablo 3.4’teki değerleri karşılaması ve normal bakıma tabi tutulmak şartıyla dayanımını yeterli ölçüde muhafaza edebilir olması gerekmektedir. TS EN 1340 standardına göre eğilme dayanımı aşağıda belirtilen (3.2) eşitliği yardımıyla hesaplanır.

$$T = \frac{F \times L_o \times y}{4 \times I} \quad (3.2)$$

T= Eğilme Dayanımı (MPa)

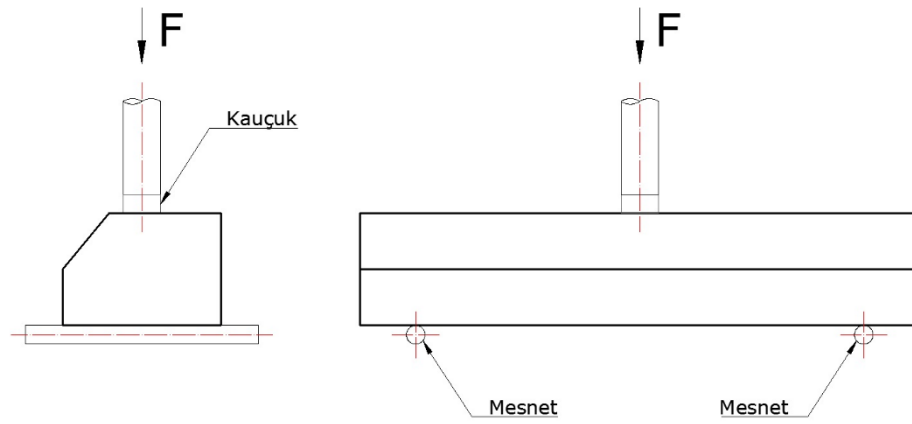
F= Kırılma Yüğü (N)

L_0 = Mesnetler Arasındaki Mesafe (mm)

I = Bordürün Deney Durumundaki Vaziyetine Göre Atalet Momenti (mm^4)

y = Kesit Ağırlık Merkezi–Yük Etkime Düzlemi Mesafesi (mm)

Deney esnasında kuvvet yükleme hızı belirli bir oranda yapılmalıdır. Beton bordür eğilme dayanımı deneyi için bu değer $0,06 \pm 0,02$ MPa/s'dir. Standart gereği deneye tabi tutulacak bordürün kesitinin kısa kenarı dikey pozisyonda olacak biçimde yerleştirilmelidir (TS EN 1340 standardı). Şekil 3.5'de eğilme dayanımı test cihazında bordür numune konumu şematik olarak gösterilmiştir.

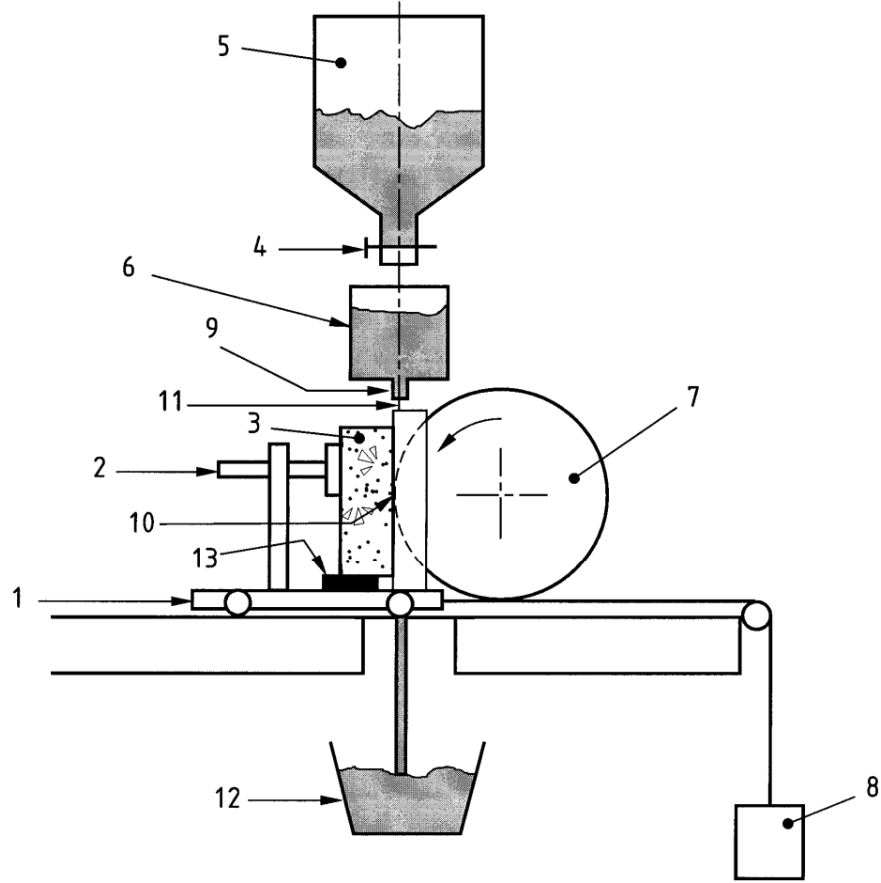


Şekil 3.5: Eğilme testi bordür konumu

- **Aşınmaya direnç**

Aşınma direnci, geniş diskli aşınma deneyi yoluyla veya alternatif metot olarak Böhme deneyi ile tayin edilir. Geniş diskli aşınma deneyi referans deneydir.

Beton bordür taşı yüzeyinde çıkıntı, girinti veya pandüllü sürtünme ölçer cihaz kullanılarak deney yapmayı engelleyen bir başka yüzey biçimi olması hâlinde, mamulün deneye tâbi tutmaksızın bu standart gereklerini sağladığı kabul edilir. Beton bordür taşının deney için gerekli alan temin edilemeyecek derecede küçük olması hâlinde imalâtçı, deneyde, deneye tâbi tutulacak blok ile aynı yüzey biçimine (yapısına) sahip daha geniş yüzeyli bir bordür taşı kullanabilir (TS EN 1340 standardı). Şekil 3.6'da aşınma direnci deneyinde kullanılan geniş diskli aşındırma deney cihazı donanımı görülmektedir.



- | | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| 1- Numune tutma kızıağı | 8- Karşı ağırlık |
| 2- Tespit vidası | 9- Çıkış ağzı |
| 3- Deney numunesi | 10- Oyuk |
| 4- Kontrol vanası | 11- Aşındırıcı malzeme akışı |
| 5- Zımpara tozu silosu | 12- Aşındırıcı malzeme toplayıcısı |
| 6- Akış yönlendirici alt silo | 13- Takoz |
| 7- Geniş aşındırma diski | |

Şekil 3.6: Aşındırma cihazı çalışma prensibi (TS EN 1340 standardı)

Tablo 3.5: Aşınmaya direnç sınıfları

Sınıf	İşaretleme	Gerekli Şartlar	
		Geniş Diskli Aşınma Deneyi Metodu Kullanılarak Ölçülen Değer (mm)	Böhme Deneyi Metodu Kullanılarak Ölçülen Değer (mm ³ /5.000 mm ²)
1	F	Performans Ölçülmez	Performans Ölçülmez
2	H	≤ 23	≤ 20.000
3	I	≤ 20	≤ 18.000

Deneye tabi tutulan bordürlerin aşınma direnci sınıfını tanımlamak için TS EN 1340 standardında tanımlanmış aşınma direnç sınıfları Tablo 3.5'de gösterilmiştir.

Eğer bordür ürünü yüzey sınıfı tanımı içermiyorsa aşınma direnci incelemesine gerek yoktur (TS EN 1340 standardı).

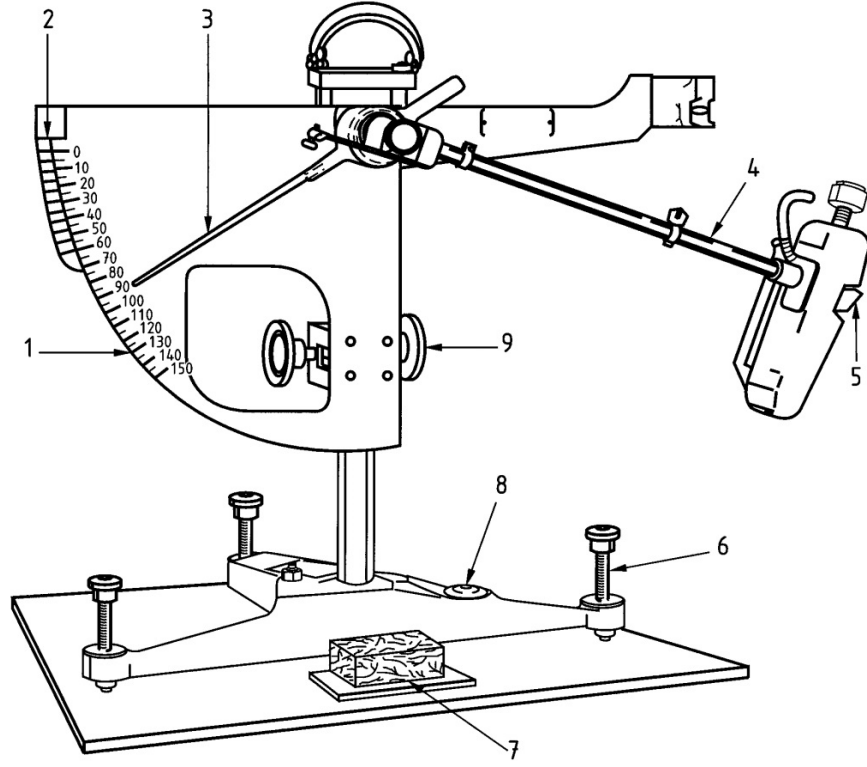
Bu çalışmada referans alınan prekast beton bordür, ilave yüzey dolgusu içermeyen her yerinde aynı beton dolguya sahip bir ürün tipidir. Bu sebeple geniş diskli aşınma deneyini veya Böhme deneyini uygulamaya gerek yoktur.

- **Kaymaya / kızıklamaya karşı direnç**

Beton bordür taşları, çok düzgün yüzey elde etmek üzere, üst yüzeylerinin tamamının aşındırılmış ve/veya cilâlanmış olması dışında, kaymaya / kızıklamaya karşı yeterli dirence sahip olduğu kabul edilir. Aksi durumda TS EN 1340 standardındaki gereklilikleri sağlaması gerekir.

Numune üzerinde, cilâlanmamış kayma direnci değeri (USRV), pandüllü sürtünme (sarkaçlı) deney donanımı kullanılarak, numunenin üst yüzeyinde kayma özelliklerinin değerlendirilmesi yoluyla tayin edilir (TS EN 1340 standardı).

Pandüllü sürtünme deney donanımı, ucuna yayla itilen standart lâstik monte edilmiş pandül ihtiva eder. Pandülün hareketi esnasında, lâstik sürtünme kütlesi ile deney numunesinin yüzeyi arasındaki sürtünme kuvveti, pandülün salınım mesafesindeki azalma, kalibre edilmiş skala kullanılarak ölçülür ve numunenin sürtünme özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Deney trafiğe maruz kalan bordür yüzeyi üzerinde yapılır ve yüzey üzerinde 136x86 mm boyutlarında düz bir yüzey olmalıdır. USRV değeri, 5 adet bordür numunesinin pandüllü sürtünme deney cihazı skalasından ölçülen kaymaya/kızıklamaya karşı direnç değerlerinin ortalamasıdır (TS EN 1340 standardı). Şekil 3.7'de kaymaya / kızıklamaya karşı direncin ölçüldüğü pandüllü sürtünme deneyi cihazı görülmektedir.



- | | |
|---|-------------------------------|
| 1- C skalası (sürtünme uzunluğu 126 mm) | 6- Yataylama (tesviye) vidası |
| 2- F skalası (sürtünme uzunluğu 76 mm) | 7- Denei numunesi tutucusu |
| 3- İbre | 8- Küresel düzeç |
| 4- Pandül | 9- Düşeylik ayarlama vidası |
| 5- Lastik sürtünme parçası | |

Şekil 3.7: Pandüllü sürtünme deney donanımı (TS EN 1340 standardı)

Normal kullanım şartlarına tâbi ön dökümlü (Prekast) beton bordür taşları, normal bakıma tâbi tutulmaları ve üst yüzeyinden, aşırı cilâlanmış önemli oranda agreganın ortaya çıkmış olmaması şartıyla, hizmet ömrü süresince kaymaya / kızaklamaya karşı tatmin edici direnç sağlar (TS EN 1340 standardı).

Bu çalışmada referans alınan prekast beton bordür yol döşemelerinde kullanıldığı için ve yüzeylerinde herhangi bir cilalama, parlatma ve benzeri bir işleme tabi tutulmadığından Kaymaya / kızaklamaya karşı direncinin irdelenmesine gerek yoktur.

- **Yangın performansı**

Yangına Direnç: Beton bordür taşları, herhangi bir deneye tâbi tutulmadan yangına direnç A1 Sınıfı olarak kabul edilir. Ayrıca çatı kaplaması olarak kullanılan, beton bordür taşlarının, haricî yangın performansına sahip olduğu, herhangi bir deneye ihtiyaç duyulmadan kabul edilir (TS EN 1340 standardı).

Bu çalışmada referans alınan prekast beton bordür yol döşemelerinde kullanıldığı için ve yangınla ilgili bir beyan arz etmediği için yangın performansı irdelemesine gerek yoktur.

Harici Yangın Performansı: Çatı kaplaması olarak kullanılan, beton bordür taşlarının, haricî yangın performansına sahip olduğu, herhangi deneye ihtiyaç duyulmadan kabul edilir (TS EN 1340 standardı).

Bu çalışmada referans alınan prekast beton bordür yol döşemelerinde kullanıldığı için ve çatı kaplama malzemesi olmadığından ve betondan imal edildiği için harici yangın performansı irdelemesine gerek yoktur.

Isıl İletkenlik: Beton bordür taşının bir elemanın ısıl performansına katkıda bulunması tasarlanmış ise imalâtçı, ısıl iletkenliği, EN 13369’da yer alan tasarım verilerini kullanarak beyan etmelidir (TS EN 1340 standardı).

Bu çalışmada referans alınan prekast beton bordür yol döşemelerinde kullanıldığı için ve yalıtımla ilgili bir beyan arz etmediği için ısıl iletkenlik irdelemesine gerek yoktur.

TS EN 12620’e uygun doğal agregalar, TS EN 197-1’e uygun çimento, TS EN 934-2’e uygun kimyasal katkıları, TS EN 450 / TS EN 13263’e uygun mineral katkılardan meydana gelen beton Euro sınıfı A olarak sınıflandırılır ve deneye tabi tutulmasına gerek duyulmaz (Ünsal ve Şen 2008).

3.3 XLPE Katkılı Prekast Kompozit Beton Bordür

Bu çalışmada çapraz bağlı polietilen (XLPE) atıkların granül halinde prekast beton bordür harcına belirli oranlarda ilave edilmesiyle en azından kıyaslama yapılacak XLPE katkısız prekast beton bordürler ile aynı eğilme mukavemetine sahip ve hafiflik bakımından daha ideal bir prekast kompozit beton bordür oluşturulmak istenmektedir. Böylece istifleme, uygulama alanında hafiflik sebebiyle daha ergonomik döşeme kolaylığı ve hammadde girdisi ve nakliyesi açısından daha ekonomik bir ürün olması hedeflenmektedir.

Beton, kompozit malzeme olarak iri parçacıklı bir kompozit olarak sınıflandırılabilir. Granül haldeki XLPE parçacıkları beton harcı içinde belirli oranlarda mümkün olduğunca homojen bir dağılımla yerleştiğinde beton, polimer katkı (takviyeli) iri parçacıklı bir kompozit olarak düşünülebilir. Bu kompozit ürün hafiflik ve maliyet açısından geleneksel betondan daha iyi özelliklere haiz olabilmesi öngörülmektedir. İyileştirilmesi beklenen bu özellikler yanında geleneksel betona yakın mukavemet özelliklerini de barındırması beklenmektedir. Genelde bir ürünle ilgili olarak bazı özelliklerde iyileştirme yapılırken bazı özelliklerde negatif kayıplar söz konusu olabilmektedir. XLPE katkı beton bordür üretiminde de geleneksel beton özelliklerinden mümkün olduğunca ödün vermeden optimum özelliklere sahip bir ürün dizaynı ile mühendislik uygulamalarında kullanılabilir olması hedeflenmektedir.

4. MATERYAL ve METOT

4.1 Materyaller

Çalışmada beton harcı elde etmek için, boyut sınıflandırması farklı 3 tip agrega; 0–5 agrega, 5–12 agrega, 12–19 agrega, çimento (CEM I 42,5 R), su, priz hızlandırıcı katkı, süper akışkanlaştırıcı katkı ve 0–5 agrega yerine kısmen kullanılacak olan 0–2 mm XLPE granülleri ve 0–5 mm XLPE granülleri olmak üzere toplam 9 çeşit malzeme kullanılmıştır.

4.1.1 0–5 Agrega, 5–12 Agrega ve 12–19 Agrega Özellikleri

Agregalar TS EN 12620 standardına uygun olmalıdır. Deneyde kullanılan agregalar İzmir ili, Bornova ilçesi taş ocaklarından temin edilmiştir. Deneylerde 3 tip kalker esaslı agrega sınıfı kullanılmıştır bunlar 0–5 (0–4) mm agrega, 5–12 (4–11) mm agrega ve 12–19 (11–16) mm agregadır (Parantez içinde yazan boyutlar teknik isimlendirme boyutlarıdır). Agrega sınıflarına ait özgül ağırlıklar sırasıyla 2,71 kg/dm³, 2,66 kg/dm³ ve 2,67 kg/dm³ 'dür. Agregaların elek analiz sonuçlarından beton reçete dizaynları aşamasında bahsedilecektir.

4.1.2 Çimento (CEM I 42,5 R)

Çimento, su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur (pasta) oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır. Bordür imalatında kullanılan çimento TS EN 197–1'e uygun olmalıdır.

Deneylerde kullanılan çimento tipi erken dayanımlı CEM I 42,5 R Portland çimentosudur. Erken ve yüksek dayanım gerektiren prekast beton ürünlerin imalatlarında tercih edilen bir çimento tipidir. Özellikle soğuk hava koşullarında da

erken dayanım değerlerine ulaşılması bakımından tercih edilen bir tiptir. Tüm yapı betonu imalatlarında kullanımı uygundur. CEM I 42,5 R tipi çimento kütlece >%95 klinker ve <%5 minör bileşenlerden oluşur. 2 günlük erken dayanımı ≥ 20 MPa ve 28 günlük erken dayanımı $\geq 42,5$ MPa'dır.

4.1.3 Su

Deneylerde kullanılan su içilebilir özellikte şebeke suyudur.

4.1.4 Priz Hızlandırıcı Katkı

Taze betonun priz ve sertleşme sürelerini kısaltan bir kimyasal katkıdır. Betonun erken dayanım değerlerini arttırıcı etkiye sahip, geç dayanım özelliklerini de düşürmeden işlenebilirliğe katkısı olan ve betonun dona maruz kalma riskini minimize eden bir katkıdır.

Beton bağlayıcı miktarının yani çimentonun ağırlıkça %0,5 ila %3 oranında kullanılması tavsiye edilir. TS EN 206 ve TS EN 13515'de tarif edilen bütün hazır beton sınıfları için kullanılabilir. Harç içine girecek karışım suyuna ilave edilerek kullanılması tavsiye edilir. Kullanılan priz hızlandırıcı katkı özgül ağırlığı 1,18 kg/dm³'tür. Kimyasal katkı maddeleri, TS EN 934-2'ye uygun olmalıdır.

4.1.5 Süper Akışkanlaştırıcı Katkı

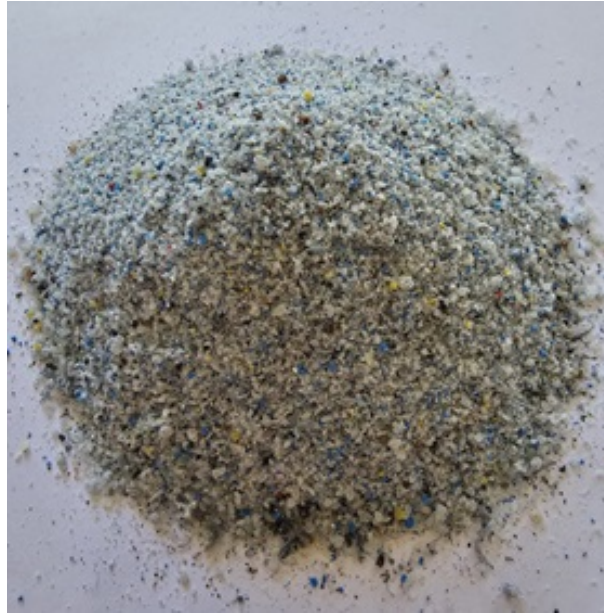
Hazır beton üretimi ile betonların kalıplara dökümünün kısa olduğu uygulamalar için yüksek oranda su miktarını azaltıcı ve prekast beton üretiminde yüksek erken dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılan bir katkıdır.

Beton bağlayıcı miktarının yani çimentonun ağırlıkça %0,4 ila %2 oranında kullanılması tavsiye edilir. TS EN 206 ve TS EN 13515'de tarif edilen bütün hazır beton sınıfları için kullanılabilir. Taze betonun işlenebilirliği ve sertleşmiş betonun özelliklerine göre laboratuvar ortamında deneyler yapılarak da karışım oranı

belirlenebilir. Harç içine girecek karışım suyuna ilave edilerek kullanılması tavsiye edilir. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkı özgül ağırlığı 1,06 kg/dm³'tür. Kimyasal katkı maddeleri, TS EN 934-2'ye uygun olmalıdır.

4.1.6 0-2 mm XLPE Granül

Nexans kablo firmasından temin edilen granül haldeki XLPE'ye ait görüntü Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Boyutlarının 0-2 mm aralığında olduğu görülmektedir. 0-2 mm XLPE elek analizi değerleri beton tasarım kısmında bahsedilmiştir.



Şekil 4.1: 0-2 mm XLPE granülleri

4.1.7 0-5 mm XLPE Granül

Nexans kablo firmasından temin edilen granül haldeki XLPE'ye ait görüntü Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Boyutlarının 0-5 mm aralığında olduğu görülmektedir. 0-5 mm XLPE elek analizi değerleri beton tasarım kısmında bahsedilmiştir.



Şekil 4.2: 0-5 mm XLPE granülleri

4.1.8 0-2 mm ve 0-5 mm XLPE Granül Karışım

XLPE atıkların istifleme etkinliği için granül haline getirilmesi uygundur. Farklı proseslerde ihtiyacı karşılayabilmesi adına granüller boyutlarına göre farklı sınıflandırmalar yapılarak istiflenebilir ve arz edilebilir.

Bu çalışmada kullanılan XLPE granüller yapılan elek analizleriyle 0-2 mm ve 0-5 mm olarak sınıflandırılmış olup beton harcı içinde bu iki sınıf granülün etkin biçimde kullanımı için bu iki granül sınıfı ikili karışım yapılarak tek bir XLPE granül karışımı olarak düşünülmüştür. Yapılan elek analizleri neticesinde 1'e 9 oranında bu iki karışım birbiri ile karıştırılmıştır. Böylece herhangi bir deney numunesi beton harcında kullanılan 0-2 mm XLPE granüllerinin toplam XLPE granüllerine kütlece oranı 0,1 olarak belirlenmiştir. Bu değer seçilmesinde diğer bir hususta granül elde edilirken 0-2 mm granüllerin ana ürün diye nitelenebilecek 0-5 mm XLPE granüllerin miktarından prosesi gereği daha az elde edilmesidir. Deney sonunda istenilen özelliklere ulaşılması durumunda XLPE granüllerin prekast beton bordür üretim proseslerinde tedarik sorunu oluşturmaması amaçlanmıştır. Zira ilave işlemlerle de yeniden alt boyutlara getirilebilir bir ürün olsa da ek bir enerji ve maliyet yükü oluşturması muhtemeldir.

4.2 Deney Ekipmanları

4.2.1 Hassas Teraziler

Deneylerde beton küp numunelerin beton harcının oluşturulmasında ve beton küp numunelerin tartımında 30 kg kapasiteli 0,1 g hassasiyetli CAS marka hassas terazi kullanılmıştır. Ayrıca beton küp numunelerin tartımında 12 kg kapasiteli ve 0,1 g hassasiyetli Sartorius marka yedek bir hassas terazi daha kullanılmıştır.

Beton bordürlerin harcının oluşturulmasında nispeten diğer hammaddelere göre küçük kütleli kimyasal katkıların ve XLPE granüllerin tartımı yine CAS marka hassas terazide yapılmıştır. Su emme tayini için beton bordürlerden alınan numunelerin tartımı yine CAS marka hassas terazide yapılmıştır.

4.2.2 Kantar

Nihai deneylerde bordür harcını oluşturan hammaddelerin (agregalar, çimento, su) ve bordür numunelerin tartımı E.M.K. marka 150 kg kapasiteli 50 g hassasiyetli kantarda yapılmıştır.

4.2.3 Elekler

Beton reçetesinin dizaynında gerekli incelik modülünün belirlenmesi için sınıflandırılmış agregalara TS EN 933–2 standardına uygun olarak, TS ISO 3310–1 standardına uygun tel örgülü 200 mm çaplı Matest marka elek serisi kullanılarak elek analizi yapılmıştır. Eleklerin göz aralıkları küçükten büyüğe; 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 5,6, 8, 11,2, 16, 22,4, 32'dir. Fakat beton dizaynında standartlara göre 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 elekler baz alınarak incelik tayini yapılmıştır.

Deney, malzemenin bir seri eleme işlemi yardımıyla azalan büyüklüğe sahip farklı tane boyutları halinde bölünmesi ve ayrılmasından oluşur. Elek göz açıklıklarının büyüklüğü ve eleklerin sayısı, talep edilen hassasiyet derecesine ve

numunenin cinsine uygun olarak seçilir. Metot, yıkama ve kuru elemeye dönüşür. Farklı elekler üzerinde kalan tanelerin kütlesi, malzemenin ilk kütlesi ile ilişkilidir. Her bir eleği geçen kümülatif yüzdeler sayısal formda ve istendiğinde grafik olarak rapor edilir (Ünsal ve Şen 2008).

Eleklerdeki göz açıklıkları TS EN 933–2'ye uygun olmalı ve TS 1227 ISO 3310–1 ve TS 1226 ISO 3310–2'deki özellikleri sağlamalıdır (Ünsal ve Şen 2008).

Elek analizi yapılacak agregalar etüvde $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında sabit kütleye ulaşmaya kadar kurutulur, (birbirini takip eden iki tartım arasındaki fark %0,1 ve altındaki oranlarda oluncaya dek) oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. 0,1 g hassasiyetli tartıda elekte elenen agrega numunelerinin elekte kalan kısımları tartılır. Elemeye önce büyük göz açıklığına sahip elekten başlanır.



Şekil 4.3: Elek analizi deneyinde kullanılan elekler

4.2.4 Beton Küp Numune Kalıbı

Küp numunelerin elde edilmesinde kullanılan kalıp ölçüleri 150x150x150 mm'dir. Darbeye ve aşınmaya karşı dayanıklı BMC (Camelyafli Polyester Hamur) malzemedен imal edilmiş olup ve TS EN 12390–1 standardına uygundur.

Küp numune kalıpları kullanım öncesi beton kalıntılarından temizlenir ve beton harcı dökümünden önce numunelerin kuruduktan sonra kalıptan rahatça

sökülebilmesi için yağlanır. Beton harcı, küp numune kalıplarına iki aşamada doldurulur. Yaklaşık olarak yarıya kadar doldurulunca 25 kere şişlenir ve beton harcın kalıp içine yerleşmesi için plastik çekiç yardımıyla tokmaklanır. Daha sonra kalıbın boş kalan kısmı beton harç ile doldurulur yine 25 kere şişlenir ve tokmaklanır. Bu işlemlerden sonra beton kalıp yüzeyi mala yardımıyla düzlenir. Numuneler karışmaması için numaralandırılır. Beton küp numuneler 24 saat kalıp içinde kurutulduktan sonra kalıp altında bulunan deliğe hava basılarak rahatça çıkabilmektedir.



Şekil 4.4: Basınç testinde kullanılan beton küp numune kalıbı

4.2.5 Betoniyer

Beton bordürlerin harcının karıştırılması işleminde 56 m³ kapasiteli, elektrik motoru tahrikli bir betoniyer kullanılmıştır. Betoniyer devri 30 rpm'dir.

Betoniyer, oluşturulacak harçtan hammadde kaçağı oluşmaması için kapaklıdır ve gözetleme penceresi bulunmaktadır. Harcın iyice karılmasından sonra katkı gibi küçük kütleli hammaddeler bu gözetleme penceresinden ilave edilebilmektedir. Beton harcının karışımını düzenlemek için harç içinde çalışan metal ayaklar mevcuttur.

4.2.6 Beton Bordür Kalıbı

Beton bordür kalıpları seri döküm işlemleri için 10 gözlü olup S235JR çelik sacdan imal edilmiştir. Kalıp saclarına presle bükümleri verilmiş ve kaynaklı birleştirmeler kullanılarak imal edilmiştir. Deneysel çalışmada ve uygulamada beton harcı dökümü öncesi kalıplar spatula ve tel fırçalar yardımıyla temizlenir. Sonra ince bir film tabakası oluşturacak biçimde kalıp iç yüzeyleri pülverize pompa yardımıyla yağlanır. Kalıplardan prizini almış beton bordürlerin rahat çıkması için kalıpların yan tarafında bulunan kapaklar gevşetilir. Beton bordürlerin kalıptan çıkarılması için döküm esnasında beton harcına yerleştirilen kaldırma ankrajlarından yukarı doğru kaldırılarak beton bordürlerin sökülmesi gerçekleştirilir.



Şekil 4.5: Prekast beton bordür üretiminde kullanılan kalıp

4.2.7 Dâhili Beton Vibratörü

Nihai deneylerde bordür numunelerinin beton harcındaki hava kabarcıklarının minimize edilmesi ve beton harcının kalıp içindeki dağılımının iyileştirilmesi için şişe tip dâhili vibratör kullanılmıştır. Kıyaslama yapılan bordürlerin üretiminde de şişe tip dâhili vibratör kullanılmaktadır. Böylece mukavemet testlerinde herhangi bir üretim hatası oluşma ihtimali sebebiyle tutarsız bir ölçüm sonucuyla karşılaşma durumu minimize edilmeye çalışılmaktadır. Şişe tip dâhili beton vibratörü 3000 rpm,

elektrik motoru tahrikli, 38 mm Şişe çaplıdır ve Şişe boyu 500 mm'dir. Şekil 4.6'da Şişe tip dâhili vibratör gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Şişe tip (dâhili) beton vibratörü

4.2.8 Kr Havuzu

Kr havuzu beton numunelerin mukavemet deneyleri öncesi bekletildiği bir ortamdır. Bu kr havuzunun sıcaklığı $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır ve otomasyon sistemiyle sıcaklık aralığı içinde tutulmaktadır. Yapılacak olan teste göre numuneler bu kr havuzlarında 7 veya 28 gün bekletilir.

4.2.9 Etüv

Deney aşamalarında kullanılan etüv cihazı UTEST marka olup UTD-1305 modelinde 250 dm^3 hacme sahiptir. Elek analizi öncesi doğal agregaları yani 0-5 agrega, 5-12 agrega ve 12-19 agregaları kurutma işlemi ve bordür numunelerden alınan parçaların kuru ağırlığını ölçmek için kullanılan etüv cihazı Şekil 4.7'de

gösterilmiştir. Etüv 200 °C'ye kadar ısıtma yapabilmektedir. Deneyde kullanılan etüv cihazı 250 dm³ hacme sahip olup alınan su emme tayini için bordür taşlarından alınacak olan 18 adet parça numune toplam hacmi yaklaşık 70–73 dm³ hacme sahip olduğundan numunelerin etüv cihazında TS EN 1340 standardına uygun olarak tek seferde kurutma işlemi gerçekleştirilebilecektir.



Şekil 4.7: Etüv cihazı

4.3 Ölçüm Araçları

4.3.1 Çökme (Slump) Deney Düzenegi

Çökme (slump) deneyi, taze beton kıvamını tayin etmek amacıyla yapılır. Taze beton, kesik huni şekilli düzenek içerisine sıkıştırılarak doldurulur. Kalıbın dairesel hareketlerle yukarı doğru çekilerek alınmasından sonra taze beton kütleindeki çökme mesafesi, betonun kıvam ölçüsü olarak kullanılır (Ünsal ve Şen 2008).

TS EN 12350–2'ye göre yapılmalıdır. Çökme ≥ 10 mm ve ≤ 210 mm, aralığında olmalıdır. Beton deney numunesi, TS EN 12390–2'e uygun olarak alınmalıdır.

Deneyde kullanılan düzenek 2 adet kesik koni biçimli metalden yapılmış olup cidar kalınlıkları 1,5 mm'dir. Küçük olan koni taze beton harcının deney konisine eklenmesine yardımcı olur. Diğer koni yani deney konisi ana ölçüleri taban çapı 200 ± 2 mm, üst yüz açıklık çapı 100 ± 2 mm ve yüksekliği 300 ± 2 mm'dir. Deney işlemleri esnasında deney konisinin hareket etmemesi için taban çapının olduğu bölgede ayakla basma parçaları ve koninin yukarı hareketini sağlamak için yanlarda el tutamakları bulunur. Şekil 4.8'de çökme deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Çökme (Slump) deneyinde kullanılan deney düzeneği

Kalıbın iç yüzeyi ile taban plâkası, yüzeyde serbest su kalmayacak şekilde nemlendirilir ve kalıp, yatay konumdaki taban plâkası/yüzeyi üzerine yerleştirilir. Kalıp, betonun doldurulması esnasında, tabana kelepçelenerek veya iki ayak basma parçasına basılarak taban plâkası/yüzeyine sıkıca tespit edilir. Taze beton, kalıba eşit kalınlıkta üç tabaka halinde ve her tabakanın sıkıştırılmış durumdaki kalınlığı, kalıp yüksekliğinin yaklaşık olarak 1/3'ü olacak şekilde doldurulur. Doldurma esnasında her tabaka, sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılır. Sıkıştırma çubuğu darbeleri, her tabakanın yüzey alanına düzgün dağılmalıdır. En alt tabakanın sıkıştırılması esnasında, darbelerin yüzeye düzgün dağıtılması için, sıkıştırma

çubuğunun düşey doğrultuya göre hafifçe yatırılması ve darbelerden en az yarısının kenardan merkeze doğru spiral oluşturacak noktalara vurulması gerekir. İkinci ve son tabaka, bütün derinliğince, sıkıştırma çubuğu bir alt tabakaya da hafifçe işleyecek şekilde sıkıştırılmalıdır. En üst tabakanın doldurulması ve sıkıştırılmasında, sıkıştırma işlemine başlanılmadan önce beton seviyesinin kalıp üst yüz seviyesinden daha yukarıda olması sağlanmalıdır. En üst tabakanın sıkıştırılması esnasında, taze beton seviyesinin, kalıp üst yüz seviyesinden daha aşağıya düşmesi halinde, beton seviyesinin sürekli olarak kalıp üst yüz seviyesinden daha yukarıda olması sağlanacak şekilde beton ilâve edilmelidir. Sıkıştırma işleminin tamamlanmasından sonra, kalıp üst seviyesinden taşan fazla beton, sıkıştırma çubuğuna kesme ve yuvarlama hareketleri (master hareketi benzeri) yaptırılarak sıyrılıp alınmalı ve yüzey tesviye edilmelidir (Ünsal ve Şen 2008).

Deney düzeneğinin taban plâkası (tepsi) içine dökülen beton temizlenir. Konik kalıp, el tutamaklarından tutularak, dikey şekilde yukarıya doğru çekilerek alınmalıdır ve kalıbın çekilme işlemi 5 saniye – 10 saniye arasındaki sürede tamamlanmalı, kalıp mümkün olduğunca sabit hızda çekilmeli, bu esnada beton kütesine yanal sıyırma hareketi bir başka deyişle dairesel dönme hareketi yaptırılmamalıdır. Tüm deney işlemi, betonun kalıba doldurulmaya başlanılmasından, kalıbın çekilerek alınmasına kadar herhangi bir duraksama olmadan 150 saniyede tamamlanmalıdır (Ünsal ve Şen 2008).

Kalıbın alınmasından hemen sonra, kalıp tepsi içinde yan tarafa konur ve kalıp (koni) üst yüzey seviyesi ile çöken beton kütesinin en yüksek noktası arasındaki çökme mesafesi ölçülerek kaydedilmelidir.

4.3.2 Basınç Dayanımı Test Cihazı

Basınç dayanımı deneylerinde kullanılan cihaz 2000 kN'a kadar yüklemeye yapabilen 750 W gücünde UTEST marka UTC-4231 serisidir. TS EN 12390-3, 12390-4, BS 1881 ve ASTM C39 standardına uygun olarak deneyler yapabilmektedir. Hidrolik güç ünitesi ile tahrik edilmektedir. Plaka başlıkları Ø300 mm olup maksimum çalışma basıncı 410 Bar'dır. Numunenin yerleştirileceği yatay açıklık, yükleme plakaları kenarı ile sınırlıdır. Numune kenarları, yükleme plakasına

kenarından dışarı taşmayacak şekilde ve merkezlenerek yerleştirilmelidir. Şekil 4.9’da basınç dayanımı test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Basınç dayanımı deneyinde kullanılan test cihazı

4.3.3 Eğilme Dayanımı Test Cihazı

Eğilme dayanımı deneylerinde kullanılan cihaz 300 kN’a kadar yükleme yapabilen UTEST marka UTC-5542 serisidir. TS EN 12390-5, TS EN 12390-6, TS EN 1338, TS 1340, BS 1881, ASTM C78, C293 ve C496 standardına uygun olarak deneyler yapılabilmektedir. Hidrolik güç ünitesi tahriklidir.

Beton bordür eğilme dayanımı deneyi, bilinen tek nokta etkili ve iki nokta etkili beton eğilme deneylerinden biraz farklı olarak uygulanmaktadır. Tek nokta etkili eğilme deneyine benzer fakat tek nokta etkili eğilme deneyinde orta noktadan etkiyen yük çizgisel iken beton bordür eğilme deneyinde etkiyen yük noktasaldır. Eğilme dayanımı deneyi TS EN 1340 ‘Zemin Döşemesi İçin Beton Bordür Taşları – Gerekli Şartlar ve Deney Metotları’ standardında tarif edilen yöntemine uygun olarak yapılmıştır.

Beton bordür numunesi, eğilme dayanımı deney cihazına her zaman en kesitinin uzun olan kenarı yatay konumda olacak biçimde yerleştirilmelidir. Yükleme, gerilme artış hızı $0,06 \pm 0,02$ MPa/s olacak şekilde ve herhangi bir darbe etkisi olmadan kırılma yüküne ulaşıncaya kadar uygulanır. Şekil 4.10'da 3 noktalı eğilme dayanımı test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Eğilme dayanımı deneyinde kullanılan test cihazı

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda ön deneyler ve nihai deneyler olmak üzere iki aşamalı deney çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ön deney çalışmalarda, nihai deney çalışmalarında izlenecek yol için öncelikle XLPE granüllerin mevcut agregalara olan uyumluluğunu gözlemlemek ve uygun karışım oranlarını belirlemek için basınç ve çökme (slump) deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu ön deneyler sonucunda nihai deneylerde oluşturulacak bordür harcına eklenecek yaklaşık XLPE miktarı belirlenmiştir.

Ön deneylerde XLPE katkısız 1 adet beton karışım reçetesi ve ince agrega yerine kullanılacak olan XLPE katkılı 3 adet beton karışım reçetesi olmak üzere toplam 4 adet beton karışım reçetesi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu reçetelerdeki hammaddelerin miktarlarının az olması sebebiyle ve hassas tartım işlemleri uygulayabilmek için beton harçları laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Reçetelere uygun beton harçlarının basınç deneylerinin yapılması için küp numunelere yerleştirilmesi işleminden önce beton harçlarına, akıcılık ve işlenebilirlik özelliklerini gözlemlemek için çökme (slump) deneyleri yapılmıştır. Çökme (slump) deneyleri sonrası beton harçlar 150x150x150 mm boyutlarında beton numune kalıplarına doldurularak bu numunelerin 28 gün kür havuzunda bekletilmesi ve sonunda ağırlıklarının tartımı ve basınç deneyleri yapılmıştır.

Ön deneyler ışığında, nihai deneylerde oluşturulacak beton karışım reçetelerinde kullanılacak XLPE miktarları belirlenmiştir. Nihai deneylerde XLPE katkısız fiziksel ve mekanik özellikleri kanıtlanmış beton karışım reçetesine göre XLPE miktarları uyarlanarak 2 adet XLPE katkılı beton karışım reçetesi uyarlanmıştır. Uyarlanan bu reçetelerde XLPE yine ince agrega yerine kullanılmıştır.

Nihai deneylerde oluşturulan XLPE katkısız 1 adet, XLPE katkılı 2 adet toplam 3 adet beton karışım reçetesine uygun beton harçları, karma işleminin güçlüğünden ve mümkün olduğunca homojen bir beton harcı oluşturabilmek için 56 dm³ 'lük bir betoniye (beton karma mikseri) yardımı ile hazırlanmıştır. 3 karışım reçetesi içinde çökme (slump) deneyleri, basınç ve eğilme deneyleri öncesi

yapılmıştır. Basınç deneyleri için 150x150x150 mm boyutlu beton küp numuneler oluşturulmuştur. Yine aynı betoniye üretim harmanında elde edilen beton harçlarıyla eğilme deneyleri için bordür kalıplarında numuneler oluşturulmuştur. Bu beton küp numunelerin ve bordür numunelerin de 28 gün kür havuzunda bekletilmesi sonunda ağırlıklarının tartımı ve basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır.

Nihai deneyler sonucunda bordür numunelerden kesilerek elde edilen ağırlığı 2,5 kg'dan büyük ve 5 kg'ı geçmeyen en kesit parça beton numunelere su emme tayini deneyi yapılmıştır.

Ön deneylerde basınç deneyi için her bir beton karışım reçetesi için 3'er adet beton küp numunesi oluşturulmuştur. Nihai deneylerde basınç deneyi ve eğilme deneyi için her bir karışım reçetesi ve numune tipi için 3'er adet numune oluşturulmuştur. Su emme tayini için bordür numunelerden her bir numune grubu için $3 \times 2 = 6$ adet numune oluşturulmuştur toplamda $3 \times 6 = 18$ adet numune elde edilmiştir ve su emme tayini deneyi yapılmıştır. XLPE katkılı/katkısız beton küp numuneler, XLPE katkılı / katkısız beton bordür numuneler birbirleriyle fiziksel ve mekanik özellikler bakımından kıyaslanmıştır.

5.1 Deney Metodolojisi ve Numune İsimlendirme

Bu çalışmada referans alınan prekast beton bordür tipi, imalat yöntemleri ve kullanım bölgesi gereği deneyde oluşturulan numunelere aşağıdaki tabloda belirtilen deneyler uygulanacaktır. Boyutları gereği eğilme dayanımı deneyine tabi tutulamayan büyük boyutlu prekast bordürler ve prekast bordür benzeri büyük boyutlu / yüksek tipli bordürler, bariyerler ve eğilme dayanımı test cihazına yerleştirme usulleri uymayan bordürler, eğilme dayanımına uygun beton harcıyla üretilmiş betona eşdeğer betondan üretilmesi gerekmektedir. Bu sebeple eğilme dayanımı yapılamayan bu bordürlerde yeterli dayanımı verip veremeyeceğini irdelemek için çökme (Slump) deneyi ve basınç dayanımı deneylerinden faydalanılır.

Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulamayan bordürlerde kullanılan betonun basınç dayanımı değerleri, gerekli eğilme dayanımı değerini yakalamış betonun elde edilen beton basınç dayanımında olması gerekmektedir. Ayrıca ideal bir beton

karişim dizaynı oluşturularak XLPE katkılı beton dizaynlarının, XLPE katkısız beton dizaynına göre nasıl davranış gösterdiği irdelenecektir. Bu sebeple ön deneylerde oluşturulan farklı beton dizaynlarında küp numunelerin basınç dayanımı değerleri ve taze beton harcının çökme (slump) deneyi değerleri irdelenecektir. Çökme deneyleri beton küp numuneler ve beton bordür numuneler oluşturulmadan önce yapılacaktır.

Tablo 5.1’de prekast beton bordürler için gerekli deney metotlarını ve bu çalışmada kıyaslama yaptığımız referans (şahit) prekast beton bordür için uygulanan deney metotlarını gösterir tablo bulunmaktadır. Kıyaslama yapılan referans prekast beton bordüre uygulananlar işaretlenmiştir.

Tablo 5.1: Çalışmada uygulanan deney metotları

DENEYLER	NUMUNE TIPLERİ	NUMUNE GRUPLARI	İrdeleme Deneyleri			Beton Bordürler İçin Gerekli Deneyler						
			Çökme (Slump) Deneyi	Basınç Dayanımı Deneyi	Eğilme Dayanımı Deneyi	Hava Etkileri Nedeniyle Yıpranmaya Karşı Direnç		Aşınmaya Direnç	Kaymaya/Kızaklamaya Karşı Direnç	Yangın Performansı		
						Su Emme Tayini	Buz Çözücü Tuz Etkisiyle Birlikte Donma/Çözölmeye Karşı Direncin Tayini			Yangına Direnç	Harici Yangın Performansı	Isıl İletkenlik
ÖN DENEYLER	BETON KÜP NUMUNELER	R0 Grubu	√	√	-	-	-	-	-	-	-	-
		R1 Grubu	√	√	-	-	-	-	-	-	-	-
		R2 Grubu	√	√	-	-	-	-	-	-	-	-
		R3 Grubu	√	√	-	-	-	-	-	-	-	-
NİHAİ DENEYLER	BETON KÜP ve BORDÜR NUMUNELER	RU0 Grubu	√	√	√	√	İ	B.Y.	B.Y.	K	K	K
		RU1 Grubu	√	√	√	√	İ	B.Y.	B.Y.	K	K	K
		RU2 Grubu	√	√	√	√	İ	B.Y.	B.Y.	K	K	K

İ; İrdeleme Yapılmadı, **B.Y.**; Beyan Yok, **K**; Kabul (Beyan Olmadığı İçin)

Referans olarak kabul edilen XLPE katkısız betondan imal edilmiş prekast bordürün kullanım alanı ılıman bölgeler olduğu için buz çözücü tuz etkisiyle birlikte donma / çözölmeye karşı direncin tayini irdelenmemiştir. Bu sebeple tabloda ‘İ’ harfi ile gösterilmiştir. Referans olarak kabul edilen bordürün her yerinde aynı dolgu özelliğini göstermesi ve yüzeyinde ilave bir kaplama tabakası olmaması sebebiyle aşınmaya direnç deneyi irdelenmeyecektir. Tabloda ‘B.Y.’ harfleri ile böyle bir beyan özelliğinin olmadığı belirtilmiştir. Referans olarak kabul edilen bordürün imalat aşamalarında ve sonrasında yüzeyine herhangi bir cilalama, parlatma işlemi uygulanmadığından Kaymaya / kızaklamaya karşı direnç deneyi irdelenmeyecektir. Tabloda ‘B.Y.’ harfleri ile böyle bir beyan özelliğinin olmadığı belirtilmiştir.

Betondan yapılan bordürlerin yangın performansı uygun kabul edilir ve bordür imalatçısının bordürde yalıtım özelliği beyanı yoksa ısı iletkenlik deneylerinin yapılmasına gerek yoktur. Referans olarak kabul edilen bordürün kullanım yerlerinde ısı iletkenlik özelliğinin aranmaması ve XLPE katkı ılı bordür numunelerde ısı iletkenlik özelliğinin iyileştirilmesi amaçlanmadığı için ısı iletkenlik deneylerinin yapılmasına gerek duyulmamıştır. Bu sebeple standartlarda beton bordürlerin yangına performansı uygun kabul edildiği için tabloda ‘K’ harfi ile gösterilmiştir.

Deneylede kullanılacak numunelere, ‘Numune Grubu’ – ‘Numune Numarası’ tanımlar biçimde bir isimlendirme yapılmıştır. Numune grubu tanımı ise numunenin hangi deney grubunda yapıldığını ve içeriğindeki küttele XLPE granüllerin küttele toplam agregaya oranlarını tanımlayan sayıdan oluşmaktadır. Numune numarası her bir deneyde 3 adet numune oluşturulduğundan 1 ‘den 3’e kadar sayılardan oluşmaktadır. Ön deneylede deney gurubu ön eki reçete anlamına gelen ‘R’ harfinden, nihai deneylede reçete uyarlama anlamına gelen ‘RU’ harfinden ibarettir ve XLPE içeriğine karşılık gelen ifade sayısıyla bitişik yazılmaktadır ardından tire işareti ve numune numarası belirtir sayı yazılmaktadır. Numune isimlendirme metodu Tablo 5.2’de ifade edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 5.2: Numune isimlendirme metodu.

Deney Grubu	Numune Grubu		-	Numune Numarası (1 / 2 / 3)	XLPE İçeriği (XLPE/Toplam Agregata) (Küttele %)
	Deney Grubu (R / RU)	XLPE İçeriği İfade Sayısı			
Ön Deneylede	→ R	0	-	1...3	← 0
	→ R	1	-	1...3	← 5
	→ R	2	-	1...3	← 10
	→ R	3	-	1...3	← 15
Nihai Deneylede	→ RU	0	-	1...3	← 0
	→ RU	1	-	1...3	← 3
	→ RU	2	-	1...3	← 5

Tablodan da anlaşılacağı üzere ön deneylede 4 numune grubunda toplam 12 adet beton küp numunesi oluşturulmuştur. Nihai deneylede ise 3 numune grubunda toplam 9 adet beton küp numunesi ve 9 adet beton bordür numunesi oluşturulmuştur. Yine her bir numune gurubuna çökme deneylede yapılmıştır.

Örnek olarak R1–2 isimlendirmesi ön deneylerdeki %5 XLPE içerikli 2 numaralı numuneyi ifade eder. RU2–3 isimlendirmesi nihai deneylerdeki % 5 içerikli 3 numaralı numuneyi temsil eder.

Nihai deneylerde yani RU grubunda bordür numunelerinin her biri üzerinden su emme tayini için 2 adet numune alınacağından su emme tayini yapılacak numunelere alındığı bordür numunesinin isimlendirmesine ek olarak A ve B harfleri eklenerek tanımlar yapılmıştır. Örnek olarak RU1–3–A ve RU1–3–B; nihai deneylerde %3 XLPE içerikli 3 numaralı bordür numunesi üzerinden alınan 2 adet su emme tayini numunesini tanımlar.

5.2 Ön Deneyler

Ön deneyler, numune hacimlerinin az olması ve kullanılan malzemelerin hassas tartımı için ve verilerin sağlıklı işlenebilmesi için laboratuvar ortamında yapılmıştır. Zira kullanılan malzemeler proses şartlarında hazırlanıp karıştırılsaydı proses şartlarında 0,1 gram hassasiyetle tartımlar gerçekleştirilemeyeceği için sağlıklı bir çalışma mümkün olmazdı. Bu sebeple laboratuvar ortamında kontrollü bir deney çalışması yapmak sonuçları gözlemek bakımından daha sağlıklıdır.

Ön deneylerde hazırlanan beton bordür reçetelerine göre oluşturulan beton küp numunelere basınç dayanımı deneyi ve taze beton deneyi olan çökme (slump) deneyi yapılmıştır.

5.2.1 Bordür Betonunu Reçete Dizaynları

Beton bordürlerin beton karışım dizaynında kullanılacak agrega sınıfları azami agrega tane boyutuna (D_{max}) göre belirlenir. Azami agrega tane boyutu bordür kalıbı içindeki ara açıklıklar ve bordür kalıbı boyutlarına göre tayin edilir. Kalıp genişliğinin $1/5$ 'i kadar olmalıdır. Beton karışım dizaynında ideal bir beton eldesi için beton karışımında kullanılacak XLPE granüllerinin miktarlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple 0–2 mm XLPE granüllere ve 0–5 mm XLPE granüllere ve 0–5 mm, 5–12 mm, 12–19 mm sınıflarındaki agregalara incelik modülü

taini için elek analizleri yapılmıştır. Elek analizlerinde alınan numune miktarları standartlarda gerekli asgari numune miktarı şartlarını sağlamaktadır. Parantez içindeki elek numaraları incelik modülü hesaplamasında kullanılmayan elek numaralarıdır. Hesaplama elek üstü yığışimli ağırlık dikkate alındığından hesaplama açısından bir sakınca teşkil etmemektedir. Tablo 5.3'te 0–2 mm XLPE granüllerin, Tablo 5.4'te 0–5 mm XLPE granüllerin, Tablo 5.5'de 0–5 mm agregaların, Tablo 5.6'da 5–12 mm agregaların ve Tablo 5.7'de 12–19 agregaların elek analizi sonuçları gösterilmiştir. Tablo 5.8'de elde edilen incelik modülleri tablo halinde özetlenmiştir. İncelik modülü agregadaki tanelerin boyutsal büyüklüğünü tanımlamaya yaramaktadır. Agregalarda küçük boyutlu tanelerin miktarı toplam agrega miktarına oranla artarsa incelik artar yani incelik modülü azalır. Büyük boyutlu tanelerin artması durumunda ise kalınlık artar yani incelik modülü artar.

Tablo 5.3: 0–2 mm XLPE elek analizi

ELEK ANALİZİ	0–2 mm XLPE			
Elek No	Elek Üstü Kalan Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığışimli Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığışimli Ağırlık (q) (%)	Elek Altı Yığışimli Ağırlık (p) (%)
32	0	0 g	0,0	100,0
(22,4)	0	0 g	0,0	100,0
16	0	0 g	0,0	100,0
(11,2)	0	0 g	0,0	100,0
8	0	0 g	0,0	100,0
(5,6)	0	0 g	0,0	100,0
4	0	0 g	0,0	100,0
2	1,4	1,4	0,7	99,3
1	23,9	25,3	12,6	87,4
0,5	85,1	110,4	54,9	45,1
0,25	70,4	180,8	89,9	10,1
(0,125)	16,7	197,5	98,2	1,8
(0,063)	2,1	199,6	99,3	0,7
Elek Altı	0	199,6	99,3	0,7
Numune Kuru Ağırlığı:	201,1	İncelik Modülü:	1,581	

0–2 mm XLPE granüller için 201,1 g kuru numune alınmış olup elek analizinde çıkan incelik modülü 1,581'dir.

Tablo 5.4: 0–5 mm XLPE elek analizi

ELEK ANALİZİ		0–5 mm XLPE			
Elek No	Elek Üstü Kalan Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığılımlı Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığılımlı Ağırlık (q) (%)	Elek Altı Yığılımlı Ağırlık (p) (%)	
32	0	0	0,0	100,0	
(22,4)	0	0	0,0	100,0	
16	0	0	0,0	100,0	
(11,2)	0	0	0,0	100,0	
8	0	0	0,0	100,0	
(5,6)	11,5	11,5	1,5	98,5	
4	236,4	247,9	31,7	68,3	
2	429,7	677,6	86,8	13,2	
1	73,3	750,9	96,2	3,8	
0,5	14,1	765	98,0	2,0	
0,25	7,5	772,5	98,9	1,1	
(0,125)	5,5	778	99,6	0,4	
(0,063)	1,4	779,4	99,8	0,2	
Elek Altı	0	779,4	99,8	0,2	
Numune Kuru Ağırlığı:	780,9	İncelik Modülü:	4,116		

0–5 mm XLPE granüller için 780,9 g kuru numune alınmış olup elek analizinde çıkan incelik modülü 4,116'dır.

Tablo 5.5: 0–5 mm agrega elek analizi

ELEK ANALİZİ	0–5 mm AGREGA			
Elek No	Elek Üstü Kalan Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığılımlı Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığılımlı Ağırlık (q) (%)	Elek Altı Yığılımlı Ağırlık (p) (%)
32	0	0	0,0	100,0
(22,4)	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
(11,2)	0	0	0,0	100,0
8	0	0	0,0	100,0
(5,6)	9,2	9,2	0,7	99,3
4	86,5	95,7	7,3	92,7
2	359,5	455,2	34,7	65,3
1	291,6	746,8	56,9	43,1
0,5	194,7	941,5	71,7	28,3
0,25	110,5	1052	80,1	19,9
(0,125)	79,2	1131,2	86,1	13,9
(0,063)	43,6	1174,8	89,5	10,5
Elek Altı	0	1174,8	89,5	10,5
Numune Kuru Ağırlığı:	1313,2	İncelik Modülü:	2,506	

0–5 mm agrega için 1313,2 g kuru numune alınmış olup elek analizinde çıkan incelik modülü 2,506'dır.

Tablo 5.6: 5–12 mm agrega elek analizi

ELEK ANALİZİ	5–12 mm AGREGA			
Elek No	Elek Üstü Kalan Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığılımlı Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığılımlı Ağırlık (q) (%)	Elek Altı Yığılımlı Ağırlık (p) (%)
32	0	0	0,0	100,0
(22,4)	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
(11,2)	307,1	307,1	11,7	88,3
8	1080,0	1387,1	52,9	47,1
(5,6)	1005,9	2393,0	91,2	8,8
4	206,2	2599,2	99,1	0,9
2	4,4	2603,6	99,2	0,8
1	2,6	2606,2	99,3	0,7
0,5	0	2606,2	99,3	0,7
0,25	0	2606,2	99,3	0,7
(0,125)	0	2606,2	99,3	0,7
(0,063)	0	2606,2	99,3	0,7
Elek Altı	0	2606,2	99,3	0,7
Numune Kuru Ağırlığı:	2623,9	İncelik Modülü:	5,491	

5–12 mm agrega için 2623,9 g kuru numune alınmış olup elek analizinde çıkan incelik modülü 5,491'dir.

Tablo 5.7: 12–19 mm agrega elek analizi

ELEK ANALİZİ	12–19 mm AGREGA			
Elek No	Elek Üstü Kalan Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığışım Ağırlık (g)	Elek Üstü Yığışım Ağırlık (q) (%)	Elek Altı Yığışım Ağırlık (p) (%)
32	0	0	0,0	100,0
(22,4)	0	0	0,0	100,0
16	1383,9	1383,9	48,5	51,5
(11,2)	1442,3	2826,2	99,1	0,9
8	11,3	2837,5	99,5	0,5
(5,6)	4,8	2842,3	99,6	0,4
4	0	2842,3	99,6	0,4
2	0	2842,3	99,6	0,4
1	0	2842,3	99,6	0,4
0,5	0	2842,3	99,6	0,4
0,25	0	2842,3	99,6	0,4
(0,125)	0	2842,3	99,6	0,4
(0,063)	0	2842,3	99,6	0,4
Elek Altı	0	2842,3	99,6	0,4
Numune Kuru Ağırlığı:	2853,1	İncelik Modülü:	6,461	

12–19 mm agrega için 2853,1 g kuru numune alınmış olup elek analizinde çıkan incelik modülü 6,461'dir. XLPE granüllerin ve agrega sınıflarının incelik modülleri Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8: Ön deneyler XLPE granül ve agrega sınıfları incelik modülleri

İncelik Modülleri	
XLPE Granül ve Agregası Sınıfları	İncelik Modülü
0–2 mm XLPE	1,581
0–5 mm XLPE	4,116
0–5 mm Agregası	2,506
5–12 mm Agregası	5,491
12–19 mm Agregası	6,461

R grubu deney numunelerinin harçlarında toplam agrega miktarına göre XLPE granül tiplerinin ve agrega sınıflarının oranları Tablo 5.9’da gösterilmiştir. Özellikle 12–19 agrega miktarının oranı, dayanımın daha iyi çıkması ve su ihtiyacının azaltılması için biraz yüksek seçilmiştir.

Tablo 5.9: Ön deneyler XLPE granül ve agrega oranları

XLPE Granül ve Agrega Oranları					
R Numune Grupları	0–2 XLPE (%)	0–5 XLPE (%)	0–5 AGREGA (%)	5–12 AGREGA (%)	12–19 AGREGA (%)
R0 Grubu (%0 XLPE)	0,0	0,0	40,0	20,0	40,0
R1 Grubu (%5 XLPE)	0,5	4,5	35,0	20,0	40,0
R2 Grubu (%10 XLPE)	1,0	9,0	30,0	20,0	40,0
R3 Grubu (%15 XLPE)	1,5	13,5	25,0	20,0	40,0

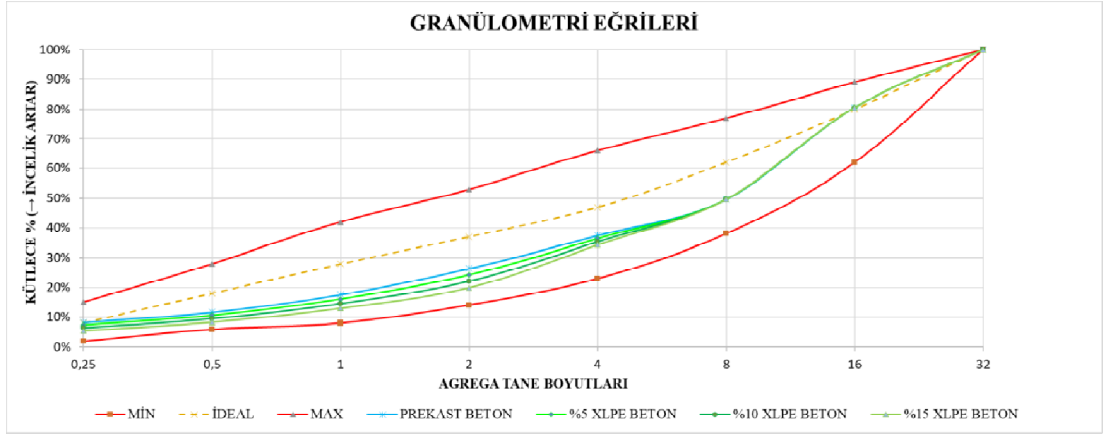
Her bir agrega sınıfının parantezli olmayan elek numaralarının elek üstü yığışlımlı ağırlık miktarları (q), Tablo 5.9’da belirlenen her bir numune grubunun agrega oranlarıyla çarpılarak karışımların elek üstü yığışlımlı ağırlık miktarı bulunur. Parantez harici elek numaralarına göre bulunan bu değerler her bir numune grubu için ayrı ayrı toplanır ve karışım agregalarının incelik modülleri bulunur. Tablo 5.10’da her bir numune grubu için hesaplanan incelik modülleri gösterilmiştir. Hazırlanan karışımlarda XLPE oranı arttıkça karışım agregasında incelik azalmaktadır yani incelik modülü artmaktadır.

Tablo 5.10: Ön deneyler numune grupları incelik modülleri

Numune Grubu	İncelik Modülü
R0; Prekast Beton Agregası (%0 XLPE)	4,685
R1; Prekast Kompozit Beton Agregası (%5 XLPE)	4,753
R2; Prekast Kompozit Beton Agregası (%10 XLPE)	4,821
R3; Prekast Kompozit Beton Agregası (%15 XLPE)	4,888

Oluşturulan agrega karışımları ile uygun bir beton elde edilip edilemeyeceği granülometri eğrileri ile irdelenir. Numune grubu karışım agregalarına ait granülometri eğrileri toplu olarak Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Granülometri eğrilerinde minimum ve maksimum eğriler arasında oluşan granülometrilere uygun beton oluşturulabilir demektir. İdeal eğrinin altına düşüldükçe karışım agregasında

kalınlık artar yani incelik modülü artar, ideal eğrinin üstüne gidildikçe incelik artar yani incelik modülü azalır. Şekil 5.1’de toplu gösterimde görüldüğü üzere XLPE oranının beton harcın içerisinde artmasıyla incelik modülünde artış meydana gelmiştir. Yani incelikte azalma meydana gelmektedir.



Şekil 5.1: R0, R1, R2 ve R3 numune grubu agrega granülometreleri

Beton harcı elde etmek için karışım reçetesinde kullanılacak su miktarı belirlenmesi gerekmektedir. Su miktarının bulunmasında incelik modülü–su bağıntısından yararlanılmıştır. Her bir numune grubuna yani reçeteye ait incelik modülü (k) belirlenir ve istenen ıslak beton harcı kıvamına ve kullanılan agrega tipine göre α katsayısı ($\alpha=37$) Tablo 5.11’den belirlenir. Her bir reçete dizaynının su miktarı (S) aşağıdaki incelik modülü–su bağıntısından bulunur.

Tablo 5.11: α katsayısının belirlenmesi (URL 11)

α Katsayısının Belirlenmesi			
Kıvam	Dere Kumu ve Çakıl	Dere Kumu ve Mıdır	Deniz Kumu ve Mıdır
Kuru	28 – 30	33	37
Plastik	31 – 33	37	40
Akıcı	36 – 40	43	47

$$S = \alpha \times (10 - k) \quad (5.1)$$

Gerekli su miktarları eşitlik (5.1)’e göre belirlendikten sonra Su / Çimento oranının (S/Ç) belirlenmesi gerekir. Su / Çimento oranının belirlenmesinde öncelikle

hedef basınç dayanımı belirlenir. Hedef basınç dayanımı belirlenirken bordür numunelerin gerekli eğilme dayanımını yakalayabilmesi için gerekli basınç dayanımı 150x150x150 mm beton küp numuneler için yaklaşık 37 MPa civarında olması gerektiği deneysel gözlemlerle tespit edilmiştir. Bu sebeple C30/37 sınıfında bir beton elde edilmesi gerekmektedir. Tablo 5.12'den C30/37 beton sınıfı için hedef basınç dayanımı silindirik numunelerde 36 MPa ve küp numunelerde 43 MPa olarak okunur.

Tablo 5.12: Beton sınıfına göre hedef basınç dayanımının belirlenmesi (TS 802 Standardı)

Beton Sınıfı	Karakteristik Basınç Dayanımı, f _{ck} (MPa)		Hedef Basınç Dayanımı, f _{cm} (Ortalama Silindir/Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı) (MPa)		
	(150x300) mm Karakteristik Silindir Basınç Dayanımı, f _{ck} (MPa)	(150x150x150) mm Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı, f _{ck} (MPa)	Standart Sapma Biliniyorsa	(150x300) mm Silindir	(150x150x150) mm Küp
C14/16	14	16	$f_{cm} = f_{ck} + 1,48 * \sigma$	18	20
C16/20	16	20		20	24
C18/22	18	22		22	26
C20/25	20	25		26	31
C25/30	25	30		31	36
C30/37	30	37		36	43
C35/45	35	45		43	53
C40/50	40	50		48	58
C45/55	45	55		53	63
C50/60	50	60		58	68
C55/67	55	67		63	75
C60/75	60	75		68	83
C70/85	70	85		78	93
C80/95	80	95		88	103
C90/105	90	105		98	113
C100/115	100	115		108	123

Su / Çimento oranı hedef basınç dayanımına göre silindirik numunelerden istenen 36 MPa hedef basınç dayanımına karşılık gelen ve hava sürüklenmemiş beton grubu için oran interpolasyon ile Tablo 5.13'ten 0,46 olarak belirlenir.

Tablo 5.13: Su / Çimento oranının seçilmesi (TS 802 Standardı)

28 Günlük (150x300) mm Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Su / Çimento Oranı	
	Hava Sürüklenmemiş Beton	Hava Sürüklenmiş Beton
45	0,38	0,3
40	0,42	0,34
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

Çimento miktarının bulunması için belirlenen 0,46 oranı (5.2) eşitliğine yerleştirilir.

$$0,46 = S / \text{Ç} \quad (5.2)$$

$$\text{Ç} = S / 0,46 \quad (5.3)$$

Su miktarları belirlenen ve Su / Çimento oranı bilinen bağıntıya göre her bir reçete dizaynının yani numune grubunun çimento miktarları eşitlik (5.3) yardımıyla belirlenir.

Katkı miktarlarının belirlenmesi tedarikçi firmanın önermesi ile belirlenen oranlardadır ve çimento miktarına göre belirlenmektedir. Priz hızlandırıcı katkı (P.H.K.) miktarı, çimento miktarının %1,63 katıdır. Süper akışkanlaştırıcı katkı (S.A.K.) miktarı, çimento miktarının %0,03 katıdır.

Hava miktarının belirlenmesi ise her bir reçete dizaynı için %1 olarak belirlenmiş olup 1000 dm³ beton için 10 dm³ olarak alınmıştır. Havanın özgül ağırlığı 1,225 kg/m³ alınırsa 10 dm³ hava 0,0125 kg eder.

Miktarları belirlenen hammaddelerin özgül ağırlıklarıyla bölünerek hacimlerinin bulunması işlemleri yapılır. Daha sonra 1000 dm³ beton hacmi için

gerekli agrega hacminin bulunması yine her bir reçete dizaynı için (5.4) eşitliğine göre yapılır.

$$V_a = 1000 - (V_s + V_ç + V_k + V_h) \quad (5.4)$$

Oluşan karışımın kütlece agrega miktarının belirlenmesi için karışımın özgül ağırlığının bilinmesi gerekmektedir. Karışımda kullanılacak olan hacmi belirlenen agregaların agrega karışım özgül ağırlığının bulunması (5.5) eşitliğine göre yapılır. Karışımda kullanılan her bir agrega sınıfının kütlece yüzde değerlerinin (%X), agrega sınıfının özgül ağırlığına (ρ) bölünmesi ve birbirleriyle çarpılarak çıkan sonucun 1'i bölmesiyle karışım agregasının özgül ağırlığı bulunur.

$$\rho_a = \frac{1}{\frac{\%X_{0-2 X}}{\rho_{0-2 X}} \times \frac{\%X_{0-5 X}}{\rho_{0-5 X}} \times \frac{\%X_{0-5 A}}{\rho_{0-5 A}} \times \frac{\%X_{5-12 A}}{\rho_{5-12 A}} \times \frac{\%X_{12-19 A}}{\rho_{12-19 A}}} \quad (5.5)$$

Agrega özgül ağırlıkları belirlenen karışımların toplam agrega miktarlarının bulunması için özgül ağırlıklar ile agrega hacimleri çarpılarak yine her bir numune grubu için bulunur. Böylece her bir karışımda kullanılan toplam agrega miktarları karışım içinde kullanılan agrega sınıflarının oranlarıyla çarpılarak karışımlarda kullanılacak agrega sınıflarının miktarları bulunur. Bulunan bu miktarlar kuru yüzey doygun (KYD) agregalar için gerekli olan su ve çimento miktarlarıdır. Agregaların nem oranlarıyla yeniden düzenleme yaparak deneylerde kullanılacak hammadde miktarları belirlenir. Tablo 5.14'te 1 m³ beton eldesi için gerekli KYD hammadde miktarları gösterilmiştir.

XLPE oranlarına bağlı R numune grupları için 1 adet XLPE içermeyen R0, %5 XLPE içeren R1, %10 XLPE içeren R2 ve %15 XLPE içeren R3 toplam 4 adet dizayn oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılacak hammadde oranlarını gösterir reçete dizaynı Tablo 5.15'de gösterilmiştir. 1 m³ beton elde etmek için agrega nem içeriklerine göre son hali belirlenmiş miktarlardır. Hacimler dm³ cinsinden, kütleler kg cinsinden verilmiştir.

Tablo 5.14: Ön deneyler numune grupları KYD hammadde miktarları

XLPE ORANLARINA BAĞLI NUMUNE GRUPLARININ KYD HAMMADDE MİKTARLARI														
Özgül Ağırlıklar (kg/dm ³) →			1,00	-	3,15	1,18	1,06	0,001225	Hacimlerin Belirlenmesi					
XLPE/Toplam Agregası (Kütlece %)	İncelik Modülü	Amaç Basınç Dayanımı (MPa)	Su Miktarı (kg)	S/Ç	Çimento Miktarı (kg)	P.H.K. Miktarı (kg)	S.A.K. Miktarı (kg)	Hava Miktarı (kg)	Su Hacmi (dm ³)	Çimento Hacmi (dm ³)	P.H.K. Hacmi (dm ³)	H.A.K. Hacmi (dm ³)	Hava Hacmi (dm ³)	Gerekli Agregası Hacmi (dm ³)
0	4,685	37	196,7	0,46	427,5	6,968	1,283	0,01225	196,7	135,7	5,9	1,2	10	650,5
5	4,753	37	194,1	0,46	422,0	6,879	1,266	0,01225	194,1	134,0	5,8	1,2	10	654,9
10	4,821	37	191,6	0,46	416,6	6,790	1,250	0,01225	191,6	132,2	5,8	1,2	10	659,2
15	4,888	37	189,1	0,46	411,2	6,702	1,234	0,01225	189,1	130,5	5,7	1,2	10	663,5
Agregası Miktarlarının Agregası Oranlarına Göre Belirlenmesi														
Agregası Oranları (%) →		40		20	40	Agregası Karışım Özgül Ağırlığı (kg/dm ³)	Agregası Karışım Ağırlığı (kg)	Brüt Beton Ağırlığı (kg)						
Özgül Ağırlıklar (kg/dm ³) →		0,94	2,71	2,66	2,67									
XLPE/Toplam Agregası (Kütlece %)	0-5 Agregası Oranı (%)	XLPE Ağırlığı (kg)	0-5 Agregası Ağırlığı (kg)	5-12 Agregası Ağırlığı (kg)	12-19 Agregası Ağırlığı (kg)									
0	40	0,0	698,3	349,2	698,3	2,68	1745,9	2.378						
5	35	80,4	562,7	321,5	643,0	2,45	1607,6	2.232						
10	30	149,1	447,3	298,2	596,4	2,26	1491,1	2.107						
15	25	208,7	347,9	278,3	556,6	2,10	1391,4	2.000						

Tablo 5.15: R0, R1, R2 ve R3 numune grupları reçete dizaynı

XLPE/Toplam Agregası	0%			5%			10%			15%		
Numune Grubu →	R0			R1			R2			R3		
Hammaddeler ↓	Hacim (KYD) (dm³)	Kütle (kg)	Oran (%)	Hacim (KYD) (dm³)	Kütle (kg)	Oran (%)	Hacim (KYD) (dm³)	Kütle (kg)	Oran (%)	Hacim (KYD) (dm³)	Kütle (kg)	Oran (%)
0–2 mm XLPE	0,0	0,00	0,00	8,6	8,03	0,36	15,9	14,89	0,71	22,3	20,83	1,04
0–5 mm XLPE	0,0	0,00	0,00	77,3	72,28	3,24	143,3	134,00	6,37	200,5	187,48	9,39
0–5 AGREGA	257,4	699,02	29,39	207,2	562,79	25,23	164,6	447,14	21,24	128,0	347,55	17,40
5–12 AGREGA	131,2	347,64	14,62	120,7	319,88	14,34	111,9	296,50	14,08	104,4	276,56	13,85
12–19 AGREGA	261,9	692,62	29,12	241,0	637,30	28,57	223,4	590,73	28,06	208,4	550,99	27,59
ÇİMENTO	135,7	427,51	17,98	134,0	422,06	18,92	132,3	416,60	19,79	130,5	411,15	20,59
SU	196,7	203,07	8,54	194,1	200,14	8,97	191,6	197,27	9,37	189,1	194,45	9,74
H.A.K.	1,2	1,28	0,05	1,2	1,27	0,06	1,2	1,25	0,06	1,2	1,23	0,06
P.H.K.	5,9	6,97	0,29	5,8	6,88	0,31	5,8	6,79	0,32	5,7	6,70	0,34
HAVA	10,0	0,01	0,00	10,0	0,01	0,00	10,0	0,01	0,00	10,0	0,01	0,00
TOPLAM	1000,0	2378,1	-	1000,0	2230,6	-	1000,0	2105,2	-	1000,0	1997,0	-

5.2.2 R0, R1, R2, R3 Numune Grubu Deneyleri

Deneylerde beton harcı oluştururken malzemelerin karışıma eklenme sırası 5–12 agrega, 12–19 agrega, 0–5 agrega, çimento, su ile birlikte akışkanlaştırıcı katkı, priz hızlandırıcı katkı, 0–5 XLPE granül ve 0–2 XLPE granül olarak uygulanmıştır. 0–5 agrega, 0–5 XLPE granül ve çimento ilavesi yapılırken incelik miktarı diğerlerine göre nispeten düşük olan bu malzemelerin topaklanma, birikme ve benzeri sebeplerle karışım homojenliğine negatif etki oluşturmasına mümkün olduğunca engel olunmuştur. Zira bu gibi sebeplerle zaten küçük hacimli bir beton harcı oluşturulduğundan numune mukavemetlerinde istenmeyen sapmaların gözlemlenmesi olasılığı oluşur ve böyle bir durum istenmemektedir.

5.2.2.1 Çökme (Slump) Deneyi

Ön deneylerde her bir numune grubu harcı oluşturulduktan sonra küp numune kalıplarına beton doldurulması işlemi öncesi çökme deneyi uygulanmıştır. Beton harçlarının sıcaklıkları; R0 numune grubu=24 °C, R1 numune grubu=25 °C, R2 numune grubu=24 °C, R3 numune grubu=24 °C olarak ölçülmüştür.

R0, R1, R2 ve R3 numune gruplarına ait çökme değerleri Tablo 5.16’da gösterilmiştir.

Tablo 5.16: Ön deneyler (R deney grubu) çökme (slump) miktarları

Ön Deneyler Çökme Miktarları		
Numune Grubu	XLPE / Toplam Agrega (Kütlece %)	Çökme Miktarı (mm)
R0	0	160
R1	5	150
R2	10	140
R3	15	0

5.2.2.2 Basınç Dayanımı Deneyi

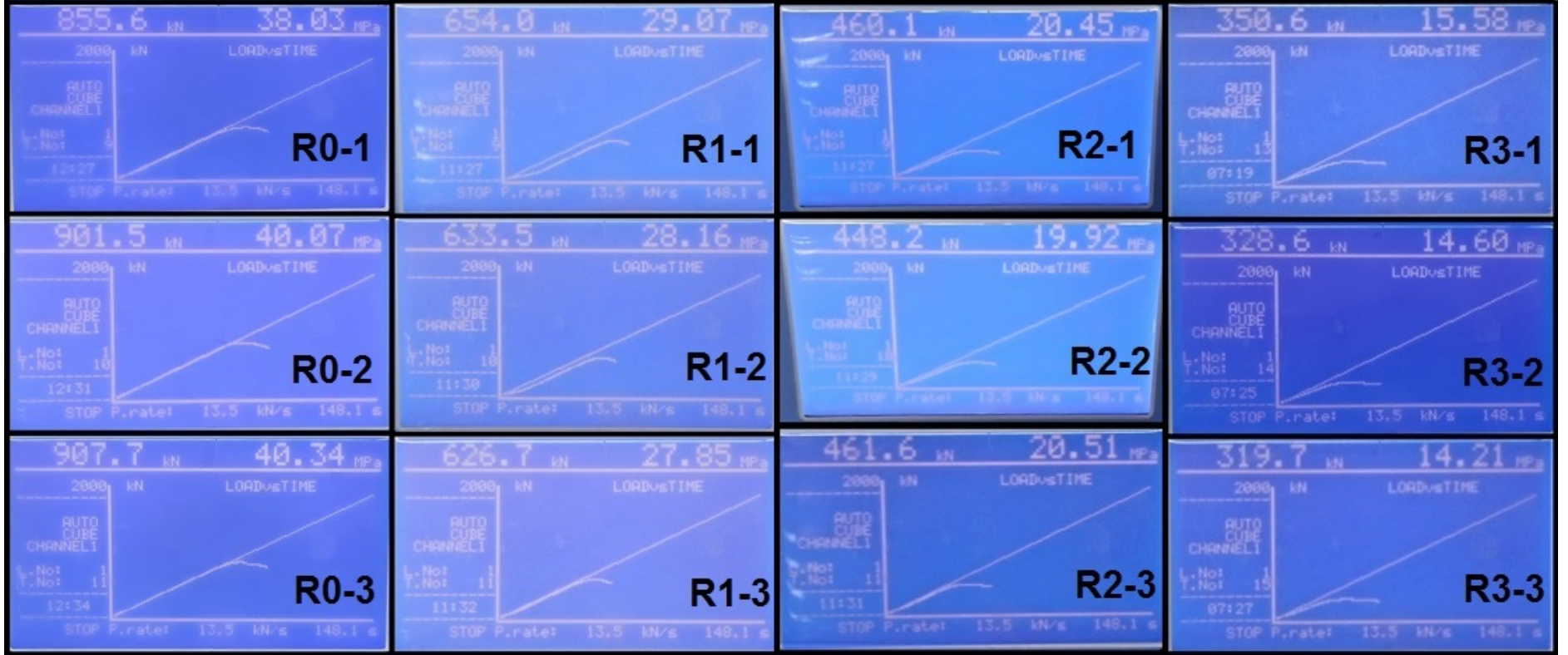
R0, R1, R2 ve R3 numune grubu çökme deneylerinden hemen sonra hazırlanan beton harçlarının, basınç dayanımı deneyleri için küp numune kalıplarına dökülmesi işlemi yapılmıştır. Önce kalıbın yarısına kadar doldurulup 25 kez şişlendikten sonra diğer yarısının ilavesi ve yine 25 kez şişleme işlemi yapıldıktan sonra plastik çekiçle kalıp kenarlarına vurmak suretiyle kalıp içerisine yerleşmesi sağlanmıştır. Kalıp yüzeylerindeki artık beton harcı mala yardımıyla düzlenerek numuneler kurumaya bırakılmıştır. 24 saat sonra kalıplardan hava yardımıyla beton küp numuneler çıkarılarak isimlendirilmiş ve kür havuzuna konmuştur.

28 gün kür havuzunda bekleyen numunelerin yüzeyi ıslak bir bezle üzerlerindeki fazla su alınacak biçimde silinmiş ve ağırlıkları tartılmıştır. R numune grubundaki numunelerin doymun ağırlıkları ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 5.17’de gösterilmiştir.

Tablo 5.17: Ön deneyler beton küp numune ağırlık ve basınç dayanımları

Ön Deneyler Ağırlık ve Basınç Dayanımı Sonuçları					
Numune Grubu	Numune	Ağırlık (kg)	Ortalama Ağırlık (kg)	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
R0 Numune Grubu	R0-1	8,154	8,130	38,03	39,48
	R0-2	8,116		40,07	
	R0-3	8,119		40,34	
R1 Numune Grubu	R1-1	7,644	7,653	29,07	28,36
	R1-2	7,632		28,16	
	R1-3	7,683		27,85	
R2 Numune Grubu	R2-1	7,142	7,117	20,45	20,30
	R2-2	7,071		19,92	
	R2-3	7,136		20,51	
R3 Numune Grubu	R3-1	6,704	6,663	15,58	14,80
	R3-2	6,610		14,60	
	R3-3	6,674		14,21	

Şekil 5.2’de R0 numune grubu, R1 numune grubu, R2 numune grubu ve R3 numune grubu beton küp numunelerinin basınç dayanımı görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 5.2: R0, R1, R2 ve R3 numune grubu beton küp numuneleri basınç dayanımları

5.3 Nihai Deneyler

Nihai deneylerde beton küp numunelerinin yanında bordür numuneleri oluşturulmuştur. %3 ve %5 XLPE granül katkılı reçeteler hazırlanarak 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler ve beton bordür numuneler hazırlanmıştır. Yine XLPE granül katkısız referans beton reçetesiyle hazırlanan beton küp ve beton bordür numuneler de kıyaslama için hazırlanmıştır. Beton küp numuneler ve beton bordür numunelerde kullanılan harçlar aynı üretim harmanından elde edilmiştir. Numuneler için gerekli beton hacmi ön deneylere göre fazla olduğundan beton harcı betoniye ile hazırlanarak numunelere yerleştirilmiştir.

Nihai deneylerde oluşturulan numunelerde ikame edilen XLPE oranları, ön deneylerde XLPE oranlarının artmasıyla basınç dayanımı değerlerinin oldukça düşmesi ve mümkün olduğunca istenen basınç dayanımı değerlerini yakalamış XLPE katkısız beton (R0 numune grubu) özelliklerinden uzaklaşmak istenmemesi sebebiyle %3 ve %5 olarak tayin edilmiştir. Toplam agrega miktarına oranla kütlece %5 XLPE ikamesiyle R0 numune grubuna göre beton küp numunelerde basınç dayanımı %28,1 oranında azalmaktadır. Her ne kadar prekast beton bordürlerde uygunluk için eğilme dayanımı değerleri referans alınsa da bordürlere eğilme kuvvetlerinin yanında bası kuvvetleri de etki etmektedir. Bu sebeple beton bordürlere gelen bası kuvvetlerini de göz ardı etmeden oranların %3 ve %5 seviyelerinde tutulması emniyetli olacaktır.

5.3.1 Bordür Betonu Reçete Uyarlama Dizaynları

R grubu numunelerin beton küp dizaynında kullanılan agregalar RU grubu numunelerin beton dizaynında da kullanıldığı için incelik modülleri aynen kullanılmıştır. Tablo 5.18'de XLPE granüllerinin ve agrega sınıflarının incelik modülleri gösterilmiştir.

Tablo 5.18: Nihai deneyler XLPE granül ve agrega sınıfları incelik modülleri

İncelik Modülleri	
XLPE Granül ve Agregası Sınıfları	İncelik Modülü
0–2 mm XLPE	1,581
0–5 mm XLPE	4,116
0–5 mm Agregası	2,506
5–12 mm Agregası	5,491
12–19 mm Agregası	6,461

RU deney grubu numunelerinin harçlarında kullanılan toplam agrega miktarına göre XLPE granül tiplerinin ve agrega sınıflarının oranları Tablo 5.19’da gösterilmiştir.

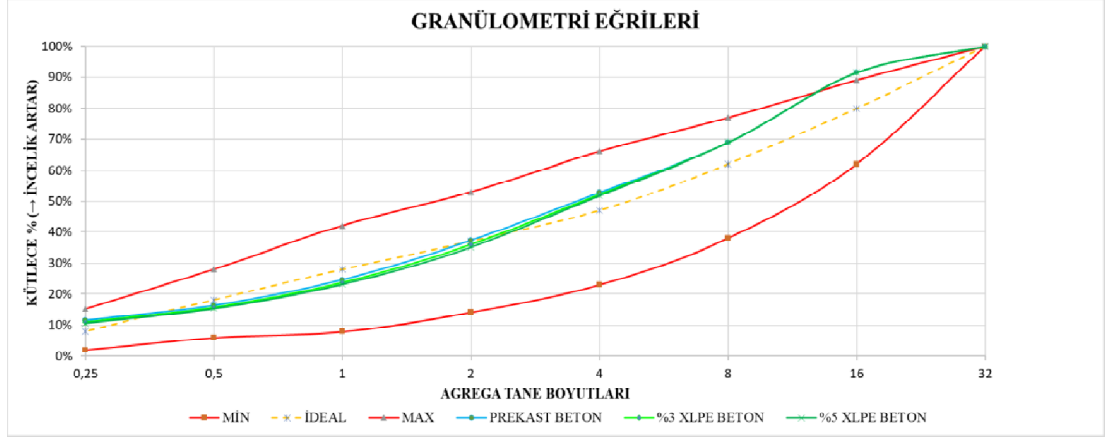
Tablo 5.19: Nihai deneyler XLPE granül ve agrega oranları

XLPE Granül ve Agregası Oranları					
RU Numune Grupları	0–2 XLPE (%)	0–5 XLPE (%)	0–5 AGREGA (%)	5–12 AGREGA (%)	12–19 AGREGA (%)
RU0 Grubu (%0 XLPE)	0,0	0,0	56,7	25,6	17,7
RU1 Grubu (%3 XLPE)	0,3	2,7	53,7	25,6	17,7
RU2 Grubu (%5 XLPE)	0,5	4,5	51,7	25,6	17,7

Tablo 5.20’de her bir numune grubu için hesaplanan incelik modülleri gösterilmiştir. Numune grubu karışımlarına ait granülometri eğrileri toplu olarak Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Kullanılan XLPE oranı arttıkça incelik azalmaktadır.

Tablo 5.20: Nihai deneyler numune grupları incelik modülleri

Numune Grubu	İncelik Modülü
RU0; Prekast Beton Agregası (%0 XLPE)	3,97
RU1; Prekast Kompozit Beton Agregası (%3 XLPE)	4,011
RU2; Prekast Kompozit Beton Agregası (%5 XLPE)	4,038



Şekil 5.3: RU0, RU1 ve RU2 numune grubu agrega granülometreleri

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi XLPE oranı arttıkça incelik modülünde artış meydana gelmektedir. Yani incelikte hafif bir azalma oluşmuştur.

Doğruluğu bilinen referans bordür betonu dizaynına göre %3 ve %5 XLPE granül içerecek biçimde reçete uyarlaması yapılmıştır. Su ve çimento miktarı sabit tutulmuş diğer oranlar 1000 dm³ beton hacmi için sabit su ve çimento miktarına göre belirlenmiştir. Uyarlama dizaynında 1 m³ beton hacminde su/çimento oranı 0,525, çimento miktarı 400 kg, su miktarı 210 kg 'dır.

Sabit çimento ve su miktarına göre uyarlanarak dizayn edilen (1 m³ beton eldesi için) beton reçetesi KYD hammadde miktarları Tablo 5.21'de gösterilmiştir.

XLPE oranlarına bağlı RU numune grupları için 1 adet XLPE içermeyen RU0, %3 XLPE içeren RU1 ve %5 XLPE içeren RU2 toplam 3 adet dizayn oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılacak hammadde oranlarını gösterir reçete dizaynı Tablo 5.22'de gösterilmiştir. 1 m³ beton elde etmek için agrega nem içeriklerine göre son hali belirlenmiş miktarlardır. Hacimler dm³ cinsinden, kütleler kg cinsinden verilmiştir.

Tablo 5.21: Nihai deneyler numune grupları KYD hammadde miktarları

XLPE ORANLARINA BAĞLI NUMUNE GRUPLARININ KYD HAMMADDE MİKTARLARI														
Özgül Ağırlıklar (kg/dm ³) →			1,00	3,15	-	1,18	1,06	0,001225	Hacimlerin Belirlenmesi					
XLPE/Toplam Agregası (Kütlece %)	İncelik Modülü	Amaç Basınç Dayanımı (MPa)	Su Miktarı (kg)	Çimento Miktarı (kg)	S/Ç	P.H.K. Miktarı (kg)	S.A.K. Miktarı (kg)	Hava Miktarı (kg)	Su Hacmi (dm ³)	Çimento Hacmi (dm ³)	P.H.K. Hacmi (dm ³)	H.A.K. Hacmi (dm ³)	Hava Hacmi (dm ³)	Gerekli Agregası Hacmi (dm ³)
0	3,970	37	210,0	400,0	0,525	6,520	1,200	0,01225	210,0	127,0	5,5	1,1	10	646,4
3	4,011	37	210,0	400,0	0,525	6,520	1,200	0,01225	210,0	127,0	5,5	1,1	10	646,4
5	4,038	37	210,0	400,0	0,525	6,520	1,200	0,01225	210,0	127,0	5,5	1,1	10	646,4
Agregası Miktarlarının Agregası Oranlarına Göre Belirlenmesi														
Agregası Oranları (%) →		56,7		25,6	17,7	Agregası Karışım Özgül Ağırlığı (kg/dm ³)	Agregası Karışım Ağırlığı (kg)	Brüt Beton Ağırlığı (kg)						
Özgül Ağırlıklar (kg/dm ³) →		0,94	2,71	2,66	2,67									
XLPE/Toplam Agregası (Kütlece %)	0-5 Agregası Oranı	XLPE Ağırlığı (kg)	0-5 Agregası Ağırlığı (kg)	5-12 Agregası Ağırlığı (kg)	12-19 Agregası Ağırlığı (kg)									
0	57%	0,0	985,8	445,8	307,0	2,69	1738,7	2.356						
3	54%	49,4	884,1	422,1	290,7	2,55	1646,3	2.264						
5	52%	79,5	822,1	407,7	280,8	2,46	1590,1	2.208						

Tablo 5.22: RU0, RU1 ve RU2 numune grupları reçete dizaynı

XLPE/Toplam Agregası	0%			3%			5%		
Numune Grubu →	RU0			RU1			RU2		
Hammaddeler ↓	Hacim (KYD) (dm³)	Kütle (kg)	Oran (%)	Hacim (KYD) (dm³)	Kütle (kg)	Oran (%)	Hacim (KYD) (dm³)	Kütle (kg)	Oran (%)
0–2 mm XLPE	0,0	0,00	0,00	5,3	4,94	0,22	8,5	7,95	0,36
0–5 mm XLPE	0,0	0,00	0,00	47,5	44,45	1,96	76,5	71,53	3,24
0–5 AGREGA	363,5	987,31	41,89	325,9	884,99	39,09	302,9	822,66	37,27
5–12 AGREGA	167,6	444,08	18,84	158,6	420,30	18,56	153,2	405,81	18,39
12–19 AGREGA	115,2	304,69	12,93	109,1	288,38	12,74	105,3	278,43	12,61
ÇİMENTO	127,0	400,00	16,97	127,0	400,00	17,67	127,0	400,00	18,12
SU	210,0	213,36	9,05	210,0	213,23	9,42	210,0	213,15	9,66
H.A.K.	1,1	1,20	0,05	1,1	1,20	0,05	1,1	1,20	0,05
P.H.K.	5,5	6,52	0,28	5,5	6,52	0,29	5,5	6,52	0,30
HAVA	10,0	0,01	0,00	10,0	0,01	0,00	10,0	0,01	0,00
TOPLAM	1000,0	2357,2	-	1000,0	2264,0	-	1000,0	2207,3	-

5.3.2 RU0, RU1, RU2 Numune Grubu Deneyleri

Bu gruptaki deney numunelerine mekanik ve fiziksel özellikleri kanıtlanmış beton bordür harcının ince agregaları yerine toplam agrega miktarının %3 ve %5 'i oranlarında XLPE granülleri eklemesi yapılarak bir beton karışım dizaynı oluşturulduğu için 'Reçete Uyarlama' anlamında 'RU' harfleri kullanılmıştır. RU0 XLPE katkısı içermeyen beton küp numuneleri ve prekast beton bordür numuneleri temsil etmektedir. RU1 grubu %3 XLPE/Toplam Agrega içeren beton karışım dizaynına sahip beton küp numuneleri ve yine aynı XLPE içerikli beton bordür numuneleri temsil etmektedir. RU2 grubu %5 XLPE/Toplam Agrega içeren beton karışım dizaynına sahip beton küp numuneleri ve yine aynı XLPE içerikli beton bordür numuneleri temsil etmektedir.

Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri için oluşturulan numunelerin hazırlanmasından önce çökme deneyi yapılmıştır. Yine her bir numune grubundan 3'er adet numune basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerinde kullanılmak için hazırlanmıştır.

Ayrıca bordürlerde istenen su emme tayini deneyi için bordürlerin 28 günlük eğilme dayanımı deneyinin yapılmasından sonra her bir bordür numunesinden 2 'şer adet ağırlığı 2,5 kg üstünde ve 5 kg altında olan toplam $9 \times 2 = 18$ adet parça numune kesilmiştir.

5.3.2.1 Çökme (Slump) Deneyi

Nihai deneylerde yine ön deneylerde olduğu gibi her bir numune grubu harcı oluşturulduktan sonra küp numune kalıplarına beton doldurulması işlemi öncesi çökme deneyi uygulanmıştır. Hazırlanan beton harçlarının sıcaklıkları; RU0 numune grubu=23 °C, RU1 numune grubu=23 °C, RU2 numune grubu=24 °C olarak ölçülmüştür.

RU0, RU1, ve RU2 numune gruplarına ait çökme değerleri Tablo 5.23'te gösterilmiştir.

Tablo 5.23: Nihai deneyler (RU deney grubu) çökme (slump) miktarları

Nihai Deneyler Çökme Miktarları		
Numune Grubu	XLPE / Toplam Agregat (Kütlece %)	Çökme Miktarı (mm)
RU0	0	220
RU1	3	210
RU2	5	190

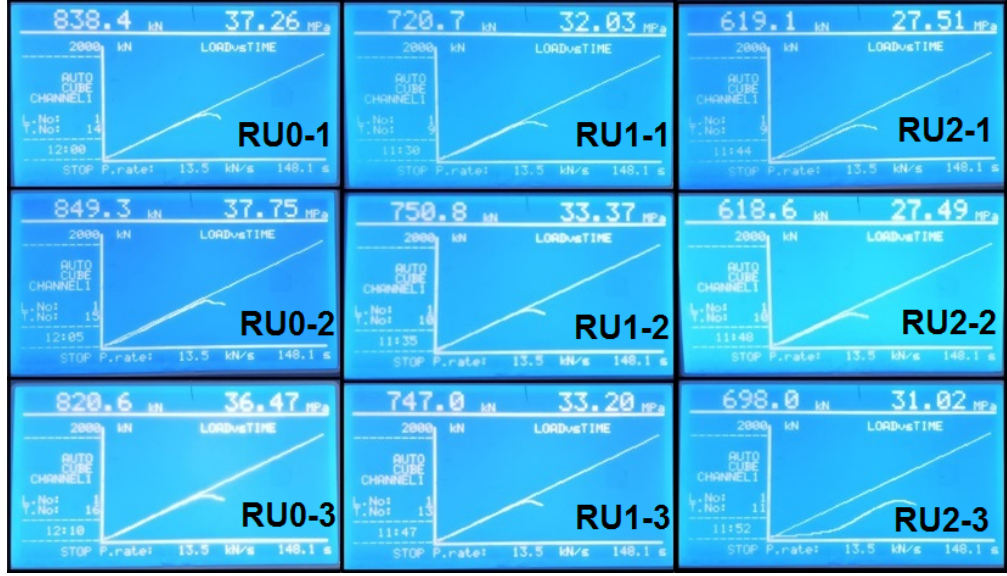
5.3.2.2 Basınç Dayanımı Deneyi

Beton bordür numunelerde kullanılacak olan beton harcı ile oluşturulan küp beton numunelere basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Deney öncesi numune oluşturma ön deneylerde uygulandığı gibi yapılmıştır ve yine ön deneylerde olduğu gibi 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. Basınç dayanımı deneyi öncesi beton küp numunelerin ağırlıkları tartılmıştır. RU0, RU1 ve RU2 numune grubu numuneler için Tablo 5.24'teki sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 5.24: Nihai deneyler beton küp numune ağırlık ve basınç dayanımları

Nihai Deneyler Ağırlık ve Basınç Dayanımı Sonuçları					
Numune Grubu	Numune	Ağırlık (kg)	Ortalama Ağırlık (kg)	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
RU0 Numune Grubu	RU0-1	7,949	7,913	37,26	37,16
	RU0-2	7,905		37,75	
	RU0-3	7,887		36,47	
RU1 Numune Grubu	RU1-1	7,605	7,586	32,03	32,87
	RU1-2	7,552		33,37	
	RU1-3	7,600		33,20	
RU2 Numune Grubu	RU2-1	7,370	7,428	27,51	28,67
	RU2-2	7,480		27,49	
	RU2-3	7,435		31,02	

Şekil 5.4'te RU0 numune grubu, RU1 numune grubu ve RU2 numune grubu beton küp numunelerinin basınç dayanımı görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 5.4: RU0, RU1 ve RU2 numune grubu beton küp numuneleri basınç dayanımları

5.3.2.3 Eğilme Dayanımı Deneyi

Beton bordürlere uygulanan deneylerde mukavemet bakımından kıstas olarak görülen eğilme dayanımının incelenebilmesi için oluşturulan beton bordür numunelere, eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Her bir bordür numune grubundan 3'er adet numune elde edilmiştir ve TS EN 1340'ta tarif edildiği gibi 3 noktalı eğilme dayanım deneyleri yapılmıştır. Eğilme dayanımı test cihazından elde edilen kırılma yükleri bölüm 3.2.4'te eğilme dayanımı kısmında bahsedilen bağıntıya bordürlerin atalet momentleri ve numune ağırlık merkezi – en dış yüzey arası mesafelerle birlikte işlenerek eğilme dayanımı değerleri bulunmuştur. Mesnetler arası mesafe her bir bordür numunesi için 480 mm olarak ayarlanmıştır. Tablo 5.25'de elde edilen kırılma yükü değerleri ve bordürlerin 28 gün kür havuzunda bekletilmesinin ardından eğilme dayanımı testi öncesi ölçülen ağırlıkları gösterilmiştir.

Tablo 5.25: Bordür ağırlıkları ve kırılma yükleri

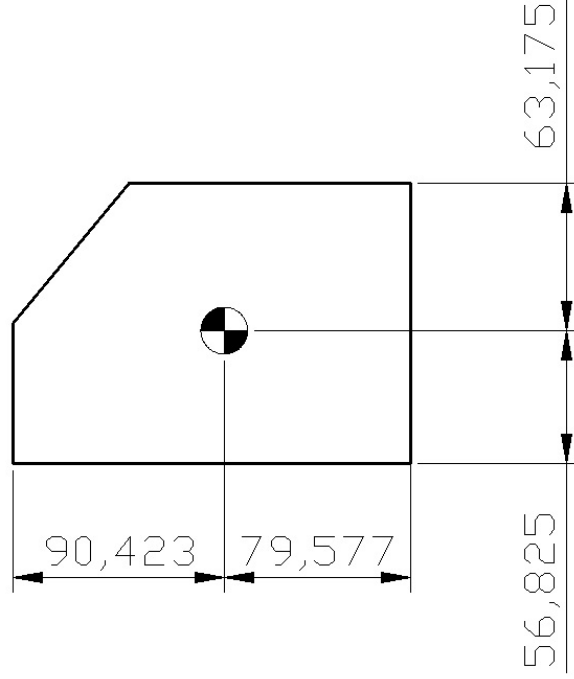
Nihai Deneyler Bordür Ağırlık ve Kırılma Yükü Değerleri				
Numune Grubu	Numune	Ağırlık (kg)	Ortalama Ağırlık (kg)	Kırılma Yükü (kN)
RU0 Numune Grubu	RU0-1	26,450	26,367	18,42
	RU0-2	26,350		21,45
	RU0-3	26,300		17,77
RU1 Numune Grubu	RU1-1	26,350	26,267	19,65
	RU1-2	25,950		19,58
	RU1-3	26,500		19,58
RU2 Numune Grubu	RU2-1	25,500	25,150	17,00
	RU2-2	25,400		18,59
	RU2-3	24,550		17,70

Numune gruplarına göre elde edilen kırılma yükleri değerleri Şekil 5.5’de gösterilmiştir (RU0 numune grubu, RU1 numune grubu ve RU2 numune grubu beton bordür numunelerinin eğilme dayanımı testi sonunda kırılma yüklerinin görüntüleri gösterilmiştir.) Ekran görüntülerinde görülen gerilme değerleri dikkate alınmamalıdır zira eğilme dayanımı değerinin hesaplanabilmesi için gerekli kesit atalet momenti ve kesit ölçüleri yaklaşık bir rakam olarak girilmiştir. Ekran görüntülerindeki grafiklerde deney sonunda kırılma yükü belirlenmiş olmasına rağmen cihaz grafiği devam ettirebilmektedir. Bu sebeple grafikler de dikkate alınmamalıdır.

Eğilme dayanımı hesabında kullanılan atalet momenti ve numune ağırlık merkezi – en dış yüzey arası mesafenin hesaplaması bordür kesitinin eğilme dayanımı test cihazında konumlandırılmasına göre belirlenir. Beton bordür numunelerinin eğilme dayanımı test cihazında konumlandırma şekline göre ağırlık merkezi mesafeleri Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Yine bu konumlandırma şekline göre atalet momenti belirlenmiştir. Belirlenen atalet momenti, bordür kesitinin ağırlık merkezinin yatay eksenine göre hesap edilmiştir.



Şekil 5.5: RU0, RU1 ve RU2 numune grubu bordür eğilme dayanımı kırılma yükleri



Şekil 5.6: Bordür kesiti ağırlık merkezi ölçüleri

Eğilme dayanımı hesabı, bordür kesiti boyutlarının nominal ölçülerine göre yapılmıştır. Ayrıca bölüm 6.2.3'te gerçek kesit ölçülerine göre eğilme dayanımı hesapları yapılmıştır ve elde edilen değerlerin, nominal ölçülere göre hesaplanan eğilme dayanım değerleriyle grafikler üzerinden kıyaslaması yapılmıştır. RU0, RU1 ve RU2 numune gruplarına göre dolayısıyla %0, %3 ve %5 XLPE granül içerikli beton bordür numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla Tablo 5.26, Tablo 5.27 ve Tablo 5.28'de gösterilmiştir.

Tablo 5.26: RU0 numune grubu eğilme dayanımları (Nominal boyut)

RU0 Numune Grubu Eğilme Dayanımı Hesabı (Nominal Ölçülere Göre)					
Tanım	Sembol	RU0-1	RU0-2	RU0-3	Birim
Kırılma Yüğü	F	18.420	21.450	17.770	N
Mesnetler Arası Mesafe	Lo	480	480	480	mm
Atalet Momenti	I	21.589.524	21.589.524	21.589.524	mm ⁴
Numune Ağırlık Merkezi ve En Dış Yüzey Arası Mesafe	y	63,175	63,175	63,175	mm
Eğilme Dayanımı	T	6,47	7,53	6,24	MPa
Ortalama Eğilme Dayanımı	T _{ort}	6,75			MPa

XLPE içermeyen referans beton bordür numunelerine ait eğilme dayanımları ortalaması 6,75 MPa olarak çıkmıştır.

Tablo 5.27: RU1 numune grubu eğilme dayanımları (Nominal boyut)

RU1 Numune Grubu Eğilme Dayanımı Hesabı (Nominal Ölçülere Göre)					
Tanım	Sembol	RU1-1	RU1-2	RU1-3	Birim
Kırılma Yüğü	F	19.650	19.580	19.580	N
Mesnetler Arası Mesafe	Lo	480	480	480	mm
Atalet Momenti	I	21.589.524	21.589.524	21.589.524	mm ⁴
Numune Ağırlık Merkezi ve En Dış Yüzey Arası Mesafe	y	63,175	63,175	63,175	mm
Eğilme Dayanımı	T	6,90	6,88	6,88	MPa
Ortalama Eğilme Dayanımı	T _{ort}	6,88			MPa

%3 XLPE içeren beton bordür numunelerine ait eğilme dayanımları ortalaması 6,88 MPa olarak çıkmıştır.

Tablo 5.28: RU2 numune grubu eğilme dayanımları (Nominal boyut)

RU2 Numune Grubu Eğilme Dayanımı Hesabı (Nominal Ölçülere Göre)					
Tanım	Sembol	RU2-1	RU2-2	RU2-3	Birim
Kırılma Yüğü	F	17.000	18.590	17.700	N
Mesnetler Arası Mesafe	Lo	480	480	480	mm
Atalet Momenti	I	21.589.524	21.589.524	21.589.524	mm ⁴
Numune Ağırlık Merkezi ve En Dış Yüzey Arası Mesafe	y	63,175	63,175	63,175	mm
Eğilme Dayanımı	T	5,97	6,53	6,22	MPa
Ortalama Eğilme Dayanımı	T _{ort}	6,24			MPa

%5 XLPE içeren beton bordür numunelerine ait eğilme dayanımları ortalaması 6,24 MPa olarak çıkmıştır.

5.3.2.4 Su Emme Tayini

RU numune grubu beton bordürlerin her birinin iki yanından yaklaşık 85 mm uzunluğunda su emme tayini deneyi için numuneler kesilmiştir. Kesilen bu

numuneler bordür kesitine sahiptir. 3 gün kür havuzunda bekletilerek su emme durumu nihayete ulaştığında numune yüzeyleri nemli bir bezle silinmiştir. Numunelerin doygun yüzey su ağırlığı 0,1 gram hassasiyetli terazide ölçülmüştür. Daha sonra etüv cihazında 3 gün 105±5 °C sıcaklıkta bekletilerek numunelerin kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Ölçülen ağırlıklar ve hesaplanan su emme yüzdeleri Tablo 5.29’da gösterilmiştir.

Tablo 5.29: Su emme oranları

Beton Bordür Numune ve Numune Gruplarına Göre Su Emme Oranları									
Numune Adı	M1 (g)	M2 (g)	Wa (%)	Numune Adı	M1 (g)	M2 (g)	Wa (%)	Ortalama Wa (%)	Grup Ortalama Wa (%)
RU0-1-A	3761,4	3560,3	5,65	RU0-1-B	3945,1	3780,5	4,35	5,00	5,16
RU0-2-A	3981,3	3808,6	4,53	RU0-2-B	3802,1	3606,0	5,44	4,99	
RU0-3-A	3851,4	3634,7	5,96	RU0-3-B	3878,6	3692,2	5,05	5,51	
RU1-1-A	3823,4	3627,5	5,40	RU1-1-B	3691,5	3492,0	5,71	5,56	5,81
RU1-2-A	3612,9	3402,3	6,19	RU1-2-B	3602,3	3382,8	6,49	6,34	
RU1-3-A	3722,3	3532,7	5,37	RU1-3-B	3728,3	3527,6	5,69	5,53	
RU2-1-A	3485,5	3264,2	6,78	RU2-1-B	3621,6	3402,8	6,43	6,60	6,38
RU2-2-A	3697,9	3474,7	6,42	RU2-2-B	3531,3	3317,4	6,45	6,44	
RU2-3-A	3552,5	3367,4	5,50	RU2-3-B	3525,4	3304,6	6,68	6,09	

%0 XLPE içerikli referans prekast beton bordür numunelerinin yani RU0 numune grubunun ortalama su emme değerleri kütlece %5,16’dır, %3 XLPE içerikli prekast beton bordür numunelerinin yani RU1 numune grubunun ortalama su emme değerleri kütlece %5,81’dir ve %5 XLPE içerikli prekast beton bordür numunelerinin yani RU2 numune grubunun ortalama su emme değerleri kütlece %6,38 olarak ölçülmüştür.

6. DENEY SONUÇLARI ve İRDELEMELER

Bu bölümde ön deneylerde elde edilen sonuçların ve nihai deneylerde elde edilen sonuçların ayrı ayrı ve birlikte irdelemesi yapılmıştır.

6.1 Ön Deneyler İrdelemesi

6.1.1 Çökme (Slump) Deneyi Sonuçları İrdelemesi

Ön deneylerde R numune grubu beton küp numunelerin oluşturulması öncesi çökme deneyleri yapılan numune gruplarına ait çökme değerleri Tablo 6.1’de tarif edilen kıvam sınıflarına göre uygun geldiği aralığa göre belirlenmiştir.

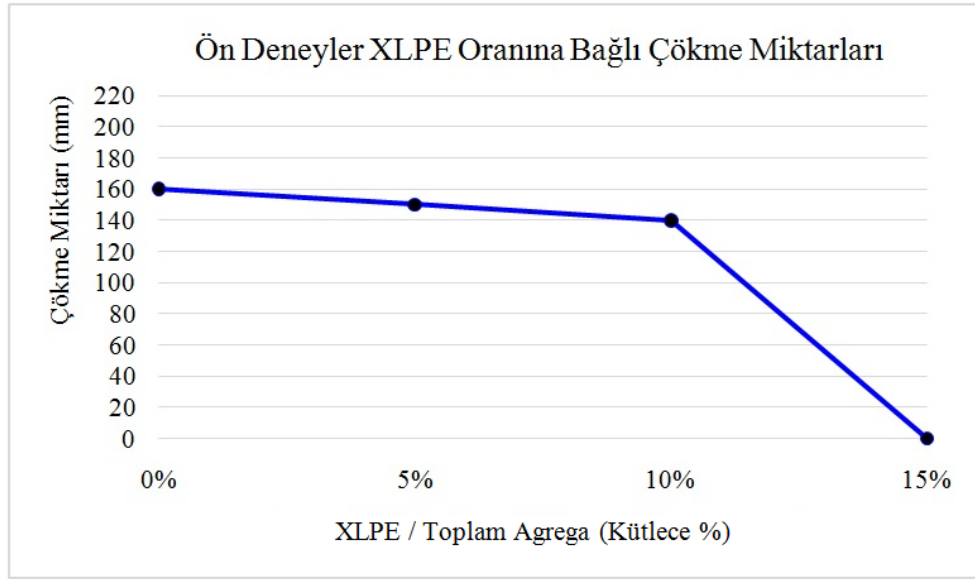
Tablo 6.1: Çökme (Slump) deneyi kıvam sınıfları (Ünsal ve Şen 2008)

Sınıf	Çökme Miktarı (mm)
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	≥ 220

Kütlece XLPE içeriklerine bağlı R numune gruplarının çökme kıvam sınıfları Tablo 6.2’de gösterilmiştir. R3 numune grubu yani %15 XLPE içerikli numunelerde kullanılan beton harcı çökme miktarı 0 olarak gözlemlenmiştir. XLPE oranının ince agrega yerine ikamesiyle çökme azalmaktadır. Hâlbuki XLPE granüllerinin ikamesiyle incelik modülünün artması ve bu sebeple su ihtiyacı miktarında teorik olarak azalma olması beklenmekteydi. Bu durumun XLPE granüllerinin yassı, konkav (iç bükey) yapısının, ikame edildiği ince agreganın yuvarlak yapısının yüzey ıslatma suyu ihtiyacından fazla olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Şekil 6.1’de XLPE oranına bağlı çökme miktarları eğilimi grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.2: Ön deneyler kıvam sınıfları

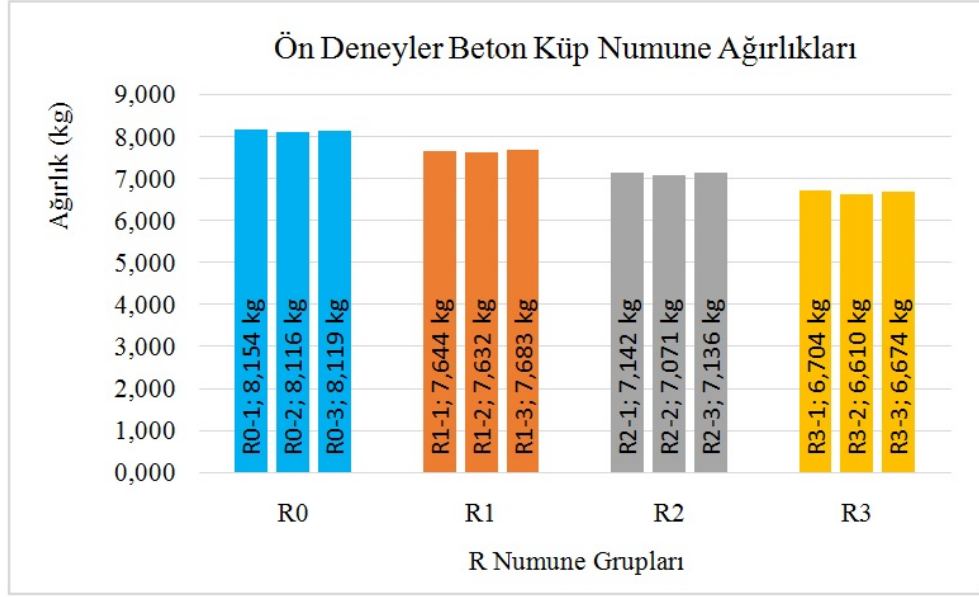
Ön Deneyler Kıvam Sınıfları			
Numune Grubu	XLPE / Toplam Agregata (Kütlece %)	Çökme Miktarı (mm)	Sınıf
R0	0	160	S4
R1	5	150	S3
R2	10	140	S3
R3	15	0	-



Şekil 6.1: Ön deneyler kütlece % XLPE oranına bağlı çökme miktarları

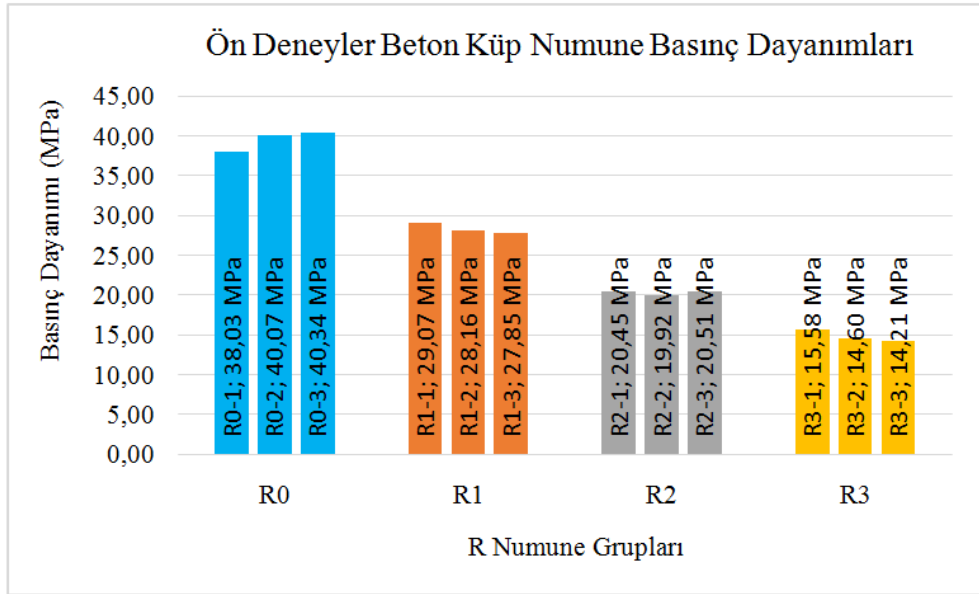
6.1.2 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları İrdelemesi

Ön deneylerde oluşturulan beton küp numunelerin ağırlıklarının değerleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir. XLPE oranı artışıyla numune ağırlıklarında düşüş gözlemlenebilmektedir.



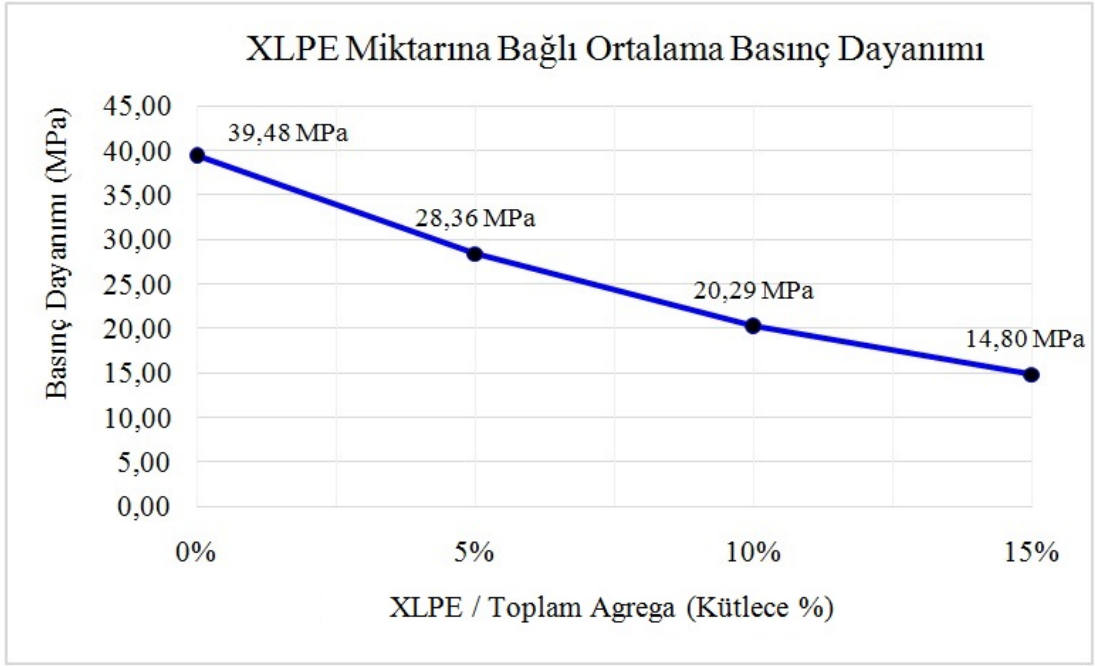
Şekil 6.2: R deney grubu numunelerin ağırlıkları

Aynı hesaplama yöntemiyle dizayn edilen XLPE içermeyen referans beton küp numunelerinin basınç dayanımı amaçlanan (37 MPa) değerlerdedir. XLPE içerikli beton küp numunelerin basınç dayanım değerleri XLPE içermeyen referans beton küp numuneye göre XLPE içeriği artmasıyla düşüş göstermektedir. Şekil 6.3'te grafik halinde değerler gösterilmiştir.



Şekil 6.3: R deney grubu numunelerin basınç dayanımları

Beton küp numunelerin XLPE içeriklerine göre ortalama basınç dayanım değerleri Şekil 6.4'te gösterilmiştir. %5, %10 ve %15 XLPE içeriği artışıyla basınç dayanımında sırasıyla yaklaşık %28,17, %48,61 ve %62,51 düşüş oluşmuştur.



Şekil 6.4: XLPE oranına bağlı R deney grubu ortalama basınç dayanımları

6.2 Nihai Deneyler İrdelemesi

Nihai deneylerde elde edilen %3 ve %5 XLPE içerikli bordür numunelerinden sırasıyla RU1 ve RU2 numune grubuna ait görüntüler Şekil 6.5’de gösterilmiştir. Yüzeylerde belirgin ve rahatsız edici durumda XLPE granüller gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.5: RU1 ve RU2 numune grubu bordür numuneleri dış görüntüleri

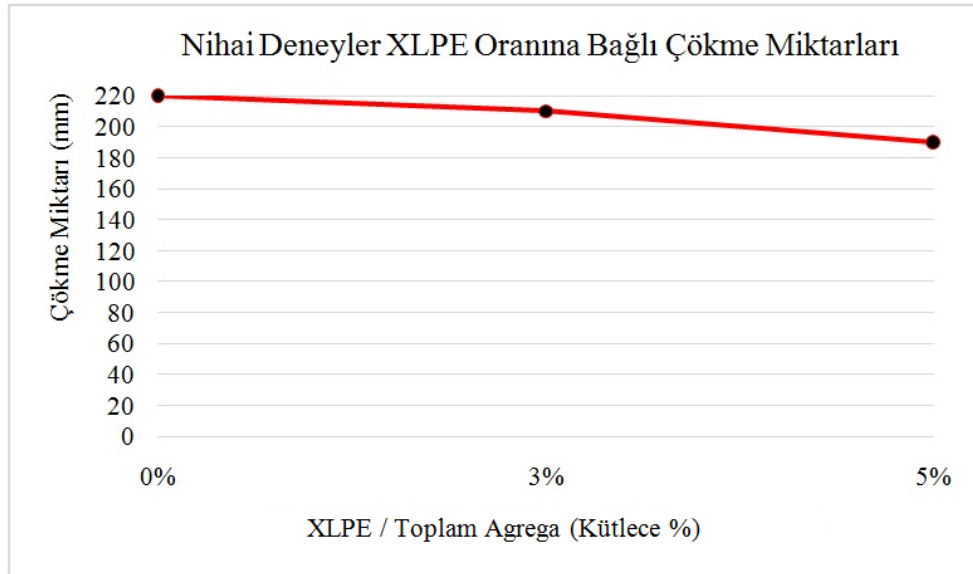
6.2.1 Çökme (Slump) Deneyi Sonuçları İrdelemesi

Nihai deneylerde RU numune grubu beton küp numunelerin ve beton bordür numunelerinin oluşturulması öncesi çökme deneyleri yapılan numune gruplarına ait çökme değerleri Tablo 6.1’de tarif edilen kıvam sınıflarına göre uygun geldiği aralığa göre belirlenmiştir.

Kütlece XLPE içeriklerine bağlı RU numune gruplarının çökme kıvam sınıfları Tablo 6.3’te gösterilmiştir. Şekil 6.6’da XLPE oranına bağlı çökme miktarları eğilimi grafik olarak gösterilmiştir. Ön deneylerde olduğu gibi nihai deneylerde sabit su ve çimento oranına göre oluşturulan numune gruplarında da XLPE oranı arttıkça çökme miktarı azalış göstermektedir. Nihai deneylerde elde edilen çökme miktarları işlenebilirlik için oldukça iyi değerlerdir.

Tablo 6.3: Nihai deneyler kıvam sınıfları

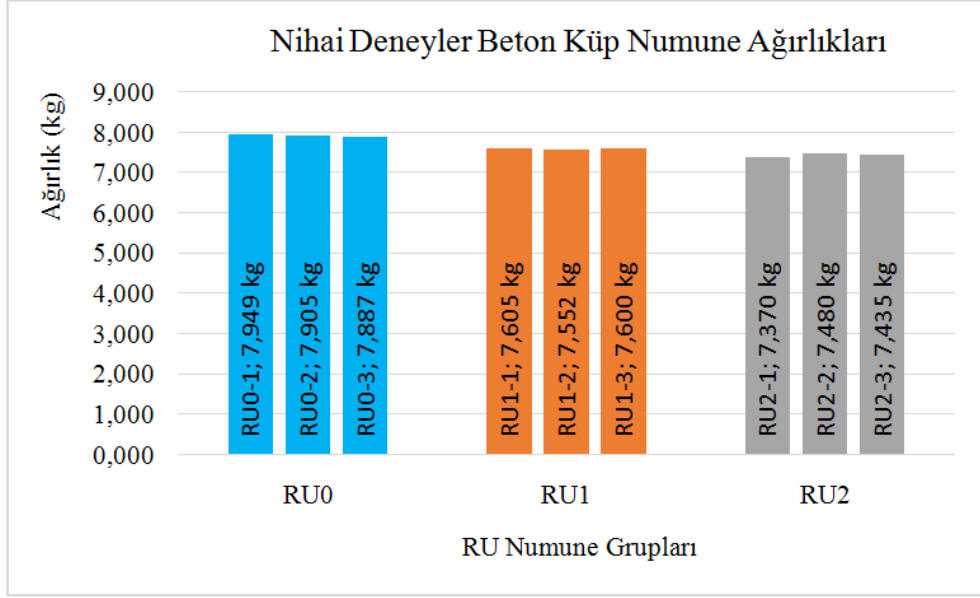
Nihai Deneyler Kıvam Sınıfları			
Numune Grubu	XLPE / Toplam Agregat (Kütlece %)	Çökme Miktarı (mm)	Sınıf
RU0	0	220	S5
RU1	3	210	S4
RU2	5	190	S4



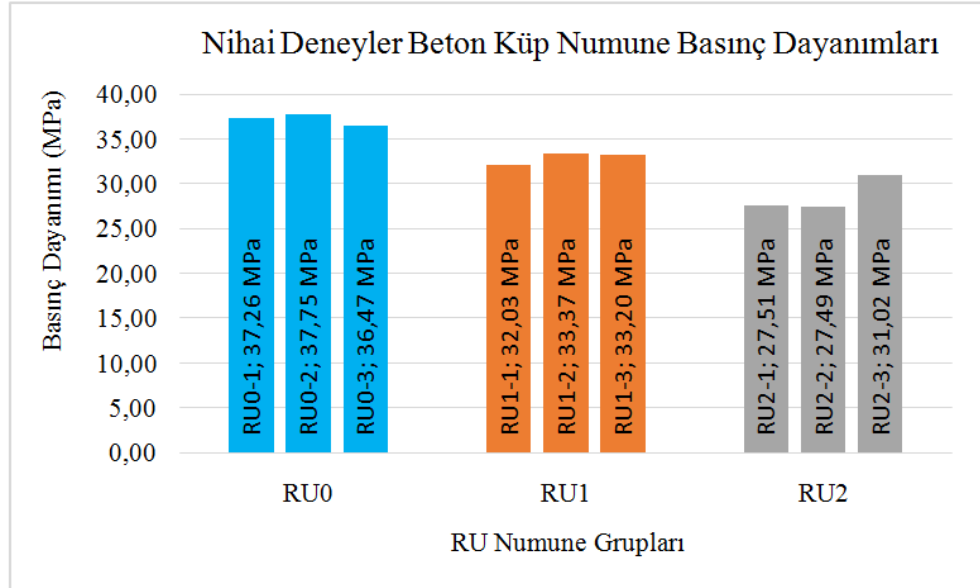
Şekil 6.6: Nihai deneyler kütlece % XLPE oranına bağlı çökme miktarları

6.2.2 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları İrdelenmesi

Nihai deneylerde beton küp numunelerden elde edilen ağırlıkların değişimi Şekil 6.7’de, basınç dayanım değerlerinin değişimi her bir numune için Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Şekil 6.9’da kütlece XLPE oranına bağlı olarak beton küp numunelerin ortalama basınç dayanımının azalış eğilimi gösterilmiştir.



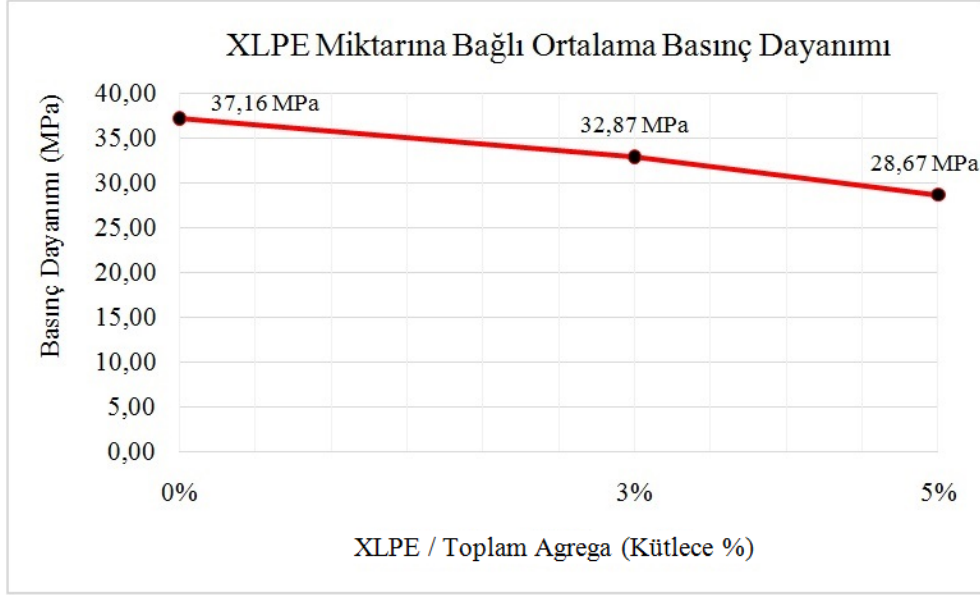
Şekil 6.7: RU deney grubu numunelerin ağırlıkları



Şekil 6.8: RU deney grubu numunelerin basınç dayanımları

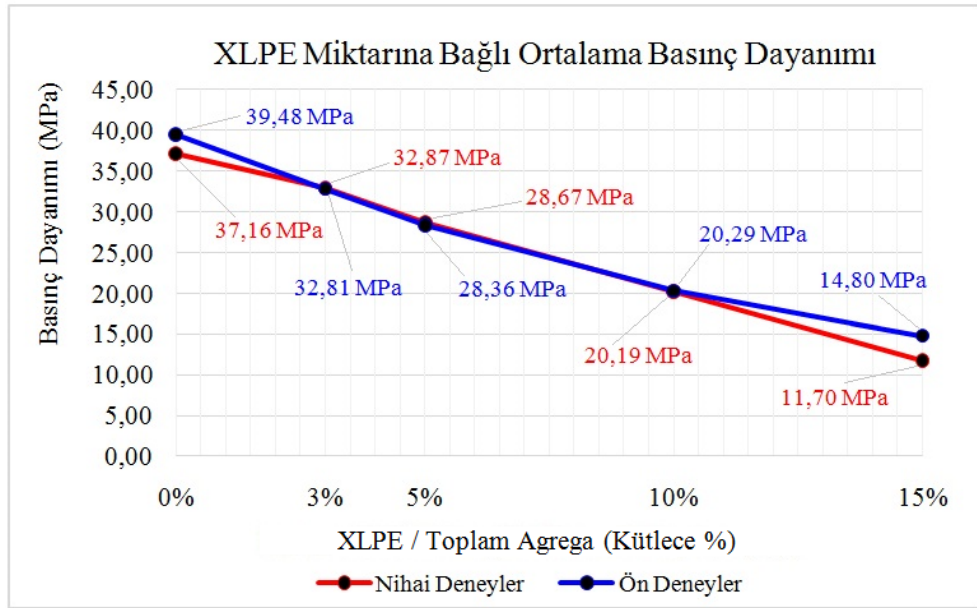
Şekil 6.9’daki grafik irdelendiğinde %3 ve %5 XLPE içeriği artışıyla XLPE içermeyen referans beton küp numune basınç dayanımına göre basınç dayanımında

sırasıyla yaklaşık %11,54 ve %22,85 düşüş oluşmuştur. Ön deneylerde, her ne kadar farklı bir reçete dizaynına sahip olsa da %5 XLPE içerikli beton küp numunelerin basınç dayanımında, XLPE içermeyen referans beton küp numune basınç dayanımına göre %28,17 bir düşüş gözlemlenmiştir.

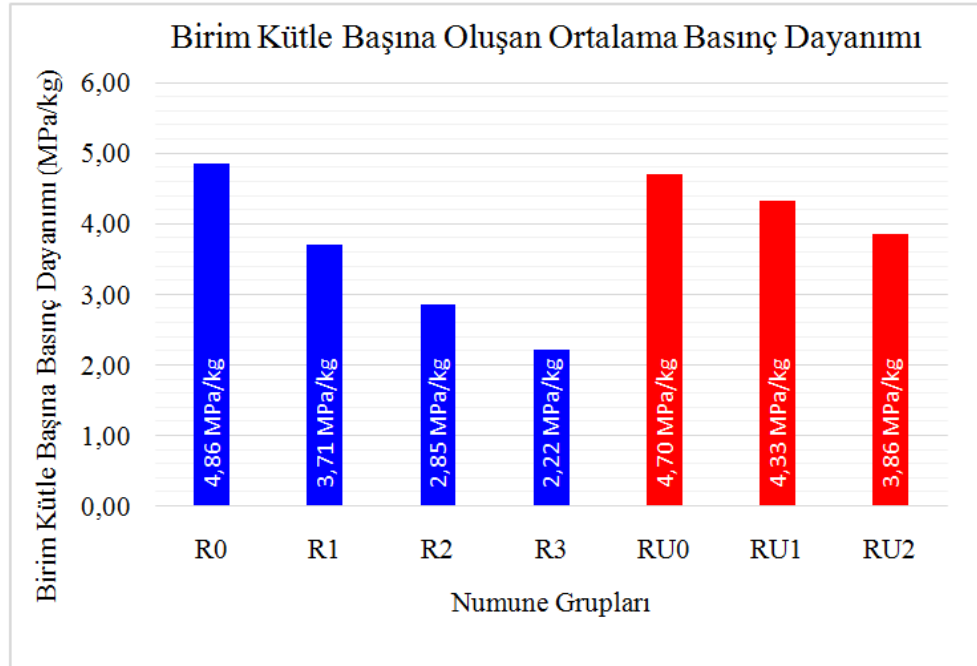


Şekil 6.9: XLPE oranına bağlı RU deney grubu ortalama basınç dayanımları

Ön deneylerde oluşturulan beton küp numuneler ile nihai deneylerde oluşturulan beton küp numunelerin basınç dayanımı değerleri ve bu iki deney grubunda irdelenmeyen aralıklardaki basınç değerleri interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemiyle belirlenerek birlikte Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Ön deneylerde oluşturulmayan %3 XLPE oranına bağlı değer interpolasyon yöntemiyle, nihai deneylerde oluşturulmayan %10 ve %15 XLPE oranına bağlı değerler ekstrapolasyon yöntemiyle elde edilmiştir. Her iki deney çalışmasında elde sonuçlara göre XLPE oranına bağlı basınç dayanımı azalışındaki eğilim görülebilmektedir. Beton dizaynında amaçlanan (istenen) basınç dayanımı olan 37 MPa değerinden XLPE oranı arttıkça uzaklaşmaktadır. Kütlece %15 XLPE eklenmesiyle basınç dayanımında %60 mertebelerinde bir düşüş söz konusudur. Her iki deney grubunda Şekil 6.10'da görüldüğü üzere XLPE içeriksiz beton dizaynları istenen C30/37 beton sınıfı özelliğini yakalayabilmiştir fakat XLPE ikamesiyle basınç dayanımı düşmektedir.



Şekil 6.10: XLPE oranına bağlı R ve RU deney grupları ortalama basınç dayanımları

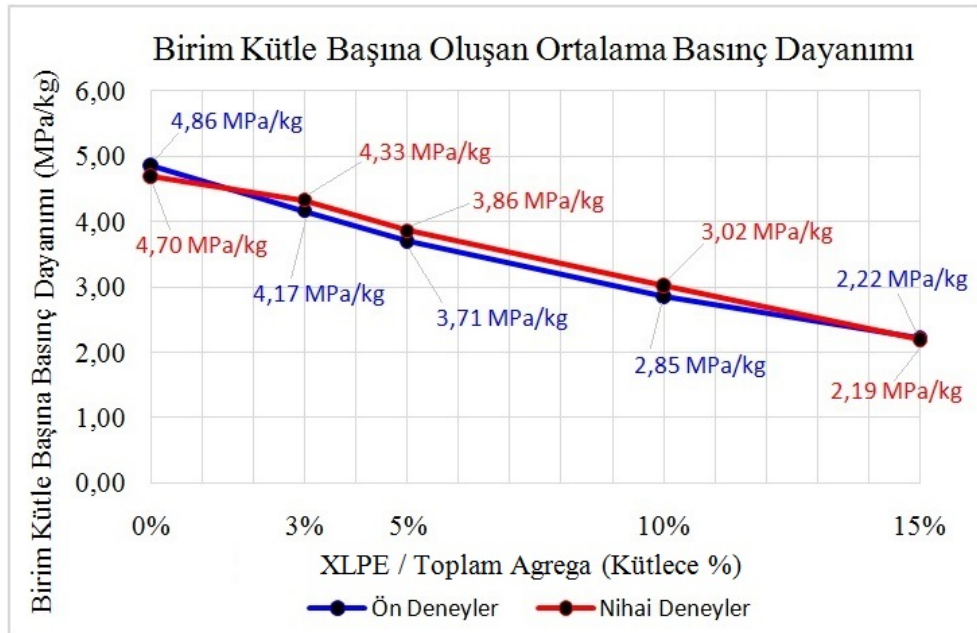


Şekil 6.11: Tüm numune gruplarında birim kütle başına ortalama basınç dayanımları

Şekil 6.11 grafiğinden de anlaşılacağı üzere ön deneylerde tasarım yapılan XLPE granül içermeyen R0 numune grubu beton küp numunelerin birim kütle başına oluşturduğu basınç dayanımı (4,86 MPa/kg), uyarılama yapılan RU0 numune grubu XLPE granül içermeyen beton küp numunelerin birim kütle başına basınç dayanımından (4,70 MPa/kg) daha iyi sonuç vermiştir. Fakat ön deneylerde kütlece %5 XLPE granül/Toplam Agregat içeren R1 numune grubunun birim kütle başına oluşturduğu basınç dayanımı (3,71 MPa/kg), nihai deneylerde kütlece %5 XLPE

granül/Toplam Agregaya içeren uyarlama yapılan RU2 numune grubunun oluşturduğu birim kütle başına basınç dayanımından (3,86 MPa/kg) daha az çıkmıştır.

Her ne kadar ön deneylerde oluşturulan beton karışım reçetesi ve nihai deneylerde uyarlanarak oluşturulan beton karışım reçetesi ile oluşturulan beton küp numuneler farklı hammadde karışımlarına sahip olsalar da ön deneyler için elde edilmemiş kütlece %3 XLPE granül/Toplam Agregaya içeriğine ait birim kütle başına oluşan basınç dayanımı interpolasyon ile 4,17 MPa/kg ve nihai deneylerde elde edilmemiş kütlece %10 ve %15 XLPE granül/Toplam Agregaya içeriği ekstrapolasyon ile sırasıyla 3,02 MPa/kg ve 2,19 MPa/kg olarak bulunmuştur ve Şekil 6.12'deki grafikte farklı dizayn reçeteleriyle tasarlanan ön ve nihai deney numunelerine ait yapısal verimliliği ifade eden birim kütle başına düşen ortalama basınç dayanımları kıyaslaması gösterilmiştir.

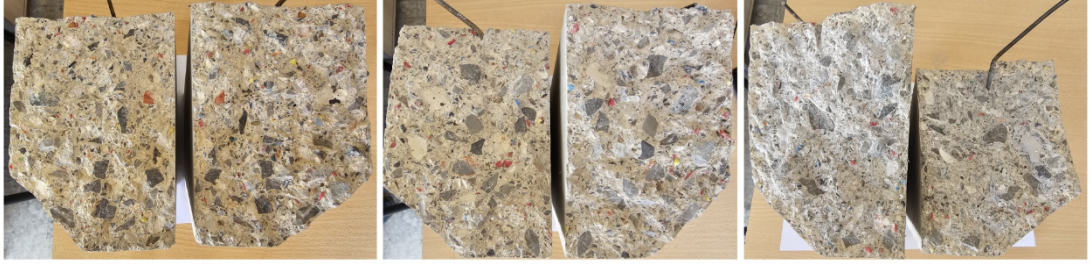


Şekil 6.12: XLPE oranına bağlı R ve RU deney grupları birim kütle başına ortalama basınç dayanımları

6.2.3 Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları İrdelenmesi

Eğilme dayanımı deneyleri sonunda XLPE içerikli prekast kompozit beton bordürlerin kırılma kesitleri incelendiğinde XLPE sebebiyle beton dokusu içinde gözle görülür boşluklar oluştuğu söylenemez hâlbuki agregalara göre daha yassı yapıda olan XLPE granülleri beton dolgusunda hafifliği ve yassılığı sebebiyle beton

dokusuyla birleşmede sorunlar teşkil edebilirdi. Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'daki kesit görüntülerine bakıldığında beton yapısı içindeki XLPE granülleri ve beton içindeki dağılımları gözlemlenebilir. Dikkat edilecek olursa eğilme kırılmalarının doğal agregaların yüzeyinden değil ama XLPE granüllerinin yüzeyinden olduğu gözlemlenebilir. Kırık bordür çiftlerine bakıldığında özellikle 12–19 mm boyutlu agregaların üzerinden kırılmaların geçtiği ve kırık kesitlerin birbirinin neredeyse simetriği olduğu söylenebilir.

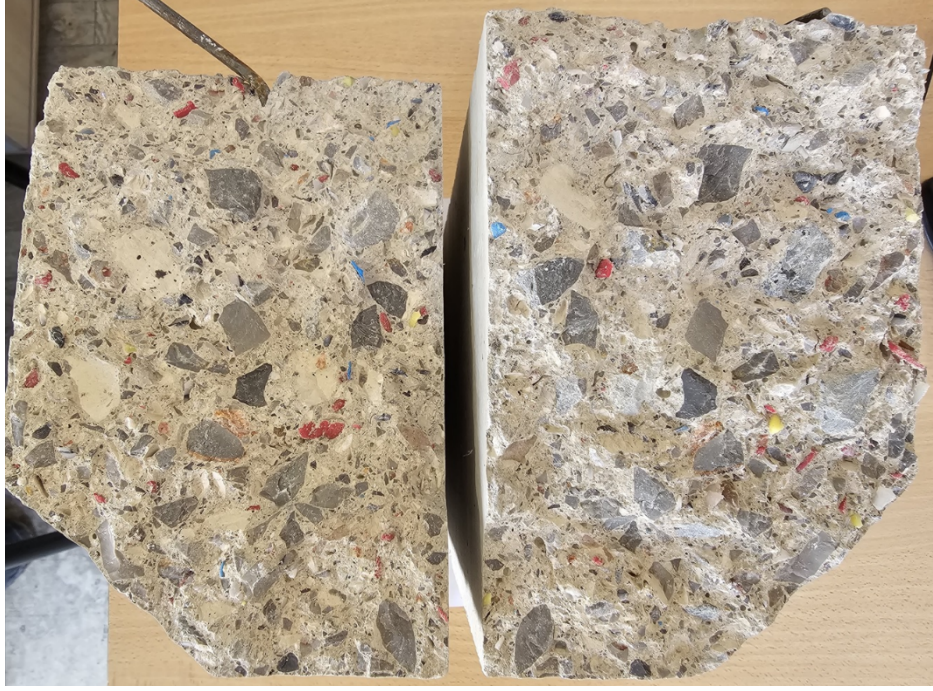


Şekil 6.13: RU1 grubu bordür numuneleri kırılma kesiti görüntüleri



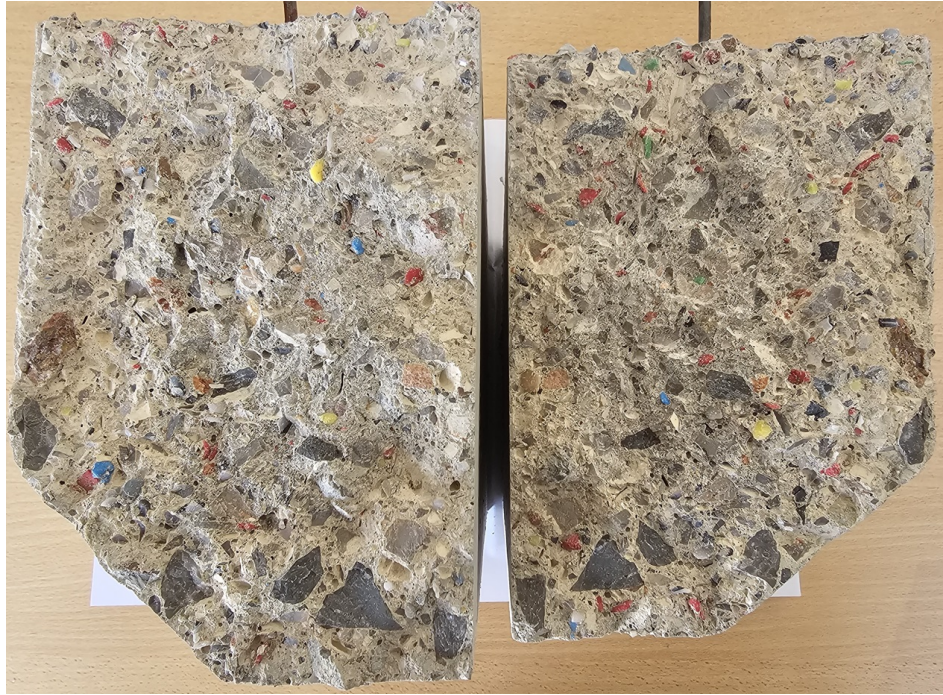
Şekil 6.14: RU2 grubu bordür numuneleri kırılma kesiti görüntüleri

Eğer dış yüzeyde belirgin XLPE granülleri gözlemlenseydi yüzeylerde beton bileşenlerinden (agrega ince agregası, kum, çimento) hariç bir malzeme olması sebebiyle yüzey aşınma durumu incelemesine ihtiyaç duyulması gerekebilirdi. Tüm numunelerde yüzeylerde belirgin XLPE granülleri görünmemektedir ve uygulama açısından kabul edilebilir görünümündedir.



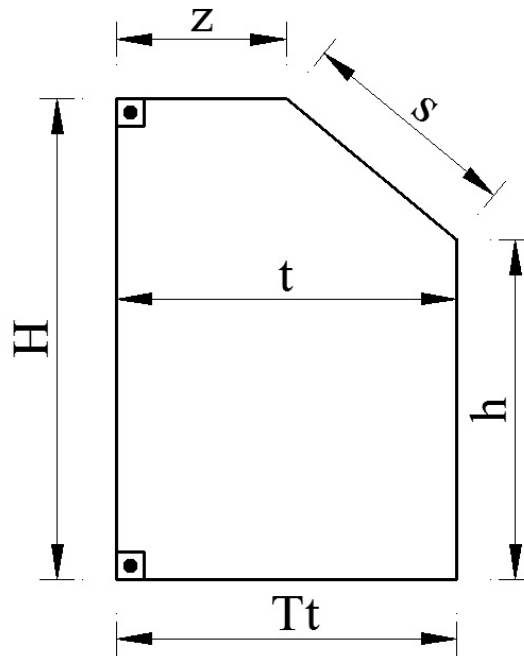
Şekil 6.15: RU1-2 bordür numunesi kırılma kesiti görüntüsü

Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’da beton kesitinde kırmızı, mavi ve sarı renkli XLPE granülleri belirgin bir biçimde görülmektedir. Beyaz ve gri renkli XLPE granülleri resimlerde seçilememektedir. Eğilme durumundaki kırılmada XLPE granüllerinin soyulduğu ve görüntülerde tek bir kırılma kesitinde bulunması sebebiyle beton harcına diğer agregalar kadar iyi tutunamadığı söylenebilir.



Şekil 6.16: RU2-3 bordür numunesi kırılma kesiti görüntüsü

Bordürlerin üretim sürecinde, gerek kalıp yapısından gerek üretim esnasındaki beton harcının akıcılığı sebebiyle bordür kesitlerinde yapısal farklılıklar oluşabilmektedir. Bu sebeple her bordür kesitinin hassas bir biçimde birbirine benzemesi beklenemez. Bordürlerin priz alma sürecinde ve kuruma esnasındaki su kaybı da bordür kesitlerinde boyutsal farklılığa sebebiyet verebilmektedir. Şekil 6.17’de bordür kesitlerinde gerek kalıp yapısı gerek büzülme sebebiyle oluşan değişken ölçüleri gösterir şematik resim görülmektedir. Boyutsal farklılık gösteren yüzeyler harf ile ifade edilmiştir. Ayrıca bordürler kalıptan çıkarılabilmesi için üretim esnasında Şekil 6.17’de gösterilen duruşunun yatay eksenden ters çevrilmiş durumuna göre konumlandırılmaktadır. Tt ölçüsü ile gösterilen bordür tabanında herhangi bir kalıp düzlemi olmadığı için beton harcı cebri davranışı ve mala ile düzeltme işlemiyle çokta hassas ölçülerde olmayan bir yüzey elde edilir. Bu yüzey her ne kadar mala ile düzeltme işlemine tabi tutulsa da agregaların yüzeyde belirginleştiği görülebilir. Özellikle bu yüzeydeki düzgün olmayan beton formu H ölçüsü değerinin tayini zorlaştırır. Bilindiği üzere betonarme işlemlerinde tolerans santimetre ile ifade edilir ve bu yüzey sebebiyle oluşan ölçü alma zorluğundan ötürü H ölçüsü 1–2 santimetre toleranslarına ulaşabilmektedir.



Şekil 6.17: Bordür kesitinde yapısal değişken ölçüler

Bu sebeple nominal ölçülere göre hesap edilen bordür eğilme dayanımını bir de gerçek ölçülere göre hesap etmekte fayda vardır. Bu sebeple beton bordür numuneler, üzerinden ölçüler alınmıştır ve Tablo 6.4'te gösterilmiştir.

Tablo 6.4: Bordür numuneleri kesit gerçek boyutları

Numune Grubu	Taban	Yükseklik	Ön Yüz Yükseklik	Orta Genişlik	Tepe	Bordür Uzunluğu	Kesit Alanı
	Tt (mm)	H (mm)	h (mm)	t (mm)	z (mm)	L (mm)	A (mm ²)
RU0-1	123,8	170,1	114,3	120,6	58,4	600	18.961
RU0-2	123,8	169,5	113,0	120,2	58,7	600	18.846
RU0-3	123,5	170,4	114,0	120,5	57,5	600	18.927
RU1-1	123,8	170,3	114,6	121,7	57,3	600	19.052
RU1-2	122,5	171,2	115,2	120,2	58,0	600	18.969
RU1-3	125,6	170,5	115,0	120,5	57,1	600	19.079
RU2-1	121,5	171,8	114,0	119,5	57,9	600	18.610
RU2-2	125,7	171,3	113,9	121,2	57,2	600	19.181
RU2-3	119,9	170,3	113,9	118,6	57,5	600	18.548

Alınan ölçülere göre CAD programında bordür kesitlerinin alanları ve atalet momentleri hesaplanmıştır ve yeniden bir eğilme dayanımı hesabı yapılmıştır. RU numune gruplarına ait eğilme dayanımları Tablo 6.5, Tablo 6.6 ve Tablo 6.7'de gösterilmiştir.

Tablo 6.5: RU0 numune grubu eğilme dayanımları (Gerçek boyut)

RU0 Numune Grubu Eğilme Dayanımı Hesabı (Gerçek Ölçülere Göre)					
Tanım	Sembol	RU0-1	RU0-2	RU0-3	Birim
Kırılma Yüğü	F	18.420	21.450	17.770	N
Mesnetler Arası Mesafe	Lo	480	480	480	mm
Atalet Momenti	I	22.288.688	22.041.604	22.172.976	mm ⁴
Numune Ağırlık Merkezi ve En Dış Yüzey Arası Mesafe	y	66,529	66,691	66,381	mm
Eğilme Dayanımı	T	6,60	7,79	6,38	MPa
Ortalama Eğilme Dayanımı	T _{ort}	6,92			MPa

XLPE içermeyen referans beton bordür numunelerine ait eğilme dayanımları ortalaması 6,92 MPa olarak çıkmıştır.

Tablo 6.6: RU1 numune grubu eğilme dayanımları (Gerçek boyut)

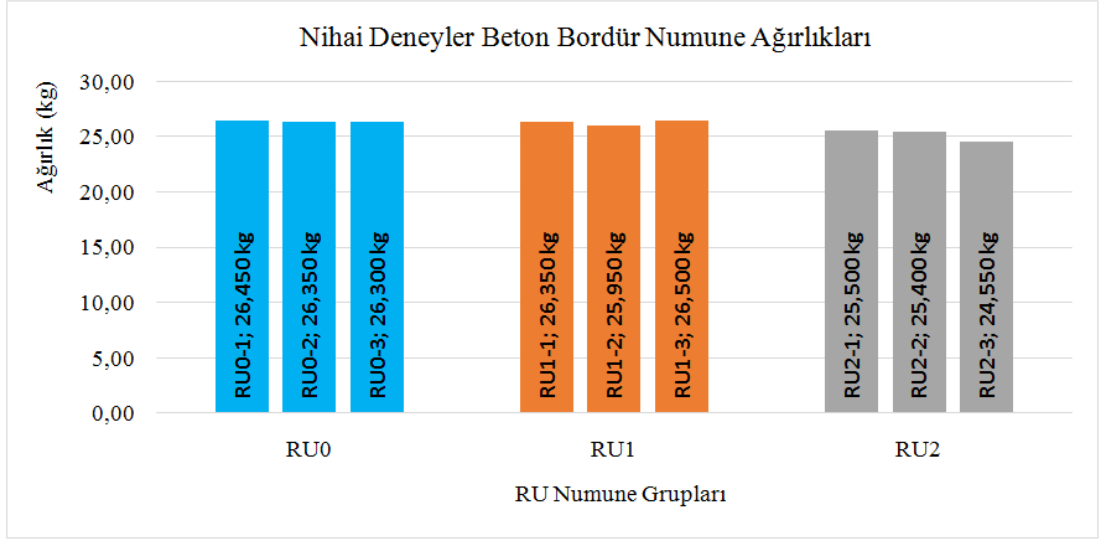
RU1 Numune Grubu Eğilme Dayanımı Hesabı (Gerçek Ölçülere Göre)					
Tanım	Sembol	RU1-1	RU1-2	RU1-3	Birim
Kırılma Yüğü	F	19.650	19.580	19.580	N
Mesnetler Arası Mesafe	Lo	480	480	480	mm
Atalet Momenti	I	22.631.206	22.000.713	22.766.628	mm ⁴
Numune Ağırlık Merkezi ve En Dış Yüzey Arası Mesafe	y	66,269	65,589	68,005	mm
Eğilme Dayanımı	T	6,90	7,00	7,02	MPa
Ortalama Eğilme Dayanımı	T _{ort}	6,98			MPa

%3 XLPE içeren beton bordür numunelerine ait eğilme dayanımları ortalaması 6,98 MPa olarak çıkmıştır.

Tablo 6.7: RU2 numune grubu eğilme dayanımları (Gerçek boyut)

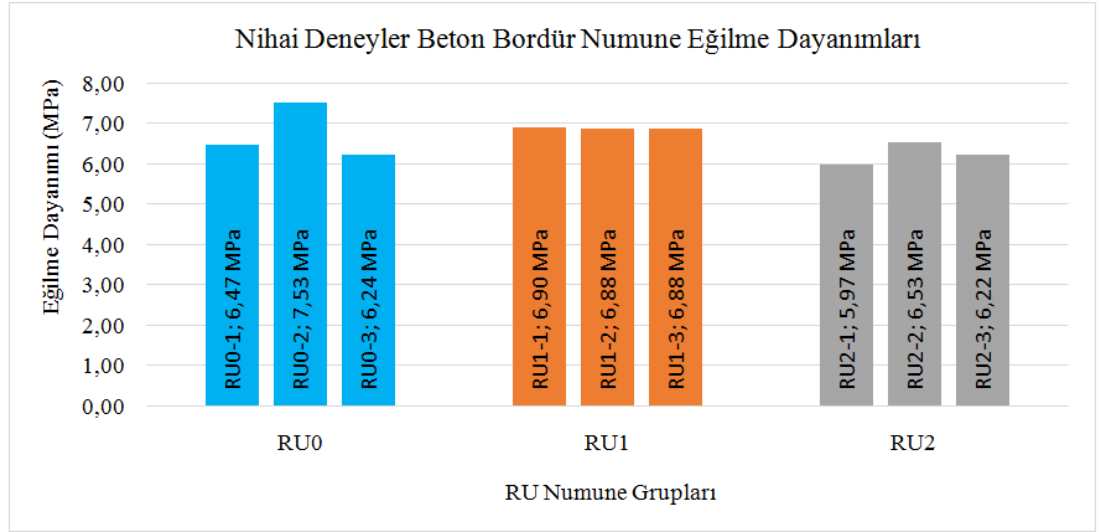
RU2 Numune Grubu Eğilme Dayanımı Hesabı (Gerçek Ölçülere Göre)					
Tanım	Sembol	RU2-1	RU2-2	RU2-3	Birim
Kırılma Yüğü	F	17.000	18.590	17.700	N
Mesnetler Arası Mesafe	Lo	480	480	480	mm
Atalet Momenti	I	20.685.780	22.988.422	20.758.236	mm ⁴
Numune Ağırlık Merkezi ve En Dış Yüzey Arası Mesafe	y	65,844	68,031	63,98	mm
Eğilme Dayanımı	T	6,49	6,60	6,55	MPa
Ortalama Eğilme Dayanımı	T _{ort}	6,55			MPa

%5 XLPE içeren beton bordür numunelerine ait eğilme dayanımları ortalaması 6,55 MPa olarak çıkmıştır. Şekil 6.18'de bordür numunelerinin ağırlıklarını gösterir grafik gösterilmiştir. XLPE içeriği artışına bağlı olarak bordür ağırlıklarına bir azalma olduğu söylenebilir fakat bordür numunelerin her birinde aynı boyutları sağlamanın pek mümkün olmamasından ve üretim esnasında beton harcının yapısı gereği her yerinde aynı özellikleri gösterememesinden dolayı yaklaşık 1 kg civarında bir oynama söz konusudur.



Şekil 6.18: Bordür numuneleri ağırlıkları

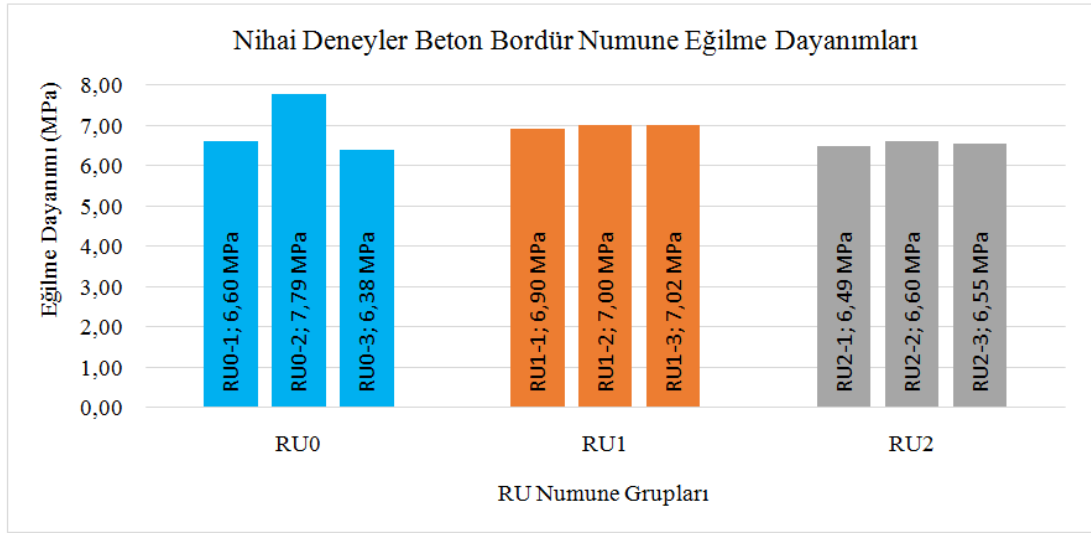
Nominal ölçülere göre bordür numunelerinin eğilme dayanımlarını gösterir grafik Şekil 6.19’da gösterilmiştir.



Şekil 6.19: Nominal ölçülere göre eğilme dayanımları

Şekil 6.21’de nominal ölçülere göre hesap edilmiş bordür numunelerinin XLPE içeriği oranına bağlı eğilme dayanımları ortalaması görülmektedir. RU0 numune grubu yani %0 XLPE içerikli bordür numunelerde ortalama eğilme dayanımı 6,75 MPa’dır. %3 XLPE içeren RU1 numune grubu bordürlerin eğilme dayanımı ortalaması 6,88 MPa’dır ve %5 XLPE içeren RU2 numune grubu bordürlerin eğilme dayanımı ortalaması 6,24 MPa’dır. %3 XLPE içeren bordür numunelerinin ortalama eğilme dayanımları diğer numune gruplarına ortalama eğilme dayanımlarına göre daha iyi sonuçlar göstermiştir.

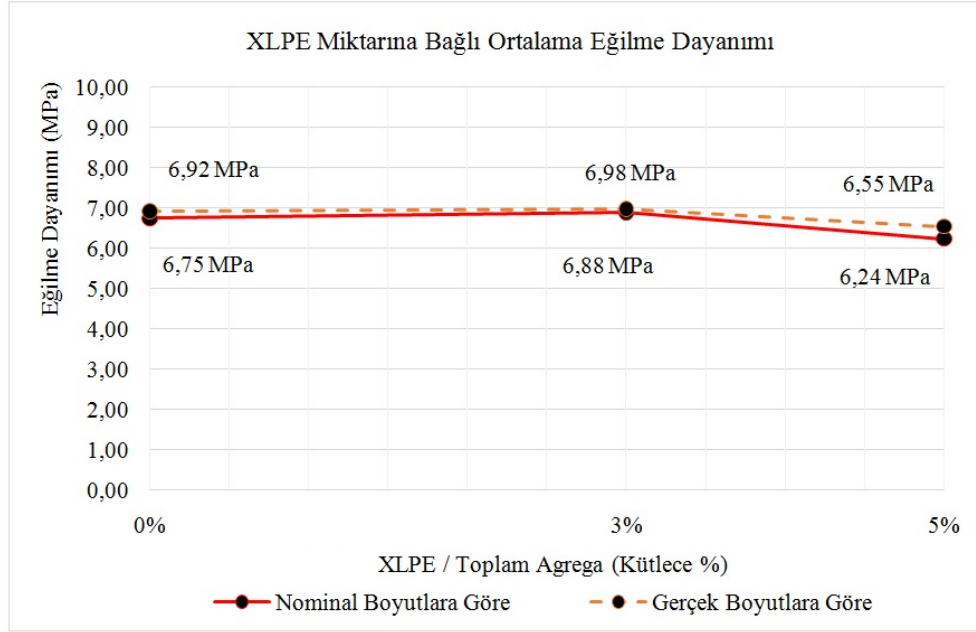
Tablo 6.5, Tablo 6.6 ve Tablo 6.7’de gerçek ölçülere göre hesap edilen bordür numunelerine ait eğilme dayanımları Şekil 6.20’de gösterilmiştir.



Şekil 6.20: Gerçek ölçülere göre eğilme dayanımları

Şekil 6.21’de gerçek ölçülere göre hesap edilmiş bordür numunelerinin XLPE içeriği oranına bağlı eğilme dayanımları ortalaması görülmektedir. RU0 numune grubu yani %0 XLPE içerikli bordür numunelerde ortalama eğilme dayanımı 6,92 MPa’dır. %3 XLPE içeren RU1 numune grubu bordürlerin eğilme dayanımı ortalaması 6,98 MPa’dır ve %5 XLPE içeren RU2 numune grubu bordürlerin eğilme dayanımı ortalaması 6,55 MPa’dır. Gerçek boyutlara göre hesaplama yapıldığında yine %3 XLPE içeren bordür numunelerinin eğilme dayanımları diğer numune gruplarına göre daha iyi sonuçlar göstermiştir.

Nominal ölçülere göre de gerçek ölçülere göre de eğilme dayanımı hesaplamasında %3 ve %5 XLPE içeren bordür numuneler 6 MPa değerinin üzerinde dayanım göstermiştir. Genel olarak hiçbir bordür numunesinin en küçük eğilme dayanımının 4,8 MPa değerinin altına düşmediği ve hiçbir bordür numune grubunun karakteristik eğilme dayanımının (ortalama eğilme dayanımının) 6 MPa değerinin altına düşmediği gözlemlenmiştir. Böylece %3 ve %5 XLPE içerikli prekast kompozit beton bordürler, referans prekast beton bordür eğilme dayanımı sınıfını sağlamıştır. Toplam agrega kütlelerine oranla, kütlece %5 XLPE içerikli beton harcıyla oluşturulan prekast kompozit beton bordürler TS EN 1340 standardına göre 3. sınıf ve ‘U’ harfi ile işaretlemeye uygun olduğu görülmüştür.

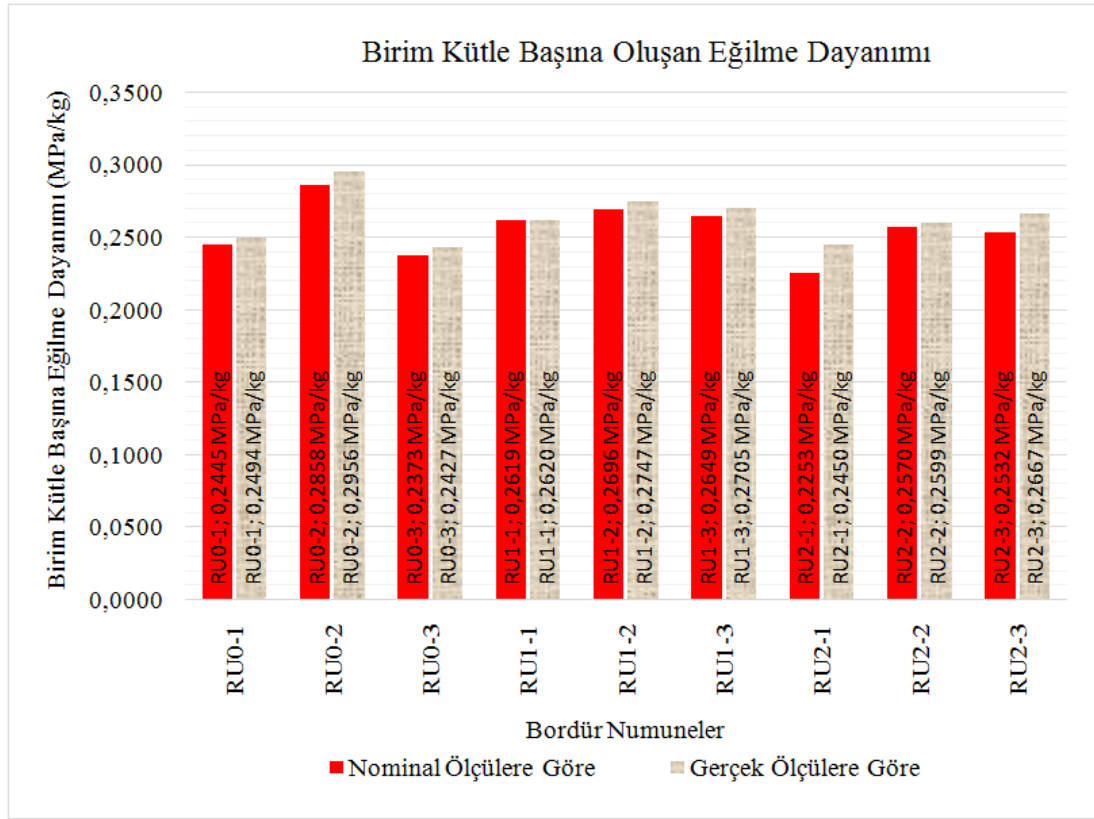


Şekil 6.21: XLPE oranlarına bağlı nominal ve gerçek ölçülere göre ortalama eğilme dayanımları

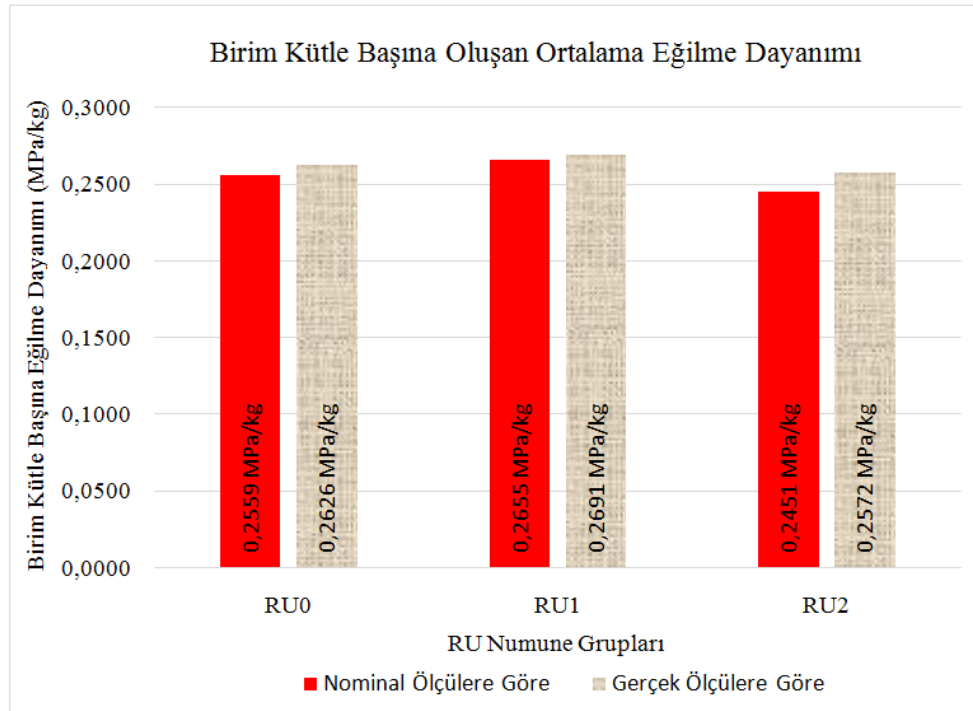
Şekil 6.21’de gerçek ve nominal ölçülere göre hesaplama yapılmış eğilme dayanımlarının XLPE oranına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Bordür betonun üzerinden tüm kesit boyunca hassas ölçü almanın yeterince mümkün olmadığını düşünürsek ki buna sebebiyet olacak unsur kalıp saclarının kalıp gövdesine kaynağı esnasında çarpılması olarak düşünülebilir. Bu sebeple %0 ila %5 XLPE içeren bordür betonuyla üretilmiş bir bordürün grafikten de anlaşılacağı üzere 6,2 MPa ve 6,5 MPa aralığında bir aralıkta eğilme mukavemeti değerlerini yakalayabileceği anlaşılmaktadır. Genel itibariyle bu aralıkta %0 ila %5 XLPE içeren bordür numunelerin eğilme dayanımları, kesit ölçülerinin çok hassas belirlenememesi ve bordür betonu içinde boşluk gibi davranabilen XLPE granüllerinin bordür betonu içindeki dağılımında farklılık göstermesi sebebiyle 0,3 MPa civarında oynama gösterdiği düşünülebilir. Bu da ister nominal ölçülere göre hesap edilmiş olsun ister gerçek ölçülere göre hesap edilmiş olsun bordür betonunda %5 oranına kadar XLPE granül katkılı beton kullanılabileceğini göstermektedir.

Ayrıca beton küp numunelerde olduğu gibi beton bordür numunelerde de birim kütle başına oluşan eğilme dayanımları irdelenmiş Şekil 6.22’de gösterilmiştir. Her ne kadar ağırlığın eğilme dayanımıyla direk ilgisi olmasa da atalet momentinin kesitle, kesidin de kütle ile dolaylı ilişkisi olduğundan böyle bir irdeleme yapılmıştır. Her bir bordür numunesinin gerçek ölçülere göre ve nominal ölçülere göre hesap edilen eğilme dayanımları birim kütle başına göre grafiklendirilmiş olup gerçek

ölçülere göre yapılan hesapların birim kütle başına düşen eğilme dayanımlarının nominal ölçülerle yapılan hesaplarınkine göre daha yüksek çıktığı görülmüştür.



Şekil 6.22: Nominal ve gerçek ölçülere göre birim kütle başına eğilme dayanımları



Şekil 6.23: XLPE oranına göre birim kütle başına ortalama eğilme dayanımları

Şekil 6.23'teki grafikten anlaşılacağı üzere XLPE kullanım oranının %3'e kadar artırılmasıyla betonun yapısal verimliliği artmaktadır. %5 oranında XLPE kullanımıyla yapısal verimlilik bir miktar azalmaktadır.

Tablo 6.8'de nihai deneylerde 1 m³ beton harcında XLPE kullanımlarının oranları, toplam agrega kütesine oranı, hacimsel oranı ve kütesel oranı olarak ifade edilerek birlikte gösterilmiştir. Yaklaşık olarak 11,34 dm³ nominal hacme sahip bir prekast kompozit beton bordürde toplam agrega kütesinde kütlece %3 ve %5 oranında XLPE kullanımıyla sırasıyla 0,560 kg ve 0,901 kg XLPE değerlendirilebilecektir. Ayrıca buharlaşmalar dikkate alınmadığında referans beton bordür ağırlığına göre %3 ve %5 XLPE içerikli bordürlerde sırasıyla yaklaşık olarak %3,945 ve %6,364 oranında bir hafifleme elde edilebilecektir.

Ayrıca plastik (ya da polimer) katkılı beton dizaynlarında kullanılan plastiğin oranlarından bahsetmek istendiğinde hacimsel oranlardan bahsetmek daha mantıklıdır. Çünkü beton harcı dizaynında kullanılan (ya da ikame edilen) plastiğin hacmi belirleyici unsurdur. Hacme göre plastik miktarları belirlenmektedir. Bu sebeple araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda beton harcı içinde kullandıkları plastiğin etkin bir şekilde kıyaslamasını yapabilmesi için hacimsel oranlardan bahsetmesinde fayda vardır. Betonun çimento matrisli bir kompozit ürün olduğunu düşündüğümüzde kompozit yapı içinde hacimsel olarak kullanılan plastik miktarının kıyaslaması daha anlaşılır olabilir. Böylece plastiğin kompozit yapı içinde matris ile bağlanması (yapışması) hakkında fikirler verebilir.

Tablo 6.8: XLPE kullanım oranları ve brüt beton ağırlığı

XLPE Oranları	XLPE/Agrega (Kütlece %)	XLPE/Beton (Kütlece %)	XLPE/Beton (Hacimce %)	Brüt Beton Ağırlığı (kg)
Prekast Beton (%0 XLPE)	0,00	0,00	0,00	2.357
Prekast Kompozit Beton (%3 XLPE)	3,00	2,18	5,28	2.264
Prekast Kompozit Beton (%5 XLPE)	5,00	3,60	8,50	2.207

%3 ve %5 XLPE kullanım oranlarında 11,34 dm³ hacimli bir bordürde XLPE kullanım miktarları %3 XLPE için eşitlikler (6.1), (6.2)' de ve %5 XLPE için eşitlikler (6.3), (6.4) ifade edilmiştir.

$$M_{XLPE} = \frac{\%2,18 \times M_{Brüt Beton} \times V_{Bordür}}{1000} \quad (6.1)$$

$$0,560 \text{ kg} = \frac{\%2,18 \times 2264 \text{ kg} \times 11,34 \text{ dm}^3}{1000 \text{ dm}^3} \quad (6.2)$$

$$M_{XLPE} = \frac{\%3,60 \times M_{Brüt Beton} \times V_{Bordür}}{1000} \quad (6.3)$$

$$0,901 \text{ kg} = \frac{\%3,60 \times 2207 \text{ kg} \times 11,34 \text{ dm}^3}{1000 \text{ dm}^3} \quad (6.4)$$

%3 ve %5 XLPE kullanım oranlarında 11,34 dm³ hacimli bir bordürde referans beton bordür ağırlığına göre oluşan hafifleme oranları eşitlik (6.5)'e göre hesap edilmiştir ve sırasıyla eşitlik (6.6) ve eşitlik (6.7) ile ifade edilmiştir. (Değerler kuru yüzey doymuş agregaya göre verilmiştir. $V_{Bordür}$ =Bordür Hacmi (dm³), $M_{Brüt Beton}$ =Brüt beton harcı kütlesi (kg).

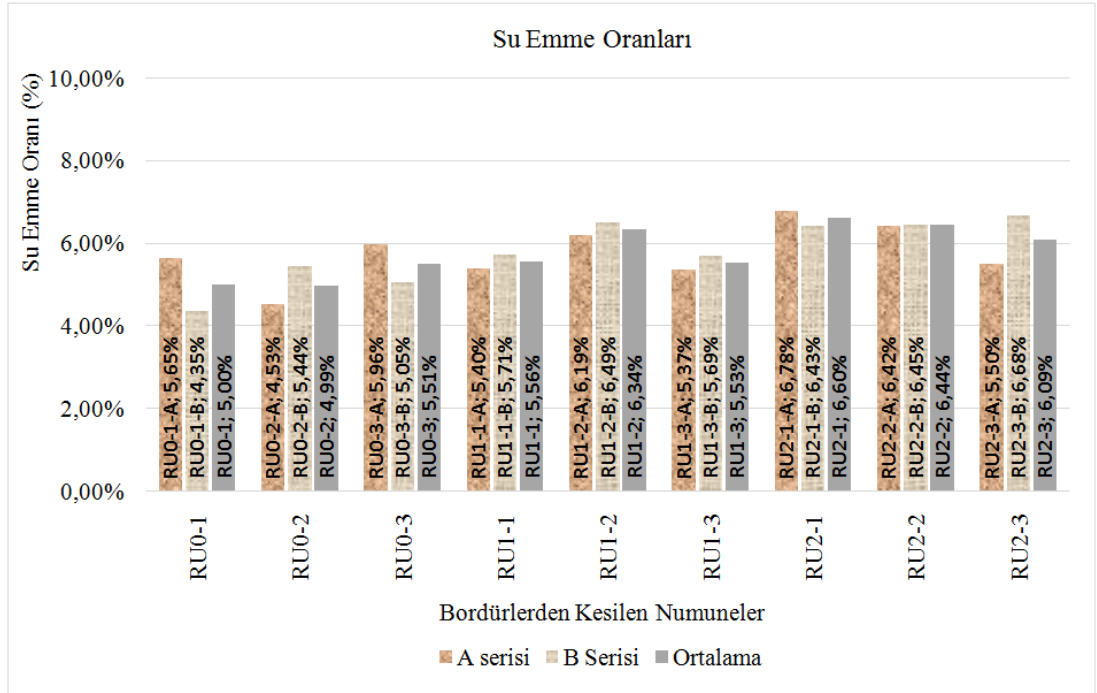
$$\%Hafifleme = V_{Bordür} \times \left(\frac{M_{Brüt Beton Referans} - M_{Brüt Beton XLPE}}{1000} \right) \quad (6.5)$$

$$\%3,945 = 11,34 \text{ dm}^3 \times \left(\frac{2357 \text{ kg} - 2264 \text{ kg}}{1000 \text{ dm}^3} \right) \quad (6.6)$$

$$\%6,364 = 11,34 \text{ dm}^3 \times \left(\frac{2357 \text{ kg} - 2207 \text{ kg}}{1000 \text{ dm}^3} \right) \quad (6.7)$$

6.2.4 Su Emme Tayini Sonuçları İrdelemesi

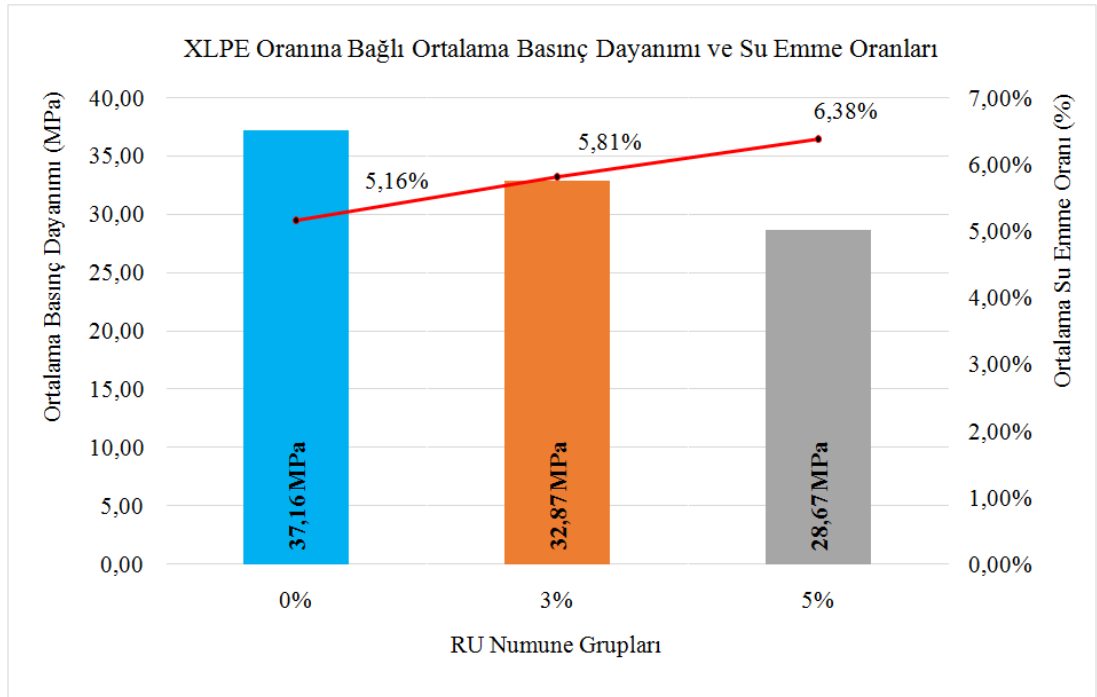
Elde edilen verilere göre %0 XLPE içeren referans prekast beton bordürlerden alınan numunelerin ortalaması %5,16 olup 2. sınıf olarak nitelendirilip 'B' harfi ile işaretleme yapmaya uygundur. %3 XLPE içeren prekast kompozit beton bordürlerden alınan numunelerin ortalaması %5,81 olup 2. sınıf olarak nitelendirilip 'B' harfi ile işaretleme yapmaya uygundur. %5 XLPE içeren prekast kompozit beton bordürlerden alınan numunelerin ortalaması %6,38 olup 1. sınıf olarak nitelendirilip 'A' harfi ile işaretleme yapmaya uygundur. %5 XLPE içerikli betonların su emme değerleri %0 ve %3 XLPE içerikli beton numunelerin ortalama değerlerinden yüksek çıkmıştır. Şekil 6.24'te bordürlerden kesilen parçaların su emme değerleri ve her bir bordür numunesinin ortalama su emme değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.24: Bordürlerin ve parçalarının su emme değerleri

Şekil 6.25'de gösterilen XLPE oranına bağlı ortalama su emme oranlarına bakıldığında XLPE oranının artmasıyla bordürlerden kesilen numunelerin su emme oranları artmaktadır. Su emme miktarının artması beton içinde oluşan boşluk miktarının artması demektir ki bu da numunelerin mukavemetiyle yakından ilgilidir. Yani XLPE oranının artmasıyla beton içinde oluşan boşluk miktarı artmaktadır ve basınç dayanımının da düşmesine sebep olmaktadır. RU deney grubunda uyarlanarak oluşturulan beton dizaynı, XLPE oranları göz ardı edilirse RU numune gruplarında

neredeyse aynı hammadde içeriğine sahiptir. XLPE içeriği arttıkça basınç dayanımının düşmesine sebep XLPE granüllerinin boşluk gibi davranması olduğu düşünüldüğünde ve su emme oranlarının XLPE oranı artışıyla artması göz önünde bulundurulduğunda XLPE granüllerinin beton yapısı içinde boşluklar oluşmasına sebep olduğu düşünülebilir. Yani basınç dayanımının düşmesi sadece XLPE granüllerinin boşluk gibi davranmasından değil XLPE'nin beton yapısı içinde ilave boşluklara sebebiyet vermesi olduğu da düşünülebilir. Şekil 6.25'de ortalama basınç dayanımı ve ortalama su emme oranları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 6.25: Ortalama basınç dayanımları ve ortalama su emme oranları

Bordür kesitlerinin kırılma kesiti görüntülerinde hava kabarcığı, gözenek gibi belirgin içyapı kusurları oluşmamıştır. Su emme tayini deneylerinden anlaşılacağı üzere XLPE ikamesiyle gözle görülmeyecek boyutta boşluklar oluştuğu düşünülmektedir.

6.3 XLPE ikamesiyle Oluşan Nakliye ve Hammadde Bazlı Kazançlar

İnce agrega yerine XLPE granül ikamesiyle brüt beton ağırlığında ve işlemlerin hammadde ve nakliye giderlerinde olumlu yönde iyileşmeler sağlanabilecektir. %5 oranında agrega yerine XLPE granül kullanımı agrega

maliyetinden %5 tasarruf anlamına gelmektedir. Ayrıca işletmelerin XLPE ye göre ağır olan agregaya nakliyesinden de tonaj bazında kazanımları olacaktır. Tablo 6.9’da yaklaşık agregaya maliyetinin 200 TL/ton olduğu varsayılarak işletmelerin günlük üretim miktarlarına göre oluşacak kazançlar gösterilmiştir. Güncel olarak rakamların daha sonraki dönemlerde irdelenebilmesi için çıkan sonuçların üretici fiyat endeksi oranında arttırılmasıyla yaklaşık değerler izlenebilir. %5 XLPE kullanılan betonda %70 oranında XLPE dâhil agregaya olduğu varsayılmıştır. İstenirse formüllerden yararlanarak işletmeler kendi verilerine göre yeniden hesap tablosu oluşturarak çıkan sonuçları irdelenebilirler.

Böylelikle %5 XLPE granül katkıli prekast kompozit beton bordür üretimi ile XLPE atık oluşturan işletmelerin stoklama problemlerinde rahatlama oluşabilecektir. Dolayısıyla işletmelerde atıkların istiflenmesi ve düzenlenmesi gibi sebeplerle oluşan enerji ve zaman kayıplarında azalmalar söz konusu olacaktır. Nihayetinde XLPE atıkların oluşturduğu negatif çevresel etkilerin azaltılmasına ve XLPE atıkların sürdürülebilir bir döngüye evrilmesine fayda sağlanabilecektir.

Tablo 6.9: Üretim kapasitesine göre agregadan ve nakliyeden tasarruf miktarları

ÜRETİM KAPASİTESİNE GÖRE AGREGADAN ve NAKLİYEDEN TASARRUF MİKTARLARI			
Günlük Bordür Betonü Üretim Miktarı	P	20 m ³	30 m ³
1 m ³ Betonda Kütlece Agregada Oranı (XLPE Dahil)	A	70,00%	70,00%
1 m ³ Klasik Bordür Betonü Brüt Ağırlığı	M _B	2.350 kg/m ³	2.350 kg/m ³
1 m ³ Betonda Kütlece Agregada Ağırlığı (XLPE Dahil)	M _A =A*M _B	1.645 kg/m ³	1.645 kg/m ³
1 m ³ Betonda %5 XLPE Oranında Kütlece Agregada Tasarruf Miktarı	M _X =%5*M _A	82 kg/m ³	82 kg/m ³
Günlük Agregadan Tasarruf Miktarı	M _{GAG} =P*M _X	1.645 kg/Gün	2.468 kg/Gün
Aylık Agregadan Tasarruf Miktarı	M _{GAA} =22*M _{GAG}	36.190 kg/Ay	54.285 kg/Ay
Yıllık Agregadan Tasarruf Miktarı	M _{GAY} =12*M _{GAA}	434.280 kg/Yıl	651.420 kg/Yıl
Agregada Özgül Ağırlığı	ρ _A	2,71	2,71
XLPE Özgül Ağırlığı	ρ _{XLPE}	0,94	0,94
XLPE Kullanımıyla Yıllık Nakliye Tonajından Tasarruf	BT _{NY} =M _{GAY} -(M _{GAY} *ρ _{XLPE} /ρ _A)	283.644 kg/Yıl	425.466 kg/Yıl
Kamyon Azami Yükleme Ağırlığı (İstiap Haddi)	M _{max}	27.000 kg	27.000 kg
Yıllık Kamyon Seferinde Azalış	Sk=BT _{NY} /M _{max}	10,5 Sefer/Yıl	15,8 Sefer/Yıl
Agregada Yaklaşık Birim Fiyatı	F _A	200,00 TL/ton	200,00 TL/ton
Günlük Kullanılan Agregada Bedeli	B _G =P*A*(M _B /1000)*F _A	6.580,00 TL/ton	9.870,00 TL/ton
%5 XLPE Oranında Günlük Agregadan Tasarruf Bedeli	BT _G =%5*B _G	329,00 TL/Gün	493,50 TL/Gün
%5 XLPE Oranında Aylık Agregadan Tasarruf Bedeli	BT _A =22*BT _G	7.238,00 TL/Ay	10.857,00 TL/Ay
%5 XLPE Oranında Yıllık Agregadan Tasarruf Bedeli	BT _Y =12*BT _A	86.856,00 TL/Yıl	130.284,00 TL/Yıl
ÜRETİM KAPASİTESİNE GÖRE AGREGADAN ve NAKLİYEDEN TASARRUF MİKTARLARI			
Günlük Bordür Betonü Üretim Miktarı	P	40 m ³	50 m ³
1 m ³ Betonda Kütlece Agregada Oranı (XLPE Dahil)	A	70,00%	70,00%
1 m ³ Klasik Bordür Betonü Brüt Ağırlığı	M _B	2.350 kg/m ³	2.350 kg/m ³
1 m ³ Betonda Kütlece Agregada Ağırlığı (XLPE Dahil)	M _A =A*M _B	1.645 kg/m ³	1.645 kg/m ³
1 m ³ Betonda %5 XLPE Oranında Kütlece Agregada Tasarruf Miktarı	M _X =%5*M _A	82 kg/m ³	82 kg/m ³
Günlük Agregadan Tasarruf Miktarı	M _{GAG} =P*M _X	3.290 kg/Gün	4.113 kg/Gün
Aylık Agregadan Tasarruf Miktarı	M _{GAA} =22*M _{GAG}	72.380 kg/Ay	90.475 kg/Ay
Yıllık Agregadan Tasarruf Miktarı	M _{GAY} =12*M _{GAA}	868.560 kg/Yıl	1.085.700 kg/Yıl
Agregada Özgül Ağırlığı	ρ _A	2,71	2,71
XLPE Özgül Ağırlığı	ρ _{XLPE}	0,94	0,94
XLPE Kullanımıyla Yıllık Nakliye Tonajından Tasarruf	BT _{NY} =M _{GAY} -(M _{GAY} *ρ _{XLPE} /ρ _A)	567.288 kg/Yıl	709.110 kg/Yıl
Kamyon Azami Yükleme Ağırlığı (İstiap Haddi)	M _{max}	27.000 kg	27.000 kg
Yıllık Kamyon Seferinde Azalış	Sk=BT _{NY} /M _{max}	21,0 Sefer/Yıl	26,3 Sefer/Yıl
Agregada Yaklaşık Birim Fiyatı	F _A	200,00 TL/ton	300,00 TL/ton
Günlük Kullanılan Agregada Bedeli	B _G =P*A*(M _B /1000)*F _A	13.160,00 TL/ton	24.675,00 TL/ton
%5 XLPE Oranında Günlük Agregadan Tasarruf Bedeli	BT _G =%5*B _G	658,00 TL/Gün	1.233,75 TL/Gün
%5 XLPE Oranında Aylık Agregadan Tasarruf Bedeli	BT _A =22*BT _G	14.476,00 TL/Ay	27.142,50 TL/Ay
%5 XLPE Oranında Yıllık Agregadan Tasarruf Bedeli	BT _Y =12*BT _A	173.712,00 TL/Yıl	325.710,00 TL/Yıl

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bordürlerde yapılan eğilme dayanımı deneylerinde toplam agregada miktarında kütlece %5 oranına kadar XLPE içeren prekast kompozit beton bordür numunelerin eğilme dayanımlarının XLPE içermeyen referans prekast beton bordür numunelerinin eğilme dayanımına yakın çıktığı görülmüştür. Toplam agregada miktarında kütlece %3 XLPE granül katkı kullanılan prekast kompozit beton bordür numunelerin ortalama eğilme dayanımları, XLPE içermeyen prekast beton bordür numunelerinin ortalama eğilme dayanımlarından bir miktar fazla çıkmıştır. Toplam agregada miktarında kütlece %5 XLPE granül katkı kullanılan prekast kompozit beton bordür numunelerin ortalama eğilme dayanımları, XLPE içermeyen prekast beton bordür numunelerinin ortalama eğilme dayanımlarından nominal boyutlu hesaplara göre %7,5, gerçek boyutlu hesaplara göre %5,3 oranında daha az çıkmıştır. Uyarlanan beton reçetesine göre toplam agregada miktarında kütlece yaklaşık %5 XLPE içeriğine kadar prekast beton bordürlerde eğilme dayanımının korunduğu düşünülebilir.

Toplam agregada miktarında kütlece %3 ve %5 XLPE granül içerikli beton harcı ile oluşturulan prekast kompozit beton bordürler referans prekast beton bordürün eğilme dayanımı sınırı olan 6 MPa sınırını geçmiştir.

Ön deneylerde toplam agregada miktarında kütlece %5, %10 ve %15 XLPE granül içerikli beton dizaynı oluşturularak hazırlanan beton küp numunelerin basınç dayanımı değerleri, %0 XLPE granül içerikli beton küp numune dayanımlarından sırasıyla %28,17, %48,61 ve %62,51 oranında daha aşağıda sonuçlar verdiği görülmüştür.

Nihai deneylerde toplam agregada miktarında kütlece %3 ve %5 XLPE granül içerikli uyarlama beton dizaynı ile oluşturulan beton küp numunelerin basınç dayanımı değerleri, %0 XLPE granül içerikli referans beton küp numune dayanımlarından sırasıyla %11,54 ve %22,85 oranında daha aşağıda sonuçlar verdiği görülmüştür. Ön deneylerde ve nihai deneylerde oluşturulan iki farklı beton

dizaynında, toplam agregada miktarında kütlece %5 XLPE içeren beton küp numunelerin basınç dayanımlarında yaklaşık %25 mertebelerinde düşüş oluşmuştur.

0–5 mm agregada yerine ikame edilerek hazırlanan XLPE granül içerikli beton dizaynların basınç dayanımları, XLPE içermeyen ikamesiz beton dizaynlarına göre daha düşük basınç dayanımı sağladığından XLPE granül katkı betonda basınç dayanımı zayıfladığı söylenebilir. Bunun sebebinin granüllerin beton içinde boşluk gibi davranmasından ve XLPE granüllerinin beton matrisi içinde yeteri kadar bağ yapamamaya boşluklar oluşturmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

XLPE katkı beton harçlarının XLPE katkısız beton harçlarına göre çökme (slump) değerlerinin azalmakta olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle ön deneylerde toplam agregada miktarında kütlece %15 seviyelerinde XLPE içerikli beton harcında çökme miktarının oldukça azaldığı gözlemlenmiştir. Çökme miktarının azalmasının sebebinin, her ne kadar su emmeyen bir yapıda olsa da XLPE granüllerinin yassı yapısının ikame edilen ince agregaların yuvarlaklığına göre hesap edilen su miktarı ihtiyacından daha fazla yüzey ıslatma suyuna ihtiyaç duyması olduğu düşünülmektedir. Beton harçlarında XLPE granül katkı kullanımı granül yapısına bağlı olarak işlenebilirliğe negatif etki yapabilir. Bu sebeple XLPE granül katkı miktarı artırıldıkça işlenebilirlik için ilave tedbirler ve donanımlara gereksinim duyulabilir.

XLPE granüllerin özgül ağırlığının, ikame edilen ince agregaların özgül ağırlığından az olması sebebiyle brüt beton ağırlığı, toplam agregada miktarında kütlece %3 XLPE granül içerikli beton harcında %3,95, toplam agregada miktarında kütlece %5 XLPE granül içerikli beton harcında %6,36 oranında azalmıştır.

Eğilme dayanımı deneyi yapılması mümkün olmayan boyutlardaki prekast beton bordürler ve benzer prekast yol sınırlama ekipmanları için gereklilik olan eşdeğer beton özelliklerine haiz olması durumunun incelenmesinde kullanılan basınç dayanımı şartının sağlanmadığı fakat eğilme dayanımlarının yakalanabildiği gözlemlenmiştir. Standartlarca incelemede XLPE içeriği olan bordürlerin mukavemet dayanımı incelemesinde standart bir numune tipi belirlenerek ölçülen eğilme dayanımlarına göre uygunluk ve uygunsuzluk değerlendirmesi yapma yöntemleri araştırılabilir.

XLPE atıkların prekast beton bordür üretiminde kullanılabilmesi böylelikle proseslerinde XLPE atık oluşan işletmeler, bu atığı yan ürün olarak beton bordür üretimi yapan işletmelere naklederek stoklama sorunlarını minimize edebilir.

Beton santrali tesislerinde agregaların yüklendiği bunkerlere ilave olarak XLPE gibi polimerlerin proseslerde kullanılabilmesi için ilave bunkerler dizayn edilebilir. Böylelikle geri kazanıma müsait atıkların hem proses şartlarında kullanıma uygunluğu test edilebilir hem de geri kazanıma müsait atıkların kullanılabilmesi için altyapının oluşmasına olanak sağlanabilir.

XLPE granül katkılı betonların, eğilme ve basınç dayanımı ihtiyacının az olduğu sulama kanalı beton savakları ve savak beton ayaklarında, kaykay pisti, beton banklar gibi yapı elemanlarında kullanılabilirliği irdelenebilir.

XLPE granül katkılı betonlar, beton yol bariyerlerinde beton harcı içindeki XLPE kullanım oranı artırılarak çarpışma testlerine uygunluğu kontrol edilebilir. Araç kullanıcılarının trafikte bariyerlere çarpma, savrulma durumunda esnek olmayan çarpışmanın negatif etkilerinin azaltılması amacıyla ve yüksek oranlı XLPE katkılı beton bariyerde kullanılan betonun düşük mukavemet özelliklerinin avantajını kullanarak beton yol bariyerlerinin tasarımı iyileştirilerek beton yol bariyerlerinde oluşabilecek herhangi bir esnek olmayan çarpışmanın esnek çarpışmaya benzetilmesi amaçlanarak araştırılması faydalı olabilir. XLPE 'nin enerji absorbe edebilme özelliğinden bu gibi durumlarda faydalanılabilir.

8. KAYNAKLAR

Aciu, C., Ilutiu-Varvara, D. A., Manea, D-L., Orban, Y-A. and Babota, F., “Recycling of plastic waste materials in the composition of ecological mortars”, *Procedia Manufacturing*, 22, 274-279. (2018). doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.042.

Akçaözoğlu, S., Atiş, C. D. and Akçaözoğlu, K., “An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete”, *Waste Management*, 30 (2), 285-290, (2010). doi: 10.1016/j.wasman.2009.09.033.

Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A. and Gutiérrez, A. “Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios”, *Waste Management*, 29 (10), 2707-2716, (2009). doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.007.

Azhdarpour, A. M., Nikoudel, M. R. and Taheri, M., “The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; A laboratory evaluation”, *Construction and Building Materials*, 109, 55-62, (2016), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056.

Babafemi, A. J., Šavija, B., Paul, S. C. and Anggraini, V., “Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review”, *MDPI Sustainability*, 10 (11), (2018). doi: 10.3390/su10113875.

Beşergil, B., *Polimer Kimyası*, Ankara: Gazi Kitabevi, 70, (2008).

Beşergil, B., *Petrokimya Teknolojisi*, Ankara:, Gazi Kitabevi, 146-147, (2009).

Birinci, G., “Silikon elastomerlerin sönümlene özelliğini kontrol eden yapısal parametrelerin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3, (2020).

Bulut H. A. and Şahin, R., “A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste”, *Composite Structures*, 178, 50-62, (2017), doi: 10.1016/j.compstruct.2017.06.058.

Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim Y. J. and Lachemi, M., “Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled

waste polyethylene terephthalate bottles”, *Construction and Building Materials*, 23 (8), 2829-2835, (2009). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036.

Duman, S., “Akrilamit-Maleikasit kopolimerinin hesapsal ve deneysel olarak FT—IR ile incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 6, Balıkesir, (2018).

Fraj, A. B., Kismi, M. and Mounanga, P., “Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, 24 (6), 1069-1077, (2010). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010

Frigione, M., “Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete”, *Waste Management*, 30 (6), 1101-1106, (2010). doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.

Hama, S. M., and Hilal, N., N., “Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6 (2), 299-308, (2017). doi: 10.1016/j.ijbe.2017.01.001.

Hameed, T., “Study of reactions between highly functionalized low molecular weight polyethylene and polyamines to produce thermoset materials” MS Thesis, *McMaster University*, Hamilton, Canada, (2012).

Hannawi, K., and Prince-Agbodjan, W., “Transfer behaviour and durability of cementitious mortars containing polycarbonate plastic wastes”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19 (4), 467-481, (2015), doi: 10.1080/19648189.2014.960100.

Jacob-Vaillancourt, C. and Sorelli, L., “Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates from postconsumer material streams”, *Construction and Building Materials*, 182, 561-572, (2018). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.083.

Jaivignesh B. And Sofi, A., “Study on Mechanical Properties of Concrete Using Plastic Waste as an Aggregate”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 80 (1), (2017). doi: 10.1088/1755-1315/80/1/012016.

Kan, A., and Demirboğa, R., “A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates”, *Journal of Materials Processing*

Technology, 209 (6), 2994-3000, (2009), doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.07.017.

Khonakdar, H. A., Morshedian, J., Wagenknecht, U. and Jafari, S. H., "An investigation of chemical crosslinking effect on properties of high-density polyethylene", *Polymer*, 44 (15), 4301-4309, (2003). doi: 10.1016/S0032-3861(03)00363-X

Kılınç, Ö. and Toplan, N., "Amorf Polimerler", *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 5(3), 131-148, (2023).

Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., and Lai, W. L., "Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes", *Waste Management*, 29 (2), 621-628, (2009). doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.014.

Mergen, Ö. B., "UV tekniği kullanılarak agarose biojellerin faz geçişlerinin incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 6, (2012).

Merrington A., "Recycling of plastics" *Applied Plastics Engineering Handbook*, 177-192, (2011). doi:10.1016/B978-1-4377-3514-7.10011-X

Mısır, M., "Yeni başlatıcı sistemleri ile e-kaprolaktonun halka açılma polimerizasyonu (ROP) ve çeşitli monomerlerin atom transfer radikal polimerizasyonu (ATRP)", Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 18-19, Trabzon, (2011).

Momotaz H., Rahman, Md. M., Karim, Md. R., Iqbal, A., Zhuge, Y., Ma, X. and Levett, P., "A Review of Current Design and Construction Practice for Road Kerbs and a Sustainability Analysis", *MPDI Sustainability*, (2022). doi:10.3390/su14031230

Oliveira, G. L. and Costa, M. F., "Optimization of process conditions, characterization and mechanical properties of silane crosslinked high-density polyethylene", *Materials Science and Engineering: A*, 527 (18-19), 4593–4599, (2010). doi:10.1016/j.msea.2010.03.102

Özel, C., Filiz, M., Sevinç, A. and Kıran, C., "Betonda fiber katkı olarak polietilen tereftalatın kullanılabilirliğinin araştırılması", *SDU International Journal of Technologic Sciences*, 3 (2), 17-28, (2011).

Ruiz-Herrero J. L., Nieto, D. V., López-Gil, A., Arranz, A., Fernández, A., Lorenzana, A., Merino, S., Antonio De Saja, J. and Rodríguez Pérez, M, Á., “Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste”, *Construction and Building Materials*, 104, 298-310, (2016). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005.

Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D., and Maallem, M., “The use of plastic waste as fine aggregate in the selfcompacting mortars: Effect on physical and mechanical properties”, *Construction Building Materials*, 43, 436-442, (2013). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049.

Saikia N. and de Brito, J., “Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review”, *Construction and Building Materials*, 34, 385-401, (2012). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.

Sibeko, M. A., “Preparation and Characterization of Vinylsilane Crosslinked Thermoplastic Composites Filled With Nanoclays” MS Thesis, *University of the Free State (Qwaqwa Campus)*, Phuthaditjhaba, South Africa, (2012).

Şentürk, B., “Çekirdeklendirici katkıların geri dönüştürülmüş polipropilenin mekanik davranışına etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 8, (2014).

Tamboli, S. M., Mhaske S. T. and Kale D. D., “Crosslinked Polyethylene”, *Indian Journal of Chemical Technology*, 11, 853-864, (2004).

TS 802 Standardı, *Beton Karışım Tasarımı Hesapları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (Mart 2016).

TS EN 1340 Standardı, *Zemin Döşemesi İçin Beton Bordür Taşları–Gerekli Şartlar ve Deney Metotları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (Nisan 2005).

URL 1, Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri, "Yeni Malzemeler Polimerler [online]", (29 March 2024), <https://acikders.ankara.edu.tr/mod/reusorce/view.php?id=165034&forceview=1>,

URL 2, Yazıcı, Ö., “Polimer Kimyası [online]”, (29 March 2024), <https://avesis.yildiz.edu.tr/oyazici/dokumanlar>, (2022).

URL 3, Tanrısever T., “Halka açılması polimerizasyonu [online]”, (29 March 2024), http://lisans.cozum.info.tr/dersler/polimer_kimyasi/polimerizasyon/halka_acilmasi_polimerizasyonu.php,

URL 4, Nexans Brazil, “Nexans, Comparison among insulation materials [online]”, (08 June 2023), https://www.nexans.com.br/.rest/eservice/dam/v1/file/223712/Comparing_pt_5.pdf,

URL 5, “Hongda Cable [online]”, (02 May 2024), <https://www.hongdacable.com/medium-voltage-non-armored-power-cable/>,

URL 6, At Yapı, (2 May 2024), <https://www.atyapi.com/polyethylene/xlpe-crosslinked-polyethylene-pipe-insulation/>,

URL 7, “Matrix Design & Build [online]”, (02 May 2024), <https://matrixgc.com/a-step-by-step-guide-to-pex-pipe-installation/>

URL 8, PAGEV, ”Türkiye Polietilen Raporu 2020 [online]”, (02 May 2020), <https://pagev.org/turkiye-polietilen-sektor-izleme-raporu-2020>,

URL 9, “Miller Brothers Paving, Inc. [online]”, (02 May 2020), <https://millerbrotherspaving.com/concrete-repair/concrete-curbs-gutters/>,

URL 10, “Nitterhouse Masonry Products, LLC [online]”, (30 April 2024), <https://www.nitterhousemasonry.com/our-products/superior-curb/>,

URL 11, Usta S., “Beton Tasarımı [online]”, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Van Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, İnşaat Teknolojisi Programı, (02 July 2024), <https://avesis.yyu.edu.tr/resume/downloadfile/susta?key=c40fc2f2-a5e9-47c8-be53-7b674ba7ac05>,

Ünsal, A. and Şen, H., “*Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri*”, T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Malzeme Lab. Şubesi Müdürlüğü, (2008).

Yaşar, H., *Plastikler Dünyası*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara: Özkan Matbaacılık Ltd. Şti., 118, (2001).

Zéhil, G-P. and Esad, J. J., "Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials", *Construction and Building Materials*, 226, 1-10, (2019). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285