



ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**KARAYOLLARINDA ÜSTYAPI PERFORMANSININ
İYİLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ**

**Hasan BOZKURT
Doktora Tezi**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Cenk KARAKURT**

**Tez İkinci Danışmanı
Doç. Dr. Murat KARACASU**

**BİLECİK, 2017
Ref. No.:10161317**



ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**KARAYOLLARINDA ÜSTYAPI PERFORMANSININ
İYİLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ**

**Hasan BOZKURT
Doktora Tezi**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Cenk KARAKURT**

**Tez İkinci Danışmanı
Doç. Dr. Murat KARACASU**

BİLECİK, 2017



ANADOLU UNIVERSITY



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Civil Engineering Department**

**IMPROVEMENT AND ANALYSIS OF THE PAVEMENT
PERFORMANCE IN SUPERSTRUCTURES**

**Hasan BOZKURT
Ph.D.Thesis**

**Thesis Advisor
Assoc. Prof. Dr. Cenk KARAKURT**

**Thesis Co-Advisor
Assoc. Prof. Dr. Murat KARACASU**

BİLECİK, 2017



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 12/07/2017 tarih ve 35 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 26/07/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hasan BOZKURT un "Karayollarında Üstyapı Performansının İyileştirilmesi ve Analizi" başlıklı tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak oy birliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE(TEZ DANIŞMANI): Doç. Dr. Cenk KARAKURT

ÜYE : Prof.Dr. Mustafa TUNCAN

ÜYE :Doç.Dr. Altan ÇETİN

ÜYE : Doç.Dr. Nazile URAL

ÜYE : Yard.Doç.Dr. Mehmet CANBAZ

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca her türlü konuda desteğini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen danışman hocalarım Doç. Dr. Cenk KARAKURT ve Doç. Dr. Murat KARACASU' ya en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca desteklerini hissettiğim İnşaat Mühendisliği Bölümünde görevli tüm arkadaşlarıma ve hocalarıma teşekkür ederim. Mühendislik Fakültesinde görevli arkadaşlarıma ve çalışmaya mali destek sağlayan Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi BAP proje birimine teşekkür ederim. Tez savunma jüri üyesi değerli hocalarıma desteklerinden ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmamda ve hayatımın her aşamasında beni sabırla destekleyen sevgili eşim Emine Tuğba BOZKURT' a ve canım aileme en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Hasan BOZKURT

ÖZET

Ülkelerin ulaşım ağının yeterli düzeyde ve standartta olması gelişmişliğinin bir göstergesi olarak görülmektedir. Ülkemizde ağır taşıt trafiği her geçen gün daha da artmakta ve bu durum yol üst yapısındaki bozulmaların artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bakım onarım maliyetlerinin her geçen yıl artması sonucunda maddi kaynak kayıpları yaşanmaktadır.

Bu çalışmada, üstyapıda oluşan bozulmaların önlenmesi için rijit ve esnek üstyapı tasarımında beton ve Bitümlü Sıcak Karışımlarının (BSK) mekanik ve kalıcılık özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan BSK ve beton kaplama karışımlarda % 0.5 ile % 2 arasında değişen oranlarda polyester lif, çelik lif ve polipropilen lif katkıları kullanılmıştır. Beton numuneleri üzerinde malzeme karakterizasyonu için taze ve sertleşmiş beton deneyleri, kalıcılık deneyleri ve içyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. BSK numuneleri üzerinde ise Marshall tasarımı, statik dinamik sünme ve buz çözücü tuzlara karşı direnç deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarından beton kaplama tasarımında lif kullanımı ile mekanik ve kalıcılık özelliklerde iyileşmenin elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre lifli beton kaplama tasarımında kullanılacak en uygun lif oranının taze ve sertleşmiş beton özellikleri göz önünde bulundurulduğunda % 1 olduğu görülmüştür. BSK kaplama numunelerinde lif kullanımında ki artışla Marshall dayanım değerlerinin azaldığı ve kontrol numunesine en yakın sonuçların % 0.5 lif katkılı numunelerden elde edildiği görülmüştür. Buz çözücü tuzlara karşı direnç açısından BSK kaplama tasarımında %0.5 oranında polyester ve polipropilen liflerin kullanımının olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca beton kaplama ve BSK tasarımı deney sonuçları istatistiksel açıdan değerlendirilmiş lif türlerine göre benzerlik dereceleri ve deney sonuçlarının ilişkisi incelenmiştir. Sonuç olarak lif katkılı beton ve BSK karışımlarıyla üstyapı performansının iyileştirilmesi ile kaplamaların hizmet ömrünün uzayacağı ve bakım onarım maliyetlerindeki azalmalarla maliyet açısından önemli kazanımlar sağlanacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü Sıcak Karışım; Beton Kaplama; Lifler; Fiziksel ve mekanik özellikler; Kalıcılık

ABSTRACT

An adequate and standard level country's transport network is seen as sign of the countries development. In our country, heavy vehicle traffic is increasing with each passing day therefore that causes an increased deformation on road superstructure. Because of this reason, the maintenance and repair costs increase with every year as a result of material resource losses.

In this study, it is aimed to prevent the deterioration of the superstructures by improving the mechanical and durability properties of concrete and hot mix asphalt (HMA) mixtures in rigid and flexible pavement design. The prepared HMA and concrete pavements are produced with polyester, steel and polypropylene fiber additives at 0.5 % to 2 % utilization ratios. Fresh and hardened concrete tests, durability tests and internal structure analyzes were performed on the concrete specimens for material characterization. The Marshall design, static-dynamic creep and resistance against de-icing salt tests were carried out on HMA mixtures. Experimental results showed that an improvement can be obtained on mechanical and durability properties of fiber used concrete pavement design. According to test results, it is seen that the optimum fiber ratio to be used in the design of fiber concrete is 1%, when fresh and hardened concrete properties are taken into consideration. The Marshall strength values are decreased with the increase of the fiber usage in the HMA pavement specimens and it was seen that the similar results to the control samples were obtained from the 0.5% fiber used specimens. The usage of 0.5 % polyester and polypropylene fiber has a beneficial effect on the resistance of HMA against de-icing salts. In addition, the results of the concrete pavement and HMA design were evaluated statistically, and the relationship between similarity ratios and test results according to fiber types was examined. As a result, the improvement of the superstructure performance by using fibers in concrete and HMA, the service life of the pavement will be increased and economic benefits can be achieved by reducing the maintenance costs.

Keywords : Hot Mix Asphalt, Concrete Pavement, Fibers, Physical and mechanical properties, Durability

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ	1
1.1.Çalışmanın Amacı	3
1.2.Çalışmanın Kapsamı	4
2. KARAYOLU ÜSTYAPISI VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİ	5
2.1.Üstyapı Tanımı ve Performans Özellikleri	5
2.1.1.Rijit (Beton) kaplamalar	8
2.1.2. Rijit kaplama bozulma türleri	11
2.1.2.1. Çatlaklar	11
2.1.2.2. Soyulmalar	12
2.1.2.3. Diğer bozulmalar.....	13
2.1.3.Esnek (BSK) kaplamalar	13
2.1.4. Bitümlü kaplamalardaki bozulma türleri	15
2.1.4.1. Şekil değiştirmeler	16
2.1.4.2. Çatlamalar	16
2.1.4.3. Ayrışmalar	17
2.2. Kaplama Performansının İyileştirilmesinde Lif Katkılarının Kullanımı	18
2.2.1. Doğal lifler	20
2.2.2. Metalik lifler	20
2.2.3. Sentetik lifler	24
2.2.3.1. Akrilik lifler	25
2.2.3.2. Aramid lifler	25
2.2.3.3. Naylon lifler	25
2.2.3.4. Polyester lifler	25

2.2.3.5. Polipropilen lifler	25
2.2.3.6. Cam lifler	26
2.2.3.7. Karbon lifler	27
3. TEZ KONUSUYLA İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	28
3.1. Lif Katkılı Beton Kaplama Tasarımı ile İlgili Çalışmalar	28
3.2. Lif Katkılı BSK Kaplama Tasarımı ile İlgili Çalışmalar	33
4.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
4.1.Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler.....	38
4.1.1. Agrega.....	38
4.1.2. Çimento	39
4.1.3. Su	39
4.1.4.Çelik lif	39
4.1.5.Polipropilen lif	39
4.1.6.Polyester lif	40
4.1.7.Bitüm	40
4.2. Lifli Beton Kaplama Tasarımı ve Numune Hazırlanışı	41
4.3. BSK ve Beton Tasarımında Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellik Deneyleri. 43	
4.3.1. Elek analizi deneyi	43
4.3.2. İri agrega için özgül ağırlık deneyi	44
4.3.3. İnce agrega için özgül ağırlık deneyi	45
4.3.4. Sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlık deneyi	45
4.3.5. İnce madde oranının yıkama ile tayini	46
4.3.6. Los angeles aşınma deneyi	46
4.4.Beton Deneyleri.....	47
4.4.1. Taze beton işlenebilirlik deneyleri	47
4.4.2. Beton birim ağırlık deneyi.....	48
4.4.3. Ultrases geçiş hızı deneyi	48
4.4.4. Su emme deneyi	49
4.4.5. Tek eksenli basınç deneyi	50
4.4.6. Kiriş eğilme deneyi	50
4.4.7. Aşınma direnci deneyi	51
4.4.8. Buz çözücü tuzların etkisi (CDF) deneyi	52

4.5. BSK Tasarımı deneyleri	55
4.5.1. Bitümün fiziksel özellik tespiti deneyleri	55
4.5.1.1. Penetrasyon deneyi	55
4.5.1.2. Özgül ağırlık deneyi	55
4.5.1.3. Düktilite deneyi	56
4.5.1.4. Yumuşama noktası deneyi	56
4.5.1.5. Parlama noktası deneyi	57
4.5.2. BSK Marshall tasarımı	57
4.5.2.1. Farklı bitüm miktarlarında karışımın maksimum özgül ağırlığı.	58
4.5.2.2. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki boşluk hacmi yüzdesi	59
4.5.2.3. Marshall numunelerinin boşluk analizi	59
4.5.3. Marshall dayanım ve akma değerlerinin belirlenmesi	60
4.5.3.1 Marshall tasarımında en uygun bitüm yüzdesinin belirlenmesi	60
4.5.4. Statik ve dinamik sünme deneyi	60
4.6. Minerolojik ve İç Yapı Analizi Deneyleri	62
4.6.1. X ışını difraksiyonu deneyi (XRD)	62
4.6.2. Taramalı elektron mikroskobu (FESEM-EDX) analizi	63
5.DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	64
5.1. BSK ve Beton Kaplama Tasarımı Agrega Deney Sonuçları	64
5.1.1. Elek analizi deney sonuçları.....	64
5.1.2. Los Angeles deney sonuçları	65
5.1.3. İri agrega için özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları	65
5.1.4. İnce agrega için özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları	66
5.1.5. Yassılık indeksi tayini deney sonuçları	66
5.1.6. Agregada organik madde ve donmaya ve çözünme deneyi sonuçları.....	67
5.2. Beton Kaplama Deney Sonuçları	67
5.2.1. Beton işlenebilirlik deney sonuçları	67
5.2.2. BHA ve su emme sonuçları	68
5.2.3. Basınç dayanımı sonuçları	70
5.2.4. Eğilme dayanımı sonuçları	71
5.2.5. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları	73
5.2.6. Aşınma direnci deney sonuçları	74

5.2.7. Buz çözücü tuzlara karşı donma çözünme (CDF) deneyi sonuçları	76
5.3. BSK Tasarımı Deney Sonuçları	79
5.3.1. BSK tasarımı bitüm deneyleri sonuçları	79
5.3.2. BSK Marshall dayanım ve akma deney sonuçları	79
5.3.3. BSK dinamik statik sünme deneyi sonuçları	99
5.4. Lif Katkılı BSK ve Beton Kaplamalar İç yapı Analizleri	103
5.4.1. Polipropilen lifli beton numunelerinde SEM analizleri	103
5.4.2. Polyester lifli beton numunelerinde SEM analizleri	107
5.4.3. Çelik lifli beton numunelerinde SEM analizleri	110
5.5. Mineralojik XRD Analizi Sonuçları	112
5.6. Beton ve BSK Kaplamalarda Yaklaşık Maliyet Analizi	112
6. DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL İNCELENMESİ	114
6.1. Beton Deney Sonuçlarının İstatistik Yöntemlerle İncelenmesi	114
6.2. BSK Deney Sonuçlarının İstatistik Yöntemlerle İncelenmesi	117
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	121
KAYNAKLAR	124
ÖZGEÇMİŞ	

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1: Türkiye’de karayolu kaplama türleri dağılımı.....	6
Çizelge 2.2: Beton kaplamaların avantajları ve dezavantajları	10
Çizelge 2.3: Esnek kaplamaların özellikleri.....	15
Çizelge 2.4: Esnek kaplamalarda oluşan bozulmaların genel oluşum sebepleri	15
Çizelge 2.5: Farklı türdeki liflere ait fiziksel özellikler	20
Çizelge 2.6: Bazı metalik liflerin tipik özellikleri	21
Çizelge 2.7: TS EN 14889’a göre çelik lif sınıfları.....	22
Çizelge 2.8: Bazı cam liflerine ait fiziksel ve mekanik özellikler.....	26
Çizelge 4.1: Kullanılan çimentonun özellikleri.....	38
Çizelge 4.2: Numune üretiminde kullanılan çelik lifin özellikleri.....	39
Çizelge 4.3: Numune üretiminde kullanılan polipropilen lifin özellikleri...	39
Çizelge 4.4: Deneyde kullanılan polyester lifin özellikleri.....	40
Çizelge 4.5: Beton tasarımında kullanılan standart ve şartname değerleri..	41
Çizelge 4.6: Beton Karışımlarına ait kısaltma isimleri.....	42
Çizelge 4.7: 1 m ³ Lifli beton karışımında kullanılan malzeme miktarları...	43
Çizelge 4.8: Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki ilişki	48
Çizelge 4.9: BSK’lara ait kısaltma isimleri.....	58
Çizelge 5.1: KTŞ BSK kaplama tasarımı için agrega özellikleri	65
Çizelge 5.2: BSK ve beton kaplama tasarımı için Los Angeles aşınma deney sonuçları	65
Çizelge 5.3: İri agrega özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları	66
Çizelge 5.4: İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları.....	66
Çizelge 5.5: Agregaların yassılık tayini deney sonuçları.....	66
Çizelge 5.6: Organik madde tayini ve donma çözünme dayanımı deney sonuçları	67
Çizelge 5.7: Lif katkılı betonların BHA ve su emme deney sonuçları	69
Çizelge 5.8: Donma çözülme direnci kategorileri	77
Çizelge 5.9: BSK kaplama tasarımında tez kapsamında 50/70 bitüme uygulanan deney sonuçları.....	79
Çizelge 5.10: BSK dizayn kriterleri	80
Çizelge 5.11: Kontrol numunelerin Marshall deney sonuçları	82
Çizelge 5.12: Polipropilen lif katkılı BSK numunelerin Marshall deney sonuçları.....	83

Çizelge 5.13:	Polyester lif katkılı BSK numunelerin Marshall deney sonuçları.....	84
Çizelge 5.14:	Çelik lif katkılı BSK numunelerin Marshall deney sonuçları.....	85
Çizelge 5.15:	Ortalama bitüm oranı tayini (kontrol numunesi).....	87
Çizelge 5.16:	PP %0.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.....	88
Çizelge 5.17:	PP %1 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini	89
Çizelge 5.18:	PP %1.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini	90
Çizelge 5.19:	PY %0.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.....	92
Çizelge 5.20:	PY %1 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.....	93
Çizelge 5.21:	PY %1.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.....	94
Çizelge 5.22:	ÇL %0.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.....	95
Çizelge 5.23:	ÇL %1 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.....	96
Çizelge 5.24:	ÇL %1.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.....	97
Çizelge 5.25:	Kaplama yaklaşık maliyetleri.....	113
Çizelge 6.1:	Beton deney sonuçları için kümeleme analizi verileri.....	115
Çizelge 6.2:	Aşınma deneyi sonucu ile diğer alt gruplar regresyon ilişkisi.....	116
Çizelge 6.3:	CDF deneyi sonucu ile diğer alt gruplar arasında regresyon ilişkisi.....	117
Çizelge 6.4:	BSK deney sonuçları için kümeleme analizi verileri.....	118
Çizelge 6.5:	Marshall deney sonucu ile diğer alt gruplar regresyon ilişkisi.....	119
Çizelge 6.6:	Pratik özgül ağırlık sonucu ile diğer alt gruplar regresyon ilişkisi	120

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1: Yük ve yolcu taşımacılığı verileri.....	1
Şekil 2.1: Esnek ve rijit kaplamaların yük dağılımı	8
Şekil 2.2: Amerika’da 1910 yılında yapılan beton yol.....	9
Şekil 2.3: Tipik rijit üstyapı en kesiti	9
Şekil 2.4: Rijit kaplama derz bölgesinde çatlak oluşumu.....	12
Şekil 2.5: Beton kaplamada oluşan aşınma problemi	12
Şekil 2.6: Sathi kaplama uygulaması-bitümlü sıcak karışım uygulaması..	14
Şekil 2.7: Esnek üstyapı en kesiti.....	14
Şekil 2.8: Esnek üstyapıda tekerlek izi oluşumu.....	16
Şekil 2.9: Timsah sırtı çatlak oluşumu.....	17
Şekil 2.10: Sökülme ve soyulmaların genel görünümü	18
Şekil 2.11: Liflerin gerilme kuvvetlerini bir köprü gibi aktarması	19
Şekil 2.12: Lifli betonun tipik gerilme şekil değiştirme diyagramı	19
Şekil 2.13: Lifli ve lifsiz betonların yük-deformasyon ilişkisi.....	23
Şekil 2.14: Çelik liflerin görünüşleri	23
Şekil 2.15: Sentetik liflerin genel görünüşleri	24
Şekil 2.16: Cam liflerin görünüşleri	27
Şekil 3.1: Tek eksenli gerilmelerde lifli betonların kırılma gelişimi (a) Kırılma gelişimi grafik,(b) Kırılma gelişimi şematik gösterimi	31
Şekil 4.1: Deneyde kullanılan liflerin görünüşleri	40
Şekil 4.2: Lifli beton karışımların hazırlanması	43
Şekil 4.3: Agregalı elek seti ve sarsma cihazı.....	44
Şekil 4.4: Los Angeles deney aleti	47
Şekil 4.5: Beton çökme deneyi.....	48
Şekil 4.6: Ultrases deney aleti	49
Şekil 4.7: Tek eksenli basınç presisi.....	50
Şekil 4.8: Kiriş eğilme deney aleti.....	51
Şekil 4.9: Böhme aşınma deneyi	52

Şekil 4.10:	CDF donma çözünme test kabini	52
Şekil 4.11:	CDF %3 tuzlu su çözeltisi doyurma işlemi	53
Şekil 4.12:	CDF deneyi sıcaklık değişimi.....	53
Şekil 4.13:	CDF deneyinde numunelere Ultrasonik banyo uygulanması.....	54
Şekil 4.14:	Penetrasyon deney aleti	55
Şekil 4.15:	Düktilite deney cihazı.....	56
Şekil 4.16:	Yumuşama noktası deney aleti.....	56
Şekil 4.17:	Parlama noktası deney aleti.....	57
Şekil 4.18:	Lif katkılı BSK ile üretilen Marshall deneyi numuneleri	57
Şekil 4.19:	Marshall dayanım ve Marshall sıkıştırma tokmağı... ..	60
Şekil 4.20:	Statik dinamik sünme deney aleti.....	61
Şekil 4.21:	Dinamik sünme deneyi yükleme grafiği	61
Şekil 4.22:	HT-XRD analiz cihazı	62
Şekil 4.23:	Taramalı elektron mikroskobu (FESEM-EDX).....	63
Şekil 5.1:	BSK tasarımı için Agregatane dağılımı	64
Şekil 5.2:	Beton karışımı granülometri eğrisi.....	64
Şekil 5.3:	Lif katkılı beton işlenebilirlik deney sonuçları.....	67
Şekil 5.4:	Lif katkılı beton basınç deneyi sonuçları.....	70
Şekil 5.5:	Lif katkılı beton kaplama karışımları eğilme deneyi sonuçları..	72
Şekil 5.6:	Beton kaplama ultrases deney sonuçları.....	74
Şekil 5.7:	Aşınma direnci deneyi sonuçları	75
Şekil 5.8:	Beton kaplamalarda buz çözücü tuz deneyi sonuçları.....	76
Şekil 5.9:	Buz çözücü tuz deneyi (CDF) deneyi sonrası PP ve çelik lifli numuneler	77
Şekil 5.10:	BSK numunelere uygulanan buz çözücü tuz deneyi sonuçları.....	78
Şekil 5.11:	Marshall dayanım deney aleti.....	81
Şekil 5.12:	Marshall deney numuneleri	81
Şekil 5.13:	Kontrol numunesi Marshall deney sonucu grafikleri.....	86
Şekil 5.14:	PP0.5 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.....	88
Şekil 5.15:	PP1 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.....	89
Şekil 5.16:	PP1.5 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.....	90

Şekil 5.17:	PY0.5 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.....	91
Şekil 5.18:	PY1 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.....	92
Şekil 5.19:	PY1.5 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.....	93
Şekil 5.20:	ÇL0.5 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.....	95
Şekil 5.21:	ÇL1 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.....	96
Şekil 5.22:	ÇL1.5 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.....	97
Şekil 5.23:	Lifli BSK'ların Marshall stabilite değerleri.....	98
Şekil 5.24:	Lifli BSK'ların Marshall akma değerleri.....	98
Şekil 5.25:	Dinamik Sünme modülü-Vuruş sayısı	100
Şekil 5.26:	Birikimli Şekil değiştirme yüzdesi(%)-Vuruş sayısı	101
Şekil 5.27:	Statik sünme modülü-vuruş süresi	102
Şekil 5.28:	Statik birikimli şekil değiştirme yüzdesi(%)-Vuruş süresi	102
Şekil 5.29:	PP1 numune 2kx SEM analizi görüntüsü	104
Şekil 5.30:	PP1 numune 1kx SEM analizi görüntüsü	104
Şekil 5.31:	PP1 numune 10kx SEM analizi görünüşü	105
Şekil 5.32:	PP2 numune 100x SEM analizi görünüşü	106
Şekil 5.33:	PP2 numune 250x SEM analizi görünüşü	106
Şekil 5.34:	PP2 numune 2000x SEM analizi görünüşü.....	107
Şekil 5.35:	PP2 numune 500x SEM analizi görünüşü	107
Şekil 5.36:	PY2 numune 50x SEM analizi görünüşü	108
Şekil 5.37:	PY2 numune 100x SEM analizi görünüşü	108
Şekil 5.38:	PY2 numune 250x SEM analizi görünüşü	109
Şekil 5.39:	PY1 numune 1000x SEM analizi görünüşü	109
Şekil 5.40:	PY1 numune 100x SEM analizi görünüşü.....	109
Şekil 5.41:	ÇL2 numune 160x Sem analizi görünüşü.....	110
Şekil 5.42:	ÇL2 numune 50x Sem analizi görünüşü.....	111
Şekil 5.43:	ÇL2 numune 150x Sem analizi görünüşü.....	111
Şekil 5.44:	Beton numunesinin XRD analizi.....	112
Şekil 6.1:	Beton deney sonuçları kümeleme analizi sonuçları.....	114
Şekil 6.2:	BSK deney sonuçları kümeleme analizi sonuçları.....	118

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Yüzey alanı (mm^2)
b	Deney numunesinin genişliği (mm)
d	Kiriş en kesit genişliği (mm)
D_p	Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (gr/cm^3)
DT	BSK Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı
E	Elastisite modülü
F_{ct}	Eğilme dayanımı (N/mm^2)
F	En büyük yük (N)
f_c	Deney numunesinin basınç dayanımı (MPa)
G	Kayma modülü
G_{ef}	Agreganın efektif özgül ağırlığı (gr/cm^3)
G_b	Bitüm özgül ağırlığı (gr/cm^3)
GPa	Giga Paskal
LA	Los Angeles aşınma kaybı (%)
m^2	Metrekare
MPa	Mega Paskal
M_n	CDF ağırlık kaybı (gr/mm^2)
R^2	Regresyon katsayısı
S_a	Su emme oranı (%)
t	Numune boyunca ultrases geçiş süresi (sn)
V	Ultrases geçiş hızı (km/sn)
V_h	Toplam hacmin yüzdesi karışımdaki agreganın boşluğu (%)
W_1	İlk hacim/kütle (cm^3/gr)
W_2	Son hacim/kütle (cm^3/gr)
W_{dyk}	Doygun yüzey kuru ağırlık (gr)
W_k	Kuru ağırlık (gr)
Δ	Hacimsel/kütlesel değişim (%)
μm	mikrometre

μ_n	N çevrim sonunda kopan numune miktarı (gr)
μs	mikrosaniye
$^{\circ}C$	Santigrat derece

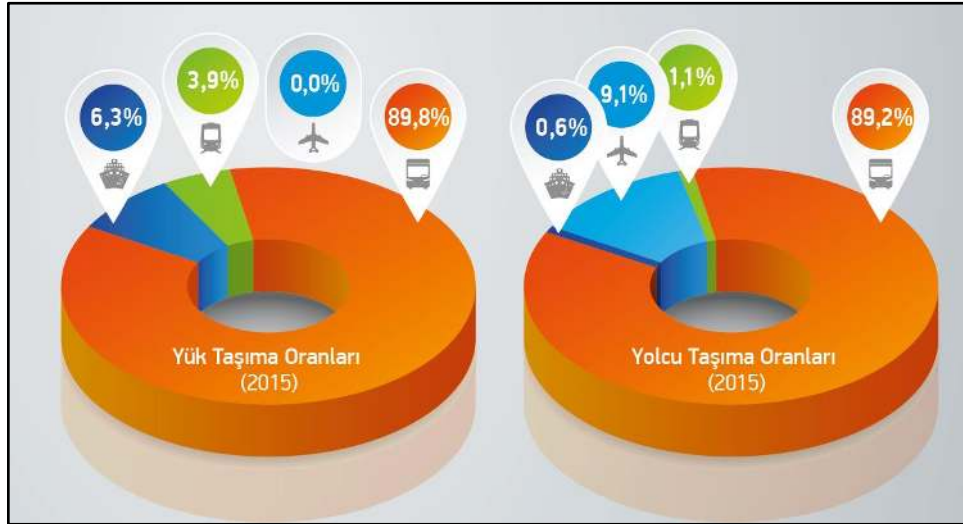
Kısaltmalar	Açıklama
AASTHO	:Amerikan Yol ve Ulaşım Dairesi
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
Ar-Ge	:Araştırma Geliştirme
ASTM	:Amerikan Standartı
BDBO	:Bitümle dolu boşluk oranı
BO	:Boşluk Oranı
BSK	:Bitümlü Sıcak Karışım
CBR	:Kaliforniya Taşıma Oranı
CCI	:Çimento Beton Enstitüsü
CDF-CIF	:Buz çözücü tuz deney yöntemi
ÇL	:Çelik lif
ÇTB	:Çelik Tel Beton
DLH	:Devlet Limanlar ve Hava meydanları Genel Müdürlüğü
D_{max}	:Maksimum agrega dane çapı
DSR	:Dinamik Kayma Reometresi
FESEM-EDX	:Taramalı Elektron Mikroskobu
FRAC	:Fiber donatılı asfalt betonu
KGM	:Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	:Karayolları Teknik Şartnamesi
LDPE	:Düşük yoğunluklu polietilen
MS	:Marshall stabilite
NaCl	:Sodyum klorür tuzu
OBO	:Optimum bitüm oranı
PÖA	:Pratik özgül ağırlık

PP	:Polipropilen lif
PY	:Polyester lif
SEM	:Taramalı elektron mikroskobu
SK	:Siyah karbon
s/ç	:Su-Çimento oranı
THBB	:Türkiye Hazır Beton Birliği
TSE	:Türk Standartları Enstitüsü
UBAK	:Ulaştırma Bakanlığı
VFA	:Bitümle dolu boşluk oranı
VMA	:Agregalar arası boşluk
XRD	:X ışını difraktometri deneyi

1.GİRİŞ

Ekonomik faaliyetlerin gelişmesi sonucunda artan mal ve hizmet taleplerini karşılanması için ulaşım talebi artmaktadır. Bunun sonucunda artan ulaşım talebi karşısında karayollarında kapsamlı problemlere yol açılmaktadır. Artan araç trafiği ve ülkemizde yapılan yük ve yolcu taşımacılığında karayolu taşımacılığı payının % 90'lar seviyesinde olması nedeniyle karayolu kaplamalarında performansın hızla azalmaktadır. Üstyapı için hedeflenen hizmet ömründen çok daha kısa sürede üstyapı bozulmaları oluşması karayollarımızda karşılaşılan başlıca problemlerdendir. Yapılan çalışmalarda üstyapı performansını arttırmak için birçok yöntem uygulanmaktadır. Bu problemlere karşı üstyapı tasarımında kullanılacak malzemelerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi ve performanslarının artırılması çalışmalarda araştırılan konuların başında gelmektedir. Bu yöntemlerden biriside çeşitli liflerin kaplama karışımlarında kullanılarak üstyapı bozulmalarının önüne geçilmesi yoluyla üstyapıların daha uzun yıllar bakım onarım ihtiyacı olmadan hizmet vermesinin sağlanmasıdır.

Ülkemizde ulaşımda karayolunun yük ve yolcu taşımacılığında yoğun olarak kullanılması, taşıt sayısının da her geçen gün artması nedenleriyle karayollarında bozulmalar hızla çoğalmaktadır. Ülkemizde yapılan yük ve yolcu taşımacılığının ulaşım yöntemlerine göre dağılımı Şekil 1.1'de görülmektedir.



Şekil 1.1. Ülkemizdeki yük ve yolcu taşımacılığının dağılımı (UBAK, 2015).

Karayolu kullanımının ülkemizde yük ve yolcu taşımacılığında ki payının %90'a yakın olması, ağır taşıt trafiğinden kaynaklı yol üstyapısındaki bozulmaların kısa sürede ortaya çıkmasının nedenleri arasındadır. (UBAK, 2015).

Ülkemizde hizmet veren karayolu ağının % 65'i taşıma gücü zayıf olan sathi kaplamalı yollardan oluşmaktadır. Bu nedenle yolların her yıl yenilenmesi bakım onarım maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır (KGM, 2016). Buna alternatif olarak yol ağının karayolu üstyapısının taşıma gücü yüksek BSK veya beton kaplamalarla yenilenmesi veya yeni hizmete açılacak yollarda BSK ve beton kaplamaların kullanılması yol üstyapısında oluşacak bozulmaların kısa sürede oluşmasını engelleyecektir. Ayrıca ağır trafik yükü altında kalan esnek üstyapı problemlerinin çözülmesi amacıyla ülkemizde beton yolların tercih edilmesi önem taşımaktadır. Ancak Ülkemizde karayolu yapım sektörünün BSK kaplama teknolojisine uygun olması beton yolların tercih edilmesinin önüne geçmektedir. Ülkemizde yeni yapılacak yollarda üstyapı performansı yüksek olan kaplamaların tercih edilmesi ile bakım onarım maliyeti düşük yol yapım tekniklerinin tercih edilmesi önemlidir. Bu amaçla yapılan çalışmada farklı lif katkıları ile beton ve BSK kaplamaların mekanik ve kalıcılık özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

1.1.Çalışmanın Amacı

Karayolu ulaşım projelerinde üstyapı tipi seçimi bitümlü esnek kaplama ile rijit kaplama karakteristik özelliklerine göre yapılmaktadır. Yapılan çalışmada her iki kaplama türünün özellikleri incelenerek bu kaplama performanslarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Esnek üstyapılarda karşılaşılan en yaygın bozulma türleri yorulma çatlakları, termal çatlaklar ve tekerlek izi oluşumudur. Yorulma çatlakları daha çok bitümlü malzemenin yaşlanması ve kullanılan üstyapının yeterli dayanıma sahip olmaması nedeniyle oluşmaktadır. BSK kaplamalarda termal çatlakların oluşumu, üstyapının etkisinde kaldığı iklim koşullarına bağlı olarak gerçekleşmektedir. BSK kaplamalarda tekerlek izi oluşumu, malzeme performansının gelen trafik yüklerine karşı yeterli olmaması nedeniyle oluşmaktadır. Bu nedenlerle BSK kaplama tasarımında oluşacak bozulmaları engellemek için lif katkılı BSK kaplama tasarımı yapılarak bu problemlerin oluşumlarının engellenmesi hedeflenmiştir.

Rijit kaplamalarda oluşan başlıca bozulma problemleri; beton kaplamada çatlakların oluşumu, plak oturmaları, çukurlar ve derzlerdeki bozulmalardır. Bu bozulmaların büyük çoğunluğu kaplama altındaki taban zeminine ait problemlerden kaynaklanmaktadır (Özerdoğan, 2005). Ayrıca beton tasarımında uygun malzeme ve yöntemlerin kullanılmaması, beton seriminin uygun yapılmaması ve beton dayanımını kazanıncaya kadar gerekli kür uygulamalarının uygun şekilde yapılmaması nedenleriyle rijit beton kaplamalarda çatlama ve bozulmalar ortaya çıkabilmektedir.

Bu sorunların çözümü için yapılacak olan beton ve BSK kaplama tasarımlarında kullanılacak malzemelerin standartlara göre hazırlanması için tasarım çalışmaları yapılmıştır. BSK ve beton karışımlarında farklı lif katkılarından karışıma hacimce % 0.5 ile % 2 oranları arasında çelik, polipropilen ve polyester lif ilave edilerek beton ve BSK deney numuneleri üretilmiştir. Üretilen lif katkılı BSK ve beton kaplama karışımları üzerinde uygulanan mekanik, fiziksel, kalıcılık ve iç yapı deneyleri yapılarak kaplama performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece farklı lif katkıların BSK ve beton kaplamaların performansı üzerine etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

1.2.Çalışmanın kapsamı

Yapılan bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde çalışmanın genel hatları ile ilgili giriş bilgileri verilmiş olup sonrasında çalışmanın amacı ve kapsamı anlatılmıştır.

İkinci bölümde ise karayolu üstyapısı performans özellikleri, esnek ve rijit üstyapıların özellikleri ve bozulma türleri ve lif türleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde lif katkılı BSK ve beton karışımları ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu bölümde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve yöntem anlatılmıştır. Deneysel çalışma sisteminde lif katkılı beton kaplama ve lif katkılı BSK numuneler üzerinde yapılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. BSK ve beton kaplama tasarımı numuneler üzerinde yapılan deneylerin uygulanma biçimleri ve amaçları anlatılmıştır.

Beşinci bölümde ise BSK ve beton numunelerinde farklı oranlarda katılan çelik, polipropilen ve polyester lif katkıları ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir.

Altıncı bölümde BSK ve beton tasarımı deney sonuçlarının istatistiksel yöntemlerle irdelenerek incelenmeye çalışılmıştır.

Yedinci bölümde BSK tasarımı ve beton tasarımı numunelerinde yapılan deneylerden elde edilen önemli sonuçlar ifade edilmiş ve ileride bu alanda yapılabilecek çalışmalara uygun önerilerde bulunulmuştur.

2.KARAYOLU ÜSTYAPISI VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİ

2.1. Üstyapı Tanımı ve Performans Özellikleri

Ülkelerin ulaşım ağının yeterli düzeyde ve standartta olması gelişmişliğinin bir göstergesi olarak görülmektedir. Ülkemizde ağır taşıt trafiği her geçen gün daha da artmakta ve bu durum yol üst yapısında önemli problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bir karayolu yatırımının proje ve inşaat safhalarında trafik tahminleri iyi yapılarak hizmet düzeyi yüksek kaplama tasarımı gerçekleştirilmelidir. Yol yapımında kullanılacak malzemelerden beklenen en önemli özelliklerden birisi, trafik yüklerine karşı kaplamanın bozulmadan planlanan servis ömrü boyunca hasara uğramaksızın hizmet vermesini sağlamaktır. Bunun yanında düşük bakım onarım harcamaları, yapım ve onarım süresinin kısa olması, çevre uyumu, atık maddelerinin kullanılabilmesi ve kalite kontrol işlemlerine uygun olma gibi özelliklerde malzeme seçiminde göz önünde bulundurulmalıdır (KTŞ, 2013).

Karayolu üst yapı kaplamalarında en çok kullanılan iki bağlayıcı malzeme bitüm ve çimentodur. Yol kaplamalarında esnek üstyapı inşaatı sathi kaplama veya Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) olarak uygulanmaktadır. Sathi kaplamada bitüm emülsiyonu üzerine agrega serilip ince bir tabaka halinde sıkıştırılır. BSK kaplamada ince ve iri agrega ısıtılarak sıcak bitümle homojen şekilde karıştırıldıktan sonra yola serilerek sıkıştırılır böylece sathi kaplamaya göre daha kalın bir tabaka oluşturulmaktadır. Rijit kaplamalarda ise ince ve iri agreganın su ve çimento ile karıştırılması sonucu elde edilen beton, yol yüzeyine serilerek özel serici yardımıyla veya silindirle sıkıştırılır ve yeterli dayanım kazanıncaya kadar kür işlemi yapılır (Tunç, 2001).

Genellikle asfalt betonu asfalt veya BSK, çimento betonu da kısaca beton olarak tanımlanmaktadır. BSK kaplama (esnek) ve beton (rijit) kaplamalar taşıma gücü açısından, şekil değiştirme ve enerji yutma gibi birçok yönden farklılık göstermektedir (Yeğinobalı, 2010). Ülkemizde hizmet veren karayolu ağımızın verileri incelendiğinde çok yüksek oranda taşıma gücü zayıf olan kaplamaların kullanıldığı görülmektedir. Çizelge 2.1’de Ülkemizdeki yol ağı dağılımı hakkında bilgiler verilmiştir.

Çizelge 2.1. Türkiye’de karayolu kaplama türleri dağılımı (KGM, 2016).

KGM Yol dağılımı	BSK kaplama	Sathi kaplama	Beton Parke	Stabilize yol	Toprak	Geçit vermez	Toplam
Devlet Yolları	14393	16399	71	45	17	288	31213
İl Yolları	2702	27327	191	699	614	1532	33065
Otoyollar	2289	-	-	-	-	-	2289
Toplam	19384	43726	262	744	631	1820	66567

Türkiye’de karayollarının yük ve yolcu taşımacılığındaki payı % 89.8’dir. Çizelge 2.1’de verilen 2016 yılı verilerine göre Ülkemizde yaklaşık olarak 2289 km’si otoyol, 31200 km’si devlet yolu, 33000 km’si il yolu olmak üzere toplam karayolu şebekesinin uzunluğu yaklaşık 66600 km’dir. Bu yolların % 65’i sathi kaplama ve % 29’u BSK olarak kaplanmış olup geri kalanı stabilize, beton parke, beton yol veya toprak yoldur. Yaklaşık 294000 km uzunluğundaki köy yollarımızın ise sadece % 27 si sathi kaplama olarak kaplanmış geri kalan bölümü stabilize veya toprak yoldur (KGM, 2016).

Karayolu üst yapıları genel olarak; esnek üst yapılar (BSK kaplamalar) ve rijit üst yapılar (beton kaplamalar) olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir. BSK kaplamalı yollar ülkemizde uzun yıllardan beri uygulanan bir kaplama türüdür. Beton yollar ise gelişmiş ülkelerde geniş bir kullanım alanına sahip olmasına karşın Türkiye’de henüz yeterli uygulama alanı bulamamıştır. Bakım giderleri çok az olan ve daha uzun süre hizmet veren beton yollar, günümüzde BSK kaplamalara oranla daha ekonomik bir çözüm getirmektedir. Ayrıca rijit bir yol üst yapısı olan beton yolun birçok bakımdan BSK kaplamalara göre daha iyi performansa sahip olduğu bilinmektedir. Her iki kaplama türünün bir arada kullanıldığı kompozit kaplama uygulaması da havaalanı kaplamalarında görülmektedir (Umar ve Ağar, 1991).

Her iki kaplama türünün uygulandığı yol platformunun temel tabakaları, taneli malzemeden, alt temeli de taneli veya kırma malzemeden oluşan üstyapı tabakalarından oluşmaktadır (Tunç, 2004).

Rijit ve esnek üstyapı tercihinde trafik güvenliği, konforu, hacmi ve kompozisyonu gibi faktörlerin yanı sıra ekonomiklik, iklim, bölge koşullarına uygunluk

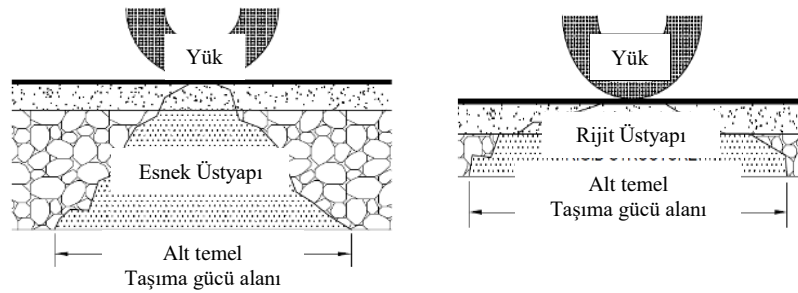
gibi faktörlerin de dikkate alınması suretiyle projelendirilmeli ve inşa edilmelidir. Ülkemizde bugüne kadar, trafik hacmi belirli bir düzeye ulaşmış yollarımızda BSK kullanımı tercih edilmiştir. Bu tercihin nedenleri arasında 1950'den sonra karayolu ağının gelişmesi sonucunda BSK uygulamasının giderek yaygınlaşması ve BSK kaplama yapımında belirli bir teknoloji ve deneyim düzeyine ulaşılması önemli rol oynamıştır. BSK kaplama uygulamasının beton kaplama yapımına oranla daha kolay ve hızlı yapılması nedeniyle tercih edilmiş ve yol yapımının teknolojik altyapısı buna göre oluşturulmuştur. 1973 yılında petrol fiyatlarındaki ani artış sebebiyle BSK yapım maliyetinde bitümün oranı % 30'a yükselmiş, 1976'da ise bu oran % 45 seviyesine çıkmıştır. Bu süreçte Ülkemiz çimento sektörünün Avrupa'da en büyük üretici konumuna gelmesi için yapılan yatırımlar ve ülkenin ihtiyacı olan yerli kaynakların değerlendirilmesi hususu beton yol kaplamalarının üretimi konusunu gündeme getirmiştir (Giriş, 2007).

Karayollarında yüksek trafik hacimli ve ağır trafiğe maruz yollarda beton kaplamaların, BSK kaplamaya karşı ciddi bir alternatif oluşturduğu tespit edilmiştir. BSK kaplama veya beton plak kaplama tercihinin temelinde bir maliyet ve ekonomi sorununun bulunduğu araştırmalarda görülmüştür. Bu nedenle teknik ve ekonomik kıyaslamalarla birlikte hangi üstyapı türünün ülkemizin çeşitli koşullarına daha uygun olacağının ve bunun da ülke ekonomisi açısından değerlendirilmesi ve planlama yaparken dikkate alınması gerekli olduğu ifade edilmektedir (Ağar, vd., 1991).

Her iki üstyapı arasında yapısal yönden önemli farklar bulunmaktadır. Üstyapıyı oluşturan malzemelerin özelliklerinin farklı olması yük taşıma ve çalışma mekanizmasını etkilemektedir. Çok tabakalı bir sisteme sahip olan esnek üstyapılarda, kaplamaya gelen tekerlek yükü nedeniyle deformasyon oluşmakta ve her tabaka üzerine gelen yükü bir alttaki tabakaya biraz daha yayarak iletmektedir. Böylece doğal zemine (altyapıya) ulaşan yük, büyük bir alana yayılmış olur böylece esas taşıyıcı olan altyapı, daha düşük birim gerilmelere maruz kalmaktadır. Esnek üstyapıda yük dağılımı rijit kaplamalara göre temel tabakalarında daha derine kadar etkimektedir.

Rijit kaplamada ise yük taşıma mekanizması esnek üstyapıya göre daha farklı oluşmaktadır. Beton yolun taşıma kapasitesi, betonun rijit yapısı ve kaplamanın kesit kalınlığı nedeniyle eğilmeye çalışana bir plak gibi davranmaktadır. Beton plağın eğilme dayanımına bağlı olarak temele yük aktarımı gerçekleşir. Yük altındaki beton plak

eğilmekte ve yük esnek kaplamaya oranla daha büyük bir alana yayılarak beton kaplamanın elastik bir temel üzerine yüklenmiş bir kiriş gibi çalışması ile temele yük transferi daha geniş bir alana yayılarak gerçekleşir. Beton plağın altında meydana gelen gerilmeler, kaplamada oluşan oturmaların ve taban reaksiyon modülünün (yatak katsayısı) bir fonksiyonunu oluşturmaktadır (Umar ve Ağar, 1991). Esnek ve rijit kaplamaların yük dağılımı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Esnek ve rijit kaplamaların yük dağılımı

(<http://www.wastormwatercenter.org>, 2017).

Geçmişten günümüze beton teknolojisinde yaşanan gelişmelerle beton yolların yapımı kolaylaşmış ve yapım maliyetleri azalarak uygulaması daha kolay hale gelmiştir. Bu yeniliklere örnek olarak; Hazır beton santral sayısının artması, çimento fabrikalarının yaygınlaşması, kalıp teknolojisinin gelişimi, lifli betonların kullanılması, katkı teknolojisi gelişmeler vb. yenilikler örnek verilebilir. Tüm bunlara rağmen Ülkemizde 2010 yılına kadar 5.5 km’si TÇMB desteği ile yapılmış yolla beraber toplamda 10 km kadar beton yol yapılmıştır (Yeğınobalı, 2009).

2.1.1.Rijit (Beton) Kaplamalar

Beton kaplamalar, trafik hacminin fazla olduğu ve taşıt trafiğinin ağır olduğu karayollarında ve havaalanlarında gerekli sürüş konforu ve emniyetini sağlamak amacıyla yapılan yüksek standartlı rijit üstyapılardır.

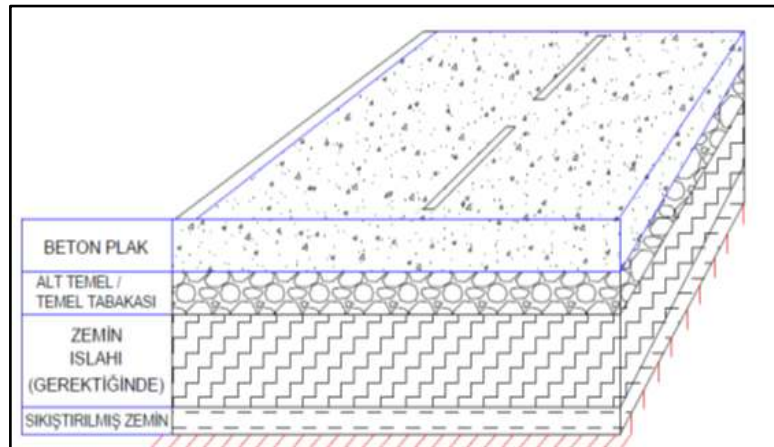
Rijit üstyapı olarak değerlendirilecek ilk örnek yol uygulamaları MÖ 1.yy’da Romalılar döneminde yapılan ilk yollarda yol yüzeyindeki taşları birbirine bağlamak için kullanılan puzolanik bağlayıcıların kullanılması şeklinde görülmüştür. Beton yol teknolojisinde en önemli uygulamalar 19. yüzyılın sonlarında ABD’de yapılmıştır. 1891’de Ohio’da yapılmış bu uygulamada çok basit yöntemler uygulanan bu yol

uygulaması ile günümüz beton yol teknolojisi arasında önemli farklar bulunmaktadır. Şekil 2.2’de Amerika’da yapılan ilk beton yola ait bir uygulama gösterilmiştir.



Şekil 2.2. ABD’de 1910 yılında inşa edilen beton yol (Snyder, 2008).

Almanya’da işsizlikle mücadele etmek ve askeri birimlerin hızlı ve güvenli şekilde hareket edebilmeleri için çalışan sayısı fazla olan beton otoyol şantiyeleri kurulmuştur. Daha sonra Belçika ve Fransa, beton otoyol yapımına başlamışlardır. Beton yol yapımında kolaylıkların artması ve sanayileşme ile sadece 1960 ve 1970 yılları arasında ABD’de 70.000 km beton yol yapılmıştır. Toplam Beton yol sahipliği açısından ABD, Almanya, Belçika, Japonya ve Fransa ilk sıralarda yer alan ülkelerdir. Silindirle sıkıştırılabilen beton kaplamalarda (SSB) ilk modern örnek ise 1970 yılında İspanya’da yapılan düşük hacimli trafiğe sahip olan bir yolda ki uygulamadır (TMH, 2003). Beton kaplamalar, yeterli dayanıma sahip zeminler üzerine belirli bir kalınlıkta serilen taneli alt temel tabakası ile kısmen donatılı veya sürekli donatılı beton plaklardan meydana gelir (Şekil 2.3). Beton kaplamaların avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.2’de verilmiştir (Ağar vd.,1998; Bolat,2009).



Şekil 2.3.Tipik rijit üstyapı en kesiti (Mutıylmaz, 2014)

Çizelge 2.2. Beton kaplamaların avantajları ve dezavantajları (Ağar vd.,1998; Bolat, 2009).

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek mekanik özellikler sayesinde düşük kaplama kalınlığı	İlk yapım maliyetlerinin yüksek olması
Düşük bakım onarım maliyeti	Onarım sürelerinin uzun olması
İç kaynakların kullanılması	Derzlerin sürüş konforunu azaltması
Düşük enerji maliyeti	Beton kaplama üretimi zorluğu
Düşük sıcaklıklarda üretime izin vermesi	Kademeli inşaatın yapım zorluğu
Açık renkli olması gece görünme kolaylığı	Kür işlemlerin hassas olma zorunluluğu

Bu avantaj ve dezavantajlar göz önünde bir arada değerlendirildiğinde rijit kaplamaların, trafik hacmi yüksek yollarda ve havaalanlarında yapılması bir tercih nedeni olmaktadır. Beton plaklar arasındaki derzler, sürüş konforunun azalmasına ve lastik gürültüsünün artmasına sebep olmaktadır. Fakat sürekli yapıda beton kaplama ile bu sorun azaltılabilmektedir. Beton yollarda katmanlar çok farklı ısınmalar gösterir. Güneş altında üst tabaka hızlıca ısınırken alt kısım bu ısıya saatler sonra ulaşabilir. Bu termal farklılık ile birlikte iç gerilmeler oluşmakta trafik yükü sonucu oluşan ilave gerilmelerle kaplamada çatlamlar görülebilmektedir (Baradan vd., 2010).

Karayolu üstyapısında 20 yıl proje ömrü için standart dingil yükü sayısının 60 ile 75 milyondan fazla olduğu veya yolun trafiğe açıldığında tek yöndeki günlük ticari vasıtaların sayısı 5000'den fazla olduğu yollarda ve büyük yolcu uçaklarının yıllık 5000'den fazla iniş kalkış yaptığı havaalanlarında beton kaplama kullanılması daha verimli olmaktadır. Bu nedenle, gelecekte ülkemizde beton kaplamaların kullanımının artması ve yaygınlaşması beklenmelidir (Mutayılmaz, 2014).

Beton kaplamalarda bozulmaların büyük bir bölümü suyun zararlı etkileri nedeniyle oluşmaktadır. Suyun içinde eriyik halde bulunan zararlı kimyasallar gerekli önlemler alınmazsa betonun içine sızarak betonun çatlamasına ve parçalanmasına neden olan reaksiyonların gelişimine neden olmaktadır. Ayrıca kış aylarında özellikle hava sürüklenmemiş betonların içerisine sızan su donma-çözülme etkisi ile betonun hasara

uğramasına yol açabilir. Ayrıca betona sızan sular betonarme donatı korozyonuna yol açarak zamanla çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Betonun geçirimli olması halinde temel tabakasına sızan suların neden olduğu pompaj etkisi ile temel tabakalarının taşıma gücü azalmakta ve oluşan gerilme yığılmaları nedeniyle beton kaplamalarda büyük hasarlar ortaya çıkmaktadır.

2.1.2.Rijit kaplama bozulma tipleri

Beton kaplamalarda görülen bozulmalar kaplamanın yapısal durumuna göre farklı olmasına rağmen bozulma türleri benzerdir. Beton kaplamalarda oluşan başlıca bozulma türleri çatlaklar, yüzeysel bozulmalar ve diğer bozulmalardır (Özerdoğan, 2005).

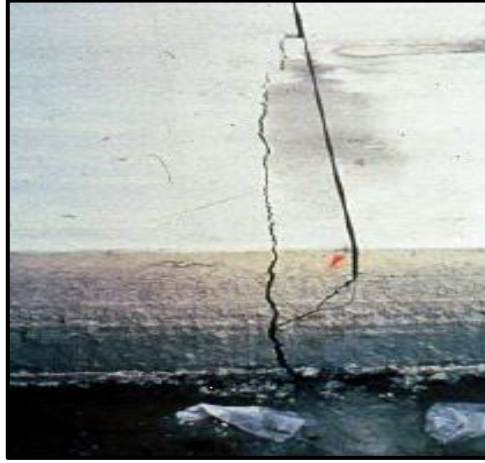
2.1.2.1.Çatlaklar

Beton kaplamalarda en sık görülen bozulma türüdür. Kaplamada çatlakların oluşuma başlaması bozulmanın habercisidir. Bozulmalar çatlaklar şeklinde başlayarak ileride daha büyük problemlerin gelişmesine yol açarlar.

Çatlak oluşumunun nedenleri:

- Betonun içine sızan suyun donma-çözülme etkisi
- Betonun boşluğu yüksek ve geçirimli olması
- Betonun dayanımının yetersiz olması
- Beton dökümü sonrası rötrenin oluşması (Özerdoğan, 2005).

Beton kaplama tasarımında betonun geçirimliliği ve boşluk yapısı az ve yüksek dayanımlı olarak üretilmesi çatlak gelişimini azaltacaktır. Beton kaplamaların üretimi sonrası hassas bir kür uygulanmalıdır. Bazı kaplamalarda plaklar arasında derzler tam olarak kesilmeden bırakılarak çatlamanın bu bölgede oluşması istenmektedir. Beton kaplamanın derz dolgularının yenilenmesi ve beton kaplamanın bakımının yapılması bozulmaların oluşmasını engelleyecektir. Betonların çatlak oluşumu diğer bozulmaların gelişmesine neden olmaktadır. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi derz bölgesinde çatlak gelişimi çok fazla deformasyonların oluşması sonucunda derz bölgesinde bozulmasına yol açmaktadır.



Şekil 2.4.Rijit kaplama derz bölgesinde çatlak oluşumu (Özerdoğan, 2005).

2.1.2.2.Soyulmalar

Beton yüzeyinin yeterli sertliğe ve dayanıma sahip olmaması veya beton serimi sonrasında kür işlemlerinin yeterince uygulanması nedenleriyle taşıt trafiği altında kaplama yüzeyinden parça kopması söz konusu olmaktadır. Aşınma olayı olarak adlandırılan bu kalıcılık sorunu dinamik yük etkisi altında kalan karayolu kaplamalarında sıkça karşılaşılan problemlerden birisidir. Özellikle sıcak havalarda beton dökümünde karşılaşılan terleme sorunu nedeniyle beton yüzeyinin su/çimento oranı (s/ç) artmakta ve dayanımı düşük bir beton yüzeyinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum beton yüzeyinden oluşacak soyulmaların artmasına yol açmaktadır. Şekil 2.5'te beton kaplamalarda oluşan soyulma probleminin bir örneği verilmiştir.



Şekil 2.5.Beton kaplamada oluşan soyulma problemi (Baradan,2010).

2.1.2.3. Diğer bozulmalar

Beton kaplamasında bozulmaların malzemenin içyapı kusurları, taban zemini problemleri, suyun etkisi gibi birçok faktörün etkisi ile oluştuğu bilinmektedir. Diğer bozulmalar bu problemlerin birlikte yaşandığı ya da ayrı ayrı oluşarak kaplamanın yüzeyinde oluşurlar. Bu bozulmalara örnek şunlar verilebilir (Özerdoğan, 2005):

- Pompaj etkisi
- Derz bölgelerinde oluşan aşırı çatlaklar ve kırılmalar
- Donatı korozyonu
- Beton kaplamanın yüksek sıcaklık farkı etkisi ile kaplamanın kıvrılması

Beton kaplamalarda bozulmaların büyük çoğunluğu su etkisi ile oluşmaktadır. Suyun içerisinde eriyik halde bulunan maddeler betonun içine sızarak betonun çatlamasına ve parçalanmasına neden olmaktadır. Çatlaklardan sızan suların yol açtığı pompaj etkisi ile çatlakların oluşumu artmaktadır. Pompaj etkisini engellemek için kaplamada oluşan çatlakların ve derz bölgelerinin tamir edilerek suyun temel tabakasına ulaşması engellemelidir. (Baradan vd., 2010).

Betonda yaşanan bir diğer bozulma türü de kaplamanın üst bölümü ile alt bölümü arasında oluşan sıcaklık farklılıkları nedeni ile oluşan şekil değiştirmelerdir. Oluşan bu şekil değişimleri nedeniyle beton kaplamalarda çatlamalar ve ayrılmalar oluşmaktadır. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için ek köşe donatıları konulmalı, betonun rötre riski azaltılmalı ve yassı agreganın kullanımından kaçınılmalıdır.

Betonun geçirimsiz olarak üretilmesi beton kaplamada bozulmalara neden olan birçok etkiye karşı çok önemli bir önlemdir. Geçirimsiz beton üretmek için malzemeler doğru seçilmeli ve doğru oranlarda kullanılmalıdır. Ayrıca betonun yerleştirmesi ve priz sonrası kür işlemlerinin uygun olarak yapılması çok önemlidir. Beton kaplamaların trafik ve çevre etkilerine maruz kalan en hassas bölümü beton kaplama yüzeyidir. Bu nedenlerle kaplamanın yüzey direncinin yüksek olması için serim, perdahlama, yüzey işlemlerinden kür uygulamasının doğru yapılması gereklidir (Baradan, 2010).

2.1.3.Esnek kaplamalar

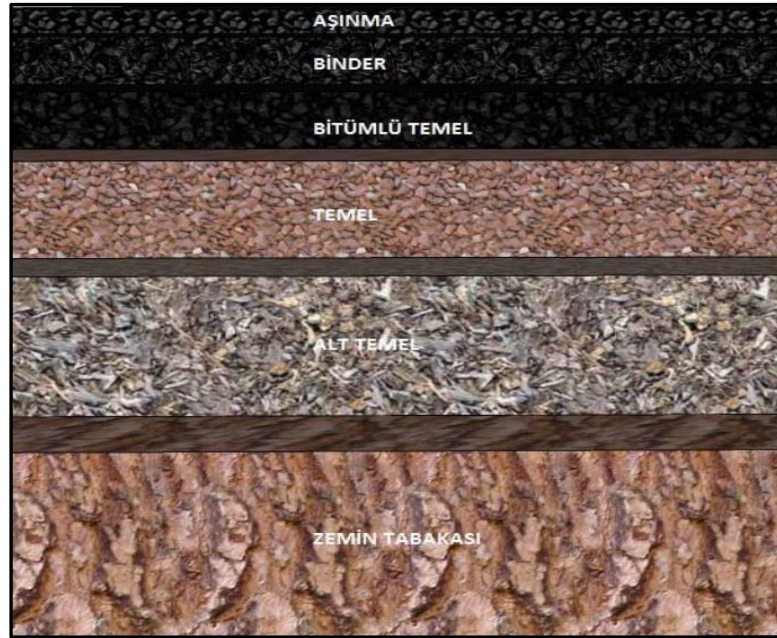
Esnek kaplamalar, taşıtlar için gerekli performansa ve taşıtların yarattığı gerilmelere karşı yeterince dayanıma sahip olacak şekilde tasarlanan bitüm esaslı bir kaplama türüdür. Esnek kaplamalar genel olarak sathi kaplama ve BSK kaplama olmak

üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Esnek üstyapılar hakkında Şekil 2.6’da sathi kaplama ve BSK üretim aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.6.Esnek üstyapı uygulamaları: (a) Sathi kaplama uygulaması (b) BSK uygulaması (Karaşahin, 2014).

Düşük standartlı kaplamalar, trafik hacminin düşük olduğu (günlük ağır taşıt trafiği 500’den az) yollarda ekonomik olup yeterli performansı sağlayabilmektedirler. Ancak yüksek standartlı karayolu ve otoyollarda ise BSK kaplamalar yapılmalıdır. Esnek kaplama kesiti Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7.Esnek üstyapı en kesiti (Kara, 2012).

Esnek üstyapıların rijit üstyapılara göre aşağıdaki avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.3’te verilmiştir (Ağar, vd.,1998; Giriş, 2007).

Çizelge 2.3. Esnek kaplamaların özellikleri (Ağar, vd.,1998; Giriş, 2007)

Avantajlar	Dezavantajlar
İlk yapım maliyetlerinin düşük olması	Rutin bakım masraflarının yüksek olması
Bakım onarım işlemlerinin kısa sürmesi	Düşük yorulma dayanımı
Trafığe hızla açılma kolaylığı	Dışa bağımlı üretim
	Gece görünüşü zorluğu
Kademeli inşaatla izin vermesi	İnşaat mevsiminin kısa olması
	Kimyasal maddelere karşı düşük dirençli olması

BSK kaplama üretiminin dışa bağımlılığını gösteren TÜPRAŞ 2015 yılı verilerine göre 2.9 milyon ton bitüm satışı yapılmıştır. Bitümün satış fiyatlarının yaklaşık 1200 TL/ton olduğu hesabıyla ülkemizde yalnızca 2015 yılında BSK kaplama üretimi amacıyla kullanılan bitüme 3.6 milyar TL ithalat bedeli harcanmıştır (TÜPRAŞ, 2015).

2.1.4. Bitümlü kaplamalardaki bozulma türleri

BSK kaplamalardaki bozulmalar kalıcı şekil değiştirme, kırılma ve ayrışma olmak üzere üç ana grupta toplanabilir. Bozulmaların genel nedenlerini ise temel tabakalarının ve tabii zeminin taşıma gücü yetersizliği, trafiğin aşındırıcı etkileri, iklim koşulları ve malzeme özelliklerinin yetersiz olmasıdır. BSK kaplamalarda bozulmaları ise aşağıdaki nedenlere bağlamak mümkündür (Karaşahin, 2014; KGM,1998).

Çizelge 2.4. Esnek kaplamalarda oluşan bozulmaların genel oluşum sebepleri (Karaşahin, 2014; Taşdemir ve Ağar, 2005).

Malzeme Kaynaklı bozulmalar	Yapım kaynaklı bozulmalar
İyi seçilmemiş ve iyi kontrol edilmemiş agrega tane dağılımı	Yetersiz sıkıştırma veya aşırı sıkıştırma
Karışımda yüksek oranda yassı malzeme kullanılması	Serme ve sıkıştırma sıcaklığının düşük olması
BSK karışımının hatalı yapılması	Yapım sırasında meydana gelen segregasyon
Sağlam olmayan agrega kullanılması	Astar veya yapıştırma tabakasının gerekli özenle imal edilmemesi
Cilalanma direnci düşük agrega kullanılması	Granülometrinin mevcut standartlarda belirlenmiş değerlere uymaması
Bitüm ve filler yüzdesinin yanlış belirlenmesi	Yetersiz karıştırma ve sıcaklık kontrolü

2.1.4.1.Şekil değiştirmeler

Karayollarımızda sıklıkla görülen bozulmalardan birisi olan şekil değiştirmeler, genel anlamda, kaplama yüzeyinin orijinal kotuna göre değişikliğe uğramasıdır. Şekil değiştirmeler, alt tabakaların (temel, alt temel ve tabii zemin) bağıl hareketlerinden meydana gelebildiği gibi, esnek kaplamanın dayanımının yetersizliğinden de oluşabilmektedir.

Yük altında meydana gelen şekil değiştirmeler, elastik ve plastik şekil değiştirmeler olmak üzere ikiye ayrılır. Kaplamanın dayanımı yüksek olduğu sürece oluşan toplam şekil değiştirme az olacağı gibi bu şekil değiştirme elastik kısmı fazla, plastik kısmı çok azdır. Kaplama dayanımının çok düşük olması durumunda ise durum tersine dönerek plastik şekil değişimi kolaylaşmakta ciddi hasarlar ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklığa sahip iklim koşullarında BSK kaplamasının termoplastik özelliğinden dolayı dayanımı düşürürken yük tekrerrü ile birlikte plastik şekil değişimlerinin daha da artmasına neden olur. Oluşan plastik şekil değiştirmeler esnek kaplama yüzeyinde oturmalar, yerel çökmeler, tekerlek izi oluşması, ondülasyonlar, kabarmalar, yığılmalar ve lastik deseni oluşması gibi bozulma ve hasarların meydana gelmesine yol açarlar (KGM, 1998; Karaşahin, 2014). Özellikle esnek kaplamalarda trafik lambalarında ve ağır taşıt trafiğin seyrettiği şeritte karşılaşılan ciddi tekerlek izi oluşumları sıkça karşılaşılan kalıcı şekil değiştirme sorunlarından birisidir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Esnek üstyapıda tekerlek izi oluşumu (Karaşahin, 2014).

2.1.4.2. Çatlamalar

BSK kaplamalarda oluşan çatlamaları, trafik etkisine bağlı olan çatlamalar ve trafik etkisine bağlı olmayan çatlamalar olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Trafik etkisine bağlı çatlamalar ağır dingil yüklerinin tek veya fazla sayıda geçmesi sonucunda

oluşmaktadır. Tekrarlı yüklerin fazla sayıda geçmesi durumuna yorulma çatlakları denir. Birinci durumda ağır trafik yükünün oluşturduğu gerilme eğilme-çekme direncini aşmaktadır. Yorulmada ise direnç aşılmamakta, fakat dingil yüklerinin doğurduğu kalıcı şekil değiştirmeler, tekrar sayısının fazla olmasından dolayı birikime maruz kalmaktadır. Ağır dingil yüklerinden hariç, taşıtların ani hızlanma ve yavaşlamaları da çatlamlara yol açabilmektedir. Çatlamlar trafik yüklerine bağlı olmaksızın sıcaklık farklılıkları ve kaplamanın su muhtevasının değişimi ile de oluşabilirler. Bu etkiler tek başlarına veya dingil yükleri ile birleşerek kaplamayı çatlatabilirler. Kaplamalarda çok çeşitli çatlama tipleri gözlemlenebilir. Çatlakların esnek kaplama yüzeyinde oluşan örnekleri; timsah sırtı çatlaklar, büzülme çatlakları, kenar çatlakları, derz çatlakları, enine çatlaklar ve yansıma çatlakları gibi bozulma ve hasarların meydana gelmesine yol açarlar (Karaşahin, 2014; Taşdemir ve Ağar, 2005). Kaplamada oluşan çatlak türüne örnek verilmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Timsah sırtı çatlak oluşumu (Karaşahin, 2014).

2.1.4.3. Ayrışmalar

Agrega danelerinin iklim ve trafiğin mekanik etkisi ile kaplamadan koparak ayrılmasıdır. Ayrışma, BSK kaplamalı karayollarımızda çok sık görülen bir bozulma türüdür. Ayrışmaya yol açan başlıca nedenler; kötü agrega tane dağılımı, kirli ve zayıf agrega kullanılması, düşük bitüm yüzdesi, plentte karışımın uygun şekilde hazırlanmaması, sıcak karışımın serim sonrasında yeterince sıkıştırılmaması, iklim koşulları ve buz çözücü kimyasalların etkileri olarak sıralanabilirler.

Ayrışma bunlardan bir kaçının bir arada bulunması durumunda trafiğin etkileri ile birlikte oluşur. Kaplamanın ömrünü kısaltır ve yolun seyir konforuyla seyir güvenliğini azaltır. Başlıca ayrışma tipleri folluk tipi oyuklar, sökülmeler, soyulma, kaplama tabakasının kayganlığının artması, cilalanma ve kasma problemleridir

(KGM,1998). Şekil 2.10’da kaplamada oluşan ayrışma problemi görülmektedir (Karaşahin, 2014).



Şekil 2.10. Sökülme ve soyulmaların genel görünümü (Karaşahin, 2014)

2.2. Kaplama Performansının İyileştirilmesinde Lif Katkılarının Kullanımı

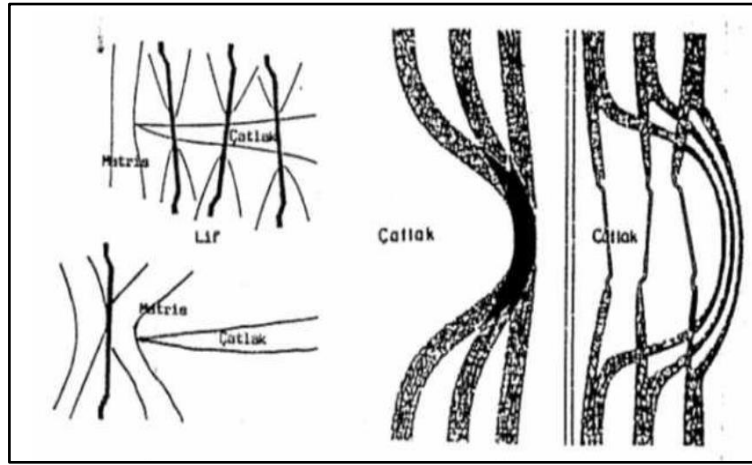
Lif malzemeleri bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan, doğal yollarla elde edilen veya yapay olarak üretilebilen, uzunluğu, esnekliği ve dayanıklılığı olan malzemelerdir. Genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki tür lif vardır. Hayvan ve bitki lifleri ile mineral doğal liflerdir. Yapay lifler ise, aranan belirli özellikleri taşıyacak biçimde özel olarak geliştirilen ve bu amaçla üretilen maddelerdir (Türker, 1992)

Günümüzde kullanılan liflerin geçmişten günümüze lifler çok uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Tarihi yapılarda kerpiç ve alçı gibi malzemelerle birlikte kullanılan keten, kenevir, at kuyruğu kılı, keçi kılı gibi doğal lifler yapı malzemesi olarak kullanılmışlardır (Sarı,2013). Yapay olarak üretilen lifler ilk defa 19. yüzyılın sonunda ortaya çıkmasına rağmen, bu liflerin endüstriyel olarak kullanılması bundan çok sonraları yaygın kullanılmaya başlamıştır (Chawla, 1998).

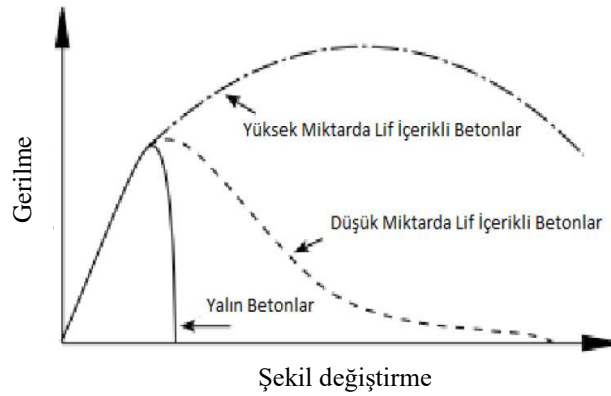
Liflerin betonda kullanımı açısından değerlendirildiğinde betonun mekanik olarak anizotrop davranış göstermesi, gevrek bir malzeme olması ve buna bağlı olarak kırılma enerjisinin düşük olması olumsuz özelliklerindendir. Betonun kırılma süreci incelendiğinde çimento agrega ara yüzeyindeki süreksizliklerin çatlak oluşumunda ve yük aktarımında etkin rol oynadığı yapılan çalışmalardan görülmüştür. Çimento agrega ara yüzeyindeki bu süreksizliklerden kaynaklı gerilme dağılımı ve çatlak oluşumu kullanılan lif katkıları ile desteklenerek çatlak oluşumunun ilerlemesi engellenmektedir Böylece çatlağın ilerlemesi için daha yüksek gerilme değerleri gerektiğinden kompozitin mekanik özellikleri çekme gerilmesi anlamında iyileşmektedir. Bu durum

beraberinde betonun daha sünek davranmasına ve kırılma sırasında betonun bütünlüğünün hızla bozulmasına engel olmaktadır.

Fırat (1996) çalışmasında liflerin çatlak gelişimi mekanizmasında çatlakların uçlarına yerleşerek ara yüzeyde oluşacak gerilmelerin liflerin üzerinden geçerek çatlamamış beton kısımlarının dayanımından yararlandığını ifade etmiştir. Bu durum Şekil 2.11’de açıkça görülmektedir. Çatlakların oluştuğu bölgede lif takviyesi sayesinde taşıma gücü artırılarak, betonun mühendislik özellikleri iyileştirilmektedir. Şekil 2.12’de lif etkisinin betonlarda gerilme-şekil değiştirme ilişkisi üzerindeki etkisi görülmektedir (Sarı, 2013).



Şekil 2.11. Liflerin gerilme kuvvetlerini bir köprü gibi aktarması (Fırat, 1996).



Şekil 2.12. Lifli betonun tipik gerilme şekil değiştirme diyagramı (Sarı, 2013).

Kullanım alanları ve farklı mekanik özellikleri bakımından birçok lif türü bulunmaktadır. Bu liflerin bazılarının özelliklerine ait sınıflandırma şu şekilde sunulmuştur (Sarı, 2013). Farklı türdeki liflere ait fiziksel özellikler Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Farklı türdeki liflere ait fiziksel ve mekanik özellikler (Sarı, 2013).

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (10^3 , MPa)	Maksimum Uzama (%)	Özgül Ağırlık
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0.6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-3.5	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
Polietilen	690	0.14-0.4	10	0.95
Polipropilen	552-759	3.5	25	0.9
Pamuk-Yün	414-621	6.9	10-25	1.5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0.6	2.7
Çelik	276-2760	200	0.5-3.5	7.8

2.2.1. Doğal lifler

Bu liflerin en önemli özellikleri kolayca elde edilebilmeleridir. Ancak bu liflerin alkali ortamda parçalanma eğiliminde oldukları için betonun alkalinitesini azaltacak katkıların kullanılması gereklidir. Bilinen en eski doğal lifler saman ve at yelesi olup Portland çimentosuyla kullanılan diğer doğal lifler ise bambu, hindistan cevizi, şeker kamışı, jüt ve ahşap gibi liflerden oluşmaktadır (Aral, 2006).

Beton karışımlarına katılan en yaygın doğal lifler saman ve at kılıdır. Modern teknoloji ile üretilen doğal liflerin bazıları çeşitli bitkilerden ekonomik biçimde üretilmektedir. Jüt ve bambu liflerinden üretilen doğal liflerin üretimi çok az enerji gerektirir (Türker, 1992). Doğal lifler; bitkisel, hayvansal ve madensel olmak üzere 3 ana grup olarak değerlendirilmektedir.

2.2.2. Metalik lifler

Metaller başta mühendislik uygulamaları olmak üzere çok geniş bir alanda kullanılmaktadırlar. Metalik lifler de mekanik ve fiziksel özelliklerin yüksek değerlerde bir arada olmasını sağlamaktadırlar. Metallerin en önemli özelliklerinden olan yüksek plastik şekil değiştirme yeteneklerinden dolayı günümüzde sanayi ve inşaat sektöründe geniş bir uygulama sahasına sahiptirler. Bu çalışma alanlarından bazılarını örnek

vermek gerekirse; tunç lifler lambalarda, bakır ve alüminyum lifler elektrik uygulamalarında, çelik lifler öngerilmeli yapılarda, çelik lifler kablo olarak asma köprülerde, süper iletkenlerde ve piyano, violin gibi çeşitli müzik aletlerinin tellerinde kullanılmaktadır (Aral, 2006; Chawla, 1998). Metalik liflerden en çok kullanılanları paslanmaz çelik liflerdir. Liflerin paslanmaz çelikten üretilmesi çeliğin korozyona uğrama riskini azaltmaktadır. Çeliğin yüksek elastisite modülü ve dayanımı çelik lifi diğer tüm liflerden daha üstün kılar. Beton takviyesinde kullanılabilecek çelik lifleri sınıflandıran ve özelliklerini belirten Amerikan Standardı ASTM A 820-96' da çelik lifler 4 değişik şekilde sınıflandırılmıştır. Çizelge 2.6'da bazı metalik liflerin fiziksel özellikleri verilmiştir:

- Tip 1: Soğuk çekilmiş çelik lifler,
- Tip 2: Plakadan kesilmiş çelik lifler,
- Tip 3: Haddelenip çekilmiş çelik lifler,
- Tip 4: Diğer lifler

Çizelge 2.6.Bazı metalik liflerin tipik özellikleri (Chawla, 1998; Aral, 2006).

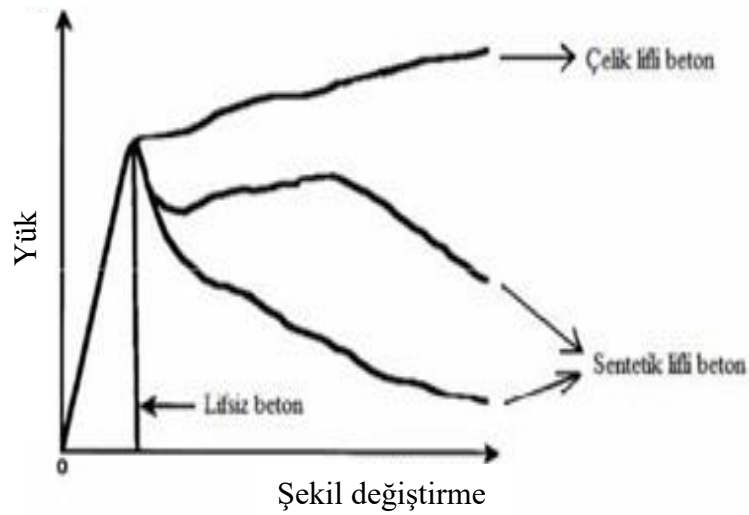
Metal	Özgül Ağırlık	Ergime Sıcaklığı (°C)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Al	2.7	660	70	300
Be	1.8	1350	310	1100
Cu	8.9	1083	125	450
Mo	10.2	2625	330	2200
W	19.3	3410	350	2890 (< 250µm) 3150 (< 125 µm) 3850 (< 25 µm)
0.9 % Karbon Çeliği (0.1 mm çapında)	7.9	1300	210	4000
Paslanmaz çelik (0.05 mm çapında)	7.8	1535	198	2400

Çelik lifli betonların üretilmesindeki ana amaçlar malzeme tokluğu, darbe yüklerine karşı direnci, eğilme dayanımı gibi özelliklerin artırılmasına yöneliktir. Çelik lif donatılı betonları karakterize eden en önemli özellikler, tokluk ve dinamik yüklere karşı dayanımdır (Yerlikaya, 2003). Çizelge 2.7'de TS EN 14889'a (2006) göre çelik lif sınıfları ve tipleri şu şekilde verilmektedir.

Çizelge 2.7.TS EN 14889’a göre çelik lif sınıfları.

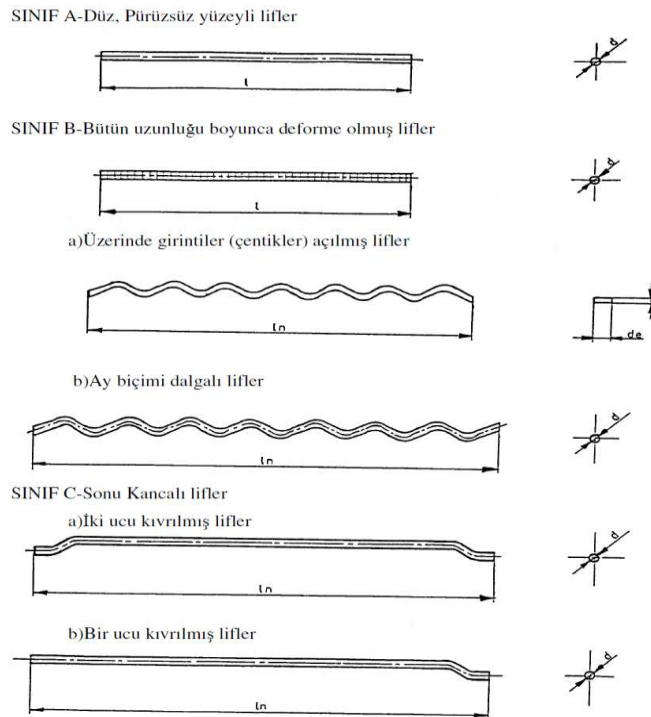
Çelik lif sınıfı		
A Sınıfı	B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş lifler	C Sınıfı: Sonu kancalı lifler
Düz, pürüzsüz yüzeyle lifler	Tip 1: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış lifler	Tip 1: İki ucu kancalı lifler
-	Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) lifler	Tip 2: Tek ucu kancalı lifler
-	Tip 3: Ay biçimi dalgalı lifler	-

Çelik liflerin genellikle çapları 0.13-1.0 mm arasında olup, narinlikleri ise (L/D) 30 ile 150 arasında değişmektedir. Lif boyları 13 mm den 70 mm ye kadar, beton katkısı olarak kullanılan lif hacmi ise genellikle % 0.5 ile % 3 arasında değişmektedir. Betonun zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan çelik liflerin tanımı ACI 544 (1988)’e göre lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen boy/çap oranı olarak kabul edilmektedir. Beton takviyesinde genellikle daire en kesitli ve dikdörtgen en kesitli çelik lifler kullanılmaktadır. Çelik liflerin yük etkisiyle kopmadan, matristen sıyrılmalarına rağmen çekme dayanımlarının en az 345 MPa olması istenir. Uçları kancalı üretilen çelik liflerin sıyrılmaya karşı dirençleri düz olanlara göre daha yüksek olmaktadır. Şekil 2.13’de ACI standartlarına göre lifli ve lifsiz betonların eğilme dayanımında yük-şekil değiştirme ilişkisi görülmektedir. Buna göre lifsiz betonlar kırıldıktan hemen sonra özelliğini yitirmekte, lifli betonlarda lif türüne ve yükleme durumuna göre bir süre daha yük taşıyabilmektedir. Gerilme – şekil değiştirme ilişkisi ile yük – şekil değiştirme ilişkisi benzerdir.



Şekil 2.13. Lifli ve lifsiz betonların yük-deformasyon ilişkisi (ACI, 1988).

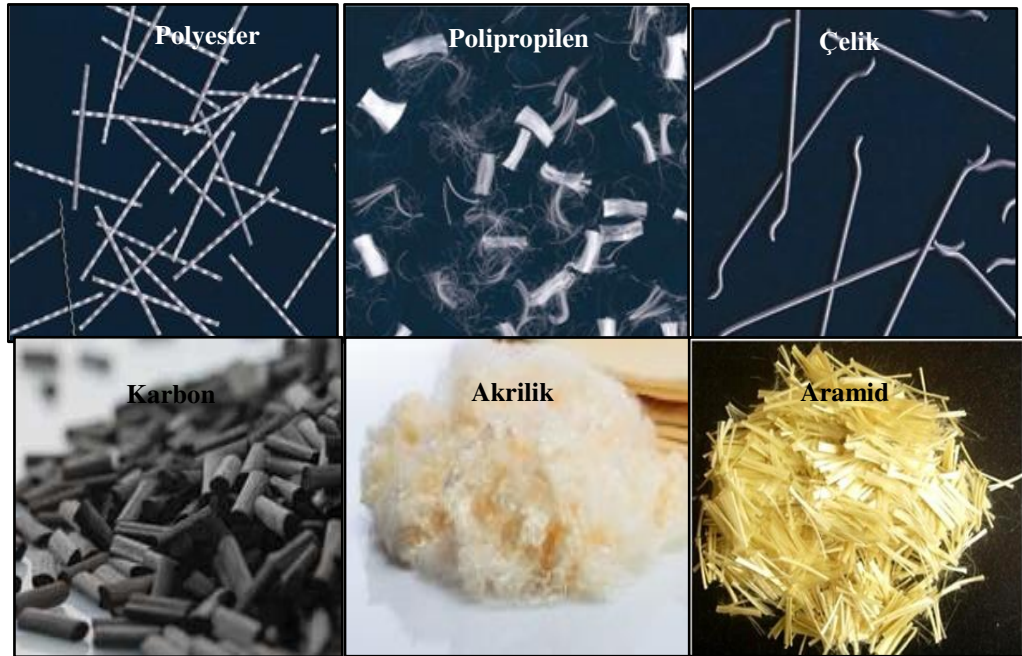
Sert çekilmiş düşük karbonlu çelikten üretilen çelik liflerde, yüksek ve üniform çekme gerilmesiyle düşük uzama özelliği bir arada bulunmaktadır. Beton içerisinde bulunan liflerin iç gerilmeleri kırılma ve kopma olmaksızın taşımaları önemlidir. Bu tip lifler 1100 MPa çekme dayanımı ile bunu gerçekleştirme kapasitesine sahiptirler. Şekil 2.14’te çelik liflerin görünüşleri verilmiştir.



Şekil 2.14. Çelik liflerin görünüşleri (TS EN 14889, 2006).

2.2.3 Sentetik lifler

Sentetik lifler petrokimya ve tekstil endüstrisinde malzemelerin gelişimi sonucunda ortaya çıkan yapay liflerdir. Bu liflerin üretiminde kullanılacak malzemelerin sıvı veya yarı sıvı hale getirilmesi sonucunda iki yöntem halinde yaş ve kuru çekme gibi farklı işlemler ile lifler üretilmektedir (Aral, 2006). Sentetik liflerin betondaki alkali ortama karşı kalıcılık özelliği yüksek olan bu liflere örnek olarak akrilik, aramid, naylon, polyester, polietilen ve polipropilen vb. yapay liflerdir. Sentetik liflerin genel olarak çekme dayanımlarının çok yüksek olmasına rağmen elastisite modülü değerleri aramid lifi hariç düşük değerlerdedir. Bu sentetik liflerin tekil ya da lif hamuru halinde genellikle boyları 12-50 mm arasında veya 1-2 mm boyutunda ve çapları mikron düzeyinde olan çeşitli tipleri bulunmaktadır. Uygulanacak yerin ihtiyacına göre lif tipleri değiştirilebilir. Sentetik lifin kalitesini belirleyen özellik lifin narinlik (L/D) değerine bağlıdır. Sentetik lifler genellikle beton karışımlarında % 0.1 ile % 0.8 arasında çok değişik oranlarda kullanılmaktadır (Sarı, 2013). Günümüzde uygulamada en çok kullanılan sentetik liflere ait bazı liflerin görünüşleri Şekil 2.15’de verilmiştir.



Şekil 2.15.Sentetik liflerin genel görünüşleri.

2.2.3.1.Akrilik Lifler

Akrilik lifler lif katkılı betonlarda asbestlerin kullanımının yasaklanması ile geliştirilmiştir. Bu Lifler, % 85 oranında akronilit özellik göstermesi halinde akrilik lif olarak tanımlanmaktadır. Bu lifler sudan daha yoğun olmakta ve diğer polimer liflere göre daha yüksek elastisite modülüne sahiplerdir (Aral, 2006). Akrilik liflerin düşük miktarda beton karışımlara eklendiğinde plastik rötre etkisinin azaltılmasına yardımcı olduğu belirtilmiştir (Sarı, 2013).

2.2.3.2.Aramid Lifler

Sahip olduğu yüksek elastisite modülü sayesinde lif katkılı betonların mekanik özelliklerini iyileştirmektedirler. Liflerin kullanımında en önemli kısıtlama unsuru bu lifin diğer liflere göre yüksek maliyetidir. Bu lifler halat formuna sahiptirler (Shah,1995). Aramid lifler birim kütlelerine göre cam liflerden iki buçuk, çelik liflerden beş kat daha kuvvetli özelliklere sahiptirler (Sarı, 2013).

2.2.3.3.Naylon Lifler

Naylon 6'dan üretilirler. Uygulamada sıkça kullanılan bu lif türünde çeşitli uzunluklarda ve tekil lif şeklinde bulunan bu liflerin boyları 19 mm civarındadır (Aral, 2006). Günümüzde betonda lif olarak kullanılan naylon 6 ve naylon 6.6 olmak üzere iki farklı lif tipi vardır (Sarı, 2013).

2.2.3.4.Polyester Lifler

Bu lifler etil asetat polimerlerinden üretilmiş olup fiziksel ve kimyasal özellikleri üretim tekniklerinin değişimiyle yüksek elastisite modülüne ve betonla iyi bir kenetlenme özelliğine sahiptir. Liflerin etkileşim özellikleri beton uygulamaları için çok önemlidir (Shah, 1995). Polyester liflerin yüksek sıcaklığa karşı dirençleri zayıftır. Polyester liflerin hacimce % 0.1 oranında kullanılması durumunda betonda plastik rötreği engellediği belirtilmiştir (Sarı, 2013).

2.2.3.5.Polipropilen Lifler

Polipropilen lifler ilk olarak 1960'larda beton karışımlarında kullanılmıştır. Polipropilen liflerin tekil veya hamur biçiminde uygulamaları bulunmaktadır. Liflerin uzunlukları 3-50 mm arasında değişmekte olup kısa lifler hamur uzun lifler tekil halde bulunmaktadır. Polipropilen hamuru, polietilen hamurundan daha düşük dayanıma sahiptir (Shah, 1995). Polipropilen liflerin hidrofobik oluşu betonun içyapısında zayıf bağlar meydana getirmesine neden olmaktadır. Polipropilen liflerin düşük çekme

gerilmesi ve düşük elastisite modülü bu tip liflerin plastik şekil değiştirme yapmalarını kolaylaştırmaktadır (Sarı, 2013).

Polipropilen lifler hasır demir, metal elyaf ve kümes filesi gibi alternatif donatı sistemleri ile karşılaştırıldığında en hafif mikro donatı sistemi olarak uygulanmaktadır. Polipropilen lifin özgül ağırlığının düşük olması nedeniyle bu liflerin kullanıldığı kompozitlerde hafifleme sağlanır (Karahan, 2006).

Beton veya sıvada kullanılan polipropilen lifin en önemli etkisi, uygulamadan sonraki ilk birkaç saat içinde plastik rötreten kaynaklı oluşacak çatlakları kontrol altına almasıdır. Bu plastik rötre olayı özellikle su ve çimento arasında başlayan hidrasyonun ve terlemenin varlığına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır (Rossi, 2000; Qian, vd, 2000).

2.2.3.6. Cam lifler

Cam liflerinin beton karışımlarında kullanımı yaygın değildir. Betonun alkalitesi bu lifleri zamanla çözülmesine yol açmaktadır. Bu alkaliteye karşı zirkon cam lifi gibi dayanıklı camlarının üretilmesine başlanmıştır (Türker, 1992). Cam lifler sertlik derecesi yüksek ve aşınmaya karşı dirençli olan esnek, hafif ve düşük maliyetli lifler olarak tercih edilmektedirler. Cam lifler kendi içlerinde sınıflara ayrılırlar. Bütün cam lifler elastisite modüllerinin benzer olmalarına karşın, farklı dayanım değerlerine sahiptirler ve çevresel etkilere karşı dirençleri de farklıdır. E tipi lifler düşük çekme dayanımına ve kimyasal dirence sahip olan liflerdir. S tipi lifler daha yüksek dayanıma sahip ve pahalı liflerdir. C tipi liflerin korozyon direnci gerektiren riskli ortamlarda kullanılması uygundur (Sarı, 2013). Çizelge 2.8’de bazı cam lifi tiplerinin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir. Şekil 2.16’da cam liflerin görünüşü verilmiştir.

Çizelge 2.8. Bazı cam liflerine ait fiziksel ve mekanik özellikler (Chawla, 1998).

Cam Lifi Tipi	Özgül Ağırlık	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E	2.54	1.7-3.5	69-72
S	2.48	2.0-4.5	85
C	2.48	1.7-2.8	70
Cem-FİL	2.7	-	80



Şekil 2.16. Cam liflerin görünüşü.

2.2.3.7. Karbon lifler

Karbon lifler ipliksi bir tür plastik madde olup akrilik elyafın belli proseslerden geçirilmesiyle elde edilen sentetik liflerdir. Karbon liflerin yüksek dayanıklılık, düşük yoğunluk, düşük sürtünme ve düşük ağırlık özelliklerinin yanında karbon liflerin üstün bileşimi ile uzay ve havacılık sanayii, savunma, otomotiv sanayisinde, spor gereçlerinde (tenis raketi, board), yapı güçlendirme alanlarında, enerji depolamada tercih edilen bir lif türüdür. Karbon lifin çelikten 4.5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklı bir malzemedir. Karbon liflerin genel özellikleri yüksek mukavemetli olması, renklendirilme özelliği, kolay şekillendirilme özelliği, korozyona karşı dayanım ve titreşim sönümleme özellikleri karbon liflerin en önemli özellikleridir (Akcausa, 2017).

3.TEZ KONUSUYLA İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

3.1.Lif Katkılı Beton Kaplama Tasarımı ile İlgili Çalışmalar

Beton yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen yüklerin karşılanmasını sağlamak ve tabana azaltarak iletilmesi görevini üstlenmektir. Betonun mekanik özelliklerinden dolayı trafikten gelen yükleri doğrudan karşılama kapasitesi esnek kaplamaya göre daha yüksektir. Beton, çekme dayanımı düşük bir yapı malzemesi olduğu için beton kaplamaların çelik donatı ile güçlendirilmesi gerekir.

Bir tekerlek yükü beton kaplama üzerinden geçerken sistem plak şeklinde davranır ve kesit üzerinde eğilme tesirine bağlı olarak çekme ve basınç gerilmeleri ortaya çıkar. Tekerlek geçtikten sonra gerilmeler ortadan kalkmaktadır. Özellikle yoğun kamyon trafiği taşıyan bir beton yolda oluşan bu tekrarlı yüklemeler malzeme üzerinde kısa zaman aralıkları ile sürekli olarak malzeme üzerinde yorulma etkisine neden olurlar. Beton kaplama üzerine etkiyen bu dinamik zorlamalar malzemenin aşınmaya, eğilmeye ve basınç gerilmelerine karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Beton yol kaplamaları sıcaklığın artmasına veya azalmasına bağlı olarak genişlemekte veya büzülmemektedir. Buna ek olarak kaplamanın alt ve üst yüzeyleri günlük ve mevsimlik sıcaklık ve nem farkları nedeniyle eğilme ve bükülmelere uğramaktadır. Bu nedenle kaplamada oluşturulacak yapay derz boşlukları ile kaplamanın genleşme büzülmesine bağlı olumsuz etkiler azaltılmaktadır (Ağar vd., 1998).

Lif katkılarının beton kaplamalarda kullanılması konusunda geçmişten günümüze çok önemli uygulamalar ve araştırmalar bulunmaktadır. Lif takviyeli betonların yol kaplama betonu olarak kullanımı 1970'li yıllarda başlamıştır. Lif takviyeli beton yolların ve takviye tabakaların sahadaki uygulamaları konusunda birçok araştırma yapılmıştır (ACI, 1988). Bu kaplama uygulamaları; köprü plak kaplamaları, karayolu kaplama ve kaplama takviye tabakaları, havaalanları, taksi yolları, havayolu apronları ve endüstriyel zemin kaplamalarını da içermektedir. 1984'ten beri, Avrupa'da endüstriyel alanlarda 1 milyon m³ lif içerikli beton kaplama uygulamaları yapılmıştır (Lankard ve Shrader, 1983).

Beton yollara etkiyen trafik yükleri esnek üstyapılara kıyasla temel tabakasına ve zemine daha homojen bir şekilde aktarılmaktadır. Çelik lif katkılı beton kaplamalar

trafik yükleri altında geleneksel beton kaplamalara göre daha farklı özellikler göstermektedir. Trafik yükleri altında beton içinde ortaya çıkan gerilmeler, malzeme içindeki mikro çatlakların oluşması nedeniyle düzensiz bir şekilde gerçekleşmektedir. Beton karışımına katılan çelik, polipropilen ve farklı lif türleri agregaların arasını dolduran harç fazı matrisinin içinde gerilmelerin aktarılmasına yardımcı olan küçük köprüler gibi davranırlar. Çatlak oluşumu sonrası betonun kazanmış olduğu bu davranış, elastik zemine oturan beton yol döşemelerinde çatlak oluşumunu azaltmaktadır. Beton yol tasarımında donatının en önemli etkisi, betona sağladığı süneklik ve enerji yutma kapasitesindeki büyük artıştır. Araç trafiğine açık yol betonlarında ve köprü kaplamalarında, betonun darbe tesirlerine, tekrarlı yüklere ve çevre koşullarına karşı yeterli dayanıma sahip olması istenmektedir. Çelik lif donatılı betonun darbe dayanımı, normal betona oranla 15-20 kat daha fazladır. Betonun şekil değişimi yapma özelliği arttığından, ani kırılmalar ortaya çıkmamaktadır. Ayrıca zorlu iklim koşullarında ortaya çıkan termal şekil değişimine bağlı çatlak oluşumu riski ve yüzey bozulmaları lif kullanımı ile azalmaktadır (Bolat, 2009).

Çelik lif donatılı beton kaplamalar özellikle ağır trafiğin büyük sorunlara yol açtığı otoyollarda, geleneksel BSK kaplamalı yollara alternatif olarak kabul edilmektedir. Ülkemizde çelik lif katkılı betonlar ile tamir edilen köprü derzleri incelendiğinde bu elemanların yüksek performansla hizmet verdiği görülmüştür. Bu elemanların bakım masrafları, araçlarda oluşturduğu hasarlar ve trafik güvenliği göz önüne alındığında, çelik lif katkılı betonların daha ekonomik olduğu görülmektedir (Bozkurt ve Karakurt, 2016).

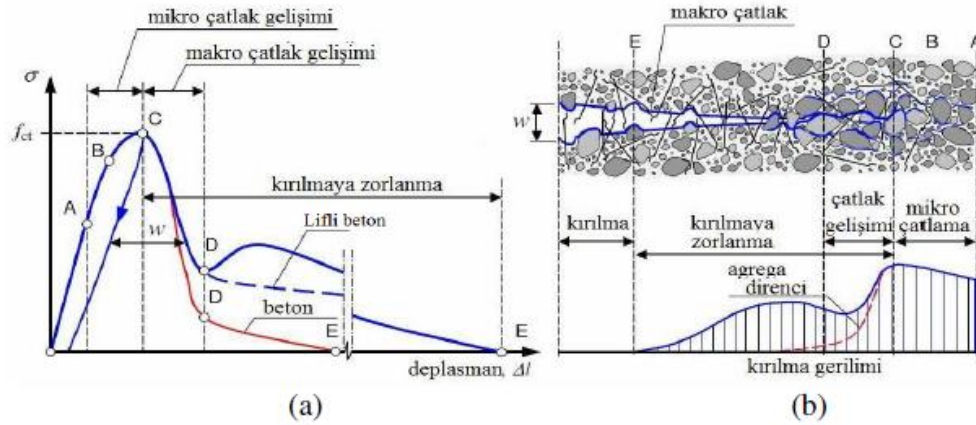
Lif katkılı betonların karayolunda kaplama olarak kullanımının yanında endüstriyel yapılar, yaya kaldırımları, köprüler, tünel ve kanal kaplamaları, hidrolik yapılar, borular, patlamaya karşı dirençli yapılar, sığınaklar ve ince kaplamalar gibi çok değişik uygulama alanları bulunmaktadır (ACI, 1988). Lif katkılı beton kaplamaların üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli özelliğin liflerin beton karışımı içinde homojen olarak dağılması ve bu dağılım özelliğinin beton yerleştirildikten sonrada devam etmesidir. Beton kaplamalar beton teknolojisinin hızla ilerlemesi ve üretim tekniklerinin gelişmesi nedeniyle yeni yapılacak yol kaplamaları için BSK kaplamalara önemli bir alternatif haline gelmiştir (THBB, 2003).

Karahan (2006) yaptığı çalışmada beton kaplama tasarımında kullandığı liflerin özelliklerinden bahsetmiştir. Bu çalışmada lif katkılarının genel kullanım alanları konusunda ve liflerin kimyasallara karşı dayanıklı malzemeler olduğu belirtilmiştir. Çalışmada kullandığı polipropilen liflerin su emme özelliğinin düşük olmasının betonun (s/ç) oranını etkilemediğini ve zararlı kimyasallara karşı dirençli oldukları için beton kaplamanın kalıcılık özelliklerini iyileştirdiği vurgulanmıştır. Polipropilen lifli beton karışımların kılcal çatlamları, beton geçirgenliğini, plastik rötre çatlaklarını ve yüzeyde oluşan terlemeyi azalttığı ifade edilmiştir. Polipropilen lif katkılı beton kaplamaların aşınma direncini arttırdığı ve betonun ayrışmasını engelleyerek homojen bir şekilde yerleşmeye yardımcı olduğu belirtilmiştir (Karahan, 2006).

Ülkemizde lifli betonlar üzerine yapılan ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda beton içerisine cam elyaf liflerin katılmasıyla başlamıştır. Daha sonraları farklı lif tipleri kullanılarak beton dayanımı üzerine liflerin mekanik etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda süreksiz dağılmış bulunan liflerin genellikle betonda oluşan çatlakları en aza indirerek betonun süneklik özelliğini artırmakta olduğu görülmüştür (Cimilli, 1978).

Çelik liflerin betonda kırılma sırasında oluşacak büyük şekil değişimlerinin oluşmasını önlediği çalışmalarda belirtilmiştir. Buna karşılık betonda sentetik lifin kullanılması durumunda üzerlerine gelen yükü daha büyük bir alana dağıtmaktadır. Sentetik lifler yük altında plastik bir davranış göstermesi nedeniyle büyük şekil değişimlerini önlemede çelik lifler kadar etkili olamadıkları belirtilmiştir (Abtahi vd., 2009).

Betonda çatlaklar mikro düzeyde başlayıp ve sırasıyla artarak mezo (orta) ve makro düzeye ilerlediği bilinmektedir. Bu çatlakların kontrolü için mikro ve makro düzeyde lifler kullanılmaktadır. Şekil 3.1'de betonların gerilme altında kırılma mekanizmasının gelişimi görülmektedir. Mikro çatlak, uzunluğu numune veya yapının boyutlarına göre çok küçük olan çatlağı, makro çatlak ise uzunluğu bir numune veya yapının boyutlarına göre fazla küçük olmayan çatlak olarak tanımlanır (Löfgren, 2005).



Şekil 3.1. Tek eksenli gerilmede lifli betonların kırılma gelişimi (a) Kırılma gelişimi grafik, (b) Kırılma gelişimi şematik gösterimi (Löfgren, 2005).

Löfgren (2005) yaptığı çalışmasında büyük boyutlu lifler arasındaki mesafe fazla olduğu için bu liflerin mikro çatlaklar için etkili olmadığını belirtmiştir. Büyük boyutlu liflerin ancak çatlakların gelişip makro düzeye geldiği zaman etkili olduğu ifade edilmiştir (Löfgren, 2005). Löfgren yaptığı bu çalışmada yüksek dayanımlı makro liflerin, büyük çatlakları, zayıf mikro liflerin (PP vb.) ise mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol ettiğini belirtmiştir. Mikro lifler boyutları nedeniyle matris içinde daha sık bir lif dağılımı oluşturmaktadırlar. Çatlakları makro düzeye gelmeden durdurduğu için elastik bölgedeki davranışı iyileştirdiği belirtilmiştir. Makro liflerin ise kompozitin Elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını arttırdığını kompozitte oluşan makro düzeydeki çatlakları kontrol ederek maksimum yük sonrasında ki malzemenin davranışını iyileştirmek için kullanıldığı belirtilmiştir (Banthia vd., 2000; Bettermann, 1995; Rossi, 2000; Qian vd., 2000).

Ünal (2003), çalışmasında polipropilen ve çelik lif içerikli beton kaplamaların mekanik özelliklerini araştırmıştır. s/ç oranı 0.47 sabit tutularak betonlara 20 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 oranlarında RC 65/60 BN tipi iki ucu kancalı çelik lif, ve 300 gr/m^3 ve 600 gr/m^3 oranlarında M13 tipi polipropilen lif katılmasıyla 5 grup beton karışımı üretmiştir. Polipropilen lif içeren numunelerde kontrol grubu gibi ani gevrek kırılma gözlenmiştir. Polipropilen lif içeren betonların basınç dayanımlarında kontrol grubuna göre % 3'lük bir artış olduğu, beton kaplamada oluşan plastik rötre değerlerinde kontrol grubuna kıyasla % 16 azalma olduğu belirtilmiştir. Ayrıca polipropilen lifli beton karışımların aşınma dayanım değerlerinde kontrol grubuna göre yaklaşık % 24 oranında azalma

olduğu, donma-çözülme direncinde ise kontrol grubuna göre yaklaşık % 16 azalma olduğu belirtilmiştir. Çelik lif içeren beton kaplamaların basınç dayanımlarında kontrol grubuna göre % 7'lik bir artış olduğu görülmüştür. Bu beton karışımlarında plastik rötre oluşumunun kontrol grubuna kıyasla %43 daha az olduğu ifade edilmiştir. Aşınma direncinin ise kontrol grubunun direncine göre % 6 oranında fazla olduğu, donma çözülme direncinin ise kontrol grubuna göre % 42 fazla olduğu bulunmuştur (Ünal, 2003).

Uğurlu (1995) yaptığı çalışmada çelik liflerin eğilme dayanımı, şok darbe dayanımı, aşınma özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada eğilme dayanımı ve tokluk özelliklerinin çelik liflerin katılması sonucunda çatlak sonrası betonun enerji yutma kapasitesini arttırdığı ve eğilme dayanımı değerini yükselttiği belirtilmiştir. Çelik liflerin çatlakları bir köprü halinde aktararak çatlağın ilerlemesini önlediği, homojen dağılımları sayesinde darbe dayanımını arttırdığı belirtilmiştir. Çelik lifli betonda küçük lif çapı, kesintili donatı sistemi ve yüksek yüzey/hacim oranına sahip olmaları yüzünden klasik demir donatılarda görülen paslanma nedeniyle oluşan kabarma olayının görülmediği ifade edilmiştir. Geleneksel beton içerisine farklı miktarlarda ve belirli özelliklerde çelik liflerin katılması ile normal betonun zayıf olarak bilinen eğilme, şok darbe etkisi özelliklerinin iyileşeceği, betonda oluşacak çatlakların gelişimini durdurma özelliğini iyileştirerek performanslarını arttıracacağı ifade edilmiştir. (Uğurlu, 1995).

Salemi ve Behfarnia (2013) yaptıkları çalışmada polipropilen, mikro silika ve mikro alümina katkılarının beton kaplamaların donma çözülme üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma sonucunda PP lifli malzemelerin beton kaplamanın dayanımını arttırdığı görülmüştür. PP lif katkılı numunelerin kontrol numunesine göre donma çözünme etkisinde oluşturduğu artış oranı nano silika ve alümina katkılı numunelere göre daha düşük kalmıştır. Nano parçacıkların boyutları nedeniyle betonun geçirgenliği ve gözenekliliği azalmakta bu nedenle beton kaplamanın donma çözünme direncinin arttığı belirtilmiştir.

Choi vd. (2011) yılında yaptıkları çalışmada beton kaplamalarda oluşan kuruma büzülmesinin lif katkıları ile önlenebileceğini ifade etmişlerdir. Beton kaplamaların esnek kaplamalara göre daha az şekil değiştirmesi ve bakım onarım masraflarının esnek kaplamalara göre az olması beton kaplamaların tercih edilmesini sağladığı belirtilmiştir. Beton kaplamalarda oluşan büzülme ve kuruma çatlaklarının azaltılması için katılan

naylon liflerin çatlamaları kontrol kaplamasına göre % 25 oranında azalttığı vurgulanmıştır.

Nobili vd. (2013) yaptıkları çalışmada polipropilen lif katkılı beton kaplamaların uzun dönem özelliklerinin takip edilmesi amacıyla İtalya’da uygulanan Marche Umbria yolunda yapılan lifli beton uygulamasını 6 ay boyunca takip ederek gerekli ölçümleri yapmışlardır. Bu çalışmada kullanılan PP lif beton kaplamaların tünel içinde uygulanması sonucunda bu bölgelerin bakım onarım zorluğu ve uzun yıllar hizmet vermesi açısından normal beton ve BSK kaplamalara göre daha uygun maliyetli bir tasarım olduğunu ifade etmişlerdir.

Simoes vd. (2017) yılında yaptıkları çalışmada üç farklı çelik, polipropilen ve cam liflerinin beton karışımına mikro boyutta katılması ile betonun eğilme, enerji yutma ve şekil değiştirmelere karşı direnç özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışma sonucunda mikro liflerden çelik ve polipropilen liflerin yüksek enerji yutma kapasitesi ve şekil değişimine karşı dirençli olduğu ancak cam liflerinin gevrek olması nedeniyle bu etkinin daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

3.2.Lif katkılı BSK kaplama tasarımı ile ilgili çalışmalar

Zube (1956) çalışmasında BSK’ların lif donatıları ile iyileştirilmesi üzerinde bilinen en eski çalışmayı 1956 yılında yayınlamıştır. Bu çalışma yansıma çatlaklarını önlemek amacıyla BSK kaplama altına tel örgü uygulanması hakkında yapılmıştır. Boyuna tel takviye uygulaması ile BSK kaplamada çatlak oluşumlarının önlenebileceği veya büyük ölçüde geciktirebileceği sonucuna varılmıştır. Zube aynı çalışmada tel donatı bindirme kalınlığını azaltarak aynı performansın sağlanabileceği sonucunu elde etmiştir. Çelik lif BSK uyumluluğunda herhangi bir sorun gözlenmediği ifade edilmiştir (Zube,1956; Cleven, 2000).

Serfass ve Samanos (1996)’un çalışmasında asbest, taş yünü, cam yünü ve selüloz lifleri kullanarak modifiye edilen BSK’da lif etkisini incelemişlerdir. Deneylerle lif katkılı bitümlerin elastisite modülü, düşük sıcaklıklarda karışımın şekil değişimi ve yorulma direnci özellikleri araştırılmıştır. Serfass ve Samanos çalışmalarının sonucunda BSK’lara liflerin eklenmesinin karışımda bitümün özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Lif modifikasyonu sayesinde agregaları saran bitüm film kalınlığında artış görülmüş aynı zamanda bitümün daha az yaşlandığı ve bağlayıcı özelliklerinin iyileştiği

ifade edilmiştir. Lif katkısının aynı zamanda BSK kaplamanın yüksek sıcaklığa karşı direncinde iyileşmeye neden olduğu görülmüştür (Serfass ve Samanos, 1996; Cleven, 2000).

Cleven (2000), çalışmasında, bir kırılma mekaniği yaklaşımı çatlak direnci üzerinde lif takviye etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Polyester ve polipropilen lifler, esneklik modülü, kırılma enerjisi ve çekme dayanımı için karışımları değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Modifiye örneklerinde kırılma enerjisi yüzde 50-100 arasında artmıştır. Esneklik ve çekme dayanımı sonuçları önemli ölçüde etkilenmemiştir.

Ahmetzade vd. (2011) çalışmasında karbon lif takviyeli BSK'ların mevcut karakteristiği ve özellikleri yolun performansını artıracakları düşünülmektedir. Bu çalışmada Marshall testi, indirekt çekme testi, akma testi, tekrarlanan indirekt çekme testiyle yorulma çatlakları gibi çeşitli testler yapılmıştır. Karbon lif ilavesinin bitümlü karışımların özelliklerini etkilediği gözlenmiştir. Bitümlü karışımdaki boşluk artışlarına ilaveten dayanımlarda artış, akma değerinde düşüşler belirlenmiştir. Bütün sonuçlar incelendiğinde karbon lif ilaveli esnek üstyapıda, yorulma ve şekil değiştirme gibi bazı mekanik özelliklerin artacağını göstermiştir. Artan dayanım ve boşluk oranı yanında azalan akmaya göre lif takviyeli bitümlü karışımların özelliklerini uygun olarak etkilediği gözlenmiştir. Böylece, trafik yüklerinin esnek üstyapıda meydana getirdiği sorunlar nedeniyle karbon liflerin yolun performansını artırma potansiyeline sahip olduğu söylenebilir. Kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında, toplam karışım üzerinden ağırlıkça en uygun karbon lif katkı oranının % 0.4 lif olduğu bu değer üzerinde ise mekanik özelliklerde bozulmaların yaşandığı ifade edilmiştir (Ahmetzade vd., 2011).

Fitzgerald (2000) yaptığı tez çalışmasında karbon liflerin BSK'larda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmalarında karbon liflerin elektrik iletkenliğine odaklanmıştır. Kaplama tasarımında karbon fiber malzemenin elektriksel iletkenliği ile aydınlatılması ve kar mücadelesinde kullanılması üzerinde çalışmalarda bulunmuştur.

Lif katkıları ile bitümün modifikasyonu konusunda çalışmaların artmasıyla BSK üretiminde yüksek sıcaklıkta çevresel problemler oluşmaktadır. Bu problemlerin önüne geçmek için karışıma katılan katkı malzemeleri ile karışım sıcaklığı düşürülmektedir. Düşük sıcaklıkta karışımlarının üretimi sırasında yüksek oranda enerji tasarrufu sağlanmakta ve çevreye zararlı gaz salınımı azaltılmaktadır (Bozkurt, vd., 2015).

Jahromi ve Khodaii (2008), karbon lifli modifiye BSK kaplamaların performansını etkileyen önemli faktörün lif uzunluğu olduğunu, karıştırma işlemi sonrası her bir lifin doğrusal yapılanma bütünlüğünü korumasına dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında uzun liflerin BSK’ında topaklanma olayına sebep olduğunu ifade etmişlerdir. Karbon liflerin maliyetinin yüksek olması nedeniyle BSK’da karbon lif kullanımının ekonomik olmadığı belirtilmiştir (Jahromi ve Khodaii, 2008).

Chen ve Lin (2005), çalışmalarında bitüme lif katkısı ilave etmenin bitüm davranışına nasıl etki ettiğini araştırmışlardır. Bu çalışmada farklı tip lifler (selülozik, taş yünü ve polyester) kullanılmış, bunların bitüm özelliklerini mekanik açıdan nasıl etkilediği vurgulanmıştır. Deney sonuçlarına göre lif katkılarının etkisinin kritik bir noktaya kadar lif katkısı miktarı arttıkça özelliklerde iyileşmeye yol açtığı görülmüştür. Yüksek karışım sıcaklıklarında katkılı bitümün viskozitesi normal bitüme oranla yüksek çıkmıştır. Bitüm–lif karışımlarının çekmeye karşı dayanımı lif oranının artmasıyla iyileşmiştir. Çekme etkisinde lifler ve bitüm arasında kuvvetli bir bağ oluştuğu ve kuvvetli bir kenetlenme oluşturdıkları belirtilmiştir. Elektron mikroskobu ise liflerin bitüm içerisindeki dağılımından karışımın üç boyutlu donatı içeren bir yapı oluşturduğu gösterilmiş ancak fazla lif eklenmesi sonucunda lifler arasında sürtünme oluşmasından dolayı dayanımı düşüreceği belirtilmiştir. Son olarak ise optimum lif oranının lif çeşidine, boyuna ve çapına göre değişebileceği belirtilmiştir (Chen ve Lin, 2005).

Chen vd. (2009), çalışmalarında lif takviyeli BSK’ların hacimsel ve mekanik özelliklerini araştırmak için poliakrilonitril, polyester, kaya lifi, lignin ve asbest lifleri kullanmışlardır. BSK’da lif eklendikten sonra özgül ağırlıkta azalma; optimum bitüm içeriği, agrega boşluk oranında ve bitümle dolu boşluk oranında artış görülmüştür. En uygun bitüm içeriğindeki numunelerde Marshall stabilite ve dinamik stabilite değerleri artmış, lif oranı artırıldığında ise azalmıştır. Polyester ve poliakrilonitril lifleri yüksek ağ etkileri nedeniyle yüksek stabiliteye sahipken lignin ve asbest lifleri yüksek bitüm absorpsiyonları nedeniyle yüksek optimum bitüm içeriğine ve agregalar arası boşluk oranı (ABO)’na sebep olmaktadır. Polyester lif takviyeli BSK tasarımında kullanılan lif oranının belirlenmesi amacıyla Marshall tasarım yönteminde önce optimum bitüm içeriği sonrasında ise optimum lif içeriği belirlenmektedir. Sonuçlara göre, % 0.35 lif oranı polyester lifler için en uygun lif oranı olarak önerilmektedir (Chen vd., 2009).

Manh ve Viet (2013), çalışmalarında karbon lif, cam lif ve selülozik liflerin farklı sıcaklıktaki (5, 25 ve 40°C) davranışlarını araştırmışlardır. Elastisite modülündeki artışın BSK dayanımını artırabildiği görülmüştür. Özellikle, yüksek sıcaklık koşullarında (40°C) yapılan deneyler sonucunda sıcak hava ve ağır trafik koşulları için lif katkılı BSK uygulanabileceği belirtilmiştir.

Serin (2012) çalışmasında esnek üstyapılarda yüksek trafik etkisine doğrudan maruz kalan kaplama tabakalarında gerilmelerin karşılanmasını sağlayabilecek çelik liflerin kullanılabilirliği araştırmıştır. Hazırlanan on beş numune Marshall Stabilitate deneyine tabi tutulmuş ve kullanılacak agrega numunesi için optimum bitüm yüzdesi tayin edilmiştir (% 5.5). Çalışmada en iyi sonucun % 5.5 bitüm miktarında ve % 0.75 lif oranının eklenmesiyle elde edilen numunelerin verdiği belirlenmiştir (Serin vd., 2012).

Zoorob ve Suparma düşük yoğunluklu polietileni (LDPE), BSK'larda agreganın hacimsel olarak % 30'u yerine kullanmışlardır. Deneysel çalışmanın sonunda agreganın LDPE ile bu kısmi değişikliği sayesinde Marshall stabilitesinin % 250 artmış olduğu görülmüştür. Statik sünme değerlerinin 60°C'de 1 saat yükleme sonunda kontrol numunelerine göre daha düşük olduğunu, statik indirekt çekme dayanımının daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır (Zoorob, Suparma, 2000).

Morales vd. (2006) yaptıkları çalışmada 4 farklı lif türünü (EVA, EVA/LDPE karışımı, toz lastik ve ABS) bitüm modifikasyonu amacıyla kullanmıştır. Atık lastik katkısının trafik yüklerine karşı dayanımı sağlayan yüksek esneklik özelliği sağladığı vurgulanmıştır. EVA ve LDPE polimer liflerin yüksek sıcaklıklarda olumlu sonuçlar verdikleri belirtilmiştir (Morales, vd., 2006).

Karacasu ve Bilgiç de (2009) yılında yaptıkları çalışmada, sert plastik parçaları, araç lastiği parçacıkları ve atık lastik tozu kullanmışlardır. Deney sonuçlarında, atık oranı arttıkça pratik özgül ağırlığın azaldığı, boşluk oranının arttığı, bitümle dolu boşluk oranının azaldığı ve Marshall dayanım değerlerinin azaldığı görülmüştür. Deney sonuçlarında bu atıkların çok yüksek oranda dayanım beklenmeyen ve daha düşük trafikli yollarda kullanılabileceğini önermişlerdir (Karacasu ve Bilgiç, 2009).

Polipropilenin BSK performansına olan etkilerini Tapkın (2008) çalışmasında incelemiştir. Yaptığı Marshall ve indirek çekme dayanımı deneysel çalışmalarının sonunda bitümün polipropilen ile modifiyesi ile numunelerin Marshall stabilitesinin arttığını, akma değerinin azaldığını, yorulma ömrünün uzadığını (% 1 polipropilen katkı

oranyla yorulma ömründe % 27 uzama), tekerlek izi dayanımının arttığını, yansıma çatlaklarının azaldığını belirlemiştir (Tapkın, 2008).

4.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Beton kaplama ve BSK kaplama tasarımında liflerin performans özelliklerinin belirlenmesi için dört aşamalı bir deneysel çalışma programı yürütülmüştür. Bunlar sırasıyla, beton kaplama ve BSK tasarımında kullanılan malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi, eldeki malzeme özelliklerine uygun beton ve BSK tasarımı yapılması, beton ve BSK tasarımında lifli numunelerin mekanik ve kalıcılık özelliklerinin belirlenmesi ve üretilen numuneler üzerinde içyapı analizlerinin yapılması şeklinde uygulanmıştır.

4.1.Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

4.1.1.Agrega

Beton ve BSK tasarımında kullanılan kırma taş agregaları Dağ-İş Madencilik'ten temin edilmiştir. Beton kaplama tasarımında agregalar 0-5 mm, 5-12 mm, 12-22 mm şeklinde 3 farklı tane boyutu olarak kullanılmıştır.

BSK kaplama tasarımında karışımlar için maksimum agrega tane boyutu 0-5 mm, 5-12 mm tane dağılımında malzemeler olarak Karayolu Teknik Şartnamesine uygun olarak kullanılmıştır. Beton ve BSK tasarımında kullanılan agregaların tane dağılımı TS EN 933-1 (2012) standardına göre elek analizi deneyi ile belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Kullanılan çimentonun özellikleri.

Çimento	
Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	
Özgül Ağırlık	3.06
Özgül Yüzey, (cm ² /g)	3641
Standart kıvam Su Miktarı, (%)	29.6
Priz Başlama Süresi, (dk)	190
Priz Sona Erme Süresi, (dk)	260
Genleşme (Le Chatelier), (mm)	1
Basınç Dayanımı, (MPa)	
2 Gün	21.6
7 Gün	42.7
28 Gün	61.5
Kimyasal Özellikler	
Kızdırma kaybı	≤%5
Çözünmeyen kalıntı	≤%5
SO ₃	≤%4
Klorür	≤%0.1

4.1.2.Çimento

Beton tasarımında kullanılan çimento, Bilecik SANÇİM Çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42,5R tipi Portland çimentosudur. CEM I 42.5R Portland çimentosu, yol, bina, köprü, prefabrik elemanlar ve yüksek dayanımlı betonların üretimine uygun genel kullanım amaçlı olan ve Ülkemizde en çok tüketilen çimento tipidir. Numune üretiminde kullanılan çimentoya ait özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

4.1.3. Su

Çalışmada üretilen lifli beton karışımlarında kullanılan su TS EN 1008 (2003) standardına uygun olması gerekmektedir. Lifli beton numunelerinin üretiminde içilebilir Bilecik şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

4.1.4.Çelik lif

Lifli beton ve BSK karışımlarında TS EN 14889 (2006) standardına uygun Polyfiber firmasının ürünü olan PolySteel 45/50 çelik lif kullanılmıştır. Çizelge 4.2’de çelik lifin özellikleri, Şekil 4.1’de çelik liflerin görüntüsü verilmiştir. Beton ve BSK tasarımında bu çelik liflerin tercih edilmesinin nedeni piyasada yaygın olarak kullanılmalarıdır.

Çizelge 4.2. Numune üretiminde kullanılan çelik lifin özellikleri.

Çelik lif özellikleri	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Narinlik oranı
			L/D
Polysteel 45/50	50	1.05	47.6

4.1.5.Polipropilen lif

Polipropilen lif olarak TS EN 14889 (2006) standardına uygun Polyfiber firmasının ürünü olan Mono 18 marka lif kullanılmıştır. Çizelge 4.3’de kullanılan polipropilen lifin özellikleri ve Şekil 4.1’de polipropilen lifin genel görüntüsü verilmiştir. Beton ve BSK tasarımında polipropilen liflerin tercih edilmesinin nedeni malzemenin sünekliğini iyileştirmesi, rötre gerilmelerini azaltması başlıca etkenlerdir.

Çizelge 4.3. Deneyde kullanılan polipropilen lifin özellikleri.

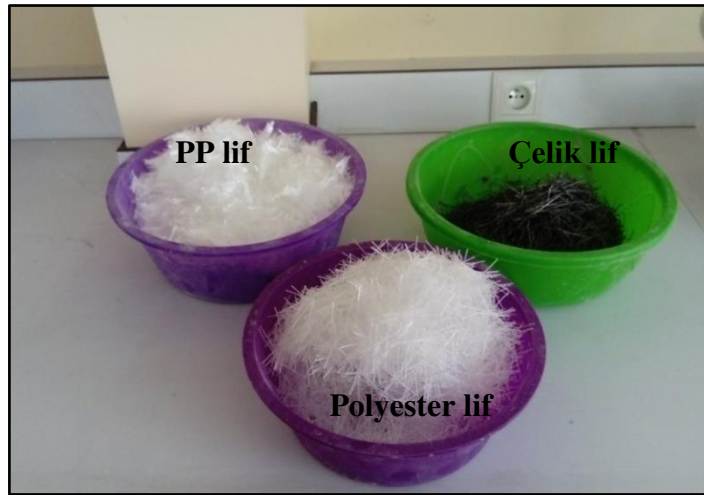
Polipropilen lif özellikleri	Uzunluk (mm)	Kopma dayanımı (MPa)	Özgül ağırlık
Mono 18	18	600-700	0.91

4.1.6. Polyester lif

Polyester lif olarak TS EN 14889 (2006) standardına uygun Polyfiber firmasının ürünü olan Polymacro 39 marka lif kullanılmıştır. Çizelge 4.4’de kullanılan polyester lifin özellikleri ve Şekil 4.1’de genel görünüşü verilmiştir. Beton ve BSK tasarımında polyester liflerin tercih edilmesinin nedeni sünekliği arttırması, rötre çatlaklarını azaltmasıdır.

Çizelge 4.4. Deneyde kullanılan polyester lifin özellikleri.

Polyester lif özellikleri	Uzunluk (mm)	Kopma dayanımı (MPa)	Özgül ağırlık
Polymacro 39	39	450	1



Şekil 4.1. Deneyde kullanılan liflerin görünüşleri.

4.1.7. Bitüm

BSK kaplama tasarımında kullanılan bitüm bağlayıcı 50/70 penetrasyon sınıfında olacak şekilde İzmit Tüpraş Rafinerisinden temin edilmiştir. BSK tasarımında kullanılan bitüme TS 115 EN 58 standardında belirlenen şartlara göre TS EN 12591 (2011) “Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Kaplama Sınıfı Bitümler-Özellikler” standardında belirtilen deneyler uygulanarak özellikleri belirlenmektedir (KGM, 2006). Bitümün özelliklerini belirlemek için penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, özgül ağırlık, parlama deneyleri yapılmıştır. Bitüm üzerinde yapılan deney sonuçları 5. bölümde verilmiştir. Bitümün penetrasyonunun belirlenmesi için bitümlü malzemelerin standart test yöntemi TS EN 1426 (2015)’ya göre uygulanmıştır.

4.2.Lifli Beton Kaplama Tasarımı ve Numune Hazırlanışı

Bu çalışmada, makro boyutta kullanılan çelik, polyester ve polipropilen lif ile üretilen betonların karayolu beton kaplaması olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. TS 10514 lif takviyeli beton karışım oranları ve imalatı için kurallar standardına uygun bir beton karışımı hedeflenmiştir. Yapılan literatür araştırmalarında lifli betonların dayanım sınıfının genellikle C25 ve üzerinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle çalışmada C35 dayanım sınıfında beton üretilmiştir. Betonlarda lif miktarının belirlenmesinde TS10514 lif takviyeli beton karışım oranları ve plastik lif üreticilerinin tavsiye ettiği sınır değerler dikkate alınmıştır. Standartta lif kullanımının miktarı, 1 m³ betonda “kg” olarak belirtilmiştir. Çalışmada karışıma katılacak liflerin beton içinde aynı hacimde kullanılması planlanmıştır. Polipropilen ve polyester lifler ilgili standart olmayışı ve çelik liflerin önemli yoğunluk farkı olması nedeniyle, TS 10514’deki “kg” olarak belirtilen karışıma katılacak lif miktarı “hacim” olarak tespit edilmiştir. Buna göre betona eklenecek lif miktarı % 0.5, % 1, % 1.5 ve % 2 olarak belirlenmiştir.

Karayolları teknik şartnamesine 2013 yılında eklenen Beton yollar bölümünde beton karışımları için değerler Çizelge 4.5’te verilmiştir (KTŞ, 2013).

Çizelge 4.5. Beton tasarımında kullanılan standart ve şartname değerleri.

Beton tasarımında aranılan şartlar	Şartname –Standart değerleri
Basınç Dayanım Sınıfı (KTŞ, 2013)	Min.C30/37MPa
Bağlayıcı İçeriği (KTŞ, 2013)	$\geq 340\text{kg/m}^3$
Agregalar için istenilen tane dağılımı şartları (KTŞ, 2013)	0-2mm, 2-8 mm, >8mm veya 0-4mm, 4-8mm, >8mm şeklinde olmalıdır.
Çimento miktarı (TS 10514)	En az 320 kg/m ³
Karışımında istenilen 0-4 mm kum miktarı (TS 14889-1)	Toplam agreg a kütle sinin %40-45’i olması gerekmektedir(750 kg/m ³ - 850 kg/m ³).
D _{max} 32 mm karışımlarda 0-0,25 mm arasındaki agrega miktarı	Min. agrega miktarı 400 kg/m ³ olması gerekmektedir.

Deney çalışması kapsamında hazırlanan beton tasarımının 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımlarının 35 MPa’dan az olmaması hedeflenmiştir. Bütün beton bileşimlerinde çimento dozajı 350 kg/m³ ve beton karışımlarında etkin s/ç oranı 0.45 olarak belirlenmiştir. TS 10514’e göre çelik lifli betonlarda 0-4 mm

grubundaki agregaların en az % 55'i 0.25 mm'den küçük olmalıdır. Karışıma katılacak lif miktarları ve beton karışım isimleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Beton Karışımlarına ait kısaltma isimleri.

Numune Kodu	Beton Karışımının Türü
Kontrol	Kontrol beton karışımı
PP0.5	% 0.5 Polipropilen lif katkılı beton karışımı
PP1	% 1 Polipropilen lif katkılı beton karışımı
PP1.5	% 1.5 Polipropilen lif katkılı beton karışımı
PP2	% 2 Polipropilen lif katkılı beton karışımı
PY0.5	% 0.5 Polyester lif katkılı beton karışımı
PY1	% 1 Polyester lif katkılı beton karışımı
PY1.5	% 1.5 Polyester lif katkılı beton karışımı
PY2	% 2 Polyester lif katkılı beton karışımı
ÇL0.5	% 0.5 Çelik lif katkılı beton karışımı
ÇL1	% 1 Çelik lif katkılı beton karışımı
ÇL1.5	% 1.5 Çelik lif katkılı beton karışımı
ÇL2	% 2 Çelik lif katkılı beton karışımı

Lif katkılı beton tasarımı karışım oranları Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bileşenler 40 dm³ hacmindeki betoniye de karıştırıldıktan sonra lif miktarının ve s/ç oranının taze beton üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla çökme ve yayılma deneyleri yapılmıştır. Özellikle lifli betonların işlenebilmesinin belirlenmesinde yayılma deneyi kullanılmaktadır. Taze beton kalıplara yerleştirilerek ve sarsma tablası ile üzerinde harici vibrasyona tabi tutulmuşlardır. 24 saat sonra kalıplardan alınan numuneler, sıcaklığı 20 ± 2°C olan kirece doymuş su içerisinde 7 ve 28 gün süreyle kür edilmişlerdir. Lifli betonların fiziksel, mekanik ve kalıcılık özelliklerinin belirlenmesi için 150x150x150 mm küp, 100x100x500 mm prizma ve 70x70x70 mm'lik küp numuneler üretilmiştir. Beton üretimi ve taze beton deneylerinin yapılışı Şekil 4.2'de görülmektedir. Beton karışımlarının hazırlanması ile taze ve sertleşmiş beton deneyleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.



Şekil 4.2.Lifli beton karışımların hazırlanması.

Çizelge 4.7. 1 m³ Lifli beton karışımında kullanılan malzeme miktarları.

Numune adı	Çimento (kg)	Su (kg)	Lif katkı (kg)	Agrega (kg)		
				0-5 mm	5-12 mm	15-22 mm
Kontrol	350	157,5	-	780	608	402
PP0.5	350	157.5	1.45	776.1	608	402
PP1	350	157.5	2.9	772.2	608	402
PP1.5	350	157.5	4.35	768.3	608	402
PP2	350	157.5	5.8	764.3	608	402
PY0.5	350	157.5	1.5	776.1	608	402
PY1	350	157.5	3	772.2	608	402
PY1.5	350	157.5	4.5	768.3	608	402
PY2	350	157.5	6	764.3	608	402
ÇL0.5	350	157.5	11.85	776.1	608	402
ÇL1	350	157.5	23.7	772.2	608	402
ÇL1.5	350	157.5	35.55	768.3	608	402
ÇL2	350	157.5	47.4	764.3	608	402

4.3. BSK ve Beton Tasarımında Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellik Deneyleri

4.3.1. Elek analizi deneyi

BSK ve beton kaplama tasarımı için agregaların tane dağılımı yapılan elek analizi deneyi ile belirlenmiştir. TS EN 933-1 (2012) standardına göre yapılan bu deneyde 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 seçilmelidir. Lifli beton ve BSK’larda elek analizinde kullanılan elekler 75 µm, 150 µm, 1.18 mm, 4.75 mm, 9.5 mm, 12.5 mm, 19 mm, 25 mm boyutlarındadır.

Agrega numuneleri 105°C etüvde kurutulduktan sonra Şekil 4.3’de görülen elek sarsma makinasında elenerek tane boyut analizi belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Agreg a elek seti ve sarsma cihazı.

4.3.2. İri agrega için özgül ağırlık deneyi

BSK ve beton kaplama tasarımında iri agregaların (4.75 mm elek üzerinde kalan agregaların) özgül ağırlık değ erleri tespit edilmiştir. Karışımlarda kullanılan agrega örneğ inden alınan numuneler üzerinde TS EN 1097-6 standardına göre Arşimet terazisi deneyi yapılmıştır. Agregaların özgül ağırlıkları (4.1-4.4) denklemleri yardımı ile belirlenmiştir.

$$\text{Hacim özgül ağırlık (gr/cm}^3\text{)} = \frac{A}{B-C} \quad (4.1)$$

$$\text{Doygun esasa göre hacim özgül ağırlık (gr/cm}^3\text{)} = \frac{B}{B-C} \quad (4.2)$$

$$\text{Görünür özgül ağırlık (gr/cm}^3\text{)} = \frac{A}{A-C} \quad (4.3)$$

$$\text{Su emme yüzdesi (\%)} = \frac{B-A}{B} \quad (4.4)$$

A = Kuru ağırlık (gr)

B = Doygun yüzey kuru ağırlık (gr)

C = Sudaki ağırlık (gr)

4.3.3. İnce Agregalar için özgül ağırlık deneyi

BSK ve beton kaplama tasarımında ince agregaların özgül ağırlıkları değerleri TS EN 1097-6 standardı ile tespit edilmiştir. Karışımlarda kullanılan agregalar örneklerinden alınan numuneler üzerinde deney yapılmıştır. Agregaların özgül ağırlıkları (4.5-4.8) denklemleri yardımı ile belirlenmiştir.

$$\text{Hacim özgül ağırlık (gr/cm}^3\text{)} = \frac{E}{((B-A)-(D-C))} \quad (4.5)$$

$$\text{Doygun esasa göre hacim özgül ağırlık (gr/cm}^3\text{)} = \frac{(C-A)}{((B-A)-(D-C))} \quad (4.6)$$

$$\text{Görünür özgül ağırlık (gr/cm}^3\text{)} = \frac{E}{(B-D)+E} \quad (4.7)$$

$$\text{Su emme yüzdesi (\%)} = \frac{(C-A)-E}{E} \quad (4.8)$$

A = Piknometre ağırlığı (gr)

B = Piknometre ağırlığı + su ağırlığı (gr)

C = Piknometre ağırlığı + yüzey kuru suya doymuş numune ağırlığı (gr)

D = Piknometre ağırlığı + yüzey kuru suya doymuş numune ağırlığı + su ağırlığı (gr)

E = Kuru numune ağırlığı (gr)

4.3.4. Sıkışık ve Gevşek birim hacim ağırlık deneyi

BSK ve beton kaplama tasarımında agregaların sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlık deneyi TS 706 EN 12620' ye (2009) yapılmıştır. Agregalar tane boyutuna bağlı olarak seçilen 3 dm³ hacimli ölçü kabına gevşek hacim ağırlığı hesabında sıkıştırmadan tartım yapılmıştır. Aynı şekilde sıkışık birim hacim ağırlığı içinde yüzeyin her tarafına yapılacak 25 vuruş ile sıkıştırılarak tartım yapılmıştır. Agreganın sıkışık ve gevşek birim ağırlıkları aşağıdaki denklemler ile (4.9-4.10) hesaplanmıştır.

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{V} \quad (\text{gr/cm}^3) \quad (4.9)$$

Burada;

G_s : Sıkışık birim hacim ağırlık (gr/cm³)

W_2 : Sıkışık agregalar ile dolu ölçü kabı ağırlığı (gr)

W_1 : Ölçü kabı boş ağırlığı (gr)

V : Ölçü kabının iç hacmi (cm^3)

$$G_g = \frac{W_2 - W_1}{V} \quad (\text{gr}/\text{cm}^3) \quad (4.10)$$

Burada;

G_g : Gevşek birim hacim ağırlık (gr/cm^3)

W_2 : Gevşek agregaya ile dolu ölçü kabı ağırlığı (gr)

W_1 : Ölçü kabı boş ağırlığı (gr)

V : Ölçü kabının iç hacmi (cm^3)

4.3.5. İnce madde oranının yıkama ile tayini

BSK ve beton kaplama tasarımında kullanılan agregalarda ince madde tayini için tane çapı 4 mm'den büyük agregalar kullanılmıştır. ASTM C 117-90 (1995) standardına göre iri agreganın yıkanması ve 0.063 mm elekten geçen maddenin tespit edilmesi için 4.11 denklemi ile belirlenmiştir.

$$m = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (4.11)$$

m : Yıkanabilen ince madde oranı (%)

W_1 : Numunenin deney öncesi etüv kurusu ağırlığı

W_2 : Numunenin deney sonrası etüv kurusu ağırlığı

4.3.6. Los Angeles aşınma deneyi

Beton ve BSK kaplama tasarımında kullanılan agregalara TS EN 1097-2 (2010) standardına göre aşınma deneyi uygulanmıştır. Beton ve BSK kaplama tasarımında kullanılacak agregaların aşınmalara karşı yüksek dirençli olması istenmektedir. Bu nedenle agregaların aşınma miktarının tespit edilmesi amacıyla aşınma ve darbelenme etkileri sonucunda agregalarda oluşan bozulma oranı ölçülmüştür. Bu deneyde denklem 4.12'ye göre agregaya numunesinin 500 devir yaptıktan sonra 1.6 mm'lik elekten elenmesi ile elek üstü kalan bakiyenin ilk numuneye göre oranlanması ile hesaplanmaktadır.

$$LA = \frac{5000-M}{5000} \quad (4.12)$$

Burada; M =1.6 mm’lik elek üzerinde kalan malzeme ağırlığıdır (gr).

TS EN 1097-2’e (2010) göre yol kaplamalarında kullanılacak malzemelerde aşınma miktarının % 30’dan küçük olması gerekir (Uzun, 2011). Deneylerde kullanılan Los Angeles cihazı Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Los Angeles deney aleti.

4.4. Beton Deneyleri

4.4.1. Taze beton işlenebilirlik deneyleri

Taze betonun işlenebilirliğini belirlenmesi amacıyla yapılan bu deneyler TS EN 12350-2 ve 5 (2010) standardlarına göre yapılmıştır. Çökme deneyi, 10 mm ile 200 mm arasında çökme değerine sahip betonların kıvamındaki değişimlere uygun bir deney yöntemidir. Bu değerler dışında daha düşük çökme değerlerinin ölçülmesi için çökme deneyi ile kıvam tayini yapılması uygun değildir. Silindirle sıkıştırılabilen beton (SSB) gibi kuru kıvamlı çökme değeri olmayan betonların değerlendirilmesi için dinamik bir işlenebilirlik deneyi olan VeBe deneyi kullanılmalıdır (TS EN 12350-3, 2010). Çalışmada kullanılan lifli betonların kıvamları kuru olmadığı için beton tasarımında çökme ve yayılma tablası deneyi uygulanmıştır. Taze beton numunelerine uygulanan çökme deneyinin yapılışı Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5.Çökme deneyi.

4.4.2. Beton birim ağırlık deneyi

Beton kaplama tasarımında birim ağırlığın tespiti amacıyla TS EN 12350-6 (2010) standardı kullanılmaktadır. Sıkıştırılmış taze betonun birim ağırlığının tayini amacıyla yapılan bu deneyde taze beton, hacmi ve kütlesi bilinen, sızdırmaz bir kap içerisine sıkıştırılarak yerleştirilir ve daha sonra tartılarak kütlesi belirlenir. Sertleşmiş beton birim ağırlık deneyi TS EN 12390-7 (2012) standartına göre yapılmıştır.

4.4.3. Ultrases geçiş hızı deneyi

Lifli beton numunelerinde ultrases geçiş hızının belirlenmesi amacıyla yapılan bu deney Matest marka ultrases cihazı ile TS EN 12504-4 (2012) standardına uygun olarak yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı deneyi 7 ve 28 gün sonunda 100x100x500 mm boyutlarındaki beton numuneleri üzerinde yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı numune boyu ve geçiş süresi ile E.4.13'deki ifade ile hesaplanmıştır. Numuneler üzerinde kullanılan ultrases deney cihazı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Ultrases deney sonuçları incelendiğinde beton kalitesinin tespiti amacıyla yapılan çalışmalardan elde edilen ultrases geçiş hızı ile beton kalite ilişkisini gösteren Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki ilişki (Erdoğan,2003).

Dalga hızı (km/sn)	Beton kalitesi
>4.5	Mükemmel
3.50–4.50	İyi
3.00-3.50	Şüpheli
2.00-3.00	Zayıf
<2.00	Çok zayıf

$$V = \frac{L}{t} \quad (4.13)$$

V = Ultrases geçiş hızı (km/sn)

L = Numune boyu (km)

t = Süre (sn)



Şekil 4.6. Ultrases deney aleti.

4.4.4. Su emme deneyi

Beton kaplamaların su emme özelliği TS EN 480-11 (2008) deney yöntemine göre 150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. 28 gün kür havuzunda şartlandırılan numuneler, havuzdan çıkarıldıktan sonra yüzey kuru suya doymun hale getirilmiş ve tartılmıştır. Daha sonra numuneler 1 gün süreyle etüvde bırakılmıştır. Etüvden çıkarılan numuneler soğutulduktan sonra tekrar tartılmıştır. Elde edilen bu verilerden numunelerin su emme oranları denklem 4.14'deki ifade yardımıyla hesaplanmıştır.

$$S_a = \frac{W_{dyk} - W_k}{W_k} \quad (4.14)$$

Burada;

S_a = Su emme oranı (%)

W_{dyk} = Doygun yüzey kuru ağırlık (gr)

W_k = Kuru ağırlık (gr)

4.4.5. Tek eksenli basınç deneyi

Lifli beton karışımlarının basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2012) deney yöntemine göre belirlenmiştir. Deney gününe kadar 150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler kirece doymun 20°C sıcaklıktaki kür havuzunda şartlandırılmıştır. Deney 7 ve 28 gün sonunda Şekil 4.7’de gösterilen Çevik Makina marka 2000 kN kapasiteli basınç presinde 5 kgf/cm²/sn yükleme hızıyla yapılmıştır.



Şekil 4.7. Tek eksenli basınç presi.

4.4.6. Kiriş eğilme deneyi

Lifli beton karışımlarında eğilme deneyi, TS EN 12390-5 (2012) standardında belirtildiği şekilde uygulanmıştır. Deney numuneleri şişleme ve sarsma tablası yardımıyla hazırlanmıştır. Deney gününe kadar numuneler kirece doymun 20°C sıcaklıktaki kür havuzunda şartlandırılmıştır. Deney 100x100x500 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde 7 ve 28 gün sonunda Şekil 4.8’de gösterilen eğilme deney cihazı ile uygulanmıştır. Eğilme deneyi 4 noktalı olarak yükleme hızı 0.5 MPa/sn olacak şekilde uygulanmıştır. Buradan bulunan kırılma kuvveti kullanılarak E.4.15 ifadesi yardımıyla her bir numunenin eğilme dayanımı hesaplanmıştır.



Şekil 4.8. Kiriş eğilme deney aleti.

$$F_{ct} = \frac{3xFL}{2bxd^2} \quad (4.15)$$

Bu denklemde;

F_{ct} = Eğilme dayanımı (MPa)

F = Maksimum yük (N)

L = Mesnetler arası mesafe (mm)

b = Kiriş en kesit yüksekliği (mm)

d = Kiriş en kesit genişliği (mm)

4.4.7. Aşınma direnci deneyi

Beton kaplama tasarımında aşınma deneyi TS 2824 EN 1338 (2009) standardına uygun olarak Şekil 4.9’da görülen Böhme aşınma cihazında yapılmıştır. Deney için 70x70x70 mm boyutlarındaki küp numuneler hazırlanmış ve 28 günlük kür süresi sonunda deney yapılmıştır. Deney sonunda tekrar numunenin boyutları ve ağırlığı ölçülüp, aşınma kaynaklı değişimler ağırlıkça ve hacimsel olarak E.4.16’daki ifade yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 4.9. Böhme aşınma deneyi.

$$\Delta = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (4.16)$$

Bu denklemde;

Δ = Hacimsel/kütlesel değişim (%)

W_1 = İlk hacim/kütle (cm^3/gr),

W_2 = Son hacim/kütle (cm^3/gr)

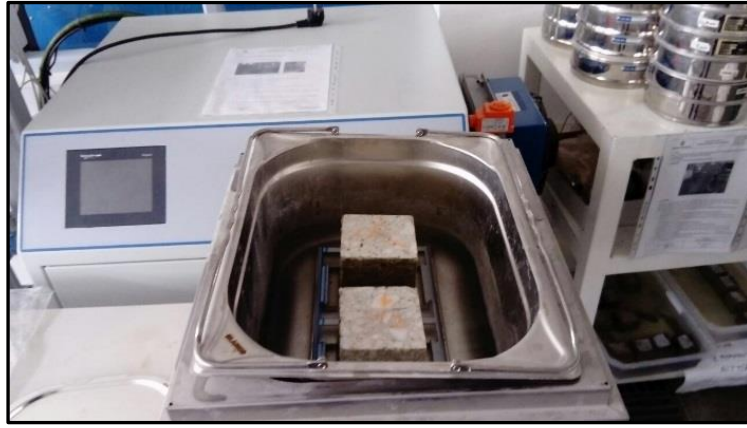
4.4.8. Buz çözücü tuzların etkisi (CDF) deneyi

Karayollarında kullanılan kaplama yüzeyi doğrudan atmosfer koşullarına açık olması nedeniyle özellikle kış aylarında donma-çözülme ve yüzeyde donan suyun çözülmesi amacıyla kullanılan buz çözücü tuzların aşındırıcı etkilerine maruz kalmaktadır. Bu olumsuz kalıcılık probleminin belirlenmesi için üretilen beton numuneleri üzerinde TSE CEN/TS 12390-9 (2017) standardına göre buz çözücü tuzların etkisi (CDF) deneyi yapılmıştır. CDF deneyi Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Schleibinger Geräte marka CDF-CIF deney cihazı (Şekil 4.10) ile gerçekleştirilmiştir.



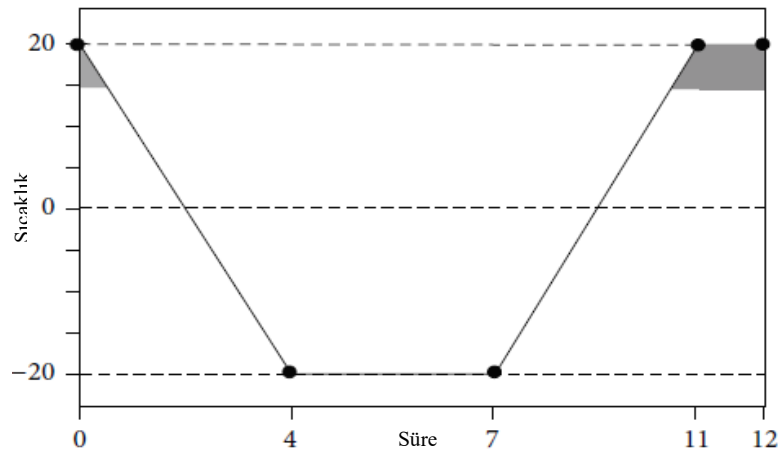
Şekil 4.10. CDF donma çözünme test cihazı.

Deney numuneleri donma-çözünme cihazına yerleştirilmeden önce % 3 NaCl içeren su çözeltisi ile ön doyurma işlemi yapılmıştır (Şekil 4.11). Ardından 100x100 mm küp numuneler deney cihazına yerleştirilerek Şekil 4.12’de görülen sıcaklık değişim periyotlarında -20°C ile +20° C arasında 14 ile 28 çevrimlik donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır



Şekil 4.11. CDF %3 tuzlu su çözeltisi doyurma işlemi.

Deney sonunda oluşan malzeme kayıplarının ölçülmesi için numuneler ultrasonik banyo ile yıkanmış sonrasında yıkama suyu filtre kağıdından geçirilerek etüvde kurutulmuş böylece ilgili çevrimler sonucunda oluşan kütle kayıpları ağırlıkça belirlenmiştir (Şekil 4.13). Oluşan kütle kayıplarının birim alandaki miktarı denklem 4.17 yardımı ile hesaplanmıştır (Setzer vd.,1996). Ayrıca standartta olmamasına rağmen en uygun lif ve bitüm oranına sahip BSK kaplama numuneleri üzerinde de CDF deney yöntemi uygulanmıştır.



Şekil 4.12. CDF deneyi sıcaklık değişimi (Karakurt ve Bayazıt, 2015).



Şekil 4.13. CDF deneyinde numunelere ultrasonik banyo uygulanması.

$$M_n = \frac{\mu_n}{A} \times 10^6 \quad (4.17)$$

Bu denklemde;

M_n = CDF ağırlık kaybı (gr/mm²)

μ_n = n çevrim sonunda ultrasonik banyo sonucu kopan numune miktarı (gr)

A = Yüzey alanı (mm²)

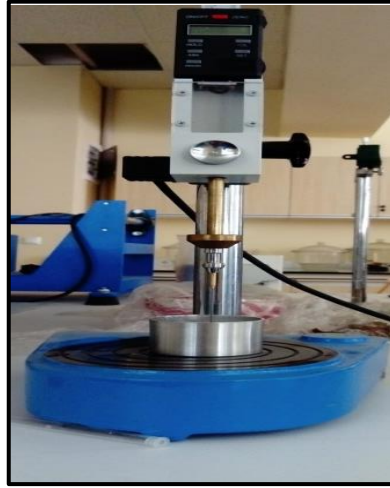
4.5. BSK Kaplama Tasarımı Deneyleri

4.5.1. Bitümün fiziksel özellik tespiti deneyleri

4.5.1.1. Penetrasyon deneyi

BSK kaplama tasarımında bağlayıcı olarak kullanılan bitümün fiziksel özelliklerinin tespiti amacıyla penetrasyon deneyi yapılmıştır. TS EN 1426 standardına göre yarı katı veya akıcı olmayan bağlayıcıların kıvamlarının ölçülmesi amacıyla bitüm numunesinin standartlara uygunluğu böylece belirlenmiştir. Bitüm penetrasyon deneyi sonuçlarına göre penetrasyon derecesi yükseldikçe daha yumuşak bitüm olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yanında viskozite değerleri için durum tam tersi olmaktadır. BSK kaplamalarda kullanılan bitümlerin penetrasyon değerleri 30 ile 300 arasında değişmektedir. Penetrasyonu aynı olan iki bitümden yumuşama noktası yüksek olan

sıcaklık etkilerine karşı daha dirençli olmaktadır (TS EN 1426, 2015; Tunç, 2001). Bitüm Penetrasyon cihazı Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Bitüm Penetrasyon cihazı.

4.5.1.2. Özgül ağırlık denevi

BSK’larda kullanılacak bitümün özgül ağırlığı tespitinde bitümün belli bir hacminin ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak hesaplanmıştır. Bitümün özgül ağırlığı BSK tasarımında şu iki bakımdan önemlidir. BSK hesaplamalarında ağırlıkla hacim arasındaki bağıntının bilinmesi gereklidir. Özgül ağırlık ölçülmesi piknometre yardımıyla yapılmıştır. Deney saf su kullanılarak genellikle 25°C’de yapılır. Farklı sıcaklıklarda yapılacaksa 25°C’ye çevirmek için çeşitli abaklardan yararlanılmaktadır (Umar ve Ağar, 1991).

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A(D-C))} \quad (4.18)$$

A = Piknometre ağırlığı (gr)

B = Su ile dolu piknometre ağırlığı (gr)

C = Piknometre ve bitüm ağırlığı (gr)

D = Piknometre, bitüm ve su ağırlığı (gr)

4.5.1.3. Düktilite denevi

Bu deney BSK kaplama tasarımında bağlayıcı olarak kullanılan bitümün sünekliliğinin belirlenmesi için uygulanmıştır. Böylece karışımlarda kullanılan bitüm numunesinin TS EN 13589 standardına uzama miktarı açısından uygunluğu belirlenmiştir. Düktilite deneyinde hazırlanan numunenin standarda göre 100 cm’den

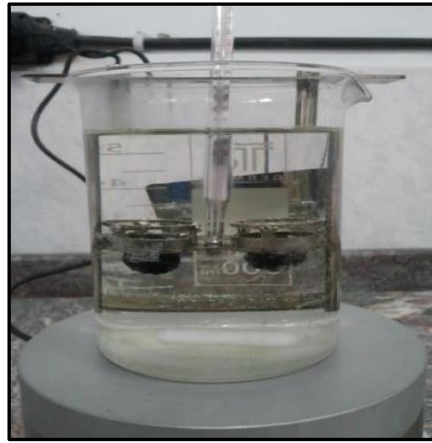
fazla uzaması istenmektedir (Orhan, 2012). Düktilite deney cihazı Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.15. Düktilite deney cihazı.

4.5.1.4. Yumuşama noktası deneyi

BSK kaplama tasarımında bitümün sıcaklık karşısındaki davranışlarını, kıvamlılığını belirlemek amacıyla yapılmıştır. TS EN 1427 standardına göre bitüm numunesinin sıcaklık etkisi ile bilyeden aşağıya aktığı ve taban yüzeyine değdiği sıcaklık yumuşama noktası olarak belirlenmektedir (Orhan, 2012). Yumuşama noktası deney aleti Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16. Yumuşama noktası deney aleti.

4.5.1.5. Parlama noktası deneyi

BSK kaplama tasarımında bitümün alevle temas etmesi halinde parladığı, ancak sürekli yanma işleminin olmadığı sıcaklık derecesinin bulmak amacıyla yapılmaktadır. TS EN ISO 2592 standardına göre bitüm numunesinin sıcaklık etkisinde parlama yaptığı derece ölçülmüştür. Bitümün parlama noktasının belirlenmesi sayesinde üretilen karışımın güvenli olması için bitümlü bağlayıcının ısıtılırken meydana gelebilecek

herhangi bir tutuşma ve alev alma riskini önlemek bakımında önemlidir (Orhan, 2012). Şekil 4.17’de parlama noktası deney aletinin görünüşü verilmektedir.



Şekil 4.17. Parlama noktası deney aleti.

4.5.2. BSK Marshall tasarımı

BSK tasarımında deney numuneleri 63.5 ± 1.27 mm (2.5 inç $\pm$ 0.05 inç) yüksekliğinde Marshall briketi hazırlayabilecek miktarda (yaklaşık 1150 gr) agrega numunesi ve lif katkıları ile önceden belirlenmiş miktarda bitüm ile hazırlanmıştır. Numunenin her iki yüzüne trafik durumuna göre orta trafik için 50, yüksek trafik için 75 darbe vurulması ile sıkıştırma yapılmıştır. Lif katkılı BSK’larla hazırlanan Marshall deney numuneleri Şekil 4.18’de görülmektedir. Lif katkılı BSK’ların kısaltma isimleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.18. Lif katkılı BSK’larla üretilen Marshall deneyi numuneleri.

Çizelge 4.9. BSK'lara ait kısaltma isimleri.

Numune Kodu	BSK Çeşidi
Kontrol	Kontrol BSK
PP0.5	% 0.5 Polipropilen lif katkılı BSK
PP1	% 1 Polipropilen lif katkılı BSK
PP1.5	% 1.5 Polipropilen lif katkılı BSK
PY0.5	% 0.5 Polyester lif katkılı BSK
PY1	% 1 Polyester lif katkılı BSK
PY1.5	% 1.5 Polyester lif katkılı BSK
ÇL0.5	% 0.5 Çelik lif katkılı BSK
ÇL1	% 1 Çelik lif katkılı BSK
ÇL1.5	% 1.5 Çelik lif katkılı BSK

4.5.2.1. Farklı bitüm miktarlarında karışımın maksimum özgül ağırlığı

Marshall tasarımında bitüm miktarının değişmesi, bitüm absorpsiyonunu önemli ölçüde değiştirmediğinden, her bir bitüm yüzdesi için maksimum özgül ağırlık aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Önal ve Kahramangiller, 1993; Orhan, 2012).

$$D_T = \frac{100 + W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (4.19)$$

D_T = Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (gr/cm³)

W_a = Agreg ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı (gr)

G_{ef} = Agreganın efektif özgül ağırlığı (gr/cm³) ;

G_b = Bitüm özgül ağırlığı (gr/cm³)

4.5.2.2. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki boşluk hacmi yüzdesi

BSK kaplama tasarımında agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), kaplamada efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu içeren, sıkıştırılmış kaplama karışımının agreg daneleri arasındaki boşluk oranı olarak tanımlanır ve toplam hacim yüzdesi olarak hesaplanmıştır (Önal ve Kahramangil, 1993; Orhan, 2012).

$$VMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} \times 100 \quad (4.20)$$

VMA = Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)

D_p = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (gr/cm³)

G_{sb} = Agreganın hacim özgül ağırlığı (gr/cm³)

W_a = Agreg ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı (gr)

4.5.2.3. Marshall numunelerinin boşluk analizi

BSK kaplamada sıkıştırılmış karışımındaki hava boşluğu, bitümle kaplanmış agreg daneleri arasındaki küçük hava boşluklarından oluşmaktadır. BSK kaplama tasarımında şartname değerleri olarak boşluk yüzdesinin % 4 olması ayrıca V_f yüzdesinin % 70 olması istenmektedir (Önal ve Kahramangil, 1993; KTS, 2013).

$$V_h = \frac{D_T - D_P}{D_T} \times 100 \quad (4.21)$$

$$V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100 \quad (4.22)$$

V_h = Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımındaki agreg boşluğu (%)

V_f = Bitümle dolu boşluk yüzdesi (%)

D_T = Kaplama karışımının en büyük özgül ağırlığı (gr/cm³)

D_P = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (gr/cm³)

4.5.3. Marshall dayanım ve akma değerlerinin belirlenmesi

BSK kaplama tasarımında kaplamanın mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla uygulanmıştır. Marshall dayanım ve akma deney yöntemi TS 3720 (2010) standardında belirtildiği üzere Marshall dayanım test cihazı yardımıyla bitümlü kaplama karışımlarından hazırlanan silindir briketlerin üzerinde yanal yükleme ile yapılmıştır. Bu deney sonucunda numunelerin plastik akmaya karşı direnci ve akma değerinin ölçümü yapılmıştır (TS 3720, 2010). Ülkemizde karayollarında bitümlü karışımlara Marshall dayanım deneyi uygulanmaktadır.

Marshall tasarımı deneylerinin agreg ve klasik bitüm deneyleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında ve BSK dizaynı ile ileri performans deneyleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Marshall Dayanım test aleti ve Marshall sıkıştırma tokmağı Şekil 4.19'da görülmektedir.



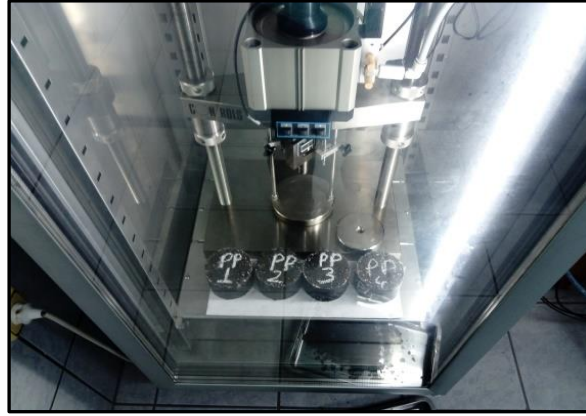
Şekil 4.19. Marshall Dayanım deney aleti ve Marshall sıkıştırma tokmağı.

4.5.3.1. Marshall tasarımında en uygun bitüm yüzdesinin belirlenmesi

BSK kaplama tasarımında en uygun bitüm yüzdesinin belirlenebilmesi için çeşitli bitüm yüzdelerinde hazırlanmış olan numunelere ait Marshall stabilite, birim ağırlık, bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesi ve boşluk oranı grafiklerinin çizilmesi gereklidir. Bitüm değerinin Marshall dayanım değerini en büyük yaptığı değerde ki bitüm oranı grafikten hesaplanır. Karışımın maksimum birim ağırlığı değerini veren bitüm oranı grafikten belirlenir. Şartnameye uygun olarak bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesini %70 olarak sağlayan bitüm oranı grafikten seçilir. Ayrıca karışımın %4 boşluk oranını (şartnamede belirtilen % 3-5 arasındaki sınır içinde kalan) sağlayan bitüm oranı grafikten bulunur. Bulunan dört bitüm oranının ortalaması en uygun bitüm oranını vermektedir (Önal ve Kahramangil, 1993; TS 3720, 2010).

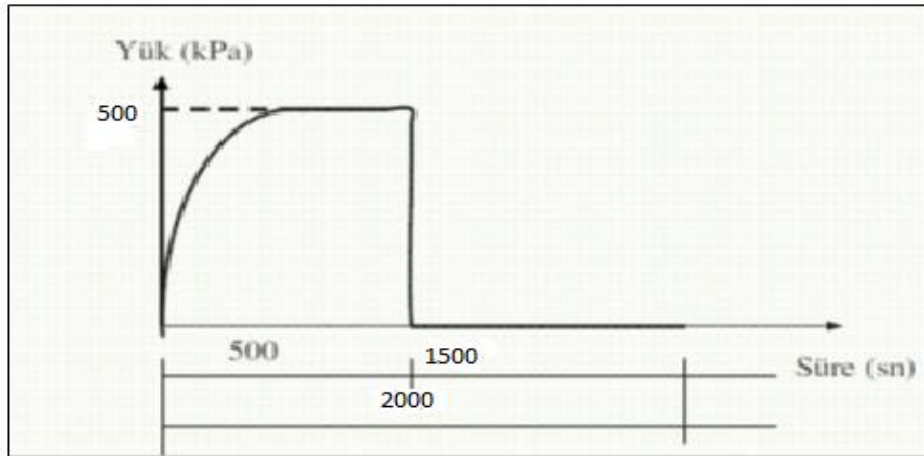
4.5.4. Statik ve dinamik sünme deneyi

En uygun bitüm ve lif oranlarında hazırlanan lifli BSK ve kontrol numunelerine dinamik ve statik yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla statik ve dinamik sünme deneyleri yapılmıştır. Kaplamanın gerçek trafik yükleri altındaki davranışının laboratuvar ortamında benzetilmesi amacıyla BSK numunelerine tekrarlı yükler uygulanmış ve ağır taşıt trafiği yükleme benzetimi gerçekleştirilmiştir. Statik ve dinamik sünme deneyi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Statik ve dinamik sünme deney aleti Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Statik dinamik sünme deney aleti.

BSK kaplamada uygulanan bu deneyde silindirik bitümlü sıcak karışımların tek eksenli basınç yüklemesi altında sünme modülü değerleri belirlenmiştir. Bu deney yöntemi TS EN 12697-25 (2016) standardına göre BSK'larda oluşan kalıcı şekil değiştirmelere karşı direnci ölçmek amacıyla kullanılır. Belli bir süre zarfında, sabit büyüklükte bir yük, sıkıştırılmış silindirik numune üzerine uygulanmıştır. Numunede meydana gelen düşey deformasyonlar ölçülür ve yükün üzerinde bulunduğu sürenin herhangi bir parçası için bir basınç sünme modülü hesaplanır. Yükün kaldırılmasından sonra, belirli bir süre içinde geri dönen deformasyon da ölçülür. Dinamik sünme deneyinde ise uygulanan yük ağır taşıt trafiğini temsil etmesi amacıyla 0-500 kPa arasında çevrimler halinde yükleme periyotları 500 ms yükleme -1500 ms boşaltma tekrarı ile uygulanmıştır. Statik sünme deneyinden temel farkı ise, hareketli trafik yükünü numune üzerinde temsil kabiliyetidir (Er, 2011). Şekil 4.21'de dinamik sünme deneyinde süreye bağlı olarak vuruş periyotları gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Dinamik sünme deneyi yükleme grafiği (TS EN 12697-25, 2016).

4.6.Mineralojik ve İç Yapı Analizleri

4.6.1. X ışını difraksiyonu (XRD) deneyi

BSK ve beton kaplama tasarımı karışımına ait mineralojik yapısının belirlenmesi amacıyla numunelere Yüksek Sıcaklık X ışını Difraktometrisi (HT-XRD) analizi yapılmıştır. Bu analiz Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Panalytical Empyrean Marka cihaz yardımıyla gerçekleştirilmiştir. XRD, katı ve toz haldeki malzemelerin faz analizinde kullanılan temel tekniklerin başında gelmektedir. X-ışını difraktometresi ile malzemedeki fazlar, fazların miktarı, kristal boyutu, latis parametreleri, yapıdaki değişimler, kristal yönlenmesi ve atom pozisyonları hakkında bilgi alınır. HT-XRD cihazında farklı olarak yüksek sıcaklıklarda (25-2300°C) XRD çekimleri yapılabilmektedir (Çağlar, 2001).

X-ışını difraktometresi, günümüzde malzeme karakterizasyonu için endüstriyel ve bilimsel araştırma/geliştirme çalışmalarında; malzeme ve metalürji, seramik, fizik, kimya, biyoloji, biyokimya, jeoloji, madencilik, çimento ve teknolojik uygulama alanlarındaki endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.22'de deneyde kullanılan XRD cihazı görülmektedir (Çağlar, 2001).



Şekil 4.22. HT-XRD analiz cihazı.

4.6.2. Taramalı elektron mikroskobu analizi

Çalışmada BSK ve beton kaplama malzemelerin iç yapılarını analiz edilmesi amacıyla kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile malzemenin iç yapı bağlarının incelenmesine yardımcı olmaktadır. Şekil 4.19'da analizlerde kullanılan SEM analizi cihazı görülmektedir. Bu incelemeler sayesinde lifli malzemelerin boşluk

yapısı, ara yüzeyi, kenetlenme özelliği, liflerin dağılımı gibi parametreler incelenmiştir. İç yapı analizi görüntüleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan ZEISS Supra 40VP marka cihazla çalışma yapılmıştır.

Taramalı elektron mikroskobu ile kırık numune yüzeylerinden alınan parçaların platin kaplanması sonrası farklı büyütme oranlarında iç yapı incelenmesi yapılmıştır.



Şekil 4.23. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

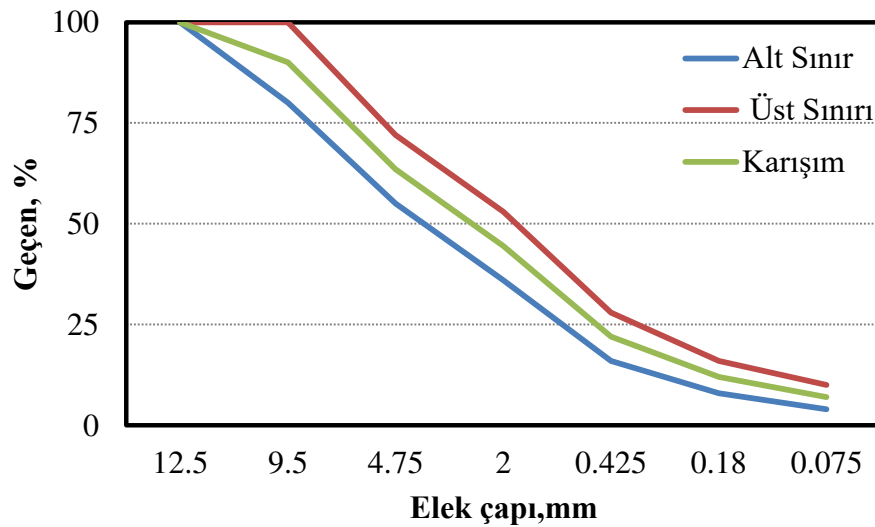
5.DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Lif katkı BSK ve beton kaplama numuneleri üzerinde yapılan deneysel çalışma sonuçları bu bölümde sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

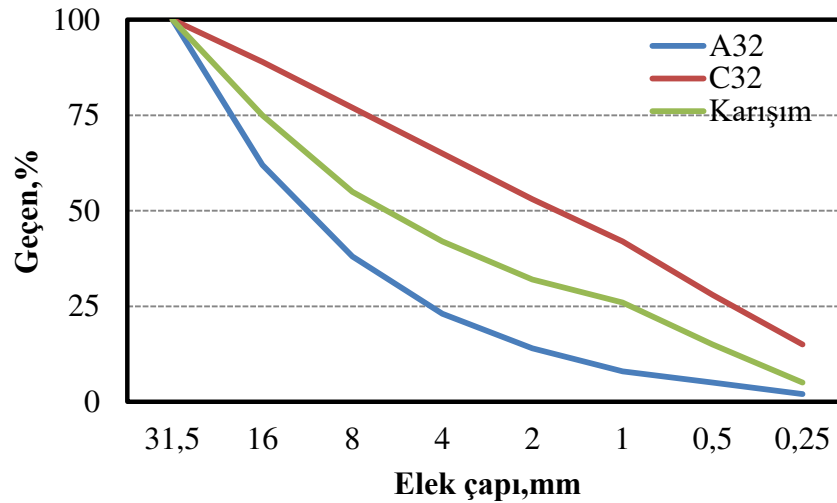
5.1. BSK ve Beton Kaplama Tasarımı Agregası Deney Sonuçları

5.1.1. Elek analizi deney sonuçları

BSK ve beton tasarımında kullanılan agregaların TS EN 933-1 (2012) standardına göre beton karışım tane dağılımı ve BSK aşınma tabakası için elek analizleri yapılmış ve tane dağılımları belirlenmiştir. Şekil 5.1’de lifli BSK kaplama tasarımına ait agrega tane dağılımı sonuçları verilmiştir. Şekil 5.2’de beton karışım granülometri analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.1. BSK tasarımı için Agregası tane dağılımı (KTŞ, 2013).



Şekil 5.2. Beton karışımı granülometri eğrisi.

5.1.2. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları

BSK ve beton kaplama tasarımında agregaların aşınma özelliğinin tespiti Los Angeles (Aşınmaya Dayanıklılık ve Aşınma Kaybı) deneyi ile yapılmaktadır (TS EN 1097-2, 2010). Yol kaplamalarında kullanılacak agregalar sıkıştırma esnasında ve trafik yükleri etkisi altında kırılmaya ve aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Karayolu teknik şartnamesinde aşınma tabakasında kullanılacak agregalar için istenilen değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir. Şartname verilerinde beton karışımlarında kullanılan agregaların en fazla %50 aşınma oranında, BSK’lar için ise en fazla %30 aşınma oranında olması gerekmektedir. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. KTŞ BSK kaplama tasarımı için agrega özellikleri (KTŞ, 2013).

Deney	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Aşınma Kaybı (Los Angeles), Maksimum (%)	35	30	TS EN 1097-2
Kırılmışlık (en az iki yüzü) ağırlıkça, Minimum (%)	100	100	—
Yassılık İndeksi, Maksimum (%)	35	30	TS EN 933-3
Su Absorpsiyonu, Maksimum (%)	2.5	2.0	TS EN 1097-3
Soyulmaya Karşı Dayanım, Minimum (%)	50	50	EK-A
Kil Topakları ve Ufalanabilir Taneler, Maksimum (%)	0,5	0,5	ASTM C-142

Çizelge 5.2. BSK ve beton kaplama tasarımı için Los Angeles aşınma deney sonuçları.

Başlangıç Miktarı (gr)	1.6 mm Elek Üstü Miktarı (gr)	Aşınma Oranı
5000	3654,7	%26,90

5.1.3. İri agrega için özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

Beton ve BSK kaplamada kullanılan agregalarda TS EN 1097-3 (1999) standardına göre yapılan iri agrega için özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. İri agregâ özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları.

Deney	Yoğunluk (gr/cm ³)
Hacim Özgül Ağırlık	2.619
Görünür Özgül Ağırlık	2.631
YKSD Özgül Ağırlık	2.624
Su emme oranı (%)	0.185

5.1.4.İnce agregâ için özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

Beton ve BSK kaplamada kullanılan agregalarda TS EN 1097-3 (1999) standardına göre ince agregâ için özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. İnce agregâ özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları.

Deney	Yoğunluk (gr/cm ³)
Hacim Özgül Ağırlık	2.622
Görünür Özgül Ağırlık	2.695
YKSD Özgül Ağırlık	2.649
Su emme oranı (%)	1.040

5.1.5. Yassılık indeksi tayini deney sonuçları

Beton ve BSK kaplamalarda kullanılan agregaların yassılık indeksi tayini deneyi TS EN 933-3 (2012) standardına göre agregaların yassı danelerin toplam agregâ ağırlığına oranı olarak belirlenmektedir. Deney, en küçük boyutu, en büyük nominal boyutunun 0.6’sından daha küçük olan agregâ danelerinin yassı olarak sınıflandırılması esasına dayanmaktadır. Agregaların yassılık tayini deney sonuçları Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Agregaların yassılık tayini deney sonuçları.

Deney	Yassılık İndeksi (%)	Standart limiti
Yassılık indeksi tayini deneyi	15.69	Maks. % 30

5.1.6. Agregada organik madde ve donmaya ve çözünme deneyi sonuçları

Beton ve BSK tasarımında TS EN 1744-1 (2013) standardına uygun olarak agregaların içinde organik madde bulunup bulunmadığını ve varsa oranını belirlemek üzere renklendirme metodu adı verilen yöntem kullanılmaktadır. TS EN 1744-1 (2013) agregaların kimyasal analiz standardında agreganın üst üste donma çözünme etkilerine maruz kaldığında nasıl davranacağını laboratuvar koşullarında önceden bilmesini sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Soğutma ve donma işlemlerinin soğutucu

bulunmaması nedeniyle yapılamaması halinde veya sonuca kısa sürede varılmak istendiğinde deneyi hızlandırmak amacıyla kimyasal yöntem uygulanır. Çalışmada kimyasal yöntem uygulanmıştır. Agregaların organik madde tayini ve donma çözünme dayanımı deney sonuçları Çizelge 5.6’da verilmiştir.

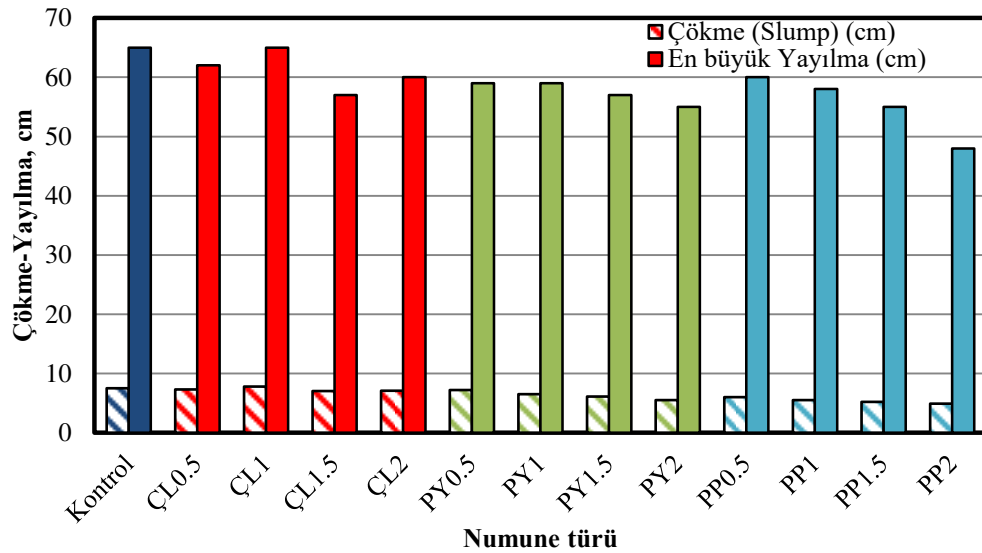
Çizelge 5.6. Organik madde tayini ve donma çözünme dayanımı deney sonuçları.

Deney	%	Şartname limiti
Don Kaybı Oranı	5.467	Maks. %16
Organik Madde	Yoktur	Maks. % 0.5

5.2.Beton Kaplama Deney Sonuçları

5.2.1.Beton işlenebilirlik deney sonuçları

Beton tasarımı kapsamında üretilen çelik lif, polipropilen lif ve polyester lif katkıli beton tasarımlarına üzerinde yapılan çökme ve yayılma deneyleri yapılmış olup elde edilen sonuçlar Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5.3. Lif katkıli beton işlenebilirlik deney sonuçları.

Çökme (slump) deney sonuçları incelendiğinde kontrol karışımından sonra en yüksek işlenebilirlik değerlerinin ÇL katkıli numunelerde olduğu en yüksek çökme değerinin ÇL1 numunesinden elde edildiği görülmüştür. PY katkıli numunelerde ise en yüksek işlenebilirlik çökme değeri 7.2 cm ile PY0.5 numunesinden elde edilmiştir. PP katkıli numunelerde kontrol numunesine göre işlenebilirliğin oldukça düştüğü görülmüştür. Beton yol standartlarına uygun olan işlenebilirlik değerleri için AASTHO yol standardında istenilen maksimum çökme değeri 10 cm olarak belirlenmiştir.

(AASHTO, 2014).Çalışmada elde edilen tüm beton kaplama çökme değerleri AASHTO standartında belirlenen sınırlar içinde kalmıştır.Tasarım çalışmasında en düşük çökme değeri 4.9 cm ile PP2 karışımında elde edilmiştir. Çökme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde tüm lif türlerinin işlenebilirlik değerlerinde azalmaya neden olduğu ancak beton yol kaplamaları için yeterli kıvam ve işlenebilirliğe sahip oldukları görülmüştür. Yayılma deneyi sonuçları incelendiğinde ÇL katkılı beton karışımlarında en büyük yayılma çapı değeri çökme deneyine benzer şekilde 65 cm ile ÇL1 karışımında bulunmuştur. PY katkılı beton karışımlarında en büyük yayılma çapı 59 cm ile PY0.5 karışımında elde edilmiştir. PP katkılı beton karışımları incelendiğinde en büyük yayılma deneyi sonucu PP0.5 karışımında bulunmuştur. Tüm lif katkıları sonuçları değerlendirildiğinde en iyi yayılma deneyi sonucunun ÇL1 karışımında elde edilmiştir. Kıvam ve yayılma deney sonuçlarına göre tüm lif türlerinde katkı oranı artışıyla işlenebilirlik değerlerinin azaldığını ancak karışımların beton yol standartlarında istenilen kıvam şartlarını sağladığı görülmüştür (KTŞ,2013; AASHTO, 2014).

5.2.2. Birim hacim ağırlık (BHA) ve su emme sonuçları

Lif katkıları kullanılarak üretilen beton numunelerinin taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlık (BHA) ile ve ağırlıkça su emme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre taze ve sertleşmiş BHA'ların ÇL katkılı betonlarda çelik lif oranındaki artışa bağlı olarak arttığı görülmüştür. ÇL2 karışımının BHA değeri kontrol BHA değerine göre %1.6 oranında artarak 2.51 t/m^3 değerine ulaşmıştır. PY ve PP katkılı beton numunelerinde lif oranının artışı ile BHA değerlerinin azaldığı görülmüştür. PP lifli karışımlarda BHA değerleri $2.35\text{-}2.4 \text{ t/m}^3$ arasında değişmektedir.

PY lifli karışımlarda BHA değerleri $2.39\text{-}2.45 \text{ t/m}^3$ arasında değişmektedir. Çelik lifli beton karışımlarında BHA değerleri $2.48\text{-}2.51 \text{ t/m}^3$ arasında değişmekte lif oranı arttıkça çelik lifin yoğunluğunun 7.8 t/m^3 olması nedeniyle BHA artmıştır. Lif katkıları kullanılarak üretilen beton numunelerinin taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlık (BHA) ile ve ağırlıkça su emme deney sonuçları Çizelge 5.7'de verilmiştir.

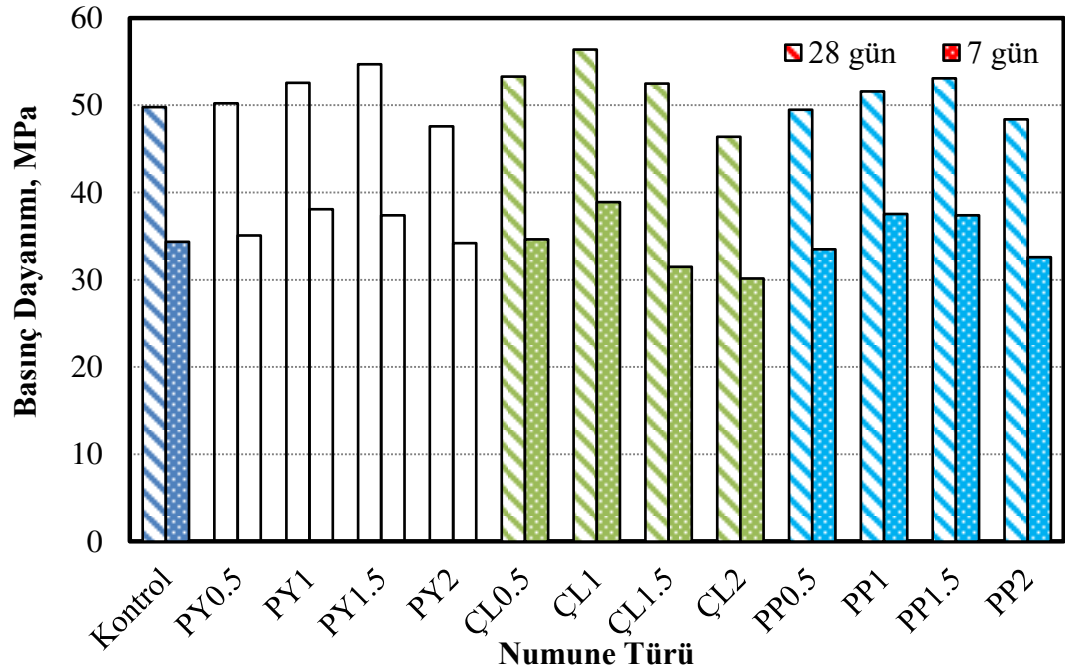
Çizelge 5.7. Lif katkılı betonların BHA ve su emme deney sonuçları.

Numune Adı	Taze beton Birim hacim ağırlık (kg/dm ³)	Sertleşmiş beton Birim hacim ağırlık (kg/dm ³)	Su emme Sonuçları (%)
Kontrol	2.47	2.48	0.050
ÇL0,5	2.48	2.48	0.040
ÇL1	2.49	2.49	0.035
ÇL1.5	2.50	2.50	0.040
ÇL2	2.51	2.51	0.030
PY0.5	2.45	2.46	0.045
PY1	2.43	2.43	0.040
PY1.5	2.41	2.41	0.030
PY2	2.39	2.39	0.030
PP0.5	2.43	2.43	0.040
PP1	2.40	2.40	0.030
PP1.5	2.38	2.38	0.025
PP2	2.35	2.35	0.020

BHA değerlerinde bu değişimin nedeni olarak kullanılan katkı malzemelerinin farklı özgül ağırlıklarının olması gösterilmektedir. Ayrıca işlenebilirlik deney sonuçlarıyla BHA sonuçları karşılaştırıldığında en düşük işlenebilirlik ve en düşük BHA sonuçları aynı şekilde PP lifli karışımlarda; en yüksek işlenebilirlik ve BHA değerleri çelik lifli karışımlarda elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre lif özgül ağırlığının değişiminin işlenebilirlik ve BHA değerlerini etkilediği görülmüştür. Ağırlıkça su emme oranı deney sonuçları değerlendirildiğinde ise katkı oranına bağlı olarak tüm lif türleri için su emme oranının azaldığı gözlenmiştir. Betonun kalıcılık özelliği için suya karşı dirençli olması istenmektedir. Deney sonuçlarına göre lif katkılarının betonun içinde doğru bir dağılımda yerleştiğinde su emme oranlarında azalmaların olduğu görülmüştür. Su emme oranı en düşük olan beton karışımı PP2 olmuştur. Beton kaplamalarda oluşacak bozulma türleri çatlaklardan suyun etkilerini engellemek için su emme oranı düşük karışımlar yapılmalıdır. Su emme değerinin beton kaplamalarda düşük olması sonucunda betonun su etkisi ile zarara uğraması ve kaplamanın altına sızması engellenebilir. Bu davranış beton kaplama kaynaklı oluşacak pompaj etkisini azaltabilecektir.

5.2.3. Basınç dayanımı sonuçları

Lif katkılı beton karışımlarına çelik, polipropilen ve polyester lif katkılarının farklı lif oranlarında katılması ile hazırlanan numuneler üzerinde 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Lif katkılı beton karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4. Lif katkılı beton basınç deneyi sonuçları.

Beton basınç dayanımı deney sonuçları değerlendirildiğinde; Çelik lif katkılı beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımlarının 30.16-38.91 MPa arasında değiştiği, ÇL0.5 katkılı numunede kontrol karışımına göre % 0.81 dayanım artışı görülürken, ÇL1 numunesi için % 13.4 artış görülmüştür. ÇL1.5 ve ÇL2 katkılı numunelerin 7 günlük basınç dayanımları kontrol karışımına göre sırasıyla % 9 ve % 12 oranlarında dayanım kayıpları gerçekleşmiştir. Çelik lifli karışımların 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde basınç deneyi sonuçlarının 46.4-56.4 MPa arasında değiştiği bulunmuştur. Çelik lif katkılı beton numuneleri için en yüksek basınç dayanımı değeri 56.40 MPa ile ÇL1 karışımından elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarında ÇL0.5, ÇL1, ÇL1.5 karışımlarının basınç dayanımları sırasıyla % 7, % 13 ve % 5.4 artış sağlarken, ÇL2 karışımında % 7.3 azalma olduğu belirlenmiştir.

Polipropilen lif katkılı beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımlarının 32.6-37.55 MPa arasında değiştiği, PP0.5 lif için % 3 azalma olduğu görülmüştür. PP1

ve PP1.5 numuneleri için sırasıyla % 9 ve % 8.7 dayanım artışı belirlenmiştir. PP2 numunesinde % 5 azalma görülmüştür.

PP katkılı beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde basınç deneyi sonuçlarının 48.4-53.1 MPa arasında değiştiği bulunmuştur. Polipropilen lif katkılı beton numuneleri için en yüksek basınç dayanımı değeri 53.1 MPa ile PP1.5 karışımında elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarında PP0.5 lif için % 0.6 dayanımda azalma görülürken, PP1 ve PP1.5 karışımlarının kontrol karışımına göre basınç dayanımlarında sırasıyla % 3.6 ve % 6.6 artış sağlanmıştır. PP2 karışımında % 3 azalma olduğu bulunmuştur.

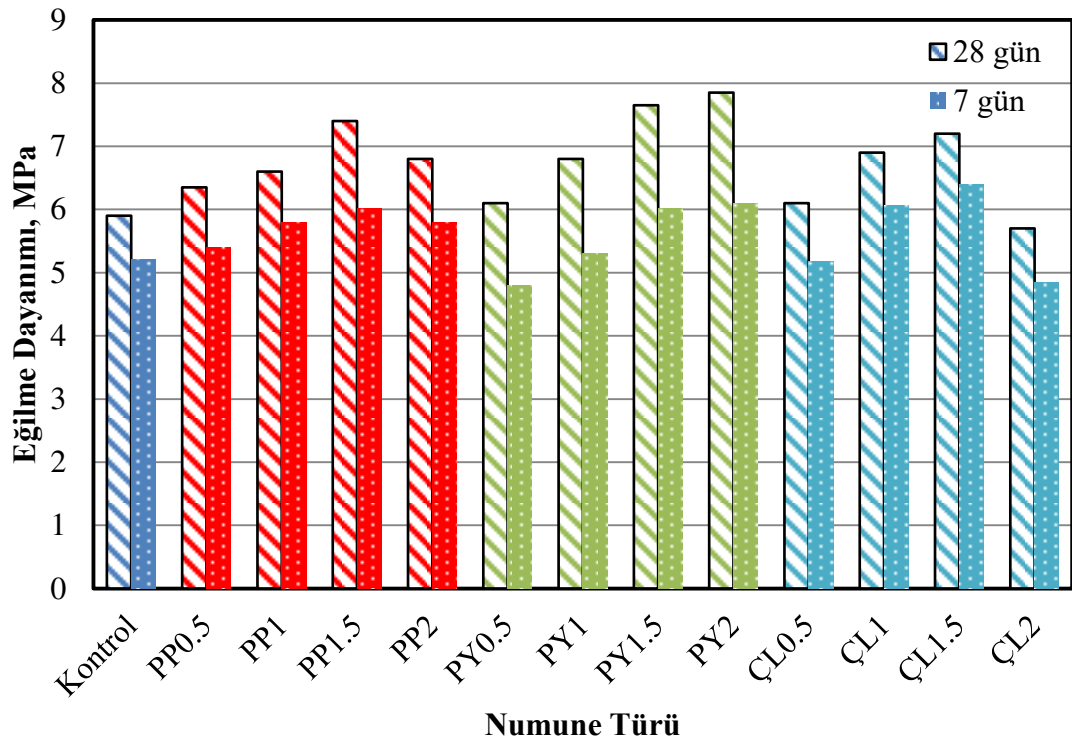
Polyester lif katkılı beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımlarının 34.2-38.1 MPa arasında değiştiği, PY0.5 lif için % 2 artış olduğu görülmüştür. PY1 ve PY1.5 lif katkılı numuneler için sırasıyla % 10 ve % 8.8 dayanım artışı bulunmuştur. PY2 numunesi için % 1.2 azalma belirlenmiştir. PY katkılı beton numunelerinin 28.gün basınç dayanımları incelendiğinde basınç deneyi sonuçlarının 47.6-54.7 MPa arasında değiştiği görülmüştür. PY beton numuneleri için en yüksek basınç dayanımı 54.7 MPa ile PY1.5 karışımında elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarında PY0.5 lif için % 0.9 oranında artış görülürken, PY1 ve PY1.5 lif karışımlarının basınç dayanımlarında sırasıyla % 5.6 ve % 9.8 oranlarında artış sağlanmıştır. PY2 karışımında % 4.5 azalma olduğu bulunmuştur. Basınç dayanımı sonuçlarına göre beton karışımlarında en uygun lif kullanım oranının %1-1.5 olduğu belirlenmiştir.

28. gün beton basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımının 56.40 MPa değeri ile ÇL1 karışımında, en düşük dayanımın da 46.4 MPa değeri ile ÇL2 karışımında olduğu bulunmuştur. Beton basınç dayanımlarının tümü dikkate alındığında PY, PP ve ÇL lif katkılı betonların basınç dayanımı değerlerinin 46.4-56.4 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Beton yollar teknik standardına göre beton sınıfının en düşük C30 sınıfında ve AASTHO şartnamesine göre en az 28 MPa olması gerekmektedir. Çalışmada üretilen lifli beton numunelerinin bu koşulları sağladığı basınç dayanımı deney sonuçlarından görülmüştür (KTŞ, 2013; AASTHO, 2014).

5.2.4. Eğilme dayanımı sonuçları

Lif katkılı beton karışımlarına çelik, polipropilen ve polyester liflerin farklı oranlarda katılması ile hazırlanan 100x100x500 mm numuneler üzerinde

gerçekleştirilen 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.5. Lif katkılı beton kaplama karışımları eğilme deneyi sonuçları.

Eğilme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde; çelik lif katkılı beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımlarının 4.85-6.4 MPa arasında değiştiği görülmüştür. ÇL0.5 katkılı numunede % 0.4 eğilme dayanımında düşme görülürken, ÇL1.5 numunesi için % 23 eğilme dayanımı artışı görülmüştür. ÇL1 katkılı numunelerin 7 günlük eğilme dayanımları %16 oranında artmıştır. ÇL2 katkılı numunelerde 7 günlük eğilme dayanımında % 7 dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Çelik lif karışımların 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde eğilme değerlerinin; 5.7-7.2 MPa arasında değiştiği bulunmuştur. Çelik lif katkılı beton numuneleri için en yüksek eğilme dayanımı 7.2 MPa ile ÇL1.5 karışımında elde edilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımlarında ÇL0.5, ÇL1 ve ÇL1.5 karışımlarının eğilme dayanımları sırasıyla % 3.3, % 16 ve % 22 oranında artış göstermiştir. ÇL2 karışımında % 3.4 azalma olduğu bulunmuştur.

Polipropilen lif katkılı beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımlarının 5.4-6.01 MPa arasında değiştiği görülmüştür. PP0.5 katkılı numunelerde % 3.8 eğilme dayanımında artış görülürken, PP1 ve PP2 numuneleri için % 11.5 eğilme dayanımı

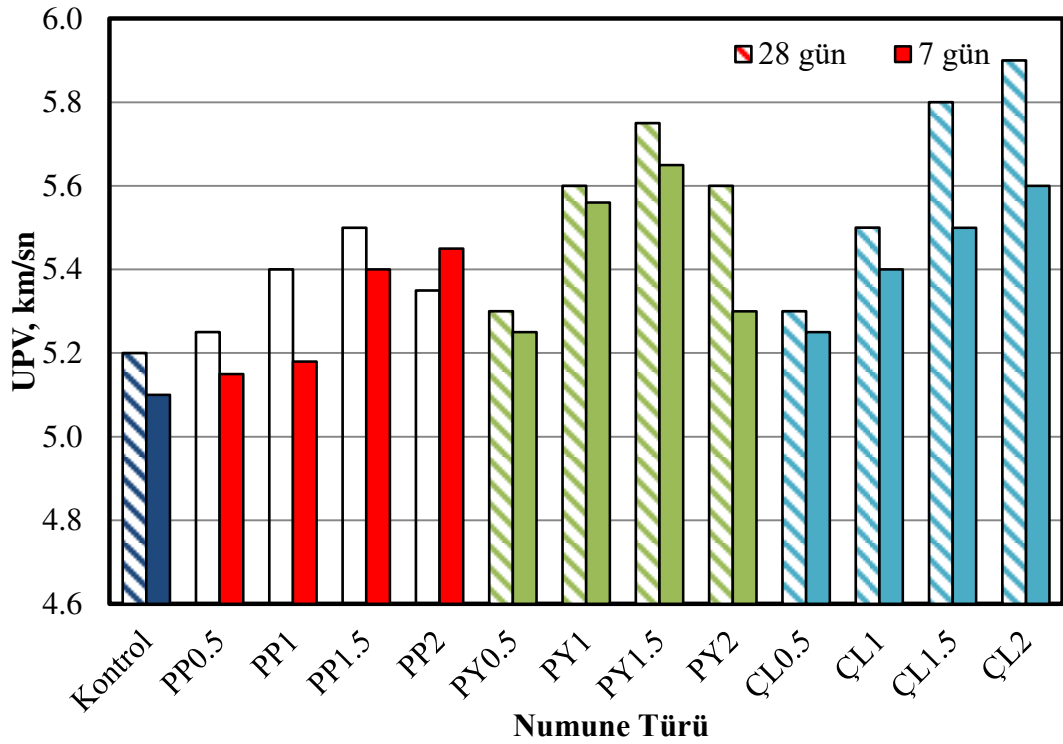
artışı görülmüştür. PP1.5 katkılı numunenin 7 günlük eğilme dayanımları % 15.5 oranında artmıştır. Polipropilen lif katkılı kiriş numunelerinin 28 günlük dayanımları incelendiğinde sonuçların; 6.35-7.4 MPa arasında değiştiği bulunmuştur. PP lif katkılı beton numuneleri için en yüksek eğilme dayanımı değeri 7.4 MPa ile PP1.5 karışımında elde edilmiştir. PP0.5, PP1, PP1.5 ve PP2 karışımlarının eğilme dayanımı değişimleri sırasıyla % 7.6, % 11.8, % 25.4 ve % 15 artış şeklinde gerçekleşmiştir.

Polyester lif katkılı beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımlarının 4.8-6.1 MPa arasında değiştiği görülmüştür. PY0.5 katkılı numunede % 7.7 eğilme dayanımında azalma görülürken PY1 için % 1.9 ve PY1.5 için % 15.7 eğilme dayanımı artışı gerçekleşmiştir. PY2 numunesinde 7 günlük eğilme dayanımı % 17.3 oranında artmıştır. PY lif katkılı kiriş numunelerinin 28 günlük dayanımları incelendiğinde sonuçların 6.1-7.85 MPa arasında değiştiği bulunmuştur. Polyester lif katkılı beton numuneleri için en yüksek eğilme dayanımı değeri 7.85 MPa ile PY2 karışımında elde edilmiştir. PY0.5, PY1, PY1.5 ve PY2 karışımlarının eğilme dayanımı değişimleri sırasıyla % 3.4, % 15.2, % 29.6 ve % 33 oranlarında artış sağlanmıştır. Lif katkılı beton karışımlarında en yüksek eğilme dayanımı değeri 7.85 MPa ile PY2 karışımında en düşük eğilme dayanımı değeri 5.7 MPa ile ÇL2 karışımında elde edilmiştir.

Beton yollar standartlarına göre eğilme dayanımının 4.5 MPa'dan büyük olması gerekmektedir. PY, PP ve ÇL lif katkılı kiriş numunelerin eğilme dayanım değerleri 5.7 MPa ile 7.85 MPa arasında olduğu için beton yol standartlarına uygun oldukları görülmüştür (KTŞ, 2013).

5.2.5. Ultrases geçiş hızı (UPV) deney sonuçları

Çelik, polipropilen ve polyester lif katkıları ile hazırlanan beton karışımları üzerinde gerçekleştirilen Ultrases geçiş hızı (UPV) deney sonuçları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



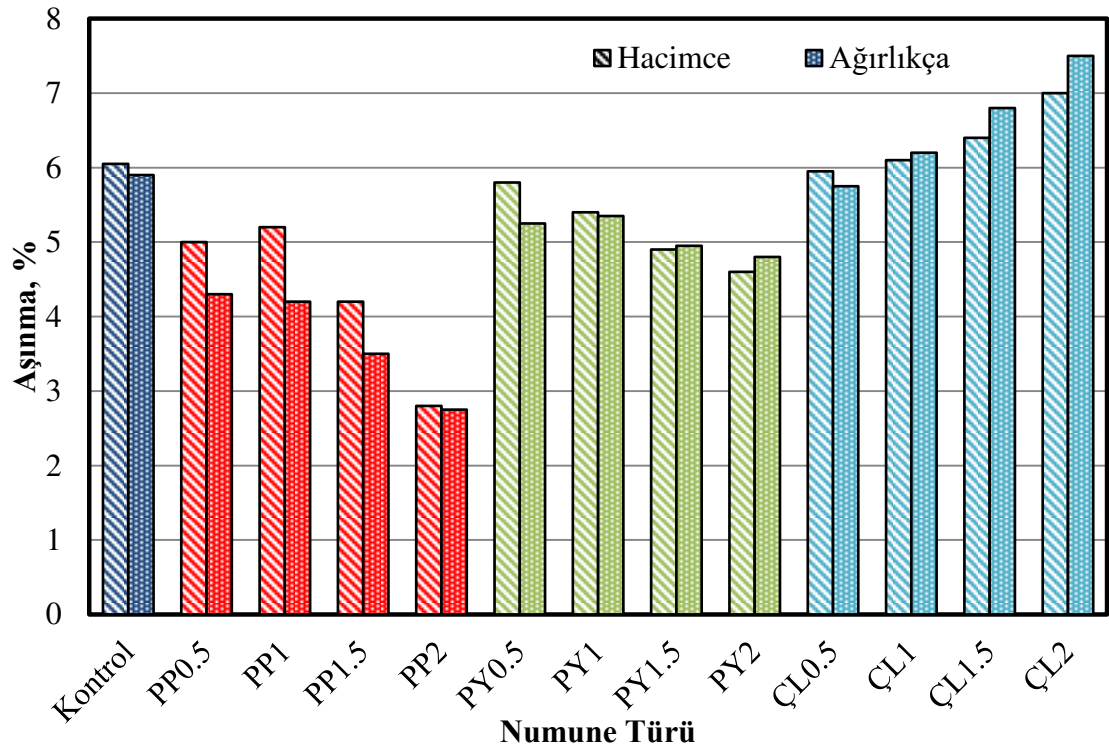
Şekil 5.6. Beton kaplama ultrases deney sonuçları.

Deney sonuçları değerlendirildiğinde her lif türü ve oranında deney sonuçlarının kontrol numunesine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ultrases geçiş hızı deneyi genel olarak değerlendirildiğinde; 7 günlük numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarının 5.15-5.65 km/sn arasında değiştiği belirlenmiştir. Ultrases geçiş hızı değerlerinin 28 günlük numuneler üzerinde 5.25-5.9 km/sn arasında değiştiği görülmüştür. Çizelge 4.8'e göre lifli beton numuneleri değerlendirildiğinde beton kalitelerinin mükemmel sınıfında olduğu bulunmuştur (Erdoğan, 2003).

5.2.6. Aşınma Direnci Deney Sonuçları

Beton yol kaplamaları yoğun ve dinamik lastik tekerlekli taşıt trafiği altında kaldığından aşınma etkilerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle lifli beton karışımlarının karayolu uygulamalarında aşınma direnci beton kalıcılığı açısından oldukça önemli bir özelliktir. Üretilen lifli beton karışımlarının aşınma davranışı 28 gün standart kür havuzunda şartlandırılmış 70x70x70 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde Böhme deney cihazı ile belirlenmiştir. Beton yollarda aşınma, en çok ağır yüklere ve olumsuz hava şartlarına maruz yüzey tabakasında meydana gelmektedir. Bu nedenle aşınma deneyleri 70x70 mm küp numunelerin yüzeylerinde yapılmıştır. Lifli beton

numunelerine TS 2824 EN 1338 standardına uygun aşınma deneyi uygulanmıştır. Aşınma deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

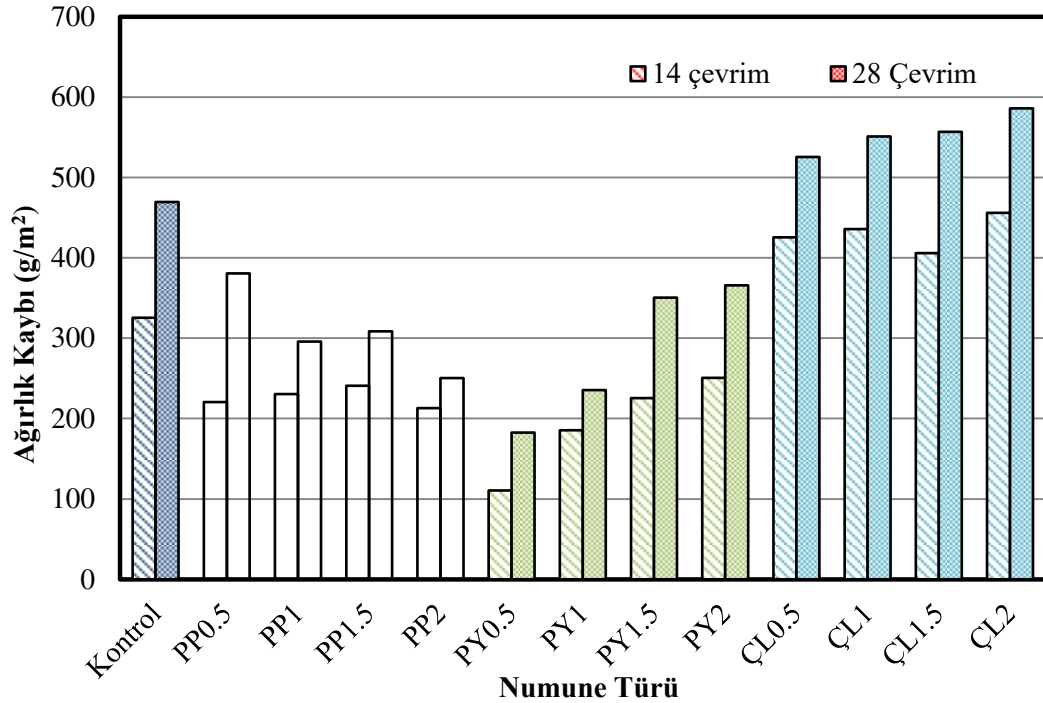


Şekil 5.7. Aşınma direnci deneyi sonuçları.

Aşınma deney sonuçlarına göre lifli beton numunelerinin hacimsel aşınma oranları incelendiğinde hacimce aşınma değerleri % 2.8-% 7 aralığında değişmekte olup ağırlıkça aşınma değerleri ise % 2.75-% 7.5 arasında değişmektedir. Hacimce aşınma değerleri incelendiğinde en düşük aşınma oranı olan beton karışımının PP2 olduğu görülmüştür. PP2 karışımı kontrol numunesine göre % 46.3 oranında daha az aşınma göstermiştir. En yüksek aşınma miktarı ÇL2 numunesinde kontrol karışımına göre % 15.7 daha fazla aşınma göstermiştir. Ağırlıkça aşınma oranları da hacimsel aşınma oranlarıyla benzer sonuçları vermiştir. Aşınma direnci yüksek lifli karışımların beton kaplama tasarımlarında kullanılması sonucunda beton kaplamanın bozulmalara karşı direncinin artacağı bunun sonucunda bakım onarım maliyetlerinin çok daha az olacağı düşünülmektedir. Aşınma dayanımının düşük olduğu kaplamalarda yüzeyde oluşan çatlakların ve bozulmaların hızla gelişmesi nedeniyle kaplama daha kısa sürede hizmet ömrünü tamamlayacaktır. Deney sonuçlarına göre aşınmaya karşı direnci en yüksek lifli beton karışımlarının PP lifli karışımlar, en dayanıksız karışımların ÇL1 ve üzerindeki lif karışımlarında olduğu görülmüştür.

5.2.7. Buz çözücü tuzlara karşı donma çözünme (CDF) deneyi sonuçları

Beton kaplamaların buz çözücü tuzlara karşı direncinin ölçüldüğü bu deney yöntemi kış aylarında buzların eritilmesi amacıyla kullanılan tuzların zararlı etkilerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Hazırlanan lif katkılı beton numunelerinin buz çözücü tuz ve donma-çözünme etkilerine karşı dayanıklılığını belirlemek için yapılan 14 ve 28 çevrimlik CDF deneylerine ait sonuçlar Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8.Beton kaplamalarda buz çözücü tuz deneyi sonuçları.

CDF deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde; en düşük ağırlık kayıplarının PY0.5 ve PY1 karışımlarının numunelerinde sırasıyla 182.5 gr/m^2 ve 235.4 gr/m^2 olduğu belirlenmiştir. PP katkılı beton numunelerinde en düşük aşınma kaybı PP2 numunesinde 250.4 gr/m^2 aşınma kaybı ile bulunmuştur. Ancak 28 çevrim sonunda ÇL katkılı beton numunelerinde ağırlık kayıplarının kontrol karışımına göre yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. PP ve PY katkılı beton karışımlarının 14 ve 28 çevrim sonucunda kontrol karışımına göre daha az aşınma gösterdiği belirlenmiştir. PP ve PY karışımlarında lif katkılarının betonun yüzey direncini artırması nedeniyle betona etki edecek buz çözücü tuz etkisine karşı betonun özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. CDF deneyi sonrasında beton numunelerinin görünüşleri Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Çelik lifin beton yüzeyine yakın kalma problemi sonucunda donma-çözünme etkisinin arttığı ve aşınmaların bu nedenle olduğu tahmin edilmektedir. PY ve PP lif katkılı

beton karışımlarının özellikle kış aylarında karla mücadele amacıyla kara yollarında kullanılan buz çözücü tuz uygulamalarına karşı beton yol kaplamalarındaki bozulmalara karşı daha dirençli hale getireceği düşünülmektedir. Çelik liflerin beton matris içinde dağılımının PP ve PY liflere göre dağılımına oranla daha az olması nedeniyle aşınma deney sonuçlarına benzer şekilde çalışmada kullanılan RC65/60 tipi lifin diğer liflere göre buz çözücü tuz etkisine karşı olumsuz etkisinin olduğu görülmüştür.



Şekil 5.9. Buz çözücü tuz deneyi (CDF) sonrası PP ve çelik lifli numuneler.

Çizelge 5.8. Donma çözülme direnci kategorileri (KTŞ, 2013).

Kategori	Kütle kaybı (28 gün)
FTO	-
FT1	Ortalama $< 1.0 \text{ kg/m}^2$ Tek değer $< 1.5 \text{ kg/m}^2$
FT2	Ortalama $< 0.5 \text{ kg/m}^2$

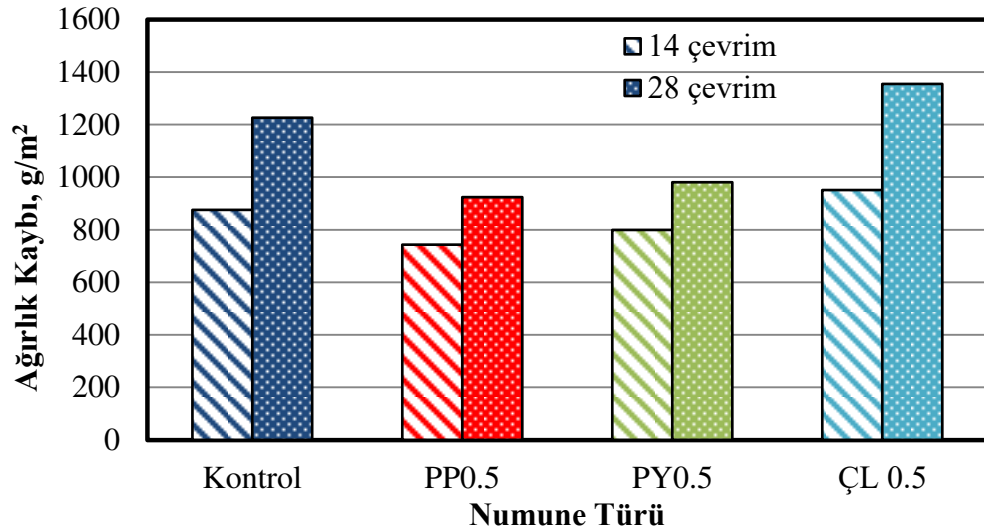
Beton kaplama tasarımında TSE CEN/TS 12390-9 standardına göre yapılan deney sonuçları değerlendirildiğinde donma çözülme direnci kategorileri Çizelge 5.8’de verilmiştir. Beton kaplamanın yapıldığı bölgenin iklim koşullarına göre kategoriler (FTO /FT1 /FT2) belirlenmeli ve kaplama tasarımı bu seçime göre yapılmalıdır (KTŞ, 2013).

KTŞ’ne göre beton kategorileri şu şekilde sıralanmaktadır:

- FTO: Donma –Çözünme olayı gerçekleşmeyen yerler.
- FT1: Donma –Çözünme olayı gerçekleşen yerler.
- FT2: Donma –Çözünme olayı olan ve buz çözücü maddelerin kullanıldığı yerler olmak üzere 3 kategori verilmiştir.

Yol kaplamasının, donma-çözünme ve buz çözücü maddelerin etkilerine maruz kalması durumunda, betona etki edecek çevre sınıfı seçilirken TS EN 206, TS 13515 standardına göre XF4 çevresel etki sınıfında seçilmeli ve donma çözülme direnci kategorisi FT2 olmalıdır. Lifli karışımlardan PP ve PY liflerin tüm karışımları için CDF aşınma kaybı miktarının 500 gr/m^2 altında olduğu için beton yol şartname değerlerine uygundur. Kontrol numunesinin 28 çevrim sonucu CDF aşınma kaybı miktarı 469.38 gr/m^2 ile şartnamede verilen sınır değere yakın sonuç vermiştir. Çelik lifli numunelerin 28 çevrim sonuçları CDF deneyi sonuçları $525-585 \text{ gr/m}^2$ ile FT2 kategorisine göre istenilen şartname limitinin üzerinde bulunmuştur.

Standartta belirtilmemesine rağmen BSK kaplama numunelerine de CDF deneyi uygulanmıştır. BSK'larda en uygun bitüm oranı ve optimum lif katkısına göre hazırlanan karışımlara CDF buz çözücü tuz deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda kontrol numunesine göre PP ve PY karışımın aşınma oranlarının kontrol numunesine göre daha az çelik lif ve kontrol numunesinin kayıplarının daha yakın olduğu Şekil 5.10'da verilmiştir. CDF deney yöntemi beton tasarımına uygun bir deney yöntemi olduğu için BSK kaplamalarda uygulanmamaktadır. Esnek kaplamada bozulmaların önüne geçilmesi için PP ve PY lifli kaplamalar bu etkiye karşı BSK direncini arttırmıştır.



Şekil 5.10. BSK numunelere uygulanan buz çözücü tuz deneyi sonuçları.

5.3. BSK Tasarımı Deney Sonuçları

5.3.1. BSK tasarımı bitüm deneyleri sonuçları

BSK tasarımıda kullanılan bitümün fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla TS 115 EN 58 (2012) standardına göre hazırlanan bitüm numunesi üzerinde TS 1081 EN 12591 (2011) standardında belirtilen deneyler yapılmıştır. Deneyisel çalışmalarda, bitümlü bağlayıcı olarak İzmit TÜPRAŞ Rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfı bağlayıcı kullanılmıştır. Saf bitümlü bağlayıcı üzerinde bağlayıcının geleneksel özelliklerini tespit etmek için penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, özgül ağırlık ve parlama deneyleri yapılmıştır. Bitüm üzerinde yapılan deney sonuçları Çizelge 5.9'da sunulmuştur.

Çizelge 5.9. BSK kaplama tasarımında 50/70 bitüme uygulanan deneyler.

Deney	Standartlar	Sonuçlar	Limitler
Penetrasyon (25°C,0,1mm)	TS EN 1426	56,5	50-70
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	47	46-54
Duktilite (mm)	TS EN 13589	100	-
Parlama noktası (°C)	TS EN ISO 2592	305	>230
Yoğunluk (gr/cm ³)	TS 1087	1,03	-

5.3.2. BSK Marshall dayanım ve akma deney sonuçları

BSK kaplama tasarımında TS EN 3720 standardına uygun olarak BSK içerisinde kullanılacak en uygun bitüm miktarını tayin etmek ve kaplamanın dayanımının ve performansının belirlemesi amacıyla yapılmaktadır. Marshall deney yönteminde, bitüm-agrega karışımının ısıtılması, karıştırılması ve sıkıştırılması ile 101,6 mm çapında ve yaklaşık 60 mm yüksekliğinde hazırlanan numuneler Marshall deney cihazında test edilerek dayanım ve akma değerleri belirlenir. Ayrıca numunelerin pratik özgül ağırlık (PÖA), Marshall stabilitesi (MS), boşluk oranı (BO) ve bitümle dolu boşluk oranı (BDBO), akma, toplam boşluk yüzdesi (ABO), ve Marshall Oranı (MO) değerleri hesaplanarak belirlenmiştir (Kara, 2012). Tüm bu değerlendirmeler sonucunda trafik yüklerine doğrudan maruz kalan, lif katkılı BSK tabakasının en üst katmanı olan aşınma tabakasında kullanılmak üzere, istenilen lif türü ve agrega gradasyonu için en uygun bitüm oranı bulunmuştur.

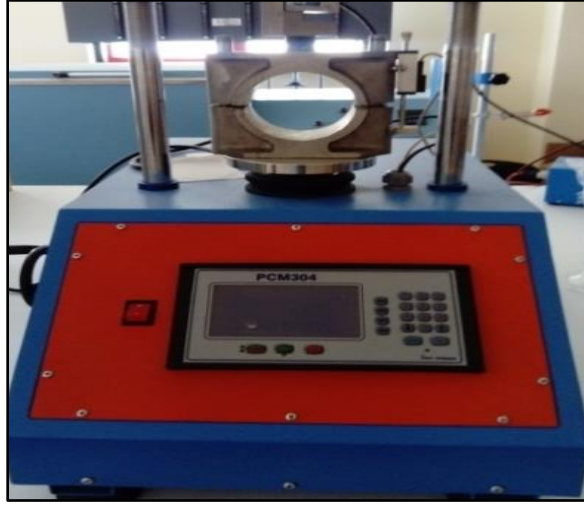
Her bir seri için 50-70 penetrasyona sahip bitümden, toplam agregaya ağırlığının % 0.5, % 1 ve % 1.5 oranlarında PP, PY ve ÇL lif katkıları agregalarla birlikte karışıma eklenmiş ve her bitüm oranından üçer karışım olacak şekilde her bir seri için 21 adet numune hazırlanmıştır. Doğabilecek karışıklığı önlemek için numaralandırılan briket boyutları ölçülerek kaydedilmiştir. Numuneler Marshall dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Hesaplamalarda çıkan değerlerin, Karayolları Teknik Şartnamesi' ne uygunluğu kontrol edilmiştir. Karayolları teknik şartnamesi değerleri Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. BSK dizayn kriterleri (KTŞ, 2013).

Özellikler	Binder		Aşınma	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		75	
Marshall Stabilesi, kg	750	—	900	—
Boşluk oranı, %	4	6	3	5
Bitümle dolu boşluk, %	60	75	65	75
Agregalar Arası Boşluk, (V_{ma}) %	13	—	14	—
Akma, mm (10^{-2} inç)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)
Filler/Bitüm Oranı	—	1.4	—	1.5
Bitüm (Ağırlıkça, %)	3.5	6.5	4.0	7.0

Marshall dayanımı bir numunenin kırılmadan önce dayanabileceği maksimum yük, akma değeri ise kırılma anına kadar meydana gelmiş olan şekil değişimi olarak hesaplanmaktadır. Bitümlü karışımların dayanımının trafik yüklerini karşılayabilecek kadar yüksek olması beklenmektedir. BSK'nın dayanımın çok yüksek olması durumunda da çatlaklar meydana gelebilir. Bu nedenle, dayanımın çok düşük olması istenmediği gibi, çok yüksek değerde olması da istenmeyen bir durumdur. Kaplamanın dayanımı, agregalar arası içsel sürtünmeye ve bitümle agregası arasında meydana gelen kenetlenme (yapışma) özelliğine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla agreganın yüzey dokusunun ve bitümün absorpsiyon özelliğinin iyi olması, dayanımın yüksek çıkmasını sağlayacaktır. Yüksek bitüm oranı, fazla miktarda ince agregası ve köşeli agregası yerine yuvarlak agregası kullanılması da dayanım değerinin düşük çıkmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada lif katkıları yardımıyla agregası bitüm içsel

sürtünmesinin artırılması hedeflenmiştir. Marshall cihazından elde edilen dayanım değerleri, briket yüksekliklerine göre düzeltme faktörü değerleriyle ile çarpılarak hesaplanmış ve 10 seri numune için deneyler yapılmıştır. Bitüm oranlarına bağlı olarak, pratik özgül ağırlık (PÖA), Marshall dayanımı (MS), boşluk oranı (BO) ve bitümle dolu boşluk oranı (BDBO), akma, agregalar arası boşluk yüzdesi (ABO) hesaplanmış ve sırasıyla deney sonuçları ve optimum bitüm oranları Çizelge 5.11-5.13’de verilmiştir. Marshall Deney aletleri ve Marshall test numuneleri Şekil 5.11 ve 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.11. Marshall stabilite deney aleti.



Şekil 5.12. Marshall deney numuneleri.

Çizelge 5.11. Kontrol numunelerin Marshall deney sonuçları.

Kontrol Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgül Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	14.012	48.692	7.246	2388	1579.325	2.508
3.5	13.002	61.439	5.015	2428	1646.890	1.675
4	12.553	73.092	3.378	2452	1762.396	2.360
4.5	12.264	84.481	1.907	2472	1561.355	2.724
5	12.667	90.425	1.213	2473	1362.653	3.434
5.5	13.429	93.010	0.940	2463	1079.401	4.240
6	14.206	95.049	0.703	2452	955.158	4.167

Kontrol karışımında ve diğer lifli BSK'larına ait Marshall deney sonuçları incelendiğinde bitüm oranı artışına bağlı olarak PÖA ve Marshall stabilite değerlerinin en yüksek değere ulaştıktan sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Bitümüm önce agreganın boşluklarını doldurduğu daha sonra katılan fazla bitümün karışımın dayanımında düşmelere neden olduğu görülmektedir. Çizelge5.11-5.14 yardımıyla BSK tasarımında kullanılacak en uygun bitüm oranı tespit edilmiş bu karışım oranlarına göre en uygun lif oranı belirlenmiştir.

Çizelge 5.12. Polipropilen Lif katkılı BSK (PP0.5, PP1, PP1.5) numunelerin Marshall deney sonuçları.

PP0.5 Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	14.993	44.873	8.322	2355	1437.985	2.170
3,5	14.573	53.792	6.751	2378	1508.642	2.250
4	12.989	70.216	3.883	2434	1571.923	2.378
4,5	12.960	79.095	2.712	2446	1509.302	2.587
5	13.662	82.673	2.368	2438	1384.161	3.647
5,5	14.045	88.073	1.676	2439	1130.174	4.535
6	14.815	90.271	1.443	2429	1000.485	4.670

PP1 Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	15.988	41.353	9.394	2327	1395.752	2.470
3,5	15.964	48.324	8.269	2339	1428.580	2.393
4	14.687	60.803	5.759	2386	1460.600	2.647
4,5	13.971	72.501	3.843	2418	1480.728	3.009
5	13.543	83.521	2.234	2442	1311.975	3.433
5,5	14.453	85.174	2.143	2427	1178.141	4.350
6	15.181	87.728	1.866	2418	995.575	4.487

PP1.5 Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	15.915	41.474	9.315	2329	1397.120	2.183
3,5	15.799	48.921	8.089	2344	1428.555	2.427
4	14.691	60.804	5.763	2386	1481.368	2.733
4,5	14.340	70.429	4.256	2407	1500.398	3.013
5	14.385	77.861	3.185	2418	1424.875	3.817
5,5	14.906	82.164	2.661	2414	1229.330	4.283
6	15.559	85.218	2.304	2407	1084.441	4.603

Çizelge 5.13. Polyester lif katkılı BSK (PY0.5, PY1, PY1.5) numunelerin Marshall deney sonuçları.

PY0.5 Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	16.991	38.357	10.476	2299	1352.640	2.013
3,5	16.259	47.237	8.591	2331	1401.313	2.143
4	15.999	55.051	7.208	2350	1467.741	2.490
4,5	15.023	66.696	5.019	2388	1487.425	2.677
5	14.034	80.133	2.789	2428	1433.740	3.480
5,5	14.662	83.779	2.382	2421	1277.737	4.401
6	15.608	84.879	2.360	2406	1129.287	4.617

PY1 Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	16.518	39.668	9.966	2313	1374.003	2.047
3,5	16.108	47.690	8.426	2335	1430.553	2.260
4	15.830	55.647	7.021	2354	1528.102	2.533
4,5	15.351	64.922	5.386	2379	1512.113	2.927
5	14.782	75.411	3.635	2407	1433.740	3.400
5,5	15.315	79.588	3.129	2403	1277.737	4.401
6	15.895	83.066	2.693	2398	1172.762	4.767

PY1.5 Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	16.001	41.207	9.408	2327	1359.822	2.117
3,5	16.174	47.463	8.498	2333	1383.343	2.207
4	16.014	54.886	7.225	2349	1448.501	2.430
4,5	15.651	63.487	5.721	2371	1489.379	2.807
5	16.085	68.263	5.108	2370	1464.152	3.333
5,5	16.425	73.223	4.400	2371	1248.850	4.491
6	17.158	75.792	4.153	2362	1090.497	4.700

Çizelge 5.14. Çelik lif katkılı BSK (ÇL0.5, ÇL1, ÇL1.5) numunelerin Marshall deney sonuçları.

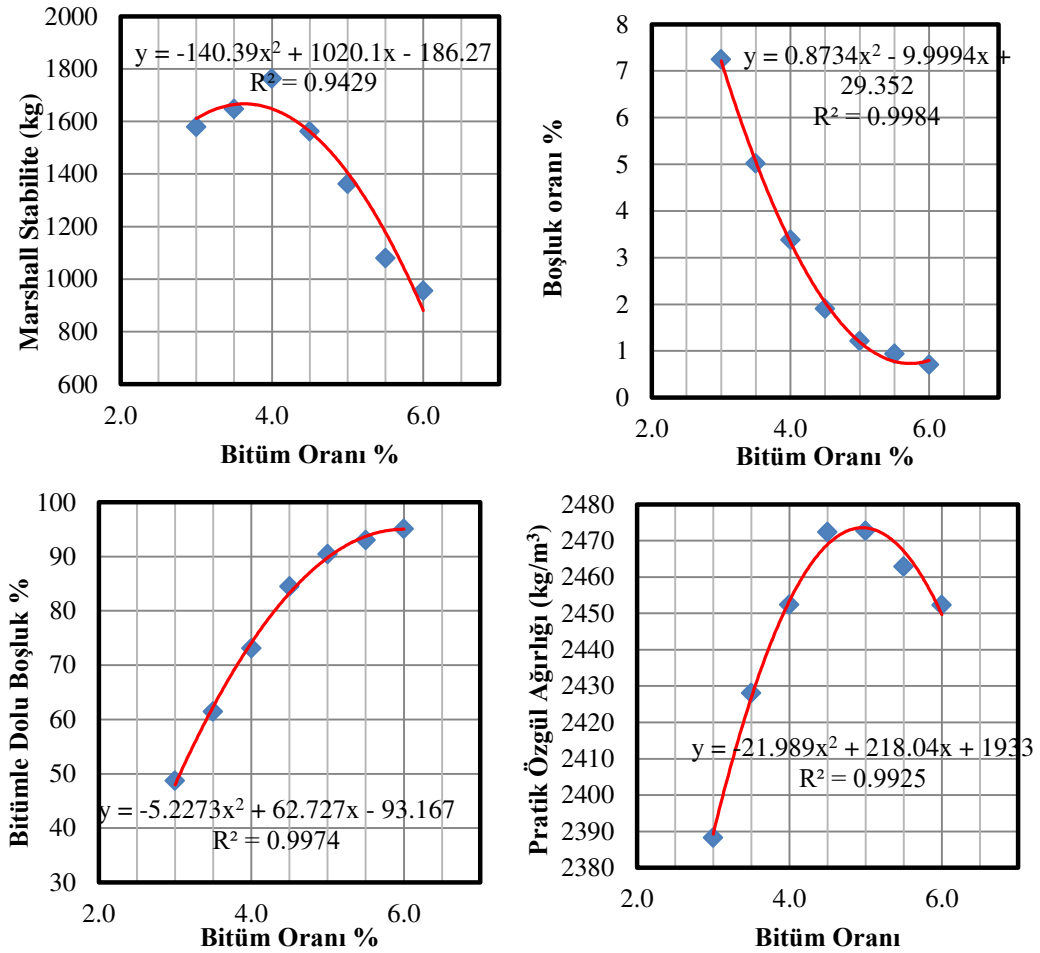
ÇL0.5 Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	13.787	49.502	7.020	2388	1429.217	2.531
3,5	13.220	60.179	5.274	2416	1557.121	1.870
4	12.464	73.496	3.304	2448	1643.490	2.438
4,5	12.295	83.995	1.970	2465	1521.263	2.769
5	12.631	90.488	1.202	2467	1362.002	3.566
5,5	13.142	95.116	0.644	2465	1079.665	4.378
6	14.050	96.027	0.559	2450	963.297	4.477

ÇL1 Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	16.822	38.826	10.294	2304	1388.140	2.642
3,5	14.497	55.106	6.667	2380	1424.819	2.227
4	12.838	71.073	3.716	2438	1456.151	2.623
4,5	13.344	76.460	3.142	2435	1468.574	2.919
5	12.887	88.469	1.491	2460	1213.750	3.633
5,5	13.559	91.731	1.121	2453	1058.032	4.500
6	14.189	95.032	0.719	2446	947.635	4.587

ÇL1.5 Bitüm Oranı (%)	ABO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (kg/m³)	Marshall Dayanım (kg)	Akma
3	17.334	37.484	10.845	2290	1266.314	2.460
3,5	15.946	48.301	8.249	2340	1307.683	2.563
4	14.658	61.594	5.727	2387	1315.310	2.720
4,5	13.679	74.330	3.517	2426	1279.015	3.013
5	13.936	80.793	2.678	2430	1138.526	3.799
5,5	15.015	81.447	2.786	2411	1018.322	4.583
6	15.289	87.056	1.991	2415	902.090	4.693

Lif katkılı BSK numunelerinin bitüm oranlarına bağlı olarak, pratik özgül ağırlık (PÖA), Marshall stabilitesi (MS), boşluk oranı (BO) ve bitümle dolu boşluk oranı (BDBO), değerlerinin Çizelge 5.11-5.14’de verilen deney sonuçlarına göre hazırlanan

değişim grafikleri çizilmiş aşağıda ve sırasıyla Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Bu grafiklerden her lif oranı için ayrı ayrı en uygun bitüm oranları belirlenmiştir.



Şekil 5.13. Kontrol numunesi Marshall deney sonucu grafikleri

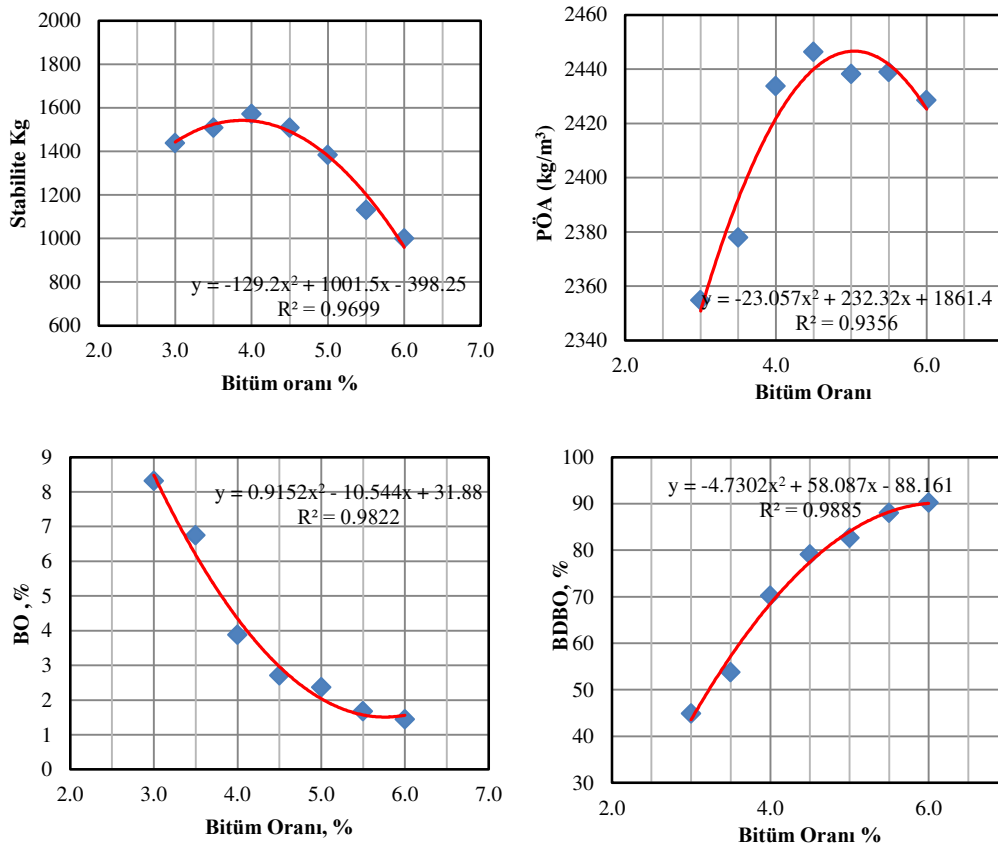
Pratik özgül ağırlık değerleri, bitüm oranı arttıkça hava boşluklarının yerini bitümün doldurması nedeniyle artmaktadır. Agregaya göre daha düşük özgül ağırlığa sahip olan PP ve PY lif katkılı numunelerde kontrol numunesine göre özgül ağırlık azalmaktadır. Çelik lif katkılı numunelerde diğer lif katkılarına göre özgül ağırlık artmaktadır.

Boşluk oranı kontrol karışımında bitüm yüzdesinin artmasıyla boşluk oranında azalma göstermekte ve en sonunda minimum boşluk oranına yaklaşmaktadır. Çizelge 5.10’da belirtilen Karayolları BSK Dizayn Kriterlerine göre boşluk oranının % 3 ile % 5 arasında olması istenmektedir. Bitümle dolu boşluk oranı, daneler arası boşluğun bitümlü bağlayıcı ile dolu yüzdesini vermektedir. Bitüm oranı arttıkça BDBO değeri artmaktadır. Teknik şartnamede BDBO değeri % 65-75 arasında olması istenmektedir.

Bitümle dolu boşluk oranının şartnamedeki limit değerlerinin altında kalması halinde agregaları çevreleyen bitüm film tabakasının az olduğu görülür. Bitüm film tabakasının yeterli kalınlıkta olmaması, kaplamanın kırılma olmasına ve hava koşullarına karşı performansının düşmesine neden olmaktadır. Limit değerinin üstünde bir BDBO değeri olması halinde ise BSK'nın kalıcılık özelliği için gerekli olan boşlukların bitümle dolmasına ve sıcak mevsimlerde BSK'nın bitümü kusmasına ve trafik yüklerinin etkisiyle oluşan deformasyonlara karşı gösterdiği direncin kırılmasına sebep olmaktadır (Öksüz, 2011). Kontrol numunesine ait Şekil 5.13 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Bitüm yüzdeleri sırası ile % 3.65, 4.96, 3.79 ve 3.81 değerleri olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.15'de Kontrol numunesine ait en uygun bitüm oranı % 4.05 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.15. Ortalama bitüm oranı tayini (kontrol numunesi).

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
PÖA (kg/m ³)	4.96	2473,51
MS (kg)	3.65	1666,75
BO %	3.79	4
BDBO %	3.81	70
Ortalama	4.05	-

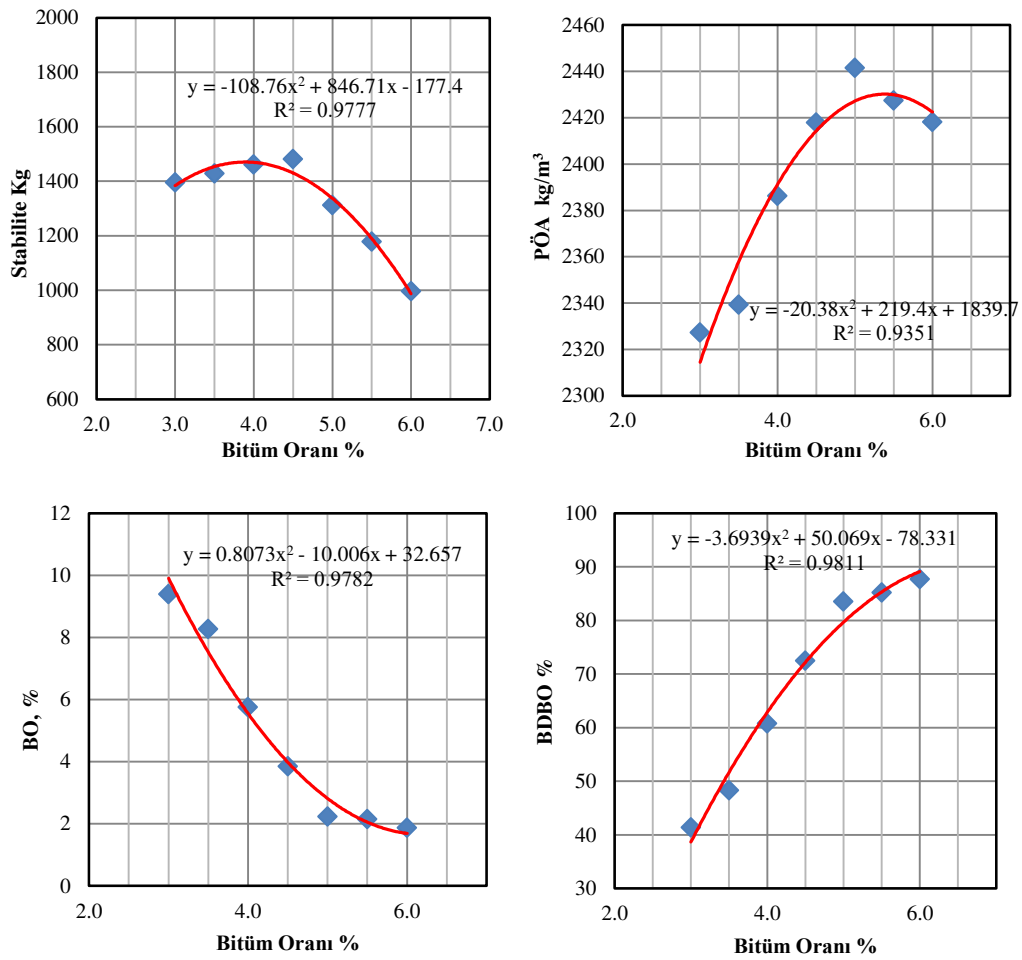


Şekil 5.14. PP0.5 için bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.

PP0.5 karışımı BSK numunelerine ait Şekil 5.14 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Bitüm yüzdeleri sırası ile % 3.88, 5.04, 4.11 ve 4.08 olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.16’da PP0.5 karışımına ait en uygun bitüm oranı % 4.28 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.16. PP0.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
PÖA (kg/m ³)	5.04	2446,60
MS (kg)	3.88	1542.54
BO %	4.11	4
BDBO %	4.08	70
Ortalama	4.28	-

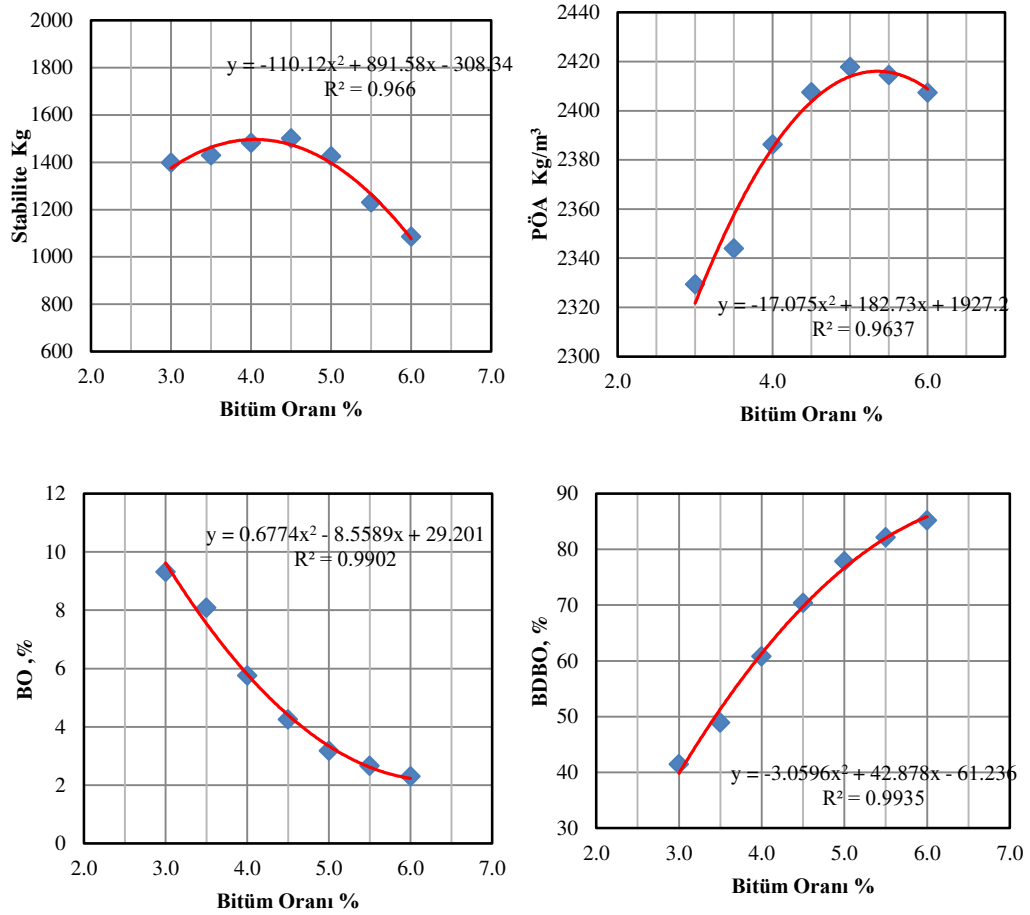


Şekil 5.15. PP1 için bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.

PP1 karışımı BSK numunelerine ait Şekil 5.15 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Bitüm yüzdeleri sırası ile % 3.91, 5.38, 4.49 ve 4.38 olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.17’de PP1 karışımına ait en uygun bitüm oranı % 4.54 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.17. PP %1 karışımı için Ortalama bitüm oranı tayini.

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
MS (kg)	3.91	1470,5
PÖA (kg/m ³)	5.38	2430.18
BO %	4.49	4
BDBO %	4.38	70
Ortalama	4.54	-



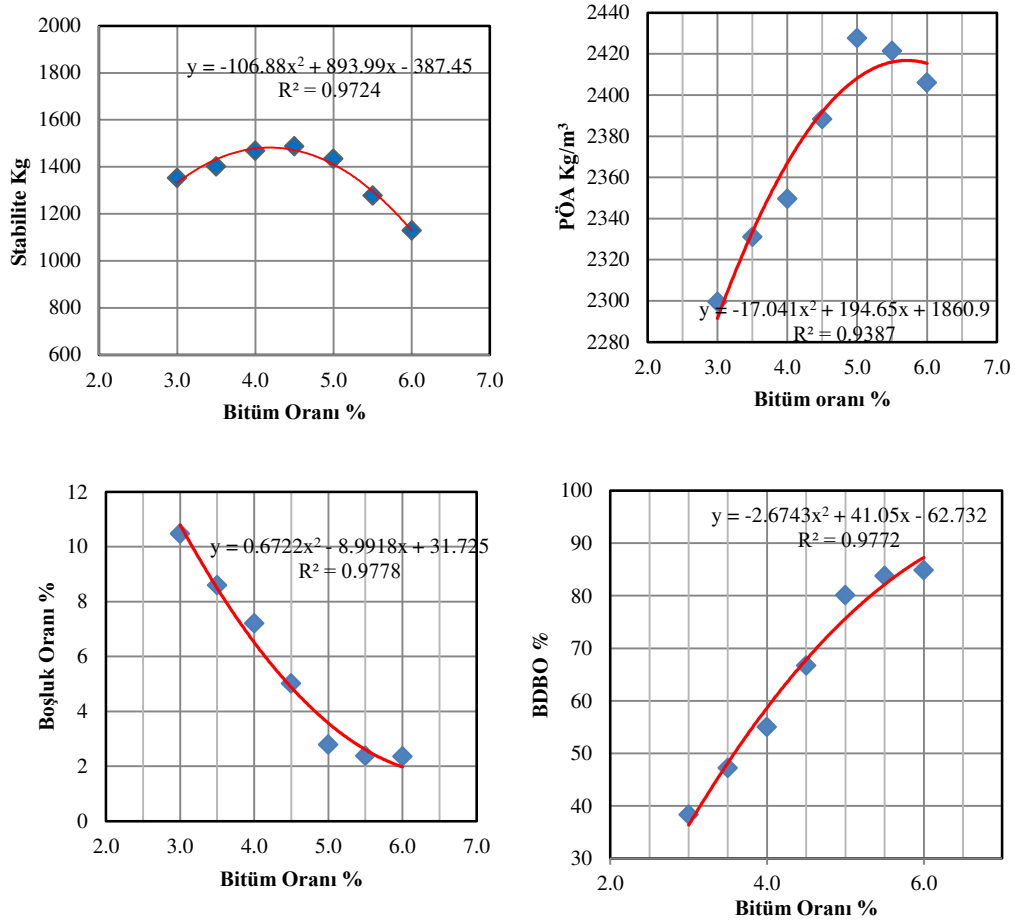
Şekil 5.16. PP1.5 için bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.

PP1.5 karışımı BSK numunelerine ait Şekil 5.16 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Bitüm yüzdeleri sırası ile % 4.05, 5.35, 4.67 ve 4.52 olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.18’de PP1.5 karışımına ait en uygun bitüm oranı % 4.65 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.18. PP1.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
MS (kg)	4.05	1496.31
PÖA (kg/m ³)	5.35	2416.17
BO %	4.67	4
BDBO %	4.52	70
Ortalama	4.65	-

Polipropilen karışımlar incelendiğinde lif katkı oranı arttıkça en uygun bitüm oranının arttığı görülmektedir. Bu durumda BSK kaplama tasarımında maliyetin arttığı görülmüştür. Polipropilen karışımlar için stabilite, akma ve diğer parametreler karşılaştırıldığında en uygun karışımın PP0.5 olduğu görülmüştür.

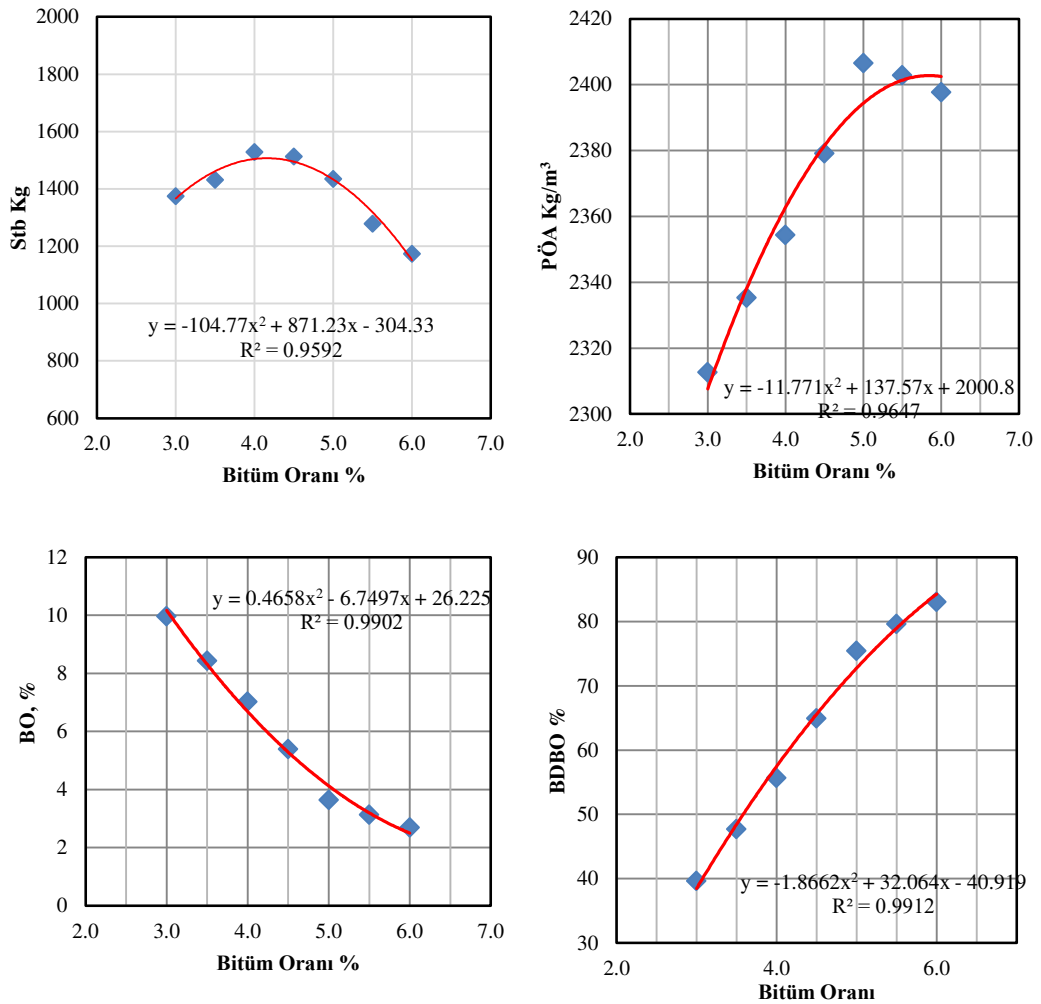


Şekil 5.17. PY0.5 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.

PY0.5 karışımı BSK numunelerine ait Şekil 5.17 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Buna göre bitüm oranları sırasıyla % 4.18, 5.72, 4.82 ve 4.63 olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.19’da PY0.5 karışımına ait en uygun bitüm oranı % 4.84 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.19. PY0.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
MS (kg)	4.18	1481.97
PÖA (kg/m ³)	5.72	2416.74
BO %	4.82	4
BDBO %	4.63	70
Ortalama	4.84	-



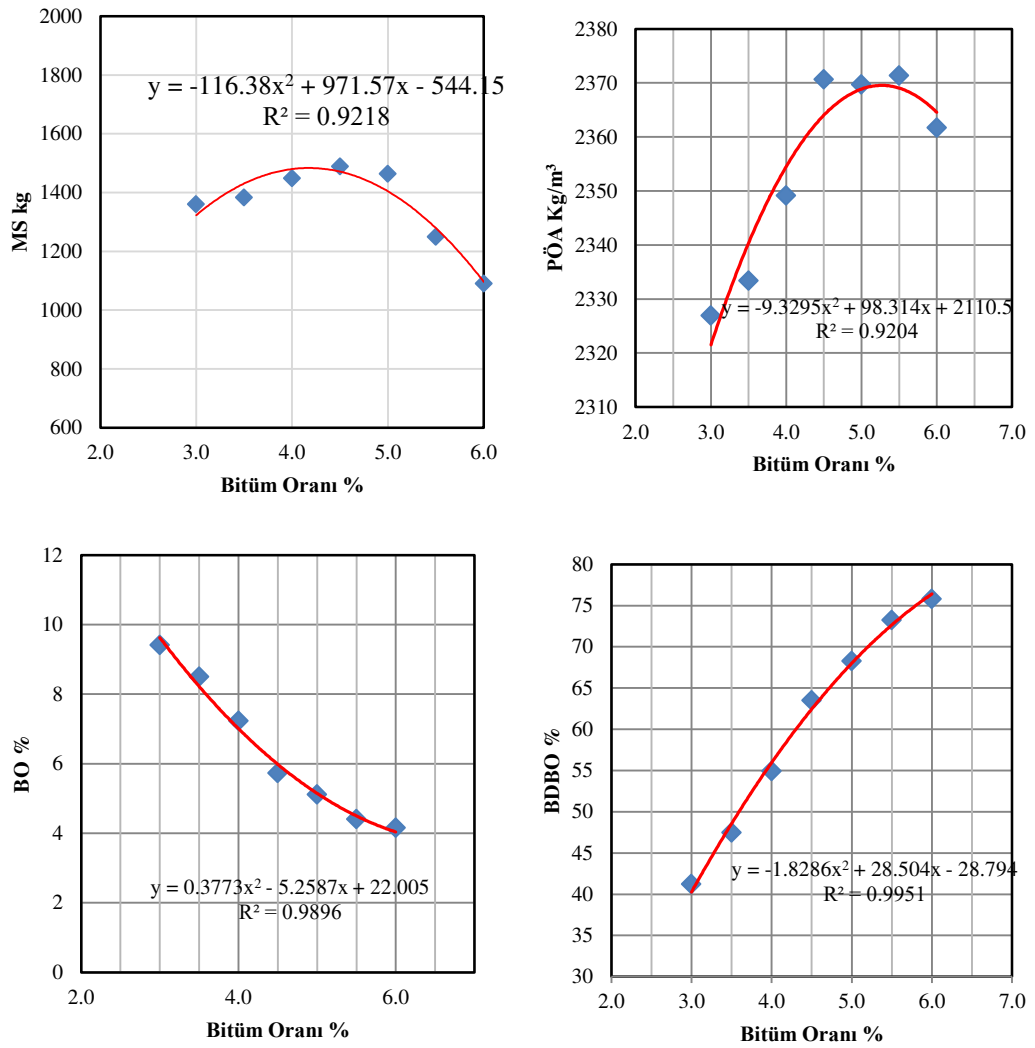
Şekil 5.18. PY1 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.

PY1 karışımına ait BSK numunelerinin Şekil 5.18 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Bitüm yüzdeleri sırası ile % 4.16, 5.84, 5.05

ve 4.81 değerleri olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.20’de PY1 karışımına ait en uygun bitüm oranı % 4.97 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.20. PY1 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
MS (kg)	4.16	1506.87
PÖA (kg/m ³)	5.84	2402.81
BO %	5.05	4
BDBO %	4.81	70
Ortalama	4.97	-



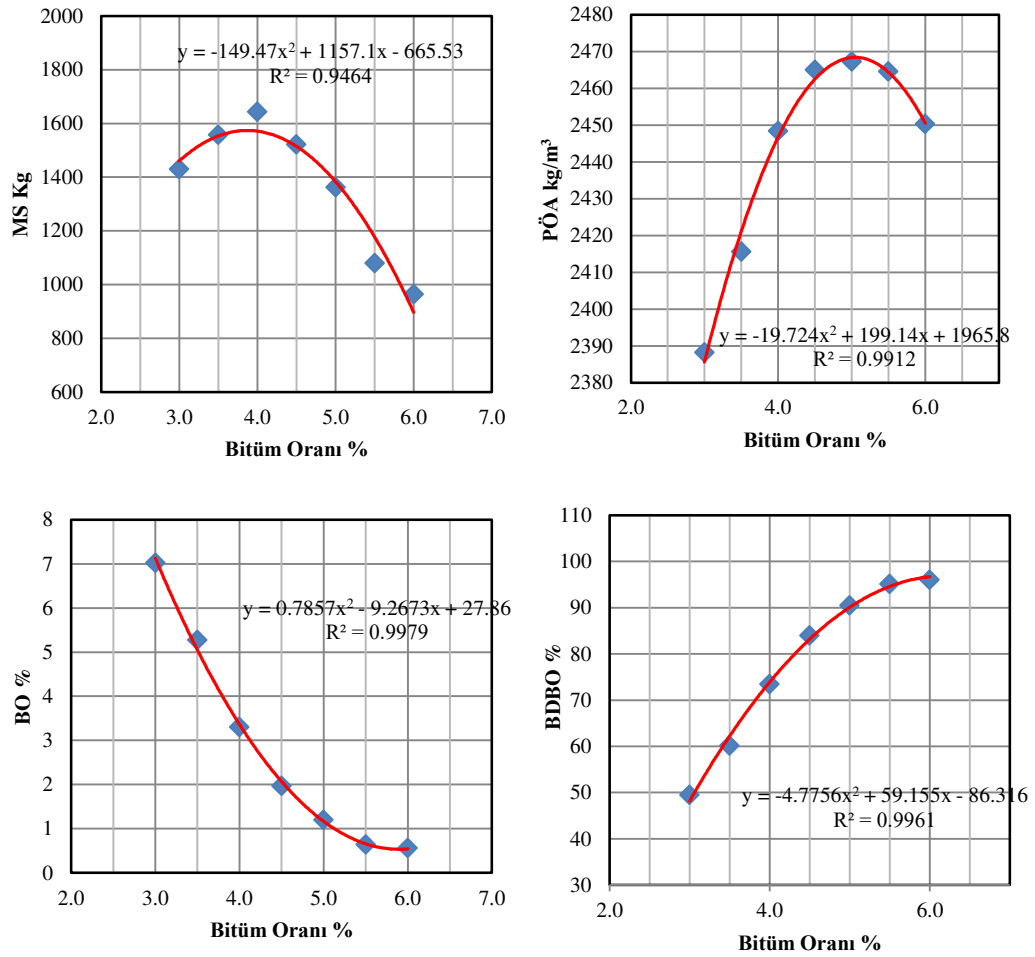
Şekil 5.19. PY1.5 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.

PY1.5 karışımı BSK numunelerine ait Şekil 5.17 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Bitüm yüzdeleri sırası ile % 4.18, 5.29, 6 ve 5.21 değerleri olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.21’de PY1.5 karışımına ait en uygun bitüm oranı % 5.17 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.21. PY1.5 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
MS (kg)	4.18	1483.57
PÖA (kg/m ³)	5.29	2369.51
BO %	6	4
BDBO %	5.21	70
Ortalama	5.17	-

Polyester karışımlar incelendiğinde lif katkı oranı arttıkça en uygun bitüm oranının arttığı görülmektedir. Bu durumda BSK kaplama tasarımında maliyetin arttığı görülmüştür. Polyester karışımlar için stabilite değeri en yüksek lif oranı PY1 karışımı olurken akma ve diğer parametreler değerlendirildiğinde en düşük bitüm oranı olan karışım PY0.5 karışımının olduğu görülmüştür.

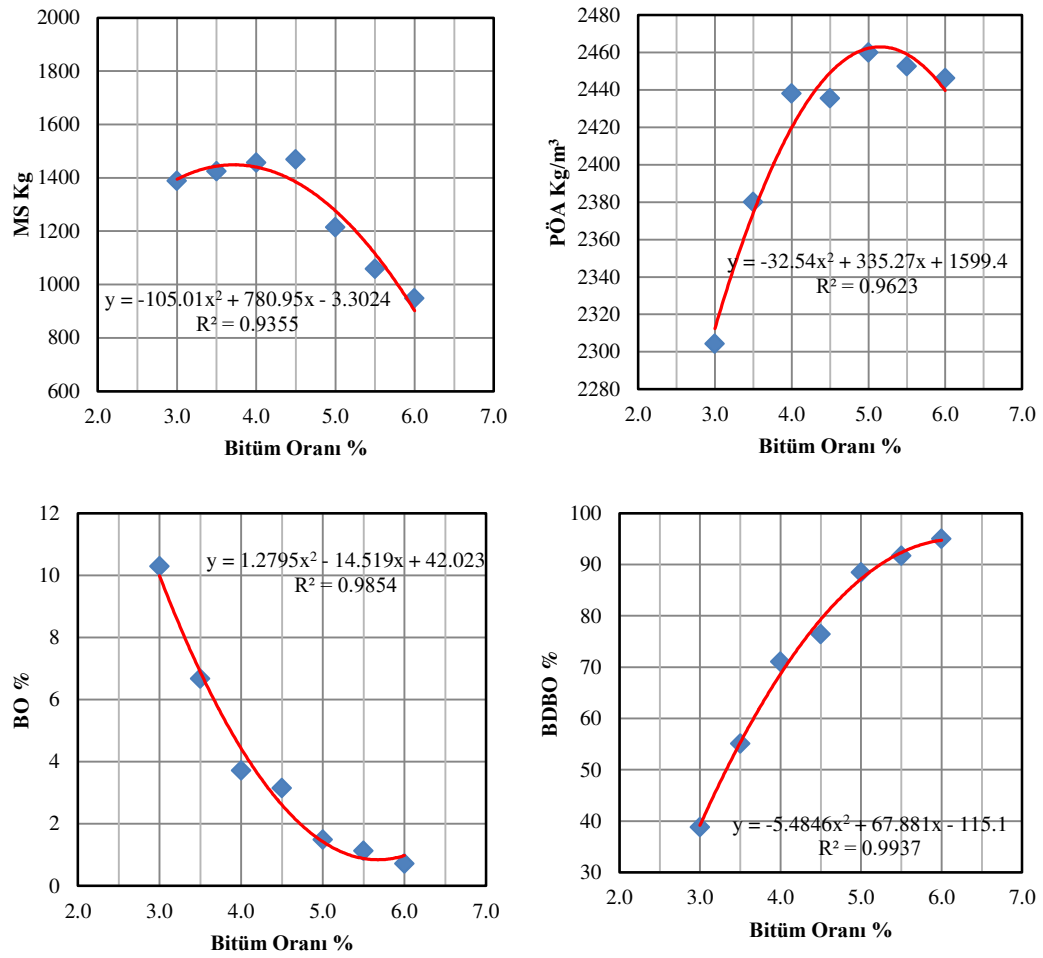


Şekil 5.20. ÇL0.5 için Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.

ÇL0.5 karışımı BSK numunelerine ait Şekil 5.20 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Bitüm yüzdeleri sırası ile % 3.95, 4.96, 3.79 ve 3.81 değerleri olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.22’de ÇL0.5 karışımına ait en uygun bitüm oranı % 4.13 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.22. ÇL %0.5 karışımı ortalama bitüm oranı tayini.

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
MS (kg)	3.95	1572,9
PÖA (kg/m ³)	4.96	2473.51
BO %	3.79	4
BDBO %	3.81	70
Ortalama	4.13	-

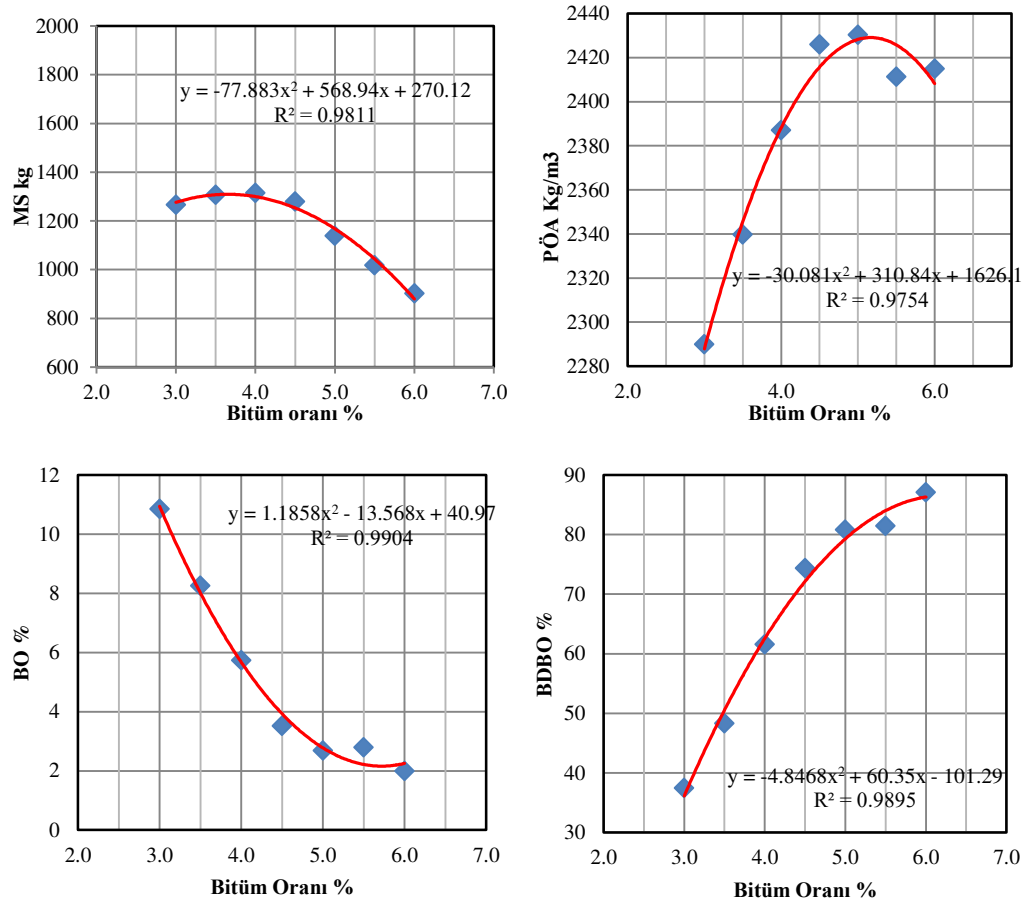


Şekil 5.21. ÇL1 karışımı Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.

ÇL1 karışımı BSK numunelerine ait Şekil 5.21 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Bitüm oranları sırası ile % 4.2, 5.15, 4 ve 4.06 değerlerinde olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.23’de ÇL1 karışımına ait en uygun bitüm oranı % 4.38 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.23. ÇL %1 karışımı için ortalama bitüm oranı tayini.

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
MS (kg)	4.2	1424.31
PÖA (kg/m³)	5.15	2462.73
BO %	4.10	4
BDBO %	4.06	70
Ortalama	4.38	-



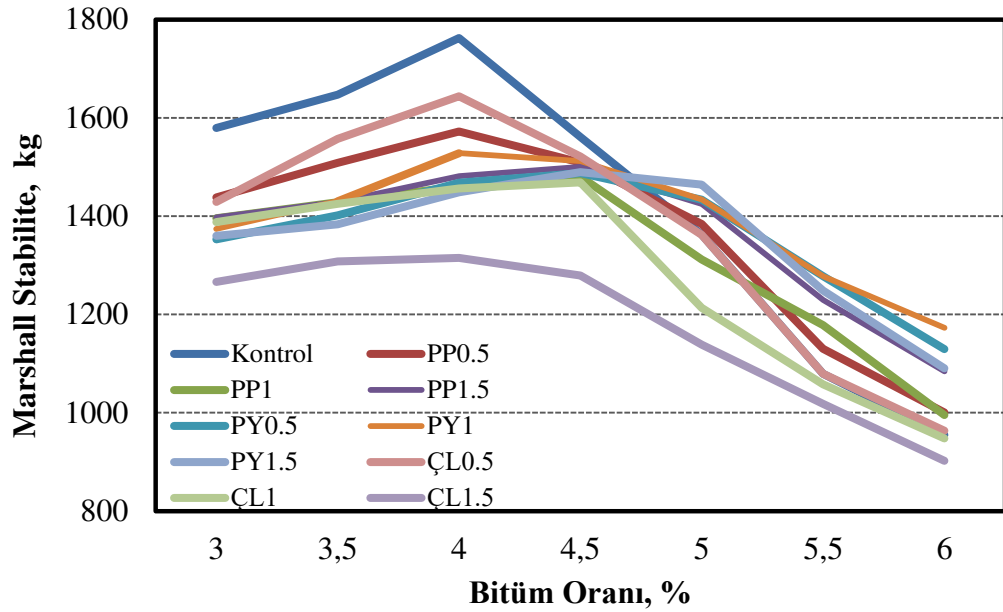
Şekil 5.22. ÇL1.5 karışımı Bitüm oranı- PÖA, MS, BO, BDBO sonuçları.

ÇL1.5 karışımı BSK numunelerine ait Şekil 5.22 grafiği incelendiğinde; en büyük stabilite ve birim ağırlığı sağlayan bitüm oranları belirlenmiştir. Ayrıca BSK tasarımında istenen % 4 boşluk oranı ve % 70 bitüm ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Bitüm yüzdeleri sırası ile % 3.67, 5.17, 4.47 ve 4.38 değerleri olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.24’de ÇL1.5 karışımına ait en uygun bitüm oranı % 4.42 olarak bulunmuştur.

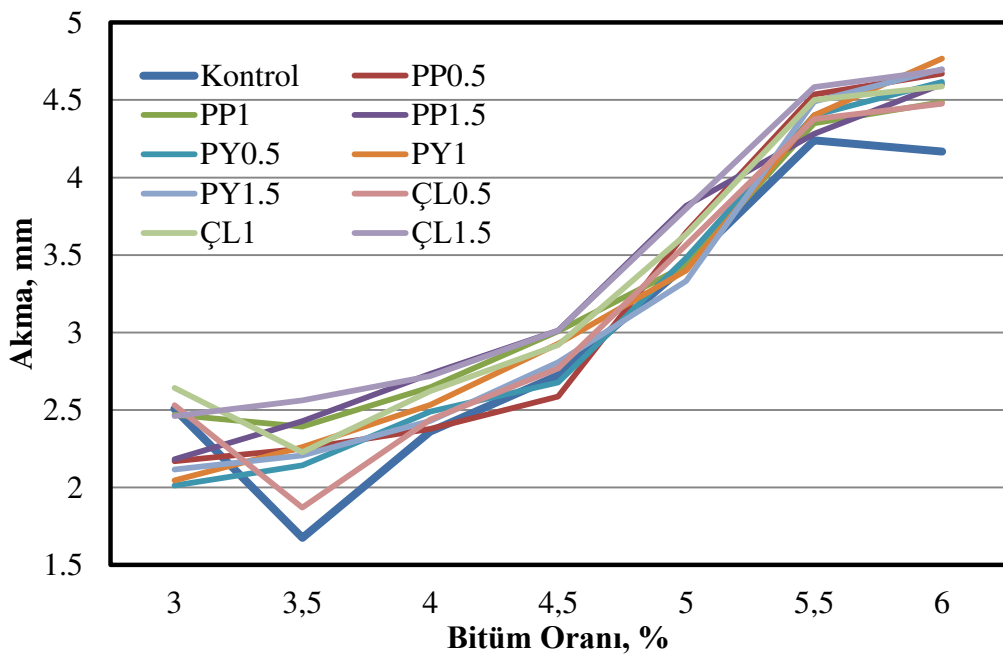
Çizelge 5.24. ÇL %1.5 karışımı için Ortalama bitüm oranı tayini.

Değişkenler	Bitüm oranı (%)	Değer
MS (kg)	3.67	1309.13
PÖA (kg/m ³)	5.17	2429.11
BO %	4.47	4
BDBO %	4.38	70
Ortalama	4.42	-

Çelik lifli karışımlar incelendiğinde lif oranı arttıkça en uygun bitüm oranının arttığı görülmektedir. Bu durumda BSK kaplama tasarımında maliyetin arttığı görülmüştür. Çelik lifli karışımlar için stabilite değeri ve PÖA (kg/m^3) değerleri en yüksek olan karışım ÇL0.5 olmuştur. Çelik lifli karışımlar için en uygun lif oranı ÇL 0.5 karışımıdır.



Şekil 5.23. Lifli BSK'ların Marshall stabilite değerleri.

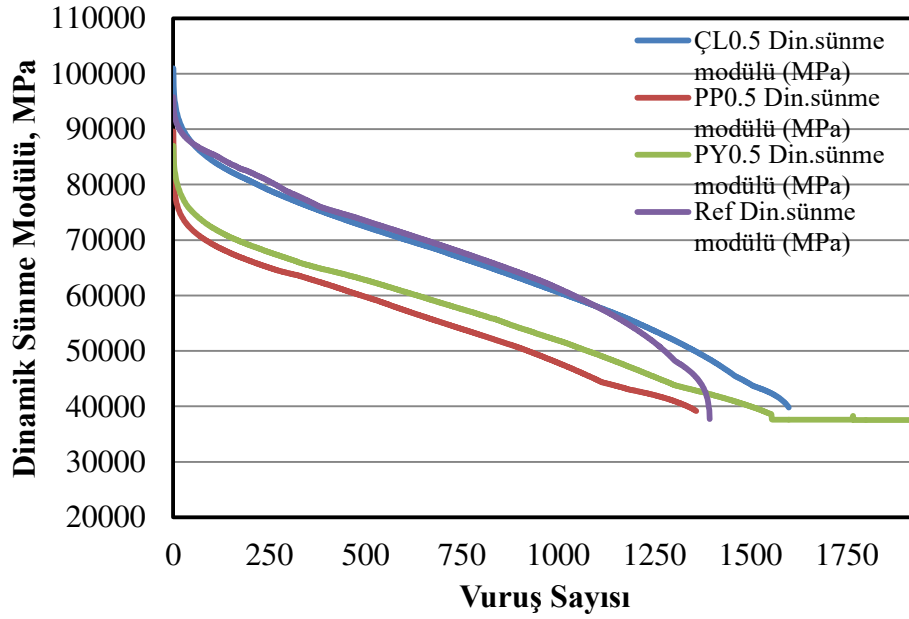


Şekil 5.24. Lifli BSK'ların Marshall akma değerleri.

Tüm lifli BSK'ların Marshall deney sonuçları (Şekil 5.23-5.24) birlikte değerlendirildiğinde; lifli karışımların kontrol karışımına yakın sonuçlar verdiği ayrıca her lif tipi için en uygun karışım oranının % 0.5 olduğu görülmektedir. KTŞ'ne göre lif katkılı BSK kaplamaların şartnamede verilen sınır değerlere uygun olduğu görülmüştür (KTŞ, 2013).Yapılan çalışmalarda elde edilen verilere göre % 4 veya daha yüksek hava boşluğuna sahip karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerinin daha yüksek olacağı belirtilmiştir (Taşdemir, 2003). Çalışmada lifli BSK karışımların en uygun bitüm oranlarına ait boşluk oranları değerlendirildiğinde PY karışım değerleri PY0.5 karışımı için % 3.95, PY1 karışımı için % 4.18 ve PY1.5 karışımı için % 4.9 boşluk oranı değerlerine göre tekerlek izine karşı en dirençli karışımların polyester karışımlar olacağı düşünülmektedir. % 13.5 veya daha fazla Agregalar arası boşluk oranına (VMA) sahip karışımların bozulmalara karşı performansının daha iyi olduğu belirtilmiştir (Er, 2011). Ayrıca karışımın bitüm oranı % 5.1 değerinden düşük olan karışımların yüksek performans gösterdikleri belirtilmiştir. Marshall akma değeri 4 mm'yi geçmesi halinde tekerlek izi oluşumu potansiyeli artmaktadır. Karışımların sonuçları değerlendirildiğinde tüm karışımların en uygun bitüm oranında akma değeri 4 mm'den küçük olduğu için tekerlek izi oluşma riskinin daha düşük olacağı düşünülmektedir. Yüksek trafik şartlarında akma değerinin 2-3.5 mm arası olması gerektiği yapılan çalışmalarda önerilmiştir (Taşdemir, 2003).

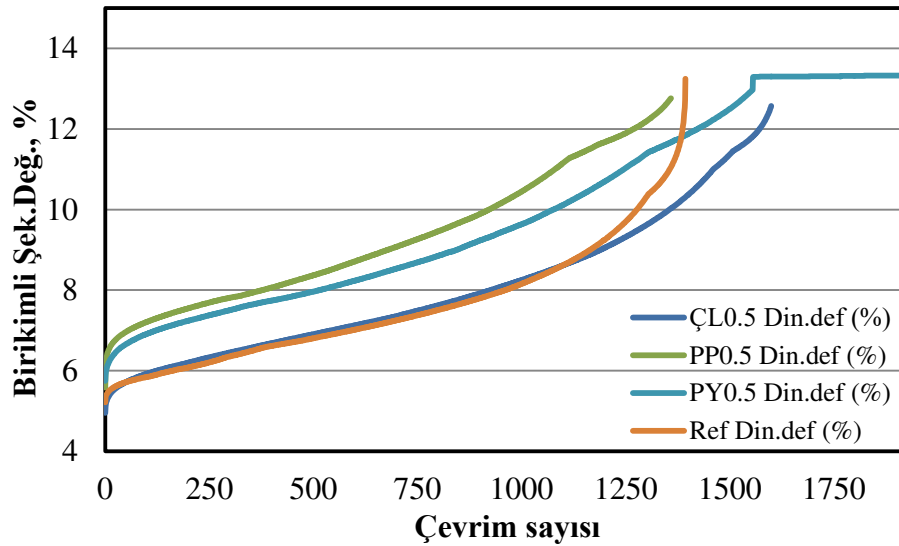
5.3.3. BSK Dinamik statik sünme deneyi sonuçları

Dinamik sünme deneyi için BSK tasarımında en uygun lif ve bitüm oranında hazırlanan PP0.5, PY0.5, ÇL0.5 ve kontrol numuneleri yükleme setine yerleştirilmeden 24 saat önce 50 °C'ye ayarlı kabinde bekletilerek şartlandırılmıştır. Deneyin uygulamasında 500 ms süre ile 500 kPa'lık yük uygulamasının ardından 1500 ms süresince numune yüksüz olarak deney çevrimlerle uygulanmıştır. Deney sonunda yükleme setine bağlı bilgisayar yardımıyla, elde edilen veriler excel formatında alınmıştır. Karışımların aynı oranlarına ait sonuçların ortalaması alınarak her bir oran için birer eğri çizilip 4 eğri halinde dinamik sünme modülü ile birikmiş deformasyon miktarının, vuruş sayılarına bağlı grafikleri çizilmiştir. Dinamik sünme deneyi sonuçları Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.25. Dinamik sünme modülü-vuruş sayısı.

Şekil 5.25'te verilmiş olan dinamik sünme modülü-vuruş sayısı grafiğine bakıldığında ilk yüklemelerde, ÇL0.5 karışımlarının ve kontrol numunelerinin rijitlik modül değerlerinin PP ve PY karışımlara göre yüksek çıktığı görülmüştür. 1000 vuruştan sonra sünme değerleri tüm numunelerde birbirine yaklaşmaktadır. PY katkılı karışımların vuruş sayısı arttıkça sünme rijitliğinin devam ettiği trafik yüklerine karşı kontrol karışımından daha fazla dayanım gösterdiği görülmektedir. Çelik lifli ve Polyester lifli karışımların rijitlik modülünün kontrol karışımlarına göre deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu görülmüştür. Numunelerin dinamik sünme modülü değerleri incelendiğinde tekrarlı trafik yükleri altındaki BSK kaplamalarda lif katkısı ilavesinin, kaplamanın sünekliğini arttırdığı söylenebilir. Dinamik sünme deneyi birikimli şekil değişimi grafiği Şekil 5.26'da verilmiştir.

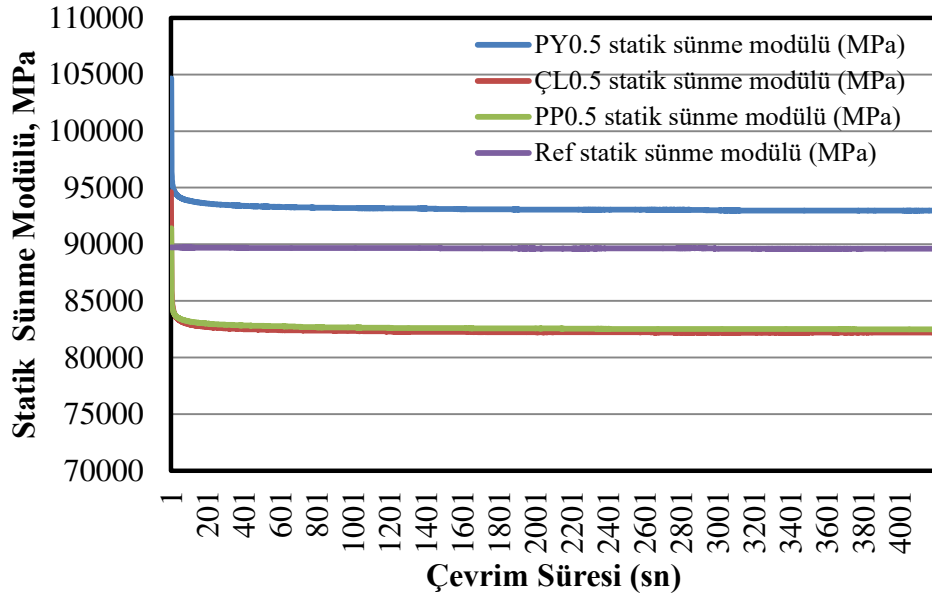


Şekil 5.26. Birikimli Şekil değiştirme yüzdesi (%) -Vuruş sayısı.

Şekil 5.26’da birikimli şekil değiştirme miktarı-vuruş sayısı ilişkisine bakıldığında ilk yüklemelerde kontrol numunelerinde, lif katkılı BSK numunelere göre daha düşük deformasyon değerleri görülmektedir. Çelik lifli BSK karışımlarının ve kontrol karışımlarının deformasyon değerlerinin çok yakın olduğu görülmektedir. 1000 vuruş sonunda Çelik lif ve kontrol karışımları aynı deformasyon değerlerine ulaşırken, PP ve PY katkılı numunelerin daha yüksek deformasyon değerlerine ulaştığı görülmüştür.

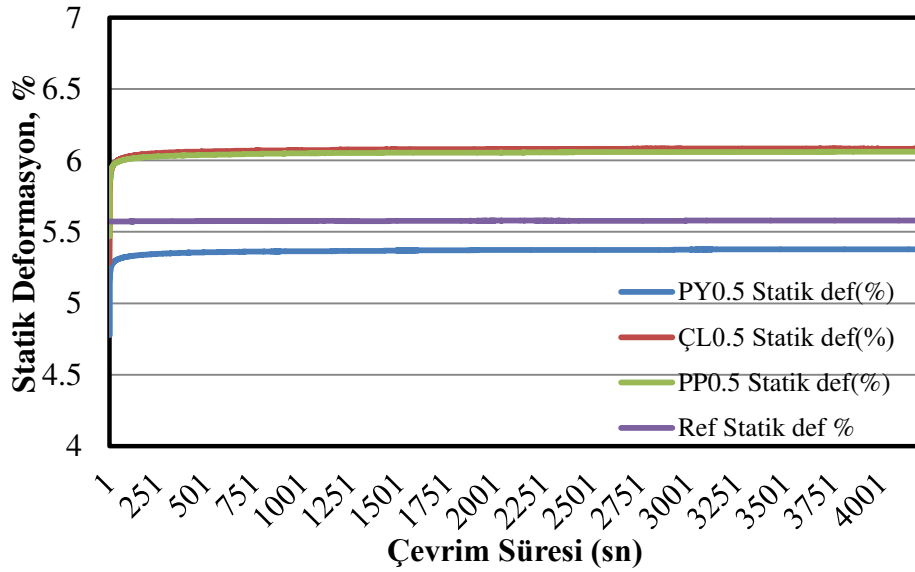
PY ve çelik lifli karışımların birikimli deformasyon değerleri ve yorulma süreleri kontrol karışımından daha uzun olmaktadır. PY katkılı numuneler 1750 vuruş sonunda en yüksek birikimli deformasyon değerine ulaşmıştır.

Lif katkılı BSK numunelerine uygulanan statik sünme deneyi şu şekilde uygulanmıştır: Yükleme setine yerleştirilen numunelere ön yükleme olarak 10 dakika boyunca 100 kPa’lık yük uygulamasından sonra 1 saat boyunca 500 kPa’lık bir yükleme daha yapılmıştır. Deneyde her numuneye sabit 4200 sn yükleme yapılmıştır. Statik sünme modülü ile birikimli deformasyon miktarlarının, zamana bağlı grafikleri Şekil 5.27 ve 5.28’de verilmiştir.



Şekil 5.27. Statik sünme modülü-vuruş süresi.

Şekil 5.27’de verilmiş olan statik sünme modülü-vuruş süresi grafiğine bakıldığında, PY numunelerinin sünme modül değerlerinin diğerlerine göre en yüksek çıktığı görülmüştür. Çelik ve PP karışımlarının sünme modül değerlerinin çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Numunelerin statik sünme modülü değerleri incelendiğinde sabit yükler altındaki BSK kaplamalarda kullanılan PY lif ilavesinin sünme değerlerini iyileştirdiği; PP ve Çelik lif katkılarının statik sünme değerlerinin kontrol karışımına göre düşüş gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.28. Statik birikimli şekil değiştirme yüzdesi -vuruş süresi.

Şekil 5.28’de birikimli şekil değiştirme miktarı-zaman ilişkisine bakıldığında PY numunelerinde, kontrol numunelerine göre daha düşük deformasyon değerleri gözlenmekte ve ÇL, PP numunelerinin daha yüksek şekil değiştirme değerleri oluşmaktadır. Statik ve dinamik sünme deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde PY lif katkılı BSK’larının kontrol numunelerine göre kalıcı deformasyon oluşumlarına karşı daha dirençli olduğu; çelik lifli karışımlarında dinamik sünmenin benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. Lif katkılarının BSK performansına olumlu etkileri olduğu deneyler sonucunda belirlenmiştir.

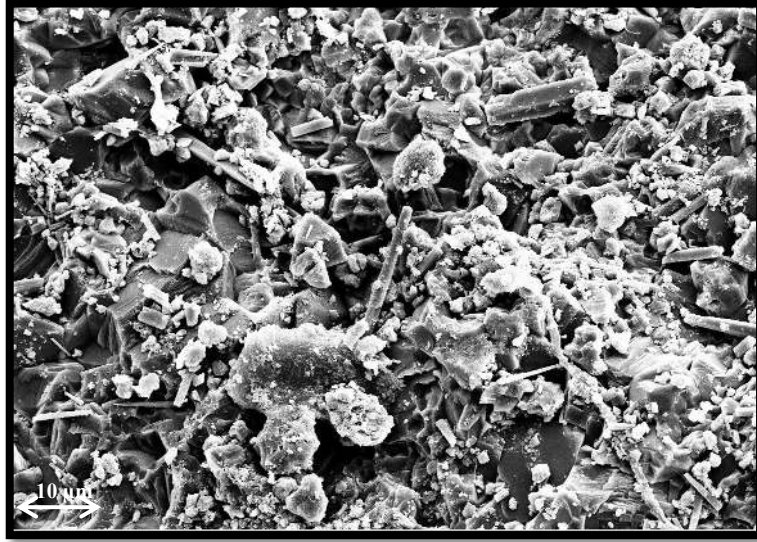
5.4.Lif Katkılı BSK ve Beton Kaplamaların İçyapı Analizi

Beton kaplama ve BSK karışımlarında malzemenin içyapı özelliklerinin belirlenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak inceleme yapılmıştır. Lif katkı oranlarının ve türlerinin malzemenin içyapısında oluşturduğu değişiklikler bu analiz sayesinde kolaylıkla belirlenebilmektedir. Bu analiz yardımıyla özellikle liflerin kompozit yapı içerisindeki dağılımı ve kenetlenmedeki ara yüzey incelenmeye çalışılmıştır.

Taramalı elektron mikroskobunda BSK numunelerindeki bitümün cihazın çalışma sıcaklığında erimesi ve düzgün yüzey oluşturulma problemi yaşandığı için Sem analizleri yalnızca lifli beton kaplamalar için gerçekleştirilmiştir.

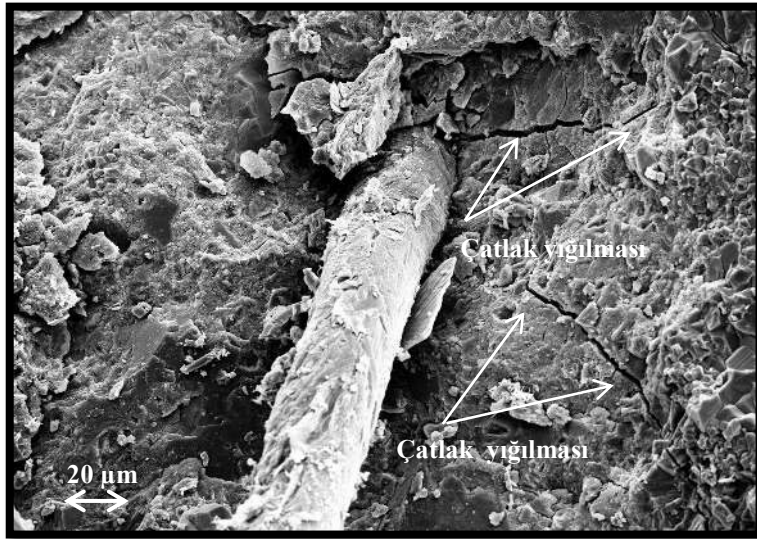
5.4.1.Polipropilen lifli beton numunelerinde SEM analizleri

Polipropilen lifli beton karışımları içinden Sem analizlerinde incelemek için PP1 ve PP2 karışımları tercih edilmiştir. Lifli betonlardan PP1 karışımlarının SEM görüntülerinin incelemeleri Şekil 5.29-5.31 arasında verilmiştir.



Şekil 5.29. PP1 numunesi 2kx SEM analizi görüntüsü.

Şekil 5.29'daki SEM analizi görüntüsü incelendiğinde polipropilen liflerin kompozit içerisindeki dağılımı ve bağlayıcı CSH fazı görülebilmektedir. Şekil 5.30'da polipropilen lif ve beton ara yüzeyinde, mekanik etki altında kalmış olan beton numunesinin kenetlenmesi görülmektedir. Dış kuvvet etkisi altında oluşan çatlaklar lif ara yüzeyine geldiğinde çatlak ilerlemesinin durduğu gözlenmiştir. Bu durum çatlak oluşumu sonrasında gerilmelerin life aktarıldığını göstermektedir. Lifli numunelerde elde edilen dayanım artışının nedeni olarak bu etki rol oynamaktadır.



Şekil 5.30. PP1 numunesinin 1kx SEM analizi görüntüsü.

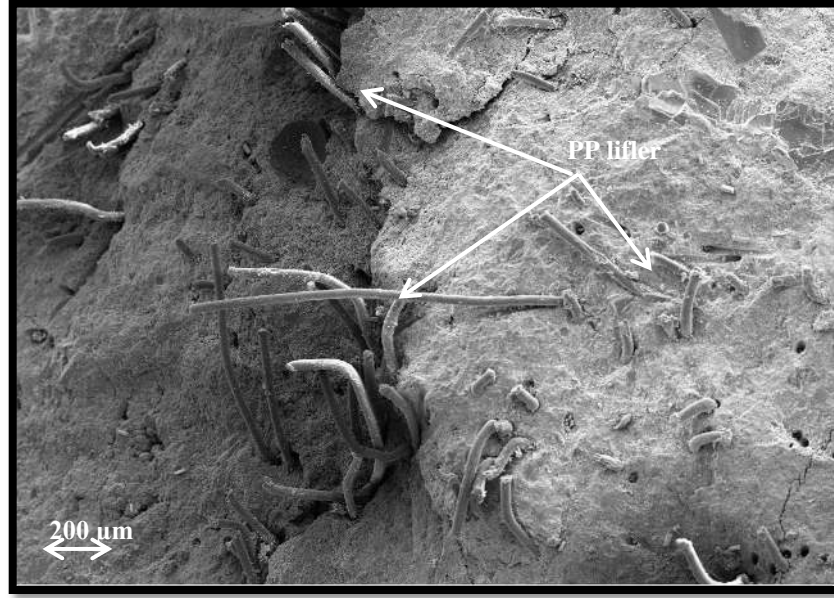
PP1 karışımlarında SEM numunelerine 10000 büyütme yapıldığında elde edilen içyapı görüntüsü Şekil 5.31'de görülmektedir. Buna göre lifin içyapıda agrega çimento

ara yüzeyinde yerleştiği ve kompozit yapının mekanik özelliklerine katkı sağladığı düşünülmektedir. Böylece betona trafik kaynaklı gelen dış kuvvetlerin daha iyi karşılanabileceği görülmüştür. Betonun içyapısını düzenlenmesi betona geçirimsizlik sağlayarak beton yolun bozulmalara karşı daha dayanıklı olmasına yardımcı olacaktır. Şekil 5.33’de görülen çatlak ilerleyişini PP lif durdurmuş ve oluşan gerilme lif tarafından karşılanmıştır.

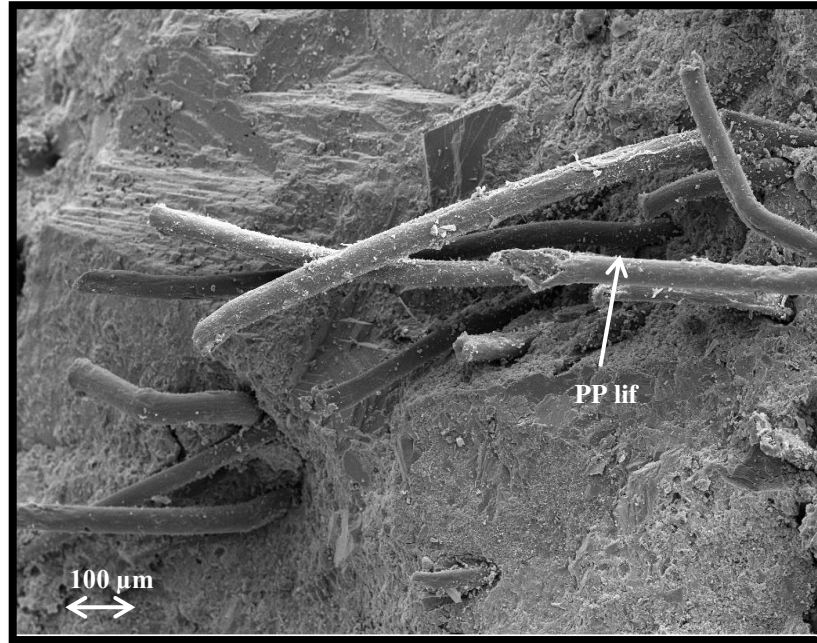


Şekil 5.31. PP1 numunesinin 10kx SEM analizi görünüşü.

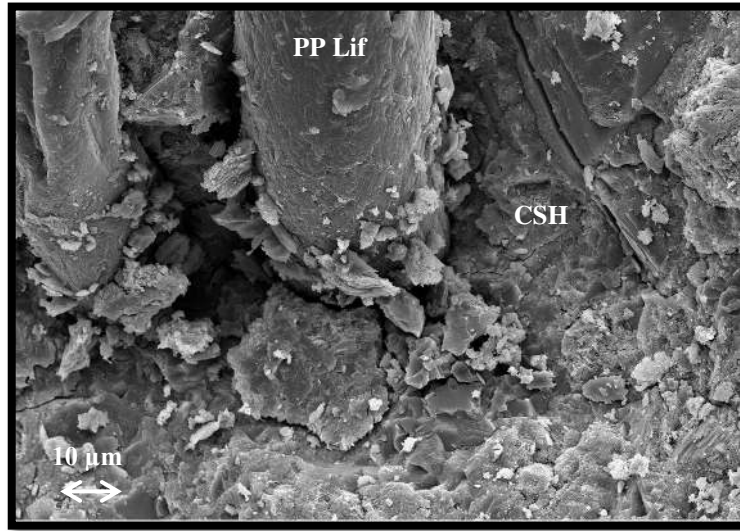
PP2 karışımlarında SEM analizlerinin görüntüleri Şekil 5.32-5.35’de verilmiştir. Şekil 5.32 ve Şekil 5.33’deki görüntüler incelendiğinde beton içyapısındaki lif dağılımının %1’lik lif katkı oranına göre daha belirgindir. Böylece lif oranındaki artışın lif dağılımı üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmüştür. Şekil 5.32’te PP2 karışımında birbirine çok yakın olarak konumlanmış polipropilen liflerinin etrafında yoğunlaşan çatlak oluşumları açıkça görülmektedir. Çatlakların özellikle lif çevresinde toplanması betondan liflere doğru bir kuvvet aktarımı olduğunu göstermektedir. Lifler çatlayan betondaki çekme kuvvetlerini karşılayarak yol betonunun daha yüksek dayanım değerlerine ulaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca liflerin çatlak ilerleyişini durdurmasıyla betonun enerji yutma kapasitesinin yani kırılma tokluğunda arttığı düşünülmektedir. Benzer lif davranışı Şekil 5.33’de yoğun şekilde dağılmış olan örnekte de görülebilmektedir.



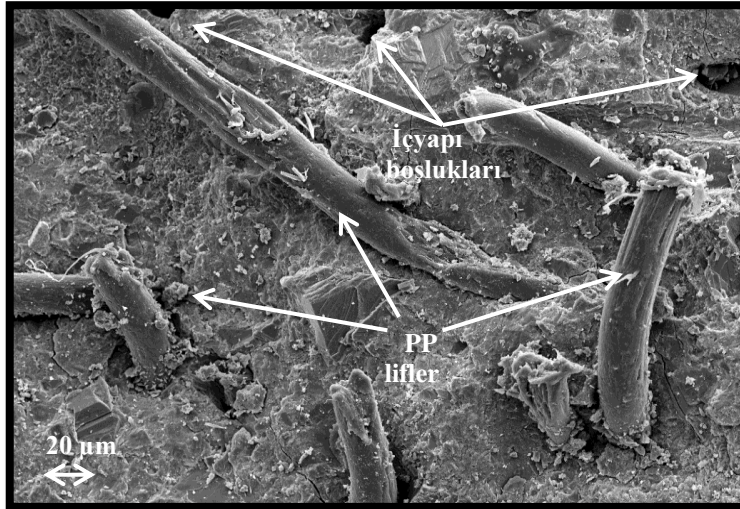
Şekil 5.32. PP2 karışımı numunesinin 100x SEM analizi görünüşü.



Şekil 5.33. PP2 numunesinin 250x SEM analizi görünüşü.



Şekil 5.34. PP2 numunesinin 2000x SEM analizi görünüşü.



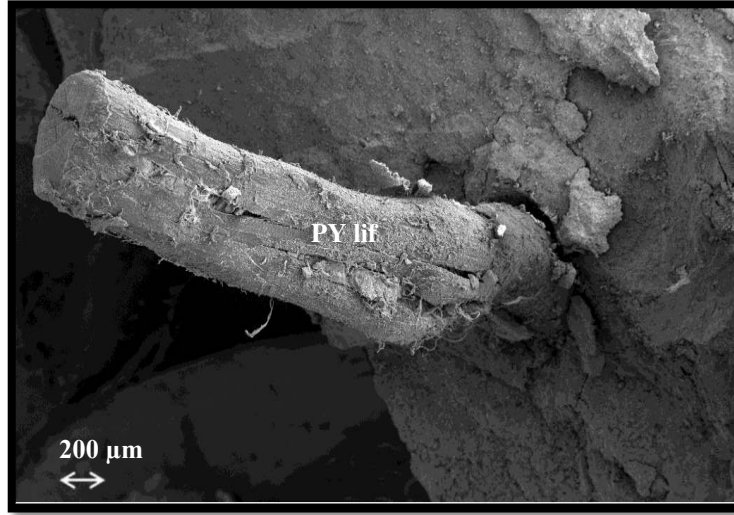
Şekil 5.35. PP2 numunesinin 500x SEM analizi görünüşü.

Şekil 5.34 ve 5.35 incelendiğinde PP lifli karışımların homojen dağılma kabiliyetinin yüksek olduğu içsel gerilmeleri lif bölgelerinde karşılandığı ve liflerin çatlak önleme fonksiyonlarının bulunduğu görülmüştür

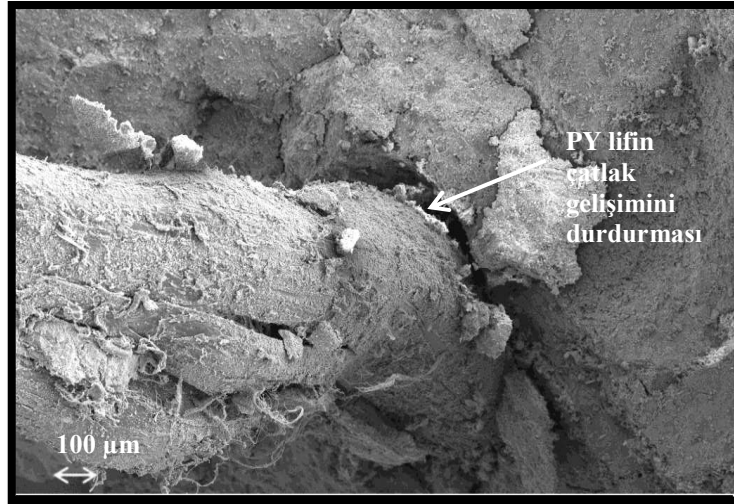
5.4.2. Polyester (Polimer) lifli beton numunelerinde SEM analizleri

Polyester lifli beton numunelerinin tümünü örnekleyen SEM analiz görüntüleri Şekil 5.36-5.39 arasında verilmiştir. Polimer lif demetinin beton ile olan kenetlenme kesitleri Şekil 5.36 ile 5.38 SEM görüntülerinde açık olarak görülmektedir. Lif demetlerinin beton içinde bazı bölgelerde tamamen açılım yaptığı görülürken bazı yerlerde liflerin demet halinde kaldıkları görülmüştür. Polyester liflerin makro donatı boyutlarında olması mikro çatlaklara karşı etkili olmadıklarından daha büyük çatlak

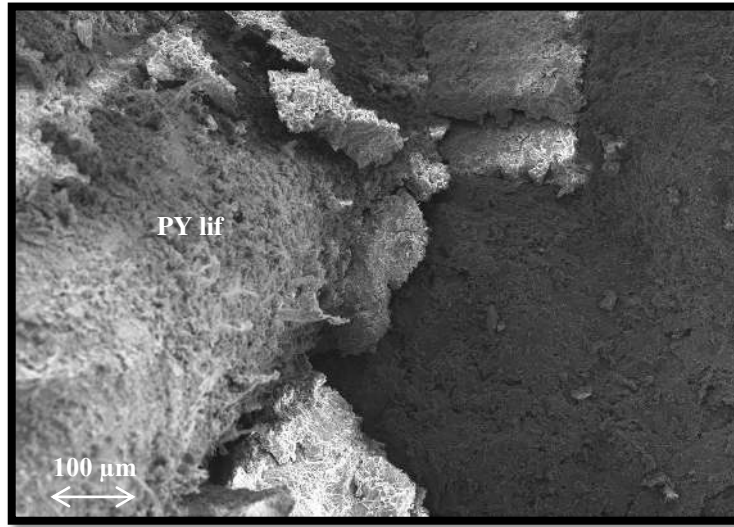
gelişimlerinde etkili oldukları anlaşılmıştır. Polimer liflerin kuvvet etkisi altında kompozit yapıdaki davranışı polipropilen life benzer şekilde gözlenmiştir. Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’de beton içindeki kılcal çatlağın lif kesitine kadar ilerlediği sonrasında ise çatlağın ilerlemesinin durduğu görülmüştür.



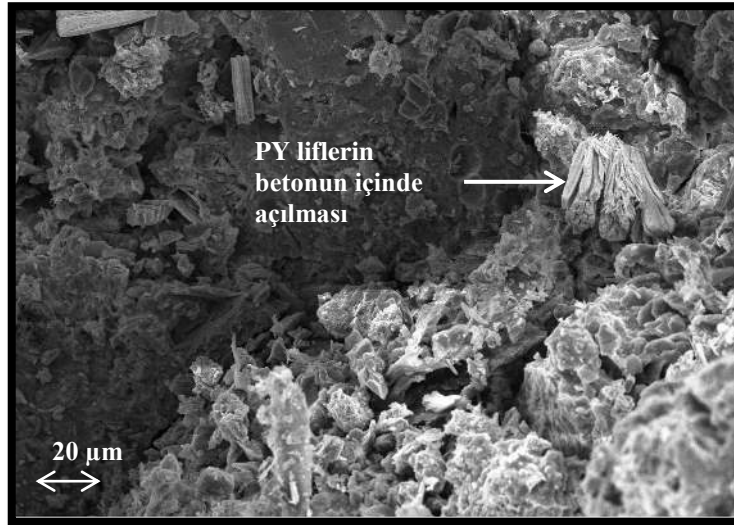
Şekil 5.36. PY2 numunesinin 50x SEM analizi görünüşü.



Şekil 5.37. PY2 numunesinin 100x SEM analizi görünüşü.



Şekil 5.38. PY2 numunelerinin 250x SEM analizi görünüşü.



Şekil 5.39. PY1 numunesinin 1000x SEM analizi görünüşü.

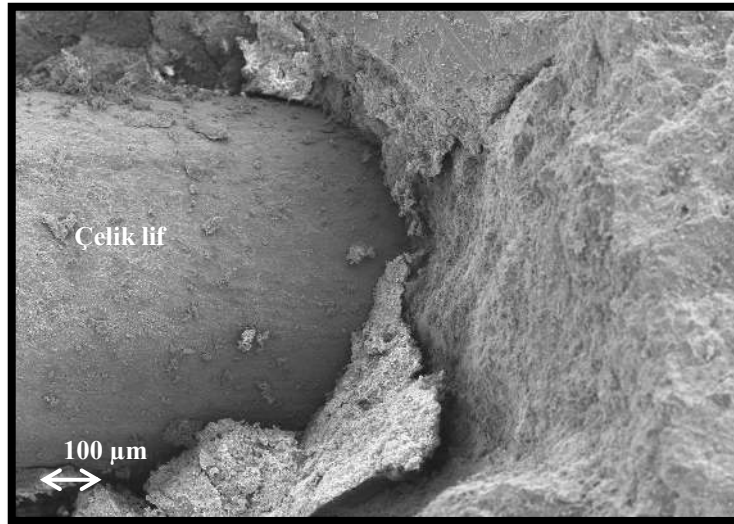


Şekil 5.40. PY1 numunesi 100x SEM analizi görünüşü.

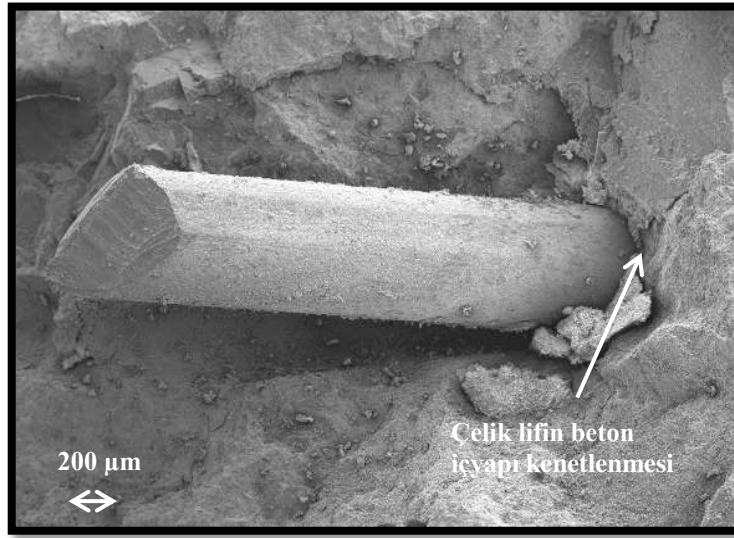
Şekil 5.40 incelendiğinde PY lifin beton içinde kenetlenmesinin ve yerleşiminin tam olduğunu boşluklu yapı oluşturmadığı ve çatlak ilerleyişini durdurarak betondaki çekme kuvvetlerini karşılaması sonucunda yol betonunun daha yüksek performans göstermesini sağlamaktadır.

5.4.3. Çelik lifli beton numunelerinde SEM analizleri

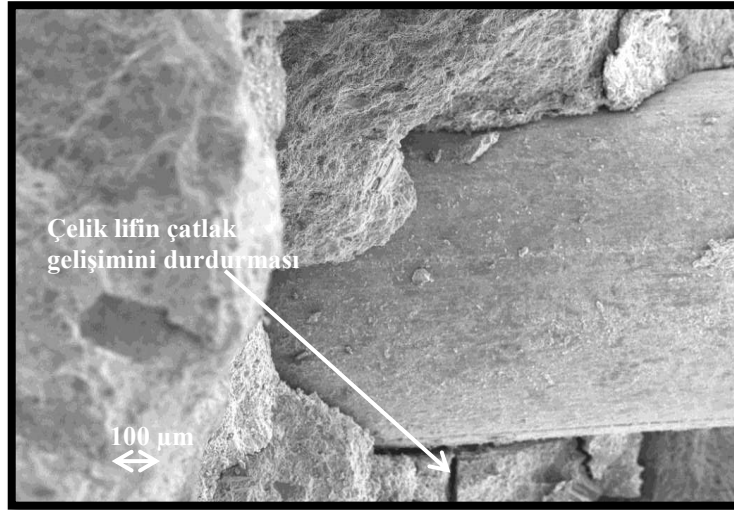
Çelik lifli beton numunelerinin SEM analiz görüntüleri Şekil 5.41-5.43 arasında verilmiştir. Çelik lifler uzun yıllardan beri beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılan lif malzemelerinin başında gelmektedir. Çelik liflerin betonla aderans yüzeyleri incelendiğinde kenetlenmenin uygun olduğu SEM görüntülerinden görülebilmektedir. Çelik lifin, polipropilen ve polimer liflere benzer şekilde çatlak durdurma etkisinin olduğu görülmektedir (Şekil 5.43). Buradaki SEM görüntüsünde lifli kompozitin alt kesiminden ilerleyen çatlağın lif tarafından durdurulduğu belirgin olarak görülmektedir. Lifle matris arasındaki kenetlenmenin çok düzgün olması kompozit içerisindeki yük aktarımının sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanımakta ve lifli beton kompozitin özellikle eğilme dayanımında artışlar görülmektedir. Şekil 5.43’de 160 kat büyütme yapılarak çekilmiş çelik lifli betonun içyapı fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.41. ÇL2 numunelerinin 160x SEM analizi görünüşü.



Şekil 5.42. ÇL2 numunesinin 50x SEM analizi görünüşü.



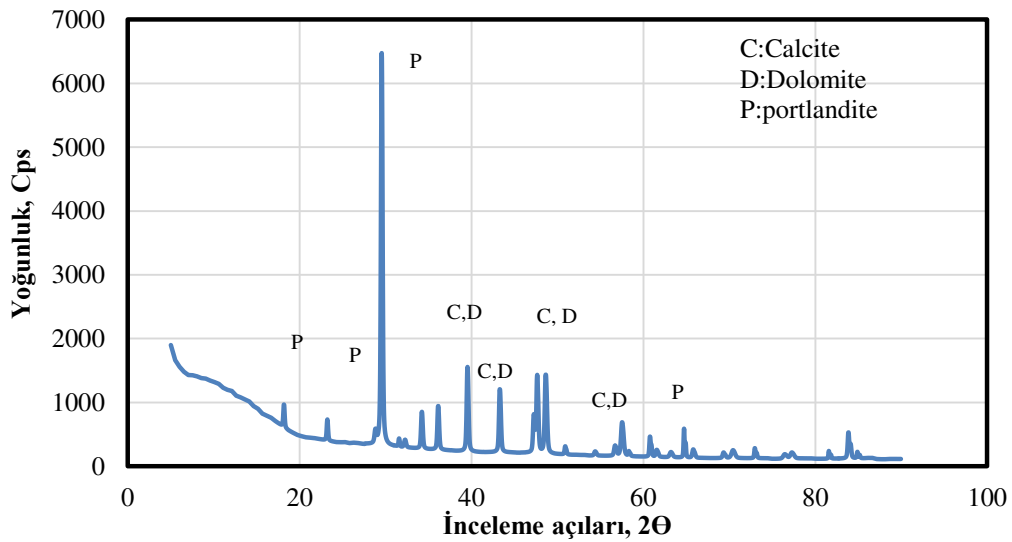
Şekil 5.43. ÇL2 numunesinin 150x SEM analizi görünüşü.

Tüm lif türlerine ait SEM analizleri değerlendirildiğinde lif katkılarının betonun içyapısını düzenlemeye yardımcı olduğu görülmüştür. Beton karışımına katılan PP, PY ve ÇL liflerin beton ara yüzeyine gelen dış kuvvetler nedeniyle oluşan çatlakları durdurduğu ve özellikle çekme gerilmelerinin betona katılan bu lifler tarafından karşılandığını göstermiştir. Lif katkılı beton numunelerinde karşılaşılan dayanım artışlarının nedeni olarak bu davranış rol oynamaktadır.

5.5. Mineralojik XRD Analizi Sonuçları

Lifli Beton karışımlarında beton matrisin mineralojik yapı incelemesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi araştırma laboratuvarında (MARAL) XRD analizi yöntemiyle belirlenmiştir. Öncelikle beton numunesinden alınan kesitlerin halkalı değirmende toz haline gelecek şekilde öğütülmesiyle XRD deney numunesi hazırlanmıştır.

XRD analizleri $2\theta=5-70^\circ$ aralığında 40 kv /30mA enerjiyle gerçekleştirilmiştir. Toz numune üzerinde gerçekleştirilen XRD analizi sonucu Şekil 5.44’de verilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlardan betonda kalsit ve portlandit fazının yoğun olduğu görülmektedir. Silis ve kalsiyum içerikli beton bileşenlerinde bu fazların görülmesi gerektiği bilinmektedir. Camsı fazın 2θ , $28^\circ-35^\circ$ arasında en büyük değere ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5.44. Beton numunesinin XRD analizi.

Betonun mineralojik analizinde çimento karma oksitlerinin CSH bileşenleri oluşturduğu ayrıca beton karışımındaki agregaların mineralojik kökenlerine bağlı olarak XRD analizi sonucunda Dolomit ve Kalsit fazlarının bulunduğu görülmüştür.

5.6. Beton ve BSK Kaplama Yaklaşık Maliyet Analizi

BSK ve beton kaplamalar için alt yapı masrafları hesaba katılmadan 2017 birim fiyatlarına göre kaplama tiplerinin yaklaşık maliyetleri hesaplanmıştır. Kaplama hesabında KGM, DLH ve Çevre Şehircilik Bakanlığı birim fiyatlarına göre hesaplama yapılmıştır. Beton ve BSK kaplama tasarımı için 10m genişliğinde ve 1km uzunluğunda bir yol kesiti için birim maliyet hesabı yapılmıştır. Maliyet hesaplamalarına göre beton

kaplamalar uzun servis ömrü ve BSK kaplamalara göre daha düşük bakım onarım masrafları düşünüldüğünde önemli avantajlara sahiptirler. BSK ve beton kaplamalara lif katılması ile kaplamaların bozulmalara karşı dirençlerinin artması sonucunda daha uzun süre bozulmalara maruz kalmadan hizmet verecekleri düşünülmektedir. İlk yatırım maliyetleri fazla olan beton kaplamaların, BSK kaplamalara göre 3 kat daha uzun servis ömrü sunduğu çalışmalarda belirtilmiştir.

Kaplama türü seçiminde en önemli noktalardan birisi olan kaplamanın hızla trafiğe açılması ihtiyacı ve kademeli inşaat yapılması durumlarına göre BSK kaplamalar daha uygun olmaktadır. Ülkemiz karayolu ağının yenilenme ihtiyacı ve satih durumu düşünüldüğünde BSK kaplamaların kısa ve orta vadede rijit kaplamalara göre daha fazla uygulaması yapılacaktır. Beton kaplamaların ülkemizde BSK kaplamaya ciddi bir alternatif olabilmesi için gerekli Ar-ge çalışmalarının yapılması ve altyapının geliştirilmesi zorunluluğu vardır. Yol üstyapısına ait tasarımlarda; tek bir kaplama türüne bağlı kalmadan; her iki türün de hem maliyet, hem de diğer tüm parametreler açısından titizlikle incelenerek karar verilmesi gerekmektedir. Karayolu üstyapılarına ait yaklaşık maliyet analizleri Çizelge 5.25’de verilmiştir.

Çizelge 5.25. Kaplama yaklaşık maliyetleri.

Kaplama Türü	Maliyet (TL/km)
BSK Kaplama	685.300
Derzli Klasik Beton Kaplama	775.500
Çelik lifli beton Kaplama(%0.5-%2)	798.720-1.150.700
PP lifli beton Kaplama (%0.5-%2)	664.425-856.260
PY lifli beton Kaplama (%0.5-%2)	726480-1.104.480
Çelik lifli Asfalt Kaplama (%0.5)	701.750
PP lifli Asfalt Kaplama (%0.5)	728.480
PY lifli Asfalt Kaplama (%0.5)	767.550

Üstyapı ilk yatırım maliyeti olarak beton kaplamaların BSK kaplamalara göre daha yüksek maliyetli oldukları ancak uzun hizmet ömrü, düşük bakım onarım maliyetleri düşünüldüğünde beton kaplamaların toplam maliyetinin azalacağı düşünülmektedir. BSK ve beton kaplamalarda lif kullanım oranı arttıkça maliyetlerin arttığı bunun yansırı mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinde de azalmalara neden olduğu görülmüştür. Bu nedenlerle lif katkılarının beton ve BSK kaplama tasarımında lif tipine bağlı olarak deneysel olarak belirlenen optimum oranlarda kullanılması gerekmektedir.

6.DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL İNCELENMESİ

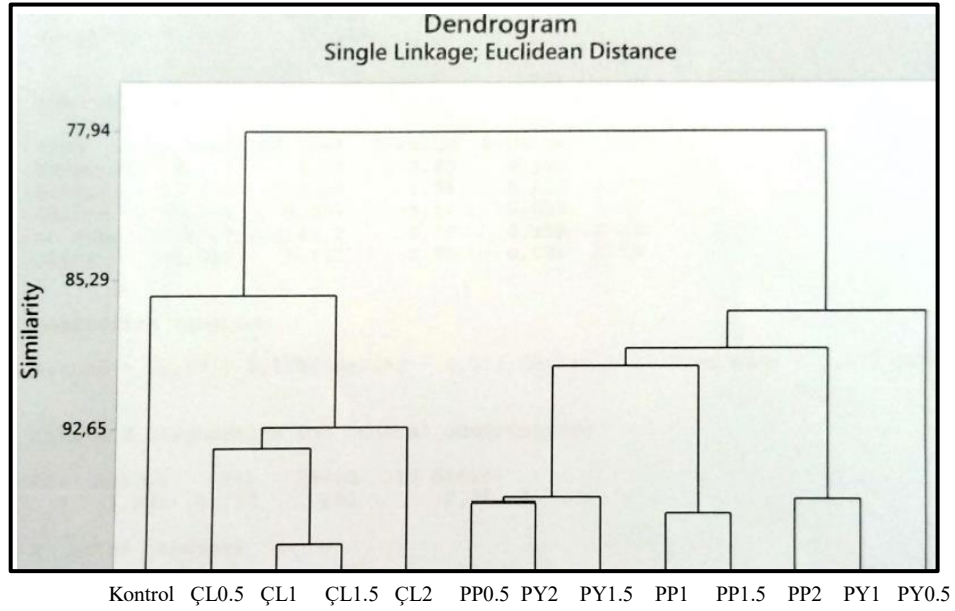
6.1.Beton Deney Sonuçlarının İstatistik Yöntemlerle İncelenmesi

Beton kaplama ve BSK kaplama numunelerine uygulanan deney yöntemlerinin sonuçları üstyapı performans kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarının birbirine en yakın gruplara göre değerlendirilmesi amacıyla istatistik programları yardımıyla kümeleme ve çoklu regresyon analizi için en iyi alt grupların belirlenmesi işlemleri Minitab istatistik programı ile yapılmıştır. Çalışmada benzerlik analizi ile lif türleri arasında deney sonuçlarının nasıl değişimlerde bulunduğu, lif gruplarının karışımlara nasıl etkilediğini ve aynı lif oranının farklı oranlarında değişimlerin nasıl olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, farklı oranlarda lif içeren BSK ve beton kaplamaların deney sonuçlarına göre kaplamaların özelliklerinin ve performansının belirlenmesinde yardımcı olmaktadır. Çalışmada bağımsız değişken olarak karışımlara katılan lif türleri belirlenmiştir. Bu değişkenlere bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarını “tepiklerini” en yakın gruplara benzerliği (kümeleme yöntemi) bulunmuştur. Bu deney sonuçlarına bağlı çoklu regresyon analizi için hangi deney gruplarının en yakın ilişki içinde olduğunun belirlenmesi işlemleri yapılmıştır.

Kümeleme yöntemi; bir ön bilgiye sahip olunmayan verilerin birbiri ile benzer olan alt kümeler (grup, sınıf) ayırmaya yardımcı olan ve bu kümelerin özelliklerini belirleyerek bu grup hakkında tahminlerin yapılmasına olanak sağlayan yöntemlerden oluşan çok değişkenli istatistiksel bir analizdir (Minitab, 2017).

Beton tasarımı çalışmasında bağımsız değişken olarak kabul edilen lif türüne bağlı olarak elde edilen bağımlı değişkenler beton deneylerinin sonuçları arasında kümeleme ve çoklu regresyon alt grupları için analiz yapılmıştır. Bu analizlerle beton tasarımında lif türlerine ait deney sonuçlarıyla hangi lif türüne ait değerlerin birbirlerine benzer olduğu ve lif türü ve oranının bu değişikliklerde ne kadar etkili olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Beton deney sonuçları için kümeleme analizi sonucunda Şekil 6.1’de verilen kümeleme tablosu oluşturulmuştur.



Şekil 6.1. Beton deney sonuçları kümeleme analizi sonuçları.

Çizelge 6.1. Beton deney sonuçları için kümeleme analizi verileri.

Adım	Küme sayısı	Benzerlik derecesi	Uzaklık derecesi	Birleşen kümeler	Yeni küme	İşlem Yap. küme
1	12	98.26	7.00	ÇL1-ÇL1.5	ÇL1	2
2	11	96.763	13.058	PP1-PP1.5	PP1	2
3	10	96.280	15.054	PP0.5-PY2	PP0.5	2
4	9	96.095	15.751	PP2-PY1	PP2	2
5	8	96.028	16.020	PP0.5-PY1.5	PP0.5	3
6	7	93.628	25.705	ÇL0.5-ÇL1	ÇL0.5	3
7	6	92.594	29.875	ÇL0.5-ÇL2	ÇL0.5	4
8	5	89.577	42.046	PP0.5-PP1	PP0.5	5
9	4	88.710	45.544	PP0.5-PP2	PP0.5	7
10	3	86.874	52.592	PP0.5-PY0.5	PP0.5	8
11	2	86.081	56.149	Kontrol-ÇL0.5	Kontrol	5
12	1	77.941	88.988	Kontrol-PP0.5	Kontrol	13

Kontrol numunesinin deney sonuçlarına göre çelik liflerle aynı kümede yer aldığı benzerlik oranının yüksek olduğu görülmektedir. PP ve PY lif gruplarının da benzer şekilde kümelendiği görülmektedir. Beton deney sonuçları değerlendirilerek benzer değerler veren grupların benzerlik derecelerine bağlı kümelendiği ve bu ilişkilerin sonucunda kümelerin birleşerek bir üst grupla benzerliğine göre yeni gruplamalar oluşturulmuştur. Bu kümeleme analizi sonuçlarının ayrıntılı analizi Çizelge 6.1’de verilmiştir. Beton deney sonuçlarının alt gruplarda benzer sonuçlar verdiği benzerlik oranı en yüksek sonuçların ÇL1-ÇL1.5 karışımlarında % 98.2 oranında gerçekleşmiştir. Beton tasarımında en düşük benzerlik oranı kontrol-PP0.5 karışımı arasında % 77.94 gerçekleşmiştir.

Beton tasarımında deney sonuçlarından aşınma dayanımı için regresyon ilişkisi kurulması açısından en iyi alt grupların ilişkisi incelendiğinde basınç, eğilme, CDF, su emme, çökme deney sonuçları ile aşınma deneyi sonuçlarının ilişkisi $R^2:0.72$ oranı ile diğer alt grupların içinde en yüksek ilişki düzeyinde çıkmıştır. Aşınma deney sonuçlarının beton yol kaplamalarında ortaya çıkacak bozulmaların engellenmesinde etkili olması bu özelliğin diğer mekanik ve fiziksel özellikleri ile değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Aşınma değerlerinin regresyon ilişkisi için en iyi alt kümelerin değerlendirmesi Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Aşınma deneyi sonucu ile diğer alt gruplar regresyon ilişki verisi.

Değişken Sayısı	R^2 (gerçek)	R^2 (tahmin)	Basınç	Eğilme	CDF	Su emme	Çökme
1	42.8	37.6	-	-	x	-	-
1	24.4	17.6	-	x	-	-	-
2	57.6	49.2	-	x	-	-	x
2	55.8	47	-	x	x	-	-
3	68.4	57.9	x	x	-	-	x
3	63.9	51.9	-	x	-	x	x
4	70.7	56	x	x	-	x	x
4	68.7	53	x	x	x	-	x
5	71.2	50.7	x	x	x	x	x

Beton tasarımında deney sonuçlarından CDF deney sonucu için regresyon ilişkisi kurulması açısından en iyi alt grupların ilişkisi incelendiğinde basınç, eğilme, aşınma, su emme, çökme deney sonuçları ile CDF deneyi sonuçlarının ilişkisi $R^2:0.67$

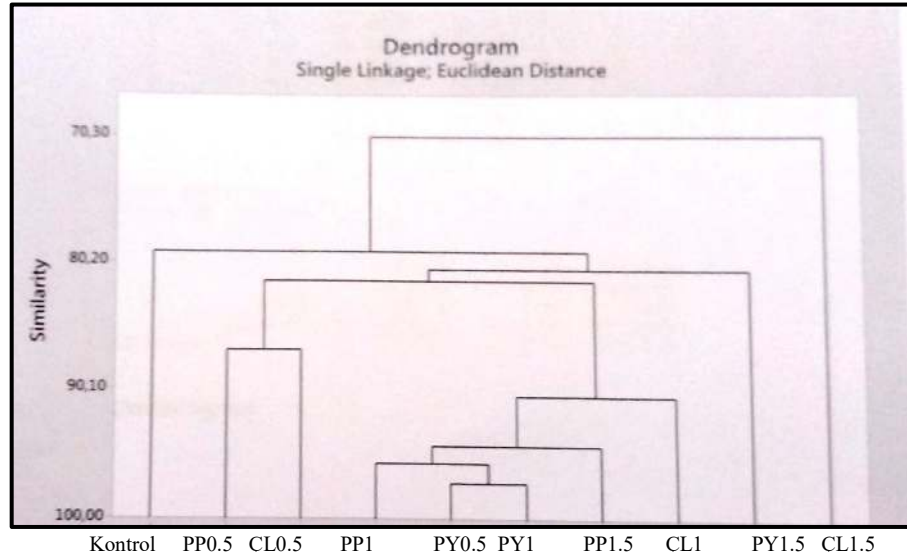
oranı ile diğer alt grupların içinde en yüksek ilişki düzeyinde çıkmıştır. CDF deneyinin beton kaplamalarında kış dönemi oluşacak bozulmaların önüne geçilmesi açısından üstyapılarda önemli bir performans göstergesidir. CDF deney sonuçlarının regresyon ilişkisi için en iyi alt kümelerin değerlendirmesi Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. CDF deneyi sonucu ile diğer alt gruplar arasında regresyon ilişki verisi.

Değişken Sayısı	R^2 (gerçek)	R^2 (tahmin)	Basınç	Eğilme	Aşınma	Su emme	Çökme
1	44.4	39.4	-	-	-	-	X
1	42.8	37.6	-	-	X	-	-
2	59.9	51.9	-	-	X	-	X
2	58.1	49.7	-	X	-	-	X
3	66.5	55.4	X	X	-	-	X
3	61.8	49.1	-	X	X	-	X
4	67.1	50.6	X	X	-	X	X
4	66.8	50.2	X	X	X	-	X
5	67.7	44.6	X	X	X	X	X

6.2.BSK Deney Sonuçlarının İstatistik Yöntemlerle İncelenmesi

BSK kaplama tasarımı çalışmasında bağımsız değişken olan lif türünün değişim oranlarına göre deney sonuçlarından elde edilen bağımlı değişkenler olan Marshall deney sonuçları (Pratik özgül ağırlık (PÖA), Marshall Stabilité, Boşluk oranı, Bitümle dolu boşluk oranı, akma) arasında kümeleme analizi yapılmıştır. Deney sonuçları arasında çoklu regresyonda alt gruplar belirlenmiştir. BSK tasarımı deney sonuçları için kümeleme analizi sonucunda Şekil 6.2’de verilen kümeleme dendrogramı oluşmuştur.



Şekil 6.2. BSK deney sonuçları kümeleme analizi sonuçları.

Kontrol numunesinin tüm lif türlerine aynı oranda benzediği görülmektedir. PP ve PY lif gruplarının sonuçlarının daha yakın benzerliğe sahip olduğu bulunmuştur. BSK deney sonuçları değerlendirilerek benzer değerler veren grupların benzerlik derecelerine bağlı kümелendiği ve bu ilişkilerin sonucunda kümelerin birleşerek bir üst grupta benzerliğine göre yeni grup oluşturulmuştur. Bu kümeleme analizi sonuçları Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Çizelge 6.4. BSK deney sonuçları için kümeleme analizi verileri.

Adım	Küme sayısı	Benzerlik derecesi	Uzaklık derecesi	Birleşen kümeler	Yeni küme	İşlem Yap. küme
1	9	97.3	10.28	PY0.5-PY1	PY0.5	2
2	8	95.78	16.07	PP1-PY0.5	PP1	3
3	7	94.46	21.12	PP1-PP1.5	PP1	4
4	6	90.61	35.79	PP1-ÇL1	PP1	5
5	5	87.07	49.31	PP0.5-ÇL0.5	PP0.5	2
6	4	81.67	69.94	PP0.5-PP1	PP0.5	7
7	3	80.77	73.37	PP0.5-PY1.5	PP0,5	8
8	2	79.38	78.66	Kontrol-PP0.5	Kontrol	9
9	1	70.29	113.34	Kontrol-ÇL1.5	Kontrol	10

BSK tasarımı deney sonuçlarının alt gruplarda benzer sonuçlar verdiği benzerlik oranı en yüksek sonuçların PY0.5-PY1 karışımlarında %97.3 oranında gerçekleşmiştir. Lif katkılı BSK deney sonuçlarında en düşük benzerlik oranı kontrol- ÇL1.5 karışımı arasında %70.29 oranında gerçekleşmiştir. BSK deney sonuçları içinden Marshall stabilite deney sonuçları için regresyon ilişkisi kurulması açısından en iyi alt grupların ilişkisi incelenmiştir. En uygun bitüm oranı (OBO), Pratik özgül ağırlık (PÖA), Boşluk oranı (BO), Bitümle dolu boşluk (BDBO), akma, Agregalar arası boşluk (ABO) deney sonuçları ile Marshall stabilite deney sonuçlarının ilişkisi $R^2:0,76$ oranı ile diğer alt grupların içinde en yüksek ilişki düzeyinde bulunmuştur. Marshall stabilite değerlerinin esnek üstyapı tasarımında önemi düşünüldüğünde bozulmaların önlenmesi için bu deney sonuçlarının ilişkisi çok önemlidir. Marshall stabilite deney sonuçlarının regresyon ilişkisi için en iyi alt kümelerin değerlendirmesi Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Marshall deney sonucu ile diğer alt gruplar regresyon ilişki verisi.

Değişken Sayısı	R^2 (gerçek)	R^2 (tahmin)	OBO	PÖA	BO	BDBO	Akma	ABO
1	42,6	35,4	-	-	-	-	-	x
1	41,2	33,8	-	x	-	-	-	-
2	62,9	52,3	x	-	-	-	-	x
2	46,7	31,4	-	-	-	-	x	x
3	67,2	50,9	x	-	-	-	x	x
3	66,2	49,3	x	x	-	x	-	-
4	72,7	50,9	-	-	x	x	x	x
4	71,4	48,6	x	x	-	x	-	x
5	76,3	46,6	x	x	x	-	x	x
5	74,4	42,4	x	x	-	x	x	x
6	76,3	29	x	x	x	x	x	x

BSK deney sonuçları içinden Pratik özgül ağırlık deney sonuçları için regresyon ilişkisi kurulması açısından en iyi alt grupların ilişkisi incelenmiştir. En uygun bitüm oranı (OBO), Marshall Stabilite (Ms), Boşluk oranı (BO), Bitümle dolu boşluk (BDBO), akma, Agregalar arası boşluk (Abo) deney sonuçları ile PÖA deney sonuçlarının ilişkisi $R^2:0,99$ oranı ile diğer alt grupların içinde en yüksek ilişki düzeyinde çıkmıştır. PÖA değerlerinin BSK kaplama tasarımında her deney sonuçlarıyla regresyon ilişkisi oranları çok yüksek bir ilişkinin olduğunun değerlendirmesi Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Pratik özgül ağırlık sonucu ile diğer alt gruplar regresyon ilişki verisi.

Değişken Sayısı	R² (gerçek)	R² (tahmin)	OBO	MS	BO	BDBO	Akma	ABO
1	94,2	93,4	-	-	-	-	-	X
1	93,6	92,8	-	-	X	-	-	-
2	99,7	99,6	X	-	-	X	-	-
2	99,5	99,3	X	-	X	-	-	-
3	99,8	99,7	X	X	-	X	-	-
3	99,8	99,7	X	-	-	X	-	X
4	99,8	99,7	X	X	-	X	-	X
4	99,8	99,7	X	X	X	X	-	-
5	99,8	99,7	X	X	X	X	-	X
5	99,8	99,6	X	X	-	X	X	X
6	99,9	99,6	X	X	X	X	X	X

7.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

BSK ve beton kaplamalarda farklı lif kullanımının kaplama performansı üzerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada fiziksel, mekanik ve kalıcılık deneyleri ile içyapı incelemelerinden elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- Lifli beton karışımlarında taze beton işlenebilirliği açısından lif kullanımı ile yayılma ve çökme değerlerinin olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Özellikle PP lif kullanılan beton kaplamalarda ortaya çıkabilecek işlenebilirlik sorunlarının önüne geçilebilmesi için gerekli durumlarda akışkanlaştırıcı kimyasal beton katkısı kullanılmalıdır.
- PY, PP ve ÇL lif katkılı betonların basınç dayanımı davranışları değerlendirildiğinde referans betonuna göre en yüksek dayanım artışı % 13 ile ÇL1 numunesinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar çelik lif kullanımının beton basınç dayanımını diğer liflere göre daha fazla arttırdığını göstermiştir.
- Beton kaplamaların yapısal olarak bir plak gibi davranması kaplamanın eğilme davranışını önemli kılmaktadır. Çalışmada incelenen üç farklı lif katkılı betonlar arasında referans betonuna göre en iyi eğilme davranışı % 33 artış oranı ile PY2 numunesinden elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak PY lifin mekanik özelliklerinin PP life göre daha iyi olması etkili olmuştur. PY lifin çelik life göre birim alanda daha fazla sayıda lif barındırması çatlak ilerlemesine karşı daha etkili olmuş ve eğilme dayanımlarını arttırmıştır.
- Aşınma direnci deney sonuçları incelendiğinde hacimce ve ağırlıkça en düşük aşınma kayıpları PP2 karışımından elde edildiği görülmüştür. Aşınma direnci en düşük karışımlar ÇL katkılı karışımlarda bulunmuştur. Aşınma direncinin oldukça önemli olduğu trafik yükü etkisi altında bulunan yol kaplamalarında polimer esaslı lif katkılarının kullanılması önerilmektedir.
- Buz çözücü tuzlara karşı beton yolların kalıcılık özelliklerini arttıran en etkili karışımlar aşınma direncine benzer şekilde PP ve PY katkılı karışımlar olmuştur. ÇL katkılı beton numunelerinde ise ağırlık kayıpları kontrol betonuna göre yüksek çıkarak en olumsuz sonuçları vermiştir. Bunda beton yüzeyine çıkan çelik liflerin beton ile kenetlenme ara yüzeyindeki boşluklara sızan suyun donma çözünme etkisini arttırması rol oynamıştır. Çelik lifli beton

numunelerinin su emme değerlerinde yüksek çıkmasındaki nedenin bu olduğu düşünülmektedir.

- Özellikle kış koşullarının etkili olduğu yerlerde kullanılacak beton yol kaplamalarında çelik lif yerine polimer liflerin kullanımı kaplama yüzeyinde oluşacak donma çözünme hasarlarını azaltacağından bu gibi yerlerde PY ve PP lif tipi kullanılmalıdır.
- Tüm lif türlerine ait içyapı analizleri değerlendirildiğinde liflerin beton kompozit içerisinde dağılarak mekanik etkilere bağlı ortaya çıkan çatlak ilerleyişini azalttığı veya durdurduğu böylece çatlak ucunda oluşan gerilme yığılmalarının lif tarafından taşınmasıyla kompozitin mekanik davranışlarında iyileşmeye yol açtığı görülmüştür.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar kullanılarak yapılan değerlendirmede rijit üstyapı kaplamalarında kullanılacak en uygun lif katkısı oranının %1.5 olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bu önerilen oranın betonda kullanılan agrega gradasyonu, çimento dozajı, su/çimento oranı ve kullanılacak mineral katkı tipine bağlı olarak değişiklik gösterebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.
- Tüm lifli BSK'ların Marshall deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde; lifli karışımların kontrol karışımına yakın sonuçlar verdiği ayrıca her lif tipi için en uygun karışım oranının % 0.5 olduğu belirlenmiştir. Ancak lif oranındaki artış ile karışımların ihtiyaç duyduğu bitüm miktarının artması kaplama maliyetini arttıracaktır. KTŞ'ne göre lif katkılı BSK kaplamaların şartnamede verilen Marshall stabilite, akma sınır değerlerini karşıladığı görülmüştür.
- Lifli BSK karışımlarının en uygun lif ve bitüm oranında yapılan statik ve dinamik sünme deney sonuçlarına göre PY lif katkılı BSK'larının kontrol numunelerine göre kalıcı deformasyon oluşumlarına karşı daha dirençli olduğu belirlenmiştir. Çelik lifli karışımlar dinamik sünme açısından polimer liflere benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. Lif katkılarının BSK performansına olumlu etkileri olduğu deneyler sonucunda belirlenmiştir.
- PP liflerle karışım oluşturulurken topaklanma ve lif erimesi gibi sorunlarla karşılaşmıştır. Bu nedenle sıcak karışıma katılacak lif seçiminde yüksek sıcaklığa dayanıklı liflerin tercih edilmesi ve lifin sıcak karışım içinde homojen

dağılımını sağlayacak özel karıştırma tekniklerinin kullanılması oldukça önemli bir konudur.

- BSK kaplama tasarımında % 0.5'üzzerindeki lif kullanım oranlarında kontrol karışımına göre Marshall deney sonuçlarında azalmaların olduğu görülmüştür. Bu nedenle BSK tasarımında lif kullanım oranının % 0.5'i geçmemesi gerektiği önerilmektedir.
- Liflerin BSK kaplama bozulmalarında etkili olup olmadığının kontrolü için yapılan buz çözücü tuz deneyi sonuçlarına göre PY0.5 ve PP0.5 BSK'ların kontrol karışımına göre kaplamalarda bozulma oluşumunu sırasıyla % 20 ve % 25.3 oranında azalttığı görülmüştür. Kış ve kar mücadelesi yoğun olan bölgelerde PP ve PY lif karışımlarının BSK'da kullanılması kaplamaya gelen donma çözülme etkilerinin olumlu yönde azaltacaktır.
- BSK ve beton tasarımında yapılan deney sonuçları istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde lif türlerine göre benzerlik oranlarının çok yakın olduğu görülmüştür. İstatistiksel değerlendirme sonucunda BSK ve beton numunelerinin deney sonuçlarının anlamlılık değerlerinin yüksek olduğunu göstermiştir.
- Bundan sonra yapılacak çalışmalarda farklı endüstriyel veya atık liflerle ve Superpave yöntemi ile tasarımlar yapılarak BSK kaplamaların iyileştirilmesi üzerine incelemelerde bulunulabilir.
- Lifli BSK uygulanan gerçek kaplamalar üzerinde uzun süreli incelemeler ve analizler yapılarak üstyapı davranışının belirlenmesi ülkemizde hizmet ömrünü kısa sürede tamamlayan BSK kaplamaların performansının artırılması için gerçekçi verilerin elde edilmesi açısından önemli bir çalışma olacaktır.
- Ayrıca ülkemizde artan ulaşım faaliyetleri ile yeni yapılacak yol projelerinde ve yenileme çalışmalarında yerli kaynakların kullanılması için beton yol projelendirmelerinin tercih edilmesi çok önemli bir gerekliliktir. Özellikle bozulmalara karşı liflerle güçlendirilen beton yolların bakım onarım ihtiyacı duymadan uzun yıllar hizmet verebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- AASTHO, “Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects FP-14”, *United States Department Of Transportation Federal Highway Administration* (2014).
- Abtahi, S., M., Sheikhzadeh, M., Hejazi, S., M., “Fiber-reinforced asphalt-concrete”, *Construction and Building Materials*, 156:871-877(2009).
- ACI 544, “Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R-88), Manual of Concrete Practice, Part 5”, *American Concrete Institute*, Detroit, 18, (1988).
- Ağar, E., Sütaş, İ. Ve Öztaş, G., “Beton Yollar”, *İ.T.Ü. Yayınları*, 1594:(1998).
- Ağar, E., Öztaş, G., ve Sütaş İ., “Esnek Yol Üstyapıları İle Rijit Yol Üstyapılarının Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması”, *Teknik Rapor*, *TÇMB 02537*, Ankara, 60-108 (1999).
- Ahmetzade, P., Alataş, T., Geçkil T., “Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı”, *İMO Teknik Dergi*, 4493-4507 (2011).
- Aral, M., “Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım”, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul,(2006).
- ASTM A 820. Standart Specification for Steel Fibers for Fiber- Reinforced Concrete, *The American Society for Testing and Materials*, U.S.A, (1996).
- ASTM C 117-95. Standard Test Method for Materials Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, *The American Society for Testing and Materials*, U.S.A, (1995).
- Banthia, N., Yan, N., Bindiganalive, V., “Development and application of high performance hybrid fiber reinforced concrete”, *5. RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France, 380-393 (2000).
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), *Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları*, İstanbul, (2010).
- Bettermann, L.R., Ouyang C., Shah, S.P., “Fiber-matrix interaction in microfiber reinforced mortar”, *Advanced Cement Based Materials*, 2: 53-61,(1995).
- Bolat, H., “Polipropilen ve polyester telli betonların yol kaplaması olarak kullanılabilirliğinin araştırılması ” Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).

- Bozkurt, H., Karakurt, C., “Çelik Lif Katkılı Beton Yol Kaplamalarının Özellikleri” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4 :617-624(2016).
- Bozkurt, H., Karakurt, C., Karacasu, M. “Evaluation of Energy Efficiency on Warm mix Asphalt” *Electronic Journal Of Occupational Improvement And Research*, 3:143-149, (2015).
- Chawla K.K., Fibrous Materials, *Cambridge University Pres*, Cambridge. (1998).
- Cimilli, T., “ Donatılı Betonlarda Matrix- Lif Aderansı” *Türkiye İns. Müh. 7. Teknik Kongresi*, Ankara, 28-32 (1978).
- Chen, J.S., Lin, K.Y., “Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers”,*Journal of Materials Science*, 40: 87-95 (2005).
- Chen, H., Xu Qinwu, Chen S and Zhang Z, “Evaluation and design of fiber reinforced asphalt mixtures,” *Material and Design*, ISSN. 0261-3069, (2009).
- Choi, S.Y., Park, J.S., Jung, W.T., “A Study on the Shrinkage Control of Fiber Reinforced Concrete Pavement” *Procedia Engineering*, Volume 14, 2815-2822, (2011)
- Cleven, M., A., Investigation of the properties of carbon fiber modified asphalt mixtures”, *PhD Thesis. Michigan Technological University*, (2000).
- Çağlar, B., “Ftir, XRD, Termal analiz ve yüzey alanı ölçümleriyle incelenmiş çeşitli kaolin-dmso-organik türleri”, Yüksek lisans tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, (2001).
- Er, A., “Özel Öğütülmüş Lastik Atığı İçeren Asfalt Betonunun Performans Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,Eskişehir, (2011).
- Erdoğan, T.Y. Beton, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.*, 1. Baskı, (2003).
- Fırat, M.T. Silis dumanı içeren yüksek mukavemetli betonların enerji tutma kapasitelerinin arttırılmasında çelik lif kullanımının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul,(1996).
- Fitzgerald, R., L., “Novel Applications of Carbon Fiber for Hot Mix Asphalt Reinforcement and Carbon-Carbon Pre-forms”, Master Thesis of Science in *Chemical Engineering Michigan Technological University*,(2000).
- Giriş, Ü. “Esnek Üstyapılar İle Rijit Üstyapıların Teknik Ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması” Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).
- <http://www.aksacausa.com/CF-Catalogue.pdf> (2017).

<http://www.udhb.gov.tr/images/istatistik/0c3de9b9fe1505c.pdf> , UBAK 2015

http://www.tupras.com.tr/uploads/Tupras_Yatirimci_Sunumu_Mart_2016.pdf

<http://www.wastormwatercenter.org/4621-common-component-design>

Jahromi, S., G., Khodaii, A., “Carbon Fiber Reinforced Asphalt Concrete”, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33(2B):355-364 (2008)

Karayolları Teknik Şartnamesi”, *KGM*, Ankara, 2013.

Karayolları Genel Müdürlüğü Yol Envanteri, *KGM*, Ankara, 2016.

KGM, “Karayolu Bakım El Kitabı”. Karayolları Genel Müdürlüğü, *Bakım Dairesi Başkanlığı*, Ankara, 1998.

Karahan, O. “Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu küllü betonların özellikleri” *Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana,(2006).

Kara, Ç. “Fayans Atıklarının Bitümlü Sıcak Karışımların Performans Özelliklerine Etkisi” Yüksek lisans tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir (2012).

Karakurt, C., Bayazıt, Y., “Freeze-Thaw Resistance of Normal and High Strength Concretes Produced with Fly Ash and Silica Fume”, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2015).

Karacasu, M. ve Bilgiç, Ş., “Atık lastik katkısının sıcak asfalt özelliklerine etkisi”, Eskişehir *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* XXII(2):(2009).

Karavaşin, M.,“Karayolu üstyapısı ders notları”, *İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ders Notları*, (2014).

Lankard, D., R., Shrader E., K., Inspection and Analysis of Curl in Steel Fiber Reinforced Concrete Airfield Pavement, *Bekaert Steel Wire Corp.*, Pittsburgh, 1983.

Löfgren, I., “Fibre-reinforced concrete for industrial construction”, *Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology*, Göteborg, Sweden, 39-50 (2005).

Manh, H., T., Viet A., P. Influence Of Fiber Polymer Reinforced Asphalt Concrete Pavement In High Temperature Environment, *The 2nd Electronic International Interdisciplinary Conference*, , 465-468(2013).

Morales, A., Lanzoni L.,Navarro, F.,J.,Gallegos, C., Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen, *Fuel* 85: 936–943 (2006).

- Mutyılmaz, S., “Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Yol Betonu Olarak Kullanılması, Yüksek lisans tezi, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, (2014).
- Nobili, M., G., Partal, P., Tarantino, A.M., “Experimental investigation and monitoring of a polypropylene based fiber reinforced concrete road pavement”, **Construction and Building Materials**, 47:888-895 (2013).
- Orhan, F. “Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları”, **Karayolları Genel Müdürlüğü**, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme şubesi Müdürlüğü, Ankara (2012).
- Önal, M., A., Kahramangil, M. “Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı”, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, **Karayolları Genel Müdürlüğü**, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara (1993).
- Özerdoğan, E. “ Rijit Üstyapılarda Bakım ve Onarım” *Yüksek Lisans Tezi*, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2005).
- Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D.H., Moczko, A., “Fracture properties and acoustic emission response of hybrid polypropylene-steel fibre reinforced concrete”, 5. **RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)**, Lyon, France, 491-500, (2000).
- Rossi, P., “Ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC): an overview”, 5. **RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)**, Lyon, France, 87-100, (2000).
- Sarı, M. Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2013).
- Salemi, N., Behfarnia, K., “Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement”, **Construction and Building Materials**, 48:934-941 (2013).
- Serfass, JP., Samanos, J., “Fiber-Modified Asphalt Concrete Characteristics”, **Applications and Behavior**. AAPT, 65:193-230 (1996).
- Serin, S., Morova, N., Saltan, M., Terzi, S., “Investigation of Usability of Steel Fibers in Asphalt Concrete Mixtures”, **Construction and Building Materials**, 52: 238-244 (2012).
- Setzer, M.J., Fagerlund, G. and Janssen, D.J., “CDF Test-Test Method For The Freeze-Thaw Resistance Of Concrete-Tests With Sodium Chloride Solution (CDF). RILEM Recommendation”, **Materials and Structures**, 3: 523-528 (1996).

- Shah, B., Fiber-Reinforced Composites, *American Concrete Institute*, Detroit U.S.A,(1995).
- Simoes, T., Costa, H. Dias da costa, D., Julio, E., “Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes ”, *Construction and Building Materials*,137: 548-556 (2017).
- Snyder M. “Evolution of Concrete Pavement Design and Construction in the U.S. over the Last 100 Years”, 50th Congresso Brasileiro do Concreto – *IBRACON* (2008).
- Songa, P. S., Hwangb, S. And Sheub, B. C. “Strength Properties of Nylon and Polypropylen Fiber Reinforced Concretes”, *Cement and Concrete Research*, 35: 356-368 (2005).
- Taşdemir, Y., “ Bitümlü kaplamaların termal davranışlarının performans testleri ile incelenmesi ” *Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2003).
- TMH. “Dünyada Beton yol çalışmaları”, *Mühendislik Haberleri dergisi*, 427(5): (2003).
- TS 802/T2, “Beton karışım hesabı”, *TSE*, Ankara, 3-18 (2016).
- TS 10514, “Beton - çelik tel takviyeli - çelik telleri betona karıştırma ve kontrol kuralları”, *TSE*, Ankara, 2-5 (2015).
- TS EN 58, “Bitümlü bağlayıcılar-Numune alma”, *TSE*, Ankara, 2-27 (2012).
- TS EN 480-11, “Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Deney metotları - bölüm 11: Sertleşmiş betonda hava boşluğu özelliklerinin tayini”, *TSE*, Ankara, 2-21 (2008).
- TS 706 EN 12620+A1 “Beton Agregaları” *TSE*, Ankara, 2-29 (2009).
- TS EN 933-1, “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi”, *TSE*, Ankara, 2-18 (2012).
- TS EN 933-3, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 3: Tane şekli tayini yassılık endeksi, *TSE*, Ankara, 2-11 (2012).
- TS EN 1008 Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, *TSE*, Ankara, 2-18 (2003).
- TS EN 1097-3 Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri için deneyler bölüm 3: Gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini,*TSE*, Ankara, 2-20 (1999).

- TS EN 1097-6 Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, *TSE*, Ankara, 2-43 (2013).
- TS EN 1744-1 Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Kimyasal analiz, *TSE*, Ankara, 2-18 (2013).
- TS EN 2824 EN 1338, “Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları, *TSE*, Ankara, 1-3 (2009)
- TS EN 3720, “Bitümlü karışımlar - Asfalt betonu - Karışım tasarımı hesap esasları - Marshall yöntemi *TSE*, Ankara, 1-13 (2010)
- TS EN 12350-2, “Beton – Taze beton deneyleri - Bölüm 2 : Çökme (slamp) deneyi”, *TSE*, 1-7 (2010).
- TS EN 12350-6, “Beton – Taze beton deneyleri - Bölüm 6 :Yoğunluk”, *TSE*, 1-9 (2010).
- TS EN 12390–1, “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıpların şekil boyut ve diğer özellikleri , *TSE*, Ankara, 5-16 (2012).
- TS EN 12390–3/AC, “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini”, *TSE*, Ankara, 5-16 (2012).
- TS EN 12390–5, “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımı tayini”, *TSE*, Ankara, 1-9(2012).
- TS EN 12390–7, “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 7:Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini”, *TSE*, Ankara, 1-7(2012).
- TS EN 14889-1, “Lifler – Betonda kullanım için – Bölüm 1: Çelik lifler – Tarifler, özellikler ve uygunluk”, *TSE*, Ankara, 1-22 (2006).
- TSE CEN/TS 12390-9 Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 9: Buz çözücü tuzlarla donma-çözünme direnci – Ölçeklendirme, *TSE*, Ankara, 1-35(2017).
- TS EN 12504-4, “Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik darbe tayini”, *TSE*, Ankara, 1-4 (2012).
- TS EN 1097-2. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2 : Parçalanma direncinin tayini için metotlar, *TSE*, Ankara, 1-36 (2010).
- TS EN 1367-1. Agregaların ısı ve bozunma özellikleri için deneyler – Bölüm 1:Donmaya ve çözölmeye karşı direncin tayini, *TSE*, Ankara, 1-14 (2008).
- TS EN 1426, “Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini”, *TSE*, Ankara, 1-16(2015).

- TS EN 1427, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi”, *TSE*, Ankara, 1-20(2015).
- TS EN ISO 2592, Petrol ürünleri-Parlama ve yanma noktası tayini-Cleveland açık kap metodu, *TSE*, Ankara, 1-25(2006).
- TS EN 12697-25, Bitümlü karışımlar - Deney yöntemleri - Bölüm 25: Tekrarlı basınç deneyi, *TSE*, Ankara, 1-37(2016).
- TS EN 13589, Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - İşlem görmüş bitümlerin çekme özelliklerinin duktilometre metoduyla tayini, *TSE*, Ankara, 1-11(2009).
- TS EN 12591, Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-Kaplama sınıfı bitümler-Özellikler, *TSE*, Ankara, 1-31(2011).
- TS EN ISO 2592, Petrol ürünleri-Parlama ve yanma noktası tayini-Cleveland açık kap metodu, *TSE*, Ankara, 1-25(2006).
- THBB Beton Yollar Teknik Çalışma Grubu, “Beton yollar”, *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 427:38-44 (2003).
- Tapkın, S. “The effect of polypropylene fibers on asphalt performance”, *Building and Environment*, 43:1065–1071,(2008).
- Taşdemir Y., Ağar E., “Bitümlü Kaplamalarda Düşük Sıcaklık Çatlaklarının İncelenmesi”. *İtü dergisi/d mühendislik*, 4(1): 59-70 (2005).
- Tunç, A., “Yol Malzemeleri ve Uygulamaları”, *Atlas Yayın Dağıtım*, İstanbul, 109-466 (2001).
- Tunç, A., Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara, 2004.
- Türker, S., Balanlı, A., *Yapı Malzemeleri*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, (1992).
- Uğurlu, A., Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Su Yapılarındaki Kaviteasyon Hasarlarının Onarımında Kullanılması. *DSİ Teknik Bülteni*, 83:71-80(1995).
- Umar, F., Ağar, E., “Yol Üstyapısı”, *İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası*, İstanbul, 5-98 (1991).
- Ünal, B., “ Çelik Tel ve Polipropilen Lif İçerikli Beton Yolların Mekaniksel Özelliklerinin Araştırılması”. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri,(2003).
- Yeğinobalı, A., “Niçin beton yol ? ”, *Ar-Ge/Y 09.01*, TÇMB, Ankara, (2009).

Yeğınobalı, A.,“Türkiye’nin İlk Beton Karayolları ”,**Ar-Ge/Y 09.01**, TÇMB, Ankara, (2010).

Yerlikaya , M., “Çelik Tel Donatılı Betonların Deprem Etkisi Altında Davranışları”,
Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 302-304(2003).

Zube, E. “Wire mesh reinforcement in bituminous resurfacing”. **Highway Research Record, Bulletin**, No. HS-023 499,(1956).

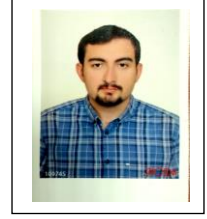
Zoorob, SE. and Suparma, B. “Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)”, **Cement & Concrete Composites** , 22:233-242(2000).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Hasan BOZKURT

Doğum Yeri ve Tarihi : BİLECİK /29.10.1986



Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü (2008)

Yüksek Lisans Öğrenimi : Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2011)

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İş Deneyimi

Stajlar : Karayolları 14.Bölge Müdürlüğü Yol Yapım Şube Müdürlüğü

Projeler :Rijit ve esnek Üstyapı tasarımında Lif Katkısı Kullanımının Araştırılması, (BŞEÜ BAP Projesi, Araştırmacı, , 08/07/2015 - 08/07/2016

Çalıştığı Kurumlar : Nippon Koei-Temelsu O.G. Sanat Yapıları Kontrol Mühendisi (Bozüyük–Mekece yolu Müşavirlik Hizmetleri 2008-2011)

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü (Arş.Gör.) 2011-(Devam ediyor)

İletişim

Adres : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi İnşaat Mühendisliği

Bölümü :İnşaat Mühendisliği

Tel : 0228 2141417

E-Posta Adresi : hasan.bozkurt@bilecik.edu.tr