

**RİJİT YOL ÜSTYAPI İNŞASINDA REAKTİF
PUDRA BETONUN (RPB)
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Abdulrezzak BAKIŞ

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Bilim Dalı

Yrd. Doç. Dr. Fatih HATTATOĞLU

2015

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**RİJİT YOL ÜSTYAPI İNŞASINDA REAKTİF PUDRA BETONUN
(RPB) KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Abdulrezzak BAKIŞ

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Ulaştırma Bilim Dalı**

**ERZURUM
2015**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**RİJİT YOL ÜSTYAPI İNŞASINDA REAKTİF PUDRA BETONUN
(RPB) KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yrd. Doç. Dr. Fatih HATTATOĞLU danışmanlığında, Abdulrezzak BAKIŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 29/12/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Ulaştırma Bilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Murat KARACASU

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ahmet ÇAVDAR

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fatih HATTATOĞLU

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu ...31.../...12.../2015 tarih ve ...54.../...1747... nolu kararı ile onaylanmıştır.

S. 

Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

RİJİT YOL ÜSTYAPI İNŞASINDA REAKTİF PUDRA BETONUN (RPB) KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Abdulrezzak BAKIŞ

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fatih HATTATOĞLU

Bu çalışmada, Reaktif Pudra Betonun (RPB) rijit üstyapı kaplama inşasında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle RPB üretimi için değişik kür uygulamaları yapılmış, üretilen RPB'ların maliyetini düşürmek için Ahlat taşı tozu ve sanayi atığı çelik lifler kullanılmıştır. Üretilen tüm numuneler basınç ve eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Seçilen tasarımlar için kalınlık hesapları yapılarak maliyet karşılaştırmaları yapılmıştır. RPB numunelere standart su kürü, etüv kürü, otoklav kürü ve bu çalışmada geliştirilen değişik kombine kür tipleri uygulanarak lifli ve liffsiz RPB üretilmiştir. En yüksek basınç ve eğilme dayanımları otoklav ve bu çalışmada geliştirilen değişik kür şartlarındaki deney sonuçlarından elde edilen 7 gün 20°C standart su kürü - 2 gün 90°C sıcak su kürü - 2 gün 180°C etüv kombine küründen sağlanmıştır. RPB'ların en yüksek basınç dayanımı otoklav kürü sonrası 171 MPa, en yüksek eğilme dayanımı otoklav kürü sonrası 11,34 MPa bulunmuştur. RPB üretim maliyetinin düşürülmesi amacıyla normal lifler yerine sanayi atığı çelik lifler, çimento yerine ise çimento ile ikameli olarak Ahlat Taşı Tozu (ATT) ve kireç kullanılmıştır. Maliyet düşürme amacıyla üretilen 20 farklı numune deneyleri sonucunda; çimento, ATT ve kireç karışımli deneylerde, en yüksek basınç ve eğilme dayanımını veren ekonomik karışımın, karışımındaki çimento, ATT ve kireç miktarları toplamının %50'sini çimento, %29,4'unu ATT ve %20,6'sını kireç oluşturacak şekilde hazırlanan karışım olduğu görülmüştür. Sanayi atık lifli RPB'un en yüksek basınç dayanımı 125 MPa; en yüksek eğilme dayanımı 15,04 MPa bulunmuştur. Çimento ile ikameli kullanılan ATT ve kireç içerikli RPB'un ise en yüksek basınç dayanımı 124,99 MPa; en yüksek eğilme dayanımı 10,98 MPa bulunmuştur. Sonuçlara göre, RPB üretiminde karışımında kullanılan çelik lif maliyeti %78,16 oranında, çimento maliyeti ise %50 oranında azaltılarak RPB üretim maliyeti düşürülmüştür. Çalışmada, $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre, RPB yol kaplama kalınlığı 10,24 cm, BSK kaplama kalınlığı 19,00 cm ve C30/37 beton yol kaplama kalınlığı 23,04 cm olarak hesaplanmıştır. Maliyet olarak, en ekonomik RPB kaplamalı üstyapı maliyeti, Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) kaplamalı esnek üstyapı maliyetinden %42,64; C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyetinden ise %38,21 daha ekonomiktir.

2015, 203 sayfa

Anahtar Kelimeler: Beton Yol, Reaktif Pudra Beton (RPB), Kombine Kür, İgnimbirit, Ahlat Taşı Tozu (ATT), Basınç Deneyi, Eğilme Deneyi

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION ON THE USABILITY OF REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC) IN RIGID ROAD SUPERSTRUCTURE CONSTRUCTION

Abdulrezzak BAKIŞ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Transportation Department

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fatih HATTATOĞLU

In this study, the usability of Reactive Powder Concrete (RPC) in rigid pavements construction was examined. Different curing applications, primarily, was determined and then Ahlat Stone Powder (ASP) and industrial waste steel fibers were used to reduce cost of produced RPC. All of samples were subjected to pressure and flexural test. Cost comparison for determined optimum design was made by calculating thickness of pavements. On RPC samples, standard water curing, oven curing, autoclave curing and various other combined curing types developed were used and fiber and fiberless RPC was produced. Highest pressure and bending resistances were obtained in autoclave curing and from combined curing developed from the experiment results in the study 7 days 20°C standard water curing - 2 days 90°C hot water curing - 2 days 180°C oven combined curing. Highest pressure resistance of RPC's was found to be 171 MPa after autoclave curing and highest bending resistance was found to be 11,34 MPa after autoclave curing. With the aim of decreasing the RPC production costs, industrial waste steel fibers were used instead of normal fibers and also ASP and lime were used instead of cement. At the end of 20 different sample that produced for reducing cost, it was observed that the mixture providing highest pressure resistance and flexural strength consists of 50% cement, 29,4% ASP and 20,6% lime. As a result of the study highest pressure resistance of RPC's including industrial waste fiber was found to be 125 MPa and highest flexural strength was found to be 15,04 MPa for producing sample with industrial waste steel fibers. The highest pressure resistance of RPC's including ASP and lime was found to be 124,99 MPa and highest flexural strength was found to be 10,98 MPa. According to the results, the steel fiber cost used in the mixture during RPC production decreased by 78,16% and cement cost was decreased by 50% and accordingly the total cost of RPC production decreased. Thickness of RPC pavement, HMA pavement and C30/37 concrete were determined as 10.24 cm, 19 cm and 23.04 cm, respectively. In terms of cost, most economical RPC rigid pavement cost is 42,64% more economical compared to HMA flexible superstructure cost and is 38,21% more economical compared to cost of normal-strength C30/37 rigid pavement.

2015, 203 pages

Keywords: Concrete Road, Reactive Powder Concrete (RPC), Combine Curing, Ignimbrite, Ahlat Stone Powder (ASP), Compressive Test, Bending Test

TEŞEKKÜR

Çalışmanın her aşamasında emeği geçen, karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmeme yardımcı olan ve beni yönlendiren çok değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Fatih HATTATOĞLU'na teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Çalışmanın her aşamasında emeği geçen ve beni yönlendiren çok değerli hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA'ya teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen başta Bitlis Eren Üniversitesi Rektörlüğü ile teknik çalışmalarımızın belirli bir kısmını yönettiğimiz Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ercan IŞIK, Sayın Yrd. Doç. Dr. Nusret BOZKURT, Sayın Öğr. Gör. Mustafa ÜLKER, Sayın Öğr. Gör. Niyazi ÇOLAK ile diğer akademik ve idari personeline teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Çalışmalarda yardımcı olan Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği akademik personelleri Sayın Doç. Dr. Osman ÜNAL ve Sayın Arş. Gör. Erhan KARAMAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Çalışmalarda teknik destek çıkan Van gölü Yapı Kalite Kontrol Laboratuvarı İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti.'ye, malzeme desteği sağlayan Polipropilen Elyaf San. ve Dış Tic. Ltd. Şti. yönetimine teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Ayrıca, İksa Ltd. Şti. üretim müdürü Sayın Alev ÇANKAYALI'ya teknik ve malzeme desteğinden dolayı teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca yanımda olup destek çıkan merhum babam, annem, eşim ve çocuklarıma teşekkür ederim.

Abdulrezzak BAKIŞ

Aralık 2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Reaktif Pudra Beton (RPB)	4
1.1.1. RPB karışımında kullanılan malzemeler.....	7
1.1.1.a. Çimento	8
1.1.1.b. Silis dumanı.....	10
1.1.1.c. Kuvars kumu.....	12
1.1.1.d. Kuvars tozu (pudra).....	13
1.1.1.e. Çelik lif.....	14
1.1.1.f. Süperakışkanlaştırıcı	16
1.1.1.g. Su.....	18
1.1.2. RPB karışım oranları	18
1.1.3. RPB üretim yöntemleri.....	20
1.1.4. RPB mekanik özellikleri	23
1.1.5. RPB kullanım alanları	29
1.2. Yol Üstyapı Tipleri.....	34
1.2.1. Esnek üstyapılar	34
1.2.1.a. Yüksek standartlı esnek kaplamalar	35
1.2.1.b. Esnek kaplamaların tasarımı	36
1.2.1.c. Karayolu esnek kaplama tasarımı.....	39
1.2.2. Rijit (beton) üstyapılar.....	42
2. KAYNAK ÖZETLERİ	49
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	56
3.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler.....	58

3.1.1. Lifsiz RPB üretim malzemeleri	58
3.1.2. Lifli RPB üretim malzemeleri	60
3.2. RPB Karışım Oranları	65
3.2.1. RPB200 karışım oranları	66
3.2.3. Lifsiz RPB karışım oranları.....	73
3.2.4. Lifli RPB karışım oranları	74
3.2.5. Kontrol numunesi beton karışım oranları.....	74
3.3. RPB Üretim Yöntemi	76
3.3.1. Lifsiz RPB üretimi.....	76
3.3.2. Lifli RPB üretimi.....	77
3.3.3. Kontrol numunesi beton üretimi.....	79
3.4. RPB Kür Uygulamaları	80
3.4.1. Kontrol numunesi beton üretiminde standart su kürü uygulaması.....	81
3.4.2. RPB üretiminde standart su kürü uygulaması	81
3.4.3. RPB üretiminde etüv kür uygulaması	81
3.4.4. RPB üretiminde otoklav kür uygulaması	82
3.4.5. RPB üretiminde kombine kür uygulamaları.....	83
3.5. Basınç Deneyleri	84
3.6. Eğilme Deneyleri.....	85
3.6.1. Kontrol numunesi beton eğilme deneyi.....	87
3.6.2. Lifsiz RPB standart su kürü eğilme deneyi	88
3.6.3. Lifli RPB standart su kürü eğilme deneyi	88
3.6.4. Lifsiz RPB otoklav kür eğilme deneyi	88
3.6.5. Lifli RPB otoklav kür eğilme deneyi	89
3.6.6. Lifsiz RPB kombine kür eğilme deneyi	89
3.6.7. Lifli RPB kombine kür eğilme deneyi	90
3.7. RPB Kaplama Maliyet Düşürme Çalışmaları	90
3.7.1. RPB üretimde sanayi atığı çelik liflerin kullanılması	90
3.7.2. RPB üretimde volkanik kayaç tozlarının çimento ile birlikte kullanımı.....	93
3.8. Üstyapı Tabaka Kalınlık Hesap Yöntemi.....	101
3.8.1. Esnek üstyapı tabaka kalınlık hesap yöntemi.....	102
3.8.2. Rijit üstyapı tabaka kalınlık hesap yöntemi	103

3.9. Üstyapı Maliyet Hesap Yöntemi	107
3.9.1. Esnek üstyapı maliyet hesap yöntemi	107
3.9.2. Rijit üstyapı maliyet hesap yöntemi	109
3.9.2.a. C30/37 normal dayanımlı beton üstyapı maliyet hesap yöntemi	109
3.9.2.b. Lifsiz RPB üstyapı maliyet hesap yöntemi	111
3.9.2.c. Lifli RPB üstyapı maliyet hesap yöntemi	113
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	115
4.1. Basınç Deneyleri	115
4.1.1. Kontrol numunesi beton basınç deneyi	115
4.1.2. Lifsiz RPB standart su kürü basınç deneyi.....	115
4.1.3. Lifli RPB standart su kürü basınç deneyi	116
4.1.4. RPB etüv kürü basınç deneyi	117
4.1.5. RPB otoklav kürü basınç deneyi	118
4.1.5.a. Lifsiz RPB otoklav kürü basınç deneyi	118
4.1.5.b. Lifli RPB otoklav kürü basınç deneyi	119
4.1.6. RPB kombine kür basınç deneyi	121
4.1.6.a. Lifsiz RPB kombine kür basınç deneyi	121
4.1.6.b. Lifli RPB kombine kür basınç deneyi	122
4.1.7. Basınç dayanımı en yüksek kür tipinin belirlenmesi.....	123
4.2. Eğilme Deneyleri.....	125
4.2.1. Kontrol numunesi beton eğilme deneyi.....	125
4.2.2. Lifsiz RPB standart su kürü eğilme deneyi	126
4.2.3. Lifli RPB standart su kürü eğilme deneyi	126
4.2.4. Lifsiz RPB otoklav kür eğilme deneyi	126
4.2.5. Lifli RPB otoklav kür eğilme deneyi	127
4.2.6. Lifsiz RPB kombine kür eğilme deneyi	127
4.2.7. Lifli RPB kombine kür eğilme deneyi	127
4.2.8. Eğilme dayanımı en yüksek kür tipinin belirlenmesi	128
4.3. RPB Kaplama Maliyet Düşürme Sonrası Basınç ve Eğilme Deneyleri.....	131
4.3.1. Sanayi Atığı Çelik Lifli RPB basınç ve eğilme deneyleri.....	131
4.3.2. Ahlat Taşı Tozu (ATT) içerikli RPB basınç ve eğilme dayanımları.....	131
4.4. Üstyapı Tabaka Kalınlık Hesabı.....	134

4.4.1. Esnek üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	135
4.4.2. Rijit üstyapı kalınlık hesabı.....	135
4.4.2.a. C30/37 normal dayanımlı beton üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	135
4.4.2.b. Prefabrik lifsiz RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	136
4.4.2.c. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	136
4.4.2.d. Geleneksel lifsiz RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	137
4.4.2.e. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	137
4.4.2.f. Prefabrik normal lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	138
4.4.2.g. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik normal lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	138
4.4.2.h. Geleneksel normal lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	139
4.4.2.1. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel normal lifli RPB kaplamalı üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	139
4.4.2.i. Geleneksel sanayi atık lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	140
4.4.2.j. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel sanayi atık lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	140
4.4.2.k. Prefabrik sanayi atık lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	141
4.4.2.1. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik sanayi atık lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı.....	141
4.5. Üstyapı Maliyet Hesabı.....	144
4.5.1. Esnek üstyapı maliyet hesabı.....	144
4.5.2. Rijit üstyapı maliyet hesabı.....	145
4.5.2.a. C30/37 normal dayanımlı beton kaplamalı üstyapı maliyet hesabı.....	146
4.5.2.b. Prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı.....	147
4.5.2.c. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı.....	148
4.5.2.d. Geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı.....	150
4.5.2.e. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı.....	151
4.5.2.f. Lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesapları.....	155

5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	163
KAYNAKLAR	166
EKLER.....	
EK 1.	173
EK 2.....	182
EK 3.....	194
ÖZGEÇMİŞ	204

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A_c	Numunenin üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı
C_d	Drenaj Katsayısı
D	Kaplama tabaka kalınlığı
d_1	Numunenin en kesit yatay boyutu
d_2	Numunenin en kesit düşey boyutu
E_c	Beton kaplamanın Elastik Modülü
F	Taşıma Bedeli
f_c	Beton kaplamanın Basınç Dayanımı
f_{cf}	Eğilme Dayanımı
f_{ck}	Betonun Karakteristik Silindir Basınç Mukavemeti
f_{ctk}	Betonun Çekme Dayanımı
J	Yük Transfer Katsayısı
k	Yatak Katsayısı (Zemin Reaksiyon Modülü)
K	Taşıma Katsayısı
L	Eğilme deney cihazı mesnet silindirleri arasındaki açıklık
M	Taşıma Mesafesi
M_R	Esneklik Modülü
S_o	Toplam Standart Sapma
\emptyset	Donatı çapı
ΔPSI	Servis Kabiliyetinde Azalma Miktarı
P_o	Başlangıç Servis Kabiliyeti İndeksi
P_t	Nihai Servis Kabiliyeti İndeksi
R	Güvenilirlik Değeri
s	Gerilme Artış Hızı
S_c'	Betonun Kopma Modülü (Eğilmede Çekme Mukavemeti)
$W_{8,2}$	8,2 Ton Eşdeğer Tek-Dingil Yüğü Tekerrür Sayısı
w/c	Su/Çimento oranı
W_g	8,2 Ton Dingil Yüğü
Z_R	Standart Normal Sapma

Kısaltmalar

AASHTO	Amerikan Devlet Yolları ve Resmi Taşımacılık Birliği
AC	Asfalt Çimentosu
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
ATT	Ahlat Taşı Tozu
ATT-RPB	Ahlat Taşı Tozlu Reaktif Pudra Beton
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
C	Çimento
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
C-S-H	Kalsiyum-Silikat-Hidrat
ÇL	Çelik Lif
ÇTDB	Çelik Tel Donatılı Beton
ÇYDB	Çok Yüksek Dayanımlı Beton
ETTY	Eşdeğer Tekil Dingil Yükün Tekerrür Sayısı
GPa	Giga Paskal
HSC	Yüksek Dayanımlı Beton
HSFRC	Yüksek Dayanımlı Çelik Lifle Güçlendirilmiş Beton
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
MPa	Mega Paskal
NDB	Normal Dayanımlı Beton
RPB	Reaktif Pudra Beton
SA	Süperakışkanlaştırıcı
SB	Su Banyosu
SD	Silis Dumanı
SDY	Standart Dingil Yüğü
SFRC	Çelik Lifle Güçlendirilmiş Beton
TEF	Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UYPB	Ultra Yüksek Performanslı Beton
YDB	Yüksek Dayanımlı Beton
YOGT	Yıllık Ortalama Günlük Trafik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. RPB karışım işlemi süresince güç tüketimi	22
Şekil 1.2. Moment taşıma kapasitesi aynı farklı malzemelerden üretilmiş kiriş elemanları	25
Şekil 1.3. Normal harç, çelik tel donatılı beton ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun (RPB) eğilme davranışı	27
Şekil 1.4. RPB'un eğilme davranışı	28
Şekil 1.5. Normal harç ve lif katkılı RPB200'ün eğilme davranışı	29
Şekil 1.6. RPB kullanılarak üretilen Sherbrooke Köprüsü	30
Şekil 1.7. RPB kullanılarak yapılan yaya kaldırım elemanı	31
Şekil 1.8. RPB kullanılarak yapılan ankraj plakası.....	32
Şekil 1.9. RPB kullanılarak yapılan ses bariyeri.....	32
Şekil 1.10. RPB kullanılarak yapılan yağmur suyu ızgaraları	33
Şekil 1.11. RPB kullanılarak yapılan rögar kapağı.....	33
Şekil 1.12. Esnek kaplama tabakaları	35
Şekil 1.13. Dingil yüklerinin kaplamada meydana getirdiği düşey gerilme dağılımı ...	37
Şekil 1.14. Teker yükünden dolayı oluşan gerilmeler	38
Şekil 1.15. Yük ve tekerrür sayısının kaplama kalınlığına etkisi	39
Şekil 1.16. Rijit kaplama tabakaları	43
Şekil 1.17. Isı farkından dolayı rijit plakta oluşan gerilme durumu	44
Şekil 1.18. Beton plakta defleksiyon (çökme) oluşumu	44
Şekil 1.19. Beton plakta kritik yükleme noktaları	45
Şekil 1.20. Rijit kaplama yol enkesit tipleri.....	45
Şekil 1.21. Rijit plak köşe derz birleşimi	47
Şekil 3.1. Çalışma programı	57
Şekil 3.2. Slamp-w/c-dozaaj ve w/c-mukavemet ilişkisi.....	62
Şekil 3.3. C30/37 NDB kontrol numunesi elek analiz grafiği	65
Şekil 3.4. Orta noktadan yüklemeli deney numunesi yükleme düzeneği	86
Şekil 4.1. Lifsiz RPB standart su kuru basınç deney sonuçları	116
Şekil 4.2. Lifsiz RPB etüv kuru basınç deney sonuçları.....	117

Şekil 4.3. Lifsiz RPB otoklav kürü basınç deney sonuçları.....	119
Şekil 4.4. Lifli RPB otoklav kürü basınç deney sonuçları.....	120
Şekil 4.5. Lifli ve lifsiz RPB otoklav kürü basınç deney sonuçları	120
Şekil 4.6. Değişik kürlerde Lifsiz RPB maksimum basınç dayanımları.....	123
Şekil 4.7. Değişik kürlerde lifli RPB maksimum basınç dayanımları	124
Şekil 4.8. Değişik kürlerde lifli ve lifsiz RPB maksimum basınç dayanımları	125
Şekil 4.9. Değişik kürlerde lifsiz RPB maksimum eğilme dayanımları	128
Şekil 4.10. Değişik kürlerde lifli RPB maksimum eğilme dayanımları	129
Şekil 4.11. Değişik kürlerde lifli ve lifsiz RPB maksimum eğilme dayanımları.....	130
Şekil 4.12. Üstyapı kaplama kalınlıklarının karşılaştırılması	143
Şekil 4.13. BSK-C30/37-lifsiz RPB üstyapı maliyet karşılaştırması ($W_{8,2}=10 \times 10^6$) ...	153
Şekil 4.14. BSK-C30/37-lifli RPB üstyapı maliyet karşılaştırması ($W_{8,2}=10 \times 10^6$)	156
Şekil 4.15. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km BSK esnek üstyapı maliyeti	159
Şekil 4.16. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km C30/37 rijit üstyapı maliyeti	160
Şekil 4.17. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km geleneksel lifsiz RPB üstyapı maliyeti .	160
Şekil 4.18. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km prefabrik sanayi atık lifli RPB üstyapı maliyeti.....	161

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Tipik RPB 200 ve RPB 800 betonların çimentoya göre karışımın oranları	18
Çizelge 1.2. RPB200 ve RPB800’de kullanılan malzemeler ve miktarları	19
Çizelge 1.3. Reaktif pudra betonunda kullanılan tipik malzemeler ve miktarları	19
Çizelge 1.4. RPB numuneleri karışım oranı	20
Çizelge 1.5. RPB numunelerinin deney sonuçları	20
Çizelge 1.6. RPB ile YDB dayanıklılığının karşılaştırması.....	24
Çizelge 1.7. Normal, yüksek dayanımlı ve reaktif pudra betonların karşılaştırılması....	25
Çizelge 1.8. Aynı taşıma gücüne sahip elemanların RPB ile karşılaştırılması.....	26
Çizelge 1.9. Reaktif pudra betonun mekanik özellikleri-1	26
Çizelge 1.10. Reaktif pudra betonun mekanik özellikleri-2	26
Çizelge 1.11. RPB’nin mekanik özelliklerinin, normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile karşılaştırılması	27
Çizelge 1.12. RPB ile normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların dayanıklılık yönünden karşılaştırılması.....	29
Çizelge 1.13. Tavsiye edilen güvenilirlik değerleri	41
Çizelge 3.1. CEM II / A-M (P-L) 42,5 R çimento kimyasal özellikleri	58
Çizelge 3.2. CEM II / A-M (P-L) 42,5 R çimento fiziksel ve mekanik özellikleri	58
Çizelge 3.3. Silis dumanı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	59
Çizelge 3.4. Kuvars kumu fiziksel özellikleri.....	59
Çizelge 3.5. Kuvars pudrası fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	59
Çizelge 3.6. Polycar 300 süperakışkanlaştırıcı özellikleri	60
Çizelge 3.7. RPB üretiminde kullanılan çelik fiber teknik özellikleri.....	61
Çizelge 3.8. Tavsiye edilen slump değerleri	62
Çizelge 3.9. Beton basınç dayanımlarına göre yaklaşık su/çimento oranları	63
Çizelge 3.10. Beton sınıflarına göre karışım hesabında esas alınacak hedef basınç dayanımları ile deney numunelerinin sahip olması gereken ortalama basınç dayanımları.....	63
Çizelge 3.11. Normal agregalar için deney numunelerinin kütlesi.....	64

Çizelge 3.12. Tahmini karma suyu ihtiyacı ve hava miktarı	64
Çizelge 3.13. Kontrol Numunesi Elek Analizi	64
Çizelge 3.14. Çelik lifsiz ve pudrasız RPB200 karışım oranları	67
Çizelge 3.15. Çelik lifsiz ve pudralı RPB200 karışım oranları	68
Çizelge 3.16. Çelik lifli ve pudrasız RPB200 karışım oranları.....	69
Çizelge 3.17. Çelik lifli ve pudralı RPB200 karışım oranları.....	70
Çizelge 3.18. Kum agregalı RPB800 karışım oranları	72
Çizelge 3.19. Çelik agregalı RPB800 karışım oranları.....	73
Çizelge 3.20. Deneylerde kullanılan çelik lifsiz RPB200 karışım oranları	74
Çizelge 3.21. Deneylerde kullanılan çelik lifli RPB200 karışım oranları	74
Çizelge 3.22. Kontrol numunesi agrega ve çimento özellikleri.....	74
Çizelge 3.23. Kontrol numunesi beton karışım oranları	76
Çizelge 3.24. Basınç deneyi için laboratuvar çelik lifsiz-pudralı RPB karışım oranları ..	77
Çizelge 3.25. Eğilme deneyi için laboratuvar çelik lifsiz-pudralı RPB karışım oranları .	77
Çizelge 3.26. Basınç deneyi için laboratuvar çelik lifli-pudralı RPB karışım oranları	78
Çizelge 3.27. Eğilme deneyi için laboratuvar çelik lifli-pudralı RPB karışım oranları....	79
Çizelge 3.28. Basınç deneyi için laboratuvar kontrol numunesi beton karışım oranları ..	79
Çizelge 3.29. Eğilme deneyi için laboratuvar kontrol numunesi beton karışım oranları .	79
Çizelge 3.30. RPB üretiminde standart su kürü uygulaması	81
Çizelge 3.31. RPB üretiminde etüv kür uygulaması.....	82
Çizelge 3.32. RPB üretiminde otoklav kür uygulaması.....	83
Çizelge 3.33. RPB üretiminde kombine kür uygulaması.....	84
Çizelge 3.34. Sanayi atığı çelik lifli ve pudralı RPB karışım oranları.....	91
Çizelge 3.35. Basınç deneyi için sanayi atığı çelik lifli ve pudralı RPB karışım oranları.....	92
Çizelge 3.36. Eğilme deneyi için sanayi atığı çelik lifli RPB karışım oranları	92
Çizelge 3.37. Ahlat ignimbriti (Ahlat taşı) kimyasal analizi	93
Çizelge 3.38. Tüm karışım tiplerinde çimento, ahlat taşı tozu ve kireç yüzdeleri.....	95
Çizelge 3.39. Çimento, ATT ve kireç bağlayıcılı lifsiz-pudralı RPB karışım miktarları (kg/m ³)	95
Çizelge 3.40. Çimento, ATT ve kireç bağlayıcılı lifsiz-pudralı RPB karışım miktarları (gram)	96

Çizelge 3.41. Çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB karışım oranları.....	97
Çizelge 3.42. Basınç deneyi için çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB karışım oranları.....	97
Çizelge 3.43. Eğilme deneyi için çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB karışım oranları.....	98
Çizelge 3.44. Çimento oranı düşürülmüş normal lifli RPB karışım oranları	98
Çizelge 3.45. Basınç deneyi için çimento oranı düşürülmüş normal lifli RPB karışım oranları.....	99
Çizelge 3.46. Eğilme deneyi için çimento oranı düşürülmüş normal lifli RPB karışım oranları.....	99
Çizelge 3.47. Çimento oranı düşürülmüş sanayi atık lifli RPB karışım oranları.....	100
Çizelge 3.48. Basınç deneyi için çimento oranı düşürülmüş sanayi atık lifli RPB karışımı	100
Çizelge 3.49. Eğilme deneyi için çimento oranı düşürülmüş sanayi atığı lifli RPB karışımı	101
Çizelge 3.50. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ ve $R=\%85$ güvenilirlik için asfalt beton kaplamalı yol üstyapı kalınlıkları	103
Çizelge 3.51. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ ve $R=\%85$ güvenilirlik için asfalt beton kaplamalı yol alttemel kalınlığı.....	103
Çizelge 3.52. Tavsiye edilen yük transfer katsayıları-AASHTO 1993	105
Çizelge 3.53. Tavsiye edilen drenaj katsayıları-AASHTO 1993.....	105
Çizelge 4.1. Kontrol numunesi basınç deney sonuçları.....	115
Çizelge 4.2. Lifsiz RPB standart su kuru basınç deney sonuçları	115
Çizelge 4.3. Lifli RPB standart su kuru basınç deney sonuçları.....	116
Çizelge 4.4. RPB etüv kuru basınç deney sonuçları	117
Çizelge 4.5. Lifsiz RPB otoklav kuru basınç deney sonuçları.....	118
Çizelge 4.6. Lifli RPB otoklav kuru basınç deney sonuçları.....	119
Çizelge 4.7. Lifsiz ve Lifli RPB otoklav kuru basınç deney sonuçları.....	120
Çizelge 4.8. Lifsiz RPB kombine kür basınç deney sonuçları.....	121
Çizelge 4.9. Lifli RPB kombine kür basınç deney sonuçları.....	122
Çizelge 4.10. Lifli ve lifsiz RPB kombine kür basınç deney sonuçları	122
Çizelge 4.11. Değişik kürlerde lifsiz RPB maksimum basınç dayanımları.....	123

Çizelge 4.12. Değişik kürlerde Lifli RPB maksimum basınç dayanımları.....	124
Çizelge 4.13. Kontrol numunesi eğilme deney sonuçları	125
Çizelge 4.14. Lifsiz RPB standart su kürü eğilme deney sonuçları.....	126
Çizelge 4.15. Lifli RPB standart su kürü eğilme deney sonuçları.....	126
Çizelge 4.16. Lifsiz RPB otoklav kür eğilme deney sonuçları	126
Çizelge 4.17. Lifli RPB otoklav kür eğilme deney sonuçları	127
Çizelge 4.18. Lifsiz RPB kombine kür eğilme dayanımları	127
Çizelge 4.19. Lifli RPB kombine kür eğilme dayanımları	127
Çizelge 4.20. Lifsiz RPB eğilme dayanımları	128
Çizelge 4.21. Lifli RPB eğilme dayanımları.....	129
Çizelge 4.22. Lifsiz ve lifli RPB basınç-eğilme dayanımları	130
Çizelge 4.23. Sanayi atığı çelik lifli RPB standart su kürü basınç ve eğilme deney sonuçları	131
Çizelge 4.24. Sanayi atığı çelik lifli RPB kombine kür basınç ve eğilme deney sonuçları	131
Çizelge 4.25. Çimento, ATT ve kireç bağlayıcılı lifsiz RPB basınç deneyi.....	132
Çizelge 4.26. Çimento oranı düşürülmüş RPB basınç ve eğilme deney sonuçları	134
Çizelge 4.27. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerlerine göre esnek üstyapı kalınlıkları	135
Çizelge 4.28. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre üstyapı kaplama kalınlıkları (cm).....	142
Çizelge 4.29. BSK üstyapı tabaka cinslerine göre birim fiyatlar ($W_{8,2} = 10 \times 10^6$)	144
Çizelge 4.30. 1 km uzunluktaki esnek üstyapı toplam maliyeti ($W_{8,2}=10 \times 10^6$)	145
Çizelge 4.31. Donatılı-derzsiz rijit üstyapı (C30/37) tabaka cinslerine göre birim fiyatlar	146
Çizelge 4.32. 1 km uzunluktaki donatılı-derzsiz rijit üstyapı toplam maliyeti ($W_{8,2}=10 \times 10^6$).....	147
Çizelge 4.33. Prefabrik lifsiz RPB tabaka cinslerine göre birim fiyatlar	147
Çizelge 4.34. 1 km uzunluktaki prefabrik lifsiz RPB üstyapı toplam maliyeti	148
Çizelge 4.35. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB tabaka cinslerine göre birim fiyatlar	149
Çizelge 4.36. 1 km uzunluktaki çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB üstyapı toplam maliyeti	150
Çizelge 4.37. Geleneksel lifsiz RPB tabaka cinslerine göre birim fiyatlar.....	150

Çizelge 4.38. 1 km uzunluktaki geleneksel lifsiz RPB üstyapı toplam maliyeti	151
Çizelge 4.39. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB tabaka cinslerine göre birim fiyatlar	151
Çizelge 4.40. 1 km uzunluktaki çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB üstyapı toplam maliyeti	152
Çizelge 4.41. BSK, C30/37, lifsiz RPB üstyapı maliyetleri	153
Çizelge 4.42. BSK, C30/37, lifli RPB üstyapı maliyetleri.....	155

1. GİRİŞ

Genel olarak karayolu üstyapıları; esnek ve rijit üstyapılar olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir (Ağar vd 1998). Beton yollar asfalt yollara nazaran bakım giderleri az ve daha uzun hizmet vermesi nedeniyle daha ekonomik çözümler sunmaktadır (Uçar 2002).

Beton yollar ile ilgili fikirselsel gelişimler 19. yüzyılın sonlarında başlamıştır. Beton yollar ilk olarak ABD'de uygulanmıştır. Hesaba dayalı olmayan bu yolların tasarımları, 1920 yılından sonra dikkate alınmaya başlamıştır. Alt zeminlerde problem oluşması nedeniyle daha sonra alt zeminleri olan yollar yapılmıştır. Modern tasarımlara 1933 yılından sonra başlamıştır. Beton otoyol şantiyeleri, askeri ve sosyal alanda kullanılmak üzere Almanya'da hız kazanmıştır. Almanya'dan sonra Belçika ve Fransa, beton otoyol inşasına başlamışlardır. 1960 ve 1970 yılları arasında ABD'de 70 000 kilometrelik beton yol tamamlanmıştır. ABD'de beton yol inşasında görülen bu gelişmeler daha sonra Almanya, Belçika ve Japonya'da görülmüştür. Beton yolların zamanla teknolojik değişim geçirmesi sonucu günümüzde beton yollar asfalt kaplamalara rakip olarak görülmüştür (Arslan 2007).

Esnek üstyapı asfalt kaplama inşasında, bitüm malzemesinin ısıtılması sürecinde çevre kirliliğinin meydana geldiği bilinmektedir. Esnek üstyapılarda bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, özellikle iklimsel etkiler sonucu olumsuz olarak etkilenmekte ve zamanla bitüm içerisindeki çeşitli maddelerin oksitlenmeden dolayı özelliğini kaybetmesi sonucu asfalt kaplamada yaşlanma denilen kaplama için olumsuz bir oluşum görülmektedir. Bunun yanında benzin, motorin, yağ ve tuz gibi maddelerin kaplama yüzeyine bulaşması ile bitümün kimyasal yapısında değişimler görülebilmektedir. Bu nedenle asfalt kaplamalar sürekli bir bakım ve onarıma ihtiyaç duyar. Beton yollarda böyle bir sorun bulunmamaktadır. Bu üstün özelliklerinden dolayı rijit üstyapı beton yol kaplamaları, esnek üstyapı asfalt kaplamalarına nazaran daha iyi bir performans sergilemektedir (Taşdemir ve Ağar 2002).

Rijit üstyapı, bir alt temel ve üzerine yapılan beton kaplamadan oluşmaktadır. Rijit üstyapı tasarımında amaç, üstyapıdaki tabaka kalınlıklarını ve üstyapıda kullanılan malzemelerin özelliklerini belirlemektir (Bayrak 2007).

Ülkemizde beton kaplamalı yollar deneme amaçlı Afyon ilinde yapılmakla birlikte havaalanlarında pist ve benzeri yapılarda, terminallerde yükleme, boşaltma ve otopark sahalarında, kısmen şehir içi yol ve benzeri yerlerde rijit kaplamaların yapımı hızla yaygınlaşmaktadır. Ülkemizde her geçen gün artan ticari taşıt sayıları göz önüne alınarak gelecekte yol üstyapısı olarak rijit (beton) kaplamaların yaygınlaşacağı tahmin edilmektedir. Reaktif Pudra Beton (RPB) kullanarak rijit kaplama maliyetlerinin düşürülmesiyle, ülkemizde kısa zamanda rijit kaplamaların kullanımının yaygınlaşacağı beklenmektedir. Ticari taşıtların son yıllarda hızla artması sonucu mevcut esnek kaplamaların aşınma tabakaları kısa bir zaman içerisinde deformasyona uğramaktadır. Esnek kaplamaların bakım maliyetleri yüksek olduğundan bu durum ekonomik sorunları da beraberinde getirmektedir. Petrol kaynaklarının hızla tükenmesi sonucu esnek yol üstyapılarında kullanılan asfalt her geçen gün daha pahalı olmakta ve petrol kaynaklarının tükenmesi durumunda yakın zamanda asfalt malzemesinin ülke ihtiyaçlarını karşılayamaz duruma geçeceği düşünülmektedir. Bu nedenle yakın gelecekte ülkemiz dâhil birçok ülkede rijit yol uygulamalarına geçeceği düşünülmektedir.

Geleneksel beton kaplamalar donatısız, kısmen donatılı veya sürekli donatılı olarak yapıldığı gibi öngermeli olarak da inşa edilebilmektedir. Bu çalışmada, yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip RPB'un rijit kaplamalara uygulanmasıyla, yol kaplamalarında donatı kullanımına gerek kalmayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, basınç ve eğilme dayanımı bakımından normal dayanımlı betonlara nazaran üstün özelliklere sahip olan RPB üretiminde tamamen yerli malzeme kullanılması, yol üstyapı inşası bakımından asfalt kaplamalara nazaran dışa bağımlılığı azaltarak ekonomik kazanç sağlamaktadır.

RPB üretiminde maliyeti artıran en önemli iki malzeme çimento ve çelik liflerdir. RPB maliyet düşürme çalışmalarında, karışımda kullanılan çimento miktarını düşürmek amacıyla, çimento ile birlikte ikameli olarak Ahlat Taşı Tozu (ATT) ve kireç kullanılmıştır. Lifsiz RPB’lerde çelik lif kullanılmamaktadır. Lifli RPB’lerde ise çelik lif kullanılmaktadır. Lifli RPB üretimindeki en pahalı malzeme çelik liflerdir. Çalışmada, lifli RPB karışımlarda normal fabrikasyon ürünü çelik lifler yerine sanayi atığı çelik lifler de kullanılarak lifli RPB üretim maliyeti düşürülmüştür.

Çalışmada ATT ve kireç içerikli RPB üretimi (ATT-RPB) geliştirilmiştir. ATT-RPB üretimleri çelik lifsiz, normal çelik lifli, sanayi atığı çelik lifli olarak farklı tiplerde yapılmıştır. Standart su kürüne alınan tüm RPB üretimler “geleneksel RPB”, kombine kür gibi yüksek ısı işlemlere alınan üretimler ise “prefabrik RPB” olarak isimlendirilmiştir. Geleneksel üretim denilmesindeki amaç bu tip RPB’ların yol inşaat sahasında üretilebileceğini belirtmek içindir. Yüksek ısı işlem gerektiren RPB üretimleri ise yol inşaat sahasında üretilemediklerinden fabrikada önceden üretilerek inşaat sahasına taşındığından prefabrik üretim olarak isimlendirilmiştir. Çalışmada ATT-RPB üretimlerine “çimento oranı düşürülmüş RPB” ismi verilmiştir. ATT-RPB üretimlerinden standart su kürüne alınan tiplere “çimento oranı düşürülmüş geleneksel RPB” denilmiştir. Kombine kür gibi yüksek ısı işlemine alınan ATT-RPB üretimleri ise “çimento oranı düşürülmüş prefabrik RPB” olarak isimlendirilmiştir. İçerisindeki lif durumuna göre, lifsiz ATT-RPB, normal çelik lifli ATT-RPB ve sanayi atığı çelik lifli ATT-RPB gibi farklı isimlendirmeler yapılmıştır. Örneğin ATT-RPB üretimi standart su kürüne alınmış ve içerisinde lif yoksa bu karışıma “çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB” denilmiştir. RPB üretimlerinde kalıplardan çıkarılan Kombine kür; standart su kürü, sıcak su kürü ve etüv kürü gibi değişik kür tiplerinin aynı numuneye uygulandığı bir kür tipidir. Çalışmada RPB numunelere farklı günlük standart su kürü, farklı saatlik etüv kürü, farklı saatlik otoklav kürü, farklı günlük kombine kür tipleri uygulanmıştır. Kombine kür tipinde 9 farklı kür tipi geliştirilerek maksimum basınç ve eğilme dayanımını veren kür tipi belirlenmiştir. Tüm RPB numunelerin basınç ve eğilme dayanımları deneysel olarak elde edilmiş, yol üstyapı kalınlık ve maliyetleri ise hesaplama yöntemiyle yapılarak, RPB yol üstyapıları hem

kendi aralarında hem de eşit trafik yükü altında C30/37 normal dayanımlı beton kaplamalı üstyapı ve BSK kaplamalı esnek üstyapı ile karşılaştırılmıştır. C30/37 normal dayanımlı beton, kontrol numunesi olarak seçilmiştir.

RPB'lerin basınç ve eğilme dayanımlarının normal dayanımlı betonlara nazaran yüksek olmasından dolayı, rijit kaplamalarda kullanılmasıyla geleneksel beton kaplamalara nazaran çok daha az bir kaplama kalınlığında inşa edilebilirler. Bu çalışmada, yüksek basınç ve eğilme dayanımlı RPB'lerin rijit yol kaplamalarında kullanılmasıyla, beton yol kaplama kalınlığını azaltarak rijit yol yapım maliyetini düşürmek amaçlanmıştır.

1.1. Reaktif Pudra Beton (RPB)

Reaktif Pudra Beton (RPB) beton tipleri içerisinde en yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip, genellikle çimento, silis dumanı (SD), kuvars kumu, kuvars tozu (pudrası), çelik lifler, su ve süperakışkanlaştırıcılar ile özel kürler uygulanarak oluşturulan ultra yüksek performanslı bir beton olarak tanımlanabilir.

Beton, ince ve iri agrega, çimento, su ve katkı maddelerinin karıştırılmasıyla elde edilen, başlangıçta şekil verilebilen, zamanla sertleşerek mukavemet kazanan yapı malzemesidir (Akman Pek ve Akman 2012; Dal vd 2013). Beton üzerine yapılan birçok çalışmalar sonucu, çimento içerikli malzemeler ile yüksek mekanik performans kazanılması hedeflenmiştir. Hedeflenen performans için yapılan çalışmalar sonucunda, Yüksek Dayanımlı Betonlar (YDB), Çok Yüksek Dayanımlı Betonlar (ÇYDB), Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UYPB) ortaya çıkmıştır (Aitcin 2000; Taşdemir vd 2004). Betona lifler katılarak geleneksel kür işlemlerinin dışında özel kürler uygulanarak Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UYPB) üretilmiştir. Bu beton sınıfında bulunan betonlardan birisi de RPB'dur. Yapımında kullanılan malzemeler ve puzolanik aktiviteden dolayı RPB ismi verilmiştir. Pudra kelimesi, RPB'yi oluşturan malzemelerin pudra tane boyutunda olmasından, reaktiflik kelimesi, puzolanik aktivitenin sıcak kür işlemi ile yeniden tekrarlamasından ve beton kelimesi ise diğer betonlar gibi çimento matrisli olmasından dolayı gelmektedir (İpek 2009).

RPB; çelik liflerle güçlendirilmiş, çok düşük w/c oranında, çimento, ince öğütülmüş kuvars kumu ve pudrasıyla, SD ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak oluşturulan basınç ve eğilme dayanımı yüksek kompozit bir malzemedir. Beton yapısındaki mikro boşluklar, kuvars kumu ve pudrası gibi karışımdaki çok ince agregaların kullanılması ile azaltılarak, betonun basınç ve eğilme dayanımlarında artış meydana gelmektedir. RPB’da tane çapının azaltılması ile geleneksel betonlarda kullanılan iri agrega tanelerinden dolayı meydana gelen beton içerisindeki boşluklar azaltılmıştır. Bu şekilde RPB porozitesi azalmakta donma ve çözülme etkilerine karşı dayanım artmaktadır. Geleneksel betonlar ile karşılaştırıldığında RPB’un en seçkin özelliği düşük boşluk miktarı ve çimento matrisindeki olumlu katkısıdır. RPB karışımında, dane çapı küçük agregaların kendisinden daha ince bir malzeme olan SD ile beraber kullanılması agrega ile çimento arasındaki mekanik özelliklerin iyileşmesine imkân vermektedir. Bu şekilde boşlukların azaltılarak beton sıklığının artması ile karışım suyunun azaltılmasına katkı sağlamaktadır. RPB’un dayanıklılığı, Yüksek Dayanımlı Betonlara (YDB) kıyasla daha üstündür (Dallaire *et al.* 1998). Reaktif pudra betonların üretim aşamasında; akışkanlaştırıcı katkıları, çelik lifler ve mineral katkıları gibi ek malzemeler ihtiyaç duyması sebebiyle, üretiminde titiz kalite kontrolü gerekmektedir. Bu yüzden yerinde imalattan ziyade, prefabrik tesislerde, laboratuvar ortamında kontrollü üretimi sağlanabilecek bir malzemedir. Basınç dayanımları yanında çekme, eğilme ve tokluk değerlerinin yüksek olması aynı yük altında daha küçük kesitlerle yapı tasarımına imkân verdiği gibi, deprem sonrası yapıların iyileştirmelerinde, güçlendirmelerinde RPB, yakın gelecekte kullanım alanı bulacak bir malzemedir (Karabulut 2006).

Reaktif Pudra Beton, YDB’ya kıyasla dayanım olarak 2 ile 4 kat daha fazla dayanıma sahiptir. RPB, oldukça düşük geçirimsizliğe sahip, sünek, iyileştirilmiş mekanik ve fiziksel özelliklere sahip, ultra yüksek dayanımlı kompozit bir malzemedir (Dallaire and Aitcin 1998).

60 ile 120 MPa arası çok yüksek dayanımlı betonların inşaat sektöründe uzun zamandır kullanıldığı bilinmektedir. Betonda w/c oranının düşürülmesi ve karışımda SD ile süperakışkanlaştırıcının kullanılması sonucu bu yüksek mekanik özellikler

kazanılmaktadır. Bu şekilde betonun porozitesini düşürmek ve beton dayanımını artırmak mümkün olmaktadır. RPB'a uygulanan düşük buhar basıncı kürü (90°C), katılaşma sonrası SD'nin puzolanik etkisi hızlanarak güçlü hidrat yapının oluşumuna katkı sağlamaktadır. Katılaşma sonrası sıcaklık kürü uygulanan RPB'da, %60-70 daha fazla dayanım sağlanmaktadır. Günümüz şartlarında prefabrik olarak 200 MPa dayanıma sahip betonlar üretilebilmektedir. Laboratuvar ortamında uygulanan 50 MPa ve 400°C sıcaklıktaki basınç kürü ile RPB'dan 500 MPa basınç dayanım sağlanmıştır (Richard and Cheyrezy 1994). Reaktif Pudra Beton, mikro yapı mühendisliği yaklaşımıyla özellikleri geliştirilmiş bir betondur (Reda *et al.* 1999).

RPB, inşaat sektöründe çelikle kıyas edilebilecek, YDB'lara alternatif olma potansiyele sahip bir betondur. RPB'un sünek kırılma sistemi, malzemeye doğrudan etki eden eğilme gerilmelerinin karşılanması için, karışımında donatı kullanılmasına gerek bırakmamaktadır. Kesit ağırlıklarının azalmasından dolayı hafifleyen yapı elemanları yapıya etkiyen deprem kuvvetlerinin azalmasına katkı sağlayarak, yapının deprem dayanımını artırmaktadır. RPB'da kullanılan kuvars kumu ve pudrası gibi ince kum normal betondaki kaba agreganın yerine, Portland çimentosu ince agreganın yerine ve SD çimentonun görevini üstlenmektedir (Topçu ve Karakurt 2005). RPB, özellikle yapı yükünün azaltılması ve yüksek dayanımın gerektiği yerlerde kullanılmalıdır (Sadrekarimi 2004). Bu şekilde yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip RPB üretimiyle beton yol, kolon, kiriş ve döşeme gibi yapı eleman kesit boyutları düşürülerek daha hafif yapılar oluşturulmakta, böylece yapıya etkiyen deprem kuvvetleri azalarak yapının deprem direnci artırılmış olmaktadır (Grassl *et al.* 2010).

RPB üretiminde sıkı tane yerleşimi hedefiyle agrega gradasyonu seçilebildiği gibi, kesikli granülometri işlenebilirlik artışı açısından önerilebilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde RPB tasarımlarında agrega hacminin genellikle %30 ila %50 aralığında olduğu, maksimum tane çaplarının ise sıklıkla 1 mm'nin altında olduğu fakat 3 mm'yi aşan uygulamaların da olduğu görülmektedir (Collepari *et al.* 1997; Ünsal ve Şen 2008; Yazıcı *et al.* 2008).

RPB'lar çok düşük w/c oranına sahip, yüksek oranda bağlayıcı ve pudra içeren, kısa kesilmiş çelik teller ile süneklik iyileştirmesi yapılmış ultra yüksek dayanımlı betonlardır. Kompakt yapısı sayesinde su ve zararlı solüsyon geçirimsizliğinin düşük olduğu bu kompozit, kalıcılığı açısından da yüksek performanslı olarak nitelendirilmektedir. Agreganın hacminin artışıyla işlenebilirlik ve büzülme azalmaktadır. Buhar küre basınç dayanımları açısından, su küre eğilme dayanımları açısından daha başarılıdır. Isıl işlem etkisiyle eğilme yükleri altında dayanım düşüren mikro çatlak oluşumu gerçekleşebilmektedir. Agreganın hacmi artışı eğilmede çatlak hassasiyetini azaltmaktadır. Agreganın hacmi artışı ile RPB'nin erken yaş bünyesel ve kuruma büzülme, ayrıca uzun dönemli büzülme önemli oranda kısıtlanmaktadır. %48 agreganın hacmine sahip karışımlarda basınç ve eğilme dayanımları açısından en iyi performans sağlanmıştır (Yalçınkaya ve Yazıcı 2011). Beton içerisinde liflerin bulunması yapılarda dayanıklılık, süneklik, dayanım ve çatlak kontrolünü sağlamaktadır. Lif olarak, cam, polipropilen, karbon, asbest ve çelik malzemeler kullanılabilir. Çelik lifler yüksek enerji yutabilmek amacıyla tercih edilirken, polipropilen lifler betonda rötre önleme amacıyla kullanılmaktadır. Karışımda hacimce %0,5-%2 çelik lif kullanılabilir. Lifli betonların tasarımı geleneksel betonlara nazaran farklılık gösterir. Çelik lifli betonlarda işlenebilirlik en fazla dikkat edilmesi gereken konulardan biridir (Yiğiter 2002). Genel olarak RPB'lar lifli ve liffsiz olmak üzere tasarlanmaktadır. RPB üretiminde maliyeti artıran en önemli iki malzeme çimento ve çelik liflerdir. RPB üretiminde çimento miktarının azaltılması ve çelik lif yerine sanayi atığı çelik lifler gibi benzer özellikte liflerin kullanılması yoluyla, RPB üretim maliyeti düşürülebilir.

1.1.1. RPB karışımında kullanılan malzemeler

RPB'de kullanılan malzemeler genellikle, çimento, silis dumanı, yüksek dayanıma sahip kuvars kumu ve tozu (pudrası), çelik lif, su ve süperakışkanlaştırıcılardır.

1.1.1.a. Çimento

Başlangıçta ince halde olan, su eklendiğinde hamur halini alan, zamanla sertleşerek suda çözülmeyen malzemelere bağlayıcı malzeme denir. Bu malzemelerin kullanımı çok eski tarihlere kadar dayanır. Bağlayıcılar arasında en çok kullanılanlar yağlı kireç, çimento ve alçıdır. Çimento 19. yüzyılda bulunmadan önce bağlayıcı malzeme olarak toprak ve kireçtaşı karışımları, farklı kireç ve alçılar, pişmiş kil ve diğer bağlayıcılar (volkanik tüfler, tras, zeolit, diatomit ve doğal topraklar) kullanılmıştır (Dal 2013). Su altında sertleşebilme özelliği gösteren malzemelere hidrolik bağlayıcı denir. Bu bağlayıcıların kullanımı 2300 yıl öncesine Helenistik devirlere rastlamaktadır. Napoli yakınlarındaki Pozzuoli kasabasında Vezüv yanardağından gelen küllerden oluşan bu toprağın kireç ile karıştırıldığında sade kireç harcından daha üstün olduğu Romalılar tarafından keşfedilmiştir (Baradan vd 2012). Milattan önce Roma imparatorluğu döneminde, Romalılar o ünlü tarihi yapılarını, puzolanik doğal maddeyi öğütüp sönmüş kirece katarak kullanmak suretiyle inşa etmişlerdir. Çünkü doğal halinde birleştirici olmayan bu madde, çok ince öğütülüp kireçle sulu ortamda karıştırılarak büyük bir hidrolik özellik göstermektedir. Böylece yontulmuş taşlar arasına yapılan bu bileşim, çimento gibi katılaşmakta ve arasına girdiği elemanları birbirine bağlamaktadır. Kullanıldığı en eski tarih M.Ö. 2000 yılları, yeri ise Romalıların Ren nehri boyunca inşa ettikleri su kanallarıydı (Önem 2000).

Puzolanik madde gibi, kendi başına bağlayıcı özellik göstermeyen ancak çok ince öğütülmüş haliyle kireç ile karıştırıldığında, sulu ortamda bağlayıcı özellik kazanan doğal veya yapay katkı maddelerine puzolanik katkı denir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve SD yapay mineral katkılardır. Tras ve volkanik cüruf gibi katkılar ise doğal mineral katkılardır. Ülkemiz standartlarına göre çimento katkısı olarak da kullanılan tras TS 25'e uygun olmalıdır. Proklastik kayalar ve çökeltim alanları, volkanik patlamayla oluşan malzemelerin kırıntılı ürünlerle beraber tümüyle sıkışmasıyla oluşur. Proklastik depolanmalar çimentolanmamış proklastik malzeme içerir. Ponza bakımından zengin proklastik akıntılar ignimbrit olarak isimlendirilir (Karaman ve Kibici 2008).

İgnimbrit, içerisinde yüklü pumis barındıran, az miktarda litik parça içeren, volkanik camsı, yüksek sıcaklıkta yerçekimi kontrolünde akan laminar akış sistemli proklastik akma birimidir. Ahlattaşı (ignimbrit) yöresel ismiyle, konut inşasından cami minaresine değişik yapılarda kaplama malzemesi ve duvar olarak kullanılmıştır (Şimşek ve Erdal 2004). Sünger taşları çimento inceliğinde öğütüldükten sonra çimento veya kireç ile karıştırıldığı zaman bağlayıcı bir özellik kazanır. Bu tip volkanik kayalara tras veya puzolan adı verilir (Ünsal 2006).

Taneli volkanik kayalar, yüksek gaz basıncına sahip volkanik patlamalar ile oluşur. Oluşan bu ürünlerden birisi proklastik kayalardır (Gevrek ve Kazancı 1991; Erguvanlı 1994; Şimşek ve Erdal 2004). Proklastikler, volkan bacasından çıkan malzemenin, rüzgâr ve volkanik mekanizma ile birbirlerine 500-600°C'nin üstünde sıcaklık ile kaynarak yapışması veya camsı malzeme taneciklerinin zeolit gibi mineraller ile bağlanması sonucu meydana gelen kayalardır (TS5694 1988; Şimşek ve Erdal 2004).

İgnimbritler, geniş alanlara yayıldıklarından dolayı kalınlıkları fazla değildir. Volkan kaynağından uzaklaştıkça, ignimbrit kalınlığı 10 ile 100 cm arasına kadar düşmektedir. Pümis içeriği bakımından zengin proklastik tortullara, ignimbrit yaygıları denilmiştir (Gevrek 2003; Şimşek ve Erdal 2004).

Nemrut volkanından çıkan lavlardan, çevreye yaklaşık 100 km³ hacminde proklastik malzeme yığıldığı ve yayılan bu malzemenin farklı kalınlıkta ignimbritler şeklinde olduğu, proklastik malzemenin trakit, tuf, siyah ve gri obsiyenlerden oluştuğu Ercan vd (1990) ile Aydar *et al.* (2003) tarafından belirtilmiştir.

Bitlis ili Ahlat ilçesinde önemli miktarda rezerve sahip, yöresel ismiyle Ahlattaşı olarak bilinen ignimbritler, geçmişte bölgede bulunan Nemrut kraterinin patlamasıyla oluşan volkanik lavların bölgeye yayılıp soğumasıyla meydana gelen proklastik kayalardır. Çok eski zamanlardan beri özellikle Ahlat bölgesi Selçuklu mimarisinde yoğun bir şekilde kullanılan ignimbritler (Ahlattaşı), günümüzde de bölge insanı tarafından kullanılmaya devam etmektedir (Bakış vd 2014).

Ahlat Taşı (AT), doğal halde basınç ve eğilme dayanımı düşük olduğundan inşaat alanında kullanım alanı sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada çimento ile birlikte Ahlat Taşı Tozu (ATT) ve kireç kullanarak RPB üretiminde yeni bir tip geliştirilmiştir. ATT ve kirecin çimento ile birlikte karıştırılmasıyla beton üzerinde önemli bir bağlayıcı etkisi olduğu görülmüştür.

Genel olarak TS EN 197-1 standartlarında, CEM I-II 42,5-52,5 R türü çimentolar ile basınç dayanımı aynı ve ya daha yüksek diğer hidrolik bağlayıcılar Reaktif Pudra Beton (RPB) üretiminde kullanılabilir. RPB üretiminde maliyeti düşürmek amacıyla çimento ile birlikte belirli oranlarda silis dumanı yanında puzolanik kayaç tozları gibi bağlayıcı özelliğe sahip diğer malzemelerin de kullanılabilmesi mümkündür. Çalışmada çimento ile ikameli olarak Ahlat Taşı Tozu (ATT) ve kireç kullanarak RPB üretiminde yeni bir tip geliştirilmiştir. Bu şekilde üretilen RPB numunelerin basınç ve eğilme dayanımları yüksek çıkmış ve üretimde m³ başına düşen çimento miktarı azaltılarak RPB üretim maliyeti düşürülmüştür.

1.1.1.b. Silis dumanı

Silis dumanı (SD), agrega ve çimento arasındaki boşlukları doldurarak daha homojen bir mikro yapı yapının oluşumuna katkı sağlar. Bu etkisinden dolayı daha yoğun ve kararlı oluşuma destek sağlayarak betonun mekanik performansını artırır.

SD, silisyum alaşımlarının ergime metoduyla üretiminden oluşan, temel bileşeni 1 µm'den küçük, camsı silis (SiO₂) parçacıklarından oluşan, küresel yapıda, yüksek seviyede puzolanik aktiviteli bir yan üründür. Silikonlu metal alaşımların oluşturulması sırasında meydana gelen gazın hızlı bir şekilde soğutulup yoğunlaştırılması neticesinde üretilen ve %85 ile %98 arasında silis barındıran, amorf yapılı çok ince katı parçacıklardan meydana gelen malzemeye SD ismi verilmektedir (Tohumcu ve Bingöl 2013). Ultra ince bir malzeme olan SD'nin, karışımda ince taneli agrega ile beraber kullanılması, agrega ve çimento arasındaki temas alanını artırarak mekanik özelliklerin iyileşmesine imkân sağlamaktadır (Dallaire *et al.* 1998). Betonda en zayıf halka,

çimento hamuru ve agrega arasındaki temas yüzeyidir. Beton yoğunluğunun ve dayanımının artırılması, beton içerisindeki boşlukların azaltılması için SD gibi ultra incelikte malzemenin kullanılması önem taşımaktadır. SD taneleri, RPB üretiminde çimento tanelerinin arasına girerek boşlukları kapatır, hidrasyon sırasında pozolanik reaksiyon ile betonun mukavemetinin artırılmasına katkı sağlar. Mikro yapıda SD'nin çimento ile hidrasyonu, betonun matris iskeletini daha da güçlendirmektedir (Taşdemir vd 2005; Karabulut 2006). RPB'de SD kullanılması ile mikro boşlukların azaltılması hedeflenmektedir (Roux *et al.* 1996).

RPB oluşumunda, CaOSiO_2 miktarının silisli malzemelerin kullanılması yoluyla azaltılması neticesinde RPB, performansı yüksek bir malzeme olarak karşımıza çıkar (Taşdemir vd 2004). 90°C 'de uygulanan düşük buhar basıncı kuru ile priz sonrası SD'nin pozolanik etkisi hızlanarak RPB'da hidrat yapının güçlenmesine yardımcı olmaktadır (Richard and Cheyrezy 1994). SD, ferrosilisyum (demirli silisyum) üretimi sırasında atık olarak oluşan şeffaf, şekilsiz, %85 ile %98 arası SiO_2 küreciklerinden meydana gelen bir mineraldir. Küresel parçacıkların büyüklüğü ortalama $0,5 \mu\text{m}$ 'nin altındadır (İpek 2009).

Tipik olarak SD/çimento oranı 0,25'dir. Bu oran ve tane boyutu, en uygun boşluk performansı ile de uyumaktadır. Bu değer çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan kirecin tamamen tüketilmesi için gerekli olan dozaja da çok yakındır (Richard and Cheyrezy 1994, 1995; İpek 2009).

SD, porozitenin daha fazla olduğu ve Ca(OH)_2 kristallerinin biriktiği agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde aderansı arttırarak, dayanımı ve dayanıklılığı daha yüksek olan bir içyapı oluşturur. Bu özeliği sayesinde yüksek dayanımlı yapıların uzun süreli performanslarında sağladığı üstünlükler nedeniyle tercih edilen bir malzeme olmaktadır (Richard and Cheyrezy 1994). RPB üretiminde en uygun SD içeriği %20 ve %30 arasındadır (Chan and Chu 2004). RPB karışımında en uygun SD içeriği %25'dir (Talebinejad *et al.* 2004). RPB üretiminde %30 silis içeriğine kadar dayanımların arttığı, sonrasında artan silis, dayanımlarda düşürücü etki oluşturmaktadır (Houry

1992). Yoğun ince parçacıklara ve yüksek reaktiviteye sahip olan silis dumanı ile çok yüksek dayanımlı beton üretiminde süperakışkanlaştırıcılar katkı maddeleri kullanılmaktadır (Güneşli 2008).

1.1.1.c. Kuvars kumu

Reaktif Pudra Beton (RPB) üretiminde genellikle kuvars kumu kullanılmaktadır. Yüksek basınç dayanımına sahip diğer agregalar da RPB karışımlarında kullanılabilir. Basınç dayanımı düşük agregaların doğal halde ve ya kırma-öğütme suretiyle uygun boyutlarda oluşturulmasıyla (0,1-1 mm) RPB üretiminde kullanılması mümkündür. Volkanik kayalar da uygun boyutlarda elde edilerek RPB üretimde kullanılabilirler.

Agrega içeriği açısından kuvars tercih edilmesinin asıl sebebi sert malzeme olması, çimento ve agregaya temas yüzeyinin fazla olması, kolaylıkla temin edilebilmesi, ucuz fiyatı ve aktif silis içermemesidir. RPB’da çimento (80–100 µm) ile kaynaşmayı sağlamak için en fazla 600 µm, en az 200 µm tane boyutlu agregalar kullanılmaktadır (Richard and Cheyrezy 1995).

RPB karışımında ince agreganın kullanılması ile betondaki mikro boşluklar azaltılarak eğilme ve basınç dayanımlarında artış sağlanabilmektedir. Geleneksel betonlarda kullanılan agregaların birbirine değmesi neticesinde matris boyunca meydana gelen beton içerisindeki boşluklar, agreganın küçültülmesiyle ortadan kalkmaktadır. Bu şekilde betonun porozitesi azalmakta, donma ve çözülme gibi etkilerine karşı dayanımı artmaktadır (Dallaire *et al.* 1998a). Büyük agregaların beton karışımından çıkarılması, RPB’u performansı yüksek bir malzeme olarak ortaya çıkarmaktadır (Taşdemir vd 2004).

RPB’un düşük porozitesi, çapı 1 ile 500 µm arasında değişen tane büyüklüğüne sahip agregası ile gerçekleşmektedir. RPB agregası olarak genelde kırılmış kuvars kumu kullanılmaktadır. RPB üretiminde kullanılan agreganın tane çapları çimento tane çapına

yakındır. Bu şekilde, hidrasyondan etkilenmemiş çimento taneleri malzemenin dayanımına katkıda bulunur (Dugat *et al.* 1996).

RPB’da kullanılan agregaların, yüksek dayanımlı kuvars, silis ve bazalt gibi sağlam mineralojik yapıya sahip saflığı yüksek malzemeler olması gerekmektedir. Bu malzemeler sadece RPB’da değil aynı zamanda yüksek dayanımlı betonların vazgeçilmez malzemeleri olmuştur. Bu malzemelerin doğal olanları betonun su ihtiyacı açısından yararlı etkilere sahip olduğu için tercih edilirken, kırma taş olanlar ise, bağlayıcı pasta ile çok iyi bir ara yüz oluşturduğu için tercih edilmektedir. Sonuçta her iki tipte RPB’da kullanılabilir (İpek 2009). Geleneksel NDB’larda kullanılan agregaların basınç dayanımı ortalama 100 MPa iken, kuvars agregasının basınç dayanımı 180 MPa’a kadar çıkmaktadır. Kuvars agregası çok sert bir agrega olduğundan dolayı aşınma direnci yüksektir (Tunç 2007; Macit 2009).

1.1.1.d. Kuvars tozu (pudra)

RPB’da kullanılan agregalar, pudra ve kum olarak iki farklı tipte bulunmaktadır. Pudra malzeme 0–100 µm tane büyüklüğündeki malzemeleri kapsarken kum 100–2000 µm tane büyüklüğündeki malzemeleri kapsamaktadır (İpek 2009).

Reaktif Pudra Beton (RPB) üretiminde kuvars kum tanelerinin arasını doldurarak minimum boşluk oluşturmak, RPB yapısında gerek kum taneleri gerekse kum ile lifler arasında yüksek kohezyonu sağlamak amacıyla, RPB karışımında kırılmış kuvars kumunun öğütülmesiyle ya da doğal olarak elde edilen kuvars tozu (pudrası) kullanılabilir. Yüksek basınç dayanımına sahip diğer agregalar pudraları da RPB karışımlarında kullanılabilir. Basınç dayanımı düşük agregaların doğal halde veya kırma-öğütme suretiyle uygun boyutlarda oluşturulmasıyla RPB üretiminde pudra olarak kullanılması mümkün olabilir. Ayrıca volkanik kayaç tozlarının da uygun boyutlarda elde edilerek RPB üretiminde kullanılabilmesi mümkündür.

1.1.1.e. Çelik lif

Yüksek dayanımlı betonlar her ne kadar yüksek performansa sahip olsa da aşırı gevrek davranış gösterir. Reaktif Pudra Beton (RPB) üretiminde betonun çekme mukavemetini artırarak sünekliğini sağlamak amacıyla beton içerisine çelik lifler katılmaktadır. Maliyeti düşürmek amacıyla sanayi atığı çelik liflerin de RPB üretiminde kullanılması mümkündür.

RPB200 türü betonlarda kalıp içerisinde priz süresi boyunca ön sıkıştırma basınç uygulamasına gerek yoktur (Richard and Cheyrezy 1995; İpek 2009). RPB800 türü betonlarda ise kalıp içerisinde priz süresi boyunca ön sıkıştırma basıncı 50 MPa olmalıdır (Richard and Cheyrezy 1995).

Reaktif Pudra Betonlara ön sıkıştırma basıncı uygulanırsa basınç ve eğilme dayanımları daha yüksek çıkmakla birlikte, üretim aşamasında kalıpta yüksek basınç altında tutulan taze betonun priz süresi boyunca sıkışarak içerisinde lif etkisi gösteren farklı boyuttaki lifsel görünümdeki beton kütlelerinden dolayı, karışıma girecek çelik lif miktarı azaltılabilir.

Betonun çekme dayanımını artırmak için içerisine çelik, cam ve polipropilen lifler katılmaktadır. Lifler, betonun çekme ve eğilme dayanımını artırmaktadır (Çivici 2006).

ACI (1990), "Lifle Güçlendirilmiş Beton Tekniğinin Son Durumu" ile ilgili raporunda, cam, metalik, plastik ve doğal liflerle güçlendirilmiş Portland çimentolu betonların karıştırma, karışım oranları, yerleştirme ve uygulama teknikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Al-Tayyib and Al-Zahrani (1990a) çalışmasında; Betonun %0,2'si kadar (hacimce) Polipropilen lifinin karışımına eklenmesinin, betonun özelliklerini geliştirdiğini belirtmiştir. Al-Tayyib and Al-Zahrani (1990b) çalışmasında; sıcak hava ortamında kür

edilen bir betonda yüzey bozulmalarının, betona polipropilen lif eklenmesiyle gözle görülür bir şekilde yavaşladığını belirtmişlerdir.

Suhaendi *et al.* (2006) çalışmasında; ısıya maruz bırakılan lifle güçlendirilmiş yüksek dayanımlı betonun mekanik ve geçirimsizlik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, silindirik beton numuneleri 10°C/k hızla 400°C'ye kadar ısıya bırakılmıştır. Polipropilen ve çelik lifler beton karışımına eklenmiştir. Polipropilen lifle güçlendirilmiş yüksek dayanımlı betonda oluşan dayanım düşüklüğünün sebebi, beton içerisindeki liflerin eriyerek ve buharlaşarak özelliğini kaybetmesi olarak belirtilmiştir. Bu nedenle RPB üretiminde kullanılacak liflerin çelik malzemeden imal edilmesi gerekmektedir.

Song *et al.* (2005) çalışmalarında, naylon lifle güçlendirilmiş beton ile polipropilen lifle güçlendirilmiş betonun, fiber miktarı 0,6 kg/m³ olacak şekilde potansiyel dayanımı karşılaştırılmıştır. Polipropilen liften üretilen numunelerin ilk çatlak ve kırılma dayanımları naylon lifli beton numunelerden daha düşük çıkmıştır. Basınç ve çekme dayanımları ve Kırılma Modülü değerleri naylon lifli betonlarda, polipropilen lifli betona nazaran %6,3, %6,7 ve %4,3 daha yüksek çıkmıştır. Bunun yanında naylon lif katılmış karışımlarda, büzülme çatlağında azalmalar görülmüştür. Fiber lifler içerisinde betonun basınç ve eğilme dayanımını artıran en önemli lifin çelik lifler olduğu bilinmelidir.

Karışıma çelik liflerin eklenmesi, RPB'ü basınç ve eğilme dayanımı gibi performansı yüksek bir malzeme olarak karşımıza çıkarmaktadır. RPB içerisindeki çelik lif dağılımının yeterince homojen olması, eğilme dayanımında daha fazla artışa neden olmaktadır. RPB eğilme dayanımlarında, çelik liflerin eklenmesiyle 50–140 MPa arası yüksek değerler elde edilebilmektedir. Eğilme dayanımlarındaki değişim, eklenen çelik tellerin yüzdeleriyle orantılıdır (Taşdemir vd 2004).

Çok yüksek basınç dayanımlı bir matris üretilmesine rağmen süneklilik normal betonlardan daha iyi değildir. Tellerin katılması çekme dayanımı arttırır ve ayrıca

süneklik düzeyini yükseltir. Lifler RPB'un sünekliğinin arttırılması için katılmak zorundadır. Düzgün kancasız çelik fiberler 0,16 mm'lik bir çapta ve 6-13 mm uzunluğunda olan mikro boyuttaki lifler hacmin %1,5–6 arasında bir oranda karışıma ilave edilir. RPB için mekanik performans (basınç ve çekme gerilmesi) iyileştirilmesi, beton içerisinde rastgele dağılmış şekilde 3 mm'den daha kısa kesilmiş liflerin agrega olarak kullanılmasıyla elde edilir. Bu durumda basınç dayanımı artarken kırılma enerjisi azalmaktadır (Richard and Cheyrezy 1995; İpek 2009).

Zheng *et al.* (2013) çalışmalarında hacim içeriği %2 olan çelik liflerin RPB'da kullanılmasıyla basınç ve eğilme dayanımının yükseldiğini belirtmiştir.

1.1.1.f. Süperakışkanlaştırıcı

Beton karışımına eklenen katkı maddeleri, beton özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılır.

Süperakışkanlaştırıcı (SA); sabit kıvamda beton karışım suyunun yüksek oranda azaltılmasını sağlayan, betonun işlenebilirliğini kolaylaştıran bir beton katkı maddesidir. Süperakışkanlaştırıcılar özellikle Reaktif Pudra Beton (RPB) gibi yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı sayesinde çok düşük su/çimento oranında betonun işlenebilirliği sağlanmaktadır. RPB üretiminde süperakışkanlaştırıcı olarak Polycar-300 ve benzeri katkıları kullanılabilir.

SA'lar yüksek performanslı betonların gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. İri agrega yerine konulacak olan ince agregaların ve mikro yapının güçlendirilmesi adına ilave edilecek mikro silis gibi ince malzemelerin özgül yüzeylerinin fazlalığı sebebiyle su ihtiyacı artmaktadır. RPB su/bağlayıcı oranını düşük tutmak (yaklaşık %15) amacıyla sisteme SA katkı ilavesi gerekmektedir (Karabulut 2006).

Su azaltıcı katkıları, organik veya organik ve inorganik bileşenlerden oluşmakta ve betonda belli bir kıvam için gereken su miktarını azaltmak amacıyla kullanılmaktadır.

Azalan su miktarına bağı olarak bu katkılar, akışkanlaştırıcı veya SA olarak isimlendirilmektedir. Normal dozajlarda, akışkanlaştırıcılar karışım suyu miktarını %5-11 arasında, SA'lar ise %12 ve üzerinde azaltabilmektedir (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) 2002).

Su/bağlayıcı oranının azalmasıyla moleküler ağırlığı az olan katkılar daha fazla akışkanlık sağlamaktadır (Kim 2000). RPB'ların işlenebilirliği karışımda kullanılan SA ile sağlanmaktadır (Roux *et al.* 1996).

RPB'nın w/c oranının düşük olması işlenebilirlik için kimyasal katkı kullanılmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Yüksek dozajda SD kullanılması, hem taze betonun işlenebilirliğini azaltmakta, hem de gerekli su miktarını artırmaktadır. Bu durumda, SD'lı betonlarda, SA kullanımı gerekmektedir. SD tanelerinin yüzey alanlarının çok büyük olması, taze beton içerisindeki serbest suyun önemli ölçüde bağlanmasına ve bu suyun beton yüzeyine çıkmasının yavaşlamasına neden olmaktadır. Bu sebeple SD katkılı betonlarda plastik büzülmeden dolayı çatlama riski artmaktadır. Bu tip betonlarda kimyasal katkı kullanılması gerekmektedir (Richard and Cheyrezy 1994).

Düşük w/c oranları için SA'lar yaygın olarak RPB üretiminde kullanılmaktadır. Bu oran, çimento içeriğinin %1,5-3'ü arasında değişiklik gösterirken, kimyasal katkının etki gösteren katı kısmı dikkate alınarak, daha düşük oranlarda değerler gösterilebilmektedir. Kullanılacak katkı tipi ve miktarı, çimento tipi ve dozajından bağımsız değildir. Katkı oranı pudra ve kumun özelliklerine bağı olarak farklılık gösterebilir. Karışımda kırma taş pudra ve kum kullanımı katkı miktarını artırırken doğal agrega katkı kullanım miktarını azaltmaktadır (İpek 2009).

Karışıma giren SA'nın molekülleri, çimento parçacıkları tarafından çekilir ve bu moleküller karıştırma sırasında çimento etrafına sarılır. Bu oluşum çimento parçacıklarının yüzeydeki negatif yüklerini artırır ve elektrostatik itmeye neden olur. Çimento tanelerinin çok miktarda dağılımı bunun sonucudur. Bu durum, su içeriğinin azlığına rağmen betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde artırır (Duyar 2006).

1.1.1.g. Su

RPB karışımındaki su/çimento oranının azaltılması, RPB'ü yüksek performanslı bir malzeme olarak karşımıza çıkarmaktadır (Taşdemir vd 2004). RPB'da su/bağlayıcı oranı oldukça düşüktür ve ortalama 0,15'yakındır (Roux *et al.* 1996). RPB üretiminde ideal olan beton suyunun içilebilir özellikte olmasıdır.

1.1.2. RPB karışım oranları

Reaktif Pudra Betonların karışım tasarımı için bu çalışma kapsamında yapılan araştırmalarda yerli ve yabancı herhangi bir standarda rastlanılmamıştır.

Karışımı oluşturan taneli malzemelerin sıkı bir yapı oluşturacak şekilde oranlanması için farklı karışım teorileri kullanılmıştır (İpek 2009). Bu teoriler, Mooney'in süspansiyon viskozite modelinden türemiştir (Larrard and Sedran 1994; İpek 2009). Mooney'in modelinden faydalanılarak ortaya çıkan farklı karışım tasarımlarından genel olarak kullanılan karışımlar Çizelge 1.1'de görülmektedir.

Çizelge 1.1. Tipik RPB 200 ve RPB 800 betonların çimentoya göre karışımın oranları (Richard and Cheyrezy 1995)

Malzemeler	RPB200				RPB800	
	Lifsiz		Lifli		Silis Agregalar	Çelik Agregalar
Portland Çimentosu	1	1	1	1	1	1
Silis Dumanı	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Kum (150 - 600 µm)	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Kırılmış Kuvars ($d_{50} = 10 \mu\text{m}$)	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Süperakışkanlaştırıcı	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Çelik Tel ($L = 12 \text{ mm}$)	-	-	0,175	0,175	-	-
Çelik Tel ($L = 3 \text{ mm}$)	-	-	-	-	0,63	0,63
Çelik agregalar ($< 800 \mu\text{m}$)	-	-	-	-	-	1,49
Su	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19

RPB200 ve RPB800 için malzeme miktarları Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2. RPB200 ve RPB800’de kullanılan malzemeler ve miktarları (Dugat *et al.* 1996)

Malzemeler (kg/m ³)	RPB200	RPB800
Portland çimentosu	950	980
Silis dumanı	237	225
Kırılmış kuvars	-	382
Silis kumu	997	490
13 mm çelik lif	146	-
3 mm paslanmaz çelik	-	617
Süperakışkanlaştırıcı	17	18
Toplam su	180	186
Su/Bağlayıcı (Çimento+SD)	0,15	0,14

Karışım oranları incelendiğinde, çimento miktarının normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre oldukça fazla olduğu w/c oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu betonlarda çimentonun tamamı yeterli su bulamadığı için hidrate olamaz, ancak çimento tane boyutu ile SD ve pudra tane boyutu birbirine yakın olduğu için hidrate olmayan çimento taneleri agrega olarak görev yapmaktadır (İpek 2009). Kanada Quebec’de RPB ile inşa edilen bir köprüde 200 MPa basınç dayanımı veren karışımdaki malzeme ve miktarları Çizelge 1.3’de verilmiştir.

Çizelge 1.3. Reaktif pudra betonunda kullanılan tipik malzemeler ve miktarları (Richard and Cheyreyzy 1994)

Kullanılan Malzeme	Miktar (kg/m ³)
Çimento	705
Silis Dumanı	230
Kırılmış Kuvars Kumu	210
Kum	1.010
Süperakışkanlaştırıcı	17
Çelik Lif	190
Su	195

Çizelge 1.4’de RPB’lar ile ilgili malzemeler ve karışım oranları verilmiştir.

Çizelge 1.4. RPB numuneleri karışım oranı (Düzgün 2004)

Kullanılan Malzeme	Miktar (kg/m³)
Çimento PÇ 52,5	980
Silis Dumanı	225
Kum (600–150 µm)	490
Kuvars Unu (4 µm)	382
Çelik Tel (6 mm)	320
Süperakışkanlaştırıcı	19
Su	186

Yukarıdaki malzeme oranları kullanılarak Düzgün (2004) çalışmasında elde edilen sonuçlar Çizelge 1.5’de gösterilmektedir.

Çizelge 1.5. RPB numunelerinin deney sonuçları (Düzgün 2004)

Deney Numunesi	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
Seri 1	58,75	216,3
Seri 2	63,67	253,2
Seri 3	53,88	216,3

1.1.3. RPB üretim yöntemleri

RPB üretiminde ana ilkeler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- İri agrega yerine ince agrega kullanılabilmesi.
- Priz sırasında kalıp içerisinde sıkıştırma yapılarak daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı elde edilebilmesi.
- Priz sonrasında ısı işlem (standart kür, otoklav kür, kombine kür) uygulanarak mikro yapının güçlendirilip beton dayanımının artırılması.
- Karışımında çelik lifler kullanarak beton basınç, eğilme dayanımlarının artırılması.

RPB üretiminde, karıştırma ve vibrasyon işlemleri geleneksel beton üretim tekniğinde olduğu gibidir. RPB üretiminde, karışıma suyun eklenip karıştırılması aşamasında dikkat edilmelidir. İlk başta, karışımdaki agrega ve bağlayıcı 3 dakika su katılmadan karıştırıldıktan sonra, su ve SA'dan oluşan karışımın yarısı beton karışımına eklenir. Bu durumda 5 dakika karıştırıldıktan sonra geriye kalan su ve SA'nın tamamı karışıma eklenir ve 5 dakika daha karıştırma yapılır. Bu şekilde uygulandığında, malzeme topaklanmadan kalıba dökülmeye hazır bir duruma gelir (Chan and Chu 2004).

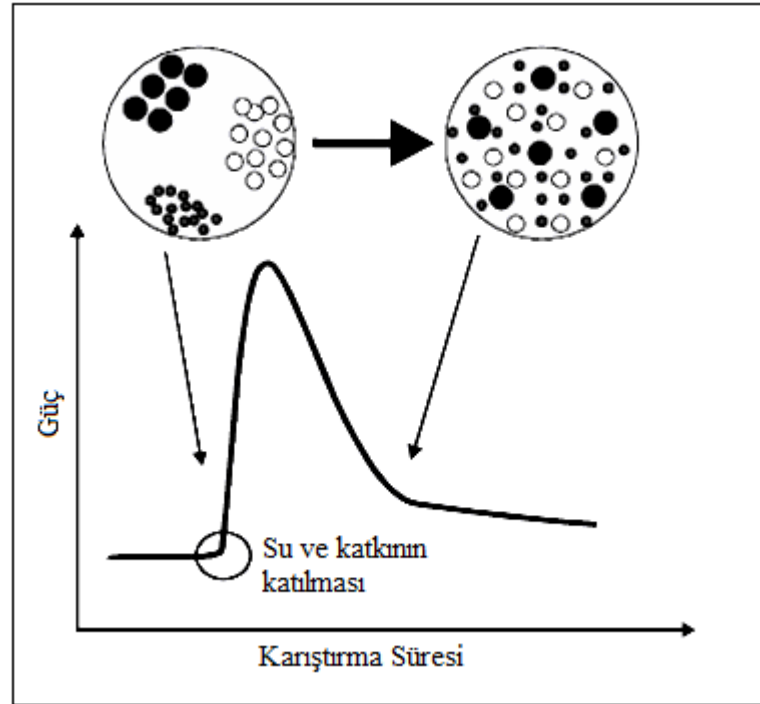
Bolat (2003) çalışmasında; betona sıkıştırma basıncı uygulanmasıyla betonun basınç dayanımının yükseldiği ve korozyonun azaldığı belirtilmiştir. Şimşek vd (2004) çalışmalarında, karışım miktarları aynı üç farklı tip beton kullanılmıştır. Birinci tip beton 35 dakika vakum, ikinci tip beton 18 dakika vakumlu olarak oluşturulmuş ve w/c oranı referans betona (üçüncü tip) göre azaltılmıştır. Bu şekilde üç tip betonun basınç ve eğilme deneyleri yapılarak w/c oranının tip numuneler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda 1. tip betonun, 2. ve 3. tip betona göre basınç ve eğilme dayanımının daha yüksek olduğu belirtilmiştir. RPB'da priz sırasında uygulanan sıkıştırma basıncı betonun basınç ve eğilme dayanımını artırmaktadır.

Kompozit betonun yoğunluğu taze betona priz sırasında uygulanan sıkıştırma basıncı ile artırılabilir. Bu şekilde uygulanan sıkıştırma basıncıyla, betonun karıştırılması esnasında içerisine aldığı hava kabarcıkları ve hidrasyon için gerekli su miktarından fazla olan su dışarı alındığından karışımın su/çimento oranı düşürülmektedir. Sıkıştırma işlemi ile betonun birim ağırlığında %5 artış meydana gelmektedir (Gilliand 1996).

Kür işlemi, RPB kalıba yerleştirildikten hemen sonra uygulanmalıdır. Betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde sıcaklık kürü uygulaması bilinen yöntemlerden biridir. Hidrasyon sırasında malzemelerin kristalleşmesi ve silis içerikli filler malzemelerin puzolanik reaksiyonunun başlamasında kür sıcaklığının önemi büyüktür. Beton dayanımlarının iyileştirilmesinde sıcaklık uygulaması yararlı olmaktadır (Feylessoufi *et al.* 1997).

RPB konusu hakkında ilk çalışmaları yapan araştırmacılar RPB'ü RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki tip olarak isimlendirmişlerdir. Bunlarda RPB200 olarak adlandırılan tip normal beton üretim teknikleri ile üretilebilirken RPB800 normal betondan farklı üretim teknikleri ile üretilmektedir. RPB200 betonların üretim aşamasında ön basınç tekniği (taze haldeki betona basınç uygulanarak sıkıştırılması) uygulanmamaktadır. RPB200'un üretimi geleneksel yüksek performanslı betonların üretimi ile benzerlik göstermektedir (İpek 2009).

Şekil 1.1'de RPB karışım işlemi süresince güç tüketim grafiği görülmektedir. Grafiğe göre, karıştırmada harcanan güç, SA ve suyun eklenmesi ile ani olarak artmakta ve daha sonra SA'nın etkisini göstermesiyle ani olarak azalmaktadır.



Şekil 1.1. RPB karışım işlemi süresince güç tüketimi (Ma and Orgass 2004)

RPB'nun üretimi için yapılan deneysel bir çalışmada RPB500 betonu için hazırlanan karışım, 10 dakikalık bir karışırma süresi sonrasında kalıplara dökülmüştür (Düzgün 2004).

RPB'nun kıvamı genellikle akışkan duruma yakındır. Kendiliğinden kalıba yerleşme eğilimindedir. RPB200 için yerleştirmede genellikle herhangi bir ek işleme gerek yoktur. RPB800 için ise basınç uygulayarak sıkıştırılması ve bu basınç altında prizini alması gerekmektedir. Bu sıkıştırma işleminden dolayı RPB800 sadece prefabrik elemanların üretimi için uygundur (İpek 2009).

RPB'ye farklı tiplerde kürler uygulanmaktadır. RPB200 için normal beton kürü uygulanabildiği gibi sıcak kür işlemi de uygulanabilmektedir. RPB200 ve RPB800'de yüksek dozajda puzolan kullanıldığı için genellikle sıcak kür işlemi tercih edilmektedir. Bu kür tipleri, 20°C su, 90°C buhar, 90°C sıcak su, basınçlı buhar kürü, 200–500°C arasında sıcak hava ve bu kürlerin birbiri ile birleşimi şeklinde olabilmektedir. RPB800 için istenilen dayanıma ancak yüksek derecelerdeki kür işlemi ile ulaşılabilmektedir. Yüksek derecelerdeki (250°C-400°C) sıcaklık hem puzolanik aktiviteyi hızlandırmakta hem de sertleşmiş pastanın büyük ölçüde yeniden hidrasyonuna eşlik ederek kristal hidratelerin oluşumuna yol açmaktadır (Richard and Cheyrezy 1995; Taşdemir *et al.* 1996; Taşdemir *et al.* 1999; Taşdemir 2003; Avar 2006; İpek 2009). RPB üretiminde otoklav kür süresi en az 2 saat olmalıdır (Şahinoğlu 2010).

1.1.4. RPB mekanik özellikleri

Genel literatür sonuçlarına göre Reaktif Pudra Betonların (RPB) basınç dayanımlarının normal betonların basınç dayanımdan ortalama 12,5 kat, eğilme dayanımların ortalama 31 kat, Kırılma enerjilerinin ortalama 227 kat ve elastisite modülünün ortalama 2,7 kat fazla olmasından dolayı RPB'lar normal betonlara nazaran çok üstün özelliklere sahiptir.

Çizelge 1.6'da RPB ve YDB ile ilgili bir karşılaştırma görülmektedir.

Çizelge 1.6. RPB ile YDB dayanıklılığının karşılaştırması (Dallaire *et al.* 1998)

Dayanıklılık Özelliği	RPB-YDB
Toplam Porozite	4–6 Kat Daha Düşük
Mikro-Porozite	10–50 Kat Daha Düşük
Permeabilite	50 Kat Daha Düşük
Su Emme	7 Kat Daha Düşük

Reaktif Pudra Beton, YDB'a kıyasla dayanım olarak 2 ile 4 kat daha fazla dayanıma sahiptir. RPB, oldukça düşük geçirimsizliğe sahip, sünek, iyileştirilmiş mekanik ve fiziksel özelliklere sahip, ultra yüksek dayanımlı kompozit bir malzemedir (Dallaire and Aitcin 1998).

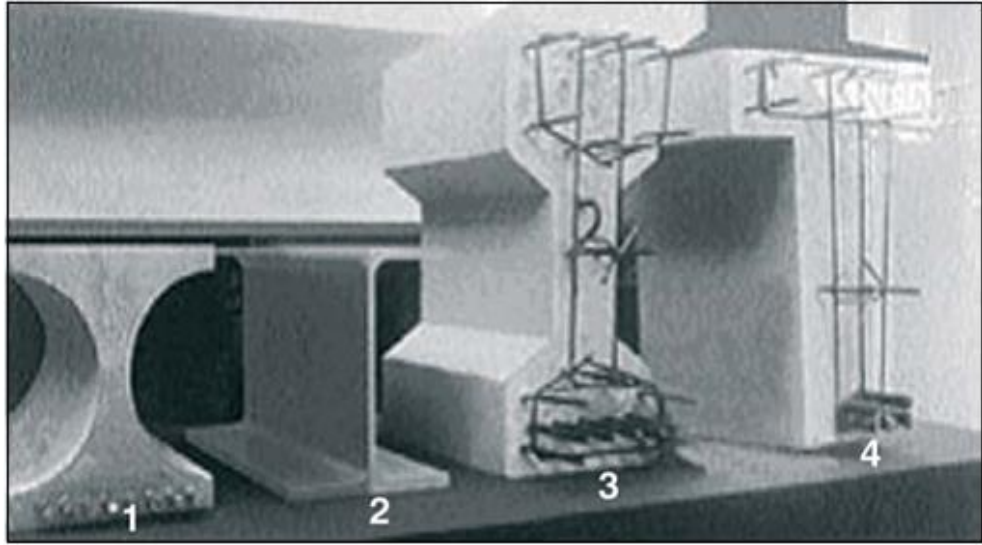
RPB karışımındaki su/çimento oranının azaltılması, karışıma çelik liflerin eklenmesi, RPB'ü basınç ve eğilme dayanımı gibi performansı yüksek bir malzeme olarak karşımıza çıkarmaktadır. Çelik lifler özellikle RPB'un eğilme dayanımı üzerinde etkili olmaktadır. RPB içerisindeki çelik lif dağılımının yeterince homojen olması, eğilme dayanımında daha fazla artışa neden olmaktadır. RPB eğilme dayanımlarında, çelik liflerin eklenmesiyle 50–140 MPa arası yüksek değerler elde edilebilmektedir. Eğilme dayanımlarındaki değişim, eklenen çelik tellerin yüzdeleriyle orantılıdır. RPB'un sıkı matris yapısı, beton basınç dayanımını maksimum değerlere taşımaktadır. Bu yüksek dayanım RPB'un, çelik donatı yapılarında kullanımını sağlamıştır. RPB, geleneksel betonlara kıyasla 240 kat daha fazla enerjiyi karşıladığı görülmüştür. Bu durum, deprem etkisi altında enerji yutma kapasitesi düşük olan gevrek beton malzemenin tokluğunu artırır. Böylece RPB ile inşa edilen yapı elemanları, depreme karşı daha dirençli bir davranış sergiler. Betonda en zayıf halka, çimento hamuru ve agrega arasındaki temas yüzeyidir. Beton yoğunluğunun ve dayanımının artırılması, beton içerisindeki boşlukların azaltılması için SD gibi ultra incelikte malzemenin kullanılması önem taşımaktadır. SD taneleri, RPB üretiminde çimento tanelerinin arasına girerek boşlukları kapatır, hidrasyon sırasında pozolanik reaksiyon ile betonun mukavemetinin artırılmasına katkı sağlar. Mikro yapıda SD'nin çimento ile hidrasyonu, betonun matris iskeletini daha da güçlendirmektedir (Taşdemir vd 2004).

Normal Dayanımlı Beton (NDB), Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) ve Reaktif Pudra Beton (RPB)'a ait bir karşılaştırma Çizelge 1.7'de görülmektedir.

Çizelge 1.7. Normal, yüksek dayanımlı ve reaktif pudra betonların karşılaştırılması (Taşdemir vd 2004)

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınç Dayanımı (MPa)	20–60	60–115	200–800
Eğilme Dayanımı (MPa)	4–8	6–10	50–140
Kırılma Enerjisi (J/m ²)	100–120	100–130	10000–40000
Elastisite Modülü (GPa)	20–30	35–40	60–75

Şekil 1.2'de eşit moment taşıma kapasitesine sahip dört adet beton kiriş görülmektedir. 1 numaralı numune RPB, 2 numaralı numune çelik, 3 numaralı numune ön gerilmeli betonarme ve 4 numaralı numune ise betonarme olarak üretilmiştir.



Şekil 1.2. Moment taşıma kapasitesi aynı farklı malzemelerden üretilmiş kiriş elemanları (Dauriac 1997)

Çizelge 1.8'de ise bu numunelerin fiziksel özellikleri görülmektedir. Çizelge 1.8'de görüldüğü gibi betonarme ya da ön gerilmeli betonarme olarak üretilen numuneler hem daha büyük hem de kütsel olarak daha ağırdır. Çizelge 1.8'de görüldüğü gibi, RPB çelik numune ile hemen hemen aynı boyutlarda ve aynı birim ağırlıkta üretilmektedir. Bu şekilde yapılardaki zati ağırlıklar düşürülebilmektedir.

Çizelge 1.8. Aynı taşıma gücüne sahip elemanların RPB ile karşılaştırılması (Dauriac 1997)

Kesit Özelliği	RPB (1)	Çelik Profil (2)	Öngerilmeli Betonarme (3)	Betonarme (4)
Yükseklik, cm	36	36	70	70
Ağırlık, kg/m	130	110	470	530

RPB konusu hakkında ilk çalışmaları yapan araştırmacılar RPB'yi RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki tip olarak isimlendirmişlerdir. Bunlarda RPB200 olarak adlandırılan tip normal beton üretim teknikleri ile üretilebilirken RPB800 normal betondan farklı üretim teknikleri ile üretilmektedir. Her iki tipe ait mekanik özellikler bu konuda ilk çalışmaları yapan Richard and Cheyrezy (1995) tarafından ortaya konmuştur (İpek 2009). Mekanik özellikler ve üretim tekniği hakkında genel bilgi Çizelge 1.9'da verilmiştir.

Çizelge 1.9. Reaktif pudra betonun mekanik özellikleri-1 (Richard and Cheyrezy 1995)

	RPB 200	RPB 800	
Ön Sertleşme Basıncı (MPa)	Yok	50	
Sıcak Kür	20°C ile 90°C	250°C ile 400°C	
Basınç Dayanımı, (MPa)	170–230	Kuvars Kumu	490–680
		Çelik Agrega	650–810
Eğilme dayanımı (MPa)	30–60	45–141	
Kırılma enerjisi ($J \cdot m^{-2}$)	20000–40000	1200–20000	
Son deformasyon ($m \cdot m^{-1}$)	5000×10^{-6} - 7000×10^{-6}	5000×10^{-6} - 7000×10^{-6}	
Elastisite Modülü (GPa)	50–60	65–75	

RPB'nin mekanik özellikleri Çizelge 1.10'da verilmiştir.

Çizelge 1.10. Reaktif pudra betonun mekanik özellikleri-2 (Dugat *et al.* 1996)

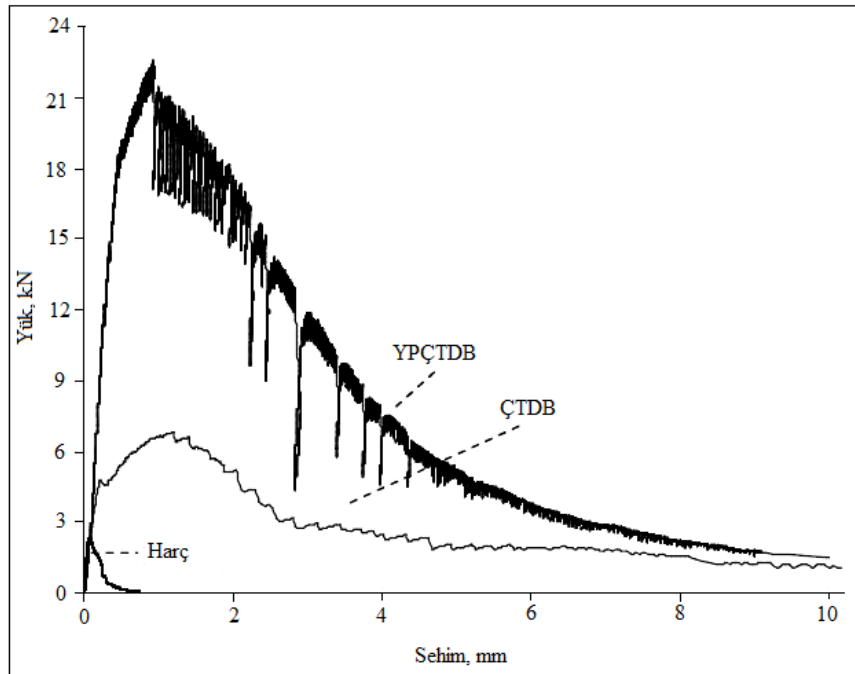
Özellikler	RPB200	RPB800
Basınç dayanımı (MPa)	194–203	422–520

RPB'un mekanik özelliklerinin, normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile karşılaştırılması Çizelge 1.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.11. RPB'nin mekanik özelliklerinin, normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile karşılaştırılması (Dugat *et al.* 1996)

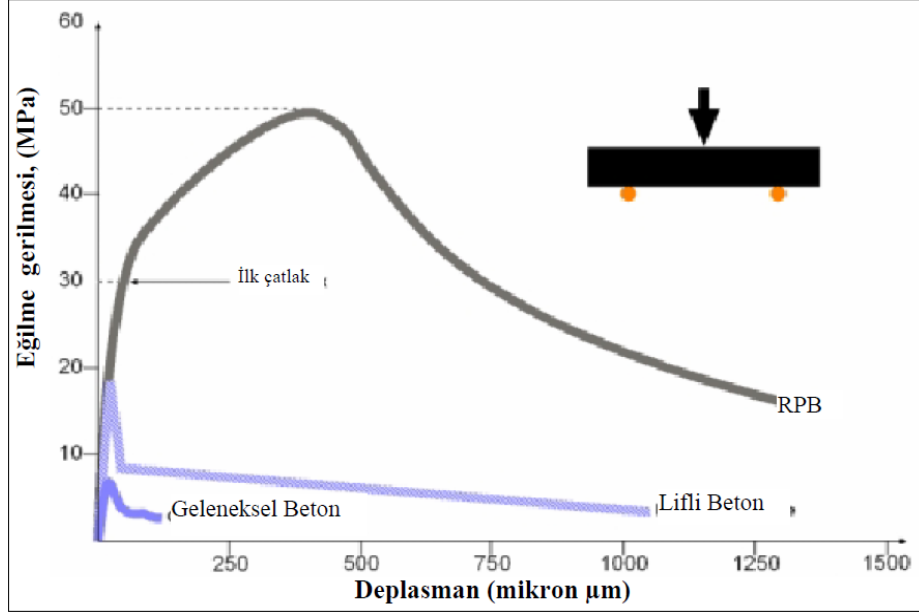
Mekanik Özellik	Normal Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	Reaktif Pudra Betonu
Basınç dayanımı (MPa)	20–50	60–80	200–800
Eğilme dayanımı (MPa)	4–8	6–10	15–140

Şekil 1.3'de Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Beton (YPÇTDB), Çelik Tel Donatılı Beton (ÇTDB) ve Normal harcın kırılması karşılaştırmalı olarak verilmektedir. YPÇTDB, normal harca göre daha uzun sürede ve çok daha büyük şekil değiştirme yaparak kırılmakta, böylelikle normal harca göre çok daha fazla enerji yutmaktadır (Taşdemir vd 2005).



Şekil 1.3. Normal harç, çelik tel donatılı beton ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun (RPB) eğilme davranışı (Taşdemir vd 2005)

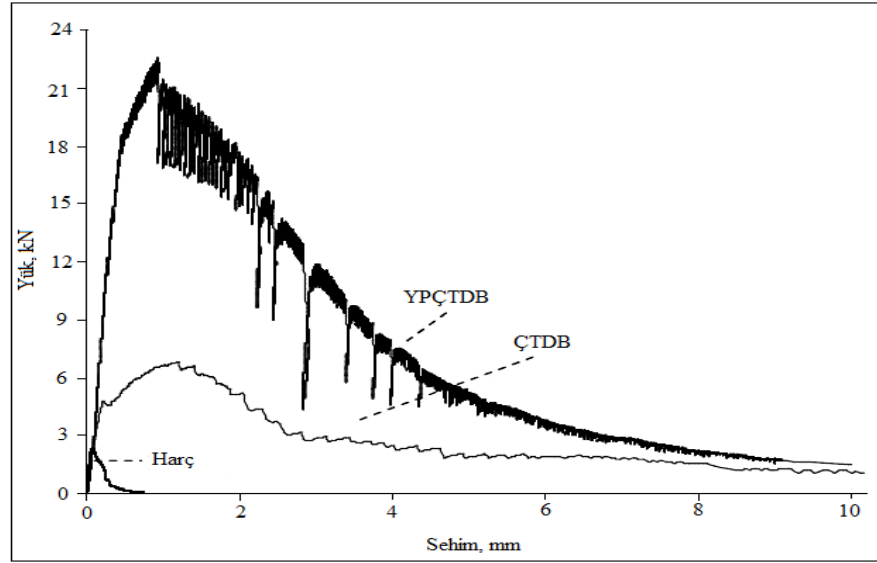
Aynı sehim boyunda RPB'lar, ÇTDB ve normal harca göre çok daha fazla eğilme dayanımına sahip olup daha fazla yük taşıma kapasitesine sahiptir. Şekil 1.4'de RPB'un eğilme davranışı görülmektedir.



Şekil 1.4. RPB'un eğilme davranışı (Richard and Cheyreyz 1994, 1995)

RPB'un eğilme dayanımı ilk çatlaktaki gerilmenin ortalama iki katı kadar yüksektir (Richard and Cheyreyz 1994, 1995). Shaheen (2004) çalışmasında, metalik olmayan ancak yüksek kırılma enerjisine sahip materyalleri seramik, plastik ve YDB'lar olmak üzere üç grupta toplamıştır. Plastiklerin sünme davranışlarının olması, seramiklerin maliyetli bir malzeme oluşu sebebiyle YDB'lar düşük maliyeti ve yüksek dayanımı ile yüksek kırılma enerjisine sahip en iyi aday olarak görülmüştür. Şekil 1.5'de normal harcın ve RPB200'ün basit kiriş halindeki mekanik davranışı görülmektedir.

Şekil 1.5'de görüldüğü gibi lif katkılı RPB'da maksimum yük, ilk çatlak yükünü geçmekte olup, ilk çatlak ve tepe yükü arasında, çeliğin gerilme deformasyon grafiğinde olduğu gibi, şekil değiştirme sertleşmesi sergilenmektedir (Taşdemir vd 2005; İpek 2009).



Şekil 1.5. Normal harç ve lif katkılı RPB200'ün eğilme davranışı (Taşdemir vd 2005)

Çizelge 1.12'de RPB ile normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların durabilite yönünden karşılaştırılması verilmektedir.

Çizelge 1.12. RPB ile normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların dayanıklılık yönünden karşılaştırılması (Dallaire *et al.* 1998, Teichman and Schmidt 2004)

Özellik	Normal Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	RPB
Permeabilite K (m ²)	6,7 ⁻¹⁷	4 ⁻¹⁷	0,01 ⁻¹⁷
Aşınma dayanımı	-	-	2-3 kat>YDB
Donma Çözünme (Çevrim)	50	150	Zarar yok
Su emme (%)	1-4	0,25	0-0,05

1.1.5. RPB kullanım alanları

RPB uygulamalarında mimari şekil ve boyutlar bakımından sınırsız imkânlar sunulmaktadır. RPB ile inşa edilen ilk köprü uygulaması Kanada'daki Sherbrooke Köprüsü'dür ve güvenle kullanılmaktadır. Bu köprüde kullanılan RPB, 200 MPa basınç dayanımı ve 40 MPa eğilme dayanımına, herhangi bir çelik donatı kullanılmadan

erişmektedir. Şekil 1.6'da görülen köprü 60 m boyuna ve 3,3 m enine uzunluktadır. Köprü uzay kafes sistemli olarak planlanmış olup, boyu 10 m olan 6 adet prefabrik elemanın montajı ile inşa edilmiştir. Üstteki elemanların yük aktardığı alt kiriş 32 x 38 cm boyutlarında ve her iki kirişin içinde ön germe donatıları yer almaktadır (Gilliand 1996).



Şekil 1.6. RPB kullanılarak üretilen Sherbrooke Köprüsü (Gilliand 1996)

Depremden zarar görmüş yapıların güçlendirilmesinde RPB kullanılabilir. Taşıma gücünü kısmen yitiren, deprem sonucu eğilme ve kesme çatlaklarının oluştuğu betonarme kirişler, RPB kullanılarak güçlendirilebilir. İnce çelik levha gibi davranan malzeme 2 cm kalınlığında kiriş altına epoksi ile yapıştırılarak güçlendirilmektedir (Yerlikaya 2005). RPB'un en yaygın kullanım alanları; depreme dayanıklı yapılar, su yapıları, saha betonları, yangına dayanıklı yapılar ve tünel kaplamalar şeklinde sayılabilir (Yiğiter 2002).

Mekanik ve dayanıklılık özellikleri bakımından diğer betonlara göre daha üstün olan RPB'nin, şantiye şartlarında üretimi oldukça zordur. Bu nedenle şu ana kadar bütün ürünler prefabrik olarak üretilmiştir. Prefabrik olarak üretilen elemanlar genellikle köprülerde kullanılan kirişler şeklinde olmuştur. Normal beton ile üretilen prefabrik ön gerilmeli kirişlerde, çelik ön germe halatlarının dışında, üretilen elemanın bütünlüğünün

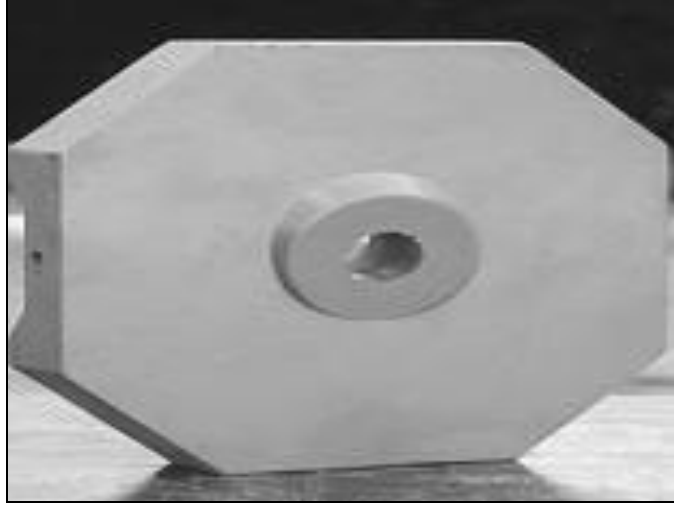
bozulmaması ve kompozit olarak hareket edebilmesi için ikinci bir donatı konulmasından dolayı maliyeti arttırmaktadır. RPB ile yapılan ön gerilmeli prefabrik kiriş elemanlarda ikinci bir donatıya gereksinim duyulmamakta ve eleman boyutları küçülmektedir (İpek 2009).

RPB200'ün üretiminde ön basınç tekniği kullanılmaz ve geleneksel yüksek performanslı betonların üretimi ile benzerlik gösterir. Bu betonların yüksek süneklik göstermesi nedeniyle geleneksel pasif güçlendirmeye tabi olmayan yapılar için kullanıma elverişlidir. RPB'nin çekme ve basınç dayanımının yüksek olması nedeniyle çekme ya da eğilmeye çalışan ön gerilmeli elemanlarda kullanılır (İpek 2009). RPB800 yalnız prekast elemanların üretimi için kullanılır. RPB800 askeri yapılarda, mekanik parçaların üretiminde çeliğin yerine kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu malzeme patlama, dağılma ve kopma etkisi yönünden çok iyi dayanıklılığa sahip olması ile askeri donanım ve yapılarda kullanılabilir. Mekanik özelliklerin haricinde RPB betonlar ultra yoğun bir mikro yapıya sahiptirler. Buda dayanıklılık ve su geçirmezlik avantajı verir. Bu malzemeler endüstriyel ve nükleer atıkların depolandığı tesislerde de kullanılabilir (Matte and Moranville 1999; Richard and Cheyrezy 1995; İpek 2009). RPB ile ankraj plakası, ses bariyeri, kaldırım elemanları, yağmur suyu ızgaraları ve kapakları gibi prefabrikasyon üretime uygun yapı elemanları üretilmektedir (Wen-Yu *et al.* 2007). Şekil 1.7'de RPB kullanılarak yapılan yaya kaldırım elemanı görülmektedir.



Şekil 1.7. RPB kullanılarak yapılan yaya kaldırım elemanı (Wen-Yu *et al.* 2007)

Şekil 1.8’de RPB kullanılarak yapılan ankraj plakası görülmektedir.



Şekil 1.8. RPB kullanılarak yapılan ankraj plakası (İpek 2009)

Şekil 1.9’da RPB kullanılarak yapılan ses bariyeri görülmektedir.



Şekil 1.9. RPB kullanılarak yapılan ses bariyeri (İpek 2009)

Şekil 1.10’da RPB kullanılarak yapılan yağmur suyu ızgaraları görülmektedir.



Şekil 1.10. RPB kullanılarak yapılan yağmur suyu ızgaraları (İpek 2009)

Şekil 1.11’de RPB kullanılarak yapılan rögar kapağı görülmektedir.



Şekil 1.11. RPB kullanılarak yapılan rögar kapağı (Yazıcı ve Yalçinkaya 2011)

1.2. Yol Üstyapı Tipleri

1.2.1. Esnek üstyapılar

Esnek üstyapı; kaplama, temel ve alt temel tabakasından oluşur. Yüksek standartlı yollarda kaplama tabakası aşınma ve binderden oluşan iki tabaka şeklinde bitümlü karışımdan, düşük standartlı yollarda ise tek kat ve ya çift kat sathi kaplama olarak yapılırlar. Esnek kaplamalarda zeminlerde don kabarması, şişme ve büzölmelere karşı koymak, kaplama altı drenajı sağlamak ve kaplamanın taşıma gücünü artırmak amacıyla alt temel yapılmaktadır. Esnek üstyapılar; düşük standartlı kaplamalar ve yüksek standartlı kaplamalar olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Günlük ağır taşıt trafiğı 500'den az olan yollarda düşük standartlı kaplamalar kullanılmaktadır. Ülkemizde toplam eşdeğer standart dingil yükü sayısı 40 000'den az ise stabilize, 40 000-100 000 arası stabilize ve ya tek kat sathi kaplama, 100 000-500 000 arası tek kat sathi kaplama, 500 000-2 000 000 arası çift kat sathi kaplama, 2 000 000'dan fazla ise asfalt kaplama yapılmaktadır. Yüksek standartlı yollar BSK kaplama tabakaları ile yapılmaktadır. Esnek üstyapılar rijit üstyapılara nazaran aşağıdaki avantajlara sahiptirler (Tunç 2007):

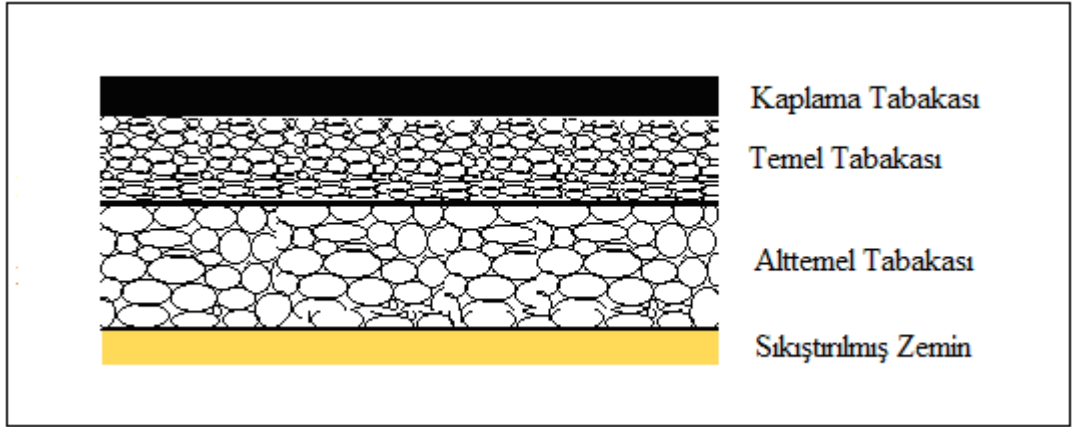
- Esnek üstyapıların inşaat süresi daha kısadır.
- Bakım-onarım işleri daha hızlıdır.
- Bakım-onarımda yolun tamamının trafiğe kapatılmasına gerek yoktur.
- Beton gibi uzun süreyle kürede beklenilmez.
- Kademeli inşaat yapılabilir. Böylece trafik hacminin artması durumunda kaplama kalınlığı artırılabilir.

Esnek üstyapılar rijit üstyapılara nazaran aşağıdaki dezavantajlara sahiptir (Tunç 2007):

- Bakım masrafları yüksektir.
- Kaplama yorulma mukavemeti rijit yapılara göre düşüktür.
- Asfalt çimentosu petrolden üretildiğinden dışa bağımlı bir malzemedir.

- Asfalt kaplama, beton kaplamalara göre daha kısa sürede bozulur.
- Esnek kaplamaların inşaat mevsimi beton kaplamalara göre daha kısadır.
- Asfalt kaplamaların gece görüşü kısıtlıdır.
- Aşınma tabakası sürekli bakım ve onarım ister.
- BSK kaplamaların yağışlı havalardaki sürtünme dirençleri daha düşüktür.

Esnek kaplama tabakaları Şekil 1.12’de görülmektedir.



Şekil 1.12. Esnek kaplama tabakaları

1.2.1.a. Yüksek standartlı esnek kaplamalar

Bitümlü karışım tabakaları; Bitümlü Sıcak Karışımlar ve Bitümlü Soğuk Karışımlar olmak üzere iki şekilde imal edilmektedir. Ülkemizde en fazla kullanılan Bitümlü sıcak karışımlardır. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK) asfalt ve agreganın uygun bir ısıya kadar ısıtılıp uygun oranlarda plentde karışımı ile elde edilmekte ve yüksek standartlı esnek kaplamaların üst tabakalarında kullanılmaktadır. BSK’lar genel olarak yüksek standartlı yol üst yapısında Aşınma, Binder ve Bitümlü Temel tabakalarında kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar beton asfalt, asfalt betonu, sıcak asfalt karışım, asfalt çimentolu karışım, sıcak asfalt betonu gibi isimler altında da kullanılabilir (Tunç 2007).

1.2.1.b. Esnek kaplamaların tasarımı

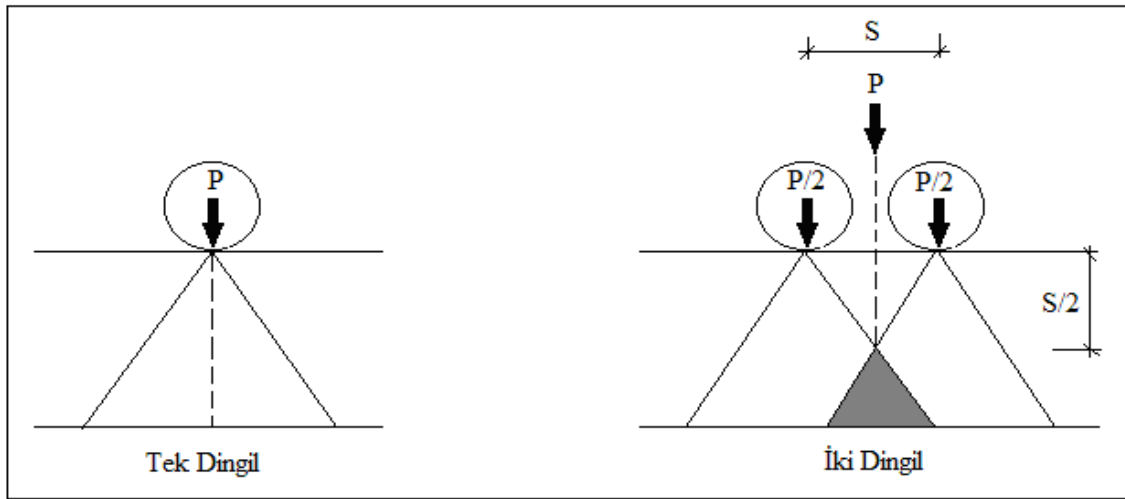
Kaplama tipi ve kalınlığına etki eden temel faktörler şunlardır (Tunç 2007):

1. Trafik
 - a. Trafik hacmi ve kompozisyonu
 - b. Dingil veya teker yükleri
 - c. Dingil sayısı veya teker geometrisi
 - d. Lastik basıncı ve temas alanı
 - e. Standart yük tekrar sayısı
 - f. Yükleme hızı veya tatbik süresi
2. İklim ve Çevre
 - a. Isı değişimleri
 - b. Yağış
 - c. Don derinliği
 - d. Drenaj
 - e. Zemin taşıma gücü
3. Malzeme
 - a. Malzemenin fiziksel özellikleri
 - b. Kaplama yük dağıtma yeteneği
 - c. Kaplama tabakasının deformasyon dayanımı
 - d. Kaplama tabakasının mukavemeti
 - e. Kaplama tabakasının yorulma mukavemeti
 - f. Malzemenin aşınma direnci ve durabilitesi

4. Yapım ve Bakım Şartları

- a. Kaplama tasarımı
- b. Kalite kontrol
- c. Bakım-onarım süresi
- d. Trafik yüklerinin denetimi

Dingil yüklerinden dolayı kaplamada oluşan gerilme dağılımı Şekil 1.13’de görülmektedir. Şekil 1.13’de görüldüğü gibi tek dingilli ve iki dingilli taşıt yüklerinin kaplamada oluşturduğu gerilme dağılımı farklılık gösterir (Tunç 2007).

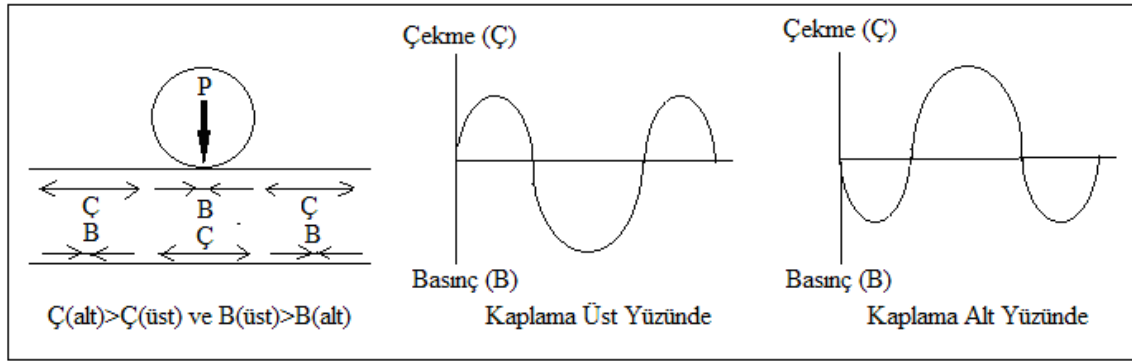


Şekil 1.13. Dingil yüklerinin kaplamada meydana getirdiği düşey gerilme dağılımı (Tunç 2007)

Kaplama ile teker arasındaki temas basıncı lastik iç basıncının büyüklüğüne bağlıdır. Yüksek lastik iç basınçlarında temas basıncı lastik iç basıncından küçüktür. Düşük lastik iç basınçlarında temas basıncı lastik iç basıncından büyüktür. Temas basıncının küçük olması kaplama ve lastik arasındaki sürtünme direncini azaltmaktadır. Yük arttıkça temas alanı ile temas basıncı artar ve teker temas alanı dairesel şekilden dikdörtgene döner. Esnek kaplama hesaplamalarında dairesel temas alanı esas alınmaktadır. Trafik yükünden dolayı esnek kaplama üst kısmında kaplama alt kısmına göre daha yüksek basınç gerilmeleri meydana gelir. Bu yüzden kaplamanın üst tarafında

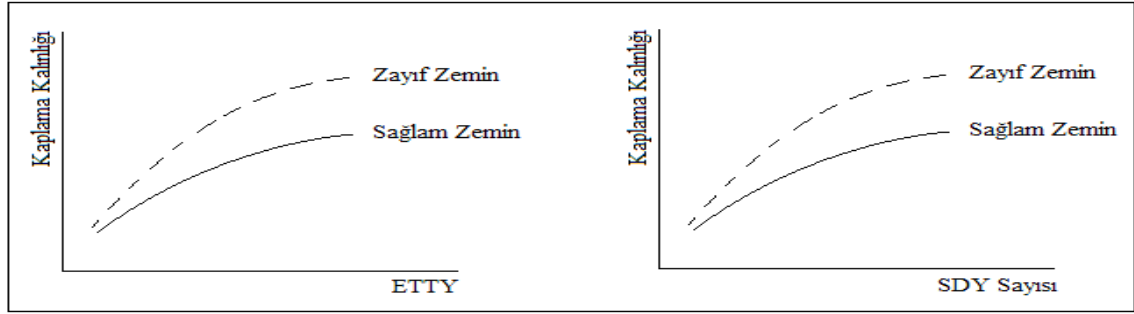
daha fazla deformasyon görülür. Kaplama altında meydana gelen çekme gerilmeleri ise bu durumun tam tersidir. Bundan dolayı esnek kaplamalar alt kısımdan çatlamaya başlar ve yüzeye doğru ilerlerler (Tunç 2007).

Teker yükünden dolayı oluşan gerilmeler Şekil 1.14’de görülmektedir.



Şekil 1.14. Teker yükünden dolayı oluşan gerilmeler (Tunç 2007)

Esnek kaplama tasarımında araç tipi ve ağırlığı, trafik hacmi veya tekerrür sayısı ve araçların işletme modu olarak üç faktör göz önüne alınmaktadır. Karayolu tırmanma şeritlerinde, kavşaklarda, duraklarda, kenar şeritlerde, otopark ve benzeri kısımlarda araçların düşük hızdaki hareketlerinden dolayı kaplamada daha büyük gerilmeler meydana gelmektedir. Kaplamaya etki eden trafik hızları işletme modu olarak isimlendirilmektedir. Kaplama tasarımlarında iki farklı yaklaşım söz konusudur. Bunlardan ilki Eşdeğer Tek Tekerrür Yüğü (ETTY), diğeri ise Standart Dingil Yüğü (SDY)'dür. ETTY'de tüm teker yükleri tek bir yüke dönüştürülür. SDY'de ise tüm araçlar standart dingil yüküne dönüştürülür. Bu yaklaşım gerek karayollarında gerekse havaalanlarında kabul gören bir yöntemdir. Her iki yaklaşımda da gerek ETTY gerekse SDY değerleri artıkaça kaplama kalınlığı da zeminin taşıma gücüne bağılı olarak artmaktadır (Tunç 2007). Bu durum Şekil 1.15’de görülmektedir.



Şekil 1.15. Yük ve tekerrür sayısının kaplama kalınlığına etkisi (Tunç 2007)

1.2.1.c. Karayolu esnek kaplama tasarımı

Karayolları esnek kaplama tasarımında, AASHTO ilk tasarım uygulaması 1950 yılında başlamıştır. 1972, 1986, 1993 ve 2008 yıllarında yayımlanan rehberler ile tasarım metodu bir takım revizelere uğramıştır.

Üstyapı modellemesinde projelendirme yöntemi olarak ASSHTO ‘un 1960 yıllarında iki yıl süre ile uyguladığı yol deneylerinden alınan verilere göre düzenlenen, birincisini 1960 yılında, daha sonra bu rehberin devamı özelliğinde 1972 yılında yayınladığı geçici rehber, son yıllara kadar ülkemizde kullanılmıştır. Bu yöntemler deneysel olup, yöntemin oluşturulmasında sınırlı sayı ve yapılandırmada trafik ile tamamıyla yerel malzemelerden ve çevresel şartlardan oluşturulan veriler göz önüne alınmıştır. Bu yöntemde malzemelerin dayanım özellikleri, bağlayıcısız granüler malzemeler için (temel, alttemel, seçme malzeme, taban zemini) Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakaları için ise Marshall stabilitesi değerlerine dayandırılmıştır. Bu deneyler statik yükleme altında gerçekleştirilmektedir. Hâlbuki gerçek arazi şartlarında yol üstyapısı statik yükten çok, sürekli olarak dinamik yüklemelerle karşı karşıyadır. Bunun yanında, üstyapıya etki eden yükler sabit olmayıp, yükleme şartları değişkenlik göstermektedir. Diğer yandan, üstyapı teknolojisi özellikle son zamanlarda hızlı bir şekilde ilerleme kaydedip, yol üstyapısında kullanılan malzemeler çeşitlilik göstermektedir. AASHTO yol deneylerinin yapıldığı 1960 yılları ile günümüz şartları karşılaştırıldığında, hem üstyapılarda kullanılan malzemeler, hem de yollarda seyir eden taşıt dingil tipleri ve ağırlıkları tartışılmayacak derecede değişmiş

durumdadır. AASHTO, 1986 yılında yayınladığı projelendirme rehberinde üstyapının performansını CBR yerine, hem bağlayıcısız granüler malzemeler, hem de BSK için esneklik modülü olarak isimlendirilen değerle ilişkilendirmiştir. Esneklik modülü, bir malzemenin tekerrür eden yük altındaki elastiklik modülüdür. Statik bir yükleme yerine tekerrür eden yük uygulanmaktadır. Bu sebeple, esneklik modülü yol üstyapılarının trafik yükleri altındaki davranışını daha iyi göstermektedir. AASHTO, 1993 ve 1998 yıllarında çıkardığı rehberlerle, öncelikle üstyapıların bakım ve onarımı ile alakalı eklemeler yaparak, üstyapı takviye tabakalarının projelendirmesinde malzeme parametresi olarak esneklik modülünü göz önüne almıştır. Günümüzde üstyapı projelendirme metodu olarak, yol performansının üstyapı tabakalarında oluşan gerilme ve yer değiştirmelere bağlı olarak belirlenen mekanik ve deneysel projelendirme yöntemleri üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Bu yöntemde de gerilme ve yer değiştirmelerin hesaplanabilmesi için aynı şekilde esneklik modülüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yönde Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 2008 'de revize edilen, ASSHTO 1993 yöntemini esas alan Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi yayınlanmıştır. Servis kabiliyeti-davranış ilişkisine dayanan bu metot; zemin taşıma gücüne, trafik yüküne, bölge ve iklim koşullarına ve üst yapı tabakalarının özelliklerine bağlı olarak üstyapı tabaka kalınlıklarını verir (Güngör ve Sağlık 2008). Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'nde tüm detaylı hesaplamalar bulunmaktadır.

Güvenilirlik; projesi yapılan üstyapıya ait proje ölçütlerinin, belirlenen proje süresi boyunca, hâkim trafik ve çevre koşulları altında, yoldan beklenen projelendirme şartlarını karşılama olasılığı olup, geleceğe yönelik kabul edilen trafik tahminleri ve servis kabiliyetindeki sapmaların belirli bir sınır içerisinde tutulabilmesi için güvenilirliğin belirlenmesi gerekmektedir. Güvenilirlik seviyesi ve güvenilirliğin standart normal sapması (Z_R) yolun sınıfına bağlı olarak Çizelge 1.13'den seçilmektedir (Güngör ve Sağlık 2008).

Çizelge 1.13. Tavsiye edilen güvenilirlik değerleri (Güngör ve Sağlık 2008)

Yolun Sınıfı	Şartname Güvenilirlik Değeri R %	Standart Normal Sapma Z _R
Otoyollar	95	-1,645
Devlet Yolu	85	-1,037
İl Yolu	70	-0,524

Trafik ve performans tahmininin bileşik Toplam Standart Sapma (S_o) değeri ise öngörülen trafik tahmininin güvenilirliğine bağlı olarak esnek üstyapılar için 0,40-0,50 arasında değişmekte olup, ortalama 0,45 alınır (Güngör ve Sağlık 2008).

Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberinde kum-çakıl alttemel tabakasının minimum kalınlığının 20 cm, kırmataş alttemel tabakasının minimum kalınlığının 15 cm, minimum granüler ve plent-miks temel kalınlığının 15 cm, çimento bağlayıcılı granüler temel kalınlığının 20 cm ve sıcak karışım bitümlü temel kalınlığının ise 8 cm olması gerektiği belirtilmiştir (Güngör ve Sağlık 2008).

Esnek kaplamaların tasarımı için Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberinde Formül 1. 1 kullanılmaktadır (Güngör ve Sağlık 2008).

$$\log(T_{8,2})=Z_R*S_0+9,36\log(SN+1)-0,20+\log[(4,2-P_t)/(4,5-1,5)]/0,40+ \\ [1094/(SN+1)^{5,19}]+2,32*\log M_R-8,07 \quad (1.1)$$

Burada;

T_{8,2} : P_t'ye erişinceye kadar tekerrür edecek standart dingil (8,2 ton) sayısı

P_t : Son servis kabiliyeti

Z_R : Standart normal sapma

S_o : Toplam standart sapma

SN : Üstyapı sayısı (inç)

M_R : Esneklik Modülü (psi)

Üstyapı yeni yapıldığında yolun ilk servis kabiliyeti (P_0) değeri esnek üstyapı projelendirmelerinde genellikle 4,2 olarak alınmaktadır. Üstyapının proje süresi sonunda ulaşması gereken hizmet kabiliyeti, son servis kabiliyeti (P_t) ile tanımlanır. Bu değer Otoyol ve Devlet Yolları için 2,5, İl Yolları için ise 2,0 olarak alınır. Hesaplanan SN'e göre minimum kalınlıklar göz önünde bulundurularak her bir tabaka kalınlığı belirlenir (Güngör ve Sağlık 2008).

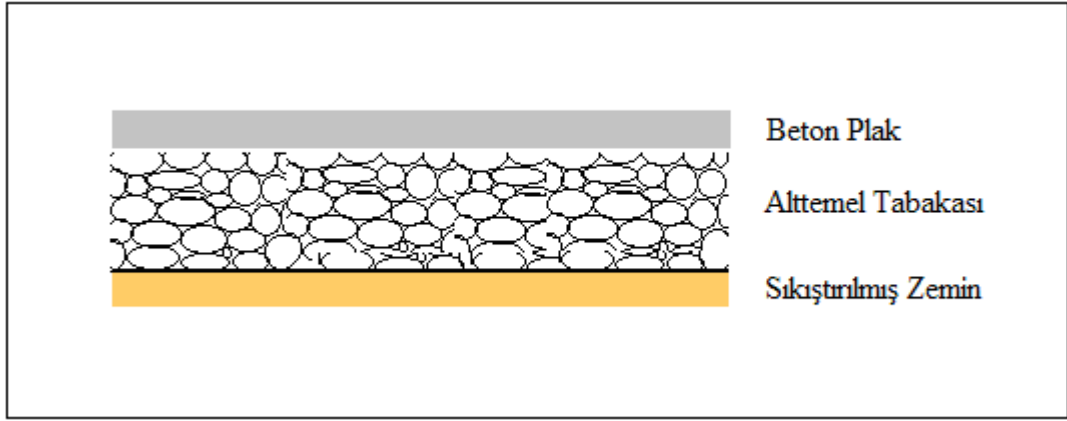
1.2.2. Rijit (beton) üstyapılar

Genel olarak 20 yıllık proje ömrü içinde 8,2 ton standart dingil yükü sayısı 60-75x10⁶'dan fazla olan yollar ve büyük yolcu uçaklarının yıllık 5000'den fazla kalkış yapan havaalanlarının rijit kaplama olarak yapılması hemen hemen bir zorunluluktur. Hatta birçok kurum, yolun trafiğe açıldığında tek yöndeki günlük ticari taşıt sayısının 5.000'den fazla olması halinde beton kaplama yapılmasını öngörmektedir (Tunç 2007).

Yol altyapısı özellikle, ilkbahar ile yağışın fazla olduğu sonbahar mevsimi başlarında genellikle çatlaklardan giren sular nedeniyle kolay deforme olmaktadır. Kaplama tabakasını oluşturan asfalt ise ısınma sonucu yazın en düşük taşıma gücüne sahiptir. Mevsimler arası büyük ısı farkları olan bölgelerde, asfalt kaplamanın viskoelastik davranış sergilemesi nedeniyle, yazın tekerlek izi oluşmasına dayanım gösteren, kışın ise çatlamayan bitümlü bir karışımın oluşturulması, henüz ekonomik olarak başarılammıştır. Rijit üstyapıların, bu tip bölgelerde kullanılması daha uygundur (Macit 2009).

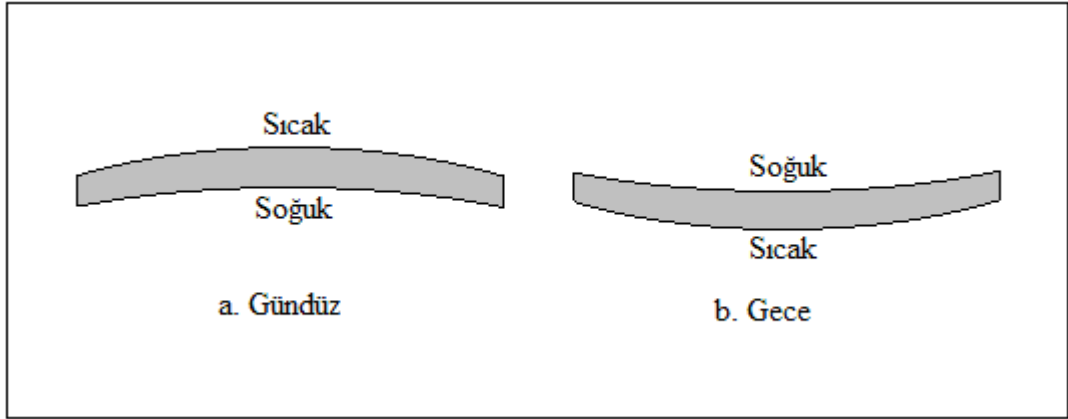
Rijit üstyapı; beton plak ve alt temel tabakasından oluşan bir üstyapı tipidir. Beton kaplamalar trafik yüklerinden dolayı oluşan gerilmelere karşı koymak ve trafik yüklerini zemine aktarmak amacıyla ağır taşıt trafiğinin bulunduğu kısımlarda yapılmaktadır. Beton kaplamalar donatısız, kısmen donatılı veya sürekli donatılı ve ön germeli olarak yapılabilmektedir. Rijit kaplamalarda zeminlerde don kabarması, şişme ve büzülmeleere karşı koymak, kaplama altı drenajı sağlamak, kaplamanın taşıma gücünü artırmak, ağır taşıtların meydana getirdiği pompaj etkisini önlemek ve beton plak için düzgün yüzey

oluşturmak amacıyla beton plağın altına alt temel yapılmaktadır. Rijit plağın Elastisite Modülü, plak altındaki alttemel ve taban zemininkinden çok daha büyüktür. Bu nedenle rijit yol, elastik zemin üzerine oturan bir kiriş şeklinde çalışır. Rijit plak, taban zeminini ile devamlı temas halinde olduğu sürece taşıyıcı eleman vazifesi görmektedir (Tunç 2007). Rijit kaplama tabakaları Şekil 1.16’da görülmektedir.



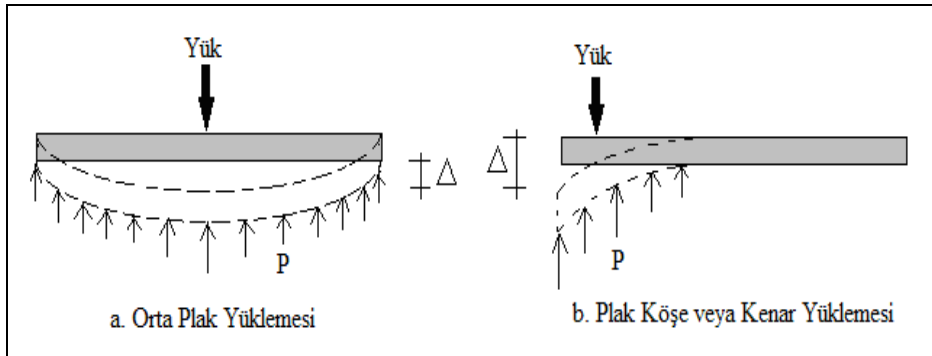
Şekil 1.16. Rijit kaplama tabakaları

Rijit plaklarda derzler özenle yapılmazsa araç geçişi sırasında gürültü yapmakta ve sürüş konforu azalmaktadırlar (Macit 2009). Trafik yüklerinden dolayı rijit kaplamada basınç ve çekme gerilmeleri birlikte oluşmaktadır. Mevsimsel ısı değişiklikleri nedeniyle rijit kaplamada oluşan genleşme veya büzülme etkilerine karşı beton plaklarda genleşme derzleri bırakılır. Rijit plaklar ısı etkisiyle burulmaya uğrarlar. Kaplamanın alt ve üst yüzeyindeki ısı farklarından dolayı, beton kaplamaların kenarları aşağı veya yukarı doğru burulabilir. Beton plağın kenar ve köşelerinde meydana gelen bu burulmalardan dolayı, beton kaplama ile alttemel arasında temas eksikliği oluşur. Bu durum trafik yükü altında eğilme gerilmelerinin artmasına neden olur (Tunç 2007). Isı farkından dolayı rijit plakta oluşan gerilme durumu Şekil 1.17’de görülmektedir.



Şekil 1.17. Isı farkından dolayı rijit plakta oluşan gerilme durumu (Tunç 2007)

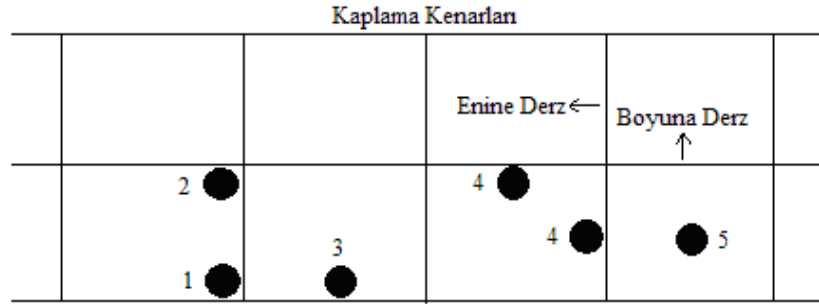
Şekil 1.18’de trafik yükleri altında beton kaplamada meydana gelen defleksiyon ve zemin reaksiyon basıncı görülmektedir.



Şekil 1.18. Beton plakta defleksiyon (çökme) oluşumu (Tunç 2007)

Beton kaplama üzerine etki eden bir teker yükü, plakta eğilme gerilmesi oluşturmaktadır. En yüksek gerilme, teker yükünün kaplama köşesinde olması durumunda, en düşük gerilme ise kaplamanın orta kısmına yükleme durumunda oluşmaktadır. Şekil 1.19’da 1 no.lu noktadaki teker yükü rijit plakta maksimum eğilme-çekme gerilmesi meydana getirmektedir. Aynı teker yüküne sahip 2, 3, 4 ve 5 no.lu noktalarda sırasıyla azalan bir etki göstermektedir (Tunç 2007).

Şekil 1.19’da kaplamanın farklı kısımlarına etki eden teker yükleri görülmektedir.

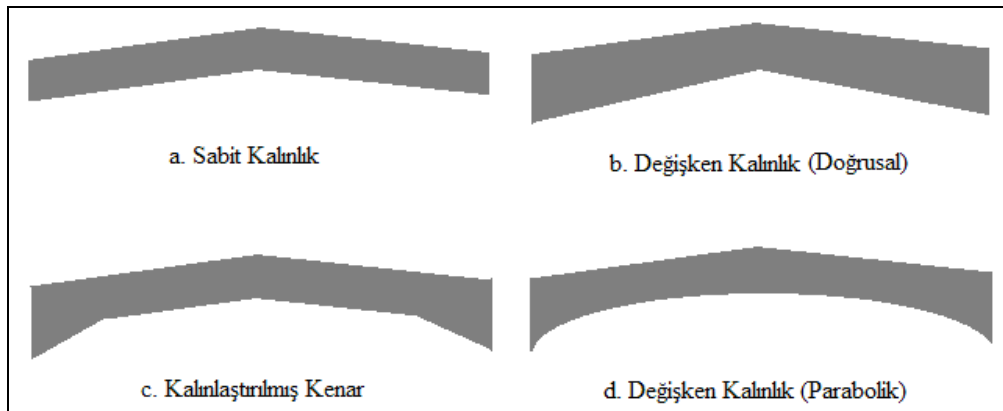


Şekil 1.19. Beton plakta kritik yükleme noktaları (Tunç 2007)

1.2.2.a. Rijit kaplamaların tasarımı

Rijit kaplamaların asfalt kaplamalara nazaran en büyük özellikleri, yüksek basınç dayanımı ve Elastik Modülü, trafik yüklerini zemin üzerinde daha fazla alana yayabilmeleri, ısı-rutubet gibi çevre şartlarından daha az etkilenmeleridir. Rijit kaplama yanında, zeminin taşıma gücü ve alttemelin uygun bir şekilde oluşturulması kaplama tasarımında önemlidir. Alttemel tabakasının en önemli görevi rijit kaplamalardaki pompajı önlemektir. Yatak katsayısı (k) $1,5 \text{ kg/cm}^3$ 'ün altında olan zayıf zeminler üzerine yapılan ve ağır trafik yüklerine maruz beton kaplamalardaki alttemel tabakası çimento karışımı olmalıdır. Çimento katkılı alttemel tabakası 7 günlük serbest basınç mukavemeti $21\text{--}45 \text{ kg/cm}^2$ 'dir (Tunç 2007).

Rijit kaplamalı karayolu en kesit tipleri, Şekil 1.20'de görülmektedir.



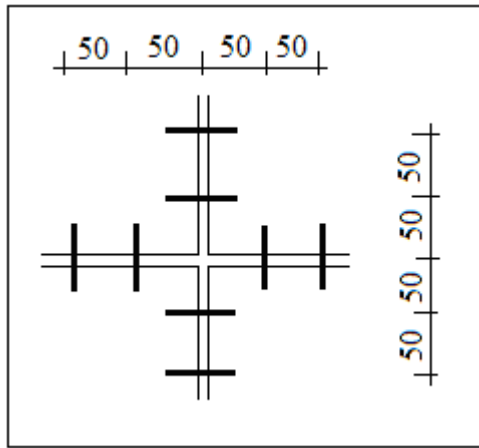
Şekil 1.20. Rijit kaplama yol enkesit tipleri (Tunç 2007)

Rijit kaplamalarda yol çatı eğimi (bombe) karayolları için %2, havaalanları için genellikle %1,5 olarak yapılmaktadır. Genel olarak karayollarında kalınlaştırılmış kenar tipi kesitler, havaalanlarında ise hem sabit hem de değişken kalınlıkta kesitler kullanılmaktadır. Kalınlaştırılmış kenar uzunluğu genellikle yol eksenindeki kalınlığın 1,5 katı olacak şekilde tasarlanmaktadır (Tunç 2007).

Genleşme ve büzülme etkilerini önlemek, beton hacim değişikliği ve kaplamanın alttemel ile sürtünmesinden dolayı meydana gelen gerilmeleri azaltmak amacıyla rijit kaplamalarda uygun aralıklarla derzler yapılmaktadır. Geleneksel rijit kaplamalarda boyuna ve enine olmak üzere iki şekilde derz tasarlanır. Oluşturulan bu derzler demirli veya demirsiz olarak yapılabilir. Boyuna-enine derzler; büzülme ve inşaat derzleri olmak üzere üç farklı tipte inşa edilmektedir. Beton kaplama genişliği 4-5 metreyi geçtiğinde boyuna derz yapılmaktadır. Boyuna derz boyuna çatlakları kontrol altına almak amacıyla, düz ve dişli şekilde inşa edilebilir. Derz kesitlerinde kaplamalar birbirlerine nervürlü bağ donatılarıyla bağlanmaktadır. Rijit kaplamaların yanal hareketleri ve trafik yükleri ile meydana gelen boyuna kayma hareketleri, boyuna derzlerde kullanılan nervürlü bağlantı donatılarıyla önlenmektedir. Donatılar, 60–80 cm boyunda, 14–16 mm çapında ve 100–150 cm aralıklarla yerleştirilmektedir. Enine çatlakları kontrol altında tutmak veya kaplama beton kesitleri arasındaki yük transferini sağlamak amacıyla enine derzler yapılmaktadır. Enine derzler düz ve dişli şekilde tasarlanabilmektedir. Geleneksel rijit kaplamalarda büzülme gerilmeleri dikkate alınarak rijit kaplamalar en fazla 20–25 cm²'lik kısımlar halinde tasarlanmaktadır. Genleşme derzlerinin arası genellikle 25-35 metre arasında değişmektedir. Enine büzülme derzleri demirli veya demirsiz yapılabilir. Demirli yapılması halinde yük transferini sağlamak amacıyla kaplama plakları arasına düz kayma donatıları konur. Kayma donatıları, 100 cm boyunda, 22 mm çapında ve 30 cm aralıklarla döşenmektedir. Kayma donatıları nervürsüz ve plak içerisinde bir ucu serbestçe hareket edebilecek şekildedir. Enine derz aralığı 6 m'den daha az ise demirsiz olarak inşa edilebilmektedir (Tunç 2007). Reaktif Pudra Betonlu (RPB) yol kaplamalarının basınç ve eğilme dayanımları, normal dayanımlı betonların basınç ve eğilme dayanımlarından çok yüksek olduğundan, yol kaplama yapımında derzlere gerek kalmayacağı veya daha fazla kaplama kesit ve

uzunluğunda derzlerin bırakılabileceği beklenmektedir. Bu şekilde sürüş konforu sağlanabilir.

Korumalı beton plak köşeleri Şekil 1.21’de görüldüğü gibi 50 cm aralıklarla 16 mm çapında demirli olarak inşa edilebilmektedir (Tunç 2007).



Şekil 1.21. Rijit plak köşe derz birleşimi (Tunç 2007)

1.2.2.b. Karayolu rijit kaplama tasarımı

Geleneksel rijit kaplamalar donatısız ve derzli, kısmen donatılı ve derzli, sürekli donatılı ve derzsiz olmak üzere üç şekilde inşa edilmektedir. AASHTO karayolu beton kaplama tasarımında yol deney sonuçları ile standart dingil yükü tekerrür sayısının kaplamanın performansına olan etkisi dikkate alınarak geliştirilmiştir. Rijit kaplamanın performansı için AASHTO yol deneylerinden Formül 1. 2’deki eşitlik elde edilmiştir (Tunç 2007).

$$\log W_{8,2} = Z_R S_o + 7,35 \log(D+1) - 0,06 + \log[\Delta PSI / (4,5 - 1,5)] / 1 + [1,624 \cdot 10^7 / (D+1)^{8,46}] + (4,22 - 0,32 P_t) \log(S_c' C_d [D^{0,75} - 1,132] / 215,63 J [D^{0,75} - [18,42 / (E_c / k^{0,25})]]) \quad (1.2)$$

Burada;

- $W_{8.2}$: 8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı
 Z_R : Standart normal sapma
 S_o : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası
 D : Rijit plak kalınlığı, inç
 ΔPSI : $P_0 - P_t$ (Servis kabiliyetinde azalma miktarı)
 P_0 : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi
 P_t : Nihai servis kabiliyeti indeksi
 S_c' : Betonun Kopma Modülü (Eğilmede çekme mukavemeti), psi
 J : Yük transfer katsayısı
 C_d : Drenaj katsayısı
 E_c : Betonun Elastisite Modülü, psi
 k : Yatak katsayısı, psi

Formül 1.2 veya AASHTO tarafından geliştirilen abaklar yardımıyla rijit kaplama kalınlığı kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

Kuloğlu vd (2011) çalışmalarında, deneysel olarak ele alınan parametreler arasında rijit kaplama kalınlığı üzerinde en etkili parametrenin betonun Elastisite Modülü olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle rijit üstyapılarda, tamamen yerli kaynaklarla üretilebilecek beton kalitesinin artırılması ile daha az kalınlıkta beton tabaka veya aynı kalınlıkta daha fazla trafik yükünü karşılayabilecek bir kaplama tipi tasarlanarak ekonomik açıdan kazanç sağlanabilir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Dugat *et al.* (1996) çalışmasında, RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki değişik karışım üzerinde basınç ve eğilme deneyleri yapmışlardır. Ürettikleri RPB200 numunelere, 7 gün 20°C'de su kürü, 4 gün 90°C'de sıcak su kürü ve 2 gün 90°C'de kuru sıcak hava kürü olmak üzere 3 farklı türde kür uygulamışlardır. Ürettikleri RPB800 türdeki betonlara yerleştirme ve sertleşme sırasında 60 MPa basınç, ayrıca RPB800 numunelere 4 gün 90°C sıcak su ve ardından 250°C'de ısıtma işlemi kürü uygulamışlardır. RPB200 numunelerinde basınç dayanımı yaklaşık 200 MPa, eğilme dayanımı ortalama 32 MPa olarak bulunmuştur. RPB800 numunelerinde ise basınç dayanımı yaklaşık 500 MPa, eğilme dayanımı 36 MPa olarak bulunmuştur.

Eren and Çelik (1997) çalışmasında, YDB'nin en önemli olumsuz yönünün, yüksek derecedeki kırılma davranışı olduğu ve bu durumun betona çelik lif (ÇL) eklenerek önlenilebileceği belirtilmiştir. Bunun yanında, YDB'nin çekme ve basınç dayanımı gibi diğer mekanik özelliklerinin de betona ÇL ekleyerek artırılabilirliği belirtilmiştir. Çalışmada iki farklı yüzde oranında silis dumanı (SD) ve üç farklı 30/0,50- 60/0,80 ve 50/0,60 uzunluk/çap (mm/mm), ucu kancalı ÇL kullanılarak, silis dumanının Yüksek Dayanımlı Çelik Lifle Güçlendirilmiş Beton (HSFRC) üzerindeki etkisi incelenmiştir. ÇL'ler betona, beton hacminin %0,5- %1,0 ve %2,0'si olmak üzere üç farklı oranda eklenmiştir. Çalışma sonucunda, çekme dayanımı ve fiber oranı arasında lineer fonksiyon olduğu, ayrıca çekme ve basınç dayanımı arasında da aynı şekilde doğrusal bir fonksiyon olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışma sonucunda, silis dumanının basınç dayanımı üzerinde belirgin etkisi olmasına rağmen, çelik liflerin etkisinin çok daha az olduğu tespit edilmiştir.

Qian and Stroeven (1999) çalışmasında, değişik boyutlardaki çelik liflerin betonun mekanik özelliklerine etkisi belirtilmiştir. Boyut ölçüleri küçük çelik lif eklenmesinin basınç dayanımı üzerinde önemli bir artışa neden olduğu, buna rağmen eğilme dayanımına etkisinin az olduğu, boyut ölçüleri büyük çelik liflerin ise tam tersi mekanik etkiler oluşturduğu ifade edilmiştir.

Balendran *et al.* (2001) çalışmasında, farklı beton tipli ve farklı boyutlardaki betonların mekanik performansının iyileştirilmesinde çelik lif eklenmesinin sonuçlarını araştırmak için yapılan bir takım deneylerin sonuçları irdelenmiştir. Çalışmada çelik lifli ve çelik lifsiz hafif agregalı ve kalker agregalı olmak üzere iki tip beton kullanılmıştır. Oluşturulan betonların basınç dayanımı 90 MPa ile 115 MPa arasında değişmektedir. Betonlardaki çelik lif miktarı hacimce %1 oranında alınmıştır. Çalışma sonucunda, betona katılan düşük miktardaki çelik liflerin, betonun basınç dayanımını çok az etkilediği, buna karşın betonun eğilme dayanımı ve dayanıklılığını önemli miktarda artırdığı belirtilmiştir.

Yerlikaya (2002) çalışmasında, çelik liflerle donatılmış betonun maliyetinin az olması, işlenebilirliğinin kolay olması ve teknik üstünlüklerinden dolayı, günümüzde yol ve köprü kaplamalarında kullanılmaya başladığını belirtmiştir. Bu çalışmada, Çelik Tel Donatılı Betonların (ÇTDB) özellikleri, uygulama alanları ve tasarım ölçütleri anlatılmıştır.

Çivici (2002) çalışmasında, çelik liflerin, park sahalarında, köprü tabliye betonlarında, havaalanı kaplamalarında, zayıf zeminler ve erozyona maruz kesimlerde sıkça kullanıldığı belirtilmiştir.

Çivici (2004) çalışmasında, betona çelik lif ilave edilmesi sonucu oluşan sünek davranış sergilemeyle, ani yüklemelere ve deprem anında meydana gelebilecek yüklere karşı istikrarlı bir davranış sağlanabileceği ifade edilmiştir.

Song and Hwang (2004) çalışmasında, beton içerisine çelik liflerin ilave edilmesiyle düşük çekme dayanımına sahip YDB'un kırılma dayanımının önlenebileceği belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada yüksek dayanımlı çelik lifle güçlendirilmiş betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu özellikler, betonun çekme dayanımı, basınç dayanımı, kırılma modülü ve dayanıklılık indeksini içermektedir. Çelik lifler beton hacminin %0,5; %1, %1,5 ve %2,0 oranlarında karışıma katılmıştır. %1,5 lif kullanılan betonda %15,3 iyileşmeye karşılık gelen maksimum beton basınç dayanımı elde edilmiştir.

Khaloo and Afshari (2004) çalışmasında, çelik lifle güçlendirilmiş 28 adet beton döşeme deneyi yapılarak, çelik liflerdeki uzunluk ve hacimsel miktarların, farklı dayanımlarına sahip beton döşemelerin enerji soğurmaları ile ilgili etkisi incelenmiştir. Çalışmada çelik lif uzunlukları ve hacimsel lif oranları değişken parametreler olarak göz önüne alınmıştır. Çalışma sonucunda, daha uzun ve hacimsel olarak daha fazla çelik lif içeren numunelerin daha fazla enerji soğurduğu belirtilmiştir.

Düzgün (2004) çalışmasında, dayanım olarak RPB500 beton üretimi hedeflenmiştir. Karışım hazırlandıktan sonra, 10 dakika süren bir karıştırmadan sonra kalıplara dökülmüştür. Kalıplar 2,5 MPa eksenel basınç kuvveti altında tutulmuştur. Numunelere, priz sonrası kür uygulanmıştır. Çalışma sonucunda 200 MPa'ın üzerinde bir basınç dayanımı elde edilerek RPB'un üretilebilir olduğu belirtilmiştir. Daha gelişmiş deney düzenekleri ve ortam koşulları ile daha yüksek dayanım değerlerine ulaşılabilmektedir.

Chan and Chu (2004) yılı çalışmasında, RPB matrisinde silis dumanı içeriğini, %0 ile %40 arasında karışım oranlarında kullanmışlardır. RPB matrisine yapışma özellikleri açısından uygun silis dumanı içeriğinin %20 ve %30 arasında olduğunu göstermişlerdir.

Talebinejad *et al.* (2004) çalışmalarında, süperakışkanlaştırıcı miktarı, su/çimento (w/c) oranı ve çimento miktarının etkisi ile silis dumanı içeriğinin RPB'nin nihai basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. En iyi sonucu veren karışımın birim ağırlığı 2400 kg/m³ ve basınç dayanımı 300 MPa olarak bulunmuştur. Kür koşulları 20°C ile değişik gün ve sürelerde 90°C olarak farklı uygulanmıştır. En iyi silis dumanı içeriği %25 olarak bulunmuştur. En iyi kür tipi, 7 gün 20°C daha sonra 2 gün 90°C suda ve son olarak da 2 gün 200°C'lik kuru hava olarak belirlenmiştir.

Rougeau and Borys (2004) çalışmalarında, yüksek performanslı ve ultra yüksek performanslı betonlarda, silis dumanı yerine ince taneli malzeme olarak, toz haline getirilmiş mikro boyutta kireçtaşı, silis taşı ve uçucu kül gibi malzemeler kullanmıştır. Bu betonlar üzerinde basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapmışlardır. Silis dumanı

içerikli numunenin basınç dayanımı 200 MPa olurken diğer malzemeler ile üretilen numunelerin basınç dayanımı 150 MPa civarında olmuştur. Silis dumanı içerikli numunelerin eğilme dayanımı 29 MPa olurken diğer malzemeler ile üretilen numunelerin eğilme dayanımı 25 MPa civarında çıkmıştır.

Topçu ve Karakurt (2005) çalışmalarında, hazırladıkları RPB karışımına, kalıp içerisinde 2,5 MPa aksenal basınç kuvveti altında, beton sertleşene kadar sıkıştırma basıncı uygulanmıştır. Kalıplardan çıkarıldıktan sonra numunelere 7 gün süreyle 90°C sıcak su kürü, ardından 7 gün süreyle 250°C'de buhar kürü uygulanmıştır. Kür sonrası numunelere basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda 253,2 MPa basınç dayanımı ve 63,67 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir.

Altoubat *et al.* (2006) çalışmasında, donatısız betona lif eklenmesinin yol betonlarının eğilme kapasitesini artıracığı belirtilmiştir.

Yazıcı (2007) çalışmasında, toz hale getirilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanını Portland çimentosuna katarak bir çalışma yapmıştır. Uçucu kül ile yüksek fırın cürufu, çimento ile %0-20-40-60-80 oranlarında yer değiştirmiştir. Bazalt ve kuvars tozu, karışımlarda agrega olarak kullanılmıştır. Üç farklı kür yöntemi (Standart, otoklav ve buhar kürü), örneklere uygulanmıştır. Standart su kürü içerisinde 28 gün, otoklav kürü 210°C sıcaklıkta 2,0 MPa buhar basıncında 8 saat, 16 saat ve 24 saat olmak üzere 3 farklı sürede, buhar kürü ise 90°C sıcaklıkta basınçsız ve 6 ile 12 gün olmak üzere iki farklı sürede, numunelere uygulanmıştır. Deney sonuçlarında, bu karışımların basınç dayanımı, 170 MPa'ın üzerine çıkmıştır. Bu karışımların RPB'de kullanılabileceği ifade edilmiştir.

İpek (2009) çalışmasında, RPB'a %4 lif katarak, farklı sürelerde ve sıcaklıklarda kür işlemleri uygulanmış ve en iyi kür işleminin, 3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 300°C etüv kürü olduğu görülmüştür. Eğilme numunelerine uygulanan 5, 10, 15, 20, 25 MPa'lık sıkıştırma basınçlarında ise eğilme parametrelerinde de önemli artışlar

meydana getirdiği, 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'un eğilme dayanımında %34 artış olduğu belirtilmiştir.

Yazıcı *et al.* (2009) çalışmalarında, kür yöntemlerinin RPB'un mekanik performansına etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmada 0,18 su/çimento oranlı, beton hacminin %3'ü oranında çelik lif içeren RPB'un farklı tip kürler altında mekanik performansları incelenmiştir. Çalışmada, 2 günlük su kürü sonrası 163 MPa basınç dayanımı, 28 günlük su kürü sonrası 202 MPa basınç dayanımı, 3 gün 100°C buhar kürü sonrası 255 MPa basınç dayanımı, 210°C sıcaklıkta, 8 saat ve 2 MPa sıkıştırılmış buhar basıncı altında otoklav kürü sonrası 273 MPa basınç dayanımı bulunmuştur. Bunun yanında, 40 MPa'a varan eğilme dayanımı sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, buhar ve otoklav kürlerinin sadece betonun dayanım kazanma hızını artırmakla kalmadığı, aynı zamanda 28 günlük su kürü ile elde edilen beton dayanımının birkaç günde elde edildiği belirtilmiştir. Bunun nedeninin, su küründe hidratasyona girmeyen karışımdaki kuvars tozlarının, ısı işlem ile hidratasyonu desteklemesi sonucu meydana geldiği belirtilmiştir.

Tanyıldızı (2010) tez çalışmasında, rijit üstyapıların, teknik ve ekonomik üstünlükleri ile karayollarındaki uygulamaları incelenmiş ve yol üstyapısının projelendirilmesinde kullanılan AASHTO metodundaki parametrelerin rijit üstyapı beton kaplama kalınlığını ne ölçüde etkilediği araştırılmıştır. Sonuçta, rijit üstyapıların projelendirilmesinde en çok dikkat edilmesi gereken parametrenin, betonun elastisite modülü (E_c) olduğu belirtilmiştir.

Kuloğlu vd (2011) çalışmalarında, yük transfer katsayısı $J=3,2$; drenaj katsayısı $C_d=1,0$ ve servis yeteneği kaybı $\Delta PSI= 2$ olarak alınmış, rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı D 'nin, $W_{8,2}$, k , S_o , Z_R , E_c ile değişimini incelemiştir. Ele alınan parametreler arasında rijit kaplama kalınlığı üzerinde en etkili parametrenin betonun elastisite modülü olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle rijit üstyapılarda kullanılacak beton kalitesinin artırılması ile daha az kalınlıkta beton tabaka imal edilebileceğinden veya aynı kalınlıkta daha fazla

trafik yükünü karşılayabilecek bir kaplama tipi tasarlanarak, tamamen yerli kaynaklarla üretilen kaliteli betonlar ile ekonomik açıdan önemli bir kazanç sağlanabilir.

Yiğiter *et al.* (2012) çalışmalarında, düşük çimento içerikli reaktif pudra betonu (RPB) üretmeyi amaçlanmıştır. RPB üretiminde üç farklı kür koşulu (standart su kürü, otoklav kürü ve buhar kürü) uygulanmıştır. Karışımların basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda 200 MPa basınç dayanımlı RPB beton üretilmiştir.

Tam *et al.* (2012) çalışmasında, RPB’de 45 ile 600 mikron arasında değişen parçacık boyutları olan kuvars kumu ve ezilmiş kuvars gibi ince ebatlı tozlar kullanıldığını, RPB kuruma büzülmesi ve su geçirgenliğinin su, bağlayıcı ve süperakışkanlaştırıcı miktarı ile ilişkilerini incelemektedir. Çalışma sonuçlarına göre su/çimento oranı azaldıkça RPB su geçirgenliği azalmaktadır. Basınç direnci ve RPB geçirgenliği arasında ters bir ilişki vardır. RPB basınç mukavemeti arttıkça su geçirgenliği azalmaktadır.

Na-Hyun *et al.* (2012) yılı çalışmasında, RPB’un terör saldırıları ya da kaza sonucu darbeler ve patlamaya karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastik modülü ve eğilme mukavemet testleri yapılmıştır. Sonuçlar RPB’un, normal dayanımlı betona göre daha iyi direnç gösterdiğini ortaya koymuştur.

Yazıcı *et al.* (2013) çalışmasında, Reaktif Pudra Betonun (RPB) mekanik özellikleri (basınç ve eğilme mukavemeti) otoklav kür altında incelenmiştir ve standart su kür durumu ile karşılaştırılmıştır. RPB basınç dayanımı önemli ölçüde standart su kürüne göre otoklav sonrası artmaktadır. Otoklav kürü; zaman, sıcaklık ve basınç da RPB’un mekanik performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

Ramyar (2013) çalışmasında, betonda bulunan nemin, ASR jelinin genişlemesini sağlama bakımından önemli olduğunu, nemin ve alkali içeren çözeltilerin beton içerisine ilerleyişini önlemek için, su/bağlayıcı oranını düşürmek ve yeterli sürede uygun bir kür rejimi uygulayarak, beton geçirimsizliğinin azaltılmasının en basit yöntem

olduğunu belirtmiştir. RPB’da su/bağlayıcı oranının çok düşük olup ortalama 0,13-0,15 arasındadır. RPB’da sıkı beton yapısı ve düşük su/bağlayıcı oranının, betonun ASR genleşmesini azalttığı söylenebilir.

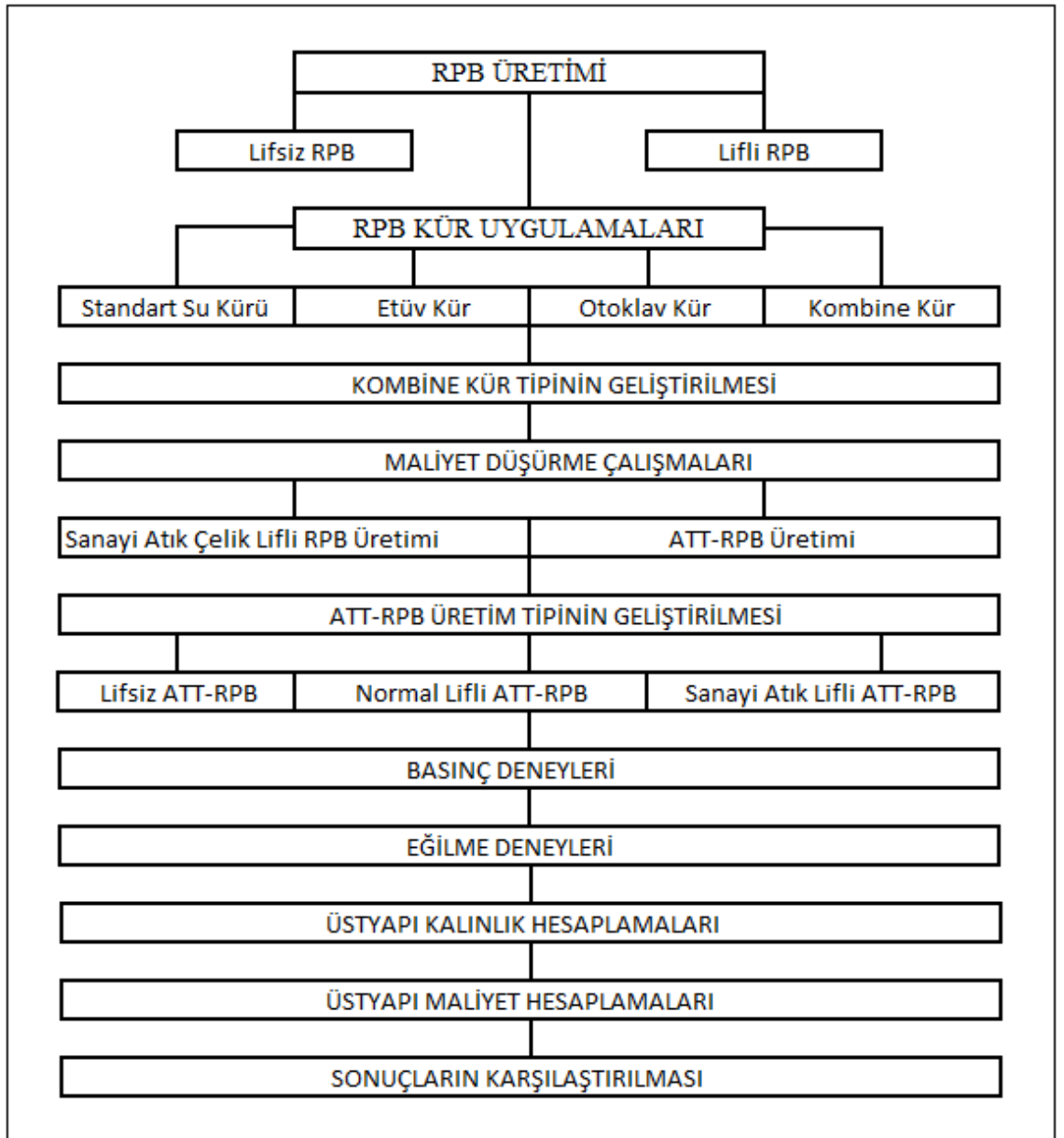
Işık *et al.* (2015) alışmasında, bina ve rijit yol kaplamaları için RPB retiminde proklastik kayaçların kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada proklastik kayaç agregası olarak Ahlat Taşı (AT) kullanılmıştır. Doğal taş halindeki AT kontrol numunesi olarak, lifli ve lifsiz Reaktif Pudra Beton (RPB) numunelerinde ise doğal haldeki AT, rotorlu öğütücüde 0,1-0,6 mm ebatlarında kırılarak kum agregası olarak kullanılmıştır. Hazırlanan kontrol ve RPB numunelerine basınç testleri uygulanıp dayanımları karşılaştırılarak, AT’nin bina ve rijit yol RPB kaplama inşasında agrega olarak kullanılabilirliği ifade edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

RPB üretiminde maliyeti artıran en önemli iki malzeme çimento ve çelik liflerdir. RPB maliyet düşürme çalışmalarında, karışımda kullanılan çimento miktarını düşürmek amacıyla, çimento ile birlikte ikameli olarak Ahlat Taşı Tozu (ATT) ve kireç kullanılmıştır. RPB üretimlerinde ATT malzemesi ilk defa bu çalışmada denenmiştir. Lifli RPB üretiminde maliyeti en yüksek olan malzemeyi çelik lifler oluşturmaktadır. RPB maliyet düşürme çalışmalarında, normal fabrikasyon ürünü çelik lifler yerine sanayi atığı çelik lifler kullanılmıştır.

Çalışmada ATT içerikli RPB üretimi (ATT-RPB) geliştirilmiştir. ATT-RPB üretimleri çelik lifsiz, normal çelik lifli, sanayi atığı çelik lifli olarak farklı tiplerde yapılmıştır. Çalışmada standart su kürüne alınan tüm RPB üretimler “geleneksel üretim”, kombine kür gibi yüksek ısıllı işlemlere alınan üretimler “prefabrik üretim” olarak isimlendirilmiştir. Standart su kürü 20°C ısıda yapılmakta olup bu değer üzerinde yüksek ısıllı işlem uygulanmamaktadır. Sadece standart su kürü görmüş tüm RPB numuneler geleneksel üretim kapsamında değerlendirilmiştir. Geleneksel üretim denilmesindeki amaç bu tip RPB’ların yol inşaat sahasında üretilebileceğini belirtmek içindir. Yüksek ısıllı işlem gerektiren RPB üretimleri ise yol inşaat sahasında beton dökümü sırasında yapılamadığından ve fabrikada önceden üretilerek inşaat sahasına taşındığından prefabrik üretim olarak isimlendirilmiştir. ATT-RPB üretimlerine “çimento oranı düşürülmüş RPB” ismi verilmiştir. ATT-RPB üretimlerinden standart su kürüne alınan tüm RPB üretimlere “çimento oranı düşürülmüş geleneksel RPB” denilmiştir. Kombine kür gibi, standart su kürü sonrası yüksek ısıllı işleme alınan ATT-RPB üretimleri ise “çimento oranı düşürülmüş prefabrik RPB” olarak isimlendirilmiştir. İçerisindeki lif durumuna göre, lifsiz, normal çelik lifli ve sanayi atığı çelik lifli gibi farklı isimlendirmeler yapılmıştır. Örneğin ATT-RPB üretimi sadece standart su kürüne alınmış ve içerisinde lif yoksa bu karışıma “çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB” denilmiştir. Üretimden sonra bu numunelere değişik kür tipleri uygulanmıştır. Kombine kür tipinde 9 farklı kür tipi geliştirilerek maksimum basınç ve eğilme dayanımını veren kür tipi belirlenmiştir. Tüm RPB numunelerin basınç ve eğilme

dayanımları deneysel olarak, yol üstyapı kalınlık ve maliyetleri ise hesaplama yöntemiyle yapılarak, RPB yol üstyapıları hem kendi aralarında hem de eşit trafik yükü altında C30/37 normal dayanımlı beton (kontrol numunesi) kaplamalı üstyapı ve BSK kaplamalı esnek üstyapı ile karşılaştırılmıştır. Çalışma programı Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Çalışma programı

3.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler

Çalışmada tüm üretimlerde kullanılan karışım malzemeleri ve özellikleri bu kısımda belirtilmiştir.

3.1.1. Lifsiz RPB üretim malzemeleri

Bu çalışmada TS EN 197-1 standartlarına uygun ve TS EN ISO 9001:2008 kalite yönetim sistem uygunluğuna sahip, CEM II / A-M (P-L) 42,5 R türü çimento kullanılmıştır. CEM II / A-M (P-L) 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM II / A-M (P-L) 42,5 R çimento kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler %	
SiO ₂	19,98
Al ₂ O ₃	4,73
Fe ₂ O ₃	2,69
CaO	61,48
MgO	2,41
SO ₃	2,58
Kızdırma Kaybı	4,2
K ₂ O	0,55
Na ₂ O	0,29
Cl	0,01

CEM II / A-M (P-L) 42,5 R fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. CEM II / A-M (P-L) 42,5 R çimento fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,10
Özgül Yüzey (cm ² /g)	4490
Priz Başı (dk)	175
Priz Sonu (dk)	270
Basınç Dayanımı 2 Gün (MPa)	25,9
Basınç Dayanımı 28 Gün (MPa)	57,2

Silis dumanı, kuvars kum ve pudrası, İksa İnşaat Katkıları San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Silis dumanı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Silis dumanı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	
Madde	Miktar (%)
SiO ₂	94,17
Al ₂ O ₃	0,70
Fe ₂ O ₃	0,43
CaO	0,67
MgO	1,23
SO ₃	0,57
>45 µm	0,79
Kızdırma Kaybı	0,77
Birim hacim (gr/cm ³)	0,45
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,25
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	200000

Kuvars kumunun fiziksel özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kuvars kumu fiziksel özellikleri

Özellik	0.15–0,6 mm Kuvars Kumu
Birim hacim (gr/cm ³)	1,60
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,68
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	150

Kuvars pudrasının fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kuvars pudrası fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bileşen	Kuvars pudrası %
SiO ₂	99,20
Al ₂ O ₃	0,5
Fe ₂ O ₃	0,03
TiO ₂	0,02
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,34
İncelik (µm)	<45
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,70

Süperakışkanlaştırıcı olarak İksa İnşaat Katkıları San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen Polycar-300 kullanılmıştır. Polycar-300 süperakışkanlaştırıcı özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Polycar 300 süperakışkanlaştırıcı özellikleri

Özellik	Değerler
Görünüm	Sıvı
Renk	Açık kahve renkli
Yoğunluk	1,1 kg/L
pH	4.00–5.50
Klorür içeriği	< %0,1 (TS EN 480–10)

Polycar-300, polikarboksilat tabanlı yüksek oranda su azaltıcı, mukavemet artırıcı, işlenebilirlik süresi uzun, RPB uygulamaları için geliştirilmiş süperakışkanlaştırıcı beton katkı maddesidir. Çimento miktarına göre; erken mukavemetli beton için kütlece %1,2–3,0, akıcı betonlar için %0,8–1,2, Plastik betonlar için %0,8–1,5 ve kompakt betonlar için en az %0,5 oranlarında kullanılır. En uygun karışım miktarı; istenilen çalışabilirlik ve mukavemetle ilgili olarak şantiye şartlarında yapılacak ön denemelerle tespit edilir. Beton karışım malzemeleri ve suyun %70'i ilave edilip, homojen bir karışım elde edildikten hemen sonra kalan su ile birlikte ilave edilir. İstenilen işlenebilirlik elde edilene kadar karıştırmaya devam edilir. SD, uçucu kül gibi malzemelerle uyumludur (İksa 2014).

Deneyleerde, içilebilir nitelikte Bitlis şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.2. Lifli RPB üretim malzemeleri

Lifli RPB üretiminde, lifsiz RPB üretiminde olduğu gibi Bölüm 3.1.1'deki malzemeler aynı şekilde kullanılmıştır. Lifli RPB üretiminde bu malzemelere ek olarak sadece çelik lifler bulunmaktadır. Çelik lif fotoğrafı **EK 3, Şekil Ek 1.6'**da gösterilmiştir.

Lifli RPB üretiminde kullanılacak çelik lifler, Polipropilen Elyaf San. ve Dış Tic. Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Çelik lifler 22 mm uzunluğunda 0,55 mm çapındadır. Üretici firma tarafından çelik liflere ait fiziksel ve mekaniksel özellikler Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. RPB üretiminde kullanılan çelik fiber teknik özellikleri

Lif Tipi	Çap (mm)	Boy (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
Çelik Fiber	0,55	22	40	>350	7,40

3.1.3. Kontrol numunesi beton üretim malzemeleri

Kontrol numunesi beton üretiminde TS EN 197–1 standartlarına uygun ve TS EN ISO 9001:2008 kalite yönetim sistem uygunluğuna sahip, CEM II / A-M (P-L) 42,5 R türü çimento, agrega olarak kırmataş kalker ve beton karma suyu için içilebilir nitelikte Bitlis şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Kırmataş kalker agregası, Bitlis şehir merkezinde faaliyet gösteren Şark Mermer İnş. Tur. San. ve Tic. Ltd. Şti'den temin edilmiştir.

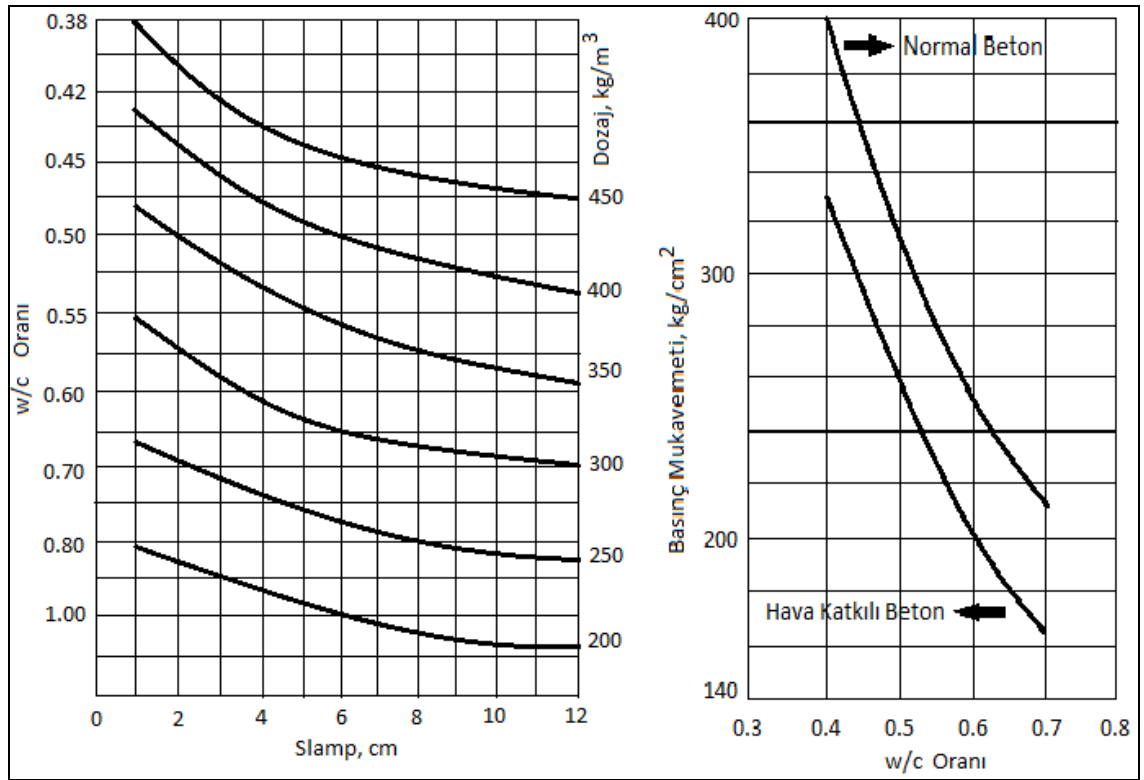
Çimento hamurunun görevi, agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak agregaların yapışmasını sağlamak ve boşlukları doldurmaktır. Beton içerisindeki malzemelerin %70-75'i agregalardan oluşmaktadır.

Kaplama betonu için maksimum su/bağlayıcı (w/c) oranı 0,40-0,45, minimum basınç dayanımı 280 kg/cm², minimum eğilme dayanımının 45 kg/cm² ve minimum çimento miktarının 270-335 kg/m³ ölçütleri esas alınmaktadır (Tunç 2007). Kaplama betonu için tavsiye edilen çökme (slamp) değeri Çizelge 3.8'e göre 3 cm alınabilir. Çizelge 3.8'de tavsiye edilen slump değerleri görülmektedir.

Çizelge 3.8. Tavsiye edilen slump değerleri (Tunç 2007)

Beton Cinsi	Slamp (Çökme) Değeri, cm	
	Minimum	Maksimum
Kaplama, Prekast, Silindir Betonu	1-2	3-4
Kütle Betonu	2,5	5,0
Betonarme Betonu		
Çok Donatılı	2,5	10,0
Az Donatılı	2,5	7,5

Şekil 3.2'de w/c değeri 0,42 ve 3 cm. slamp için çimento miktarı 450 kg/m^3 ve w/c oranına göre yaklaşık su miktarı 189 kg/m^3 bulunur.



Şekil 3.2. Slamp-w/c-dozej ve w/c-mukavemet ilişkisi (Tunç 2007)

Şekil 3.2’de 0,42 w/c oranı için karışım tasarım hedef mukavemeti 380 kg/cm^2 (38 MPa) bulunur. Çizelge 3.9’da ise beton basınç dayanımlarına göre yaklaşık w/c oranları görülmektedir. Kaplama betonunda maksimum w/c oranı 0,40-0,45 arası olması istendiğinden, w/c oranı 0,42 olan hava sürüklenmemiş beton için 28 günlük basınç dayanımı 40 MPa olan ortalama hedef basınç dayanımı bulunur.

Çizelge 3.9. Beton basınç dayanımlarına göre yaklaşık su/çimento oranları (TS802 2009; Dal vd 2013)

Basınç Dayanımı (28 Gün) 150x300 mm Silindir (MPa)	Su/Çimento Oranı	
	Hava Sürüklenmemiş Beton	Hava Sürüklenmiş Beton
15	0,79	0,70
20	0,69	0,60
25	0,61	0,52
30	0,54	0,45
35	0,47	0,39
40	0,42	0,33
45	0,37	0,29
50	0,33	0,25

Çizelge 3.10’a uygun olarak ortalama hedef basınç dayanımı göz önüne alınarak kontrol numunesi beton sınıfı C30/37 alınmıştır.

Çizelge 3.10. Beton sınıflarına göre karışım hesabında esas alınacak hedef basınç dayanımları ile deney numunelerinin sahip olması gereken ortalama basınç dayanımları (TS802 2009; Dal vd 2013)

Beton Sınıfı	Karakteristik Basınç Dayanımı (MPa)		Hedef Basınç Dayanımı (MPa)	
	Karakteristik Silindir (150x300) mm Basınç Dayanımı	Eşdeğer Küp (150x150x150) mm Basınç Dayanımı	(150x300) mm Silindir	(150x150x150) mm Küp
C30/37	30	37	36	43

Elek analizi için gerekli olan agrega miktarı Çizelge 3.11’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.11. Normal agregalar için deney numunelerinin kütlesi (TS EN 933-1 2012; Dal vd 2013)

Agrega Tane Büyüklüğü (D) (en çok) mm	Deney için Gerekli Numune Miktarı (en az) kg
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
< 4	0,2

Kontrol numunesi elek analizi TS EN 933-1 standardına göre yapılmıştır. Elek analizi için TS EN 933-1’de belirtildiği gibi kontrol numunesindeki en büyük agrega dane boyutu 16 mm göz önüne alınarak 3 kg numune alınmıştır. Çizelge 3.12’ye göre $d_{max}=16$ mm için hava miktarı %2 oranında alınmıştır.

Çizelge 3.12. Tahmini karma suyu ihtiyacı ve hava miktarı (Tunç 2007)

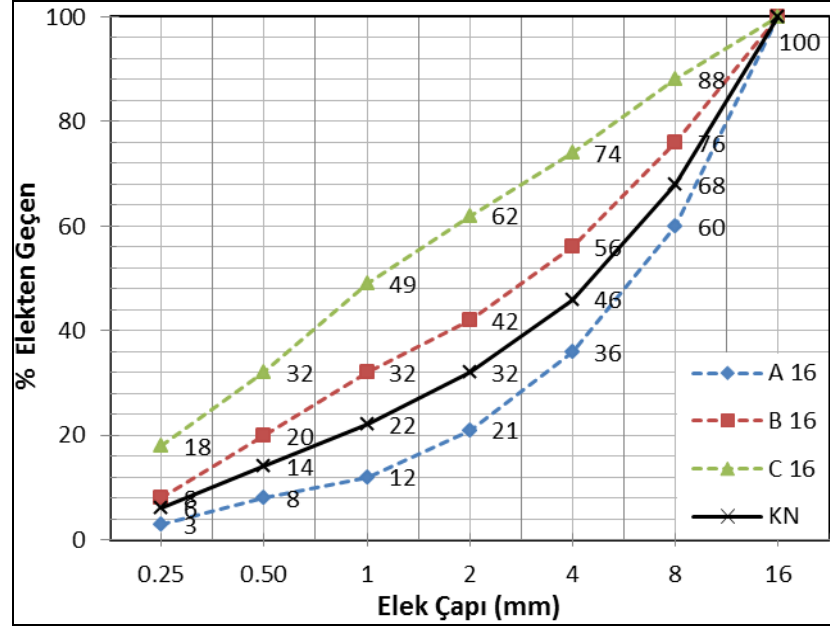
Slamp (cm)	Maksimum Agregaya Boyutu (mm) İçin Karma Suyu İhtiyacı (kg/m^3)											
	Hava Katkısız Betonlarda						Hava Katkılı Betonlarda					
	10	12,5	20	25	40	50	10	12,5	20	25	40	50
2-5	210	200	185	180	165	155	180	175	165	160	150	140
7,5-10	230	215	200	195	180	170	200	195	180	175	165	155
15-17,5	245	230	215	200	185	180	215	205	195	185	170	165
Hava (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	8	7	6	5	4,5	4

Kontrol numunesi elek analizi Çizelge 3.13’de görülmektedir.

Çizelge 3.13. Kontrol numunesi elek analizi

Elek Çapı (mm)	Elek Üzerinde Kalan Ağırlık (gr)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık (gr)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık (%)	Elek Altında Kalan (%)
16	-	-	-	100
8	960	960	32	68
4	660	1620	54	46
2	420	2040	68	32
1	300	2340	78	22
0,5	240	2580	86	14
0,25	240	2820	94	6

Kontrol numunesi elek analiz grafiği Şekil 3.3’de görülmektedir. Şekil 3.3’de görüldüğü gibi kontrol numunesi agrega granülometrisi TS802’ye uygundur.



Şekil 3.3. C30/37 NDB kontrol numunesi elek analiz grafiği

3.2. RPB Karışım Oranları

RPB’larda kullanılan  imento miktarına göre diğer malzeme miktarları ağırlıkça oranlandırılır. Çimento miktarına göre diğer malzemeler bu oranın ağırlıkça yüzdeleri Şeklinde dilimlere ayrılır ve karışım oluşturulur. Literatür incelemeleri sonucunda RPB üretimlerinde kullanılan  imento miktarının genel olarak 900–1000 kg/m³ arasında olduğu, 1 m³ RPB200’de kullanılan  imento miktarının ortalama 950 kg, 1 m³ RPB800’de kullanılan  imento miktarının ise ortalama 980 kg olduğu söylenebilir.

RPB’ların karışım tasarımı için; bu çalışma kapsamında yapılan araŐtırmalara göre yerli ve yabancı herhangi bir standarta rastlanılmamıştır. Karışımı oluşturan taneli malzemelerin sıkı bir yapı oluşturacak Şekilde oranlanması için farklı karışım teorileri kullanılmıştır (İpek 2009). Bu teoriler, Mooney’in süspansiyon viskozite modelinden türemiştir (Larrard and Sedran 1994; İpek 2009).

Mooney'in modelinden faydalanılarak ortaya çıkan farklı karışım tasarımlarında, genel olarak kullanılan karışımlar 1 birim cinsinden Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

3.2.1. RPB200 karışım oranları

Çizelge 1.1'de görüldüğü gibi RPB200 üretiminde karışım modeli 4 şekilde oluşturulmaktadır:

- A. Karışımında çelik lif ve pudra olmaması durumu (lifsiz-pudrasız)
- B. Karışımında sadece çelik lif olmaması durumu (lifsiz-pudralı)
- C. Karışımında sadece pudra olmaması durumu (lifli-pudrasız)
- D. Karışımında çelik lif ve pudra olması durumu (lifli-pudralı)

Çalışmada beton yol kaplaması için, aşağıda hesaplama detayları verilen, 2388 kg/m^3 birim ağırlığa sahip lifsiz-pudralı ve lifli-pudralı olmak üzere iki tip RPB200 cinsi kompozit beton numuneleri üretilmiş ve bu numunelerin basınç ile eğilme deneyleri yapılmıştır. Kompozit RPB'lar hem kendi aralarında hem de kontrol numunesiyle karşılaştırılmıştır.

A. Karışımında çelik lif ve pudra olmaması durumu (lifsiz-pudrasız);

Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, hesaplamalarda kolaylık sağlaması amacıyla toplam karışım ağırlığı ile çimento miktarı arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde formül haline dönüştürülmüştür:

$$1 \text{ m}^3 \text{ RPB Karışım Ağırlığı (kg)} = 2,516 \times 1 \text{ m}^3 \text{ RPB Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.1)$$

1 m^3 RPB200 karışım ağırlığı 2388 kg ise, bu karışımında kullanılacak çimento miktarı Formül 3.1'den $2388 / 2,516$ oranı sonucu yaklaşık 949 kg olacaktır. Çimento miktarı

949 kg bulunduktan sonra karışım oranlarına göre karışımda kullanılacak diğer malzeme miktarları belirlenir.

Çizelge 1.1’de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, lifsiz ve agrega tozu (pudrası) kullanılmayan RPB200 üretiminde silis dumanı çimento miktarının ağırlıkça %25’i, kum içeriği çimento miktarının ağırlıkça %110’u, süper akışkanlaştırıcı çimento miktarının ağırlıkça %1,6’sı, karıştırma suyu çimento miktarının ağırlıkça %15’i oranında hazırlanarak karışım oluşturulur.

1 m³ RPB karışımında kullanılacak 949 kg çimento miktarına göre diğer karışım malzeme ve karışım oranları Çizelge 3.14’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.14. Çelik lifsiz ve pudrasız RPB200 karışım oranları

Malzemeler	Hesaplama Yöntemi	Hesaplama Sonucu Bulunan Malzeme Miktarı (kg/m ³)
Çimento	2388 / 2,516	949
Silis Dumanı	949 x 0,25	237
Kum (0,15-0,6 mm)	949 x 1,10	1 044
Pudra (d ₅₀ =0,01 mm)	-	-
Süperakışkanlaştırıcı	949 x 0,016	15
Çelik Lifler (L=12 mm)	-	-
Su	949 x 0,15	143
TOPLAM		2388

B. Karışımda sadece çelik lif olmaması durumu (lifsiz-pudralı);

Çizelge 1.1’de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, hesaplamalarda kolaylık sağlaması amacıyla toplam karışım ağırlığı ile çimento miktarı arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde formül haline dönüştürülmüştür:

$$1 \text{ m}^3 \text{ RPB Karışım Ağırlığı (kg)} = 2,909 \times 1 \text{ m}^3 \text{ RPB Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.2)$$

1 m³ RPB200 karışım ağırlığı 2388 kg ise, bu karışımında kullanılacak çimento miktarı Formül 3.2'den $2388 / 2,909$ oranı sonucu yaklaşık 821 kg olacaktır. Çimento miktarı 821 kg bulunduktan sonra aşağıdaki karışım oranlarına göre karışımında kullanılacak diğer malzeme miktarları belirlenir.

Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, Çelik lifsiz RPB200 üretiminde silis dumanı çimento miktarının ağırlıkça %23'ü, kum içeriği çimento miktarının ağırlıkça %110'u, pudra içeriği çimento miktarının ağırlıkça %39'u, süper akışkanlaştırıcı çimento miktarının ağırlıkça %1,9'u, karıştırma suyu çimento miktarının ağırlıkça %17'si oranında hazırlanarak karışım oluşturulur.

1 m³ karışımında kullanılacak 821 kg çimento miktarına göre diğer karışım malzeme ve karışım oranları Çizelge 3.15'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.15. Çelik lifsiz ve pudralı RPB200 karışım oranları

Malzemeler	Hesaplama Yöntemi	Hesaplama Sonucu Bulunan Malzeme Miktarı (kg/m ³)
Çimento	2388 / 2,909	821
Silis Dumanı	821 x 0,23	189
Kum (0,15-0,6 mm)	821 x 1,10	902
Pudra (d ₅₀ =0,01 mm)	821 x 0,39	320
Süperakışkanlaştırıcı	821 x 0,019	16
Çelik Lifler (L=12 mm)	-	-
Su	821 x 0,17	140
TOPLAM		2388

C. Karışımında sadece pudra olmaması durumu (lifli-pudrasız);

Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, hesaplamalarda kolaylık sağlaması amacıyla toplam karışım ağırlığı ile çimento miktarı arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde formül haline dönüştürülmüştür:

$$1 \text{ m}^3 \text{ RPB Karışım Ağırlığı (kg)} = 2,711 \times 1 \text{ m}^3 \text{ RPB Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.3)$$

1 m³ RPB200 karışım ağırlığı 2388 kg ise, bu karışımında kullanılacak çimento miktarı Formül 3.3'den $2388 / 2,711$ oranı sonucu yaklaşık 881 kg olacaktır. Çimento miktarı 881 kg bulunduktan sonra karışım oranlarına göre karışımında kullanılacak diğer malzeme miktarları belirlenir.

Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, Lifli ve pudra kullanılmayan RPB200 üretiminde silis dumanı çimento miktarının ağırlıkça %25'i, kum içeriği çimento miktarının ağırlıkça %110'u, süper akışkanlaştırıcı çimento miktarının ağırlıkça %1,6'sı, karıştırma suyu çimento miktarının ağırlıkça %17'i ve çelik lifler çimento miktarının ağırlıkça %17,5'u oranında hazırlanarak karışım oluşturulur.

1 m³ karışımında kullanılacak 881 kg çimento miktarına göre diğer karışım malzeme ve karışım oranları Çizelge 3.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.16. Çelik lifli ve pudrasız RPB200 karışım oranları

Malzemeler	Hesaplama Yöntemi	Hesaplama Sonucu Bulunan Malzeme Miktarı (kg/m ³)
Çimento	$2388 / 2,711$	881
Silis Dumanı	$881 \times 0,25$	220
Kum (0,15-0,6 mm)	$881 \times 1,10$	969
Pudra ($d_{50}=0,01$ mm)	-	-
Süperakışkanlaştırıcı	$881 \times 0,016$	14
Çelik Lifler (L=12 mm)	$881 \times 0,175$	154
Su	$881 \times 0,17$	150
TOPLAM		2388

D. Karışımında çelik lif ve pudra olması durumu (lifli-pudralı);

Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, hesaplamalarda kolaylık sağlaması amacıyla toplam karışım ağırlığı ile çimento miktarı arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde formül haline dönüştürülmüştür:

$$1 \text{ m}^3 \text{ RPB Karışım Ağırlığı (kg)} = 3,104 \times 1 \text{ m}^3 \text{ RPB Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.4)$$

1 m³ RPB200 karışım ağırlığı 2388 kg ise, bu karışımda kullanılacak çimento miktarı Formül 3.4'den 2388 / 3,104 oranı sonucu yaklaşık 769 kg olacaktır. Çimento miktarı 769 kg bulunduktan sonra karışım oranlarına göre karışımda kullanılacak diğer malzeme miktarları belirlenir.

Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, Lifli ve pudra kullanılan RPB200 üretiminde silis dumanı çimento miktarının ağırlıkça %23'ü oranında hazırlanarak karışım oluşturulur. Ayrıca kum içeriği çimento miktarının ağırlıkça %110'u, pudra içeriği çimento miktarının ağırlıkça %39'u, süperakışkanlaştırıcı çimento miktarının ağırlıkça %1,9'u, karıştırma suyu çimento miktarının ağırlıkça %19'u ve çelik lifler çimento miktarının ağırlıkça %17,5'u oranında hazırlanarak karışıma eklenir. 1 m³ karışımda kullanılacak 769 kg çimento miktarına göre diğer karışım malzeme ve karışım oranları Çizelge 3.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.17. Çelik lifli ve pudralı RPB200 karışım oranları

Malzemeler	Hesaplama Yöntemi	Hesaplama Sonucu Bulunan Malzeme Miktarı (kg/m ³)
Çimento	2388 / 3,104	769
Silis Dumanı	769 x 0,23	177
Kum (0,15-0,6 mm)	769 x 1,10	845
Pudra (d ₅₀ =0,01 mm)	769 x 0,39	300
Süperakışkanlaştırıcı	769 x 0,019	15
Çelik Lifler (L=12 mm)	769 x 0,175	135
Su	769 x 0,19	147
TOPLAM		2388

Çizelge 3.14, Çizelge 3.15, Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17'de görüldüğü gibi, lifsiz-pudralı ve lifli-pudralı RPB karışım tiplerinde 1 m³ başına kullanılan çimento miktarı lifsiz-pudrasız ve lifli-pudrasız RPB tiplerine nazaran daha düşüktür. Bu çalışmada 2,388 t/m³ birim ağırlıklı lifsiz-pudralı RPB üretimlerinde 1 m³ başına 821 kg, lifli-pudralı RPB üretimlerinde ise 1 m³ başına 769 kg çimento kullanılmaktadır. Bu sebeple

lifli ve lifsiz RPB üretim ve uygun kür seçimi çalışmalarında, daha ekonomik olması sebebiyle, karışımda pudra bulunan tipler seçilmiştir. Diğer lifsiz-pudrasız ve lifli-pudrasız RPB karışım tiplerinde 1 m³ başına kullanılan çimento miktarı yüksek olduğundan ekonomik olmaması açısından bu çalışmada dikkate alınmamıştır. RPB konusu üzerinde çalışma yapacak araştırmacılara faydalı olması amacıyla, 2400 kg/m³ birim ağırlığa göre RPB karışım miktarları tablolar halinde **EK 1**'de gösterilmiştir.

3.2.2. RPB800 karışım oranları

Çizelge 1.1'de RPB800 üretiminde karışım modelinin 2 şekilde olduğu görülmektedir:

- A. Karışımda kum kullanılması durumu (kum agregalı)
- B. Karışımda kum yerine kum boyutlarında çelik agrega kullanılması durumu (çelik agregalı)

A. Karışımda kum kullanılması durumu (kum agregalı)

Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, hesaplamalarda kolaylık sağlaması amacıyla toplam karışım ağırlığı ile çimento miktarı arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde formül haline dönüştürülmüştür:

$$1 \text{ m}^3 \text{ RPB Karışım Ağırlığı (kg)} = 2,959 \times 1 \text{ m}^3 \text{ RPB Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.5)$$

1 m³ RPB800 karışım ağırlığı 2388 kg ise, bu karışımda kullanılacak çimento miktarı Formül 3.5'den 2388 / 2,959 oranı sonucu yaklaşık 807 kg olacaktır. Çimento miktarı 807 kg bulunduktan sonra aşağıdaki karışım oranlarına göre karışımda kullanılacak diğer malzeme miktarları belirlenir.

Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, RPB800 üretiminde silis dumanı çimento miktarının ağırlıkça %23'ü, kum içeriği çimento

miktarının ağırlıkça %50'si, pudra içeriği çimento miktarının ağırlıkça %39'u, süper akışkanlaştırıcı çimento miktarının ağırlıkça %1,9'u, karıştırma suyu çimento miktarının ağırlıkça %19'u ve çelik lifler çimento miktarının ağırlıkça %63'ü oranında hazırlanarak karışım oluşturulur. 1 m³ karışımında kullanılacak 807 kg çimento miktarına göre diğer karışım malzeme ve karışım oranları Çizelge 3.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.18. Kum agregalı RPB800 karışım oranları

Malzemeler	Hesaplama Yöntemi	Hesaplama Sonucu Bulunan Malzeme Miktarı (kg/m ³)
Çimento	2388 / 2,959	807
Silis Dumanı	807 x 0,23	186
Kum (0,15-0,6 mm)	807 x 0,50	404
Pudra (d ₅₀ =0,01 mm)	807 x 0,39	315
Süperakışkanlaştırıcı	807 x 0,019	15
Çelik Lifler (L=3 mm)	807 x 0,63	508
Su	807 x 0,19	153
TOPLAM		2388

B. Karışımında kum yerine kum boyutlarında çelik agrega kullanılması durumu (çelik agregalı)

Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, hesaplamalarda kolaylık sağlaması amacıyla toplam karışım ağırlığı ile çimento miktarı arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde formül haline dönüştürülmüştür:

$$1 \text{ m}^3 \text{ RPB Karışım Ağırlığı (kg)} = 3,949 \times 1 \text{ m}^3 \text{ RPB Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.6)$$

Örneğin 1 m³ RPB800 karışım ağırlığı 2388 kg ise, bu karışımında kullanılacak çimento miktarı Formül 3.6'dan 2388 / 3,949 oranı sonucu yaklaşık 605 kg olacaktır. Çimento miktarı 605 kg bulduktan sonra karışım oranlarına göre karışımında kullanılacak diğer malzeme miktarları belirlenir. Çizelge 1.1'de 1 birim cinsinden verilen karışım oranları göz önüne alınarak, RPB800 üretiminde silis dumanı çimento miktarının ağırlıkça %23'ü, çelik agregalar çimento miktarının ağırlıkça %149'u, pudra içeriği çimento miktarının ağırlıkça %39'u, süper akışkanlaştırıcı çimento miktarının ağırlıkça %1,9'u,

karıştırma suyu çimento miktarının ağırlıkça %19'u ve çelik lifler çimento miktarının ağırlıkça %63'ü oranında hazırlanarak karışım oluşturulur. 1 m³ karışımda kullanılacak 605 kg çimento miktarına göre diğer karışım malzeme ve karışım oranları Çizelge 3.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.19. Çelik agregalı RPB800 karışım oranları

Malzemeler	Hesaplama Yöntemi	Hesaplama Sonucu Bulunan Malzeme Miktarı (kg/m ³)
Çimento	2388 / 3,949	605
Silis Dumanı	605 x 0,23	139
Çelik Agregası (< 0,8 mm)	605 x 1,49	901
Pudra (d ₅₀ =0,01 mm)	605 x 0,39	236
Süperakışkanlaştırıcı	605 x 0,019	11
Çelik Lifler (L=3 mm)	605 x 0,63	381
Su	605 x 0,19	115
TOPLAM		2388

Literatür araştırma sonuçlarına göre; genel olarak RPB200 ve RPB800 üretiminde kum boyutları 0,15-0,60 mm arası seçilmektedir. Pudraların %50'ye karşılık gelen tane boyu (d₅₀) 0,01 mm inceliktedir. RPB800 üretiminde kum yerine kullanılacak çelik agregası tane boyutları 0,8 mm'den küçük alınmaktadır. RPB200 üretimlerinde priz sırasında kalıp içerisine beton sıkıştırma basıncı uygulanmayabilir. RPB200 üretimlerinde ısıtım işlemi olarak 20-90°C arası sıcak kür uygulaması yapılmaktadır. Sıcak kür uygulamaları olarak; sıcak su banyosu, buhar kürü, etüv kürü ve otoklav kürü (yüksek basınçlı buhar kürü) gibi değişik ısıtım işlemleri uygulanabilmektedir. RPB800 üretimlerinde ise numunelere taze haldeyken kalıp içerisinde 50 MPa'a kadar beton sıkıştırma basıncı uygulanabilmekte, sertleşme sonrası kür uygulamasında ise ısıtım işlemleri 250-400°C arasındaki sıcaklıklarda yapılabilmektedir (Richard and Cheyrezy 1995; Taşdemir *et al.* 1996; Taşdemir *et al.* 1999; Taşdemir 2003; Avar 2006; İpek 2009).

3.2.3. Lifsiz RPB karışım oranları

Deneysel olarak kullanılan çelik lifsiz RPB200 karışım oranları Çizelge 3.20'de verilmiştir.

Çizelge 3.20. Deneylerde kullanılan çelik lifsiz RPB200 karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg/m³)
Çimento	821
Silis Dumanı	189
Kum (0,15-0,6 mm)	902
Pudra (0-0,045 mm)	320
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	16
Çelik Lifler (L= 22 mm) (Çap= 0,55 mm)	-
Su	140
TOPLAM	2388

3.2.4. Lifli RPB karışım oranları

Deneylerde kullanılan çelik lifli RPB200 karışım oranları Çizelge 3.21’de verilmiştir.

Çizelge 3.21. Deneylerde kullanılan çelik lifli RPB200 karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg/m³)
Çimento	769
Silis Dumanı	177
Kum (0,15-0,6 mm)	845
Pudra (0-0,045 mm)	300
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	15
Çelik Lifler (L= 22 mm) (Çap= 0,55 mm)	135
Su	147
TOPLAM	2388

3.2.5. Kontrol numunesi beton karışım oranları

Kontrol numunesi (C30/37) agrega ve çimento özellikleri Çizelge 3.22’de görülmektedir.

Çizelge 3.22. Kontrol numunesi agrega ve çimento özellikleri

Agrega (mm)	Oran (%)	Çimento
0-4	46	CEM II / A-M (P-L) 42,5 R
4-8	22	
8-16	32	

1000 dm³'lük karışıma giren miktarların mutlak hacimleri aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Tunç, 2007).

$$V_c + V_s + V_h + V_a = 1000 \text{ dm}^3 \quad (3.7)$$

Burada;

V_c : Karışıma giren çimentonun hacmi, dm³

V_s : Karışıma giren suyun hacmi, dm³

V_h : Karışımındaki havanın hacmi, dm³

V_a : Karışıma giren agreganın hacmi, dm³

Formül 3.1'e göre karışıma giren agreganın hacmi aşağıdaki şekilde bulunmuştur:

$$(450/3.10) + (189/1.00) + (0.02 \cdot 1000) + V_a = 1000 \text{ dm}^3$$

$$V_a = 646 \text{ dm}^3$$

Karışımındaki agreganın mutlak hacimleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$0-4 \text{ mm için } 0.46 \cdot 646 = 297 \text{ dm}^3$$

$$4-8 \text{ mm için } 0.22 \cdot 646 = 142 \text{ dm}^3$$

$$8-16 \text{ mm için } 0.32 \cdot 646 = 207 \text{ dm}^3$$

Hesaplamalar sonucu kontrol numunesi beton üretiminde karışıma giren miktarların mutlak hacim ve kg. cinsinden değerleri Çizelge 3.23'de gösterilmiştir:

Çizelge 3.23. Kontrol numunesi beton karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg/m³)
Çimento	450
0-4 mm	799
4-8 mm	385
8-16 mm	565
Su	189
TOPLAM	2388

Çizelge 3.23’de görüldüğü gibi kontrol numunesi beton üretim karışımında kullanılan agrega miktarı karışımın ağırlıkça yaklaşık %73, hacimce yaklaşık %65’ini karşılamaktadır. Rijit kaplamaların ağırlıkça %70-80’i ve hacimce %60-75’i agregadan oluşmaktadır (Tunç 2007).

3.3. RPB Üretim Yöntemi

3.3.1. Lifsiz RPB üretimi

Hazırlanan karışımların tamamı lifsiz olarak karıştırıcıya dökülmüştür. RPB’un performans özellikleri karıştırıcıda karıştırılma işlemine duyarlıdır. Karışıma giren malzemelerin karıştırıcıya konulma sırasına dikkat edilmelidir. Öncelikle karıştırıcıda, agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun %70 ‘i ilave edilmiştir. Karışım suyunun %70’i ilave edildikten sonra karışım karıştırıcıda karıştırılarak taneler iyice ıslatıldıktan sonra karışım suyunun kalan %30 ‘u süperakışkanlaştırıcı katkı ile beraber aynı anda karışıma püskürtülmüştür. Süperakışkanlaştırıcı katıldıktan sonra etkisi görülene kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır.

Numune kalıpları basınç numuneleri için 50x50x50 mm, eğilme numuneleri için ise 50x50x300 mm’dir. RPB200 için numuneleri kalıptayken sıkıştırmaya gerek yoktur (Richard and Cheyrezy 1995). Bu nedenle kalıp içerisine dökülen lifsiz RPB

numunelerine priz süresince herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Basınç deneyinde kullanılmak üzere üçer adet lifsiz RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.24’de görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.24. Basınç deneyi için laboratuvar çelik lifsiz-pudralı RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	103
Silis Dumanı	24
Kum (0,15-0,6 mm)	112
Pudra (0-0,045 mm)	40
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	2
Çelik Lifler (L=22 mm) (Çap=0,55 mm)	-
Su	18
TOPLAM	299

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üçer adet lifsiz RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.25’de görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.25. Eğilme deneyi için laboratuvar çelik lifsiz-pudralı RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	616
Silis Dumanı	142
Kum (0,15-0,6 mm)	676
Pudra (0-0,045 mm)	240
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	12
Çelik Lifler (L= 22 mm) (Çap= 0,55 mm)	-
Su	105
TOPLAM	1791

3.3.2. Lifli RPB üretimi

Hazırlanan karışımların tamamı lifsiz olarak karıştırıcıya dökülmüştür. Öncelikle karıştırıcıda, agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan

sonra karışım suyunun %70'i ilave edilmiştir. Karışım suyunun %70'i ilave edildikten sonra karışım karıştırıcıda karıştırılarak taneler iyice ıslatıldıktan sonra karışım suyunun kalan %30'u süperakışkanlaştırıcı katkı ile beraber aynı anda karışıma püskürtülmüştür. Süperakışkanlaştırıcı katıldıktan sonra etkisi görülene kadar karıştırılan karışıma, daha sonra çelik lifler ilave edilip, çelik lifler çimento hamuru içinde tamamen dağılana kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır.

Numune kalıpları basınç numuneleri için 50x50x50 mm, eğilme numuneleri için ise 50x50x300 mm'dir. RPB200 için numuneleri kalıptayken sıkıştırmaya gerek yoktur (Richard and Cheyrezy 1995). Bu nedenle kalıp içerisine dökülen lifli RPB numunelerine priz süresince herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır.

Basınç deneyinde kullanılmak üzere üçer adet lifli RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.26'da görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.26. Basınç deneyi için laboratuvar çelik lifli-pudralı RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	96
Silis Dumanı	22
Kum (0,15-0,6 mm)	105
Pudra (0-0,045 mm)	38
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	2
Polysteel Çelik Lifler (L=22 mm) (Çap=0,55 mm)	17
Su	19
TOPLAM	299

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üçer adet çelik lifli RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.27'de görüldüğü gibi laboratuarda tartılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 3.27. Eğilme deneyi için laboratuvar çelik lifli-pudralı RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	577
Silis Dumanı	133
Kum (0,15-0,6 mm)	632
Pudra (0-0,045 mm)	225
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	12
Polysteel Çelik Lifler (L=22 mm) (Çap=0,55 mm)	101
Su	111
TOPLAM	1791

3.3.3. Kontrol numunesi beton üretimi

Basınç deneyinde kullanılmak üzere üçer adet kontrol numunesi beton üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.28’de görüldüğü gibi laboratuvar da tartılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 3.28. Basınç deneyi için laboratuvar kontrol numunesi beton karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	1519
0-4 mm	2695
4-8 mm	1300
8-16 mm	1908
Su	638
TOPLAM	8060

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üçer adet kontrol numunesi beton üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.29’da görüldüğü gibi hazırlanmıştır.

Çizelge 3.29. Eğilme deneyi için laboratuvar kontrol numunesi beton karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	337
0-4 mm	599
4-8 mm	289
8-16 mm	424
Su	142
TOPLAM	1791

Hazırlanan karışımlar karıştırıcıya dökülerek öncelikle ilk 5 dakika agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun tamamı ilave edilmiştir. Karışım suyu ilave edildikten sonra karışım 15 dakika karıştırıcıda karıştırılmıştır. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Basınç deneyi numune kalıpları 150x150x150 mm'dir. Basınç ve eğilme deneyi için ayrı ayrı üçer adet numune oluşturulmuştur. Eğilme deneyi numune kalıpları 50x50x300 mm'dir. Tüm numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır.

3.4. RPB Kür Uygulamaları

Beton üretiminde en önemli aşama betonun kür edilmesidir. Kür; betonun mukavemet kazanması için çimento hidrasyonunu ilerletmek amacıyla yapılır. Taze çimento hamurundaki boşlukların çimento hidrasyonu sonucu oluşan ürünler ile en yüksek düzeyde doldurulma işlemidir. Çimento bileşenlerinin reaksiyon hızlarının farklı olmasından dolayı, priz olayında çimentonun bir kısmı hidrasyona girer. Taze haldeyken su ile reaksiyona giren çimentoda priz olmayan miktar, priz alan miktardan daha fazladır. Bu sebeple betonun dayanım artışı yıllar boyunca devam eder. Betona uygulanan ısıtılma işlemi amacı, hidrasyon hızını yükselterek priz ve sertleşme süresini azaltmaktır. Standart su kürüne ek olarak, farklı kür yöntemleriyle de betonun daha kısa zamanda dayanım kazanması sağlanabilir. Betonun kısa zamanda dayanım kazanmasını sağlayan bu çeşit kürlere ısıtılma işlemi ismi verilmiştir (Karabulut 2006).

RPB200 üretimlerinde ısıtılma işlemi olarak 20-90°C arası sıcak kür uygulaması yapılmaktadır. Sıcak kür uygulamaları olarak, sıcak su banyosu, buhar kürü, etüv kürü ve otoklav kürü (yüksek basınçlı buhar kürü) gibi değişik ısıtılma işlemleri uygulanabilmektedir. Bu kür uygulamaları ayrı ayrı yapılabildiği gibi değişik kürlerin karışımları şeklinde de (kombine kürleri) yapılabilmektedir (Richard and Cheyrezy 1995; Taşdemir *et al.* 1996, Taşdemir *et al.* 1999; Taşdemir 2003; Avar 2006; İpek 2009).

Bu çalışmada, RPB ile ilgili tüm kür numunelerinde her kür tipinden sonra numunelere basınç deneyi uygulanarak basınç dayanımları tespit edilmiştir. Değişik kür uygulamaları sonucunda en yüksek basınç dayanımını veren kür tipi tespit edilmiştir. Eğilme deneylerinin tümünde, kür uygulamaları sonucu tespit edilen bu kür şekli uygulanmıştır.

3.4.1. Kontrol numunesi beton üretiminde standart su kürü uygulaması

24 saat sonra kalıptan çıkarılan kontrol numunesi betonlar 7 ve 28 günlük üçer adet olmak üzere 20°C standart su kürü havuzuna alınmıştır.

3.4.2. RPB üretiminde standart su kürü uygulaması

24 saat sonra kalıptan çıkarılan RPB'lar herhangi bir özel kür işlemine tabi olmadan Çizelge 3.30'da görüldüğü gibi 20°C standart su kürü havuzuna alınmıştır.

Çizelge 3.30. RPB üretiminde standart su kürü uygulaması

Sıcaklık-Zaman	Kür Cinsi
20°C - 8 Saat	Standart Su Kürü
20°C - 1 Gün	Standart Su Kürü
20°C - 2 Gün	Standart Su Kürü
20°C - 3 Gün	Standart Su Kürü
20°C - 7 Gün	Standart Su Kürü
20°C - 28 Gün	Standart Su Kürü

Her kür tipinde üçer adet çelik lifsiz ve pudralı RPB numunesi bulunmaktadır. Bu numunelere standart su kürü sonrası basınç deneyi uygulanmıştır.

3.4.3. RPB üretiminde etüv kür uygulaması

RPB200 üretimlerinde ısıtıl işlem olarak 20-90°C arası sıcak kür uygulaması yapılmaktadır (Richard and Cheyrezy 1995). Dugat *et al.* (1996) çalışmalarında etüv kür

ısısı 90°C alınmıştır. Talebinejad *et al.* (2004) çalışmalarında etüv kür ısısı 200°C alınmıştır. İpek (2009) çalışmasında etüv kür ısısı 300°C alınmıştır. Literatürlere bakıldığında etüv kür ısısı RPB ile ilgili çalışmalarda farklı alınmış ve herhangi bir standarta rastlanılmamıştır. Bu çalışmada etüv kürü 90°C sabit ısıda gerçekleştirilmiştir.

24 saat sonra kalıptan çıkarılan RPB'lara herhangi bir su kürü yapılmadan Çizelge 3.31'de görüldüğü gibi sadece etüv kürü (sıcak kuru hava kürü) uygulanmıştır.

Çizelge 3.31. RPB üretiminde etüv kür uygulaması

Sıcaklık-Zaman	Kür Cinsi
90°C - 8 Saat	Etüv Kürü
90°C - 1 Gün	Etüv Kürü
90°C - 2 Gün	Etüv Kürü
90°C - 3 Gün	Etüv Kürü
90°C - 7 Gün	Etüv Kürü

Her kür tipinde 3 Adet çelik lifsiz ve pudralı RPB numune bulunmaktadır. Bu numunelere etüv kür sonrası basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonunda bu kür şekilleri içinde basınç dayanımı en yüksek olan kür şekli belirlenmiştir.

3.4.4. RPB üretiminde otoklav kür uygulaması

Basınçlı buhar küründe sıcaklık 140–220°C aralığında istenen bir değere getirilebilir (Karabulut 2006). Bu nedenle otoklav kürü, literatürde belirtilen ısı aralığının ortalaması alınarak 180°C sabit ısıda gerçekleştirilmiştir. Yazıcı (2007) çalışmasında otoklav buhar basıncı 2 MPa alınmıştır. Literatürlere bakıldığında RPB otoklav küründe buhar basıncı ile ilgili herhangi bir standarta rastlanmamıştır. Literatüre katkı sağlaması açısından çalışmada otoklav buhar basıncı 1,3 MPa alınmıştır.

Yüksek basınçlı buhar kürü (otoklav) ile ulaşılabilecek 28 günlük standart kür dayanıma 24 saatte erişilebilir (Karabulut 2006). Ancak, Mindess *et al.* (1991) RPB ile otoklav kürü çalışmalarında, farklı sürelerde uygulanan otoklav kürlerinde 3–14 saat arasındaki

kür süresinin basınç dayanımını artırdığı ve sonrasında düşüş gösterdiğini, ayrıca 14 saat otoklav kürü ile maksimum basınç dayanımları elde edildiğini belirtmişlerdir. Bunun yanında, Uygunoğlu ve Ünal (2007) otoklav kürü çalışmalarında, en uygun otoklav süresinin 8 saat olduğunu, otoklavda 8 saatten fazla kalan numunelerde basınç dayanım kaybı görüldüğünü belirtmişlerdir. Bu nedenle otoklav kür süreleri 4, 8 ve 12 saat olmak üzere 3 farklı tipte belirlenmiştir.

Otoklav kür işlemleri Afyon Kocatepe Üniversitesi inşaat laboratuvarında yapılmıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan RPB'lara herhangi bir kür yapılmadan Çizelge 3.32'de görüldüğü gibi sadece otoklav kürü uygulanmıştır.

Çizelge 3.32. RPB üretiminde otoklav kür uygulaması

Sıcaklık-Buhar Basıncı-Zaman	Kür Cinsi
180°C - 1,3 MPa - 4 Saat	Otoklav Kürü
180°C - 1,3 MPa - 8 Saat	Otoklav Kürü
180°C - 1,3 MPa - 12 Saat	Otoklav Kürü

Her kür tipinde üçer adet çelik lifsiz-pudralı ve çelik lifli-pudralı RPB numunesi bulunmaktadır. Bu numunelere otoklav kür sonrası basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonunda bu kür şekilleri içinde basınç dayanımı en yüksek olan kür şekli belirlenmiştir.

3.4.5. RPB üretiminde kombine kür uygulamaları

Hazırlanan numunelere kalıp içersinde herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Yağlanan kalıplara malzemeler şişle sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan lifsiz-pudralı RPB'lara aşağıdaki şekillerde kür birleşimi yapılmıştır. Çalışmada kombine kür deneyleri değişik ısı ve sürelerde uygulanmıştır.

Çizelge 3.33'de görüldüğü gibi 9 tip kombine kür çalışması yapılmıştır. Kombinasyon alternatifleri bu çalışma kapsamında ortaya çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda en yüksek basınç dayanımını veren kombine kür şekli bulunmuştur.

Çizelge 3.33. RPB üretiminde kombine kür uygulaması

Sıcaklık-Zaman-Kür	Kür Cinsi
3 Gün 90°C Su Banyosu – 1 Gün 180°C Etüv	Kombine
3 Gün 90°C Su Banyosu – 2 Gün 180°C Etüv	Kombine
3 Gün 90°C Su Banyosu – 3 Gün 180 °C Etüv	Kombine
7 Gün 20°C Standart Su Kürü – 1 Gün 180°C Etüv	Kombine
7 Gün 20°C Standart Su Kürü – 2 Gün 180°C Etüv	Kombine
7 Gün 20°C Standart Su Kürü – 3 Gün 180°C Etüv	Kombine
7 Gün 20°C Standart Su Kürü - 2 Gün 90°C Su Banyosu - 1 Gün 180°C Etüv	Kombine
7 Gün 20°C Standart Su Kürü - 2 Gün 90°C Su Banyosu - 2 Gün 180°C Etüv	Kombine
7 Gün 20°C Standart Su Kürü - 2 Gün 90°C Su Banyosu - 3 Gün 180°C Etüv	Kombine

3.5. Basınç Deneyleri

Beton basınç deneylerinde TS EN 12390-3: 2010 standardı uygulanmıştır. Bu standart, CEN tarafından kabul edilen EN 12390-3: 2009 standardı esas alınarak, TSE İnşaat İhtisas Grubu'nca TS EN 12390-3: 2003'ün düzeltilmesi olarak hazırlanmış ve TSE Teknik Kurulu'nun 29 Nisan 2010 tarihli toplantısında Türk Standardı olarak kabul edilerek yayımına karar verilmiştir. Bu standardın kabulü ile TS EN 12390-3: 2003 iptal edilmiştir. TS EN 12390-3: 2010 standardı esas alınarak basınç deneyi cihaz yükleme hızı 0,6 MPa/s (N/mm².s) seçilmiştir. Basınç deneyinde kullanılan cihaz kırma yükünü de göstererek basınç dayanımını, TS EN 12390-3: 2010'a uygun olarak Formül 3.8'de verilen bağıntı yardımıyla otomatik olarak hesaplamaktadır (TS EN 12390-3: 2010):

$$f_c = F / A_c \quad (3.8)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, MPa (N/mm²)

F : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm²

Basınç dayanımları TS EN 12390-3: 2010'a uygun olarak en yakın 0,1 MPa'a (N/mm^2) yuvarlatılarak gösterilmiştir (TS EN 12390-3: 2010).

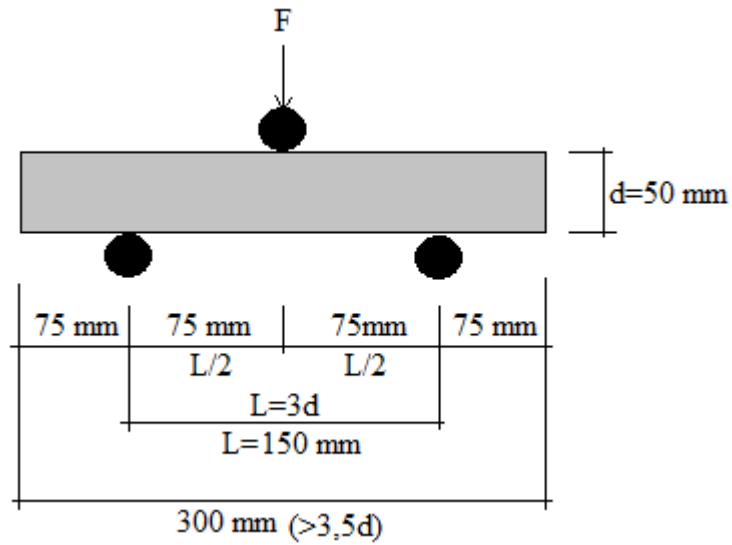
Basınç deneylerinde, her karışımdan üçer adet olmak üzere normal dayanımlı kontrol numunesi betonlar için 150x150x150 mm boyutlarında, RPB numuneler için ise 50x50x50 mm boyutlarında üretilmiştir. RPB numunelerin basınç dayanımları çok yüksek olduğundan 150x150x150 mm olarak üretimlerinde kırma yükü çok yüksek olacağından basınç test cihazının zorlanacağı düşünülerek, numuneler 50x50x50 mm boyutlarında üretilmiştir. Basınç deneyleri Bitlis ili Tatvan ilçesinde faaliyet gösteren Van gölü Yapı Kalite Kontrol Laboratuvarı İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti. ve Bitlis Eren Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu İnşaat laboratuvarında yapılmıştır.

3.6. Eğilme Deneyleri

Rijit yol kaplamalarında trafik yüklerinden dolayı basınç ve eğilme gerilmeleri oluşur. Betonun basınç mukavemeti yüksek olup eğilme dayanımı düşüktür. Eğilme dayanımını karşılamak üzere derzsiz ve sürekli donatılı rijit yol uygulamalarında beton içerisine donatı katılmaktadır. RPB'larda eğilme dayanımı yüksek olduğundan beton içerisine donatı katılmamaktadır. Daha yüksek eğilme dayanımı istendiğinde RPB'lara donatı yerine çelik lifler katılmaktadır. Rijit kaplama kalınlık hesaplamalarında betonun eğilme dayanımı da göz önüne alınan parametrelerden biridir. Bu nedenle çalışmada lifli ve liffsiz RPB numunelerin basınç dayanımları yanında eğilme dayanımları da hesaplanmıştır.

Betonların eğilme dayanımı hesap yöntemleri, ülkemizde 1992 yılında yayınlanan eski TS 10515 standartında belirtilmiş, daha sonra 2002 yılında TS EN 12390-5 standardı kullanılmaya başlanılmış, en son 2010 yılında "TS EN 12390-5 Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini" standardı yayımlanmıştır. Eğilme deneyleri 2010 standartına göre yapılmıştır.

Yükleme hızı 0,04 MPa/s (N/mm².s) ile 0,06 MPa/s (N/mm².s) arasında sabit gerilme artış hızı sağlanacak şekilde ayarlanmaktadır (TS EN 12390-5: 2010). Tüm deneylerde sabit gerilme artış hızı 0.05 MPa/s alınmıştır. Eğilme deneyleri Bitlis Eren Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Orta noktadan yüklemeli deney numunesi yükleme düzeneği Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.4. Orta noktadan yüklemeli deney numunesi yükleme düzeneği

Deney cihaz yükleme hızı, Formül 3.9’da verilen eşitlikle hesaplanmıştır (TS EN 12390-5: 2010):

$$R = 2.d_1.d_2^2.s / 3.L \quad (3.9)$$

Burada;

- R : Gerekli yükleme hızı (N/s),
- s : Gerilme artış hızı (MPa/sn)
- L : Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm),
- d_1 : Numunenin en kesit yatay boyutu (mm),
- d_2 : Numunenin en kesit düşey boyutu (mm).

Numuneler 50x50x300 mm olduğundan $d_1=d_2=d= 50$ mm alınmıştır. Formül 3.9 ile deney cihaz yükleme hızı 25 N/s olarak hesaplanmıştır.

Eğilme dayanımı, TS EN 12390-5’de belirtilen Formül 3.10 ile hesaplanmaktadır (TS EN 12390-5: 2010):

$$f_{cf} = 3.F.L / 2. d_1.d_2^2 \quad (3.10)$$

Burada;

- f_{cf} : Eğilme dayanımı (MPa),
- F : En büyük yük (N),
- L : Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm),
- d_1 : Numunenin en kesit yatay boyutu (mm),
- d_2 : Numunenin en kesit düşey boyutu (mm).

Eğilme numuneleri, en büyük basınç dayanımlarını veren numune karışım oranları göz önüne alınarak hazırlanmıştır.

3.6.1. Kontrol numunesi beton eğilme deneyi

Hazırlanan karışımlar karıştırıcıya dökülerek öncelikle ilk 5 dakika agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun tamamı ilave edilmiştir. Karışım suyu ilave edildikten sonra karışım 15 dakika karıştırıcıda karıştırılmıştır. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Tüm numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan kontrol numunesi betonlar 28 günlük üçer adet olmak üzere 20°C standart su kürü havuzuna alınmıştır. Kontrol numunesi ile ilgili standart su kürü numunelerinde 28 günlük numunelere eğilme deneyi uygulanarak eğilme dayanımları tespit edilmiştir.

3.6.2. Lifsiz RPB standart su kürü eğilme deneyi

Hazırlanan karışımlar karıştırıcıya dökülerek öncelikle ilk 5 dakika agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun tamamı ilave edilmiştir. Karışım suyu ilave edildikten sonra karışım 15 dakika karıştırıcıda karıştırılmıştır. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Tüm numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan RPB numunesi betonlar 28 günlük üçer adet olmak üzere 20 °C standart su kürü havuzuna alınmıştır. 28 günlük RPB numunelerine eğilme deneyi uygulanarak eğilme dayanımları tespit edilmiştir.

3.6.3. Lifli RPB standart su kürü eğilme deneyi

Hazırlanan karışımlar karıştırıcıya dökülerek öncelikle ilk 5 dakika agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun tamamı ilave edilmiştir. Karışım suyu ilave edildikten sonra karışım 15 dakika karıştırıcıda karıştırılmıştır. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Tüm numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan RPB numunesi betonlar 28 günlük üçer adet olmak üzere 20 °C standart su kürü havuzuna alınmıştır. 28 günlük RPB numunelerine eğilme deneyi uygulanarak eğilme dayanımları tespit edilmiştir.

3.6.4. Lifsiz RPB otoklav kür eğilme deneyi

Hazırlanan karışımlar karıştırıcıya dökülerek öncelikle ilk 5 dakika agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun tamamı ilave edilmiştir. Karışım suyu ilave edildikten sonra karışım 15 dakika karıştırıcıda karıştırılmıştır. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Tüm numuneler kalıplara şişlenerek

yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan RPB numunesi betonlar üç adet olmak üzere 1,3 MPa-180 °C-8 saat otoklav kürüne alınmıştır. 8 saatlik RPB numunelerine eğilme deneyi uygulanarak eğilme dayanımları tespit edilmiştir.

3.6.5. Lifli RPB otoklav kür eğilme deneyi

Hazırlanan karışımlar karıştırıcıya dökülerek öncelikle ilk 5 dakika agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun tamamı ilave edilmiştir. Karışım suyu ilave edildikten sonra karışıma lifler ilave edilerek, karışım 15 dakika karıştırıcıda karıştırılmıştır. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Tüm numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan RPB numunesi betonlar üç adet olmak üzere 1,3 MPa-180°C-8 saat otoklav kürüne alınmıştır. 8 saatlik RPB numunelerine eğilme deneyi uygulanarak eğilme dayanımları tespit edilmiştir.

3.6.6. Lifsiz RPB kombine kür eğilme deneyi

Hazırlanan karışımlar karıştırıcıya dökülerek öncelikle ilk 5 dakika agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun tamamı ilave edilmiştir. Karışım suyu ilave edildikten sonra karışım 15 dakika karıştırıcıda karıştırılmıştır. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Tüm numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan RPB numunesi betonlar üç adet olmak üzere 7 Gün 20°C Standart Su Kürü-2 Gün 90°C Su Banyosu-2 Gün 180 °C Etüv kürüne alınmıştır. Kür sonunda RPB numunelerine eğilme deneyi uygulanarak eğilme dayanımları tespit edilmiştir.

3.6.7. Lifli RPB kombine kür eğilme deneyi

Hazırlanan karışımlar karıştırıcıya dökülerek öncelikle ilk 5 dakika agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun tamamı ilave edilmiştir. Karışım suyu ilave edildikten sonra karışıma lifler ilave edilip, karışım 15 dakika karıştırıcıda karıştırılmıştır. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Tüm numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan RPB numunesi betonlar üç adet olmak üzere 7 gün 20°C standart su kürü-2 gün 90°C su banyosu kürü-2 gün 180°C etüv kürü şeklinde ardı sıra uygulanan kombine küre alınmıştır. Kür sonunda RPB numunelerine eğilme deneyi uygulanarak eğilme dayanımları tespit edilmiştir.

3.7. RPB Kaplama Maliyet Düşürme Çalışmaları

Reaktif Pudra Betonlarda (RPB) en yüksek maliyet kalemlerini çimento ve çelik lifler oluşturmaktadır. Bu maliyet kalemlerinin düşürülmesi amacıyla çalışmada iki yöntem uygulanmıştır. Birinci yöntemde RPB üretiminde normal fabrika üretimi çelik lifler yerine sanayi atığı çelik liflerin değerlendirilerek kullanılabilirliği araştırılmıştır. İkinci yöntemde ise çimento maliyetinin düşürülebilmesi amacıyla çimento ile birlikte bağlayıcı özelliğe sahip Ahlat Taşı Tozu (ATT) ve kireç kullanılarak m³ başına çimento miktarının azaltılarak maliyetin düşürülmesi hedeflenmiştir. Bu yöntemler ve yapılan deneyler ayrı kısımlar halinde aşağıda belirtilmiştir.

3.7.1. RPB üretiminde sanayi atığı çelik liflerin kullanılması

Sanayi atığı çelik lifler Bitlis Endüstri Meslek ve Teknik Lisesi'nden temin edilmiştir. Lisenin makine atölyesinde endüstriyel çelik malzeme üretimleri sonucu arta kalan atıl durumdaki çelik lifler BEÜ Teknik Bilimler MYO İnşaat Laboratuvarı'na alınarak RPB numune üretimlerinde kullanılmıştır. Çelik lifler ortalama 0-1 mm çaplarında ve 0-10 mm uzunluktadırlar. Sanayi atığı çelik liflerin kullanıldığı RPB numunelerde çelik lif

ağırlıkları, normal fabrikasyon üretimi çelik liflerinin ağırlığında alınarak deneylere başlanmıştır. Numuneler basınç ve eğilme numuneleri şeklinde oluşturularak malzeme miktarları değiştirilmemiştir. Tek farklılık normal lif yerine sanayi atığı çelik liflerin kullanılmasıdır. Sanayi atığı çelik lif görünümü **EK 3, Şekil Ek 1.7'**de görülmektedir. Malzeme miktarlarının m³ başına düşen kg cinsinden miktarları Çizelge 3.34'de verilmiştir.

Çizelge 3.34. Sanayi atığı çelik lifli ve pudralı RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg/m³)
Çimento	769
Silis Dumanı	177
Kum (0,15-0,6 mm)	845
Pudra (0-0,045 mm)	300
Süperakışkanlaştırıcı	15
Sanayi Atığı Çelik Lifler (L=0-10 mm) (Çap= 0-1 mm)	135
Su	147
TOPLAM	2388

Hazırlanan karışımların tamamı önce lifsiz olarak karıştırıcıya dökülmüştür. Öncelikle karıştırıcıda, agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyunun %70'i ilave edilmiştir. Karışım suyunun %70'i ilave edildikten sonra karışım karıştırıcıda karıştırılarak taneler iyice ıslatıldıktan sonra karışım suyunun kalan %30 'u süperakışkanlaştırıcı katkı ile beraber aynı anda karışıma püskürtülmüştür. Süperakışkanlaştırıcı katıldıktan sonra etkisi görülene kadar karıştırılan karışıma, daha sonra sanayi atığı çelik lifler ilave edilip, çelik lifler çimento hamuru içinde tamamen dağılına kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Toplam karıştırma süresi 20 dakikadır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıplar yağlanmıştır. Numune kalıpları basınç numuneleri için 50x50x50 mm'dir. Kalıp içerisine dökülen sanayi atığı çelik lifli RPB numunelerine priz süresince herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Basınç deneyinde kullanılmak üzere her bir kür için üçer adet sanayi atığı çelik lifli RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.35'de görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.35. Basınç deneyi için sanayi atığı çelik lifli ve pudralı RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	96
Silis Dumanı	22
Kum (0,15-0,6 mm)	105
Pudra (0-0,045 mm)	38
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	2
Sanayi Atığı Çelik Lifler (L= 0-10 mm) (Çap= 0-1 mm)	17
Su	19
TOPLAM	299

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere de her bir kür için üçer adet sanayi atığı çelik lifli RPB numune için gerekli malzemeler Çizelge 3.36'da görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.36. Eğilme deneyi için sanayi atığı çelik lifli RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	577
Silis Dumanı	133
Kum (0,15-0,6 mm)	632
Pudra (0-0,045 mm)	225
Süper Akışkanlaştırıcı (Polycar 300)	12
Sanayi Atığı Çelik Lifler (L= 0-10 mm) (Çap= 0-1 mm)	101
Su	111
TOPLAM	1791

Numune kalıpları eğilme numuneleri için 50x50x300 mm'dir. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan her bir kür için üçer adet sanayi atığı çelik lifli RPB basınç ve eğilme numuneleri herhangi bir özel kür işlemine tabi olmadan 7 ve 28 günlük 20°C standart su kürü havuzuna alınmıştır. Bu numunelere standart su kürü sonrası basınç ve eğilme deneyleri uygulanmıştır.

En yüksek basınç dayanımını veren kür şeklinin 7 gün 20°C standart su kürü - 2 gün 90°C su banyosu kürü - 2 gün 180°C etüv kürü şeklinde ardı sıra uygulanan kombine

kürü olduğu yapılan deneylerde bulunmuştur (Kısım 4.1.6.a'ya bakınız). Numuneler kalıplarda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılmış ve en yüksek basınç dayanımını veren 7 gün 20°C standart su kürü - 2 gün 90°C su banyosu - 2 gün 180°C etüv kombine kürüne alınmıştır. Bu numunelere kür sonrası basınç ve eğilme deneyleri uygulanmıştır.

3.7.2. RPB üretimde volkanik kayaç tozlarının çimento ile birlikte kullanımı

Ahlat ignimbriti kimyasal analizi Çizelge 3.37'de görülmektedir.

Çizelge 3.37. Ahlat ignimbriti (Ahlat taşı) kimyasal analizi (Şimşek ve Erdal 2004)

Numune	Na ₂ O (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
Açık Kahverengi Ahlat Taşı	5,51	0,24	16,01	64,11	4,78	1,64	0,44	4,91

Şimşek ve Erdal (2004) çalışmasında, açık kahverengi Ahlat Taşının ortalama basınç dayanımının 10,6 MPa, eğilme dayanımının ortalama 1,59 MPa olduğu belirtilmiştir. TSE tarafından hazırlanan TS 25 numaralı Tras Standardında SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplamı en az %70 oranında olması gerektiği belirtilmiştir (TS25 1975). Çizelge 3.37'de görüldüğü gibi Ahlattaşının SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplamı %85,03'dür.

Reaktif Pudra Betonlarda (RPB) en yüksek maliyet kalemlerinden birisi üretimde kullanılan çimento miktarıdır. Bu çalışmada yapılan RPB üretimlerinde 2,388 t/m³ birim ağırlıklı lifsiz-pudralı RPB üretimlerinde m³ başına 821 kg, lifli-pudralı RPB üretimlerinde ise m³ başına 769 kg çimento kullanılmaktadır. RPB karışımlarında en ekonomik karışım tipleri lifsiz-pudralı ve lifli-pudralı karışımlardır. Çünkü bu tip karışımlarda m³ başına kullanılan çimento miktarı en düşüktür. Diğer lifsiz-pudrasız ve lifli-pudrasız RPB karışım tiplerinde m³ başına kullanılan çimento miktarı yüksek olduğundan ekonomik olmaması nedeniyle bu çalışma kapsamında dikkate alınmamıştır.

Çalışmalarda çimento miktarının azaltılması amacıyla, çimento (C) ile birlikte Ahlat Taşı Tozu (ATT) ve kireç kullanılarak oluşturulan RPB numunelerin basınç dayanımları hesaplanmıştır. Ahlat Taşı Tozu (ATT) görünümü **EK 3, Şekil Ek 1.11**'de görülmektedir. Karışım tipi olarak, daha ekonomik olduğundan dolayı Çizelge 3.15'de verilen lifsiz-pudralı RPB tipi seçilmiştir. Çizelge 3.15'de görüldüğü gibi su/bağlayıcı oranı 0,14'dür. Bağlayıcı miktarı olarak çimento ve silis dumanı miktarının toplamı alınmıştır. Bu kısımda en uygun çimento, ATT ve kireç miktarını tespit etmek için yapılan deneylerde su/bağlayıcı oranı 0,28 alınmıştır. Bunun sebebi yüksek su/bağlayıcı oranlarında ATT-RPB numunelerindeki basınç dayanım değerinin değişimini görebilmektir. Böylece su/bağlayıcı oranı 0,28 olacak şekilde 20 farklı ATT-RPB numunesi hazırlanmıştır.

Karışımlarda kireç miktarları Ahlat Taşı Tozu (ATT) miktarının %0, %30, %50, %70 ve %100'ü olacak şekilde oluşturulmuştur. Her bir yüzde oranında çimento miktarları da %0, %30, %50, %70 olacak şekilde değiştirilmiştir. Örneğin Kireç oranı Ahlat Taşı Tozu miktarının %0'ı olması durumunda çimento yüzdeleri %0, %30, %50 ile %70 olarak ayrı ayrı hesaplanmış ve değişik tip karışımlar oluşturulmuştur. Kireç oranı Ahlat Taşı Tozu miktarının %30'u olması durumunda da aynı şekilde çimento yüzdeleri %0, %30, %50 ve %70 olarak ayrı ayrı hesaplanmış ve değişik tip karışımlar oluşturulmuştur. Bu şekilde kireç miktarları Ahlat Taşı Tozu miktarının %30, %50, %70 ve %100'ü olacak şekilde her bir yüzde değeri için çimento miktarları %0, %30, %50 ve %70 olarak ayrı ayrı hesaplanmış ve değişik tip karışımlar oluşturulmuştur. ATT-RPB numunelerinde bağlayıcı görevi gören malzemeler, çimento, ATT, kireç ve silis dumanıdır.

20 farklı tipteki ATT-RPB numunesinin bağlayıcı karışım yüzdeleri Çizelge 3.38'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.38. Tüm karışım tiplerinde çimento, ahlata taşı tozu ve kireç yüzdeleri

Numune No	Çimento (C) (%)	ATT (%)	Kireç (%)	Kireç / ATT (%)
1	-	100	-	-
2	30	70	-	-
3	50	50	-	-
4	70	30	-	-
5	-	77	23	30
6	30	53,9	16,1	30
7	50	38,5	11,5	30
8	70	23	7	30
9	-	66,7	33,3	50
10	30	46,7	23,3	50
11	50	33,3	16,7	50
12	70	20	10	50
13	-	58,8	41,2	70
14	30	41,2	28,8	70
15	50	29,4	20,6	70
16	70	17,6	12,4	70
17	-	50	50	100
18	30	35	35	100
19	50	25	25	100
20	70	15	15	100

Karışıma giren tüm malzeme miktarları Çizelge 3.39’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.39. Çimento, ATT ve kireç bağlayıcılı lifsiz-pudralı RPB karışım miktarları (kg/m³)

NUMUNE NO	C	ATT (0-0,10 mm)	KİREÇ	Silis Dumanı	Kuars (0,15-0,6 mm)	Kuars Pudra (0-0,045 mm)	SA	Su
1	-	821	-	189	796	283	16	283
2	246	575	-	189	796	283	16	283
3	410,5	410,5	-	189	796	283	16	283
4	575	246	-	189	796	283	16	283
5	-	632	189	189	796	283	16	283
6	246	443	132	189	796	283	16	283
7	410,5	316	94,5	189	796	283	16	283
8	575	189	57	189	796	283	16	283
9	-	548	273	189	796	283	16	283
10	246	383,5	191,5	189	796	283	16	283
11	410,5	273,5	137	189	796	283	16	283
12	575	164	82	189	796	283	16	283
13	-	483	338	189	796	283	16	283
14	246	338,5	236,5	189	796	283	16	283
15	410,5	241,5	169	189	796	283	16	283
16	575	144	102	189	796	283	16	283
17	-	410,5	410,5	189	796	283	16	283
18	246	287,5	287,5	189	796	283	16	283
19	410,5	205,25	205,25	189	796	283	16	283
20	575	123	123	189	796	283	16	283

Çizelge 3.40. Çimento, ATT ve kireç bağlayıcılı lifsiz-pudralı RPB karışım miktarları (gram)

NUMUNE NO	C	ATT (0-0,10 mm)	KİREÇ	Silis Dumanı	Kuvars (0,15-0,6 mm)	Kuvars Pudra (0-0,045 mm)	SA	Su
1	-	103	-	24	99	35	2	36
2	31	72	-	24	99	35	2	36
3	51,5	51,5	-	24	99	35	2	36
4	72	31	-	24	99	35	2	36
5	-	79	24	24	99	35	2	36
6	31	55	17	24	99	35	2	36
7	51,5	39,5	12	24	99	35	2	36
8	72	24	7	24	99	35	2	36
9	-	69	34	24	99	35	2	36
10	31	48	24	24	99	35	2	36
11	51,5	34,25	17,25	24	99	35	2	36
12	72	21	10	24	99	35	2	36
13	-	60,5	42,5	24	99	35	2	36
14	31	42	30	24	99	35	2	36
15	51,5	30,25	21,25	24	99	35	2	36
16	72	18	13	24	99	35	2	36
17	-	51,5	51,5	24	99	35	2	36
18	31	36	36	24	99	35	2	36
19	51,5	25,75	25,75	24	99	35	2	36
20	72	15,5	15,5	24	99	35	2	36

Her bir numuneden 50x50x50 mm boyutlarında üçer adet hazırlanmıştır. Laboratuarda hazırlanan ve her bir kalıba giren malzeme miktarları Çizelge 3.40’da gösterilmiştir.

Bu şekilde toplamda 20 karışım tipi hazırlanmıştır. Çalışmada, Ahlat Taşı Tozunun çimento ile birlikte veya çimento kullanmadan kullanılabilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,28 alınmıştır. 20 farklı tipteki karışımlarda, silis dumanı, kuvars kumu, kuvars pudrası, süperakışkanlaştırıcı (SA) ve su miktarları sabit tutulmuştur.

Çalışmada, 20 farklı tipteki ATT-RPB numuneleri 7 gün 20°C standart su kürü - 2 gün 90°C su banyosu (SB) kürü – 2 gün 180°C etüv kürü şeklinde kombine kürde ayrı ayrı kür edilerek kür sonunda basınç dayanımları tespit edilmiştir. Hazırlanan numunelere kalıp içerisinde herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır.

Basınç deneyleri sonucunda, dayanımı en yüksek ve ekonomik olan ATT-RPB tipi seçilmiştir. Daha sonra seçilen bu tipin Çizelge 3.15'e uygun olması için su/bağlayıcı oranı 0,28'den 0,14'e düşürülmüştür. Çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB karışımında, malzeme miktarlarının 1 m³ karışımda kg cinsinden miktarları Çizelge 3.41'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.41. Çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg/m³)
Çimento	410,5
Ahlat Taşı Tozu (ATT) (0-0,10 mm)	241,5
Kireç	169
Silis Dumanı	189
Kum (0,15-0,6 mm)	902
Pudra (0-0,045 mm)	320
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	16
Çelik Lifler	-
Su	140
TOPLAM	2388

Çizelge 3.41'deki miktarlar, Çizelge 3.42'de görüldüğü gibi basınç deneyinde kullanılmak üzere 50x50x50 mm boyutlarındaki küp numunelere girecek şekilde, üçer adet laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.42. Basınç deneyi için çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	51,50
Ahlat Taşı Tozu (ATT) (0-0,10 mm)	30,29
Kireç	21,21
Silis Dumanı	24
Kum (0,15-0,6 mm)	112
Pudra (0-0,045 mm)	40
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	2
Çelik Lifler	-
Su	18
TOPLAM	299

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üçer adet çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.43’de görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.43. Eğilme deneyi için çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	308
Ahlat Taşı Tozu (ATT) (0-0,10 mm)	181
Kireç	127
Silis Dumanı	142
Kum (0,15-0,6 mm)	676
Pudra (0-0,045 mm)	240
Süper Akışkanlaştırıcı (Polycar 300)	12
Çelik Lifler	-
Su	105
TOPLAM	1791

Aynı şekilde 20 farklı tip arasından seçilen en uygun bağlayıcı yüzdesi oranlarında normal lifli ATT-RPB üretimlerine başlanmıştır. Çizelge 3.17’ye uygun olacak şekilde çimento oranı düşürülmüş normal lifli RPB karışımında, malzeme miktarlarınının 1 m³ karışımında kg cinsinden miktarları Çizelge 3.44’de verilmiştir.

Çizelge 3.44. Çimento oranı düşürülmüş normal lifli RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg/m³)
Çimento	384,50
Ahlat Taşı Tozu (ATT) (0-0,10 mm)	226,16
Kireç	158,34
Silis Dumanı	177
Kum (0,15-0,6 mm)	845
Pudra (0-0,045 mm)	300
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	15
Polysteel Çelik Lifler (L=22 mm) (Çap=0,55 mm)	135
Su	147
TOPLAM	2388

Basınç deneyinde kullanılmak üzere üçer adet çimento oranı düşürülmüş normal lifli RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.45’de görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.45. Basınç deneyi için çimento oranı düşürülmüş normal lifli RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	48
Ahlat Taşı Tozu (ATT) (0-0,10 mm)	28,23
Kireç	19,77
Silis Dumanı	22
Kum (0,15-0,6 mm)	105
Pudra (0-0,045 mm)	38
Süper Akışkanlaştırıcı (Polycar 300)	2
Polysteel Çelik Lifler (L= 22 mm) (Çap= 0,55 mm)	17
Su	19
TOPLAM	299

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üçer adet çimento oranı düşürülmüş normal lifli RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.46’da görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.46. Eğilme deneyi için çimento oranı düşürülmüş normal lifli RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	288,5
Ahlat Taşı Tozu (ATT) (0-0,10 mm)	169,70
Kireç	118,80
Silis Dumanı	133
Kum (0,15-0,6 mm)	632
Pudra (0-0,045 mm)	225
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	12
Polysteel Çelik Lifler (L=22 mm) (Çap=0,55 mm)	101
Su	111
TOPLAM	1791

Daha sonra 20 farklı tip arasından seçilen en uygun bağlayıcı yüzdesi oranlarında sanayi atık lifli ATT-RPB üretimlerine başlanmıştır. Çizelge 3.17'ye uygun olacak şekilde çimento oranı düşürülmüş sanayi atık lifli RPB karışımında, malzeme miktarlarının 1 m³ karışımda kg cinsinden miktarları Çizelge 3.47'de verilmiştir.

Çizelge 3.47. Çimento oranı düşürülmüş sanayi atık lifli RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg/m³)
Çimento	384,50
Ahlat Taşı Tozu (ATT) (0-0,10 mm)	226,16
Kireç	158,34
Silis Dumanı	177
Kum (0,15-0,6 mm)	845
Pudra (0-0,045 mm)	300
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	15
Sanayi Atığı Çelik Lifler (L=0-10 mm) (Çap= 0-1 mm)	135
Su	147
TOPLAM	2388

Basınç deneyinde kullanılmak üzere üçer adet çimento oranı düşürülmüş sanayi atık lifli RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.48'de görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.48. Basınç deneyi için çimento oranı düşürülmüş sanayi atık lifli RPB karışımı

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	48
Ahlat Taşı Tozu (ATT) (0-0,10 mm)	28,23
Kireç	19,77
Silis Dumanı	22
Kum (0,15-0,6 mm)	105
Pudra (0-0,045 mm)	38
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	2
Sanayi Atığı Çelik Lifler (L= 0-10 mm) (Çap= 0-1 mm)	17
Su	19
TOPLAM	299

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üçer adet çimento oranı düşürülmüş sanayi atık lifli RPB üretiminde kullanılacak karışım için gerekli malzemeler Çizelge 3.49'da görüldüğü gibi laboratuarda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.49. Eğilme deneyi için çimento oranı düşürülmüş sanayi atığı lifli RPB karışımı

Malzemeler	Miktar (gram)
Çimento	288,5
Ahlat Taşı Tozu (ATT) (0-0,10 mm)	169,70
Kireç	118,80
Silis Dumanı	133
Kum (0,15-0,6 mm)	632
Pudra (0-0,045 mm)	225
Süperakışkanlaştırıcı (Polycar 300)	12
Sanayi Atığı Çelik Lifler (L=0-10 mm) (Çap=0-1 mm)	101
Su	111
TOPLAM	1791

En yüksek basınç dayanımını veren kür şeklinin 7 Gün 20°C Standart Su Kürü - 2 Gün 90°C Su Banyosu – 2 Gün 180°C Etüv kombine kürü olduğu daha önce yapılan deneylerde bulunmuştur (Bakınız Bölüm 4.1.6.a). 24 saat sonra kalıptan çıkartılan her bir kür için üçer adet RPB basınç ve eğilme numuneleri 7 ve 28 günlük 20°C standart su kürü ile 7 Gün 20°C Standart Su Kürü-2 Gün 90°C Su Banyosu-2 Gün 180°C Etüv kombine kürüne alınmıştır. Çimento oranı düşürülmüş tüm lifsiz, normal lifli ve sanayi atık lifli RPB numunelere kür sonrası basınç ve eğilme deneyleri uygulanmıştır.

3.8. Üstyapı Tabaka Kalınlık Hesap Yöntemi

Bu kısımda üstyapı tabaka kalınlık karşılaştırması, esnek ve rijit üstyapılar olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Esnek üstyapılarda BSK kaplama, rijit üstyapılarda ise C30/37 normal dayanımlı beton kaplama ile tüm lifli ve lifsiz RPB yol kaplamaları seçilmiştir. Tüm üstyapıların kalınlıklarının hesaplanmasında kullanılan materyal ve yöntemler belirtilmiştir.

Çalışmada lifsiz ve lifli tüm RPB'lar rijit yol kaplaması olarak değerlendirilmiştir. Rijit kaplamalar için kontrol betonu olarak C30/37 normal dayanımlı beton tipi seçilmiştir.

Lifsiz ve lifli RPB'lara kombine ısıtma işlem uygulandığı zaman basınç ve eğilme dayanımları aynı özellikteki RPB numunelerin 28 günlük standart su kürü sonrası basınç ve eğilme dayanımlarından çok yüksek çıkmaktadır. Kombine ısıtma işlemler inşaat sahasında yol beton dökümü sırasında uygulanmadığından ancak prefabrik olarak üretilebilirler. Çalışmada kombine kür tipi uygulanmayan tüm üretimler “geleneksel üretim (yerinde beton döküm)”, kombine kür tipi uygulanan tüm üretimler ise “prefabrik üretim” olarak isimlendirilmiştir. RPB üretim maliyet düşürme çalışmalarında çimento ile ikameli olarak kullanılan ATT ve kireç içerikli karışımlara “çimento oranı düşürülmüş karışım” ismi verilmiştir. Maliyet düşürme çalışmalarında ayrıca sanayi atığı çelik lifler de kullanılmıştır. Daha önce herhangi bir üretimde kullanılmamış çelik liflerle üretilen karışımlara “normal lifli üretim”, inşaat ve sanayi sektöründe atıl veya atık durumda bulunan sanayi atığı liflerin kullanıldığı karışımlara ise “sanayi atığı lifli üretim” ismi verilmiştir. Çalışmada yol üstyapısında kullanılacak RPB'ların kalınlık hesaplamaları prefabrik ve geleneksel üretimdeki kalınlık olarak iki şekilde ele alınmıştır. Lifsiz RPB'ların kalınlık hesaplamaları prefabrik ve geleneksel üretimdeki kalınlık olarak iki şekilde ele alınmıştır. Prefabrik üretimde RPB'ların kombine kür sonrası basınç ve eğilme dayanımları, geleneksel üretimde ise 28 günlük standart su kürü sonrası basınç ve eğilme dayanımları dikkate alınmıştır. RPB rijit üstyapı beton kaplama tabaka kalınlıklarında karşılaştırma yapmak üzere, C30/37 kaplama betonlu rijit üstyapılar ve BSK kaplamalı esnek üstyapıların kalınlık hesapları ayrı ayrı yapılmıştır.

3.8.1. Esnek üstyapı tabaka kalınlık hesap yöntemi

Esnek üstyapı kalınlık hesaplamasında $W_{8,2}=10 \times 10^6$ ve $R=85\%$ güvenirlilik değerine göre, Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi (Güngör ve Sağlık 2008) göz önüne alınarak Çizelge 3.50 oluşturulmuştur. Aşınma, binder ve bitümlü temel esnek üstyapıda

kaplama tabakası olarak uygulanmıştır. Temel tabakasında kırmataş agrega kullanıldığı varsayılmıştır.

Çizelge 3.50. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ ve $R=\%85$ güvenilirlik için asfalt beton kaplamalı yol üstyapı kalınlıkları

Üstyapı Tabakaları	Üstyapı Kalınlığı (cm)
Aşınma	5
Binder	6
Bitümlü Temel	8
Kırmataş Temel	15

Esnek üstyapı alttemel kalınlık hesaplamasında $W_{8,2}=10 \times 10^6$ ve $R=\%85$ güvenilirlik değerine göre, Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi (Güngör ve Sağlık 2008) göz önüne alınarak Çizelge 3.51 oluşturulmuştur. Alttemelde kırmataş agrega kullanıldığı varsayılmıştır. Çalışmada esnek ve rijit üstyapılarda zemin Efektif Esneklik Modülü (M_R) 7500 psi kabul edilmiştir. Zemin Efektif Esneklik Modülü (M_R) 7500 psi olduğundan Çizelge 3.51’de görüldüğü gibi esnek üstyapı kırmataş alttemel kalınlığı 20 cm olarak alınmıştır.

Çizelge 3.51. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ ve $R=\%85$ güvenilirlik için asfalt beton kaplamalı yol alttemel kalınlığı

Esnek Kaplamalarda Efektif Esneklik Modülü (M_R) (psi)	Kırmataş Alttemel Kalınlığı (cm)
7500	20

3.8.2. Rijit üstyapı tabaka kalınlık hesap yöntemi

Rijit üstyapı kaplamaları donatısız ve derzli, kısmen donatılı ve derzli, sürekli donatılı ve derzsiz olmak üzere üç tipe inşa edilmektedir (Tunç 2007). Çalışmada sürekli donatılı ve derzsiz rijit kaplama tipi seçilmiştir. Rijit kaplamanın performansı için AASHTO yol testinden Formül 1.2’deki eşitlik elde edilmiştir:

$$\log W_{8,2} = Z_R S_o + 7,35 \log(D+1) - 0,06 + \log[\Delta PSI / (4,5 - 1,5)] / 1 + [1,624 \cdot 10^7 / (D+1)^{8,46}] \\ + (4,22 - 0,32 P_t) \log(S_c' C_d [D^{0,75} - 1,132] / 215,63 J [D^{0,75} - [18,42 / (E_c / k^{0,25})]]) \quad (1.2)$$

Burada;

$W_{8,2}$: 8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekrerrür sayısı

Z_R : Standart normal sapma

S_o : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası

D : Rijit plak kalınlığı, inç

ΔPSI : $P_o - P_t$ (Servis kabiliyetinde azalma miktarı)

P_o : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi

P_t : Nihai servis kabiliyeti indeksi

S_c' : Betonun kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti), psi

J : Yük transfer katsayısı

C_d : Drenaj katsayısı

E_c : Betonun elastisite modülü, psi

k : Yatak katsayısı, psi

Tüm rijit kaplama kalınlık hesaplamalarında $W_{8,2} = 10 \times 10^6$ alınmıştır. Kısım 1.2.1.c'de görüldüğü gibi, tüm rijit kaplama kalınlık hesaplamalarında Standart Normal Sapma (Z_R) değeri esnek kaplamalarda olduğu gibi %85 güvenilirlik değerine göre -1,037 alınmıştır. Kısım 1.2.1.c'de görüldüğü gibi, trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası (S_o) değeri 0,45 alınmıştır. Kısım 1.2.1.c'de görüldüğü gibi, tüm rijit kaplama kalınlık hesaplamalarında $P_o = 4,5$ ve $P_t = 2,5$ alınmıştır. Tüm rijit kaplama kalınlık hesaplamalarında $\Delta PSI = P_o - P_t = 2$ alınmıştır.

Tüm rijit kaplamaların kopma modülü (S_c') (Eğilmede çekme mukavemeti), eğilme deneyleri sonucu hesaplanan eğilme dayanım değerleridir. Bu değerler eğilme deney cihazında MPa cinsinden hesaplanmaktadır. Kalınlık hesaplamalarında MPa birimi Formül 1.2 gereği psi birimine dönüştürülmüştür.

Beton kaplamanın derzlerde veya çatlaklarda yükü transfer edebilme (dağıtabilme) yeteneği için yük transfer katsayısı (J) bir parametre olarak göz önüne alınmaktadır (Tunç 2007).

Çizelge 3.52’de yük transfer katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.52. Tavsiye edilen yük transfer katsayıları-AASHTO 1993 (Tunç 2007)

Banket	Asfalt		Beton Kaplama	
	Var	Yok	Var	Yok
Kaplama Tipi	J	J	J	J
Donatısız Derzli	3,2	3,8-4,4	2,5 -3,1	3,8-4,2
Donatılı Derzli	3,2	3,8-4,4	2,5-3,1	3,6-4,2
Sürekli Donatılı Derzsiz	2,9-3,2	-	2,3-2,9	-

Beton kaplamalarda drenaj katsayısı (C_d) için tavsiye edilen değerler, Çizelge 3.53’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.53. Tavsiye edilen drenaj katsayıları-AASHTO 1993 (Tunç 2007)

Drenaj Kalitesi	Suyun Uzaklaştırma Süresi	Kaplamanın Doygunluk Seviyesine Yakın Su İçeriğine Maruz Kaldığı Sürenin Yüzdesi			
		<%1	%1-5	%5-25	>%25
Çok iyi	2 saat	1,25-1,20	1,20-1,15	1,15-1,10	1,10
İyi	1 gün	1,20-1,15	1,15-1,10	1,10-1,00	1,00
Vasat	1 hafta	1,15-1,10	1,10-1,00	1,00-0,90	0,90
Kötü	1 ay	1,10-1,00	1,00-0,90	0,90-0,80	0,80
Çok Kötü	Dren yok	1,00-0,90	0,90-0,80	0,80-0,70	0,70

Betonun elastisite modülü, TS 500 (2000)’e göre aşağıdaki eşitlik ile bulunması önerilmektedir:

$$E_c = 3250 \sqrt{f_{ck}} + 14000 \quad (3.11)$$

Burada;

E_c : Betonun elastisite modülü (MPa)

f_{ck} : Betonun karakteristik silindir basınç mukavemeti (N/mm^2)

TS500 (2000)'e göre betonun karakteristik silindir basınç mukavemeti, küp basınç mukavemetinin 0,8 katı alınabilir. Deneysel çalışmalarda numuneler küp şeklinde hazırlanmıştır. Tüm rijit kaplamaların küp basınç mukavemeti, basınç deneyleri sonucu hesaplanan basınç dayanım değerleridir. Bu değerler basınç deney cihazında MPa cinsinden otomatik olarak hesaplanabilmektedir. Tüm rijit kaplama kalınlık hesaplamalarında MPa birimi psi birimine dönüştürülerek hesaplama yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu bulunan küp basınç dayanımlarının 0,8 katı alınarak, numunelerin karakteristik silindir basınç mukavemetleri hesaplanmıştır. Formül 3.11 ile numunelerin elastik modülleri hesaplanmıştır.

Esnek kaplamalarda zemin taşıma gücü efektif esneklik modülü (M_R) ile tanımlanırken beton kaplamalarda ise zeminin taşıma gücü efektif yatak katsayısı (zemin reaksiyon modülü ile) tanımlanmaktadır. Zemin yatak katsayısı (k) ile esneklik modülü (M_R) arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır (Tunç 2007):

$$k = M_R / 19,4 \quad (3.12)$$

Burada;

k : Yatak katsayısı (Plaka yükleme deneyi ile) (psi)

M_R : Esneklik modülü (Üç eksenli deney ile) (psi)

Esnek ve rijit tüm kaplama üstyapı kalınlık hesaplamalarında M_R değeri 7500 psi alınmıştır. Zemin yatak katsayısı (k), M_R değeri 7500 psi alınarak, tüm rijit kaplama kalınlık hesaplarında formül 3.12 yardımıyla hesaplanmıştır.

Formül 1.2 ile rijit kaplama kalınlığı kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Hesaplama için gerekli tüm değerler Formül 1.2’de yerine konularak rijit kaplama kalınlığı (D) hesaplanmıştır. AASHTO tarafından geliştirilen abaklar yardımıyla da bu hesaplama bulunabilmektedir. Kalınlık hesaplamalarında abaklar kullanılmamış, C30/37 normal dayanımlı beton ile lifli ve lifsiz RPB yol kaplama kalınlığı hesaplamalarında Formül 1.2 kullanılmıştır. Formül 1.2 ile kaplama kalınlığı (D) inç olarak bulunmuş ve cm’ye çevrilmiştir. Rijit alttemel kalınlığı esnek üstyapı alttemel kalınlığına eşit kabul edilerek 20 cm alınmıştır.

3.9. Üstyapı Maliyet Hesap Yöntemi

Bu kısımda üstyapılar esnek ve rijit üstyapılar olmak üzere iki şekilde irdelenmiştir. Esnek üstyapılarda BSK kaplama, rijit üstyapılarda ise C30/37 normal dayanımlı beton kaplama ile tüm lifli ve lifsiz RPB yol kaplamaları seçilmiştir. Tüm üstyapıların maliyet hesaplanmasında kullanılan materyal ve yöntemler bu kısımda belirtilmiştir. Çalışmada lifsiz ve lifli tüm RPB’lar rijit yol kaplaması olarak değerlendirilmiştir. Rijit kaplamalar için kontrol betonu olarak C30/37 normal dayanımlı beton tipi seçilmiştir.

3.9.1. Esnek üstyapı maliyet hesap yöntemi

Maliyet hesaplamalarında aşınma tabakasının birim hacim ağırlığı $2,4 \text{ t/m}^3$ alınmış ve içerisindeki Asphalt Çimentosu (AC) oranı %6 kabul edilmiştir. Aşınma tabakasındaki karışımda 1 m^3 karışım içerisindeki AC miktarı yaklaşık 0,144 tondur. 1 metre kalınlıkta ve 1 m^2 aşınma tabakası yüzey alanında kullanılan AC miktarı 0,144 ton ise kalınlık değişimde (örneğin aşınma tabakasının 5 cm olması durumunda) 1 m^2 aşınma tabakasında kullanılan AC miktarı $0,05 * 0,144 = 0,0072$ ton olmaktadır.

Binder tabakasının birim hacim ağırlığı $2,4 \text{ t/m}^3$ alınmış ve içerisindeki AC oranı %5 kabul edilmiştir. Binder tabakasındaki karışımda 1 m^3 karışım içerisindeki AC miktarı yaklaşık 0,12 tondur. 1 metre kalınlıkta ve 1 m^2 binder tabakası yüzey alanında kullanılan AC miktarı 0,12 ton ise kalınlık değişimde (örneğin binder tabakasının 6 cm

olması durumunda) 1 m² binder tabakasında kullanılan AC miktarı 0,06 * 0,12=0,0072 ton olmaktadır.

Bitümlü temel tabakasının birim hacim ağırlığı 2,3 t/m³ alınmış ve içerisindeki AC oranı %3,5 kabul edilmiştir. Bitümlü temel tabakasındaki karışımda 1 m³ karışım içerisindeki AC miktarı yaklaşık 0,081 tondur. 1 metre kalınlıkta ve 1 m² bitümlü temel tabakası yüzey alanında kullanılan AC miktarı 0,081 ton ise kalınlık değişimde (örneğin bitümlü temel tabakasının 8 cm olması durumunda) 1 m² bitümlü temel tabakasında kullanılan AC miktarı 0,081 * 0,08 = 0,0065 ton olmaktadır. Toplam platform genişliği 24 metre, uzunluğu 1 km. olan bölünmüş bir asfalt yolun toplam yüzey alanı 24000 m² olarak hesaplanmıştır. Bu değerler AC zati bedeli, AC nakil bedeli ve taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılma bedelinin hesaplanmasında göz önüne alınmıştır.

2014 yılı Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Batman Rafinerisi Asfalt çimentosunun (AC) birim fiyatı 1310,00 TL/ton'dur (ÇSB 2014). Birim fiyat açıklamasında AC zati bedeli, AC'nun rafineriden nakliye bedeli ve taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılması hariç denilmektedir. Bu nedenle hesaplamalarda AC zati bedelleri, AC nakliye bedelleri ve taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılma bedeli de ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Taşıma bedeli formülü aşağıda gösterilmiştir (KGM 2014):

$$F = 1,25 \times A \times K \times (0,0007 \times M + 0,01) - 0,00260 \times K \text{ TL/ton} \quad (3.13)$$

Burada;

A=1,00 (KGM tarafından genellikle 1,00 alınmaktadır)

K=Taşıma Katsayısı (2014 yılı için K=196)

M= Taşıma mesafesi (km)

F= Taşıma Bedeli (TL/Ton)

Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakasında AC kullanılmış olup, temel ve alttemelde AC bulunmamaktadır. Temel ve alttemelerde sadece KGM tarafından verilen 2014 yılı birim fiyatları esas alınmıştır. Karışımda kullanılan agregalar KGM tarafından birim fiyata dâhil edilmiştir.

$W_{8,2} = 10 \times 10^6$ değerinde, tabaka cinslerine göre 2014 yılı birim fiyatlar KGM ve Çevre Şehircilik Bakanlığı (2014) birim fiyat listesinden alınmıştır. Rafineri ile esnek üstyapılı yolun yapıldığı konum birbirinden uzaklaştıkça taşıma mesafesinin artmasından dolayı taşıma bedellerinin artacağı unutulmamalıdır. Hesaplamalarda Bitlis-Üçyol ile Tatvan arası (0+000)-(1+000) km karayolu göz önüne alınmıştır. Bitlis-Batman rafineri arası mesafe ortalama 138 km'dir. Toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir asfalt yolun 1 km maliyeti $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre hesaplanmıştır.

3.9.2. Rijit üstyapı maliyet hesap yöntemi

Rijit üstyapı maliyet hesaplamalarında C30/37 normal dayanımlı beton kaplama ile tüm lifli ve lifsiz RPB yol kaplama tipleri değerlendirilmiştir. Tüm üstyapıların maliyet hesaplanmaları bu kısımda yapılmıştır.

3.9.2.a. C30/37 normal dayanımlı beton üstyapı maliyet hesap yöntemi

Tunç (2007)'ye göre genel olarak 20 yıllık proje ömrü içinde 8,2 ton standart dingil yükü sayısı $60-75 \times 10^6$ 'dan fazla olan yolların rijit kaplama olarak yapılması hemen hemen bir zorunluluktur. Tunç (2007)'ye göre rijit yollar derzli donatısız, kısmen donatılı ve derzsiz sürekli donatılı olarak inşa edilebilirler. Yol beton kaplama hesaplarında trafik yüklerinden dolayı meydana gelen eğilme gerilmelerinin beton tarafından karşılanmaması durumunda, beton içerisine donatı katılarak eğilme dayanımı artırılmaktadır. Çalışmada RPB numunelerinin basınç ve eğilme dayanımlarının yüksek çıkmasından dolayı, RPB yol kaplamaları derzsiz donatısız veya derzsiz lifli olacak şekilde inşa edilebilirler. Seyahat konforu açısından normal rijit kaplamaların derzli yapılması, istenmeyen bir durumdur. Rijit yolun derzsiz yapılması durumunda ise

kaplamanın eğilme dayanımını artırmak için beton içerisine donatı katılmaktadır. Beton yol içerisine donatı katılması rijit yol yapım maliyetini artırmaktadır.

Bu çalışmada en uygun bir rijit kaplamanın, yolcu ve sürücülerini rahatsız etmeyecek şekilde güvenli, derzsiz ve içerisine donatı katılmadan inşa edilen ekonomik bir kaplama olması gerektiği fikri ortaya atılmıştır. Bu nedenle maliyet hesaplama çalışmalarında C30/37 normal dayanımlı beton yol kaplama ile geleneksel lifsiz ve lifli RPB yol kaplamaları derzsiz olarak değerlendirilmiştir. C30/37 normal beton üstyapı maliyet hesabı yapılırken, sürekli donatılı ve derzsiz kaplama tipi seçilerek maliyet hesaplamaları yapılmıştır.

Tabaka cinslerine göre 2014 yılı birim fiyatlar KGM ve Çevre Şehircilik Bakanlığı (2014) birim fiyat listesinden alınmıştır. KGM, Çevre Şehircilik Bakanlığı ve diğer kurumların birim fiyat incelemesinde, RPB üretiminde genel bir poz numarasına rastlanılmamıştır. RPB üretimlerinde çimento zati bedeli, C30/37 normal dayanımlı beton yol kaplama birim fiyat poz numarasında olduğu gibi Çevre Şehircilik Bakanlığı (2014) birim fiyat listesinden alınmıştır. RPB üretimlerinde donatı bulunmadığından rijit plak beton dökümü demirsiz beton dökümü KGM (2014) birim fiyat poz numarasıyla hesaplanmıştır. C30/37 normal dayanımlı beton yol kaplamasında donatı bulunduğundan dolayı birim fiyat hesaplamasında KGM (2014) demirli beton pozuna göre hesaplama yapılmıştır. RPB üretiminde kullanılan süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve normal çelik lif ve kireç birim fiyatları için Çevre Şehircilik Bakanlığı (2014) birim fiyat pozları esas alınmıştır. Ahlat Taşı Tozu (ATT) ve sanayi atığı çelik lifler için herhangi bir poza rastlanmadığından, ATT poz numarası “Özel Poz 1”, Sanayi atığı çelik lif poz numarası “Özel Poz 2” olarak belirtilmiştir.

Tasarım hesapları, beton kesitinde yaklaşık %0,67 oranında donatı kullanılması gerektiğini göstermektedir (Edis 2007).

Araştırmacı veya çalışanlara yardımcı olmak amacıyla, 1 m³ betonda kullanılması gereken minimum boyuna donatı miktarı hesap örneği aşağıda verilmiştir:

$$1 \text{ m}^2 = 10000 \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ m}^2 \text{ beton kesitinde olması gereken donatı kesit alanı} = 10000 * 0,67 / 100 = 67 \text{ cm}^2$$

Yolda kullanılacak boyuna donatı çapı 12 mm olarak kabul edilirse ($r = 6 \text{ mm}$);

$$12 \text{ mm}'\text{lik donatının kesit alanı} = \pi * r^2 = \pi * 6^2 = 113,10 \text{ mm}^2 = 1,131 \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ m}^2 \text{ beton kesitinde kullanılması gereken donatı sayısı} = 67 / 1,131 = 60 \text{ Adet}$$

$$\text{Kesit uzunluğu} = 1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

$$1 \text{ m uzunluk ve 12 mm çapında 1 adet donatının hacmi} = 100 \text{ cm} * 1,131 \text{ cm}^2 = 113,1 \text{ cm}^3$$

$$60 \text{ Adet 12 mm çaplı donatının toplam hacmi} = 60 * 113,1 = 6786 \text{ cm}^3$$

$$\text{Donatı birim ağırlığı} = 7,85 \text{ gr/cm}^3$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ yol betonunda gerekli donatı miktarı} = 6786 * 7,85 = 53270 \text{ gr} = 53,27 \text{ kg}$$

Hesaplama sonucunda, 1 m^3 derzsiz ve sürekli donatılı yol betonunda 12 mm çaplı minimum 53,27 kg boyuna donatı kullanılması gerektiği söylenebilir.

Çalışmada, C30/37 normal dayanımlı derzsiz ve sürekli donatılı beton kaplama maliyet hesaplamasında, 1 m^3 betonda 60 adet ve 12 mm çaplı toplam 53,27 kg ağırlığında donatı kullanıldığı kabul edilmiştir.

KGM ve Çevre Şehircilik Bakanlığı (2014) birim fiyat açıklamasında çimento, demir ve demir işçiliği bedelleri hariç denilmektedir. Çalışmada C30/37 betonu için 1 m^3 karışımında 450 kg CEM II / A-M (P-L) 42,5 R türü çimento kullanılmıştır. Yolun toplam yüzey alanı 24000 m^2 olarak hesaplanmıştır. Rijit yolun sürekli donatılı-derzsiz olarak inşa edildiği varsayılmıştır. Demir ve çimento her yerde kolaylıkla temin edildiğinden nakliye bedeli dikkate alınmamıştır. Karışımında kullanılan agregalar KGM (2014) birim fiyat listesinde birim fiyata dâhil edilmiştir.

3.9.2.b. Lifsiz RPB üstyapı maliyet hesap yöntemi

Geleneksel lifsiz RPB kaplamalar sürekli ve derzsiz olarak inşa edilmekte ve eğilme dayanımlarının çok yüksek olmasından dolayı içerisine donatı katılmamaktadır. Prefabrik lifsiz RPB kaplamalar ise derzli olarak inşa edilmekte ve eğilme

dayanımlarının çok yüksek olmasından dolayı içerisine donatı katılmamaktadır. Geleneksel lifsiz kaplamalar inşaat sahasında beton dökümü yapılan, normal rijit kaplamaların yapımına benzerlik gösterir. Prefabrik lifsiz RPB kaplamalar ise inşaat sahasında üretilmezler, prefabrik olarak imal edilebilirler.

Çalışmada kombine kür tipi uygulanmayan tüm üretimler “geleneksel üretim” (yol inşaat sahasında beton döküm), kombine kür tipi uygulanan tüm üretimler ise “prefabrik üretim” (kaplamaların fabrikada yüksek sıcaklık ve basınçtaki otoklav kürü, yüksek sıcaklıktaki su banyosu kürü veya yüksek sıcaklıktaki kombine kürlerde üretimi) olarak isimlendirilmiştir. RPB üretim maliyet düşürme çalışmalarında çimento ile ikameli olarak kullanılan ATT ve kireç içerikli karışımlara “çimento oranı düşürülmüş karışım” ismi verilmiştir. Maliyet düşürme çalışmalarında ayrıca sanayi atığı çelik lifler de kullanılmıştır. Daha önce herhangi bir üretimde kullanılmamış çelik liflerle üretilen karışımlara “normal lifli üretim”, inşaat ve sanayi sektöründe atıl veya atık durumda bulunan sanayi atığı liflerin kullanıldığı karışımlara ise “sanayi atığı lifli üretim” ismi verilmiştir. Bu kısımda lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesapları aşağıdaki görüldüğü gibi dört farklı şekilde irdelenmiştir.

- Prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar
- Geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar
- Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar
- Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar

Prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar; karışımında bağlayıcı olarak çimento ve silis dumanı bulunan, yüksek ısıllı işlemler görmüş lifsiz RPB kaplamalı üstyapıları ifade etmektedir. Geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar; karışımında bağlayıcı olarak çimento ve silis dumanı bulunan, sadece standart su kürü görmüş, yüksek ısıllı işlem görmemiş lifsiz RPB kaplamalı üstyapıları ifade etmektedir. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar; karışımında bağlayıcı olarak çimento, Ahlat Taşı Tozu (ATT), kireç ve silis dumanı bulunan, yüksek ısıllı işlemler görmüş lifsiz RPB kaplamalı üstyapıları ifade etmektedir. Çimento

oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar; karışımında bağlayıcı olarak çimento, Ahlat Taşı Tozu (ATT), kireç ve silis dumanı bulunan, sadece standart su kürü görmüş, yüksek ısı işlem görmemiş lifsiz RPB kaplamalı üstyapıları ifade etmektedir.

Prefabrik lifsiz RPB için 1 m³ karışımında 821 kg CEM II / A-M (P-L) 42,5 R türü çimento kullanılmıştır. Yolun toplam yüzey alanı 24000 m² olarak hesaplanmıştır.

Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB için 1 m³ karışımında 410,50 kg CEM II / A-M (P-L) 42,5 R türü çimento, 241,50 kg Ahlat Taşı Tozu (ATT), ve 169 kg kireç kullanılmıştır. Bitlis ili Tatvan ilçesinde faaliyet gösteren Peker İnş. San. Tic. Ltd.Şti.'den alınan bilgiye göre, Ahlat Taşı Tozu, tonu 10 TL'den satılabilecek çok ucuz bir malzemedir. Ucuz olmasının sebebi henüz kullanım alanının olmadığından dolayı atıl bir hammadde olarak görülmesidir. Ahlat Taşı kesim fabrikalarında arta kalan bu toz hammadde kullanılmamakta, herhangi bir üretimde değerlendirilmediğinden dolayı talep olmamaktadır. ATT ile ilgili herhangi bir birim fiyat poz numarası olmadığından tüm hesaplamalarda "Özel Poz 1" olarak isimlendirilmiştir. Yolun toplam yüzey alanı 24000 m² olarak hesaplanmıştır.

Geleneksel lifsiz RPB için 1 m³ karışımında 821 kg CEM II / A-M (P-L) 42,5 R türü çimento kullanılmıştır. Yolun toplam yüzey alanı 24000 m² olarak hesaplanmıştır.

Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB için 1 m³ karışımında 410,50 kg CEM II/A-M (P-L) 42,5 R türü çimento, 241,50 kg Ahlat Taşı Tozu (ATT), ve 169 kg kireç kullanılmıştır. Yolun toplam yüzey alanı 24000 m² olarak hesaplanmıştır.

3.9.2.c. Lifli RPB üstyapı maliyet hesap yöntemi

Geleneksel lifli RPB kaplamalar sürekli ve derzsiz olarak inşa edilmekte ve eğilme dayanımlarının çok yüksek olmasından dolayı içerisine donatı katılmamaktadır. Prefabrik lifli RPB kaplamalar ise derzli olarak inşa edilmekte ve eğilme dayanımlarının

çok yüksek olmasından dolayı içerisinde donatı katılmamaktadır. Geleneksel lifli kaplamalar inşaat sahasında beton dökümü yapılan, normal rijit kaplamaların yapımına benzerlik gösterir. Prefabrik lifli RPB kaplamalar ise inşaat sahasında üretilmezler, prefabrik olarak imal edilebilirler.

Lifli RPB kaplamaların basınç ve eğilme dayanımları normal rijit kaplamaların basınç ve eğilme dayanımlarından çok yüksek olduğundan, lifli RPB kaplamalarda donatı kullanımına gerek yoktur. Bu durum kaplama maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır. Lifli RPB'lara kombine ısıtma işlemi uygulandığı zaman basınç ve eğilme dayanımları aynı özellikteki numunelerin 28 günlük standart su kürü sonrası basınç ve eğilme dayanımlarından çok yüksek çıkmaktadır. Kombine ısıtma işlemleri inşaat sahasında yol beton dökümü sırasında uygulanmadığından ancak prefabrik olarak üretilbilirler. Bu nedenle yol üst yapısında kullanılacak RPB'lerin maliyet analizleri geleneksel ve prefabrik üretim olarak iki şekilde irdelenmiştir. Çalışmada ayrıca normal çelik lifler yerine sanayi atığı çelik lifler de kullanılarak yüksek değerlerde basınç ve eğilme değerleri elde edilmiştir. Normal lifli RPB kaplamalı üst yapıların maliyet analizine ek olarak sanayi atığı çelik lifli RPB kaplamalı üst yapıların maliyet analizi de yapılmıştır. Çalışmada kombine kür tipi uygulanmayan tüm üretimler "geleneksel üretim" (yol inşaat sahasında beton dökümü), kombine kür tipi uygulanan tüm üretimler ise "prefabrik üretim" (kaplamaların fabrikada yüksek sıcaklık ve basınçtaki otoklav kürü, yüksek sıcaklıktaki su banyosu kürü veya yüksek sıcaklıktaki kombine kürlerde üretimi) olarak isimlendirilmiştir. RPB üretim maliyet düşürme çalışmalarında çimento ile ikameli olarak kullanılan ATT ve kireç içerikli karışımlara "çimento oranı düşürülmüş karışım" ismi verilmiştir. Maliyet düşürme çalışmalarında ayrıca sanayi atığı çelik lifler de kullanılmıştır. Daha önce herhangi bir üretimde kullanılmamış çelik liflerle üretilen karışımlara "normal lifli üretim", inşaat ve sanayi sektöründe atıl veya atık durumda bulunan sanayi atığı liflerin kullanıldığı karışımlara ise "sanayi atığı lifli üretim" ismi verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Basınç Deneyleri

4.1.1. Kontrol numunesi beton basınç deneyi

24 saat sonra kalıptan çıkarılan kontrol numunesi betonlar 7 ve 28 günlük üçer adet olmak üzere 20°C standart su kürü havuzuna alınmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Kontrol numunesi basınç deney sonuçları

Standart Su Kürü (20°C)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
7 Gün	32
28 Gün	37

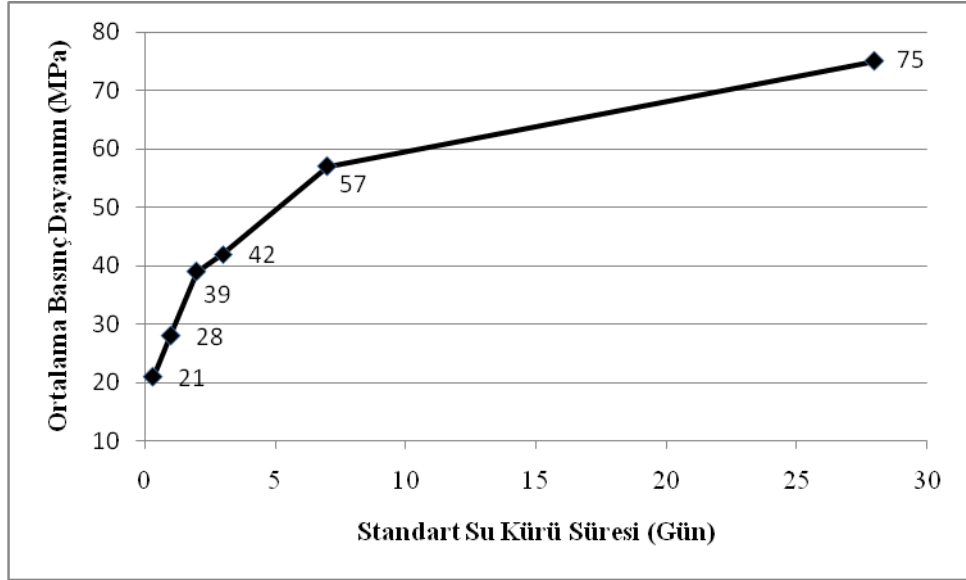
4.1.2. Lifsiz RPB standart su kürü basınç deneyi

Hazırlanan numunelere kalıp içerisinde herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Yağlanan kalıplara malzemeler şişle sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplarda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılmış ve farklı sürelerde standart su kürüne alınmıştır. Bu numunelere standart su kürü sonrası basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Lifsiz RPB standart su kürü basınç deney sonuçları

Standart Su ürü (20°C)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
8 Saat	21
1 Gün	28
2 Gün	39
3 Gün	42
7 Gün	57
28 Gün	75

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi 20°C standart su kür süresi arttıkça RPB basınç dayanımı da artmaktadır.



Şekil 4.1. Lifsiz RPB standart su kürü basınç deney sonuçları

4.1.3. Lifli RPB standart su kürü basınç deneyi

Hazırlanan numunelere kalıp içerisinde herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Yağlanan kalıplara malzemeler şişle sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplarda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılmış ve en yüksek dayanım 28 günde meydana geldiği için sadece 28 günlük standart su kürüne alınmıştır. Bu numunelere 28 gün standart su kürü sonrası basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.3’de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Lifli RPB standart su kürü basınç deney sonuçları

Standart Su Kürü (20°C)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
28 Gün	106

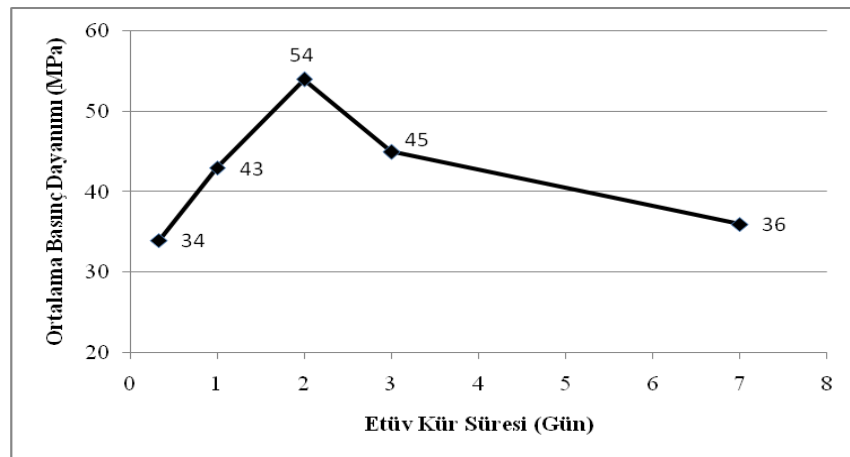
4.1.4. RPB etüv kürü basınç deneyi

Hazırlanan numunelere kalıp içerisinde herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Yağlanan kalıplara malzemeler şişle sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplarda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılmış ve herhangi bir küre girmeden doğrudan farklı sürelerde etüv kürüne alınmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.4’de görülmektedir.

Çizelge 4.4. RPB etüv kürü basınç deney sonuçları

Etüv Kürü (90°C)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
8 Saat	34
1 Gün	43
2 Gün	54
3 Gün	45
7 Gün	36

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi 2 günlük kür süresine kadar RPB basınç dayanımı artmakta, 2 günden sonra düşmektedir.



Şekil 4.2. Lifsiz RPB etüv kürü basınç deney sonuçları

Çizelge 4.4’de 90°C etüv kürde en yüksek dayanım 2 günlük etüv küründe gerçekleşmiştir. 2 günlük etüv kürüne kadar dayanımın sürekli olarak arttığı, 2 günden sonra dayanımların azaldığı görülmektedir. Dayanımın düşme sebebi, etüvdeki yüksek

sıcaklığın ve etüv süresinin uzun olması sebebiyle, hidrasyonun yeterince gerçekleşmemesi, betonda oluşan C-S-H jellerinin kristal yapıya dönüşmesiyle boşlukları dolduramayarak, daha gözenekli bir ortam oluşturması olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla lifli ve lifsiz RPB numunelerin etüvden önce mutlaka 3-7 gün 20°C standart su kürüne alınması gerekmektedir. Bu süre içerisinde çimento taneleri su ile hidrasyona girerek basınç dayanımına etkisi sağlanmalıdır. Hidrasyona girmeyen diğer çimento tanelerinin basınç dayanımına katkı sağlaması için, betonun standart su küründen sonra etüv ve benzeri diğer ısı işlemlere girmesi gerekmektedir.

4.1.5. RPB otoklav kürü basınç deneyi

Otoklav kürü için RPB numuneleri lifsiz ve lifli olmak üzere iki şekilde hazırlanmıştır. Lifsiz ve lifli RPB numunelere 4, 8 ve 12 saat otoklav kürü uygulanmıştır.

4.1.5.a. Lifsiz RPB otoklav kürü basınç deneyi

Hazırlanan numunelere kalıp içerisinde herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Yağlanan kalıplara malzemeler şişle sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplarda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılmış ve herhangi bir küre girmeden doğrudan farklı sürelerde otoklav kürüne alınmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.5’de görülmektedir.

Çizelge 4.5. Lifsiz RPB otoklav kürü basınç deney sonuçları

Otoklav Kürü (1,3 MPa-180°C)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
4 Saat	99
8 Saat	142
12 Saat	79

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi 8 saatlik otoklav kür süresine kadar lifsiz RPB basınç dayanımı artmakta, 8 saatten sonra düşmektedir.



Şekil 4.3. Lifsiz RPB otoklav kürü basınç deney sonuçları

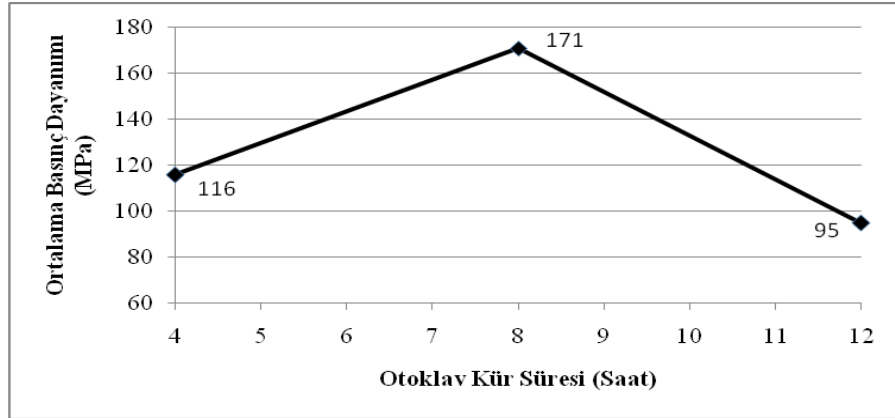
4.1.5.b. Lifli RPB otoklav kürü basınç deneyi

Hazırlanan numunelere kalıp içerisinde herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Yağlanan kalıplara malzemeler şişle sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplarda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılmış ve herhangi bir küre girmeden doğrudan farklı sürelerde otoklav kürüne alınmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.6’da görülmektedir.

Çizelge 4.6. Lifli RPB otoklav kürü basınç deney sonuçları

Otoklav Kürü (1,3 MPa-180°C)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
4 Saat	116
8 Saat	171
12 Saat	95

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi 8 saatlik otoklav kür süresine kadar lifli RPB basınç dayanımı artmakta, 8 saatten sonra düşmektedir.



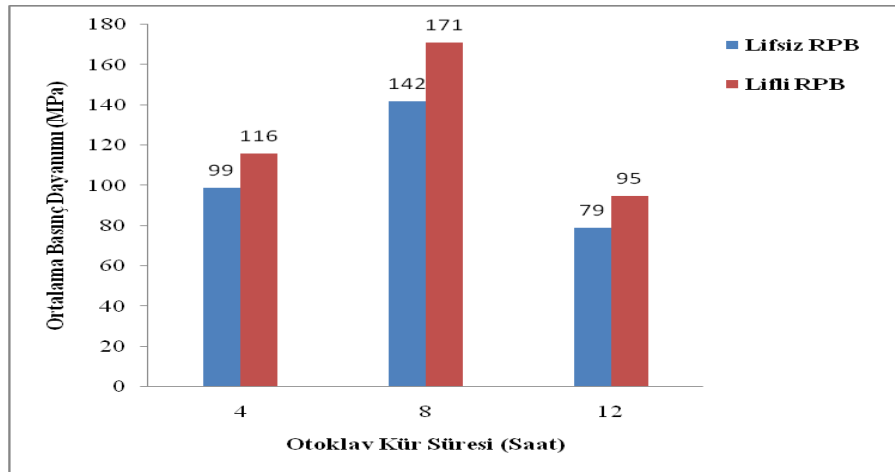
Şekil 4.4. Lifli RPB otoklav kürü basınç deney sonuçları

Lifsiz ve lifli RPB otoklav basınç deney sonuçları Çizelge 4.7’de görülmektedir.

Çizelge 4.7. Lifsiz ve Lifli RPB otoklav kürü basınç deney sonuçları

Otoklav Kürü (1,3 MPa-180°C)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	
	Lifsiz	Lifli
4 Saat	99	116
8 Saat	142	171
12 Saat	79	95

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi 8 saatlik otoklav kür süresine kadar lifli ve lifsiz RPB basınç dayanımı artmakta, 8 saatten sonra düşmektedir.



Şekil 4.5. Lifli ve lifsiz RPB otoklav kürü basınç deney sonuçları

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.5 otoklav kür sonuçlarında görüldüğü gibi, eşit kür şartlarında lifli ve lifsiz RPB numuneleri basınç dayanımlarının aynı saatte yükselip düşmesi göz önüne alınarak benzer özellikler gösterdiği ve eşit kür şartlarından etkilenmediği söylenebilir. Lifli ve lifsiz RPB numunelerin her iki tipinin otoklav küründe 4 saatte belirli bir basınç dayanımına kavuştuğu, 8 saatte maksimum düzeye ulaştığı ve 12 saatte dayanımların düştüğü görülmüştür. Tüm numunelerde çatlak oluşumu görülmemiştir.

4.1.6. RPB kombine kür basınç deneyi

24 saat sonra kalıptan çıkartılan tüm RPB'lara değişik şekilde kür birleşimi uygulanmıştır. Tüm numunelere değişik kombine kürler uygulanarak kür sonrası basınç deneyleri yapılmıştır.

4.1.6.a. Lifsiz RPB kombine kür basınç deneyi

Çalışmada kombine kür deneyleri değişik ısı ve sürelerde uygulanmıştır. Çizelge 3.33'de görüldüğü gibi 9 tip kombine kür çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucunda en yüksek basınç dayanımını veren kombine kür şekli bulunmuştur. Bu numunelere kür sonrası basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.8'de görülmektedir.

Çizelge 4.8. Lifsiz RPB kombine kür basınç deney sonuçları

Kombine Kür	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
3 Gün 90°C SB Kürü + 1 gün 180°C Etüv Kürü	116
3 Gün 90°C SB Kürü + 2 gün 180°C Etüv Kürü	117
3 Gün 90°C SB Kürü + 3 gün 180°C Etüv Kürü	109
7 Gün 20°C Su Kürü + 1 gün 180°C Etüv Kürü	108
7 Gün 20°C Su Kürü + 2 gün 180°C Etüv Kürü	109
7 Gün 20°C Su Kürü + 3 gün 180°C Etüv Kürü	89
7 Gün 20°C Su Kürü + 2 gün 90°C SB Kürü + 1 gün 180°C Etüv Kürü	115
7 Gün 20°C Su Kürü + 2 gün 90°C SB Kürü + 2 gün 180°C Etüv Kürü	123
7 Gün 20°C Su Kürü + 2 gün 90°C SB Kürü + 3 gün 180°C Etüv Kürü	108

Çizelge 4.41’de en yüksek basınç dayanımınının 7 gün 20°C standart su kürü - 2 Gün 90°C su banyosu kürü – 2 Gün 180°C etüv küründen sağlandığı görülmektedir.

4.1.6.b. Lifli RPB kombine kür basınç deneyi

Çizelge 4.7 otoklav kür sonuçlarında görüldüğü gibi eşit kür şartlarında lifli ve lifsiz RPB numuneleri basınç dayanımlarının aynı saatte yükselip düşmesi göz önüne alınarak benzer özellikler göstermiştir. Lifli ve lifsiz RPB numunelerin her iki tipinin otoklav küründe 4 saatte belirli bir basınç dayanımına kavuştuğu, 8 saatte maksimum düzeye ulaştığı ve 12 saatte dayanımların düştüğü görülmüştür. Çizelge 4.7’ye göre lifli ve lifsiz RPB numunelerin eşit kür şartlarından etkilenmediği söylenebilir. Bu sebeple lifli RPB numuneler lifsiz RPB numunelerde uygulandığı şekilde, kalıplarda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılmış ve en yüksek basınç dayanımını veren 7 Gün 20°C Standart Su Kürü - 2 Gün 90°C Su Banyosu – 2 Gün 180°C Etüv kombine kürüne alınmıştır. Bu numunelere kür sonrası basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.9’da görülmektedir.

Çizelge 4.9. Lifli RPB kombine kür basınç deney sonuçları

Kombine Kür	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
7 Gün 20°C + 2 gün 90°C SB + 2 gün 180°C Etüv	154

Lifsiz ve lifli RPB maksimum basınç dayanımı veren kombine kür sonrası basınç deney sonuçları Çizelge 4.10’da görülmektedir.

Çizelge 4.10. Lifli ve lifsiz RPB kombine kür basınç deney sonuçları

Kombine Kür	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
7 Gün 20°C + 2 gün 90°C SB + 2 gün 180°C Etüv (Lifsiz RPB)	123
7 Gün 20°C + 2 gün 90°C SB + 2 gün 180°C Etüv (Lifli RPB)	154

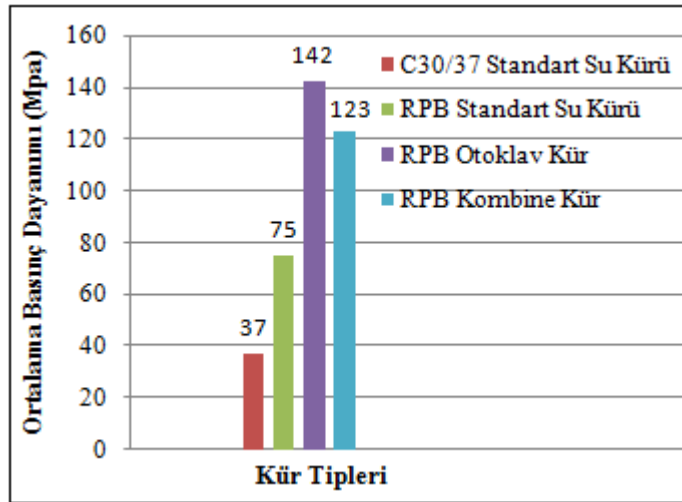
4.1.7. Basınç dayanımı en yüksek kür tipinin belirlenmesi

Yapılan tüm kürler içerisinde basınç dayanımı en yüksek çıkan kür tipi belirlenmiştir. Tüm kürlerdeki lifsiz RPB'ların maksimum basınç dayanımları Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Değişik kürlerde lifsiz RPB maksimum basınç dayanımları

Kür Tipi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
C30/37 Standart Su Kürü	37
RPB Standart Su Kürü	75
RPB Otoklav Kür	142
RPB Kombine Kür	123

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi lifsiz RPB maksimum basınç dayanımları otoklav küründen elde edilmiştir.



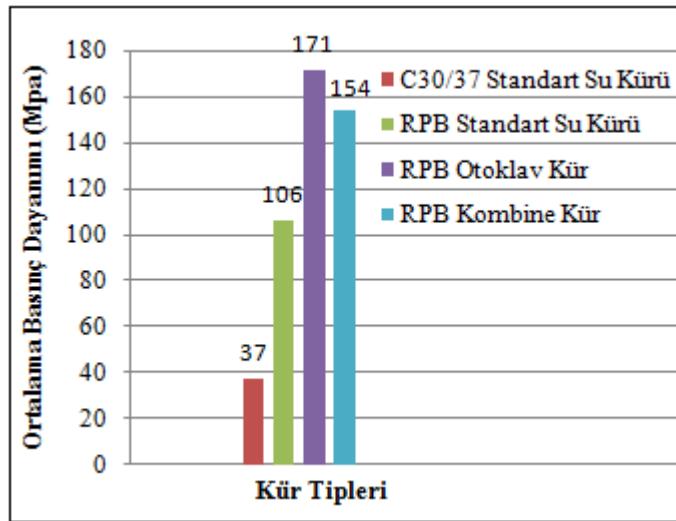
Şekil 4.6. Değişik kürlerde Lifsiz RPB maksimum basınç dayanımları

Tüm kürlerdeki lifli RPB'ların maksimum basınç dayanımları Çizelge 4.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Değişik kürlerde Lifli RPB maksimum basınç dayanımları

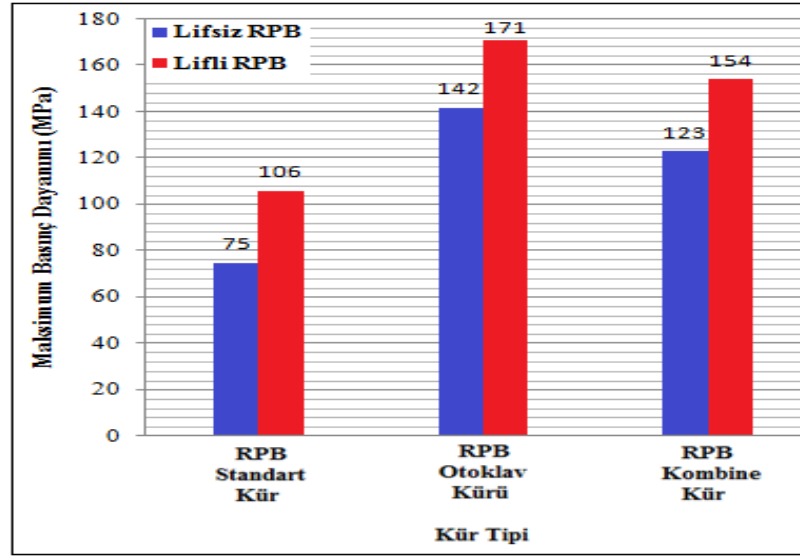
Kür Tipi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
C30/37 Standart Su Kürü	37
RPB Standart Su Kürü	106
RPB Otoklav Kür	171
RPB Kombine Kür	154

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi lifli RPB maksimum basınç dayanımları otoklav küründen elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Değişik kürlerde lifli RPB maksimum basınç dayanımları

Lifli ve lifsiz RPB numunelerin tüm kürlerdeki maksimum basınç dayanımları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Değişik kürlerde lifli ve lifsiz RPB maksimum basınç dayanımları

Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de görüldüğü gibi lifli ve lifsiz RPB maksimum basınç dayanımları otoklav küründen elde edilmiştir. Bu değerler numunelere kalıptayken herhangi bir yüksek basınç altında sıkıştırma işlemi olmadan elde edilmiştir. Sıkıştırma işlemlerinin uygulanmasıyla daha yüksek basınç dayanımları elde edilebilmektedir. Ancak yüksek basınç altında sıkıştırma işlemleri ekonomik maliyeti arttırdığından geleneksel yol beton döküm uygulamalarında kullanılamaz, ancak prefabrik olarak üretilebilirler.

4.2. Eğilme Deneyleri

4.2.1. Kontrol numunesi beton eğilme deneyi

Deney sonuçları Çizelge 4.13’de görülmektedir.

Çizelge 4.13. Kontrol numunesi eğilme deney sonuçları

Standart Su Kürü (20°C)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
28 Gün	4,55

4.2.2. Lifsiz RPB standart su kürü eğilme deneyi

Deney sonuçları Çizelge 4.14’de görülmektedir.

Çizelge 4.14. Lifsiz RPB standart su kürü eğilme deney sonuçları

Standart Su Kürü (20°C)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
28 Gün	7,27

4.2.3. Lifli RPB standart su kürü eğilme deneyi

Deney sonuçları Çizelge 4.15’de görülmektedir.

Çizelge 4.15. Lifli RPB standart su kürü eğilme deney sonuçları

Standart Su Kürü (20°C)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
28 Gün	7,38

4.2.4. Lifsiz RPB otoklav kür eğilme deneyi

Deney sonuçları Çizelge 4.16’da görülmektedir.

Çizelge 4.16. Lifsiz RPB otoklav kür eğilme deney sonuçları

Kür Tipi	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
RPB Otoklav Kürü (1,3 MPa-180°C-8 saat)	9,54

4.2.5. Lifli RPB otoklav kür eğilme deneyi

Deney sonuçları Çizelge 4.17’de görülmektedir.

Çizelge 4.17. Lifli RPB otoklav kür eğilme deney sonuçları

Kür Tipi	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
RPB Otoklav Kürü (1,3 MPa-180°C-8 saat)	11,34

4.2.6. Lifsiz RPB kombine kür eğilme deneyi

Deney sonuçları Çizelge 4.18’de görülmektedir.

Çizelge 4.18. Lifsiz RPB kombine kür eğilme dayanımları

Kür Tipi	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
RPB Kombine Kür	8,37

4.2.7. Lifli RPB kombine kür eğilme deneyi

Deney sonuçları Çizelge 4.19’da görülmektedir.

Çizelge 4.19. Lifli RPB kombine kür eğilme dayanımları

Kür Tipi	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
RPB Kombine Kür	10,44

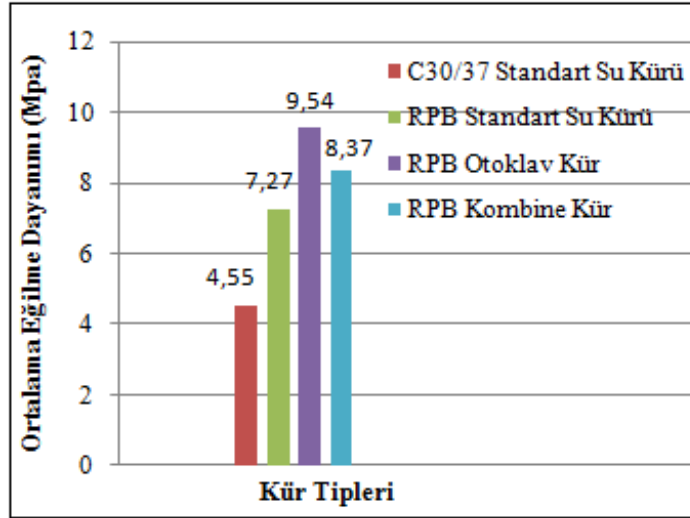
4.2.8. Eğilme dayanımı en yüksek kür tipinin belirlenmesi

Yapılan tüm kürler içerisinde eğilme dayanımı en yüksek çıkan kür tipi belirlenmiştir. Lifsiz RPB'ların tüm kürlerdeki maksimum eğilme dayanımları Çizelge 4.20'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. Lifsiz RPB eğilme dayanımları

Kür Tipi	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
C30/37 Standart Su Kürü	4,55
RPB Standart Su Kürü	7,27
RPB Otoklav Kür	9,54
RPB Kombine Kür	8,37

Lifsiz RPB'ların tüm kürlerdeki maksimum eğilme dayanımları Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



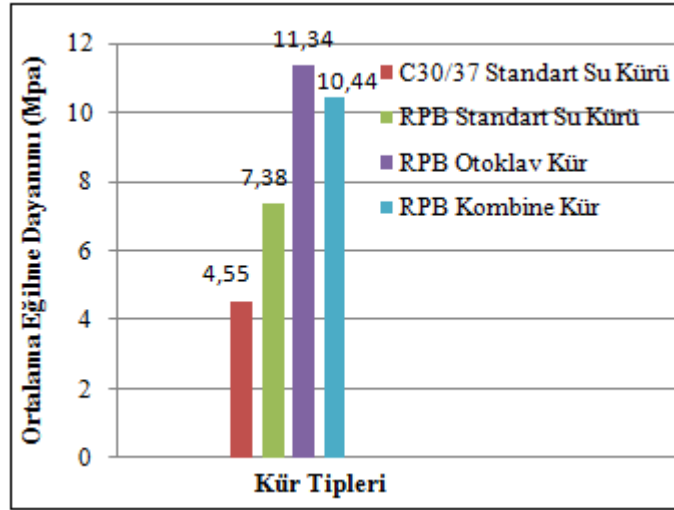
Şekil 4.9. Değişik kürlerde lifsiz RPB maksimum eğilme dayanımları

Lifli RPB'ların tüm kürlerdeki maksimum eğilme dayanımları Çizelge 4.21'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.21. Lifli RPB eğilme dayanımları

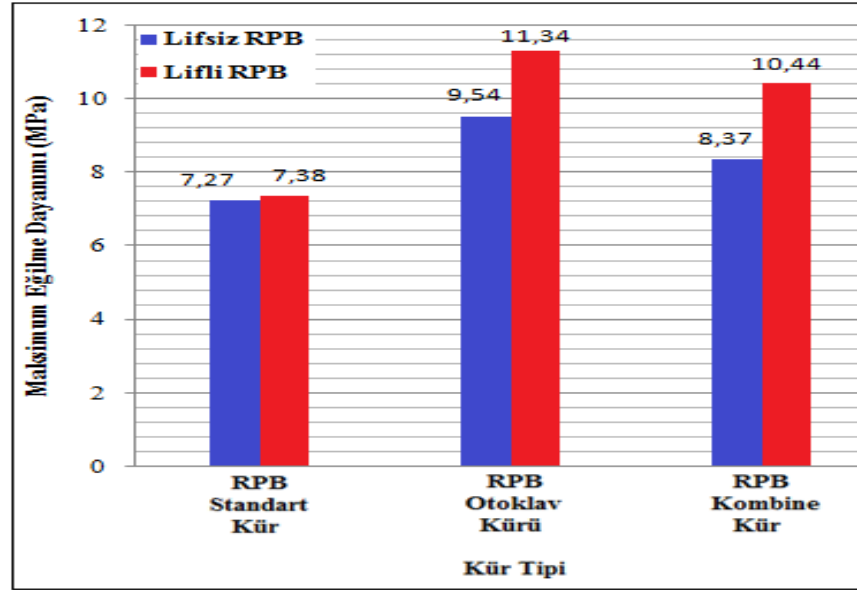
Kür Tipi	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
C30/37 Standart Su Kürü	4,55
RPB Standart Su Kürü	7,38
RPB Otoklav Kür	11,34
RPB Kombine Kür	10,44

Lifli RPB'ların tüm kürlerdeki maksimum eğilme dayanımları Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

**Şekil 4.10.** Değişik kürlerde lifli RPB maksimum eğilme dayanımları

Çizelge 4.20 ve Çizelge 4.21'de görüldüğü gibi lifli-lifsiz RPB maksimum eğilme dayanımı otoklav küründen elde edilmiştir.

Şekil 4.11'de değişik kürlerde lifli ve lifsiz RPB maksimum eğilme dayanımları görülmektedir.



Şekil 4.11. Değişik kürlerde lifli ve lifsiz RPB maksimum eğilme dayanımları

Çizelge 4.22’de lifsiz ve lifli RPB numunelerin basınç ve eğilme dayanımları toplu halde verilmiştir.

Çizelge 4.22. Lifsiz ve lifli RPB basınç-eğilme dayanımları

Kür Tipi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
C30/37 Standart Su Kürü	37	4,55
RPB Standart Su Kürü -Lifsiz	75	7,27
RPB Standart Su Kürü-Lifli	106	7,38
RPB Otoklav Kürü-Lifsiz	142	9,54
RPB Otoklav Kürü-Lifli	171	11,34
RPB Kombine Kür-Lifsiz	123	8,37
RPB Kombine Kür-Lifli	154	10,44

4.3. RPB Kaplama Maliyet Düşürme Sonrası Basınç ve Eğilme Deneyleri

4.3.1. Sanayi Atığı Çelik Lifli RPB basınç ve eğilme deneyleri

Sanayi atığı çelik lifli RPB numunelerinin 7 ve 28 günlük 20°C standart su kürü sonrası basınç ve eğilme deney sonuçları Çizelge 4.23'de görülmektedir.

Çizelge 4.23. Sanayi atığı çelik lifli RPB standart su kürü basınç ve eğilme deney sonuçları

Standart Su Kürü (20°C)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
7 Gün	57,65	7,65
28 Gün	84,76	9,06

Sanayi atığı çelik lifli RPB numunelerinin kombine kür sonrası basınç ve eğilme deney sonuçları Çizelge 4.24'de görülmektedir.

Çizelge 4.24. Sanayi atığı çelik lifli RPB kombine kür basınç ve eğilme deney sonuçları

Kombine Kür	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
7 Gün 20°C Su Kürü + 2 gün 90°C Su Banyosu + 2 gün 180°C Etüv	125	15,04

4.3.2. Ahlat Taşı Tozu (ATT) içerikli RPB basınç ve eğilme dayanımları

Çizelge 3.38'de verilen yüzdelere göre, 20 farklı tip ATT-RPB numunesine, kombine kürden sonra basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.25'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.25. Çimento, ATT ve kireç bağlayıcılı lifsiz RPB basınç deneyi

Numune No	Su / Bağlayıcı	Kireç / ATT (%)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
1	0,28	-	2,81
2	0,28	-	41,51
3	0,28	-	64,46
4	0,28	-	69,97
5	0,28	30	5,22
6	0,28	30	42,24
7	0,28	30	66,35
8	0,28	30	71,96
9	0,28	50	4,33
10	0,28	50	38,51
11	0,28	50	54,17
12	0,28	50	64,56
13	0,28	70	7,89
14	0,28	70	47,43
15	0,28	70	80,95
16	0,28	70	84,17
17	0,28	100	7,73
18	0,28	100	55,69
19	0,28	100	73,43
20	0,28	100	83,18

ATT ve kireç içerikli lifsiz RPB'lara 7 Gün 20°C + 2 gün 90°C Su Banyosu + 2 gün 180°C Etüv kombine kürü uygulanmış ve en yüksek basınç dayanımını Çizelge 4.25'de görüldüğü gibi 84,17 MPa değer ile 16 no.lu numune karışım tipi vermiştir. 15 no.lu karışıma dikkat edildiğinde basınç dayanımının (80,95 MPa), 16 no.lu karışımın basınç dayanımına (84,17 MPa) çok yakın olduğu görülmektedir. 20 no.lu karışım ekonomik olmadığından dikkate alınmamıştır. %50 çimento içeren 15 no.lu karışım ekonomik açıdan daha avantajlı olduğundan numune tipi olarak 15 no.lu karışım seçilmiştir. Çimento içerikli karışımlarda, Çimento Oranı+ATT Oranı+Kireç Oranı %100 olacak şekilde, 15 no.lu karışımın çimento oranı %50, ATT miktarı %29,4, kireç oranı %20,6 ve kireç/ATT oranı %70'dir. Çimento içeriksiz karışımlarda en ekonomik ve en yüksek basınç dayanımı veren karışım ATT oranı+kireç oranı %100 olacak şekilde, ATT miktarı %50, kireç oranı %50 ve kireç/ATT oranı %100 olan 13 no.lu karışımdır. Kireç/ATT oranı karışımda önemli bir parametredir. Kireç karışıma katılırken, ATT

miktarı yüzdesine göre karışıma katılmıştır. Bu çalışmada 15 no.lu karışım göz önüne alınır, Çizelge 3.38’de görüldüğü gibi, karışımdaki çimento oranı %50 ve kireç+ATT oranı %50’dir. Kireç+ATT oranı %50 ve kireç/ATT oranı %70 ise karışımdaki kireç ve ATT yüzdeleri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\text{Çimento} = \%50$$

$$\text{Kireç} + \text{ATT} = \%50$$

$$\text{Kireç} / \text{ATT} = \%70$$

$$\text{Kireç} = 0,70 * \text{ATT}$$

$$(0,70 * \text{ATT}) + \text{ATT} = \%50$$

$$\text{ATT} = \%29,40$$

$$\text{Kireç} = \%20,60$$

15 no.lu karışımda su/bağlayıcı oranı 0,28’dir. Daha önceki tüm çalışmada lifsiz numuneler için su/bağlayıcı oranı 0,14 ve tüm lifli numuneler için su/bağlayıcı oranı 0,15 alınmıştır. Bu aşamadan sonraki çalışmalarda, daha önce alınan oranlar göz önüne alınarak yeni karışımlar oluşturulmuştur. Ancak karışımlardaki çimento, Ahlat Taşı Tozu (ATT) ve kireç oranları değiştirilmemiştir. Sadece su/bağlayıcı oranı 0,28 yerine, lifsiz numuneler için 0,14 ve tüm lifli numuneler için 0,15 alınmıştır. Böylece önceki çalışmalardaki oranlara bağlı kalınmıştır. En yüksek basınç dayanımını veren kür şeklinin 7 Gün 20°C Standart Su Kürü - 2 Gün 90°C Su Banyosu – 2 Gün 180°C Etüv kombine kürü olduğu daha önce yapılan deneylerde bulunmuştur (Bakınız Kısım 4.1.6.a). Tüm numunelere değişik tip kür sonrası basınç ve eğilme deneyleri uygulanmıştır. Basınç Deney cihazında kırılan ATT içerikli RPB numuneleri Şekil Ek 1.12’ de verilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.26’da görülmektedir:

Çizelge 4.26. Çimento oranı düşürülmüş RPB basınç ve eğilme deney sonuçları

Kür Tipi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
Çimento Oranı Düşürülmüş Lifsiz RPB (7 Gün-20°C Su Kürü)	36,57	2,52
Çimento Oranı Düşürülmüş Lifsiz RPB (28 Gün-20°C Su Kürü)	54,26	4,63
Çimento Oranı Düşürülmüş Lifsiz RPB (7 Gün 20°C Su Kürü + 2 gün 90°C Su Banyosu + 2 gün 180°C Etüv)	106,52	8,19
Çimento Oranı Düşürülmüş Normal Lifli RPB (7 Gün-20°C Su Kürü)	46,53	3,96
Çimento Oranı Düşürülmüş Normal Lifli RPB (28 Gün-20°C Su Kürü)	66,40	5,28
Çimento Oranı Düşürülmüş Normal Lifli RPB (7 Gün 20°C Su Kürü + 2 gün 90°C Su Banyosu + 2 gün 180°C Etüv)	124,99	9,18
Çimento Oranı Düşürülmüş Sanayi Atık Lifli RPB (7 Gün-20°C Su Kürü)	43,83	4,32
Çimento Oranı Düşürülmüş Sanayi Atık Lifli RPB (28 Gün-20°C Su Kürü)	61,74	5,76
Çimento Oranı Düşürülmüş Sanayi Atık Lifli RPB (7 Gün 20°C Su Kürü + 2 gün 90°C Su Banyosu + 2 gün 180°C Etüv)	109,36	10,98

Yapılan deneyler sonucu çimento oranı düşürülmüş RPB numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının yüksek olduğu görülmektedir. Tüm deneylerde sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Reaktif Pudra Betonun kalıba konulduktan sonra, taze haldeyken prizini alana kadar geçen süre içerisinde sıkıştırma basıncı uygulanmasıyla, numunelerin basınç ve eğilme değerlerinin çok daha yüksek çıkacağı bilinmelidir.

4.4. Üstyapı Tabaka Kalınlık Hesabı

Bu kısımda üstyapılar esnek ve rijit üstyapılar olmak üzere iki şekilde irdelenmiştir. Esnek üstyapılarda BSK kaplama, rijit üstyapılarda ise C30/37 normal dayanımlı beton kaplama ile tüm lifli ve lifsiz RPB yol kaplamaları seçilmiştir. Çalışmada lifsiz ve lifli

tüm RPB'lar rijit yol kaplaması olarak değerlendirilmiştir. Rijit kaplamalar için kontrol betonu olarak C30/37 normal dayanımlı beton tipi seçilmiştir.

4.4.1. Esnek üstyapı tabaka kalınlık hesabı

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ ve $R=85\%$ 'lik güvenilirlik için esnek üstyapı kalınlıkları Çizelge 4.27'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.27. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerlerine göre esnek üstyapı kalınlıkları

$W_{8,2}$ ($\times 10^6$)	Aşınma (cm)	Binder (cm)	Bitümlü Temel (cm)	Kırmataş Temel (cm)	Kırmataş Alttemel (cm)
10	5	6	8	15	20

4.4.2. Rijit üstyapı kalınlık hesabı

Hesaplamalarda Formül 1.2'de istenen tüm değerler yazılmış, hesaplama yapılarak kaplama kalınlıkları (D) bulunmuştur. Rijit alttemel kalınlığı esnek üstyapı alttemel kalınlığına eşit kabul edilerek 20 cm alınmıştır. Tüm hesaplamalarda $W_{8,2}=10 \times 10^6$, $Z_R=-1,037$, $S_o=0,45$, $P_o=4,5$, $P_t=2,5$, $\Delta PSI=2$, $C_d=1$, $J=2,9$ ve $k=387$ psi alınmıştır.

4.4.2.a. C30/37 normal dayanımlı beton üstyapı tabaka kalınlık hesabı

C30/37 normal beton kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler elde edilmiştir.

C30/37 elastisite modülü (E_c) = 31.801 MPa (4.612.343 psi)

C30/37 kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) (S'_c) = 4,55 MPa (659,93 psi)

Formül 1.2 ile C30/37 normal beton kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 23,04 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.b. Prefabrik lifsiz RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Prefabrik lifsiz RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Lifsiz RPB elastisite modülü (E_c) = 46.239 MPa (6.706.525,00 psi)

Lifsiz RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$) = 8,37 MPa (1.214,00 psi)

Formül 1.2 ile prefabrik lifsiz RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 15,88 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.c. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k) = 387 psi

Lifsiz RPB elastisite modülü (E_c) = 44.002 MPa (6.382.006,67 psi)

Lifsiz RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$) = 8,19 MPa (1.187,88 psi)

Yük transfer katsayısı (J) = 2,9

Drenaj katsayısı (C_d) = 1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI = P_o - P_t$) = 2,0

Formül 1.2 ile çimento oranı düşürülmüş lifsiz RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 16,38 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.d. Geleneksel lifsiz RPB üstyapı kaplama tabaka kalınlık hesabı

Geleneksel lifsiz RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifsiz RPB elastisite modülü (E_c)=39.174 MPa (5.681.871,00 psi)

Lifsiz RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) (S'_c)=7,27 MPa (1.054,00 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile geleneksel lifsiz RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 17,15 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.e. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB üstyapı kaplama tabaka kalınlık hesabı

Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifsiz RPB elastisite modülü (E_c)=35.413 MPa (5.136.235,24 psi)

Lifsiz RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) (S'_c)=4,63 MPa (671,54 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 22,99 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.f. Prefabrik normal lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Prefabrik normal lifli RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifli RPB elastisite modülü (E_c)=50.074 MPa (7.262.828,00 psi)

Lifli RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$)=10,44 MPa (1.514,24 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile prefabrik normal lifli RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 13,67 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.g. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik normal lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Çimento oranı düşürülmüş prefabrik normal lifli RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifli RPB elastisite modülü (E_c)=46.500 MPa (6.744.360,00 psi)

Lifli RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$)=9,18 MPa (1.331,47 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile çimento oranı düşürülmüş prefabrik normal lifli RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 15,21 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.h. Geleneksel normal lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Geleneksel normal lifli RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifli RPB elastisite modülü (E_c)=43.928 MPa (6.371.400,49 psi)

Lifli RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$)=7,38 MPa (1.070,41 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile geleneksel normal lifli RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 17,17 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.i. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel normal lifli RPB kaplamalı üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Çimento oranı düşürülmüş geleneksel normal lifli RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifli RPB elastisite modülü (E_c)=37.687 MPa (5.466.141,00 psi)

Lifli RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$)=5,28 MPa (765,81 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile çimento oranı düşürülmüş geleneksel normal lifli RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 21,36 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.i. Geleneksel sanayi atık lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Geleneksel sanayi atık lifli RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifli RPB elastisite modülü (E_c)=40.763 MPa (5.912.302,12 psi)

Lifli RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$)=9,06 MPa (1.314,08 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 14,73 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.j. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel sanayi atık lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Çimento oranı düşürülmüş geleneksel sanayi atık lifli RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifli RPB elastisite modülü (E_c)=36.841 MPa (5.343.392,35 psi)

Lifli RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$)=5,76 MPa (835,43 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile çimento oranı düşürülmüş geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 20,22 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.k. Prefabrik sanayi atık lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Prefabrik sanayi atık lifli RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifli RPB elastisite modülü (E_c)=46.500,00 MPa (6.744.401,75 psi)

Lifli RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$)=15,04 MPa (2.181,42 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 10,24 cm olarak hesaplanmıştır.

4.4.2.l. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik sanayi atık lifli RPB üstyapı tabaka kalınlık hesabı

Çimento oranı düşürülmüş prefabrik sanayi atık lifli RPB üstyapı kaplama tabakası kalınlık belirlenmesinde aşağıdaki değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Zemin yatak katsayısı (k)=387 psi

Lifli RPB elastisite modülü (E_c)=44.399 MPa (6.439.613,78 psi)

Lifli RPB kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) ($S'c$)=10,98 MPa (1.592,54 psi)

Yük transfer katsayısı (J)=2,9

Drenaj katsayısı (C_d)=1,0

Servis yeteneği kaybı ($\Delta PSI=P_o-P_t$)=2,0

Formül 1.2 ile çimento oranı düşürülmüş prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplama kalınlığı $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 13,24 cm olarak hesaplanmıştır.

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre esnek ve tüm rijit üstyapı kaplama kalınlıkları Çizelge 4.28’de gösterilmiştir. Çizelge 4.28’de sadece üstyapı kaplama kalınlıkları gösterilmiş olup, temel ve alttemel kalınlıkları gösterilmemiştir. BSK kaplama kalınlığı içerisinde aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları dâhil edilmiştir.

Çizelge 4.28’de görüldüğü gibi, prefabrik olarak lifsiz RPB’larda en düşük üstyapı kaplama kalınlığı prefabrik lifsiz RPB kaplamada 15,88 cm’dir. Prefabrik olarak lifli RPB’larda en düşük üstyapı kaplama kalınlığı ise prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamada 10,24 cm’dir.

Çizelge 4.28’de görüldüğü gibi, geleneksel olarak lifsiz RPB’larda en düşük üstyapı kaplama kalınlığı geleneksel lifsiz RPB kaplamada 17,15 cm’dir. Geleneksel olarak lifli RPB’larda en düşük üstyapı kaplama kalınlığı geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamada 14,73 cm’dir.

Çizelge 4.28. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre üstyapı kaplama kalınlıkları (cm)

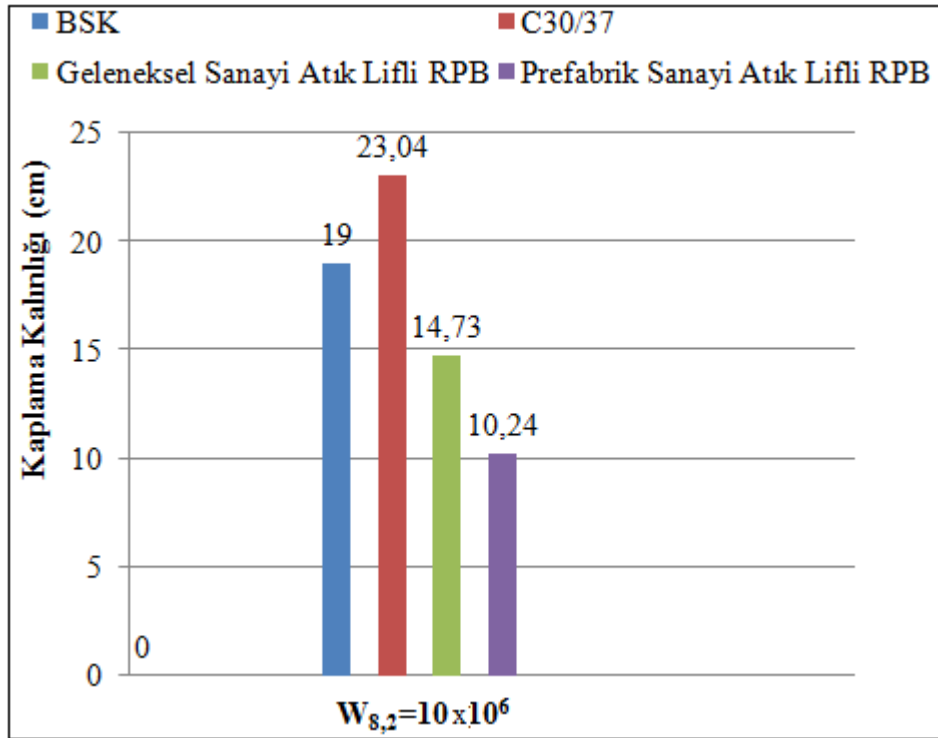
Üstyapı Tipi	Kaplama Kalınlığı (cm)
BSK	19,00
C30/37	23,04
Prefabrik Lifsiz RPB	15,88
Geleneksel Lifsiz RPB	17,15
Çimento Oranı Düşürülmüş Prefabrik Lifsiz RPB	16,38
Çimento Oranı Düşürülmüş Geleneksel Lifsiz RPB	22,99
Prefabrik Normal Lifli RPB	13,67
Geleneksel Normal Lifli RPB	17,17
Geleneksel Sanayi Atık Lifli RPB	14,73
Prefabrik Sanayi Atık Lifli RPB	10,24
Çimento Oranı Düşürülmüş Prefabrik Normal Lifli RPB	15,21
Çimento Oranı Düşürülmüş Prefabrik Sanayi Atık Lifli RPB	13,24
Çimento Oranı Düşürülmüş Geleneksel Normal Lifli RPB	21,36
Çimento Oranı Düşürülmüş Geleneksel Sanayi Atık Lifli RPB	20,22

Çizelge 4.28’e göre prefabrik olarak en düşük üstyapı kaplama kalınlığının 10,24 cm ile prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamada, geleneksel olarak en düşük üstyapı kaplama

kalınlığının 14,73 cm ile geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamada olduğu gör÷lmektedir.

Çizelge 4.28’de BSK kaplama kalınlığının 19 cm, C30/37 normal dayanımlı rijit kaplama kalınlığının 23,04 cm olduğu gör÷lmektedir. Çizelge 4.31’de gör÷ldüğü gibi, eşit trafik yükü altında geleneksel veya prefabrik RPB yol kaplamaları, BSK kaplama ve C30/37 normal dayanımlı rijit kaplamalara nazaran daha düşük kalınlıkta inşa edilebilirler.

Prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplama, geleneksel lifsiz RPB kaplama, C30/37 beton kaplama ve BSK kaplama kalınlık karşılaştırması Şekil 4.12’de gösterilmiştir. BSK’da kaplama kalınlığına esas olarak aşınma, binder ve bitümlü temel tabakasının toplam kalınlığı dikkate alınmıştır. Üstyapı tipleri içerisinde en düşük kaplama kalınlığının prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplama olduğu gör÷lmektedir.



Şekil 4.12. Üstyapı kaplama kalınlıklarının karşılaştırılması

4.5. Üstyapı Maliyet Hesabı

Bu kısımda üstyapılar esnek ve rijit üstyapılar olmak üzere iki şekilde irdelenmiştir. Esnek üstyapılarda BSK kaplama, rijit üstyapılarda ise C30/37 normal dayanımlı beton kaplama ile tüm lifli ve lifsiz RPB yol kaplamaları seçilmiştir. Çalışmada lifsiz ve lifli tüm RPB'lar rijit yol kaplaması olarak değerlendirilmiştir. Rijit kaplamalar için kontrol betonu olarak C30/37 normal dayanımlı beton tipi seçilmiştir.

4.5.1. Esnek üstyapı maliyet hesabı

BSK üstyapı tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 4.29'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.29. BSK üstyapı tabaka cinslerine göre birim fiyatlar ($W_{8,2}=10 \times 10^6$)

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/6405	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	6,15
KGM/6306	6 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	7,22
KGM/6208	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	9,08
KGM/6040	Temel yapılması (1 inç kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ³	24,57
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	22,76
04.610/1C	Asfalt çimentosu	Ton	1.310,00
KGM/4355	Bitümün emiş derecesine kadar ısıtılması	Ton	21,54

5 cm aşınma tabakasında 1 m ² de kullanılan AC miktarı	0,05 x 0,144	= 0,0072 Ton
6 cm binder tabakasında 1 m ² de kullanılan AC miktarı	0,06 x 0,12	= 0,0072 Ton
8 cm bitümlü temelde 1 m ² de kullanılan AC miktarı	0,08 x 0,081	= 0,0065 Ton

1 m² de kullanılan toplam AC miktarı 0,021 tondur. Toplam platform genişliği 24 metre, uzunluğu 1 km. olan bölünmüş bir asfalt yolun toplam yüzey alanı 24000 m² olarak hesaplanmıştır. 24000 m²'de aşınma, binder ve bitümlü temel tabakasında kullanılan toplam AC miktarı 0,021 x 24.000=504 tondur. Taşıma bedeli Formül 3.13 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$F = 1,25 \times 1 \times 196 \times (0,0007 \times 138 + 0,01) - 0,00260 \times 196 = 25,61 \text{ TL/Ton}$$

$$\text{AC Nakliye Bedeli} = 25,61 \times 504 = 12.907,00 \text{ TL}$$

$W_{8,2} = 10 \times 10^6$ değerine göre, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir asfalt yolun 1 km maliyeti Çizelge 4.30'da görülmektedir.

Çizelge 4.30. 1 km uzunluktaki esnek üstyapı toplam maliyeti ($W_{8,2} = 10 \times 10^6$)

$W_{8,2} = 10 \times 10^6$, R=%85, Pt=2,5, Aşınma=5 cm, Binder=6 cm, Bitümlü Temel=8 cm, Temel=15 cm, Alttemel=20 cm					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4.800,00	m ³	22,76	109.248,00
2	Temel Yapılması	3.600,00	m ³	24,57	88.452,00
3	Bitümlü Temel Yapılması	24.000,00	m ²	9,08	217.920,00
4	Binder Yapılması	24.000,00	m ²	7,22	173.280,00
5	Aşınma Yapılması	24.000,00	m ²	6,15	147.600,00
6	AC zati bedeli	504,00	Ton	1310,00	660.240,00
7	AC Nakli ($M_{ort} = 138$ km)	504,00	Ton	25,61	12.907,00
8	Taşıma dolayısıyla soğuyan bitümün emiş derecesine kadar ısıtılması	504,00	Ton	21,54	10.856,00
TOPLAM					1.420.503,00

4.5.2. Rijit üstyapı maliyet hesabı

Rijit üstyapı maliyet hesaplarında, C30/37 normal dayanımlı beton kaplama ile tüm lifli ve liffsiz RPB yol kaplamaları göz önüne alınmıştır. Maliyet hesaplamalarında liffsiz ve lifli tüm RPB'lar rijit yol kaplaması olarak değerlendirilmiştir. Rijit kaplamalar için kontrol betonu olarak C30/37 normal dayanımlı beton tipi seçilmiştir.

Kısım 3.9.2.b’de belirtildiği gibi lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesapları aşağıdaki görüldüğü gibi dört farklı tipte irdelenmiştir. Her üstyapı tipinde maliyet hesaplaması yapılmıştır.

- Prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar
- Geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar
- Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar
- Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapılar

4.5.2.a. C30/37 normal dayanımlı beton kaplamalı üstyapı maliyet hesabı

C30/37 normal dayanımlı beton üstyapı maliyet hesap yöntemleri Kısım 3.9.2.a’da belirtilmiştir. Tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 4.31’de oluşturulmuştur.

Çizelge 4.31. Donatılı-derzsiz rijit üstyapı (C30/37) tabaka cinslerine göre birim fiyatlar

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/16.023/K-1	Her Dozda Demirli Beton	m ³	55,21
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	22,76
04.009/53C	Çimento zati bedeli	Ton	138,00
Y.23.014	Ø 8- Ø 12 mm nervürlü beton çelik çubuğu bedeli ve işçilik	Ton	1.905,86

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre C30/37 normal dayanımlı beton yol kaplama kalınlığı Formül 1.2 ile hesaplanarak 23,04 cm bulunmuştur.

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir rijit yolun 1 km maliyeti Çizelge 4.32’de görülmektedir. Çizelge 4.32’deki miktarlar sütunu, yapılan işin cinsine göre aşağıdaki şekilde hesaplanarak bulunmuştur:

$$20 \text{ cm alttemel tabaka hacmi} \quad 0,20 \times 24.000,00 \quad = 4.800,00 \text{ m}^3$$

23,04 cm rijit plak tabaka hacmi	$0,2304 \times 24.000,00$	$= 5.529,60 \text{ m}^3$
Çimento Miktarı (450 kg/m^3)	$0,2304 \times 24.000,00 \times 0,450$	$= 2.488,32 \text{ Ton}$
Demir miktarı ($53,27 \text{ kg/m}^3$)	$0,2304 \times 24.000,00 \times 0,05327$	$= 294,56 \text{ Ton}$

Çizelge 4.32. 1 km uzunluktaki donatılı-derzsiz rijit üstyapı toplam maliyeti ($W_{8,2}=10 \times 10^6$)

$W_{8,2}=10 \times 10^6$, R=%85, Pt= 2,5, C30/37 Beton plak kalınlığı=23,04 cm, Alttemel=20 cm, Beton Plak=C30/37, Çimento=450 kg/m^3					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4.800,00	m^3	22,76	109.248,00
2	Rijit plak beton dökümü	5.529,60	m^3	55,21	305.289,00
3	Çimento zati bedeli	2.488,32	Ton	138,00	343.388,00
4	Demir zati bedeli ve işçiliği	294,56	Ton	1.905,86	561.390,00
TOPLAM					1.319.315,00

4.5.2.b. Prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı

Prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesap yöntemleri Kısım 3.9.2.b'de belirtilmiştir. Tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 4.33'de oluşturulmuştur.

Çizelge 4.33. Prefabrik lifsiz RPB tabaka cinslerine göre birim fiyatlar

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m^3	22,76
KGM/16.002/K-1	Her Dozda Demirsiz Beton	m^3	55,11
04.009/53C	Çimento zati bedeli	Ton	138,00
04.379/B02	Yüksek Oranda Su Azaltıcı (Süperakışkanlaştırıcı)	Ton	1.584,00
04.007/A	Silis agrega	Ton	200,00

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre prefabrik lifsiz RPB yol kaplama kalınlığı Formül 1.2 ile hesaplanarak 15,88 cm bulunmuştur. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği

24 metre olan bölünmüş bir prefabrik lifsiz RPB kaplamalı yolun 1 km maliyeti Çizelge 4.34'de görülmektedir. Çizelge 4.34'deki miktarlar sütunu, yapılan işin cinsine göre aşağıdaki şekilde hesaplanarak bulunmuştur:

20 cm alttemel tabaka hacmi	0,20 x 24.000,00	=4.800,00 m ³
15,88 cm lifsiz RPB plak tabaka hacmi	0,1588 x 24.000,00	=3.811,20 m ³
Çimento Miktarı (821 kg/m ³)	0,1588 x 24.000,00 x 0,821	=3.129,00 Ton
Süperakışkanlaştırıcı Miktarı (16 kg/m ³)	0,1588 x 24.000,00 x 0,016	=60,98 Ton
Silis Dumanı Miktarı (189 kg/m ³)	0,1588 x 24.000,00 x 0,189	= 720,32 Ton

Çizelge 4.34. 1 km uzunluktaki prefabrik lifsiz RPB üstyapı toplam maliyeti

W _{8,2} =10x10 ⁶ , R=%85, Pt= 2,5, Prefabrik lifsiz RPB plak kalınlığı=15,88 cm, Alttemel=20 cm, Çimento=821 kg/m ³					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4.800,00	m ³	22,76	109.248,00
2	Lifsiz RPB plak dökümü	3.811,20	m ³	55,11	210.035,00
3	Çimento zati bedeli	3.129,00	Ton	138,00	431.802,00
4	Süperakışkanlaştırıcı	60,98	Ton	1.584,00	96.592,00
5	Silis dumanı bedeli	720,32	Ton	200,00	144.064,00
TOPLAM					991.741,00

4.5.2.c. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı

Tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 4.35'de oluşturulmuştur.

Çizelge 4.35. Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB tabaka cinslerine göre birim biyatlar

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	22,76
KGM/16.002/K-1	Her Dozda Demirsiz Beton	m ³	55,11
04.009/53C	Çimento zati bedeli	Ton	138,00
04.379/B02	Yüksek Oranda Su Azaltıcı (Süperakışkanlaştırıcı)	Ton	1.584,00
04.007/A	Silis agrega	Ton	200,00
Özel Poz 1	Ahlat Taşı Tozu (ATT)	Ton	10,00
04.759	Kireç	Ton	92,50

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB yol kaplama kalınlığı Formül 1.2 ile hesaplanarak 16,38 cm bulunmuştur. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB kaplamalı yolun 1 km maliyeti Çizelge 4.36'da görülmektedir. Çizelge 4.36'daki miktarlar sütunu, yapılan işin cinsine göre aşağıdaki şekilde hesaplanarak bulunmuştur:

20 cm alttemel tabaka hacmi	$0,20 \times 24.000,00$	$=4.800,00 \text{ m}^3$
16,38 cm lifsiz RPB plak tabaka hacmi	$0,1638 \times 24.000,00$	$=3.931,20 \text{ m}^3$
Çimento Miktarı ($410,50 \text{ kg/m}^3$)	$0,1638 \times 24.000,00 \times 0,4105$	$=1.613,76 \text{ Ton}$
Süperakışkanlaştırıcı Miktarı (16 kg/m^3)	$0,1638 \times 24.000,00 \times 0,016$	$= 62,90 \text{ Ton}$
Silis Dumanı Miktarı (189 kg/m^3)	$0,1638 \times 24.000,00 \times 0,189$	$= 743,00 \text{ Ton}$
Ahlat Taşı Tozu (ATT) ($241,50 \text{ kg/m}^3$)	$0,1638 \times 24.000,00 \times 0,2415$	$= 949,38 \text{ Ton}$
Kireç (169 kg/m^3)	$0,1638 \times 24.000,00 \times 0,169$	$= 664,37 \text{ Ton}$

Çizelge 4.36. 1 km uzunluktaki çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB üstyapı toplam maliyeti

$W_{8,2}=10 \times 10^6$, $R=\%85$, $Pt=2,5$ Çimento Oranı Düşürülmüş Lifsiz RPB plak kalınlığı=16,38 cm, Alttemel=20 cm, Çimento= 410,50 kg/m ³ , ATT=241,50 kg/m ³ , Kireç=169 kg/m ³					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4.800,00	m ³	22,76	109.248,00
2	Lifsiz RPB plak dökümü	3.931,20	m ³	55,11	216.648,00
3	Çimento zati bedeli	1.613,76	Ton	138,00	222.699,00
4	Süperakışkanlaştırıcı	62,90	Ton	1.584,00	99.634,00
5	Silis dumanı bedeli	743,00	Ton	200,00	148.600,00
6	ATT bedeli	949,38	Ton	10,00	9.494,00
7	Kireç bedeli	664,37	Ton	92,50	61.454,00
TOPLAM					867.777,00

4.5.2.d. Geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı

Tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 4.37’de oluşturulmuştur.

Çizelge 4.37. Geleneksel lifsiz RPB tabaka cinslerine göre birim fiyatlar

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	22,76
KGM/16.002/K-1	Her Dozda Demirsiz Beton	m ³	55,11
04.009/53C	Çimento zati bedeli	Ton	138,00
04.379/B02	Yüksek Oranda Su Azaltıcı (Süperakışkanlaştırıcı)	Ton	1.584,00
04.007/A	Silis agrega	Ton	200,00

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre geleneksel lifsiz RPB yol kaplama kalınlığı Formül 1.2 ile hesaplanarak 17,15 cm bulunmuştur. $W_{8,2}= 10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir geleneksel lifsiz RPB kaplamalı yolun 1 km maliyeti Çizelge 4.38’de görülmektedir. Çizelge 4.38’deki miktarlar sütunu, yapılan işin cinsine göre aşağıdaki şekilde hesaplanarak bulunmuştur:

20 cm alttemel tabaka hacmi	0,20 x 24.000,00	=4.800,00 m ³
17,15 cm lifsiz RPB plak tabaka hacmi	0,1715 x 24.000,00	=4.116,00 m ³
Çimento Miktarı (821 kg/m ³)	0,1715 x 24.000,00 x 0,821	=3.379,24 Ton
Süperakışkanlaştırıcı Miktarı (16 kg/m ³)	0,1715 x 24.000,00 x 0,016	= 65,86 Ton
Silis Dumanı Miktarı (189 kg/m ³)	0,1715 x 24.000,00 x 0,189	= 777,92 Ton

Çizelge 4.38. 1 km uzunluktaki geleneksel lifsiz RPB üstyapı toplam maliyeti

W _{8,2} =10x10 ⁶ , R=%85, Pt=2,5, Geleneksel Lifsiz RPB plak kalınlığı=17,15 cm, Alttemel=20 cm, Çimento=821 kg/m ³					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4.800,00	m ³	22,76	109.248,00
2	Lifsiz RPB plak dökümü	4.116,00	m ³	55,11	226.833,00
3	Çimento zati bedeli	3.379,24	Ton	138,00	466.335,00
4	Süperakışkanlaştırıcı	65,86	Ton	1.584,00	104.322,00
5	Silis dumanı bedeli	777,92	Ton	200,00	155.584,00
TOPLAM					1.062.322,00

4.5.2.e. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı

Tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 4.39'da oluşturulmuştur.

Çizelge 4.39. Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB tabaka cinslerine göre birim fiyatlar

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/6000	Ocak taşından konkaşörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	22,76
KGM/16.002/K-1	Her Dozda Demirsiz Beton	m ³	55,11
04.009/53C	Çimento zati bedeli	Ton	138,00
04.379/B02	Yüksek Oranda Su Azaltıcı (Süperakışkanlaştırıcı)	Ton	1.584,00
04.007/A	Silis agrega	Ton	200,00
Özel Poz 1	Ahlat Taşı Tozu (ATT)	Ton	10,00
04.759	Kireç	Ton	92,50

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB yol kaplama kalınlığı Formül 1.2 ile hesaplanarak 22,99 cm bulunmuştur. $W_{8,2} = 10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplamalı yolun 1 km maliyeti Çizelge 4.40'de görülmektedir. Çizelge 4.40'deki miktarlar sütunu, yapılan işin cinsine göre aşağıdaki şekilde hesaplanarak bulunmuştur:

20 cm alttemel tabaka hacmi	$0,20 \times 24.000,00$	$=4.800,00 \text{ m}^3$
22,99 cm lifsiz RPB plak tabaka hacmi	$0,2299 \times 24.000,00$	$=5.517,60 \text{ m}^3$
Çimento Miktarı ($410,50 \text{ kg/m}^3$)	$0,2299 \times 24.000,00 \times 0,4105$	$=2.264,97 \text{ Ton}$
Süperakışkanlaştırıcı Miktarı (16 kg/m^3)	$0,2299 \times 24.000,00 \times 0,016$	$= 88,28 \text{ Ton}$
Silis Dumanı Miktarı (189 kg/m^3)	$0,2299 \times 24.000,00 \times 0,189$	$=1.042,83 \text{ Ton}$
Ahlat Taşı Tozu (ATT) ($241,50 \text{ kg/m}^3$)	$0,2299 \times 24.000,00 \times 0,2415$	$=1.332,50 \text{ Ton}$
Kireç (169 kg/m^3)	$0,2299 \times 24.000,00 \times 0,169$	$= 932,47 \text{ Ton}$

Çizelge 4.40. 1 km uzunluktaki çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB üstyapı toplam maliyeti

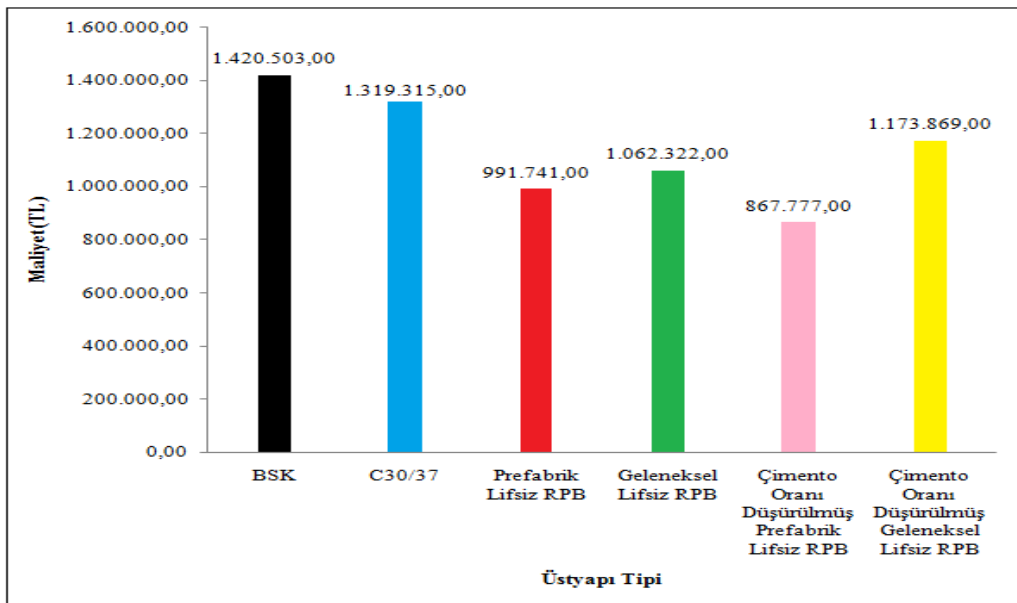
$W_{8,2}=10 \times 10^6$, $R=\%85$, $Pt=2,5$, Çimento Oranı Düşürülmüş Geleneksel Lifsiz RPB plak kalınlığı=22,99 cm, Alttemel=20 cm, Çimento=410,50 kg/m ³ , ATT=241,50 kg/m ³ , Kireç=169 kg/m ³					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4.800,00	m ³	22,76	109.248,00
2	Lifsiz RPB plak dökümü	5.517,60	m ³	55,11	304.075,00
3	Çimento zati bedeli	2.264,97	Ton	138,00	312.566,00
4	Süperakışkanlaştırıcı	88,28	Ton	1.584,00	139.836,00
5	Silis dumanı bedeli	1.042,83	Ton	200,00	208.566,00
6	ATT bedeli	1.332,50	Ton	10,00	13.325,00
7	Kireç bedeli	932,47	Ton	92,50	86.253,00
TOPLAM					1.173.869,00

4 farklı tip lifsiz RPB yol üstyapı maliyet hesaplama sonuçları Çizelge 4.41'de görülmektedir. Çizelge 4.41'de lifsiz RPB üstyapı maliyetleri içerisinde en ekonomik olan üstyapı tipinin, çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB üstyapı tipi olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.41. BSK-C30/37-lifsiz RPB üstyapı maliyetleri ($W_{8,2}=10 \times 10^6$)

Üstyapı Tipi	Maliyet (TL)
BSK	1.420.503,00
C30/37	1.319.315,00
Prefabrik Lifsiz RPB	991.741,00
Geleneksel Lifsiz RPB	1.062.322,00
Çimento Oranı Düşürülmüş Prefabrik Lifsiz RPB	867.777,00
Çimento Oranı Düşürülmüş Geleneksel Lifsiz RPB	1.173.869,00

BSK, C30/37 ve 4 farklı tip lifsiz RPB yol üstyapı maliyet karşılaştırması Şekil 4.13’de görülmektedir.

**Şekil 4.13.** BSK-C30/37-lifsiz RPB üstyapı maliyet karşılaştırması ($W_{8,2}=10 \times 10^6$)

C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti Çizelge 4.41’de görüldüğü esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir. Rijit üstyapıların dayanım ömürlerinin esnek üstyapılara kıyasla daha uzun olduğu bilinmektedir. Esnek üstyapıların rijit üstyapılara nazaran bakım maliyetlerinin yüksek olması, daha kısa sürede bakım ve onarım gerektirmesinden dolayı rijit üstyapıların uzun vadede daha ekonomik olduğu söylenebilir. Esnek veya rijit yol üstyapılarının ilk maliyetlerinin

karşılaştırılmaları, zemin ve trafik özelliklerine, hizmet sürelerine ve ülke koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Ülkemizde beton yolun ilk yapım maliyetinin asfalt yoldan daha fazla olduğuna dair yerleşmiş bir kanı vardır. Yapılan bazı çalışmalar bunun genellikle doğru olmadığını göstermektedir (Uçar ve Konrapa 2002; Yeğinobalı 2009; Sağlık vd 2009). Taban zemininin zayıf olması durumunda beton kaplama düşük trafik hacimlerinde bile asfalt kaplamalardan daha ekonomik olmaktadır. Yüksek trafik hacimlerinde beton kaplama daha ekonomik olmaktadır (Ağar vd, 1998; Türel, 2003).

Prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.41’de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, prefabrik lifsiz RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.41’de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, çimento oranı düşürülmüş prefabrik lifsiz RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.41’de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.41’de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit

üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, çimento oranı düşürülmüş geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir.

4.5.2.f. Lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesapları

Bu kısımda lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesapları aşağıdaki Kısım 3.9.2.c'de belirtildiği gibi sekiz farklı şekilde irdelenmiştir.

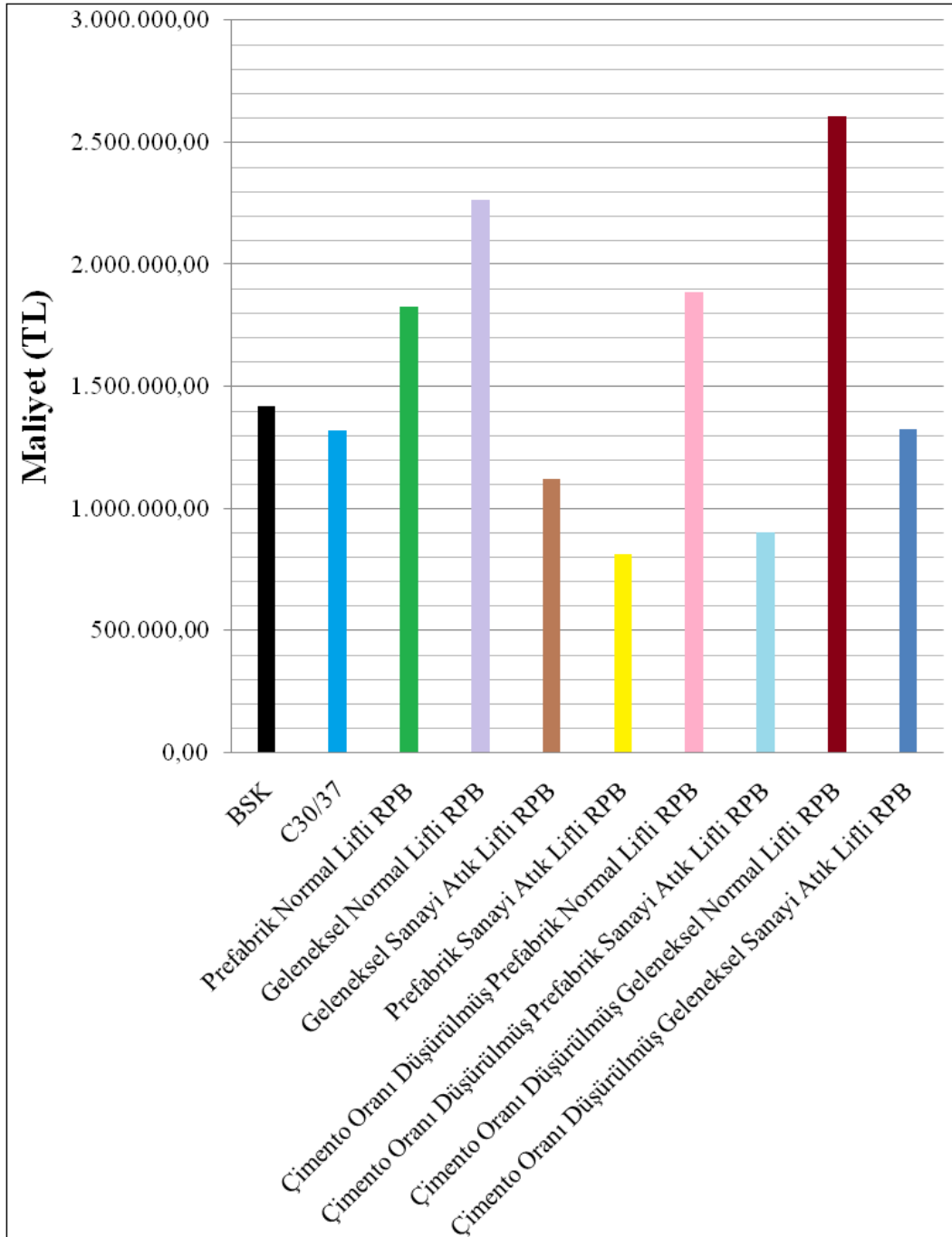
- Prefabrik normal lifli RPB kaplamalı üstyapılar
- Prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapılar
- Çimento oranı düşürülmüş prefabrik normal lifli RPB kaplamalı üstyapılar
- Çimento oranı düşürülmüş prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapılar
- Geleneksel normal lifli RPB kaplamalı üstyapılar
- Geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapılar
- Çimento oranı düşürülmüş geleneksel normal lifli RPB kaplamalı üstyapılar
- Çimento oranı düşürülmüş geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapılar

Lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesaplamaları **EK 2'**de verilmiştir. Çizelge 4.42'de lifli RPB üstyapı maliyetleri içerisinde en ekonomik olan üstyapı tipinin prefabrik sanayi atık lifli RPB üstyapı tipi olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.42. BSK-C30/37-lifli RPB üstyapı maliyetleri ($W_{8,2}=10 \times 10^6$)

Üstyapı Tipi	Maliyet (TL)
BSK	1.420.503,00
C30/37	1.319.315,00
Prefabrik Normal Lifli RPB	1.826.198,00
Geleneksel Normal Lifli RPB	2.265.796,00
Geleneksel Sanayi Atık Lifli RPB	1.122.380,00
Prefabrik Sanayi Atık Lifli RPB	813.449,00
Çimento Oranı Düşürülmüş Prefabrik Normal Lifli RPB	1.887.632,00
Çimento Oranı Düşürülmüş Prefabrik Sanayi Atık Lifli RPB	904.870,00
Çimento Oranı Düşürülmüş Geleneksel Normal Lifli RPB	2.606.704,00
Çimento Oranı Düşürülmüş Geleneksel Sanayi Atık Lifli RPB	1.324.319,00

BSK, C30/37 ve 8 farklı tip lifli RPB yol üstyapı maliyet karşılaştırması Şekil 4.14'de görülmektedir.



Şekil 4.14. BSK-C30/37-lifli RPB üstyapı maliyet karşılaştırması ($W_{8,2}=10 \times 10^6$)

Prefabrik normal lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.42'de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, prefabrik normal lifli RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, prefabrik normal lifli RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çimento oranı düşürülmüş prefabrik normal lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.42'de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, çimento oranı düşürülmüş prefabrik normal lifli RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, çimento oranı düşürülmüş prefabrik normal lifli RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Geleneksel normal lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.42'de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, geleneksel normal lifli RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, geleneksel normal lifli RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çimento oranı düşürülmüş geleneksel normal lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.42'de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, çimento oranı düşürülmüş geleneksel normal lifli RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, çimento oranı düşürülmüş geleneksel normal lifli RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.42’de görüldüğü esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir. Sürekli donatılı-derzsiz C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Çimento oranı düşürülmüş geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.42’de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, çimento oranı düşürülmüş geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında ise çimento oranı düşürülmüş geleneksel sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

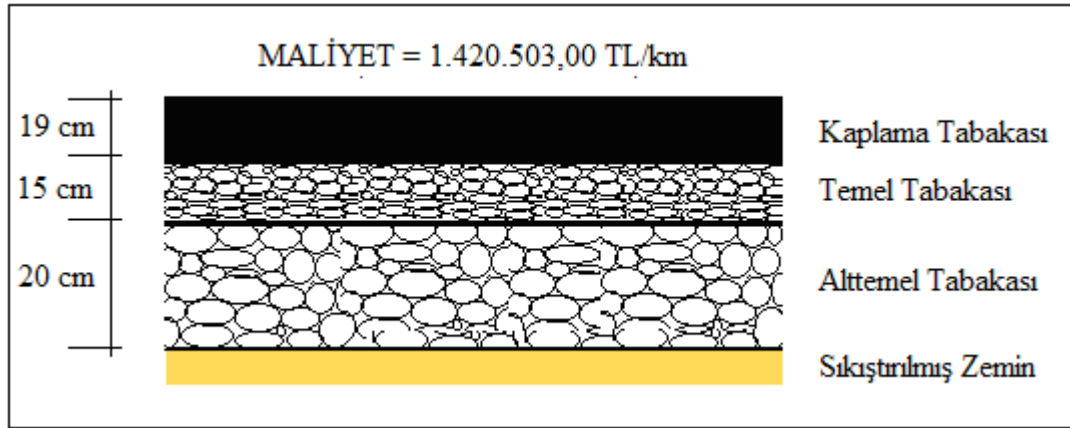
Prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 4.42’de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyetli ile kıyaslandığında da, prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Çimento oranı düşürülmüş prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı Çizelge 4.42’de görüldüğü gibi esnek üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında, çimento oranı düşürülmüş prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında da, çimento oranı düşürülmüş prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Rijit üstyapı kaplama inşasında RPB kaplamalar geleneksel RPB kaplama ve prefabrik RPB kaplama olarak iki kısımda ele alınmıştır. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km uzunluktaki BSK kaplamalı esnek üstyapı, C30/37 normal dayanımlı beton kaplamalı rijit üstyapı, geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı ve prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı toplam maliyetleri en yüksekten en düşüğe doğru Şekil 4.15, Şekil 4.15, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Zemin sıkıştırma giderleri tüm üstyapılarda göz önünde bulundurulmamıştır.

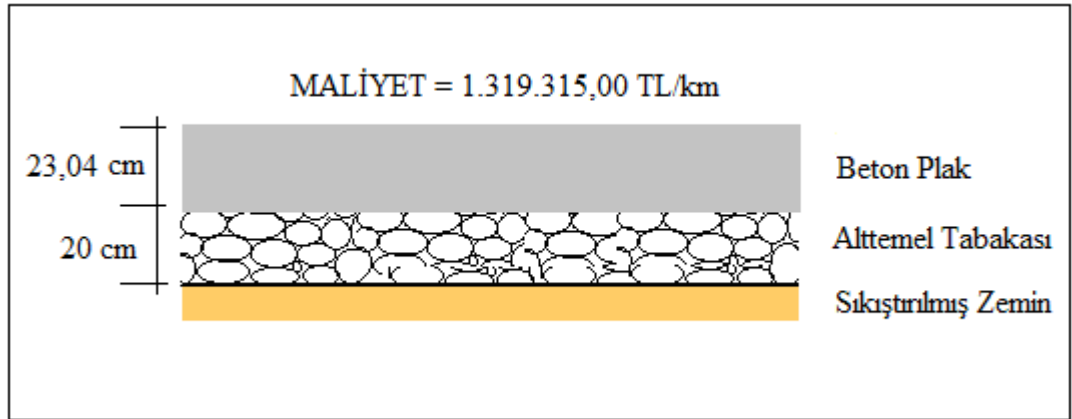
Hesaplamalar sonucunda $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km yol üstyapısı için, prefabrik imalatlı en ekonomik rijit üstyapı tipinin prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı, geleneksel olarak en ekonomik rijit üstyapı tipinin ise geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı tipi olduğu görülmüştür.

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km BSK esnek üstyapı maliyeti Şekil 4.15’de görülmektedir.



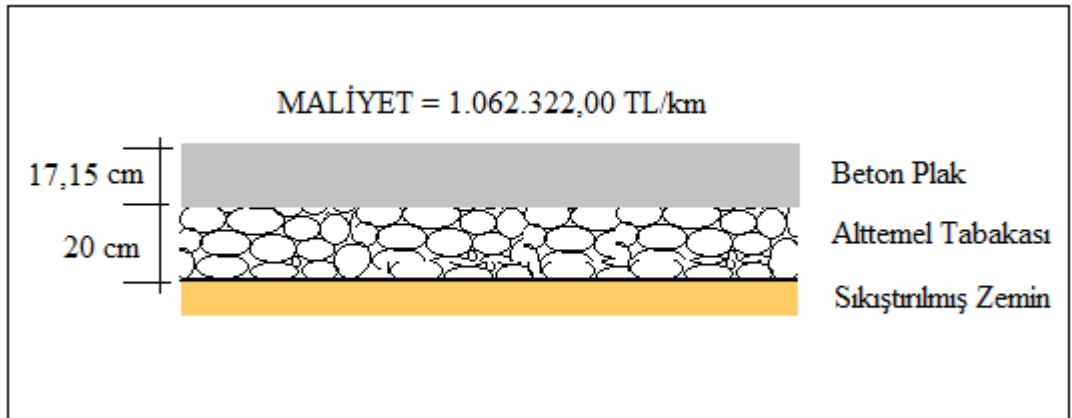
Şekil 4.15. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km BSK esnek üstyapı maliyeti

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km C30/37 rijit üstyapı maliyeti Şekil 4.16’da görülmektedir.



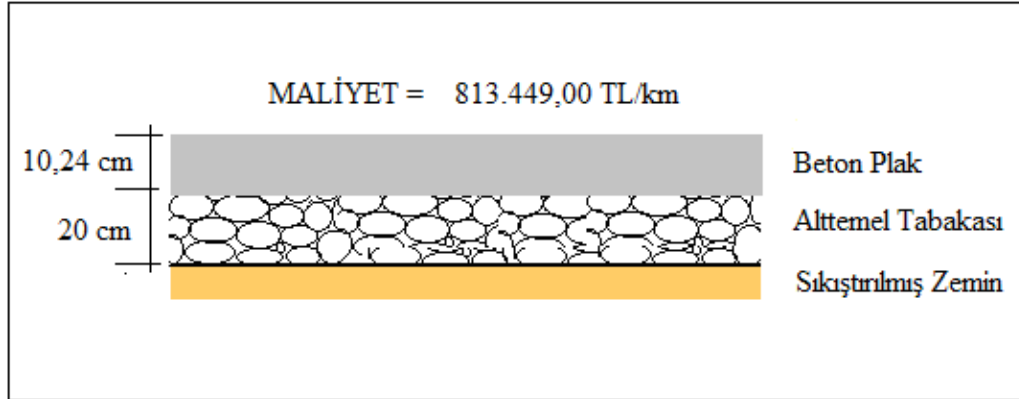
Şekil 4.16. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km C30/37 rijit üstyapı maliyeti

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Şekil 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4.17. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km geleneksel lifsiz RPB üstyapı maliyeti

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Şekil 4.18'de görülmektedir.



Şekil 4.18. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km prefabrik sanayi atık lifli RPB üstyapı maliyeti

$W_{8,2}$ değeri 10×10^6 olan bir üstyapıda prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplama kalınlığı 10,24 cm, geleneksel lifsiz RPB kaplama kalınlığı 17,15 cm, BSK kaplama kalınlığı 19,00 cm ve C30/37 rijit kaplama kalınlığı 23,04 cm olarak hesaplanmıştır. Maliyet olarak $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km yol üstyapısı için, prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti, BSK esnek üstyapı maliyetinden %42,64; C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyetinden ise %38,21 daha ekonomiktir. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km yol üstyapısı için, geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyeti, BSK esnek üstyapı maliyetinden %25,28; C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyetinden ise %19,51 daha ekonomiktir. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km yol üstyapısı için, C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyeti, BSK esnek üstyapı maliyetinden %7,17 daha ekonomiktir. C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyetleri esnek üstyapı maliyetleri ile kıyaslandığında sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapıların ilk yapım maliyetlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Rijit üstyapıların dayanım ömürlerinin esnek üstyapılara kıyasla daha uzun olduğu bilinmektedir. Esnek üstyapıların rijit üstyapılara nazaran bakım maliyetlerinin yüksek olması, daha kısa sürede bakım ve onarım gerektirmesinden dolayı rijit üstyapıların daha ekonomik olduğu söylenebilir. C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyetinin BSK esnek üstyapı maliyetinden düşük çıkma sebebinin petrol fiyatlarıyla bağlantısı olduğu tahmin edilmektedir. Rijit kaplamalarda bağlayıcı görevi gören çimentonun yerel bir malzeme olması ve ülkemizde bol miktarda üretilebilmesi sonucu piyasa fiyat dalgalanmalarından az etkilendiği, asfalt kaplamalarda bağlayıcı

görevi gören bitümün ise dünya genelinde petrol kaynaklarının tükenmeye yüz tutması sonucu kıt ve ülkemizde yeterli miktarda bulunmaması neticesinde ithal edilen bir malzeme olmasından dolayı piyasa fiyat dalgalanmalarından etkilendiği düşünülmektedir. RPB kaplamalarda bağlayıcı görevi gören çimentonun yerel bir malzeme olması, basınç ve eğilme dayanımlarının yüksek olmasından dolayı daha düşük kalınlıkta ekonomik kaplama inşa edilebilmesi sonucunda, RPB kaplama maliyetinin BSK kaplama ve C30/37 normal dayanımlı beton kaplama maliyetinden daha düşük olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

- Bu çalışmada Reaktif Pudra Betonun (RPB) rijit üstyapı beton yol kaplamasında kullanılabilirliği araştırılmıştır.
- Çalışmada oluşturulan RPB'un su/bağlayıcı oranı 0,14 ve lifli RPB'un su/bağlayıcı oranı 0,15'dir. Kaplama betonunun oranlandırılması için şartnamelerde; maksimum su/bağlayıcı oranının 0,40-0,45 olması istendiğinden lifsiz ve lifli RPB'lar rijit yol kaplaması olarak kullanılabilir.
- Lifsiz RPB'ların değişik kürler sonucu en yüksek basınç dayanımı 1,3 MPa basınçlı 180°C ısıda 8 saat uygulanan otoklav küründe 142 MPa; lifli RPB'ların en yüksek basınç dayanımı ise 1,3 MPa basınçlı 180°C ısıda 8 saat uygulanan otoklav kürü sonrası 171 MPa'dır. Kaplama betonunun oranlandırılması için şartnamelerde; minimum basınç dayanımının 28 MPa olması istendiğinden lifsiz ve lifli RPB'lar rijit yol kaplaması olarak kullanılabilir.
- Lifsiz RPB'ların değişik kürler sonucu en yüksek eğilme dayanımı 1,3 MPa basınçlı 180°C ısıda 8 saat uygulanan otoklav küründe 9,54 MPa; lifli RPB'ların en yüksek eğilme dayanımı 1,3 MPa basınçlı 180°C ısıda 8 saat uygulanan otoklav küründe 11,34 MPa'dır. Kaplama betonunun oranlandırılması için şartnamelerde; minimum eğilme dayanımının 4,5 MPa olması istendiğinden lifsiz ve lifli RPB'lar rijit yol kaplaması olarak kullanılabilir.
- Sanayi atık çelik lifli RPB numunelere 7 gün 20°C standart su kürü, 28 gün 20°C standart su kürü ve 7 gün 20°C - 2 gün 90°C - 2 gün 180°C etüv kürü şeklinde kombine kür uygulanmıştır. Sanayi atık lifli RPB numunelerin 7 günlük 20°C standart su küründe basınç dayanımı 57,65 MPa, eğilme dayanımı 7,65 MPa, 28 günlük 20°C standart su küründe basınç dayanımı 84,76 MPa, eğilme dayanımı 9,06 MPa bulunmuştur. Sanayi atık lifli RPB'ların en yüksek basınç dayanımı 7 gün 20°C su kürü - 2 gün 90°C su

banyosu kürü - 2 gün 180°C etüv kombine kürü sonrası 125 MPa; en yüksek eğilme dayanımı ise aynı kombine kür tipinde 15,04 MPa bulunmuştur. Rijit yol kaplama betonunun oranlandırılması için şartnamelerde; minimum basınç dayanımının 28 MPa, minimum eğilme dayanımının ise 4,5 MPa olması istendiğinden sanayi atık çelik lifli RPB'lar rijit yol kaplaması olarak kullanılabilir.

- ATT ve kireç içerikli lifsiz RPB'ların en yüksek basınç dayanımı 7 gün 20°C su kürü - 2 gün 90°C su banyosu - 2 gün 180°C etüv kombine küründen 106,52 MPa; en yüksek eğilme dayanımı ise aynı kombine kür tipinde 8,19 MPa bulunmuştur.

- ATT ve kireç içerikli normal lifli RPB'ların en yüksek basınç dayanımı 7 gün 20°C su kürü - 2 gün 90°C su banyosu - 2 gün 180°C etüv kombine küründen 124,99 MPa; en yüksek eğilme dayanımı ise aynı kombine kür tipinde 9,18 MPa bulunmuştur.

- ATT ve kireç içerikli sanayi atığı lifli RPB'ların en yüksek basınç dayanımı 7 gün 20°C su kürü - 2 gün 90°C su banyosu - 2 gün 180°C etüv küründen 109,36 MPa; en yüksek eğilme dayanımı ise aynı kombine kür tipinde 10,98 MPa bulunmuştur.

- Çalışma sonuçları, Ahlattaşının çimento kıvamında öğütülerek uygun su muhtevasında sönmüş kireç ile karıştırılmasıyla bağlayıcı özellik kazanması ve yol kaplamaları ile diğer yapı inşaatlarında çimento ile ikameli olarak uygulanabilirliğini göstermiştir. Bu çalışmada Ahlat Taşı tozu (ATT) ve kirecin çimento ile birlikte kullanılmasıyla, daha düşük dozajda çimento miktarı ile RPB üretilebileceği kanıtlanmıştır.

- 20 farklı deney sonucunda; çimento, ATT ve kireç karışımı deneylerde, en yüksek basınç ve eğilme dayanımını veren ekonomik karışımın, karışımdaki çimento, ATT ve kireç miktarları toplamının %50'sini çimento, %29,4'ünü ATT ve %20,6'sını kireç oluşturacak şekilde hazırlanan karışım olduğu görülmüştür. Karışıma çimento katılmadan sadece ATT ve kireç kullanılan deneylerde ise, en yüksek basınç ve eğilme dayanımını veren ekonomik karışımın, karışımdaki ATT ve kireç miktarları toplamının

%50'sini ATT ve %50'sini kireç oluşturacak şekilde hazırlanan karışım olduğu görülmüştür.

- Rijit üstyapı kaplama inşasında RPB kaplamalar geleneksel RPB kaplama ve prefabrik RPB kaplama olarak iki kısımda ele alınmıştır. Çalışma sonucunda $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km için, prefabrik imalatlı en ekonomik rijit üstyapı tipinin prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı, geleneksel olarak en ekonomik rijit üstyapı tipinin ise geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı tipi olduğu görülmüştür. $W_{8,2}$ değeri 10×10^6 olan bir üstyapıda prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplama kalınlığı 10,24 cm, geleneksel lifsiz RPB kaplama kalınlığı 17,15 cm, BSK kaplama kalınlığı 19,00 cm ve C30/37 rijit kaplama kalınlığı 23,04 cm olarak hesaplanmıştır. Maliyet olarak $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km için, prefabrik sanayi atık lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti, BSK esnek üstyapı maliyetinden %42,64; C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyetinden ise %38,21 daha ekonomiktir. Maliyet olarak $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 metre için, geleneksel lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyeti, BSK esnek üstyapı maliyetinden %25,28; C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyetinden ise %19,51 daha ekonomiktir. Maliyet olarak $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 metre için, C30/37 normal dayanımlı rijit üstyapı maliyeti, BSK esnek üstyapı maliyetinden %7,17 daha ekonomiktir.
- RPB yol kaplamalarının 1 günlük kalıp süresi dâhil toplam 2. gün sonunda trafiğe açılmaları mümkündür. RPB kaplamalar normal betonlara nazaran daha yüksek basınç ve eğilme dayanıma sahip olduklarından daha düşük kalınlıkta inşa edilebilirler. Bu şekilde malzeme tasarrufu ve ekonomik kazanç sağlanır. RPB kaplama üretiminde bütünüyle yerel malzeme kullanılmaktadır. Üretimde yerel malzeme kullanılması ekonomik olarak tercih sebebidir.
- Bundan sonraki çalışmalarda RPB yol kaplamalarında aşınma, yorulma ve darbe deneyleri yapılarak bilime yenilik getirilebilir. RPB Alkali-Silika Reaksiyonları (ASR) ve Gecikmiş Etrenjit oluşumu yönünden ileriye yönelik çalışmalar yapılabilir. Travers üretiminde RPB kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- AASHTO, 1972. Guide for Design of Pavement Structures.
- ACI Committee 544, 1990. State of The Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, 22.
- Ağar, E., Öztaş, G., Sütaş, İ., 1998. Beton Yollar. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Ağar, E., Öztaş G. ve Sütaş, İ., 1998. Esnek yol üst yapıları ile rijit yol üst yapılarının teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması. Teknik Rapor, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.
- Aitcin, P. C., 2000. Cements of Yesterday and Today Concrete of Tomorrow. Cement and Concrete Research, 30, 1349-1359.
- Akman Pek, A.N., Akman, M.S., 2012. Kıyı ve Açık Deniz Yapılarında Beton. Maya Basın Yayın Mat. Tic.Ltd. Şti, İstanbul.
- Al-Tayyib, A.H.J., Al-Zahrani, M.M., 1990. Corrosion of Steel Reinforcement in Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Structures. ACI Materials Journal, 87 (2), 108-113.
- Al-Tayyib, A.H.J., Al-Zahrani, M.M., 1990. Use of Polypropylene Fibers to Enhance Deterioration Resistance of Concrete Surface Skin Subjected to Cyclic Wet/Dry Sea Water Exposure. ACI Materials Journal, 87 (4), 363-370.
- Altoubat, S.A., Roesler, J. R., Lange, D. A., Rieder, K. A., 2006. Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. Construction and Building Materials.
- Arslan, M., 2007. Beton Yol Kaplamalarında Alternatif Beton ve Yapım Yöntemi Araştırmaları. Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Ankara.
- ASTM, Standard Specifications for Chemical Admixtures for Concrete (ASTM C494-C494M-99), 2002. Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Aggregates, 4(2).
- Avar, D., 2006. Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydar, E., Gourgaud, A., Ulusoy, I., Digonnet, F., Labazuy, P., Sen, E., 2003. "Morphological Analysis of Active Mount Nemrut Stratovolcano, Eastern Turkey: Evidences and Possible Impact Areas of Future Eruption", Journal of Volcanology and Geothermal Research, 123: 301-312.
- Bakış, A., Işık, E., Hattatoğlu, F., Akıllı, A., 2014. Jeolojik Miras Nitelikli Ahlattaşımın İnşaat Sektöründe Kullanımı, 3.Uluslararası Ahlat-Avrasya Bilim, Kültür ve Sanat Sempozyumu.
- Balendran, R.V., Zhou, F.P., Nadeem, A., Leung A.Y.T., 2002. In uence of steel füme on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete. Building and Environment, 37, 1361-1367.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012. Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Bayrak, O., Ü., 2007. Rijit Üstyapı Tasarımına Yeni Bir Yaklaşım. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Bimel Metal çelik talaş hurda fiyatları, <http://www.bimelmetal.com> (13.10.2014).
- Bolat, H., 2003. Vakum uygulamasının betonun özelliklerine etkisi. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ens., Ankara.
- Chan, Y.W., Chu, S.H., 2004. Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 1167-1172.
- Collepari, S., Cappola, L., Trolli, R., Collepari, M., 1997. Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete. *Proceedings of the fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı birim fiyatları, <http://www.csb.gov.tr> (26.10.2014).
- Çivici F., 2002. İki Eksenli Eğilme Altında Lifli Betonların Davranışı. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Çivici F., 2004. Çelik Lif Donatılı Betonun Eğilme Tokluğu. *Pamukkale Üniv. Müh. Bil. Dergisi* 12 (2), 183-188.
- Çivici, F., 2006. Çelik Lif Donatılı Betonun Eğilme Tokluğu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (2), 183-188.
- Dal, M., Kılınç, C., Eren, E., Işık, A., 2013. Beton Teknolojisi ve Beton Teknolojisi Laboratuvarı, Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi, İstanbul.
- Dallaire, E., Aitcin P. C., Lachemi, M., 1998. High-Performance Powder. *Civil Engineering, ABI/INFORM Global*, 68, 48-51.
- Dallaire, E., Aitcin, P.C., 1998. Reactive Powder Concrete in Use. *ASCE Journal of Civil Engineering*, 68 (1), 4-48.
- Dauriac, C., 1997. Special Concrete May Give Steel Stiff Competition. *Building with Concrete, The Seattle Daily Journal of Commerce*, p.5.
- Dugat, J., Roux, N., Bernier, G., 1996. Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes. *Materials and Structures*, 29 (188), 233-260.
- Duyar, O., 2006. Kendiliğinden yerleşen betonlar. *Hazır Beton, Mart-Nisan*, 25-27.
- Düzgün, E., 2004. Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Performanslarının İncelenmesi. ESOGÜ, Eskişehir.
- Edis, E., 2007. Asfalt Ve Beton Kaplamalı Yolların Maliyet Yönünden Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.
- Ercan, T., Fujitani, T., Matsuda, J., Notsu, K., Tokel, S., Ui, T., 1990. "Doğu ve Güneydoğu Anadolu Neojen- Kuvaterner Volkanitlerine İlişkin Yeni Jeokimyasal, Radyometrik ve İzotopik Verilerin Yorumu", *M.T.A. Dergisi*, 110, 143-164.
- Eren, Ö., Çelik, T., 1997. Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 11 (1-8), 373-382.
- Erguvanlı, K., 1994. Mühendislik Jeolojisi (4. Baskı), Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Feylessoufi, A., Crespin, M., Dion, P., Bergaya, F., Van Damme, H., 1997. Controlled Rate Thermal Treatment of Reactive Powder Concretes. *Advanced Cement Based Materials*, 6, 21-27.
- Gevrek, A. İ., ve Kazancı, N., 1991. "İgnimbrit: Oluşumu ve Özellikleri", *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 38, 39-42, Ankara.
- Gevrek, A.İ., 2003. Volkaniklastiklerin Oluşumu Fasiyes Özellikleri ve Jeotermal Aramalarındaki Yeri, M.T.A. Genel Müdürlüğü, Enerji Dairesi, Ankara.

- Gilliand, S.K., 1996. Reactive Powder Concrete (RPC), A New Material For Prestressed Concrete Bridge Girders. Building an International Community of Structural Engineers Structures Congress–Proceedings, ASCE, New York, USA, 1, 125-132.
- Grassl, P., Wong, H.S., Buenfeld, N.R., 2010. Influence of Aggregate Size and Volume Fraction on Shrinkage Induced Micro-Cracking of Concrete and Mortar. Cement and Concrete Research, 40, 85-93.
- Güneşli U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Güngör, A. G., Sağlık, A., 2008. Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi. Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Işık, E., Bakış, A., Akıllı, A., Hattatoğlu, F., 2015. Usability of AhlatStone as Aggregate in Reactive Powder Concrete. Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, 4, 4, 507-514.
- İksa İnşaat Katkıları San. ve Tic. Ltd. Şti., <http://www.iksa.com.tr> (13.06.2014).
- İpek, M., 2009. Reaktif Pudra Betonların Mekanik Davranışına Katılma Süresince Uygulanan Sıkıştırma Basıncının Etkileri. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Karabulut, A.Ş., 2006. Reaktif Pudra Betonunun (RPB) Özelliklerinin Mineral Katkılarla Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Karaman, E.M, Kibici, Y., 2008. Temel Jeoloji Prensipleri (2.Baskı), Belen Yayıncılık ve Matbaacılık, Ankara.
- Karayolları Genel Müdürlüğü birim fiyatları, <http://www.kgm.gov.tr> (26.10.2014).
- Khaloo, A.R., Afshari, M., 2005. Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs. Cement and Concrete Composites, 27, 141-149.
- Khoury, A., 1992. Effect of Very Fine Aggregate on Concrete Strength. Materials and Structures, 27, 185-194.
- Kim, B.G., 2000. Compatibility Between Cements and Superplasticizers in High Performance Concrete: Influence of Alkali Content in Cement and of the Molecular weight of PNS on the Properties of Cement Pastes and Concretes. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke.
- Kuloğlu, N., Kök, B. V., Yılmaz, M., Tanyıldızı, M., 2011. AASHTO Metodunda Rijit Üstyapı Kaplama Kalınlığına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS), Elazığ.
- Larrard, F., Sedran, T., 1994. Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by The Use of A Packing Model. Cement and Concrete Research, 24 (6), 997–1009.
- Ma, J., Orgass, M., Dehn, F., Schmidt, D., Tue, N.V., 2004. Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates, International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany.
- Macit,S., 2009. Beton Yol İnşaatında Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanılması Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Matte, V., Moranville, M., 1999. Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes. *Cement and Concrete Composites*, 21 (1), 1-9.
- Mindess, S., Young J.F., Darwin D., 1991. *Concrete*, NJ: Prentice Hall.
- Na-Hyun, Y., Jang-Ho, J.K., Tong-Seok, H., Yun-Gu, C., Jang, H.L., 2012. Blast-Resistant Characteristics Of Ultra-High Strength Concrete And Reactive Powder Concrete. *Construction and Building Materials*, 28 (1), 694–707.
- Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A.P., 1999. Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and Concrete Composites*, 21, 383-390.
- Önem, Y., 2000. *Sanayi Madenleri (2.Baskı)*, Kozan Ofset Matbaa, Ankara.
- Qian, C.X., Stroeven, P., 2000. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 63–69.
- Ramyar, K., 2013. *Betonda Alkali Silis Reaksiyonu*. *Beton 2013*, Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 289-311.
- Reda, M.M., Shrive, N.G., Gillott, J.E., 1999. Microstructural Investigation of Innovative UHPC. *Cement and Concrete Research*, 29, 323– 329.
- Richard, P., Cheyrezy, M., 1995. Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research*, 25, 1501-1511.
- Richard, P., Cheyrezy, M.H., 1994. Reactive Powder Concretes With High Ductility and 200-800 Mpa Compressive Strength. *Concrete Technology: Past, Present and Future*, Proc. Of V. M. Malhotra Symp., ACI SP-144, S. Francisco, USA, 507-518.
- Rougeau, P., Borys, B., 2004. Ultra High Performance Concrete with Ultra Fine Particles Other Than Silica Fume, *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany.
- Roux, N., Andrade, C., Sanjuan, M. A., 1996. Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1-6.
- Sadrekarami, A., 2004. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2 (3), 409-417.
- Sağlık, A., Sümer, O., Tunç, E., Kocabeyler, M. F., Çelik, R.S. 2009. Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu ve DSİ Projelerinde Uygulanabilirliği. *DSİ Teknik Bülteni*, Sayı 105, sayfa 13, Ankara.
- Shaheen, E.A.H., 2004. Carbon fibre reinforced reactive powder concrete (CFRRPC) anchorage system. Ph.D., *Calgaria Üniversitesi*, Alberta.
- Song, P.S., Hwang, S., 2004. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18, 669–673.
- Song, P.S., Hwang, S., Sheu, B.C., 2005. Strength properties of nylon and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35, 1546– 1550.
- Suhaendi, Sofren.L., Horiguchi,T., 2006. Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition. *Cement and Concrete Research*, 36, 1672–1678.
- Şahinoğlu, S.A., 2010 . *Reaktif pudra betonlar*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Şimşek, O., Bolat, H., Erdal, M., Sancak, E., Durmuş, G., 2004. Vakum Uygulamasının Betonun Özelliklerine Etkisi. Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Proje No: 07/2001-12, Ankara.
- Şimşek, O., Erdal, M., 2004. Ahlat Taşının (İgnimbrit) Bazı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 17(4):71-78.
- Talebinejad, I., Bassam, S.A., Iranmanesh, A., Shekarchizadeh, M., 2004. Optimizing Mix Proportions of Normal Weight Reactive Powder Concrete with Strengths of 200–350 Mpa, Ultra High Performance Concrete (UHPC). International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany.
- Tam, C.M., Vivian, W.Y., Tam, K.M., 2012. Assessing Drying Shrinkage And Water Permeability of Reactive Powder Concrete Produced In Hong Kong. Construction and Building Materials, 26 (1), 79–89.
- Tanyıldızı, M.M., 2010. Aashto Metodunda Rijit Üstyapı Beton Kaplama Kalınlığına Etki Eden Parametrelerin İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Taşdemir, C., 2003. Combined Effects of Mineral Admixtures and Curing Conditions on The Sorptivity Coefficient of Concrete, Cement and Concrete Research, 33 (10), 1637–1642.
- Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Mills, N., Barr, B.I.G., Lydon, F.D., 1996. Effects of Silica Fume and Aggregate Size on Brittleness of Concrete. Cement and Concrete Research, 26 (1), 63–68.
- Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Mills, N., Barr, B.I.G., Lydon, F.D., 1999. Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Postpeak Response of Concrete in Bending. ACI Mater, 96 (1), 74–83.
- Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Kocatürk, N., Yerlikaya, M., 2004. Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler. Beton 2004 Kongresi Bildiriler, İstanbul.
- Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Yerlikaya, M., 2005. Yeni Kuşak Süperakışkanlaştırıcıların Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerdeki İşlevleri. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu Bildiriler, 201-221, Ankara.
- Taşdemir, M.A., Kocatürk, A.N., Haberveren, S., Aslan, G., 2005. Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar, İstanbul.
- Taşdemir, Y., Açar, E., 2002. Silindir İle Sıkıştırılabilen Beton Yollar. Hazır Beton Dergisi, 9 (51).
- Teichman, T., Schmidt, M., 2004. Influence of The Packing Density of Fine Particles on Structure, Strength and Durability of UHPC. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany.
- Tohumcu İ., Bingöl, A. F., 2013. Silis Dumanı Ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri Ve Basınç Dayanımları. DEÜ Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15 (2), 31-44.
- Topçu İ.B., Karakurt, C., 2005. Reaktif Pudra Betonu ve Uygulamaları. Akdeniz İnşaat Haber, 2, 32-33.

- Topçu, İ.B., Karakurt, C., 2005. Reaktif Pudra Betonları. TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri, 437 (3).
- TS EN 12390-3, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2010. Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 933-1, 2012. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Elleme Metodu. TSE, Ankara.
- TS10515, 1992. Çelik Tel Takviyeli Betonun Eğilme Mukavemeti Deney Metodu. Türkiye Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS25, 1975. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS2824 EN 1338, 2005 AC, 2009. Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-Gerekli şartlar ve deney metotları. TSE, Ankara.
- TS2824 EN 1338, 2005 T1, 2006. Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-Gerekli şartlar ve deney metotları. TSE, Ankara.
- TS500, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. TSE, Ankara.
- TS5694, 1988. Yapı ve Kaplama Taşları-Tabii-Terimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS802, 2009. Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. TSE, Ankara.
- Tunç, A., 2007. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. 2.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım.
- Türel, Ö. 2003. Antalya Çevre İllerdeki Bölgesel Devlet Yollarının mevcut üstyapı uygulamalarının incelenmesi ,“Rijit ÜstYapı” formunda yeniden çözülmesi , maliyet karşılaştırmalarının yapılabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: 236 ss, Antalya.
- Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası kurları, <http://www.tcmb.gov.tr> (30.06.2015).
- Uçar, S., 2002. Yol Üstyapıları Yapım Maliyetleri Araştırması. Ulusal Beton Yollar Kongresi, Ankara.
- Uçar, S.ve Konrapa,U.,” Yol üst yapıları yapım maliyetleri araştırması”, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 2002.
- Uygunoğlu, T., Ünal, O., 2007. Buhar Kürü Uygulanmış Pomzalı Hafif Betonun Özellikleri. Politeknik Dergisi, 10 (1), 111-116.
- Ünsal, A., Şen, H., 2008. Beton Kaplama Blokları–Beton Parkeler-Gerekli Şartlar ve Deney Metotları (TS 2824 EN 1338), Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Malzeme Lab. Şubesi Müdürlüğü.
- Ünsal, N., 2006. İnşaat Mühendisleri İçin Jeoloji (2.Baskı), Alp Yayınevi, Ankara.
- Wen-Yu, J., Ming-Zhe, A., Gui-Ping, Y., Jun-Min, W., 2007. Study on Reactive Powder Concrete Used in the Sidewalk System of the Qinghai-Tibet Railway Bridge. International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 333–339.
- Yalçınkaya, Ç., Yazıcı, H., 2011. Agregaların Hacminin Reaktif Pudra Betonunun Mekanik ve Büzülme Özelliklerine Etkileri. THBB Beton 2011 kongresi, İstanbul, 150-159.
- Yazıcı, H., 2007. The Effect of Curing Conditions on Compressive Strength of Ultra High Strength Concrete with High Volume Mineral Admixtures. Building and Environment, 42 (5), 2083–2089.

- Yazıcı, H., Deniz, E., Baradan, B., 2013. The Effect of Autoclave Pressure, Temperature and Duration Time on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete. *Construction and Building Materials*, 42, 53–63.
- Yazıcı, H., Yalçınkaya, Ç., 2011. Yeni nesil yüksek performanslı beton: Reaktif Pudra Betonu. *TMMOB İMO İzmir Bülten*, 156, 26-29.
- Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Aydın, S., Karabulut, A.Ş., 2009. Mechanical properties of Reactive Powder Concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials* 23 (2009), 1223-1231.
- Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş., Baradan, B. 2008. Utilization of Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag as an Alternative Silica Source in Reactive Powder Concrete. *Fuel*, 87, 2401-2407.
- Yeğınobalı, A. 2009. Niçin Beton Yol. TÇMM-ARGE Enstitüsü, 1.Baskı, Sayfa 13, Ankara.
- Yerlikaya, M., 2002. Çelik Tel Donatılı Yol Betonları. Beksa AŞ, Kocaeli.
- Yerlikaya, M., 2005. Çelik tel donatılı betonların deprem etkisi altında davranışları. Deprem Sunusu, BEKSA Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş.
- Yiğiter H, 2002. Yüksek Performanslı Betonları Süneklik Özelliğinin Araştırılması. Y.Lisans Tezi, DEÜ Fen Bil. Ens.
- Yiğiter, H., Aydın, S., Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., 2012. Mechanical Performance of Low Cement Reactive Powder Concrete (LCRPC). *Composites Part B: Engineering*, 43 (8), 2907–2914.

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Adana'da doğdu. Lise öğrenimini 1987 yılında Adana Karşıyaka Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1991'de Dicle Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1992 yılında askerlik hizmetini yedek subay olarak tamamladı. 1995'de Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı'nda yüksek lisansını tamamladı. Yüksek lisan öğrenimi süresince aynı bölümde 50/d Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı. 1997 yılında Milli Eğitim Bakanlığı'nda öğretmen kadrosuna atandı. 1998 yılında Yüzüncüyıl Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. 2007 yılında Bitlis Eren Üniversitesi'nin kurulmasıyla kadrosu bu üniversiteye alındı. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimine başladı. Halen Bitlis Eren Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu İnşaat Teknolojisi Bölüm Başkanı olarak görevini sürdürmekte ve yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir. Evli olup 6 çocuk babasıdır.