

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETON YOL KAPLAMALARINDA YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE ÇELİK LİF
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**



DOKTORA TEZİ

Mehmet Mahmut TANYILDIZI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

ARALIK 2022

**T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETON YOL KAPLAMALARINDA YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE ÇELİK LİF
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Mehmet Mahmut TANYILDIZI
(36173621004)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

ARALIK 2022



TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde yardım, öneri, ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgilendirme ve yönlendirmeleriyle tez çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillerindiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tacetin GEÇKİL'e,

Tez sürecinde benden desteğini bir an için bile esirgemeyen, tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her döneminde bana destek olan aileme,

Çalışma kapsamında bilgi ve deneyimi sayesinde karşılaştığımız tüm olumsuzlukları aşmamızı sağlayan hocam Sayın Prof. Dr. Kazım TÜRK'e, Öğr.Gör. Metin KATLAV'a ve Doktora öğrencisi Ceren Beyza İNCE'ye,

Bu çalışmamın gerçekleştirilmesinde yardım ve katkılarından ötürü Sayın Prof. Dr. Ragıp İNCE ve Prof. Dr. Baha Vural KÖK'e

teşekkür ederim.

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, FDK-2022-2837 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürü borç bilirim.

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Beton yol kaplamalarında yüksek fırın cürufu ve elik lif kullanımının araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mehmet Mahmut TANYILDIZI



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Tezin Ana Hatları	4
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1 Karayolu Üstyapısı	5
2.1.1 Esnek üstyapı	5
2.1.2 Rijit üstyapı	6
2.1.3 Kompozit üstyapı	7
2.2 Havaalanı Üstyapısı	7
2.3 Yol Üstyapında Oluşan Bozulmalar ve Nedenleri.....	8
2.3.1 Karayolu ve havaalanı beton yol üstyapılarında oluşan kusurlar	9
2.3.2 Karayolu ve havaalanı beton yol üstyapılarında oluşan gerilmeler.....	10
2.4 Üstyapı Tipi Seçim Metodolojisi	13
2.4.1 Karayolu üstyapı tipi seçiminde teknik ölçütler	13
2.4.1.1 Dıştan gelen yüklerin taban zeminine iletilmesi	13
2.4.1.2 Trafik.....	14
2.4.1.3 İklim	14
2.4.1.4 Konfor ve güvenlik	15
2.4.1.5 Malzeme yapısı	15
2.4.1.6 Onarım ve bakım kolaylığı	16
2.4.2 Karayolu üstyapı tipi seçiminde ekonomik ölçütler	17
2.4.2.1 Toplam ekonomik maliyet.....	17
2.4.2.2 İlk yapım maliyeti.....	17
2.4.2.3 Bakım-onarım maliyeti	17
2.4.2.4 Ülkede mevcut yolların üstyapı durumu	18
2.4.2.5 Finansman kaynakları ve güncelleme (iskonto) oranı	18
2.4.2.6 Enerji tüketimi	18
2.4.3 Havaalanı üstyapı tipi seçimi	19
2.5 Beton Yol Kaplamaları	20
2.5.1 Türkiye’de karayolu ve havaalanı beton yol kaplamaları	20
2.5.2 Beton yol kaplamalarının avantajları	21
2.5.3 Beton yol kaplamalarının dezavantajları	23
2.5.4 Yapım yöntemine göre beton yol kaplamaları	24
2.5.4.1 Derzli donatısız beton kaplamalar	25
2.5.4.2 Derzli donatılı beton kaplamalar	25
2.5.4.3 Sürekli donatılı beton kaplamalar	26
2.5.5 Farklı yapım tekniğine göre beton kaplamalar	27
2.6 Lif Takviyeli Beton Kaplamalar	27
2.6.1 Lif tipleri	28

2.6.2 Çelik lifler	29
2.6.3 Liflerin kullanım şekilleri	32
2.6.3.1 Tek tip lif takviyesi	32
2.6.4 Beton yol kaplamalarında çelik liflerin kullanılması	33
2.6.5 Çelik lifli sertleşmiş betonun özellikleri	34
2.6.5.1 Çelik lifli betonlarda basınç dayanımı	35
2.6.5.2 Çelik lifli betonlarda eğilme dayanımı	35
2.6.5.3 Çelik lifli betonlarda yarmada çekme dayanımı	35
2.7 Puzolanlar	36
2.7.1 Puzolanların sınıflandırılması ve çeşitleri	36
2.7.2 Yüksek fırın cürufu (YFC)	37
2.7.2.1 Yüksek fırın cürufunun üretimi	37
2.7.2.2 Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal yapısı	38
2.7.2.3 Yüksek fırın cürufunun kullanım alanları	39
2.7.2.4 Yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkileri	39
2.7.2.5 YFC'nin taze beton özellikleri üzerine etkileri	40
2.7.2.6 YFC'nin sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkileri	41
2.8 Beton Yol Kaplamalarının Tasarım Yöntemi	42
2.8.1 Beton yol kaplamalarının tasarımında kritik noktalar	43
2.8.1.1 Beton yol kaplamalarının tasarımını etkileyen trafik faktörleri	44
2.8.1.2 Beton yol kaplamalarının tasarımında taban zemininin etkileri	44
2.8.1.3 Beton yol kaplamalarının tasarımında iklimin etkileri	44
2.8.1.4 Beton yol kaplamalarının tasarımında beton dayanımının etkileri	44
2.8.1.5 Beton yol kaplamalarının tasarımında plak kalınlığının etkileri	45
2.8.1.6 Beton yol kaplamalarının tasarımında kritik saha koşullarının etkisi	45
2.8.2 Karayolu beton yol kaplamalarının tasarım yöntemi	45
2.8.2.1 Servis yeteneği (performans ölçütü)	46
2.8.2.2 Tasarım değişkenleri	47
2.8.2.3 Malzeme özellikleri	50
2.8.2.4 Üstyapının yapısal özellikleri	53
2.8.3 Havaalanı beton yol kaplamalarının tasarım yöntemi	54
2.8.3.1 FAARFIELD metodu ile havaalanı rijit kaplama tasarımı	55
2.9 Literatür Özetleri	59
2.9.1 Lifli betonlarla ilgili literatür özeti	59
2.9.2 Puzolan katkılı betonlarla ilgili literatür özeti	64
2.9.3 Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemi ile ilgili literatür özeti	66
3. MATERYAL VE METOT	67
3.1 Materyal	67
3.1.1 Çimento	67
3.1.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	68
3.1.3 Agrega	69
3.1.4 Kimyasal katkı	71
3.1.5 Karışım suyu	71
3.1.6 Çelik lif	71
3.2 Metot	72
3.2.1 Karışımların hazırlanması	72
3.2.2 Numune Boyutları	76
3.2.3 Numunelerin kuru	76
3.2.4 Testler	77
3.2.4.1 Birim ağırlık tayini	77

3.2.4.2 İşlenebilirlik kıvam tayini.....	77
3.2.4.3 Basınç dayanımı	77
3.2.4.4 Elastisite modülü tayini	78
3.2.4.5 Eğilmede çekme dayanımı.....	79
3.2.4.6 Enerji yutma kapasitesi (tokluk)	80
3.2.4.7 Yarmada çekme dayanımı	81
3.2.4.8 Betonun donma-çözülme ve buz çözücü maddelere karşı dayanımı	81
3.2.4.9 Aşınma dayanımı.....	84
3.2.4.10 Elektriksel özdirenç ve iletkenlik ölçümü.....	84
3.2.4.11 Isıtma deneyi	85
3.2.4.12 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-Işını kırınım (XRD) analizi	85
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	87
4.1 Taze ve sertleşmiş beton deneyleri	87
4.1.1 Birim ağırlık deney sonuçları.....	87
4.1.1.1 Kontrol numunelerinin birim ağırlık deney sonuçları	87
4.1.1.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin birim ağırlık deney sonuçları	88
4.1.1.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin birim ağırlık deney sonuçları	90
4.1.1.4 Numunelerin birim ağırlık deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	90
4.1.2 İşlenebilirlik (slump) deney sonuçları	93
4.1.2.1 Kontrol numunelerinin slump deney sonuçları.....	94
4.1.2.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin slump deney sonuçları	94
4.1.2.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerinin slump deney sonuçları	96
4.1.2.4 Numunelerin slump deney sonuçlarının değerlendirilmesi	97
4.1.3 Basınç dayanımı deney sonuçları.....	99
4.1.3.1 Kontrol numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları	99
4.1.3.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları.....	100
4.1.3.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları.....	102
4.1.3.4 Numunelerin basınç dayanımını deney sonuçlarının değerlendirilmesi	104
4.1.4 Eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları	109
4.1.4.1 Kontrol numunelerinin eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları	109
4.1.4.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları	110
4.1.4.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları	112
4.1.4.4 Numunelerin eğilmede çekme dayanımını deney sonuçlarının değerlendirilmesi	114
4.1.4.5 Yük-sehim eğrileri ve eğilme tokluğu	118
4.1.5 Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları	120
4.1.5.1 Kontrol numunelerinin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	121
4.1.5.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	122
4.1.5.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	123
4.1.5.4 Numunelerin yarmada çekme dayanımını deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	124
4.1.6. Betonun donma-çözülme ve buz çözücü maddelere karşı dayanımı sonuçları	128
4.1.7. Betonun aşınma direnci	131
4.1.8 Elektriksel özdirenç deneyi	133
4.1.8.1 Numunelerin ısıtılması.....	135
4.1.9 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve XRD analizi.....	137
4.2 Karayolu beton yol kaplama tasarımı	140
4.2.1 Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) beton yol kaplama tasarımı	141
4.2.1.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	141
4.2.1.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	143
4.2.1.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	146
4.2.2 Taşıma gücü zayıf zeminlerde (siltli ve siltli kil) beton yol kaplama tasarımı	150

4.2.2.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	150
4.2.2.2 Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	151
4.2.2.3 Çelik lif (35 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	154
4.2.3 Taşıma gücü orta sınıf zeminlerde (kum ve killi çakıl) ($k=300$ pci) beton plak kalınlık tasarımı ..	158
4.2.3.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	158
4.2.3.2 Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	159
4.2.3.3 Çelik lif (35 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	162
4.2.4 Taşıma gücü iyi sınıf zeminlerde (çakıl) beton plak kalınlık tasarımı	166
4.2.4.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	166
4.2.4.2 Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	167
4.2.4.3 Çelik lif (35 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	171
4.2.5 Taşıma gücü çok iyi sınıf zeminlerde (kırmataş) beton plak kalınlık tasarımı	175
4.2.5.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	175
4.2.5.2 Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	176
4.2.5.3 Çelik lif (35 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı	180
4.3. Havaalanı beton yol kaplama tasarımı	184
4.3.1 Çakıllı zeminlerde havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	184
4.3.1.1 Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	185
4.3.1.2 Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	187
4.3.2 Kumlu zeminlerde havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	189
4.3.2.1 Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	189
4.3.2.2 Çelik lif (60 mm) katkıli beton numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	192
4.3.3 Düşük plastisiteli siltli ve killi zeminlerde havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	194
4.3.3.1 Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	194
4.3.3.2 Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	196
4.3.4 Yüksek plastisiteli siltli ve killi zeminlerde havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	198
4.3.4.1 Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı	198
4.3.4.2 Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin beton plak kalınlık tasarımı	201
4.4 Karayolu beton yol kaplaması maliyet analizi	203
4.4.1 Kontrol numunelerine ait numunelerin maliyet analizi	204
4.4.2 Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin beton plak maliyet analizi	205
4.4.3 Taşıma gücü zayıf zeminlerde (siltli ve siltli kil) çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin beton plak maliyet analizi	210
4.4.4 Taşıma gücü orta sınıf (kum ve killi çakıl) zeminlerde çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin beton plak maliyet analizi	213
4.4.5 Taşıma gücü iyi zeminlerde (çakıl) zeminlerde çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin beton plak maliyet analizi	218
4.4.6 Taşıma gücü çok iyi zeminlerde (kırmataş) zeminlerde çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin beton plak maliyet analizi	221
5. SONUÇLAR	226
KAYNAKLAR	231
ÖZGEÇMİŞ	242

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Üstyapı tipi seçiminde teknik parametrelerin etkisi.	16
Çizelge 2.2 : Üstyapı tipi seçiminde ekonomik parametrelerin etkisi.	19
Çizelge 2.3 : Havaalanı kaplama tipi seçimine etki eden ana faktörler.	19
Çizelge 2.4 : Beton yol kaplamalarının esnek üstyapı ile karşılaştırılması.....	24
Çizelge 2.5 : Betonların mekanik özellikleri üzerine lif katkısının etkisi.....	29
Çizelge 2.6 : Çelik lif katkılı betonların kullanım yerleri.	31
Çizelge 2.7 : YFC kimyasal kompozisyonu.....	38
Çizelge 2.8 : YFC karşılaştırmalı kimyasal kompozisyonu (%).	39
Çizelge 2.9 : Performans ölçütü değeri.	46
Çizelge 2.10 : Analiz periyot süreleri.	47
Çizelge 2.11 : Taşıt eşdeğerlik faktörleri.	48
Çizelge 2.12 : Şerit dağıtma faktörleri.	48
Çizelge 2.13 : Güvenilirlik seviyesi oranları.....	50
Çizelge 2.14 : Standart normal sapma değerleri.	50
Çizelge 2.15 : AASHTO 1993 tasarım yönteminde önerilen yatak katsayısı değerleri.....	51
Çizelge 2.16 : Drenaj katsayısı değerleri.	53
Çizelge 2.17 : Yük transfer katsayıları.....	54
Çizelge 2.18 : Farklı kümülatif hasar faktörü değerlerinin üstyapıya etkisi.	56
Çizelge 2.19 : FAA yönteminde kullanılan malzemelerin özellikleri.....	57
Çizelge 2.20 : FAARFIELD tasarım yönteminde önerilen rijit kaplama minimum tabaka kalınlıkları.....	58
Çizelge 2.21: Birleşik zemin sınıflandırma sistemi.	59
Çizelge 3.1 : Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.	67
Çizelge 3.2 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	68
Çizelge 3.3 : Agregaya ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	69
Çizelge 3.4 : Çelik liflerin özellikleri.....	72
Çizelge 3.5 : Kontrol karışımlarına ait kodlandırma.....	73
Çizelge 3.6 : Çelik lifli (60 mm) karışımlara ait kodlandırma.....	73
Çizelge 3.7 : Çelik lifli (35 mm) karışımlara ait kodlandırma.....	74
Çizelge 3.8 : Çelik lif (60 mm) katkılı karışımların oranları.	74
Çizelge 3.9 : Çelik lif (35 mm) katkılı karışımların oranları.	75
Çizelge 3.10 : Taze betonun çökme sınıflandırılması (TS EN 206-1).....	77
Çizelge 3.11 : Donma çözülme direnci kategorileri.....	82
Çizelge 4.1 : Kontrol numunelerinin birim ağırlık değerleri.	88
Çizelge 4.2 : Çelik lif (60 mm) katkılı betonların taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları.	89
Çizelge 4.3 : Çelik lifli (35 mm) betonların birim ağırlıkları.	90
Çizelge 4.4 : Kontrol numunelerin çökme değerleri.	94
Çizelge 4.5 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin çökme değerleri.	95
Çizelge 4.6 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin çökme değerleri.	96
Çizelge 4.7 : Kontrol numunelerinin basınç dayanım değerleri.	99
Çizelge 4.8 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin basınç dayanım değerleri.....	101
Çizelge 4.9 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin %20 YFC ikameli betonlarda basınç dayanım değerleri.	103
Çizelge 4.10 : Kontrol numunelerinin eğilmede çekme dayanımı değerleri.	109
Çizelge 4.11 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanım sonuçları.	111
Çizelge 4.12 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin %20 YFC ikameli betonlarda eğilmede çekme dayanım değerleri.....	113

Çizelge 4.13 : Kontrol numunelerinin yarmada çekme dayanımı.....	121
Çizelge 4.14 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanım sonuçları.	122
Çizelge 4.15 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin %20 YFC ikameli betonlarda yarmada çekme dayanım değerleri.	123
Çizelge 4.16 : Donma-çözülme deneyi sonuçları.	129
Çizelge 4.17 : Üretilen betonların aşınma kaybı değerleri.....	131
Çizelge 4.18 : Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) beton numunelerine ait elektriksel öz direnç deney sonuçları.	133
Çizelge 4.19 : Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) karışım numunelerine ait ısıtma deney sonuçları.	136
Çizelge 4.20 : Yol kaplama betonunun tasarımında kullanılan ortak parametreler.	140
Çizelge 4.21 : Beton kaplamalı yol tasarımında minimum basınç, eğilme, yarmada çekme dayanım değerleri.	141
Çizelge 4.22 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri	141
Çizelge 4.23 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	143
Çizelge 4.24 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	147
Çizelge 4.25 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri	150
Çizelge 4.26 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	151
Çizelge 4.27 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	155
Çizelge 4.28 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri	158
Çizelge 4.29 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	159
Çizelge 4.30 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	163
Çizelge 4.31 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.	166
Çizelge 4.32 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	168
Çizelge 4.33 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	172
Çizelge 4.34 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri	175
Çizelge 4.35 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	177
Çizelge 4.36 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri....	181
Çizelge 4.37 : FAARFIELD v2.0 programında verilen uçakların listesi, brüt ağırlıkları.	184
Çizelge 4.38 : Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık değerleri	185
Çizelge 4.39 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.....	185
Çizelge 4.40 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin havaalanı beton plak kalınlık değerleri.	187
Çizelge 4.41 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.	188
Çizelge 4.42 : Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık değerleri	190
Çizelge 4.43 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.....	190
Çizelge 4.44 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin havaalanı beton plak kalınlık değerleri.	192
Çizelge 4.45 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.	193
Çizelge 4.46 : Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık değerleri	194
Çizelge 4.47 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.....	194
Çizelge 4.48 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin havaalanı beton plak kalınlık değerleri.	196
Çizelge 4.49 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.	197
Çizelge 4.50 : Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık değerleri	199
Çizelge 4.51 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.....	199
Çizelge 4.52 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin havaalanı beton plak kalınlık değerleri.	201
Çizelge 4.53 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.	202

Çizelge 4.54 : Maliyet analizi için birim fiyatlar.	203
Çizelge 4.55 : Kontrol numunelerine ait maliyet analizi.	204
Çizelge 4.56 : Çelik lifli (60 mm) beton numunelerine ait maliyet analizi.....	205
Çizelge 4.57 : Çelik lif (%0.75) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	206
Çizelge 4.58 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	207
Çizelge 4.59 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	208
Çizelge 4.60 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	209
Çizelge 4.61 : Çelik lif (%0.75) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	210
Çizelge 4.62 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	211
Çizelge 4.63 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi	212
Çizelge 4.64 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	213
Çizelge 4.65 : Çelik lif (%0.75) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	214
Çizelge 4.66 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	215
Çizelge 4.67 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi.	216
Çizelge 4.68 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi	217
Çizelge 4.69 : Çelik lif (%0.75) katkılı numunelere ait maliyet analizi	218
Çizelge 4.70 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi	219
Çizelge 4.71 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi	220
Çizelge 4.72 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi	221
Çizelge 4.73 : Çelik lif (%0.75) katkılı numunelere ait maliyet analizi	222
Çizelge 4.74 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi	223
Çizelge 4.75 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi	224
Çizelge 4.76 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi	225

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Tipik esnek üstyapı enkesiti.....	6
Şekil 2.2 : Tipik rijit üstyapı enkesiti.....	6
Şekil 2.3 : Isı farklarından dolayı beton yol kaplamalarında oluşan gerilme durumu.	11
Şekil 2.4 : Beton yol kaplamasında defleksiyon oluşumu.	11
Şekil 2.5 : Beton yol kaplamasında farklı gerilme oluşturan teker yükleri.....	12
Şekil 2.6 : Esnek ve rijit yol üstyapılarında yük dağılımı.	13
Şekil 2.7 : Derzli donatısız beton kaplamaya ait plan ve kesit görüntüsü.....	25
Şekil 2.8 : Derzli donatılı rijit üstyapının plan ve kesit görüntüsü.....	26
Şekil 2.9 : Sürekli donatılı rijit üstyapının plan ve kesit görüntüsü.	26
Şekil 2.10 : Lif katkılı betonların üstünlükleri.	27
Şekil 2.11 : Lif katkılı betonların kullanıldığı yapı tesisleri.	28
Şekil 2.12 : Liflerin malzeme özelliklerine göre sınıflandırılması.	28
Şekil 2.13 : Betonda kullanılan çelik liflerin üstünlükleri.	30
Şekil 2.14 : Lif katkılı betonlarda yük-deplasman ilişkisi.	30
Şekil 2.15 : Şekil yapılarına göre çelik lif çeşitleri.	31
Şekil 2.16 : Liflerin betonda çatlak oluşumuna etkisi.....	32
Şekil 2.17 : Lif katkılı betonlarda gerilme-şekil değiştirme etkisi.....	33
Şekil 2.18 : Çelik liflerin kullanım amacına göre çeşitleri.....	33
Şekil 2.19 : Rijit üstyapılı karayolu ve havaalanında lif katkılı betonun kullanım yerleri.	34
Şekil 2.20 : Puzolanların sınıflandırılması.	36
Şekil 2.21 : Yatak katsayısı (k) - (CBR) arasındaki ilişki.....	51
Şekil 2.22 : Üçte bir nokta yüklemesi altında oluşan kesme ve moment diyagramları.	52
Şekil 2.23 : Havaalanı üstyapı bölgelerinin şematik gösterimi.....	55
Şekil 3.1 : Tez çalışması kapsamında kullanılan YFC.....	68
Şekil 3.2 : Tez çalışması kapsamında kullanılan agregası.....	69
Şekil 3.3 : Agregası karışımı granülometri eğrisi ile TS EN 933-1 sınır eğrileri.	70
Şekil 3.4 : Tez kapsamında kullanılan çelik lifler: a) 60/90 çelik lif b) 35/55 çelik lif.	72
Şekil 3.5 : Beton karışımı numunelerinin hazırlanmasında izlenen yöntem.....	76
Şekil 3.6 : Üretilen beton numunelerinin şekil ve boyutları.	76
Şekil 3.7 : Basınç dayanım testi.	78
Şekil 3.8 : Numunelere ait eğilme dayanımı testi.	80
Şekil 3.9 : Farklı lif boyutlarının çatlaklar arası köprü oluşturmaları.	80
Şekil 3.10 : Numunelere ait yarmada çekme dayanımı testi.....	81
Şekil 3.11 : Numune boyutları ve elde edilişi.	82
Şekil 3.12 : Üretilen numuneler, donma-çözülme kabini ve çevrimleri.	83
Şekil 3.13 : Elektriksel öz direnç ölçüm düzeneği.....	85
Şekil 4.1 : Kontrol numunelerinin birim ağırlıkları.	88
Şekil 4.2 : Çelik lif (60 mm) katkılı betonların birim ağırlıkları.	89
Şekil 4.3 : Çelik lifli (35 mm) betonların birim ağırlıkları.	90
Şekil 4.4 : Taze betonun birim ağırlığının çelik lif (60 mm) ve YFC ile değişimi.....	91
Şekil 4.5 : Sertleşmiş betonun birim ağırlığının çelik lif (60 mm) ve YFC ile değişimi.	91
Şekil 4.6 : Taze betonun birim ağırlığının çelik lif (35 mm) ve %20 YFC oranına göre değişimi.	92
Şekil 4.7 : Sertleşmiş betonun birim ağırlığının çelik lif (35 mm) ve %20 YFC oranına göre değişimi.	92
Şekil 4.8 : YFC'nin çökme değerine etkisi.	94
Şekil 4.9 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin çökme değerleri.	95
Şekil 4.10 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin çökme değerleri.	96

Şekil 4.11 : Çelik lif (60 mm) ve YFC'nin çökme değerine etkisi.	97
Şekil 4.12 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin çökme değerine etkisi... ..	97
Şekil 4.13 : Çelik lif (35 mm ve 60 mm) katkılı numunelerin çökme değerine etkisi.....	98
Şekil 4.14 : Basınç dayanımı için test cihazı ve deneye tabi tutulmuş numune.....	99
Şekil 4.15 : Kontrol numunelerinin basınç dayanımları.	100
Şekil 4.16 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin basınç dayanım grafiği.	101
Şekil 4.17 : Kontrol ve çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin basınç dayanımı.	103
Şekil 4.18 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin Basınç Dayanımı-YFC oranı ilişkisi.	105
Şekil 4.19 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin basınç dayanımının tasarım kriteri. ..	106
Şekil 4.20 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin basınç dayanımının tasarım kriteri. ..	106
Şekil 4.21 : Çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelerin basınç dayanımına etkisi	107
Şekil 4.22 : Basınç dayanımı-Çelik lif (35 ve 60 mm) oranı ilişkisi.....	108
Şekil 4.23 : Çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin basınç dayanımına etkisi.	108
Şekil 4.24 : Kontrol ve YFC katkılı beton numunelerinin eğilme dayanımının tespiti	109
Şekil 4.25 : Eğilme dayanımı kontrol numuneleri sonuçları.	110
Şekil 4.26 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı.....	111
Şekil 4.27 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin eğilme dayanımı.	113
Şekil 4.28 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin Eğilmede Çekme Dayanımı-YFC oranı ilişkisi.	114
Şekil 4.29 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin eğilme dayanımının tasarım kriteri ..	115
Şekil 4.30 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin eğilme dayanımının tasarım kriteri. .	115
Şekil 4.31 : Çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelerin eğilme dayanımı.	116
Şekil 4.32 : Eğilmede çekme dayanımı-Çelik lif oranı ilişkisi.	117
Şekil 4.33 : Çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin eğilme dayanımı.	117
Şekil 4.34 : Çelik lif (%0.75) katkılı karışımların yük-sehim eğrileri.	118
Şekil 4.35 : Çelik lif (%1.00) katkılı lifli karışımların yük-sehim eğrileri	119
Şekil 4.36 : Çelik lif (%1.25) katkılı lifli karışımların yük-sehim eğrileri.	119
Şekil 4.37 : Çelik lif (%1.50) katkılı lifli karışımların yük-sehim eğrileri.	119
Şekil 4.38 : Çelik lifli (60 mm) numunelere ait tokluk değerleri.....	120
Şekil 4.39 : Kontrol ve lifli numunelere ait yarmada çekme dayanımı.	120
Şekil 4.40 : Kontrol numuneleri yarmada çekme dayanımı sonuçları.	121
Şekil 4.41 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı.....	122
Şekil 4.42 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı.....	124
Şekil 4.43 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin Yarmada çekme dayanımı-YFC oranı ilişkisi.	125
Şekil 4.44 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımının tasarım kriteri.	125
Şekil 4.45 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımının tasarım kriteri.	126
Şekil 4.46 : Çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı.	126
Şekil 4.47 : Çelik lif oranının yarmada çekme dayanımına etkisi.	127
Şekil 4.48 : Çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı.	128
Şekil 4.49 : Lif katkılı beton numunelerin donma-çözülme ağırlık kayıpları (%).	129
Şekil 4.50 : Beton numunelerin donma-çözülme ağırlık kayıpları-YFC oranı ilişkisi.	130
Şekil 4.51 : Lifli numunelere ait Ağırlık kayıpları-Çelik lif oranı ilişkisi grafiği.....	130
Şekil 4.52 : Ağırlıkça aşınma kaybı.	132
Şekil 4.53 : Aşınma kaybı- YFC oranı ilişkisi.	133

Şekil 4.54 : Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) numunelere ait elektriksel özdirenç değerleri.	134
Şekil 4.55 : Kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) numunelere ait iletkenlik değerleri.....	134
Şekil 4.56 : Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) karışım numunelerinin 30. dakikadaki sıcaklık artışı değerleri.	136
Şekil 4.57 : (K-Ç) numunesine ait SEM görüntüsü.	137
Şekil 4.58 : (K-Ç20Y) numunesine ait SEM görüntüsü.	138
Şekil 4.59 : (K-Ç) numunesine ait XRD görüntüsü.	138
Şekil 4.60 : (K-Ç20Y) numunesine ait XRD görüntüsü.	139
Şekil 4.61 : (1,50L60-Ç20Y) numunesine ait SEM görüntüsü.....	139
Şekil 4.62 : (1,50L35-Ç20Y) numunelerine ait SEM görüntüsü.	139
Şekil 4.63 : Kontrol numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.	142
Şekil 4.64 : Çelik lifli (60 mm) numunelere ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.	145
Şekil 4.65 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.	149
Şekil 4.66 : Kontrol numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.	150
Şekil 4.67 : Çelik lifli (60 mm) numunele ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.	153
Şekil 4.68 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.	157
Şekil 4.69 : Kontrol numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.	158
Şekil 4.70 : Çelik lifli (60 mm) numunelere ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.	161
Şekil 4.71 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.	165
Şekil 4.72 : Kontrol numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.....	166
Şekil 4.73 : Çelik lifli (60 mm) numunelere ait $W_{8,2} - D$ değişimi.	170
Şekil 4.74 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.	174
Şekil 4.75 : Kontrol numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.....	175
Şekil 4.76 : Çelik lif (60 mm) katkılı numenelere ait $W_{8,2} - D$ değişimi.	179
Şekil 4.77 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.	183
Şekil 4.78 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı kesit görünüşü.	186
Şekil 4.79 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı kesit görünüşü.....	189
Şekil 4.80 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı kesit görünüşü	191
Şekil 4.81 : Çelik lif (60 mm) katkılı beton numunelerin üstyapı kesit görünüşü.	193
Şekil 4.82 : Kontrol numunelerinin üstyapı kesit görünüşü.....	195
Şekil 4.83 : Numunelerin havaalanı üstyapı kesit görünüşü.	198
Şekil 4.84 : Kontrol numunesinin üstyapı kesit görünüşü	200
Şekil 4.85 : Çelik lif (60 mm) katkılı beton numunelerinin havaalanı üstyapı kesit görünüşü.	203

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

YFC	: Yüksek fırın cürufu
PÇ	: Portland çimentosu
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
FAA	: Federal Aviation Administration
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
ASTM	: American Society for Testing Materials
ACI	: American Concrete Institute
LCN	: Load Classification Number
ACN	: Aircraft Classification Number
PCN	: Pavement Classification Number
R	: FAARFIELD tasarımında eğilme dayanımı.
FAARFIELD	: FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design
S_c	: AASHTO tasarım yönteminde eğilmede çekme dayanımı
CBR	: California Bearing Ratio
LEAF	: Layered elastic analysis
FAAMesh	: Three-dimensional mesh generation for finite element analysis.
FAASR3D	: Finite element processing
CDF	: Cumulative damage factor
CDF	: Capillary suction Deicing salts and Freeze thaw test
PTFE	: Politetrafloroetilen
SEM	: Scanning Electron Microscope
XRD	: X- Ray Diffraction
DYK	: Doygun yüzey kuru
R²	: Korelasyon katsayısı
YOGATT	: Yıllık ortalama günlük ağır taşıt trafiği
W_{8.2}	: 8.2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekerrür sayısı (Proje trafiği)
E_c	: Betonun elastisite modülü
k	: Taban reaksiyon modülü
D	: Rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı
P-501	: Portland çimentolu beton kaplama
P-401	: Stabilize temel tabakası
P-209	: Kırmataş temel tabakası
P-154	: Alttemel tabakası

ÖZET

Doktora Tezi

BETON YOL KAPLAMALARINDA YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE ÇELİK LİF KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Mehmet Mahmut TANYILDIZI

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

243+XVsayfa

2022

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Son yıllarda betonun yüksek dayanım özelliği için betonda kullanılabilecek katkı maddelerinin betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkisinin neler olduğu üzerine birçok araştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda; %0, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranlarında 60 mm uzunluğunda çelik lif ile güçlendirilmiş, YFC oranı %0, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında çimento ile ikame edilmiş numuneler tasarlanmış ve bu tez çalışmasında beton yol kaplamalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. İlâveten, elde edilen sonuçlar analiz edilerek optimum %20 YFC oranı ile 35 mm uzunluğunda çelik lif aynı oranlarında kullanılarak üretilen beton numuneleri üzerinde çalışma yapılmıştır. Hazırlanan bu karışımlara ait işlenebilirlik, çökme, eğilmede çekme, yarmada çekme, donma-çözülme, aşınma direnci, elektriksel özdirenç, iletkenlik ve ısınma, SEM ve XRD analizi testleri yapılmıştır. Test sonuçları esas alınarak AASHTO 1993 ve FAARFIELD beton kaplama tasarım yöntemleri ile farklı taşıma gücüne sahip taban zeminleri ile farklı trafik yükleri altında beton plak (kaplama) kalınlık ve karayolu tasarımı için maliyet hesaplamaları yapılmıştır. Sonuç olarak; YFC kullanılması ile daha işlenebilir beton karakteristiği gözlemlenmiş, çelik lif oranı arttıkça işlenebilirliğin zorlaştığı görülmüştür. Diğer taraftan, 60 mm uzunluğundaki makro çelik lif ilavesi ile numunelerin basınç dayanımında azalma, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımında artış; 35 mm uzunluğundaki makro çelik lif ilavesi ile basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarında artış meydana gelmiştir. Numunelerin donma-çözülme işleminde en fazla kütle kaybı %1.50 çelik lif içeren numunede gözlemlenmiştir. Lifsiz numunelere kıyasla karışımlara çelik lif ilave edilmesi ile numunelerin elektriksel özdirençlerinin azaldığı görülmüştür. Lif katkısız en düşük aşınma miktarının %15 YFC katkılı beton numunesinde gerçekleştiği, YFC ikamesi %15'den fazla olan numunelerde YFC ikamesi arttıkça aşınma miktarlarının da arttığı; çelik lif katkılı betonların aşınma kaybı çelik lif miktarının artışı ile aşınma kaybının azaldığı tespit edilmiştir. Farklı trafik yükleri altında ve farklı taşıma gücüne sahip zeminler üzerine inşa edilecek YFC katkılı beton numunelerin beton kaplama kalınlıklarını ve maliyeti azalttığı; çelik lif katkılı numunelerin ise kaplama kalınlığını azalttığı ancak maliyet etkin olmadığı, betonun çatlak gelişimi ve eğilme dayanımı üzerinde çelik lif katkısının önemli bir etkisinin olması ve beton yolların hizmet ömürleri boyunca çoğunlukla zorlu çevre koşullarına maruz kalmaları sebebiyle uzun vadede maliyet artışının ekonomik olarak olumsuz bir etkisinin olmayacağı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton Yol Kaplaması, Çelik Lif, Yüksek Fırın Cürufu, AASHTO Metodu, FAARFIELD Metodu, Maliyet Analizi.

ABSTRACT

Phd. Thesis

INVESTIGATION OF THE USE OF BLAST FURNACE SLAG AND STEEL FIBER IN CONCRETE PAVEMENTS

Mehmet Mahmut TANYILDIZI

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineer

243+XV sayfa

2022

Supervisor: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

In recent years, many studies have been carried out on the effects of additives that can be used to give high strength to concrete on its physical and mechanical properties. Within this scope, specimens reinforced with 60 mm long steel fibers at the rates of 0%, 0.75%, 1%, 1.25%, 1.25% and 1.50% and using BFS at the rates of 0%, 15%, 20%, 25% and 30% as a substituted for cement were designed and their usability in concrete pavements was investigated of this thesis study. In addition, the results obtained were analyzed and an evaluation was carried out on concrete specimens produced using the optimum 20% BFS ratio and the same proportions of 35 mm long steel fibers. The workability, slump, flexural strength, splitting tensile strength, freeze-thaw, abrasion resistance, electrical resistivity, conductivity and heating, SEM and XRD analysis tests were performed on these prepared specimens. Based on the test results, AASHTO 1993 and FAARFIELD concrete pavement design methods were used to calculate the concrete pavement thickness and cost for highway designs under different traffic loads with base soils of different bearing capacity. As a result, more workable concrete characteristics were observed with the use of BFS and it was seen that workability became more difficult as the steel fiber ratio increased. On the other hand, with the addition of 60 mm long macro steel fiber, compressive strength values of the specimens decreased and splitting tensile and flexural strength values of the specimens increased, while with the addition of 35 mm long macro steel fiber, compressive, splitting tensile and flexural strength values increased. The highest mass loss in the freeze-thaw cycles of the specimens was observed in the specimen containing 1.50% steel fiber. It was seen that the electrical resistivity of the specimens decreased with the addition of steel fibers to the mixtures compared to the specimens without fibers. It was determined that the lowest abrasion amount without fiber additives was observed in the concrete specimen with 15% BFS, the abrasion amounts increased as the BFS substitution increased in the specimens with more than 15% BFS substitution, and the abrasion loss of steel fiber reinforced concretes decreased with the increase in the amount of steel fiber. It is considered that BFS reinforced concrete specimens to be created under different traffic loads and on soils with different bearing strengths were found to reduce concrete pavement thickness and cost, while steel fiber reinforced specimens reduced pavement thickness but were not cost effective, and the increase in cost in the long term would not have a negative economic impact since steel fiber reinforcement has a significant effect on crack development and flexural strength and concrete pavements are mostly exposed to harsh environmental conditions during their service life.

Keywords: Concrete Pavement, Steel Fiber, Blast Furnace Slag, AASHTO Method, FAARFIELD Method, Cost Analysis.

1. GİRİŞ

Son yıllarda ulaşım sektörü; nüfus ile birlikte teknoloji ve ekonominin gelişmesine dayalı olarak hızlı bir şekilde artış eğilimi göstermektedir. Bu artış eğilimi gösteren ulaşım sektörü içerisinde ülkemizde en çok tercih edilen ulaşım türü karayolu taşımacılığıdır. Karayolu taşımacılığının gün geçtikçe artmasından dolayı araç miktarı ve trafik yoğunluğu da artış göstermekte, bu durum ise yol yapısının bozulmasına sebep olmaktadır. Meydana gelen bu bozulmaları önlemek için karayolu ve havaalanı yol yapım çalışmalarında çeşitli trafik yükleri ve çevresel koşullara karşı dayanıklı, uzun ömür süresine sahip ve maliyeti etkin yeni yöntem ve teknikler devamlı geliştirilmektedir. Bu bağlamda, beton teknolojisinde son dönemlerde yaşanan hızlı gelişmeye dayalı olarak, betonun yüksek dayanım özelliği için betonda kullanılabilecek katkı maddelerinin ve betona ikame edilecek farklı elementlerin, betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkisinin neler olduğu araştırma konusu olmuştur. Yapılan araştırma çalışmalarında, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini artırmak amacıyla beton içerisine farklı cins ve miktarlarda katkı maddeleri ilave edilmektedir. Betona ilave edilen bu katkı maddelerinin kullanılmasındaki amaç malzemenin basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı, tokluk vb. diğer dayanım özelliklerinin geliştirilmesine yöneliktir (Tanrıverdi, 2013; THBB, 2003).

Yapılan bu çalışmalar kapsamında, beton yol kaplamalarında katkı maddesi olarak yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül, çelik lif vb. katkıların kullanımı oldukça yaygın bir hale gelmiştir. Çevresel bozulmaya sebep olan atık cürufların, karayolları, havaalanı, otopark, terminal vb. diğer inşaat sektörlerinde puzolan malzeme olarak değerlendirilmesi ve bertaraf edilmesi günümüz şartlarında önemli olmaktadır. Özellikle, beton içerisinde bağlayıcı olarak çimentonun ikamesi olarak YFC'nin maksimum ikame edilebilme yeteneğinin tespit edilmesi ekonomik bakımdan fayda sağlayacaktır. Ayrıca, betonun dayanımı ve diğer mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli kimyasal katkıların yanı sıra farklı şekil ve boyutlarda çelik lifler de kullanılmaktadır. Çelik lif ilavesi ile, sünek davranış gösteren, çatlak oluşumuna karşı dayanımı yüksek olan beton elde edilmektedir. Bu olumlu özelliklerinden dolayı da lif katkılı betonlara talep günden güne artış göstermektedir. Özellikle, beton yol kaplamalarında kullanılan çelik lifler, betonun

çarpmaya, çatlamaya ve eğilmeye karşı direncini önemli derecede artırmaktadır. Beton içerisinde homojen olarak dağılan lifler, betonda çatlak oluşumunun önüne geçmekte ve çatlakların beton içerisinde ilerleme hızını azaltarak betonu daha dayanıklı hale getirmektedir (Uğurlu, 1999; Düzgün, 2001).

Betonun dayanımını artırmak maksadıyla bu atık YFC ve çelik lifler kullanılarak oluşturulan beton yol kaplamalarının görevi, araç dingil yüklerinin etkilerini geniş bir alana iletterek yol tabanında ve kaplamada meydana gelen deformasyonların ortaya çıkmasını önlemektir. Bu sebeple, proje trafiği ömrü boyunca mevcut çevresel ve iklimsel etkiler ile trafik ve yükden dolayı oluşacak deformasyonlara karşı beton kaplama kalınlığının belirlenmesi ve üstyapıda kullanılması planlanan malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Özellikle, havaalanı ve karayolu üstyapı tasarımı için üstyapı kaplama kalınlıklarının hesabında AASHTO (Amerika Devlet Karayolları Görevlileri Birliği) ve FAA (Federal Havacılık İdaresi) vb. diğer kurum ve kuruluşların yaptıkları araştırmalar üstyapı tasarım metotlarının gelişimine kayda değer katkılar sağlamıştır (Kök, 2008; Tunç, 2007).

Havaalanı üstyapı dizayn metotları ampirik ve analitik yöntemler olmak üzere iki esas başlıkta incelenir. Havaalanı üstyapı dizaynında üstyapının kaplama kalınlığının hesaplanmasında kullanılan ampirik yöntemler; deneysel araştırma sonuçlarına bağlı olarak grafikler, tablolar ve abaklar yardımı ile yapılmaktadır. Diğer metot olan analitik yöntemler ise çevresel koşullar, planlanan trafik yükü, yol üstyapısında kullanılacak malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini esas alarak bilgisayar programları aracılığıyla üstyapı tabaka kalınlıklarının hesaplandığı gelişmiş yöntemlerdir (Okur, 2008; Tunç, 2003).

Karayolu üstyapı dizayn metotları ise; analitik, ampirik ve analitik-ampirik metotlar olarak üç başlıkta incelenmektedir. Ampirik yöntemler; gerçekleştirilen deney test sonuçlarına ve deney şartlarına dayalı olan geleneksel dizayn metotlarıdır. Bu metotlar, maliyeti yüksek ve uygulanma süreci uzun zaman alan metotlardır. Analitik yöntemler; çevresel ve iklimsel şartlar, proje trafiği, güvenilirlik seviyesi, taban zemininin yük taşıma kapasitesi, malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri vb. diğer etkiler esas alınarak geliştirilen matematiksel modeller ile abaklar ve bilgisayar programları aracılığıyla üstyapının tabaka kalınlıklarının belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Analitik-ampirik metotlar ise; analitik metotlar ile tespit edilemeyen bazı özelliklerin, ampirik bağıntılarla ve performans gözlemleriyle kalibrasyonunun sağlanması maksadıyla geliştirilmiştir (Okur, 2008).

Ülkemizde, karayolu üstyapı tasarımı için Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından AASHTO 1993 analitik-ampirik dizayn yöntemi ile üstyapı kalınlık hesabı yapılmaktadır. Havaalanı üstyapılarının tasarımı için, Ulaştırma, Habercilik ve Denizcilik Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü Havameydanları Daire Başkanlığı tarafından; LCN (Load Classification Number), ACN (Aircraft Classification Number), PCN (Pavement Classification Number) ve FAA metotları hali hazırda kullanılmakta olan üstyapı tasarım metotlarıdır. (Kök, 2008; Tunç, 2007).

1.1 Tezin Amacı

Günümüzde ülkemiz havaalanı ve karayollarında, uzun vadede ekonomik, geniş bir malzeme potansiyeline sahip, ağır trafik yüklerine karşı dirençli ve aynı zamanda da proje trafiği ömrü uzun olan ve buna rağmen uygulanmasına henüz daha yeni başlanmış beton kaplamalı yol uygulamalarının planlanmaması, bu konuda ön hazırlıkların yapılmaması, uzun vadede eksiklik olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, büyük bir bölümü ekonomik hizmet süresini tamamlamış olan ülkemiz karayolları ve havaalanlarında, üstyapı yenileme çalışmalarında, özellikle yeni yol ve otoyol yapımında beton kaplamalı yol seçeneğine yer verilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Esnek üstyapı ile inşa edilmiş karayollarında, çoğunlukla bakım-onarım ve takviye tabakasına ihtiyaç duyulması ve sürekli artan trafiğin kaplama üzerindeki olumsuz etkisi sonucunda belli bir periyodun sonunda sorunlara sebep olabilecek düzeye gelirken, bu kusurların beton yol kaplamalı yollarda daha az meydana gelebileceği dikkate alınması gereken ilk parametre sayılmaktadır.

Karayollarında esnek kaplamalı olarak inşa edilmiş üstyapının bakım ve onarım giderlerinin beton kaplamalı yollara göre daha yüksek olması sebebiyle, maliyeti daha düşük olan yol yapım seçeneklerine ihtiyaç duyulması, buna alternatif olarak da beton kaplamalı yol yapımına yönelinmesi gereği ortaya çıkmaktadır.

Özellikle kış mevsiminin çok şiddetli geçtiği ve mevsimler arasında büyük sıcaklık farklarının olduğu ülkelerde, esnek üstyapıların zamanla deforme olarak taşıma gücünün ve proje süresinin azaldığı, daha fazla bakım ve onarıma ihtiyaç duyulduğu; buna karşılık olarak beton kaplamalı yolların aynı iklim koşullarından daha az etkilendiği, çok az bir bozulma gösterdiği bu sebeple üstyapı tipi seçiminde bu etkenlere dikkate edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, Türkiye’de karasal iklim koşulları mevcut olup mevsimler arasında büyük sıcaklık

farkları vardır. Bu da beton kaplamalı yol konusunu gündeme getiren kaydadeğer bir parametredir.

Bu tez çalışması kapsamında, farklı miktar ve boyutlarda YFC ve çelik lif kullanılarak üretilcek betonların, beton yol kaplamalarında kullanılabilirliği amaçlanmıştır. Bu amaçla üretilcek betonlar üzerinde taze ve sertleşmiş betona ait deneyler yapılmış, deney sonuçlarına göre üretilen betonların karayolu ve havaalanı beton yol kaplamalarında kullanılabilirliği incelenmiştir. Ayrıca, çelik lif katkılı ve çimento ikameli YFC'nin beton yol kaplamalarında farklı zemin dayanımı ve proje trafiği değerlerinde AASHTO 1993 ve FAARFIELD üstyapı tasarım yöntemi yardımıyla beton plak kaplama kalınlıkları hesaplanmış ve karayolu tasarımı için maliyet analizi yapılmıştır. Bu yönleri ile tamamen özgün olan çalışmanın literatürde konuyla ilgili boşluklara katkı yaparak akademik açıdan bir kazanım sağlayacağı öngörülmüştür.

1.2 Tezin Ana Hatları

Yapılan tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır.

İkinci bölümde karayolu ve havaalanı yol üstyapı tipleri, yol üstyapısında oluşan bozulmalar ve nedenleri, üstyapı tipi seçim metodolojisi, beton yol kaplamalarının avantajları ve dezavantajları, beton yol kaplamaları yapım yöntemleri, lif takviyeli beton kaplamalar, puzolanlar ve beton yol kaplamaları tasarım yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, üretilen beton malzemeleri (agrega, çimento, YFC, karışım suyu, akışkanlaştırıcı, çelik lif) hakkında bilgi verilmiştir. Deneysel araştırmalarda kullanılan düzenekler, cihazlar ve yöntemler anlatılmıştır. Beton karışım oranları belirlenmiş ve üretilen betonların özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan deney metotlarından bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ile ilgili bilgi verilmiş, ayrıca karayolu ve havaalanı beton yol üstyapı kaplama tasarımı yapılarak üstyapı kaplama kalınlıkları hesaplanmış ve karayolu tasarımı için maliyet analizi yapılmış ve sonuçlar literatürde bulunan araştırmalar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde, tez çalışması ile ilgili olarak gerçekleştirilen bütün deneyler ve beton yol kaplamaları tasarım yöntemi sonuçları özetlenerek verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

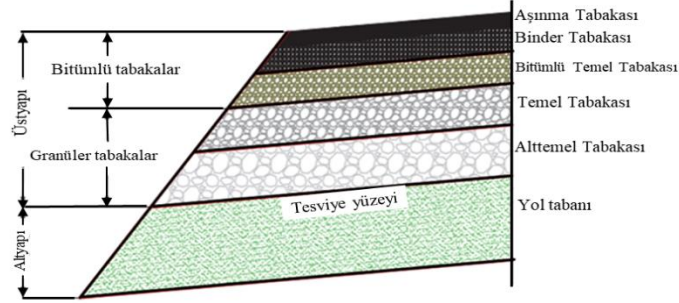
2.1 Karayolu Üstyapısı

Karayolları; belirli standartlara göre projelendirilmiş yol güzergâhı boyunca doğal zeminin kazı ve dolgu yapılarak istenilen kota getirilmesi ve üzerinde motorlu araçların güvenlik, konfor ve hız koşullarında hareket edebilmesini sağlayan yapıların tümü olarak tanımlanabilir (Okur, 2008; Üstümkol, 2006). Karayolu üstyapısı, araç dingil yüklerinin üstyapıya aktardığı trafik yüklerini emniyetli bir şekilde taşımak ve oluşan bu trafik yüklerini taban zemininin efektif reaksiyon modülü değerini geçmeyecek şekilde üstyapının oturduğu taban zeminine iletmek üzere inşa edilir. Üstyapı; temel, alttemel ve kaplama tabakalarından oluşur. Üstyapı, kaplama tabakasında meydana gelen trafik yüklerini temel ve alttemel tabakalarına iletmek, düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlayarak kayma direncini en aza indirmek, trafiğin aşındırıcı etkilerine engel olmak, aktif durumda olan trafiğin dinamik ve statik yüklerini taşımak için inşa edilen tabakalı yol yapısıdır. Yol üstyapıları, çevresel ve iklimsel koşullar ile proje trafik yüklerinin etkisi altında oluşan davranış ve inşa edildikleri malzemeye göre esnek, rijit ve kompozit üstyapılar olmak üzere üç gruba ayrılırlar (Er, 2011).

2.1.1 Esnek üstyapı

Türkiye’de karayolu inşasında en çok tercih edilen üstyapı türü esnek kaplamalı üstyapıdır. Esnek üstyapı; stabilitesi, adezyonu, tane sürtünmesi ve kohezyonu kullanılan agregaların özelliklerine bağlı olan ve tesviye sathıyla çok iyi bir temas sağlayan bir üstyapı şeklindedir. Esnek üstyapılar kaplama, temel ve alttemel tabakası şeklinde üç tabaka halinde inşa edilir (Umar ve Ağar, 1991). Temel tabakası; kaplama ile alttemel arasına bulunan, trafiğin doğrudan temas etmediği, üstyapının don etkilerinden korunması amacıyla, kum, çakıl ve kırmataş veya bitüm karışımları gibi bağlayıcı malzemelerden oluşmaktadır. Alttemel tabakası; taban zemini üzerine inşa edilen, trafik yükünü bu taban zeminine ileten, dren kabiliyeti yüksek, kırmataş, çakıl ve kum gibi granüler malzemeden inşa edilirler. Ayrıca, üzerine etki edecek yüklere karşı deforme olmadan direnç gösterebilen, suların

altyapıya sızmasını engelleyen ya da minimum seviyeye düşüren, pürüzsüz ve konforlu bir sürüş için yuvarlanma yüzeyi sağlayan, temel tabakasının üstüne inşa edilen yapılar ise kaplama tabakası olarak tanımlanmaktadır. Esnek bir üstyapının enkesit görünümü Şekil 2.1’de verilmiştir (Fındık, 2005; Ilıcalı, Tayfur, Özen ve Sönmez, 2001).

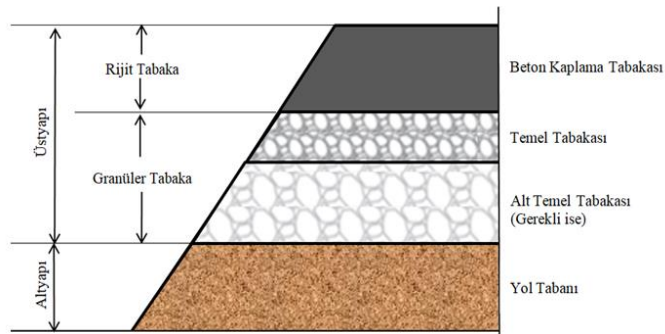


Şekil 2.1 : Tipik esnek üstyapı enkesiti.

2.1.2 Rijit üstyapı

Rijit üstyapı; bağlayıcı olarak Portland çimentosunun kullanıldığı, bir temel ve alttemel (gerekli ise) tabakası üzerine inşa edilen, kaplamada oluşan trafik yüklerini taban zeminine dağıtan bir beton plaktan oluşmaktadır. Özellikle, trafik hacminin yüksek olduğu ve ağır taşıt trafiği fazla olan karayollarında inşa edilen, standartları yüksek bir karayolu üstyapısıdır (Ağar, Süttaş ve Öztaş, 1998; Tunç, 2007).

Beton kaplamalar (rijit üstyapı), taşıma gücü yeterli dayanıma sahip taban zeminleri üzerine granüler temel ve alttemel (gerekli ise) tabakasının inşası ile derzli donatısız, derzli donatılı veya sürekli donatılı beton plaklardan oluşmaktadır. Alttemel tabakası; hacim değişmesi, don, büzülme, şişme ve pompaj gibi olumsuz etkilerden beton kaplamayı korumak amacıyla yol tabanı ile temel tabakası arasına seçme malzeme ile yapılan daneli bir tabakadır. Tipik bir rijit üstyapı enkesiti Şekil 2.2’de verilmiştir (Ağar ve diğ, 1998).



Şekil 2.2 : Tipik rijit üstyapı enkesiti.

2.1.3 Kompozit üstyapı

Deforme olmuş beton plak kaplamalar üzerine bitümlü sıcak karışım takviyesiyle veya zaman içerisinde deforme olmuş esnek kaplamaların üzerine beton kaplamalı plak inşa edilerek oluşturulan dayanıklı kompozit bir üstyapı tipidir. Kompozit üstyapı; bitümün su yalıtım özelliği sayesinde beton kaplamanın temel tabakasına suyun sızması önlenmekte, betonun yüksek elastisite modülüne sahip olmasından dolayı ise esnek üstyapılı kaplamanın alt kısmında taşıma gücü çok iyi bir temel tabakası oluşumuna imkân vermektedir (Ağar ve diğ., 1998; Tunç 2004).

2.2 Havaalanı Üstyapısı

Havaalanı üstyapısı, karayolu üstyapısında olduğu gibi yol tabanı üzerine ve üst tabakalara doğru taşıma gücü sağlam kaliteli malzemeler kullanılarak tasarlanır ve inşa edilir. Üstyapı; yol tabanından üst tabakalara doğru alttemel, temel ve kaplama tabakalarından meydana gelir. Havaalanı üstyapısı, günümüz hava araçlarının yüklerini proje trafiği boyunca karşılayacak dayanımda planlanır. Ayrıca, üstyapıyı oluşturan tabakaların kalınlığı, planlanan hizmet ömür süresi boyunca kaplamaya uygulanan yüklerin etkisi ile deforme olmayacak ve ekonomik olacak şekilde yeterli kalınlıkta tasarlanır (Okur, 2008; Tunç, 2003).

Karayolu üstyapı tabakalarında olduğu gibi havaalanı üstyapı tabakaları da inşa yöntemlerine ve seçilen malzemenin özelliğine göre; esnek, rijit ve kompozit üstyapı olmak üzere üç şekilde sınıflandırılmaktadır. Rijit üstyapı, yüksek eğilme dayanımına sahip ve portland çimentosundan inşa edilmiş beton veya betonarme plaklardan meydana gelen üstyapı türüdür. Üstyapıyı oluşturan tabakalar, beton veya betonarme plaktan inşa edilen kaplama tabakası, seçme malzemedan inşa edilen temel tabakası ve granüler malzemedan oluşan alttemel tabakasıdır. Ayrıca, üstyapının alt tarafında taşıma gücü yeterli dayanımda olan yol taban zemini bulunur. Temel ve alttemel tabakaları suyun drene edilmesini de sağlamaktadır. Esnek üstyapı, trafik yüklerinin etkisi ile elastik davranış gösterebilen, küçük deformasyonlara karşı yeterli dayanıma sahip, üzerine gelen yükleri kaplama, temel ve alttemel tabakaları yardımıyla yol taban zeminine ileten üstyapı tipidir. Kompozit üstyapı ise, deforme olmuş beton kaplamanın üzerine bitümlü sıcak karışım veya deforme olmuş esnek kaplamanın üzerine beton plak inşasıyla oluşan üstyapı türüdür (Tunç, 2004).

2.3 Yol Üstyapında Oluşan Bozulmalar ve Nedenleri

Yollarda iklim ve çevre koşulları ile trafik yükleri sebebiyle zaman içerisinde bozulma meydana gelmektedir. Bu bozulmalar, ilk başta çok yavaş şekilde olmakta ve yolun servis kapasitesinin aynı seviyede kalması için sadece periyodik bakıma ihtiyaç duyulmaktadır. Zaman geçtikçe yolda bakım ve onarım yapılmaz ise, bozulmalar artış göstermekte ve maliyeti daha yüksek bakım ve iyileştirme seçeneklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple bozulmaya henüz yeni başlamış yollarda, zaman çok geçmeden planlanmış bakım programları, en az işletme maliyetlerini doğurur (Doğan, 2006; TCK, 2019).

Üstyapıda meydana gelen bozulma; bir üstyapının çevresel etki faktörleri ve trafik yüklerinin sonucunda tasarım süresi sonunda ya da anılan sürenin sonuna bile ulaşmadan, azalması beklenen hizmet ömrünün bir parametresidir. Üstyapıda oluşan bozulmalarda, ilk olarak bozulmanın sebeplerinin araştırılması önem arz etmektedir. Bu kapsamda yapılması gereken, karayolu ağının mevcut durumu ile oluşan yol bozulmalarının niteliğinin araştırılmasıdır. Bozulmaya sebep olan etkiler tespit edilip, akabinde uygulanacak bakım ve onarım çalışmaları sayesinde, sonradan tekrar oluşabilecek olan bozulmalar da önlenmiş olacaktır (Doğan, 2006; Tunç, 2007).

Ülkemiz koşullarında, dizayn yönteminin ve kullanılacak malzemenin yanlış seçimi, planlanan trafik yükündeki hızlı artış, çevresel ve iklimsel koşulların etkisi, yol yapımı esnasındaki projeye uygun yapılmayan imalatlar, beklenmedik jeolojik faktörler, projelendirme aşamasında öngörülen gabarilerin gerçekte çok daha fazlasına tabi yollar, bakım ve onarım faaliyetlerinin istenildiği şekilde sık ve iyi yapılmaması ve diğer kurum ve kuruluşlar ile koordinasyon problemleri başlıca bozulma sebepleridir. Bir yolun projede planlanan tasarım hizmet ömrünü artırmanın veya ekonomik hizmet ömrü içerisinde ondan verimli bir şekilde yararlanmanın en kayda değer çözümü, yeterli seviyede bakım yaparken, yol üstyapısının dayanım ömrünü gerekli onarımlar ile sürdürülebilir kılmaktır. Yol boyunca bozulmaya sebep olan etkenler sürekli olarak değişkenlik göstermektedir. Genellikle, yol üstyapısında oluşan bu bozulmalar, yapısal ve fonksiyonel bozulma olarak iki şekilde açıklanır. Fonksiyonel bozulma sürecinde, üstyapı için hedeflenen faktörler planlanan süreç boyunca görevini yapamaz hale gelir. Yapısal bozulma ise, üstyapıyı oluşturan bileşenlerin birçoğunun kırılmasını, göçmesini veya deforme olmasını ifade eder (Doğan, 2006).

2.3.1 Karayolu ve havaalanı beton yol üstyapılarında oluşan kusurlar

Beton yol kaplamalarında meydana gelen kusurlar genel olarak; çatlaklar, yüzeysel kusurlar (Talaşlanma, soyulma, yassı harç oluşumu, kabarma), çukurlar ve diğer kusurlardan (Burulma, oturma ve köşe kırıkları, derz bozulmaları) oluşmaktadır (TCK, 2019; Tunç, 2007).

Bu kusurların meydana gelmesinde trafik yükleri ve çevresel faktörlerin yanında tasarım ve yapım hatalarının da etkisi büyüktür. Beton kaplamalarda en fazla görülen kusur, kaplama çatlaklarıdır. Kaplama çatlakları; kuruma büzülmesi, ısısal büzülme, burulma, zemin oturmaları ve aşırı yük gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Isı ve rutubetten dolayı büzülme çalşıan beton plak, hacim değişimi sırasında bu değişime engel olan alttemel, zemin sürtünme direnci, beton ağırlığı ve aşırı plak boyutundan dolayı çatlamlara maruz kalabilmektedir. Büzülme sırasında meydana gelen çekme gerilmelerinin plak çekme mukavemetini aşması sonucu çatlaklar başlamaktadır. Büzülme çatlaklarını önlemenin en önemli yolu su/çimento oranını mümkün mertebe az tutmaktır. Yetersiz kür, düşük dozaj, büzülme derzinde aşırı donatı kullanımı vb. etkilerde büzülme çatlaklarını tetiklemektedir (Tunç, 2007).

Erken oluşan çatlaklar beton kaplamalarda betonun sertleşmesinden hemen önce oluşur. Beton dökümü sırasında rüzgâr, düşük rutubet, yüksek ısı gibi etkenlerden dolayı bu tip çatlaklar oluşmaktadır. Uygun kür yöntemleriyle bu tip çatlaklar önemli ölçüde azaltılmaktadır. Büzülmeyle bağlı olmayan çatlaklar; alttemel yüzey bozuklukları, beton plak kenarlarındaki yetersiz destek, zemin şişmeleri, don kabarmaları, darbe yükleri, alkali-agrega reaksiyonları, erken ve aşırı trafik yükü, yetersiz kalınlık ve zayıf mukavemet gibi etkenlerden dolayı meydana gelmektedir. Beton kaplamalarda meydana gelen yüzeysel aşınmalar, beton mukavemetinin düşük olduğu durumlarda kendini göstermektedir. Mukavemetin düşük olmasının ana nedenleri; beton içine aşırı hava katkısı katılması, yetersiz kür ve beton yüzeyindeki terlemedir. Terleme, su ve çimento şerbetinin yüzeye çıkmasıdır. Böylece yüzeydeki su/çimento oranı artarak beton mukavemeti azalmaktadır. Terleme olayı; betonun aşırı vibrasyonu, yüksek su/çimento oranı gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır. Beton plak yüzeyi düşük mukavemetli olursa, yüzeyde talaşlanma (tozlanma) meydana gelmektedir. Trafiğin aşırı etkisiyle zayıf mukavemetli yüzeylerde tozlanma olayı hızlanmaktadır. Kötü işçilik, yetersiz dozaj, agrega kirliliği, yetersiz kür, plak yüzeyinin donması vb. nedenler yüzeyde talaşlanma miktarını artırmaktadır. Rijit kaplama yüzeyindeki soyulmalar, yüzeydeki çimento hamurunun sökülmesi sonucu oluşmaktadır.

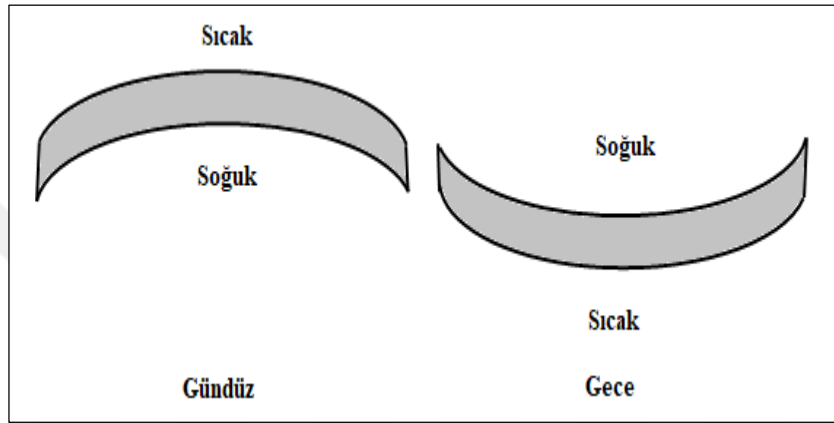
Su/Çimento oranı 0.50'den fazla olan düşük mukavemetli betonlar, sık sık donma çözölmelere maruz kalan betonlar, yetersiz hava katkısı olan betonlar, aşırı vibrasyon yapılmış betonlar ve yetersiz kür görmüş betonlarda soyulma olayı daha sık görölmektedir. Rijit plak yüzeyindeki beton harcının yassı plakalar halinde olması durumunda, yüzeyde trafik yükleri altında soyulma ve kopmalardan dolayı küçük çukurlar oluşmaktadır. Daha çok yassı taneli agrega karışımlarında görölmektedir. Aşırı sıcak ve rüzgârlı havalarda bu tip oluşumlar hızlanmaktadır. Yassı harçlar donma sırasında agregalardan daha hızlı soyulmaktadır. Plastik beton bünyesindeki hava veya suyun yükselmesiyle plak yüzeyinde kabarcık kusurları oluşabilmektedir. Uygun çimento dozajı, aşırı vibrasyondan kaçınılması ve betonda su kaybının önlenmesi gibi tedbirler kabarcıkların oluşumunu önlemektedir. Beton kaplamada görölen çukurlar; beton içsel basıncının artması, fiziksel ve kimyasal etkiler nedeniyle oluşmaktadır. Alkali-agrega reaksiyonları, donma çözölme gibi etkenler betonda içsel basıncı artırmaktadır. Çukurların büyümesi, betonun mukavemetine ve trafik yüklerine bağılı olarak değışiklik gösterir. Erken tamir edilmesiyle büyüme durdurulabilir. Düşük su/çimento oranı, ıslak kür gibi tedbirler beton mukavemetini artırarak çukur oluşumunu önlemektedir. Rijit kaplamalarda oluşan burulmalar, beton plağın alt ve üst kısımlarındaki ısı ve rutubet farklılığından dolayı, kaplama kenar ve köşelerinin aşağı ve ya yukarı doğru kıvrılmasıdır. Rijit plağın üst kısmı alt kısmından daha soğuksa kaplama kenarları yukarı doğru, sıcaksa aşağıya doğru kıvrılma meyli gösterir. Plaklarda donatı kullanılması bu kıvrılmaları önlemektedir. Kuvars, bazalt, kalker ve benzeri düşük büzölme özelliğı gösteren agregalar kullanılması, akışkanlaştırıcılık özelliğı yüksek katkıların kullanımı gibi tedbirler beton plaklardaki burulmaları azaltmaktadır. Rijit plaklarda oturma tip kusurlar betonun yapısal özelliğinden değıl zeminsel sebeplerden kaynaklanmaktadır. Özellikle havaalanı beton kaplamalarında en kritik bölgeler köşe noktalarıdır. Kırılma ve çatlaklar bu köşelerde görölmektedir. Bu sebeple köşe bölgelere donatı katılması ya da bu kısımlarda kesit kalınlık artırımı kırılma ve çatlakları azaltmaktadır. Rijit plak derz bozulmaları nedeniyle meydana gelen çatlaklar, bağı demirlerinin derzlere dik olarak bırakılmamasından kaynaklanmaktadır. Derz boşluklarının uygun dolgu malzemesiyle kapatılması derz bozulmalarını azaltmaktadır (Umar ve diğı, 1991; Tunç, 2007).

2.3.2 Karayolu ve havaalanı beton yol üstyapılarında oluşan gerilmeler

Beton yol kaplamaları geniş ve ince beton plaklar oluşturmaktadır. Trafik ve çevre etkileriyle oluşan gerilmeler bu plaklar tarafından karşılanır. Taşıt yükleri, burulma, büzölme, genleşme, don kabarması, oturma, beton plak ve alttemel arasında kalan yüzeydeki

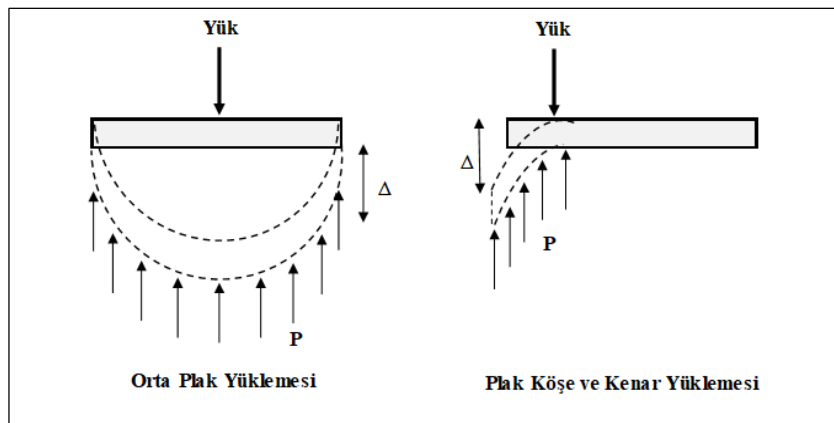
sürtünme, beton plaklar arası düşey sürtünme ve yük aktarımı gibi nedenlerden dolayı beton plaklar değişik şiddetlerde gerilmelere maruz kalmaktadır (Ağar ve diğ, 1998; Tunç, 2007).

Teker yüklerinin etkisiyle rijit plaklarda basınç ve çekme gerilmeleri aynı anda meydana gelmektedir. Mevsim farklarından kaynaklı olarak ısı değişiklikleri sebebiyle rijit kaplamada genleşme veya büzölmeler meydana gelir. Bu nedenle rijit kaplamaların inşasında genleşme derzleri yapılır. Rijit kaplamalar, ısının etkisiyle burulma şekil değişikliğine maruz kalırlar. Kaplamanın alt ve üst yüzeyindeki farklı ısılarından dolayı, plak kenarları aşağı veya yukarı doğru burulma eğilimi gösterir (Şekil 2.3) (Tunç, 2004).



Şekil 2.3 : Isı farklarından dolayı beton yol kaplamalarında oluşan gerilme durumu.

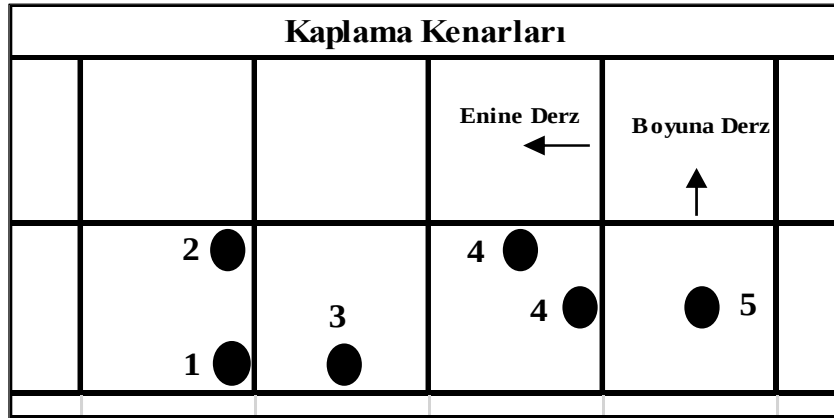
Beton kaplama kalınlığının bu burulmalara karşı koyması sonucu, plak içerisinde burulma gerilmeleri meydana gelir. Rijit kaplamanın kenar ve köşelerinde oluşan bu burulmalardan dolayı, beton plak ile alttemel arasında temas eksikliği meydana gelir. Bu durum, teker yükü etkisi altında eğilme gerilmelerinde artışa sebep olur. Trafik yükünün etkisiyle beton yol kaplamasında meydana gelen defleksiyon ve zemin reaksiyon basıncı Şekil 2.4'te verilmiştir (TCK, 2019; Tunç, 2007).



Şekil 2.4 : Beton yol kaplamasında defleksiyon oluşumu.

Rijit üstapılarda görülen en kritik gerilmeler, artan ısı etkisi ile birlikte beton plağın yukarı doğru kıvrılma olduğu durumda beton plağın serbest köşesinde; aşağı doğru kıvrılma meydana geldiği zamanlarda ise beton plağın orta yüklemesinde oluşmakta ve artan trafik yükü etkisine paralel olarak değişim göstermektedir. Bu nedenle beton plaktaki çatlaklar özellikle köşe ve merkezde meydana gelmektedir. Beton plağın sert kaya zeminler üzerinde yapılması durumunda beton plak burulma sırasında esneklik davranışı gösteremediğinden burulma gerilmeleri ve dolayısıyla burulma çatlakları artmaktadır. Bu nedenle beton plaklar granüler bir alttemel üzerine inşa edilmektedir. Son yıllarda beton kalitesinin artmasıyla birlikte burulma problemleri azaltıldığından alttemel tabakaları grobeton olarak da yapılabilmektedir. Bu uygulama havaalanı rijit kaplamalarında yaygın bir şekilde kullanıma başlanmıştır. Beton kaplamalı yollarda meydana gelen gerilmelere; teker yükü ve yeri (köşe, kenar, orta), taban zemin reaksiyonu, beton plakta oluşan burulmalar, lastik basıncı ve tekerlek arası mesafe gibi etmenler etki etmektedir (Ağar ve diğ, 1999; Tunç, 2007).

Beton kaplamalı plak üzerine etki eden bir teker yükü, beton plağın değişik bölgelerinde farklı eğilme gerilmelerine neden olmaktadır. En kritik gerilme, beton kaplamalı plağın köşesine yükleme yapılması durumunda, en düşük gerilme ise beton plağın orta noktasına yükleme yapılması durumunda oluşmaktadır. Şekil 2.5'te beton plağın değişik kısımlarına etki eden teker yükleri verilmiştir (Tunç, 2007).



Şekil 2.5 : Beton yol kaplamasında farklı gerilme oluşturan teker yükleri.

Şekil 2.5'te bir numaralı bölgedeki teker yükü beton plakta maksimum eğilme-çekme gerilmesi oluşturmaktadır. Aynı teker yükünün etkisine sahip iki, üç, dört ve beş numaralı noktalarda sırasıyla gittikçe azalan bir eğilme-çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Teker yükünün etkisi ile beton plak üzerinde dış bükey bir deformasyon oluşmaktadır. Deformasyon miktarı; teker yükünün plak içerisinde bulunduğu yer, artan gerilmenin şiddeti

ve temas alanı gibi faktörlere bağlıdır. Beton plağın deformasyona karşı direnci ise zeminin ve beton plağın eğilme rijitliği ile değişim göstermektedir (Tanyıldızı, 2010; Tunç, 2007).

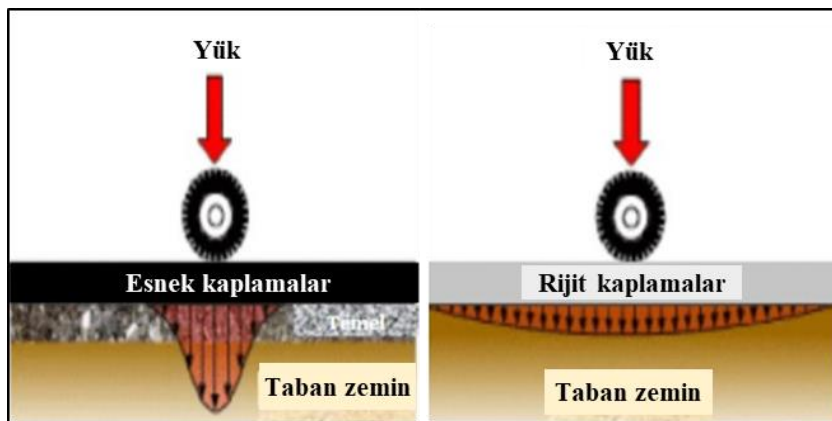
2.4 Üstyapı Tipi Seçim Metodolojisi

Karayolları üstyapı tabakalarının inşasının maliyetinin çok yüksek olmasından dolayı, karayolu yapımı için tahsis edilen bütçelerinin en etkin bir biçimde kullanımı ve mevcut en iyi dizayn metodunun uygulanması gerekmektedir. Yeni yol yapımı ya da takviye tabakası yapılacak üstyapı kaplamalarının dizaynındaki araştırma ve gelişmeler, bu yapılardaki bakım maliyetlerini azaltmada kayda değer olanaklar sunmuştur. Karayolu üstyapı tipi seçimi, farklı ve çok sayıda parametrelere dayandırılması gereken geniş kapsamlı bir konu niteliği taşımaktadır. Seçim aşamasında, üstyapı türleri teknik ve ekonomik olarak karşılaştırılmalı ve ülkenin bulunduğu koşullar da dikkate alınarak, karara varılmalıdır (Ağar ve Umar, 1991; Tanyıldızı 2010).

2.4.1 Karayolu üstyapı tipi seçiminde teknik ölçütler

2.4.1.1 Dıştan gelen yüklerin taban zeminine iletilmesi

Esnek ve beton kaplamalı üstyapılar, kaplamaya etki eden trafik yükünü yol taban zeminine iletme bakımından farklılık gösterirler. Rijit ve esnek üstyapıların, üzerindeki yükü altta bulundurduğu katmanlara iletirken gösterdiği davranış Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Arslan, 2014).



Şekil 2.6 : Esnek ve rijit yol üstyapılarında yük dağılımı.

Rijit kaplamalar üzerindeki yükü üniform bir şekilde dağıtıp alt katmanlara iletirken; esnek kaplamada ise yük tek bir noktadan alt katmanlara iletilmektedir.

Karayolu esnek üstyapısını oluşturan alttemel, temel ve kaplama tabakaları, trafik yüklerini yol taban zeminine iletirken tekerlek yüklerinin etkisine bağılı olarak deforme olmakta ve her bir tabaka kendi üzerine gelen teker yükünü bir altta bulunan tabakaya yayarak iletmektedir. Bunun sonucunda yol taban zeminine aktarılan yük, üstyapının en alt noktasına kadar yayılım göstermektedir. Esnek üstyapılarda yük etkisi ile meydana gelen gerilmeler, yolun en üstünde bulunan tabakadan alt tabakalara doğru inildikçe azalma göstermektedir. Bu sebeple üstyapıda kullanılacak malzemenin kalitesi tabakalara göre seçilmektedir. Rijit kaplamalı üstyapılar ise, yol taban zemini üzerine inşa edilen beton plaktan oluşmaktadır. Şişme, büzülme, pompaj ve don olaylarının olumsuz etkilerini en aza indirmek için yol taban zemini ile beton kaplama arasına temel tabakası ve alttemel (gerekli ise) inşa edilmektedir. Beton kaplamalı plağın elastisite modülü yol taban zemininin elastisite modülünden çok daha büyüktür. Bu sebeple, beton plak yol taban zeminine oturan bir kiriş gibi çalışmakta ve trafik yüklerini esnek üstyapıya kıyasla daha geniş bir alana iletterek yol taban zeminine aktarmaktadır (Arslan, 2014; TCK, 2019; AASHTO, 1993).

2.4.1.2 Trafik

Yıllık proje trafik artış oranı ile trafik hacmi yüksek, ayrıca trafik içindeki ağır taşıt miktarı fazla olan yollar için beton kaplamalı üstyapılar tercih edilmektedir. Çelik lif katkılı beton kaplamalı yollar, normal geleneksel beton kaplamalı yollara kıyasla maliyeti daha yüksek olmakla birlikte, son dönemlerde Avrupa ülkelerinde ağır araç sayısının fazla olduğu trafik yoğunluğu fazla olan yolların kaplanması ve onarımında kullanılmaktadır. Rijit üstyapılı yollar, gelişmişlik düzeyi ne olursa olsun bütün bölgelerde inşa edilebilir bir teknolojiye sahiptir. Trafik artış oranlarının az olması durumunda ise, kademeli inşaata olanak sağlayan esnek üstyapı ile gelişen trafiğe göre planlama ve tasarım yapılması mümkün olabilmektedir (Ağar ve Umar, 1991).

2.4.1.3 İklim

İklimsel koşullar üstyapıda gerilme değişimlerine, defleksiyonlara ve deformasyon oluşumuna sebep olan sıcaklık ve nem değişimlerini içermektedir. Sıcaklık ve nem değişimleri; beton plakta çatlamalara, kıvrılma şekil değişimine ve eğilme gerilmelerine sebep olabilmektedir. Özellikle karasal iklimin hakim sürdüğü bölgelerde yağış miktarının ve gece gündüz arasındaki sıcaklık farkının fazla olması, donma-çözülme tekrar sayısını arttırmaktadır. Ayrıca, buzlanmayı önlemek maksadıyla tuzların kullanılması, tuzların kar ile eriyik bir hal alarak (NaCl ve CaCl) kaplamanın içine girmesi, yol üstyapılarında

meydana gelebilecek deformasyonların artış göstermesine sebep olmaktadır. Yaz mevsimlerinde ise gündüz üstyapı kaplaması daha yüksek sıcaklıkların etkisine maruz kalmaktadır (Ecevit, 2007).

Mevsimler arasında sıcaklık farklılıklarının fazla olduğu karasal bölgelerde, asfalt betonunun viskoelastik davranış gösteren bir malzeme olması sebebiyle, yaz aylarında tekerlek izi meydana gelmesine direnç gösteren, kış aylarında ise çatlak oluşumuna engel olan bir bitümlü karışımın formüle edilmesi güç olmaktadır. Bu bölgelerde beton kaplamalı üstyapıların projelendirilmesi daha uygun olmaktadır. Ancak bu gibi durumlar karşısında, beton plaklar arasındaki derzler kış aylarında daha çok açılacaktır. Bu durum ise pompaj olayına neden olacaktır. Rijit plakta derz boşluklarını kaliteli bir malzeme ile doldurmak, kayma demiri kullanmak ve rijit plak ile yol taban zemini arasına seçme granüler malzemeden “kaplama altı” tabakası yapmak suretiyle pompaj olayı sakıncası giderilebilmektedir (Ecevit, 2007; Tunç, 2007).

2.4.1.4 Konfor ve güvenlik

Hem rijit hem de esnek kaplama türü, ilk yapımından sonra güvenli ve konfor seviyesi yüksek bir seyir zevki sağlamaktadır. Beton kaplamalı yollar açık renkleri sebebiyle gece şartlarında daha kolay görünmekte, asfalt betonlu yollarda ise siyah renk nedeniyle durum tam tersi olmaktadır (Ağar ve Umar, 1991).

2.4.1.5 Malzeme yapısı

Esnek kaplamalı yollarda bağlayıcı malzeme olan bitüm, termoplastik bir malzeme olup sıcaklık değişimine göre gevrek elastik, elasto-plastik, viskoelastik ve viskoz olmak üzere dört farklı reolojik durumda bulunmaktadır. Bitümün sahip olduğu bu farklı özellikler asfalt betonunun yapısal özelliklerini de yansıtmaktadır. Bu sebeple, asfalt betonunun plentte karıştırılarak hazırlanması, yola uygulanması ve yolda sıkıştırılması esnasında şartnamede belirtilen sıcaklık değerlerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Asfalt betonunun gerilme-deformasyon bağlantısı, sıcaklığa ve yükleme hızına bağlı olduğundan, çimento bağlayıcılı beton gibi sabit bir Poisson oranı ve elastisite modülü bulunmamaktadır. Üstyapıların projelendirme metotları çoğunlukla elastik varsayımlara dayandığından, esnek kaplamalı üstyapıların projelendirilmesi, rijit kaplamalı üstyapıya göre daha komplekstir. Bitümlü bağlayıcıların yapısı, kaplamanın inşa edilmesinden birkaç yıl sonra, bağlayıcının içinde bulunan uçucu özelliğe sahip bileşenlerin ortamdan uzaklaşması ve bunun neticesinde bağlayıcının okside olması ile bozulmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların “yaşlanması” adlı bu

olay, bağlayıcının sertleşmesi ve agregada oluşan adezyonun azalması şeklinde kendini göstermektedir (Ağar ve Umar, 1991; Tunç, 2007).

Beton kaplamalı üstyapılarda ise, mevsimsel farklılıklar, çevresel etkenler ve artan trafik yüklerinden dolayı oluşan gerilmeler altında beton kaplamada çatlak oluşumu meydana gelmektedir. Bu çatlakları engellemek ve belirli yerlerde oluşmasını sağlamak amacıyla derzler yapılmalı ve beton plağın yekpare bir çalışma davranışı sergilemesinin engellenmesi gerekmektedir. Ani oluşan sıcaklık farkları beton kaplamalı plağın kamburlaşmasına ve eğilme gerilmelerinin artmasına neden olmaktadır. (Ağar ve Umar, 1991; Ecevit, 2007; Tunç, 2004).

2.4.1.6 Onarım ve bakım kolaylığı

Beton kaplamalı yolun inşası tamamlandıktan sonra trafiğe açılabilmesi için, betonun istenilen dayanım özelliğini sağlaması ve kür süresinin tamamlanmasını beklemek gerekmektedir. Bu durum ise, yolun inşası esnasında yolun bir kısmının veya tamamının trafiğe kapatılmasını gerektirmektedir. Yolun tamamının trafiğe kapatılması durumunda, servis yolu inşa edilmekte ve bu da ilave bir maliyet artışına sebep olmaktadır. Buna karşılık esnek kaplamalı yollarda ise, bitümlü bağlayıcının kurumasını sağlayacak bir zaman geçtikten sonra yolu trafiğe açmak mümkün olabilmektedir. Ancak, esnek üstyapılı kaplamalar, çimento bağlayıcılı beton kaplamalı yollara kıyasla daha kolay bozulmakta, dolayısıyla da çok daha sık bakım ve onarım gerektirmektedir (Ağar ve Umar, 1991; Ecevit, 2007; Tanyıldızı 2010).

Esnek ve rijit üstyapı tipi seçimini etkileyen teknik parametreler Çizelge 2.1’de verilmiştir. Çizelge 2.1’de gösterilen (+ veya ++) işareti elverişli olma durumunu, (-) işareti ise uygun olmadığını göstermektedir (Ecevit, 2007).

Çizelge 2.1 : Üstyapı tipi seçiminde teknik parametrelerin etkisi.

Teknik Parametreler		Esnek Üstyapı	Rijit Üstyapı
Taban zemini taşıma gücü değeri (CBR)	20>CBR>6	+	+
	CBR<6	-	+
Trafik	Yıllık artış oranı (Yüksek)	-	++
	Yıllık artış oranı (Düşük)	+	-
	Ağır taşıt oranı (Yüksek)	-	++
Yüksek sıcaklık farkı		-	++
Bakım ve onarımdan kaynaklanan gecikme		-	+

2.4.2 Karayolu üstyapı tipi seçiminde ekonomik ölçütler

Üstyapı tipi seçimi aşamasında ekonomik karşılaştırma yapılabilmesi için, farklı zaman dilimlerinde gerçekleştirilen harcamaların aynı yıla dönüştürülmesi ve güncelleme işlemi yapılmalıdır. Güncelleme yapılabilmesi maksadıyla, iskonto ve faiz hesaplarından istifade edilmelidir. Üstyapı tipi seçiminde karar verilirken dikkate alınacak ekonomik ölçütler dört ana başlık altında verilmiştir (Ecevit, 2007).

2.4.2.1 Toplam ekonomik maliyet

Üstyapı tipi seçim aşamalarında öne çıkan en önemli parametrelerden biri belirlenen proje trafiği ömrü için hesaplanan toplam ekonomik maliyet değeridir. Bir karayolu inşasının reel ekonomik maliyet değeri, ilk yapım sırasında oluşan maliyeti, proje ömrü devam ederken yapılan bakım maliyeti ve bakım faaliyetleri nedeniyle oluşacak gecikme maliyetlerinin toplamıdır (Ağar ve Umar, 1991; Ecevit, 2007).

2.4.2.2 İlk yapım maliyeti

Bir üstyapının ilk yapım maliyeti belirlenirken; kullanılması planlanan malzemelerin cinsi, miktarı ile malzemelerin nakliye maliyeti, işçilik ücretleri, kullanılacak inşaat makineleri ile ilgili giderler ve sabit giderlerin hesaplanması gerekmektedir. Beton kaplamalı yolların ilk yapım maliyeti çoğunlukla esnek üst yapıli yollardan daha yüksektir. Ancak, ülkemizin bütün bölgelerinde uluslararası standartlara uygun çimento fabrikası ve hazır beton üretim tesisi bulunmakta, bu bakımdan beton kaplamalı yollar asfalt yollara göre, malzeme açısından daha avantajlı olmaktadır (Ağar ve Umar, 1991; Tanyıldızı, 2010).

2.4.2.3 Bakım-onarım maliyeti

Genel olarak esnek üstyapılar 20 yıllık bir proje ömrü kapsamında projelendirilir. Beton kaplamalı üstyapılardan çok farklı bir bakım ve onarım periyot süresine sahiptir. Esnek kaplamalı yollarda oluşan yerel bozuklukların her kış mevsimi bitiminde bakımı dışında, ilk beş yıl geçtikten sonra küçük çapta bakım ve onarımlar ile yüzey kaplaması, 10. yılın sonuna gelindiğinde yol yüzeyinin mevcut durumuna göre yenilenmesi, bir beş yıllık zaman dilimi geçtikten sonra ise, ilk beş yılda yapıldığı gibi yüzey yapısının yenilenmesi gerekmektedir. 20. yılın sonunda ise, esnek üstyapılı yol proje tasarım ömrünün sonuna geleceğinden, üstyapının belirlenecek yeni bir üstyapı ile takviyesi zorunlu olmaktadır. Bunlara ilave olarak, temel ve alttemel tabakalarının bakım ve onarımı ile değıştirilmesi gibi çok önemli bakım çalışmaları da gerekli olabilmektedir (Ağar ve Umar, 1991; Tunç, 2007).

2.4.2.4 Ülkede mevcut yolların üstyapı durumu

Deforme olmuş mevcut bir üstyapının takviyesi için beton kaplamalı yollar ekonomik olmamaktadır. Bu sebeple, ülkedeki mevcut yolların esnek üstyapılı olması durumunda, takviye tabakasının asfalt kaplama ile inşa edilmesi elverişli olmaktadır. Esnek kaplamalı yollarda üstyapıya ait temel ve kaplama tabakalarının değiştirilmesinin zorunlu olduğu yenileme çalışmalarında, beton kaplama seçeneği de göz önüne alınabilmektedir (Ağar ve Umar, 1991; Ecevit, 2007).

2.4.2.5 Finansman kaynakları ve güncelleme (iskonto) oranı

Esnek ve rijit üstyapı tipi seçimi aşamalarında yapım işinin maliyet etkinliği önemli bir parametre olmaktadır. Bu açıdan, yalnızca inşa maliyetinin finanse edildiği durumlarda beton kaplamalı üstyapılar tercih edilmektedir. Bu durumun aksine, gün geçtikçe artış eğiliminde olan trafiğe uygun olarak ilave tabakaların yapılması gibi bir kademeli inşaat planlaması gerektiren, az sayıda yatırım kaynakları ve yüksek iskonto oranı gibi durumlarda esnek üstyapıları tercih etmek daha elverişli olmaktadır. Ancak bu tip planlamalarda, üstyapıyı sürekli olarak belirli bir hizmet seviyesinde tutmak için yüksek bakım fonları gerekmektedir (Ağar ve Umar, 1991; Tunç, 2007).

2.4.2.6 Enerji tüketimi

Günümüzde enerji sorunları gün geçtikçe artış göstermekte ve bu sorun ülkelerin durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Bu durum, üstyapı kaplama yapım yönteminin seçiminde en önemli parametre olan yapım ve bakım maliyetlerinin yanı sıra, enerji problemi de dolaylı olarak üstyapı tipi seçimi etkileyebilmektedir (Ecevit, 2007).

Teknik ölçütler dikkate alınarak üstyapı tipinin seçilmesi durumunda, taşıma gücü zayıf yol taban zemini, trafik hacmi ve yıllık trafik artış oranı yüksek, ağır taşıt miktarı fazla, mevsimsel sıcaklık farklarının yüksek olduğu durumlarda beton kaplamalı üstyapılar; proje trafik hacmi ve yıllık trafik artış oranı düşük olduğu durumlarda ise esnek kaplamalı üstyapılar elverişli olmaktadır. Ekonomik ölçütler dikkate alınarak belirlenecek üstyapı tipi seçiminde, hizmet ömrü boyunca toplam gider, çimento ve cürufun bol bulunması ve kolaylıkla temini ve enerji sorunlarının olduğu durumlarda beton kaplamalı üstyapılar; ilk yapım giderlerinin ve iskonto oranının yüksek olması durumunda ve takviye çalışmasının gerekli olması halinde ise esnek üstyapılar uygun olmaktadır (Ecevit, 2007; Tunç 2004).

Üstyapı tipi seçimini etkileyen ekonomik parametreler Çizelge 2.2’de verilmiştir. Çizelge 2.2’de (+) işareti elverişli olma durumunu, (-) işareti ise uygun olmama durumunu göstermektedir (Ecevit, 2007; Tanyıldızı, 2010).

Çizelge 2.2 : Üstyapı tipi seçiminde ekonomik parametrelerin etkisi.

Ekonomik Parametreler	Esnek Üstyapı	Rijit Üstyapı
İlk yapım maliyeti	+	-
Hizmet Ömrü boyunca toplam maliyet	-	+
Çimento ve cürufun bol ve kolaylıkla temini	-	+
Mevcut üstyapıların esnek kaplamalı olması	+	-
Yüksek iskonto oranı	+	-
Enerji sorunu	-	+

2.4.3 Havaalanı üstyapı tipi seçimi

Karayolu üstyapı tipi seçimindeki gibi, havaalanı üstyapı kaplama tipinin seçimi de oldukça karmaşıktır. Çünkü kaplama tabakası, birbirinden farklı yüklerin etkisi altında ve çok farklı iklimsel ve çevresel şartlar altında hizmet vermektedir. Üstyapı kaplama kalınlığına etki eden tasarım parametreleri birbirlerini etkilemekte ve nicelik olarak ölçülememektedir (Tunç, 2003; Kuloğlu, Özdemir ve Kök, 2007).

Havaalanı üstyapı bölümlerinin her biri için birbirinden farklı ihtiyaçlar ve göz önünde bulundurulması gereken özellikler bulunmaktadır. Bu sebeple, hava kısmını oluşturan taksiyolu, apron ve pist alanlarının ve diğer yer hizmetlerinin sunulduğu alanların üstyapılarının esnek, rijit veya kompozit olarak seçilerek planlanması, karayolu üstyapı tasarımındaki gibi teknik deneyim gerektiren bir mühendislik sorunudur. Havaalanı üstyapı tipi seçimine ve kaplama kalınlığına etki eden etkenler genel olarak Çizelge 2.3’de sunulmuştur (Kuloğlu ve diğ, 2007).

Çizelge 2.3 : Havaalanı kaplama tipi seçimine etki eden ana faktörler.

Ana Faktörler	Değişkenler
Trafik ve yük	Mevcut trafik hacmi, planlanan trafik hacmi, trafiğin dağılımı, teker yükü ve düzeni, lastik basıncı, temas alanı, yük tekrar sayısı ve tatbik süresi.
İklim ve çevre şartları	Isı değişimleri, yağış miktarı, don derinliği, drenaj şartları, zemin özellikleri, donma ve çözülme.
Malzeme özellikleri	Malzeme özellikleri (asfalt, beton, agrega ve içerdikleri malzemeler), tabakaların yük dağıtma ve mukavemet gibi mekanik özellikleri.
Yapım, bakım ve onarım	Üstyapı tayini, tabaka kalınlığı, tabaka cinsi, yapım kalitesi ve kalite kontrol seviyesi, periyodik ve duruma dayalı bakım hizmetlerinin yapılması.

2.5 Beton Yol Kaplamaları

Beton yol kaplamaları, hem kaliteli malzeme özelliği hem de inşa metotlarının güvenilirliği bakımında, yüksek ve orta trafik hacmini emniyetle taşıyan, bilhassa hız yapılmasına elverişli ortam bulunan karayollarında verimli mühendislik hizmeti verecek standartta bir üst yapı tipidir (Ağar ve Umar, 1991; Tunç, 2007).

Beton yol kaplamaları; kaynakları kısıtlı olan ülkeler için gerekli hammadde ve diğer şartların sağlanması koşuluyla uygun olmaktadır. Birim yol başlangıç maliyeti diğer cins kaplamalara göre biraz daha fazla ise de, kendisini belirlenen bir süre içerisinde amorti edebilmektedir. Nitekim gerçekleştirilen çalışmalara göre, usulüne göre yapıldığı takdirde beton kaplamalı yollar bitümlü sıcak karışım üstyapılara göre 5-7 kat daha fazla uzun ömürlü olmaktadır (Ağar ve Umar, 1991).

2.5.1 Türkiye’de karayolu ve havaalanı beton yol kaplamaları

Günümüzde ulaşım sektörü daima bir bölgenin gelişiminde ön planda olmuştur. Doğru karar verilmiş ulaştırma altyapı yatırım hizmetleri ekonomik kalkınmayı hızlandırmaktadır. Kaynakların etkin bir şekilde değerlendirilmesinde enerji verimliliğine yönelik onarım ve yapım maliyeti düşük yatırımlara öncelik verilmelidir. Ülkemiz karayolu ve havaalanlarında gün geçtikçe büyüyen ekonomi, ihracat ve ithalat sebebiyle karayollarında ağır taşıt yükü günden güne artmaktadır (Süme, 2016).

Artan ağır taşıt yüklerinden dolayı, yollarımızın beton yol olarak planlanması gelişen ulaşım ağı içerisinde en önemli parametre olmaktadır. Özellikle, araç trafik hacmindeki sürekli artışlar ve ödenek temini konusunda karşılaşılan güçlükler karşısında, yeni karayolu inşa etmek yerine mevcut karayolu üstyapılarının daha uzun bir zaman diliminde yoğun ve ağır trafiği karşılayabilecek şekilde yenilenmesi gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Hem yeni karayolu inşasında, hem de üstyapı yenileme çalışmalarında üstyapı tipi seçimi önemli olmaktadır. Havaalanı ve karayolları üstyapı seçimi, farklı ve bir çok parametreye dayandırılması gereken çok geniş kapsamlı bir konu özelliği taşımaktadır. Üstyapı tipi seçiminde, üstyapı tipleri hem ekonomik hem de teknik bakımdan kıyaslanmalı ve ülke şartları dikkate alınarak karara varılmalıdır (Ecevit, 2007; Süme, 2016; Tunç, 2007).

Günümüzde karayollarına tahsis edilen kısıtlı bütçenin büyük bir bölümünün sadece bakım ve onarım giderlerinde kullanılabilmesi, ülkemizde bundan sonra daha dayanıklı, uzun yıllar bakım onarım ihtiyacı göstermeyen yolların inşa edilmesi gereğini ortaya

koymaktadır. Bu gibi durumda tercih edilmesi gereken ilk seçenek beton kaplamalı yol olmaktadır. Köy yolları dışında, şu ana kadar inşa edilen beton kaplamalı yollar;

- ✓ Afyonkarahisar-Emirdağ yolu 2.0 km (2004),
- ✓ Hasdal-Kemberburgaz yolu 3.5 km (2006)
- ✓ Ordu-Ulubey yolu 1.0 km (2007)
- ✓ İzmit-Yalova arası (2009) Karamürsel bölgesinde 1.6 km olmak üzere 8.1 km.dir. (Süme, 2016).

Günümüzde hava ulaşımında gelişen teknolojiye dayalı olarak daha modern ve büyük hava taşıtlarının hizmet vermesiyle havaalanı mühendisliği gün geçtikçe önem kazanmıştır. 31 Aralık 2021 tarihi itibarıyla ülkemizde sivil hava trafiğine açık toplam 61 adet havaalanı bulunmaktadır. Bu havaalanlarından, 100074 m pist uzunluğu rijit üstyapı, 35172 m pist uzunluğu esnek üstyapı ve 17830 m pist uzunluğu ise kompozit üstyapı olarak inşa edilmiştir (Okur, 2008; Kuloğlu ve diğ, 2007; URL-1).

2.5.2 Beton yol kaplamalarının avantajları

Beton yol kaplamalarının esnek üstyapı kaplamalarına göre avantajları aşağıda karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Ağar ve diğ, 1998).

- ✓ Kaymaya karşı sürtünme katsayıları yüksek ve dirençleri yeterli seviyededir. Boyuna sürtünme ve enine sürtünme katsayıları sırasıyla yaklaşık olarak 0.70 ve 0.65'dir. İlaveten, ıslak zemin koşullarında sürtünme katsayısındaki azalma, diğer plastik bağlayıcılarla inşa edilen kaplamalara göre daha az olmaktadır. Yol yüzeyinin düz olmasından dolayı yağmur suları kolay bir şekilde drene edilebilmektedir.
- ✓ Sürtünme katsayısının düşük olması sebebiyle harekete karşı olan direnç değeri düşük olmaktadır. Bu durum, araçların yıpranmasına engel olur ve mekanik ömür sürelerinin artmasını sağlar. Ayrıca, kaplamanın pürüzsüz ve yol konforlu olmasından dolayı yağ ve yakıt masrafı azalmakta, bandaj ve lastik aşınması daha az olmaktadır.
- ✓ Taşıma gücü yüksek bir kaplama tipidir. Her türlü olumsuz etkilere karşı koyacak bir şekilde planlanabilir. Çatlak oluşumunu engellemek maksadıyla çelik donatı kullanılabilir. Çelik donatı kullanılarak kaplamada oluşabilecek çatlak düzeyi ve çatlağın yayılma hızı en aza indirilir.
- ✓ Kalite seviyesinin üst düzeyde olmasından dolayı, bitümlü asfalt tabakasına göre eşdeğer kaplama cinslerinden daha ekonomiktir.

- ✓ Yüzey pürüzlülük katsayısı küçük olduğundan yüksek hızlarda daha az gürültülüdür. Yüzey yapısının dayanıklı olması, malzemenin deformasyona uğramasını engeller. Açık rengi ile gece şartlarında kolaylıkla görünür. Trafik güvenliği açısından, karşı yönden gelen far ışığının yansımalarına neden olmaz.
- ✓ Esnek üstyapılar; trafik yüklerini bir alt tabakaya yani kaplamadan temele, temelden alttemele ve son olarak alttemelden yol taban zeminine gittikçe azalan bir şekilde yayarak iletirler. Bu nedenle, tabakaların yapımında kullanılan malzemenin mekanik özellikleri de, tabakalardan aşağı doğru azalan gerilme değerleri ile paralellik gösterir. Yol taban zemininin taşıma gücünün zayıf zemin olması durumunda tabakalarda oluşacak gerilmeler beton asfalt kaplamanın deforme olmasına ve bunun sonucunda yolda farklı ondülasyonlar veya oturmalar meydana gelmesine neden olacaktır. Beton yol kaplamaları ise, bir kırış davranışı gösterir ve trafik yükleri geniş bir alana yayarak yol taban zeminine iletir. Bu nedenle, beton yol kaplamaları, taşıma gücü zayıf yol taban zeminlerinde esnek üstyapılara kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir.
- ✓ Kaliteli malzeme ve işgücü ile yapılan bir beton yol kaplamanın bakım ve onarım giderleri beton asfalt kaplamalara göre daha düşük olmaktadır. İyi projelendirilmiş ve tasarımı yapılmış beton yol kaplamalarının hiçbir yüzey bakımı olmadan 20 yıl hizmet ömrü boyunca kullanılmaları mümkündür.
- ✓ Plastik bağlayıcılarla inşa edilen yol kaplamalarında sık sık görülen ondülasyonlar beton yol kaplamalarında görülmez. Ayrıca, sürtünme katsayısının yüksek olmasından dolayı plastik bağlayıcı kaplamalara kıyasla daha dik eğimlere uygulanabilme yeteneğine sahiptir.
- ✓ Türkiye’de inşaat mevsimi süresi, asfalt betonunun aksine beton dökümü için daha uzun sürelidir. Ayrıca, ıslak zeminlerde asfalt betonunun aksine beton dökümü yapılabilir.
- ✓ Betonda bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun hammaddesi tamamen yerli kaynaklardan üretilmektedir. Ayrıca, ülkemizin tüm bölgelerinde çimento mevcut olup yerli kaynaklarla üretim gerçekleştirilebilmektedir.
- ✓ Beton yol kaplamalarında kullanılan bağlayıcı çimento olup içeriğinde uçucu madde bulunmamaktadır. Bu sebeple kaplamada yaşlanma olgusu rijit kaplamalar için söz konusu değildir. Ayrıca, kimyasal maddelerin beton yol üzerine dökülmesi durumunda rijit üstyapının özelliğinde herhangi bir değişme görülmemektedir.

2.5.3 Beton yol kaplamalarının dezavantajları

Beton yol kaplamalarının esnek üstyapı kaplamalarına göre dezavantajları aşağıda karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Ağar ve diğ, 1998; Avcı, 2013).

- ✓ Beton yol kaplamalarının inşası boyunca, beton prizini alıncaya kadar yol trafiğe kapalı olacaktır. Yolda bakım ve onarım faaliyetleri sırasında da aynı sorun ortaya çıkmaktadır.
- ✓ Projede, tasarımda veya yapım esnasında yapılacak küçük bir hata, kaplamanın hızlı bir şekilde deforme olmasına ve yol yüzeyinde çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, betonun priz süresi devam ederken ısı farklarından dolayı çatlak oluşumu meydana gelmektedir. Trafik yükünün etkisi dışında da tekrar eden don olayları sonucunda çatlak meydana gelmiş olan kaplama tamamen deforme olabilmektedir.
- ✓ Bitümlü sıcak karışımların aksine trafik yükü altında çalışmaya uygun değildirler.
- ✓ Beton yol kaplamalarının yapımı esnasında alt yapı tesisleri bakımından güçlükler meydana gelmektedir. Beton yol kaplamalarının inşası tamamlandıktan sonra doğalgaz, su ve telefon hattı gibi tesislerinin yapım ve onarımları çok güçlükle yapılır. Yer altı hattında meydana gelebilecek arızaların yerlerini tespit etmek güçtür. Arıza onarımı tamamlandıktan sonra beton yolların tamir edilen bölümlerinde mukavemet azalmaktadır.
- ✓ Açık renkli olması sebebiyle güneş ışığında göz kamaştırmalarına neden olur. Betona boya ilave ederek renkli yol yapması ile bu kusur giderilebilir.
- ✓ Beton yol kaplamalarında derzlerin yapımı ve bakımı büyük özen ve deneyim gerektirmektedir. Yol yüzeyindeki derzler ile kaplama üzerinde kaymaya karşı direnç oluşturması için yapılan yivler gürültüye sebep olmakta ve sürüş konforunu azaltmaktadır (Battal, 2012; Bakış, 2018; Çetin, 2009).
- ✓ Beton plağın üst yüzeyi iklim etkilerine açık, alt yüzeyi ise yol taban zeminine oturmaktadır. Bu sebeple belirli bir kalınlığa sahip olan beton plağın alt ve üst yüzeyleri arasında ısı farkları veya ani ısı değişiklikleri meydana geldiğinde, beton plağın alt ve üst düzeylerinde gerilmelerin oluşturacağı farklı genleşmeler görülebilir. Bu durum ise, çekme direnci yüksek olmayan beton plağın çatlamasına neden olabilmelidir (Çetin, 2009).

Beton yol kaplamalarının esnek üstyapı ile kıyaslaması, Çizelge 2.4'te özetlenmiştir. Çizelge 2.4'te beton yol kaplamalarının esnek üstyapıya göre elverişli olma durumların yanı sıra uygun olmayan durumlar da verilmiştir. Tamamen (+) işaretinden oluşan tek bir kaplama tipinin uygulanması bu şartlarda olanak dışı olarak değerlendirilmektedir. Çünkü birçok değişken birbiri ile çelişmektedir. Bu sebeple üstyapı tipi seçiminde, proje hizmet ömrü

boyunca dayanıklı ve ülkenin farklı koşulları (ekonomi, trafik, iklim, teknik imkanlar vb.) dikkate alınarak ve optimum sonuca varmak zorunlu olmaktadır. Çizelgede (++) işareti çok uygun, (+) işareti avantajlı, (-) işareti uygun değil, (--) işareti ise hiç uygun değil olarak tanımlanmaktadır (Battal, 2012; Bakış, 2018; Çetin, 2009; Ecevit, 2007; Tanyıldızı 2010).

Çizelge 2.4 : Beton yol kaplamalarının esnek üstyapı ile karşılaştırılması.

Parametre	Esnek üstyapı	Beton yol kaplaması
Trafiğe hızlı açılma	++	-
Demir donatı kullanabilme	-	+
Bakım ve onarım sıklığı	-	++
Dayanıklılık	+	++
Islak durumda kayma sürtünme katsayısı	-	+
Taşıma gücü zayıf taban zemininin bulunması	--	+
Yapım sırasında ısı kaybının yol açacağı sorunlar	--	+
Dayanıklı malzeme temini	-	+
Derz yapılma zorunluluğu	+	-
Seyir konforu	++	+
Gece şartlarında görüş olanakları	-	++
Yaşlanma ve kimyasal maddelerden etkilenme	--	+
Yapım esnasında çevre kirliliğini artırıcı etki	-	+
Enerji azlığından etkilenme	-	+
Taban zeminindeki ıslaklık	-	+
İklim şartlarına bağımlılık	--	++
Yıllık trafik artış oranı yüksek	-	++
Yıllık trafik artış oranı düşük	+	-
Ağır taşıt oranı fazla	-	++
Üstyapı kaplama takviyesi	+	-
Üstyapı temel ve kaplama değişimi	+	+
Yüksek iskonto oranı ve sınırlı yatırım kaynakları	+	-

2.5.4 Yapım yöntemine göre beton yol kaplamaları

Rijit üstyapı kaplamaları yapım yöntemine göre;

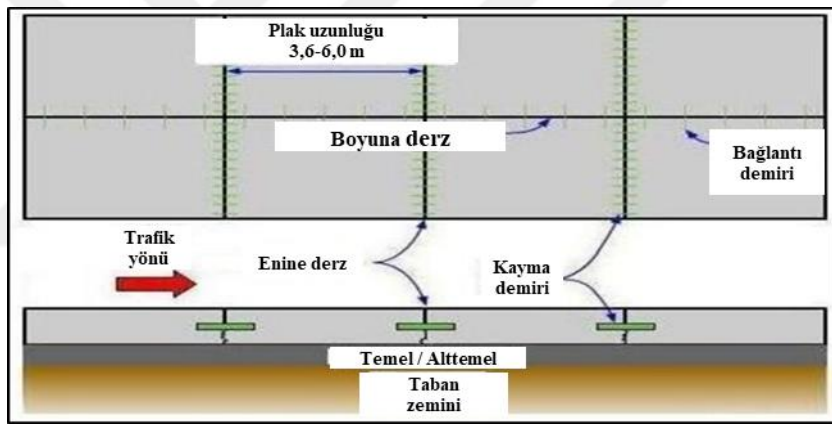
- ✓ Derzli donatısız beton kaplamalar
- ✓ Derzli donatılı beton kaplamalar
- ✓ Sürekli donatılı rijit kaplamalar olmak üzere üç farklı şekilde inşa edilebilmektedir.

2.5.4.1 Derzli donatısız beton kaplamalar

Derzli donatısız beton kaplamalar, 3.60-6.00 m uzunluğunda kısa anolardan inşa edilir. Bloklar 125-350 mm kalınlığa sahip olup donatı çeliği içermezler. Derzler geçmeli veya geçmesiz olabilirler. Beton plak çoğunlukla granüler malzeme veya bitümlü tabakalar üzerine yapılır. Temel tabakası kalınlığı 200 mm olabilmektedir (TCK, 2019).

Derzli donatısız beton kaplamalarda plak ortası çatlamayı minimum seviyeye indirmek için derz açıklıkları kısa yapılır. Ağır araç sayısının fazla olduğu yollarda, özellikle nemli bölgelerde trafik yükünün iletilmesi için beton demirleri veya stabilize temel tabakası kullanılır. Derzli donatısız beton kaplamalar genellikle, havaalanı kaplamalarında, otoyol yapımında ve şehir içi yollarda kullanılmaktadır (Ecevit, 2007; TCK, 2019).

Derzli donatısız beton kaplamasına ait plan ve kesit görüntüsü Şekil 2.7’de verilmiştir (URL 2, 2022).



Şekil 2.7 : Derzli donatısız beton kaplamaya ait plan ve kesit görüntüsü.

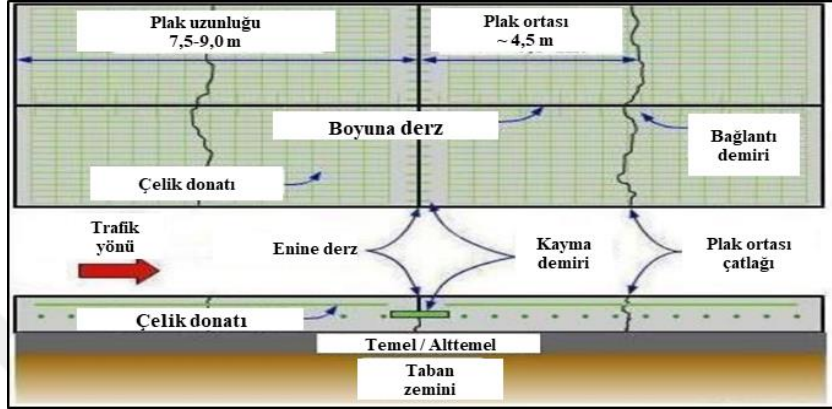
2.5.4.2 Derzli donatılı beton kaplamalar

Derzli donatılı beton kaplamalar, 8-30 m uzunluğunda anolardan meydana gelir. Blok kalınlıkları ortalama 150-350 mm olup, blok ortasından donatı çeliği geçmektedir. Temel tabakası kalınlığı ise yaklaşık 200 mm’dir (Tanyıldızı, 2010).

Derzli donatılı beton kaplamalarda derz aralığının uzun olması durumunda, ısı etkisinden dolayı kıvrılmaya bağlı olarak kaplamada çatlaklar meydana gelmektedir. Donatı çeliği kullanılarak ano ortasında oluşan çatlakların ilerlemesi engellenmektedir. Çatlakların yayılması ve yük transferinin sağlanması çelik donatı tarafından yapılmaktadır (Ecevit, 2007; Tanyıldızı, 2010).

Derz aralığının uzun olması daha büyük derz açıklıklarına neden olur. Bu durumda, derzler arası yük transferini iletmek için donatı çubukları kullanılır. Derzli donatılı beton kaplamalar, ısı farklarının fazla olduğu bölgelerdeki şehirlerarası yollarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Tunç, 2007).

Derzli donatılı rijit üstyapıya ait plan ve kesit görüntüsü Şekil 2.8’de verilmiştir (Ecevit, 2007; TCK, 2019).

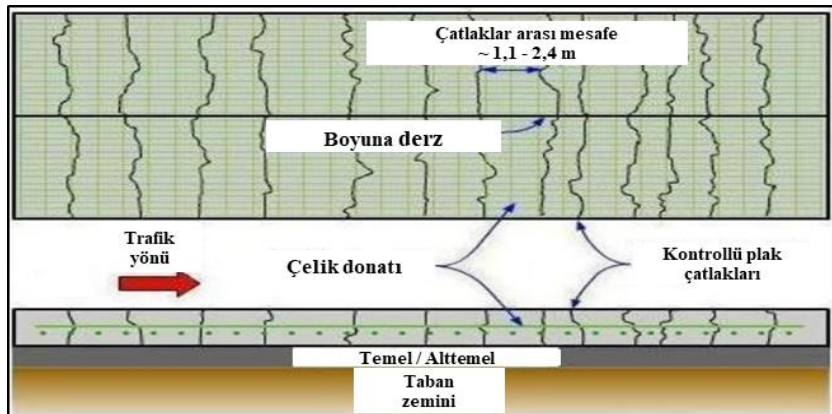


Şekil 2.8 : Derzli donatılı rijit üstyapının plan ve kesit görüntüsü.

2.5.4.3 Sürekli donatılı beton kaplamalar

Sürekli donatılı beton kaplamalar, enine derzler yapılmadan döşenen beton bir plaktan meydana gelir. Yüksek donatı içeriğine sahiptirler. Bu donatılar çatlakları kontrol altında tutar. Plak kalınlıkları ortalama 150-250 mm olmaktadır. Derzli donatılı tipteki beton kaplamalarına kıyasla daha fazla çelik donatı bulunmaktadır. Genellikle bu çelik miktarı kesit alanının %5-%7 kadar olmaktadır (Boztepe, 2011; TCK, 2019).

Sürekli donatılı beton kaplamasına ait plan ve kesit görüntüsü Şekil 2.9’da verilmiştir (Boztepe, 2011).



Şekil 2.9 : Sürekli donatılı rijit üstyapının plan ve kesit görüntüsü.

2.5.5 Farklı yapım tekniğine göre beton kaplamalar

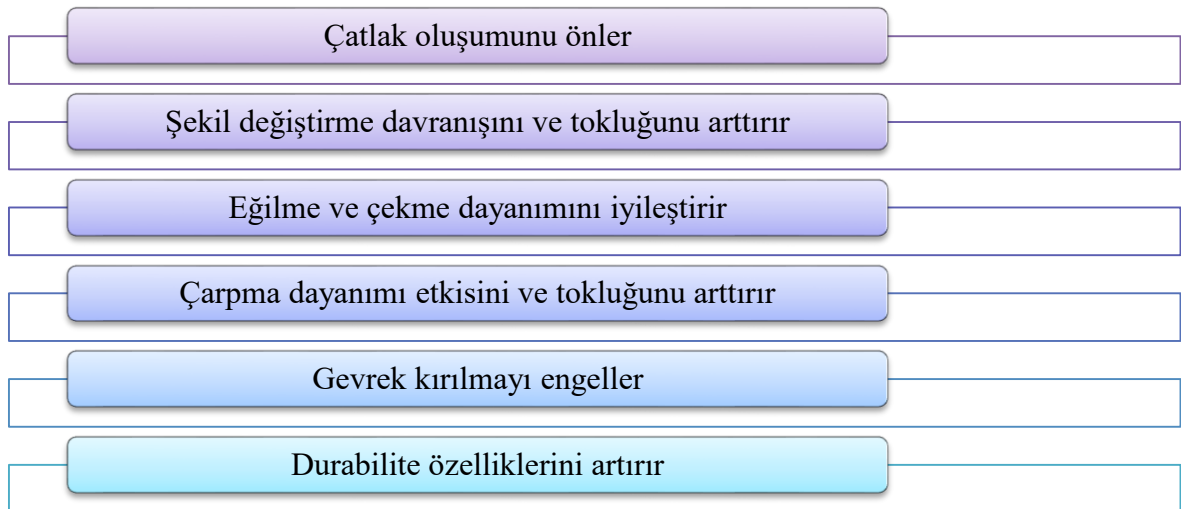
Dünyada yapılmış ve yapılması için çalışma gerçekleştirilmiş birçok beton yol üstyapı türü yer almaktadır. Bunlar içerisinde en fazla tercih edilen ve ülkemizin mevcut koşullarına göre en uygun olacağı değerlendirilen beton yol kaplaması üstyapı tiplerinin sınıflandırması aşağıda verilmiştir (Edis, 2007).

- ✓ Kalın plak kaplamalar,
- ✓ Sürekli betonarme yol kaplamaları.
- ✓ Ön gerilmeli beton yol kaplamalar,
- ✓ Silindirle sıkıştırılan beton (SSB) yol kaplamalar,
- ✓ Kendinden yerleşebilen beton yol kaplamalar,
- ✓ Lifli beton plak kaplamalar.

2.6 Lif Takviyeli Beton Kaplamalar

Beton aşınma, yorulma, çekme ve çatlama sonrasında yük taşıma dayanımı ile enerji emme kapasitesi yönünden zayıf bir malzemedir. Bu kusurların giderilmesi ve betonun çekme dayanımının artış göstermesi için lifler kullanılmaya başlanmıştır. M.Ö. dayanan dönemlerde saman kullanılan kerpiçler ve at kılı ilaveli harçlar lifli betonlara öncü olmuştur. 20 yy.da betona katılmaya başlanan lifler betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine olumlu katkıda bulunmaktadır (Hannant, 1987).

Liflerin betona ilave edilmesiyle sağlanan olumlu özellikler aşağıda gösterilmiştir (Çiçek, 2021).



Şekil 2.10 : Lif katkılı betonların üstünlükleri.

Lif katkılı beton kaplamalar üstün özelliklerinden dolayı çok geniş bir kullanım alanlarına sahiptirler (Şekil 2.11) (Çiçek, 2021).



Şekil 2.11 : Lif katkılı betonların kullanıldığı yapı tesisleri.

Çelik lif katkısı ile betonun yarı gevrek davranışı geliştirilerek süneklik özelliğinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Betona lif katkısı ile yükleme neticesinde ortaya çıkan çatlak oluşumu engellenerek betonun gevrek davranış göstermesi önlenir. Matris içinde dağılan lifler betonun enerji yutma özelliğini artırarak betonun eğilme, çekme ve tokluk kapasitesini artırır. Çatlakların yayılmasına karşı dayanım sağlarlar (Türk ve Kına, 2019; Bentur ve Mindess, 2007).

2.6.1 Lif tipleri

Çimento bazlı kompozitlere, gösterdiği faydalar sonucunda farklı lifler ilave edilmektedir. Çok çeşitli özelliklere sahip olan lifler malzeme cinsine göre sınıflara ayrılmışlardır (Sertbaş, 2006). Bu sınıflandırma Şekil 2.12’de verilmiştir.

Doğal Lifler	Mineral katkılı lifler
	Hayvansal katkılı lifler
	Bitkisel katkılı lifler
Sentetik Lifler	Polimer katkılı lifler
	Metalik katkılı lifler (Çelik)
	Seramik katkılı lifler

Şekil 2.12 : Liflerin malzeme özelliklerine göre sınıflandırılması.

Lif ilaveli betonların özelliklerine göre liflerin belirlenmesi kompozitin dayanıklılığı bakımından çok önemlidir. Çimento esaslı kompozitlere lif katkısı ile artırılan mekanik özellikler Çizelge 2.5’te verilmiştir (Ersoy, 2001).

Çizelge 2.5 : Betonların mekanik özellikleri üzerine lif katkısının etkisi.

Betonun Niteliği	Artış Miktarı (%)
Tokluk dayanımı	100-1200
Darbelere karşı direnç dayanımı	100-1200
İlk çatlak dayanımı	25-100
Çekme dayanımı	25-100
Basınç dayanımı	± 25
Yorulma dayanımı	50-100
Şekil değiştirme oranı	50-300
Eğilme çekme dayanımı	25-200
Kavitasyon direnci	200-300
Elastisite modülü	± 25

2.6.2 Çelik lifler

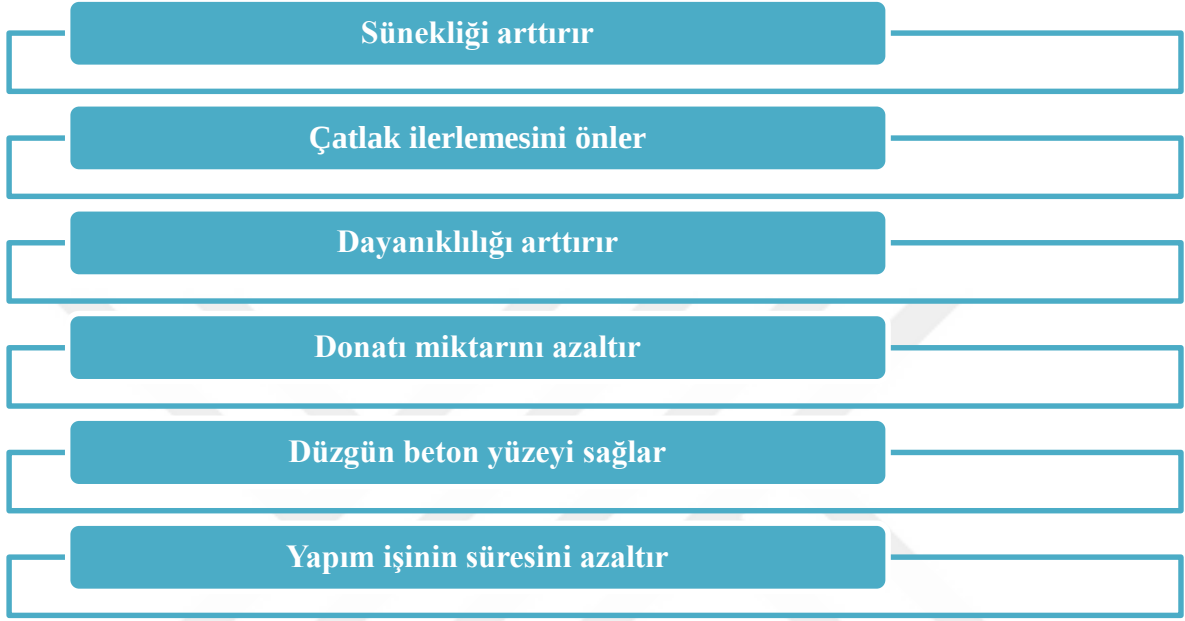
Genellikle beton yorulma, aşınma, çekme dayanımı ile çatlak oluşumu sonrası yük taşıma dayanımını ve enerji emme kapasitesi bakımından zayıf bir malzemedir. Betonun bu kusurlu yönlerini iyileştirmek maksadıyla betona lif katkısı ile birçok alanda yeni araştırmalar yapılmıştır. Bilhassa, teknolojik gelişmelere paralel olarak yeni kompozit malzemelerin betonda kullanılmasını hedeflenmektedir. Bu anılan yeni malzemelerden en önemlisi betona ilave edilen çeşitli boyutlardaki çelik liflerdir (Holschemacher, Mueller ve Ribakov, 2010).

Betona ilave edilen çelik lif, betonun yapısını değiştiren ve onun plastik davranış niteliğini artıran bir malzeme olarak açıklanabilir. Betonun plastik davranış ve enerji yutma kapasitesi, betona çelik lif katkısı ile artırılmaktadır (Holschemacher ve diğ, 2010). Bu olumlu özelliklerinden dolayı çelik lifler en yaygın şekilde kullanılan lif türlerindendir. Bunun nedeni, çelik lifin aderans ve tokluğu artırması, kullanım kolaylığı gibi faydalarıdır (Çiçek, 2021).

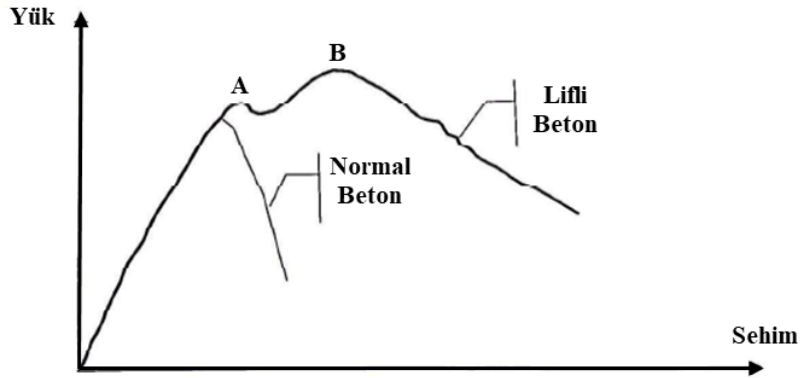
Çelik lif ilaveli betonlar için en yaygın kullanım alanlarından biri, elastik zemine oturan beton plaklardır. Oluşan gerilmeleri geniş bir alana ilettikleri ve mikro çatlaklar arasında geçiş görevini sağladıkları için çelik lifler, beton yapısını daha dayanıklı hale

getirmektedir. Sonuçta, gerilmelerin betonda dağılımı değişmekte, yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde artış göstermektedir (Holschemacher ve diğ, 2010; Topçu, 2006).

Çelik lif katkılı betonların gösterdikleri avantajlar Şekil 2.13'te, eğilme etkisinde yük-sehim bağıntısı ise Şekil 2.14'te verilmiştir (Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2015; Çiçek, 2021; Türk ve diğ, 2022).



Şekil 2.13 : Betonda kullanılan çelik liflerin üstünlükleri.



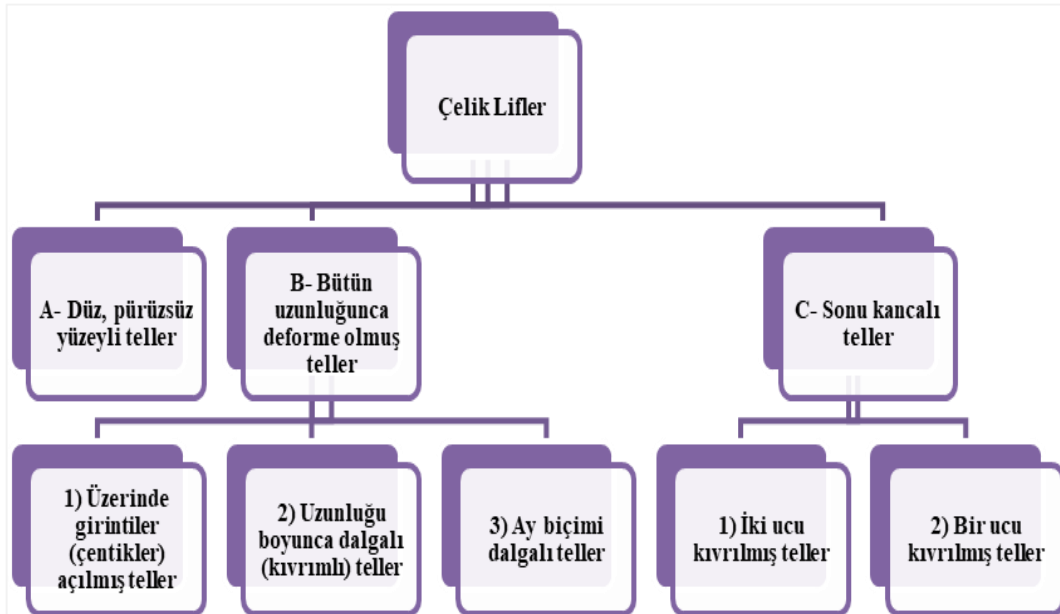
Şekil 2.14 : Lif katkılı betonlarda yük-deplasman ilişkisi.

Şekil 2.14'te görüleceği üzere, eğri doğrusal bir şekilde A noktasına ilerlemekte, bu noktadan sonra eğri doğrusal olmayan bir şekilde maksimum yükün oluştuğu B noktasına ulaşmaktadır. A noktası ilk çatlağın meydana geldiği kuvveti, B noktası ise en son dayanım olarak belirtilmiştir. B noktasından itibaren uygulanan yükün yavaşlama hızı liflerin, narinliğine (L/D), miktarına ve matris içindeki dağılımına bağlıdır (Baradan ve diğ, 2015).

Çelik lifli betonların kullanım alanları Çizelge 2.6’da, TS 10513’e göre şekillerine göre çelik lifler Şekil 2.15’te verilmiştir (Çiçek, 2021; Türk ve diğ, 2022).

Çizelge 2.6 : Çelik lif katkılı betonların kullanım yerleri.

Çelik Lifli Betonlar	Sanayi Yapılarında
	Su Tesislerinde
	Yol Kaplamalarında
	Kolon - Kiriş Birleşim Bölgelerinde
	Püskürtme Beton Uygulamalarında
	Şev Stabilitesinin Dayanımının Artırılmasında
	İnce Kabuklu Yapılarda
	Patlamaya Karşı Dirençli Yapılarda
	Yüksek Sıcaklık Farklarına Maruz Kalan Yapılarda
	Ön Yapımlı Beton Elemanlarda
	Yüksek Mukavemetli Beton Elemanlarda
	Deprem Etkisine Dayanıklı Yapılarda
	Altyapı Malzemelerinde
	Büyük Yapı Tesislerinin Döşemelerinde
	Havaalanı Pist Kaplamalarında
	Liman Kaplamalarında

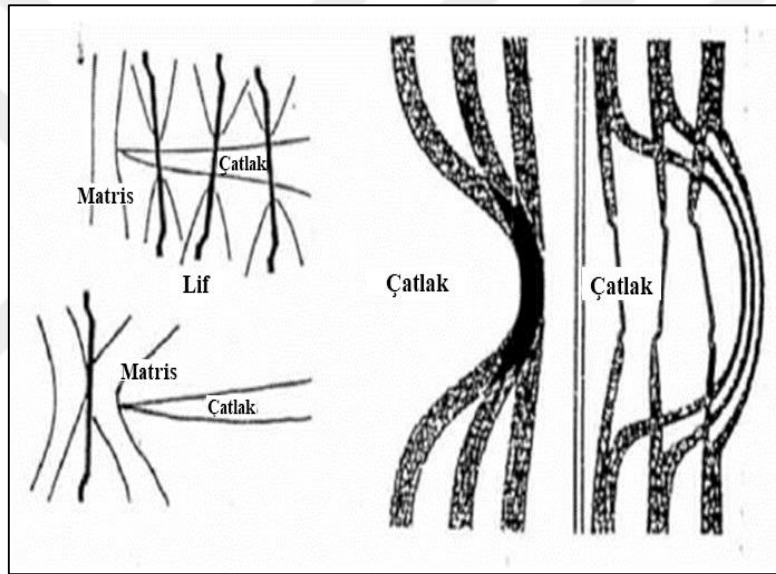


Şekil 2.15 : Şekil yapılarına göre çelik lif çeşitleri.

2.6.3 Liflerin kullanım şekilleri

2.6.3.1 Tek tip lif takviyesi

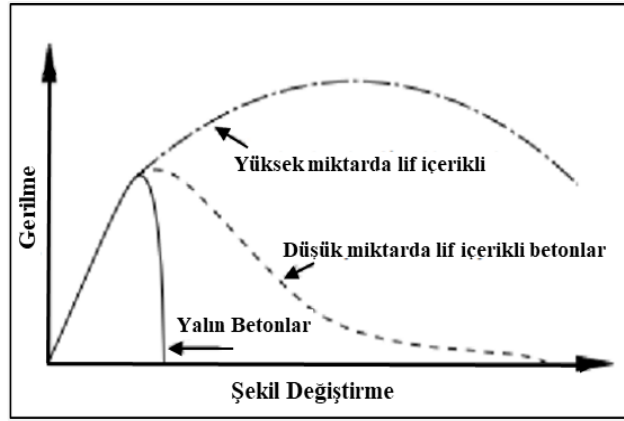
Çimento bazlı kompozitlere genel olarak tek tip lifler katılmaktadır. İlave olarak katılan bu çelik lifler kompozit içerisinde homojen bir dağılım göstermektedir. Çelik lifli betonların darbelere karşı direnç etkisi ve enerji yutma yetenekleri çok daha yüksektir. Bu katkılı betonlarda ilk çatlak oluşumundan itibaren gerilmeler çelik lifler ile karşılanır. Gerilmelerin bir bölümünü çelik lif karşılarken kalan diğer kısmını da köprüleyerek matrise iletir (Sarı, 2013). Çelik lifler köprü görevi görerek çatlağın ilerlemesini engeller. Çelik lif ilaveli betonlarda ilk çatlağın oluşması ve ilerlemesi için sağlanan enerji normal betonlara göre çok daha yüksektir (Kızıllıgın, 2009). (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 : Liflerin betonda çatlak oluşumuna etkisi.

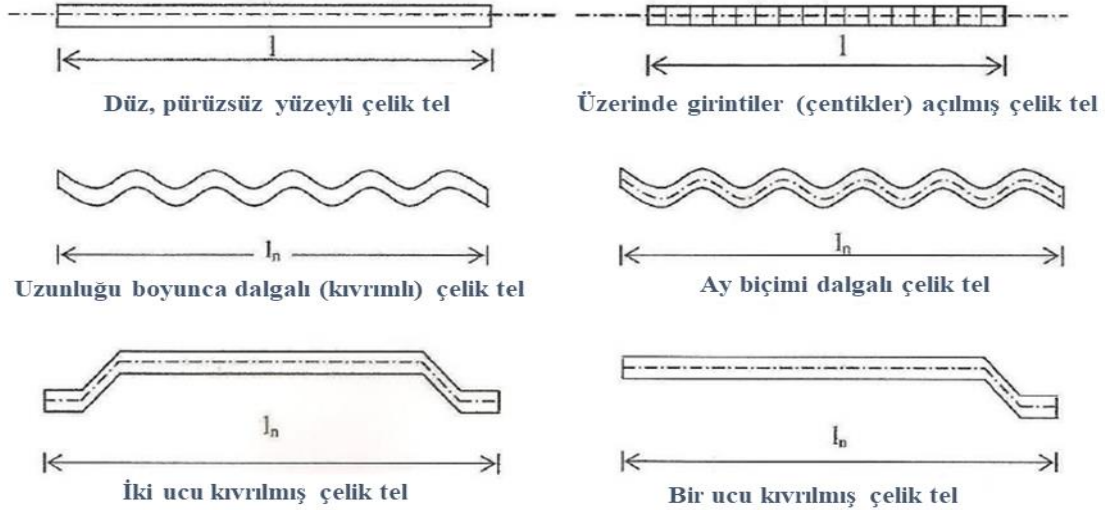
Çelik lifler, sahip oldukları yüksek çekme mukavemeti sayesinde betonda meydana gelebilecek çatlakların başlangıcına, yayılmasına ve artmasına engel olurlar. Matris içine dağılmış olan lifler betonda meydana gelen çatlaklardaki gerilmeleri henüz çatlak oluşmamış bölümlere iletirler. Matriste oluşan gerilmeler liflerin üzerinden geçerek matrisin çatlamamış kesitlerinin dayanım direncinden faydalanırlar. Böylece, matrisin çatlak oluşan bölümünde ilave liflerin etkisiyle taşıma gücü artırılarak betonun mekanik özellikleri iyileştirilmiştir (Sahmaran, Yurtseven ve Yaman, 2005; Çiçek, 2021; Türk ve diğ., 2022).

Lif miktarına bağlı olarak betonun gerilme-şekil değiştirme etkisi Şekil 2.17’de verilmiştir (Yaman, 2005).



Şekil 2.17 : Lif katkılı betonlarda gerilme-şekil değiştirme etkisi.

Kompozitte çatlak meydana geldikten sonra oluşan kuvvetin karşılanabilmesi maksadıyla matris ile lif arasında güçlü bir fiziksel ve mekanik bağ oluşmalıdır. Matris ile lif arasındaki bu bağın kuvvetli olması için aderans etkisinin betonun çekme gerilmesinden büyük olması gerekmektedir (Sertbaş, 2006). Matris ile lif arasındaki aderansı arttırmak maksadıyla farklı geometrilerde lif türleri tasarlanmıştır. Kullanım maksadına açısından lif türleri Şekil 2.18’de verilmiştir (Yerlikaya, 2003).



Şekil 2.18 : Çelik liflerin kullanım amacına göre çeşitleri.

2.6.4 Beton yol kaplamalarında çelik liflerin kullanılması

Trafik etkisine açık beton yol kaplamaları ve köprülerde, betonun tekrarlı darbe etkilerine, yük etkisine ve çevresel şartlara karşı yeterli derecede dayanım gücüne sahip olması istenir. Çelik lif ilaveli betonun darbe dayanımı, normal betona kıyasla 15-20 kat artış göstermektedir. Çelik lif etkisi sayesinde betonda ani kırılmalar meydana gelmemektedir.

Ayrıca, sıcaklık farklarının bulunduğu bölgelerde betonun tabanı ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farklarından dolayı çelik lifin etkisi ile kısa sürede çatlak oluşumu önlenmektedir (Gökçe, 2015; Sertbaş, 2006).

Karayolu beton yol kaplamalarında çelik lif katkısı ile dayanımı ve dayanıklılığı daha fazla olan beton elde edilir. Ayrıca beton plak kalınlığının azalmasına sebep olur (Gökçe, 2015; Tunç, 2004).

Havaalanı rijit üstyapı kaplamalarında da çelik lifler kullanılmaktadır. Bu lifler kullanıldığında derz açıklıkları büyütülebilmektedir. Havaalanı yol yapımlarında da betonda yüksek eğilme dayanım özelliğine sahip çelik lifler kullanılarak kaplama kalınlıkları azaltılabilmektedir (Gökçe, 2015; Tunç, 2003).

Çelik lif ilaveli betonların darbe ve yorulma dayanımının yüksek olması sebebiyle araç tekerleklerinin neden olduğu tekrarlı yüklerin kolayca karşılanmasını sağlar. Tasarım faktörleri belirlenirken, bölgenin sıcaklık farkları, taban zemininde oluşabilecek deformasyonlar, derz açıklıkları ve rötre etkisi dikkate alınır. Çelik lif katkılı beton kaplamalar; yol, köprü ve havaalanı gibi yapılarda şimdiye kadar en iyi bir şekilde uygulanmıştır (Şekil 2.19) (Düzgün, 2001).



Şekil 2.19 : Rijit üstyapılı karayolu ve havaalanında lif katkılı betonun kullanım yerleri.

2.6.5 Çelik lifli sertleşmiş betonun özellikleri

Betonun çekme dayanımı basınç dayanımına oranla oldukça küçüktür. Betona çelik lif ilave edilerek eğilme ve çekme dayanımı başta olmak üzere birçok mekanik ve fiziksel özelliği iyileştirilmektedir (Düzgün, 2001).

Lif katkılı sertleşmiş beton geleneksel betonlara kıyasla, enerji emme kapasitesi, darbe ve ilk çatlak dayanımı ile aşınma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin iyileştirmesini etkilemektedir (Uğurlu, 1999).

2.6.5.1 Çelik lifli betonlarda basınç dayanımı

Çelik lif katkılı betonların basınç dayanımları araştırıldığında, liflerin betonun basınç dayanımı üzerinde daima olumlu bir etkisinin olmadığı; bazen betonun basınç dayanımını olumlu etkilerken bazen de dayanımda azalmaya neden olduğu görülmüştür. Ayrıca lifin geometrik şekli, miktarı ve lifin cinsine bağlı olarak basınç dayanımının değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir (Öner ve Akyüz, 2007; Uğurlu, 1999).

Yapılan çalışmalarda, betona katılan çelik liflerin betonun çekme ve basınç dayanımlarını etkilediği belirlenmiştir. Bu etkinin lifin şekli, miktarı ve cinsine ilave olarak olumlu veya olumsuz olması liflerin betondaki dağılımına göre de değişkenlik göstermektedir. Yükleme eksenine dik doğrultuda olan liflerin dayanım üzerinde olumlu veya olumsuz bir etkisi olmazken, yükleme eksenine paralel doğrultuda olan liflerin ise olumlu etkileri olduğu görülmüştür (Düzgün, 2001). Çelik lif ilaveli betonlarla ilgili yapılan diğer çalışmalarda, liflerin betonun basınç dayanımında yaklaşık ± 25 oranında bir artma ve azalma oluşturduğu tespit edilmiştir (Arslan, 1993; Min ve diğ., 2021).

2.6.5.2 Çelik lifli betonlarda eğilme dayanımı

Çelik lif ilaveli betonun eğilmede çekme dayanımındaki etkisi, yarmada çekme ve basınç dayanımındaki etkisinden daha fazladır. Çelik lif katkılı betonların eğilme dayanımı geleneksel betonlara oranla %50-%100 daha fazladır. Bu artış, çelik liflerin çekme dayanımının yüksek olması ile bağlantılıdır (Lee, 2017; Uğurlu, 1999).

Betonda eğilme dayanımına tesir eden unsurlar, lifin miktarı, şekli, görünüm oranı, lifin hacmi, deney numunesinin boyutları ve liflerin beton içindeki dağılımlarıdır. Ancak dayanımda öne çıkan önemli etken lif ile beton arasındaki aderans gerilmelerinin artırılmasıdır (Meng, 2017; Uğurlu, 1999).

2.6.5.3 Çelik lifli betonlarda yarmada çekme dayanımı

Betonda şekil değiştirme ve kırılma davranışına karşı betonun gösterebileceği dayanım, betonun çekme dayanımı şeklinde tanımlanır (Erdoğan, 2003).

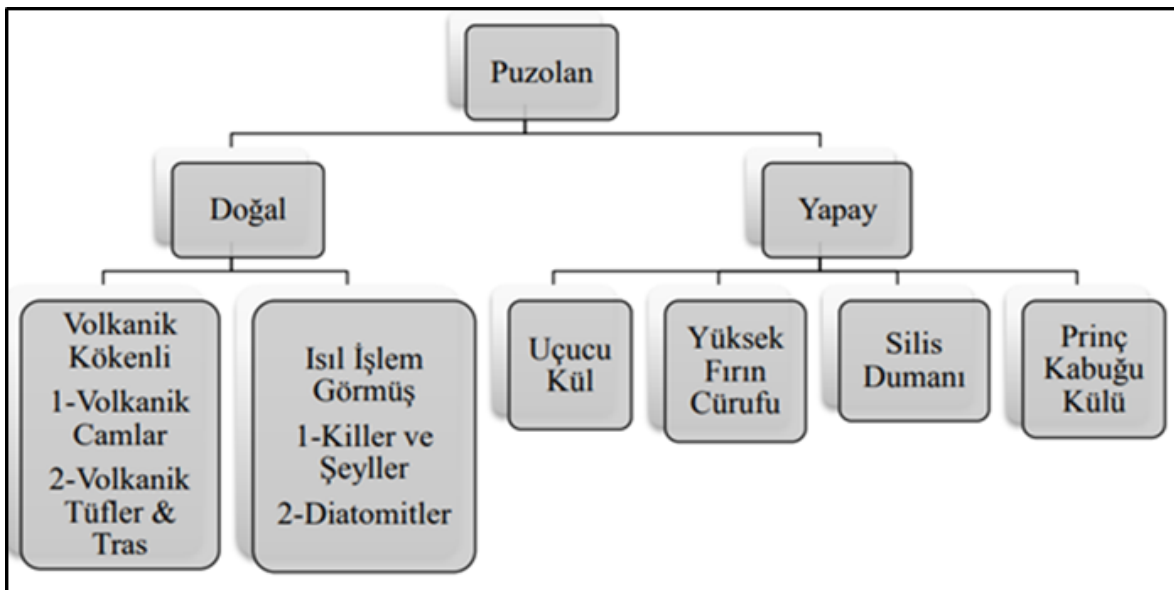
Çelik lif ilaveli betonların çekme dayanımları normal betonlara oranla daha fazladır. Gerçekleştirilen araştırmalarda, beton içerisine homojen bir biçimde çelik lif ilavesinin, gerilmeler sonucunda meydana gelen çatlakların büyümesini ve yayılmasını engellemek için uygun olacağı tespit edilmiştir (Sekban, 2007; Uğurlu, 1999).

2.7 Puzolanlar

Puzolanlar kendi başına bağlayıcılık niteliği çok az veya hiç bulunmayan fakat uygun rutubet koşullarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliğine sahip ürünler ortaya çıkaran, ince toz halindeki alüminli veya silisli maddelere puzolan denir. Puzolanlar genelde reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)’den meydana gelir. Geri kalan kısım ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri ihtiva eder (Gündeşli, 2008).

2.7.1 Puzolanların sınıflandırılması ve çeşitleri

Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki kısma ayrılırlar. Doğal puzolanlar; doğada serbest halde bulunan ve ön işlem uygulanarak veya doğrudan öğütülerek kullanılan malzemelerdir. Tüfler, küller, ve tras vb mineraller bu kısımda yer alırlar. Yapay puzolanlar ise; endüstriyel bir üretim sırasında yan ürün olarak elde edilen ve puzolanik özelliklere sahip malzemelerdir. YFC, uçucu kül ve silis dumanı en fazla tercih edilen yapay puzolanlardır. Doğal ve yapay puzolanlar Şekil 2.20’de gösterilmiştir (Dayı, 2006; Gülen, 2015).



Şekil 2.20 : Puzolanların sınıflandırılması.

2.7.2 Yüksek fırın cürufu (YFC)

2.7.2.1 Yüksek fırın cürufunun üretimi

Demir oluşumunda, demir cevherlerinin fırınlarda çok yüksek sıcaklık değerlerinde (ortalama 1600°C) ısıtılmaları, bunun neticesinde yabancı maddelerden temizlenmesi gerekmektedir. Yakıt olarak kok kömürünün (karbon) kullanıldığı bu fırınlarda, ilave olarak arıtma işlemi için kalkertaşı da cevher ile birlikte ısıtılmaktadır. Yüksek sıcaklık sayesinde, demir oksitteki oksijen ile kok kömürünün karbonu birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit gazları meydana getirerek fırından çıkmaktadır. Daha sonra geride, eriyik halde demir ve CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi yabancı bileşenler kalmaktadır. Demirin yoğunluğu, yabancı bileşenlerin yoğunluğundan çok daha yüksek olduğundan, eriyik haldeki demir, fırının taban kısmında ve eriyik haldeki diğer malzemeler ise demirin hemen üst kısmında bulunmaktadır. Demir ve diğer malzemeler ayrı ayrı çıkışlardan fırının dışına çıkartılmaktadır. En son olarak elde edilen bu yabancı maddeler topluluğu “Yüksek Fırın Cürufu” olarak adlandırılmaktadır (Bilgen ve diğ, 2010; Tokyay ve Erdoğan, 1997).

Yüksek fırından çıkartılan eriyik haldeki atık cüruf ortalama 1500°C sıcaklık değerine sahiptir. Eriyik cürufun yavaş bir hızla havada soğutulması ile oluşan cüruf kristal bir yapı elde etmekte ve puzolanik özelliği bulunmamaktadır. Cüruf bu durumu ile betonda agrega olarak kullanılabilir. Fakat, eriyik halde bulunan cüruf suda çok hızlı soğumaya bırakılırsa, irili ufaklı ve kum taneleri boyutunda granüle bir hale gelir. Bu cins cüruflar “granüle yüksek fırın cürufu” şeklinde isimlendirilir. Cüruflar içerisinde en fazla yaygın olarak kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır (Bilim, 2006; Gündeşli, 2008; Tokyay ve Erdoğan, 1997).

Amorf yapı özelliği gösteren ve çok fazla miktarda SiO₂ ve Al₂O₃ ihtiva eden granüle yüksek fırın cürufu, öğütülerek çok ince taneli bir hal aldığı zaman, doğal puzolanların ve uçucu küllerin puzolanik özelliklerine benzer etkiler göstermektedir. Ayrıca, çok fazla miktarda CaO içermesi sebebiyle, YFC’nin kendiliğinden de bir miktar bağlayıcılık özelliği bulunmaktadır (Gülen, 2015; Tokyay ve Erdoğan, 1997).

Yapılan çalışmalarda, YFC’nin su ile granülasyonu neticesinde oluşan malzemenin kireçle karıştırılmasıyla bağlayıcılık özelliği olduğu tespit edilmiştir. Bunun neticesinde, Portland çimentosu klinkerini YFC ile beraber öğüterek Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentosunun üretimi başlamıştır (Gündeşli, 2008; Tokyay ve Erdoğan, 1997; Yaprak, 2004).

2.7.2.2 Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal yapısı

Cüruflar farklı tesislerinden sağlanan atık maddelerden birisidir. Kimyasal bileşenleri ve özellikleri, sağlanan sanayi kuruluşunun ürettiği ana malzeme türüne ve üretim metotuna bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Örneğin YFC'nin tek bir atık olarak bağlayıcılık özelliğine sahip olmasına karşın, bakır ve nikel cüruflarının sadece puzolanik özellikleri mevcuttur (Tokyay ve Erdoğan, 1997; Yaprak, 2004).

YFC'nin hidrolik özelliklerinin tespit edilmesindeki önemli faktörlerden birisi de kimyasal bileşenleridir. Genellikle, cürufların alkalinitesi ne kadar fazla olursa hidrolik özelliğinin de o derece iyi olduğu kabul edilir (Tokyay ve Erdoğan, 1997; Erdoğan, 2003).

Elde edilişleri farklı olan YFC ve Çelikhane Cürufunun "Basic Oxygen Furnace" (BOF) kimyasal ve fiziksel özellikleri farklılıklar göstermektedir. Söz konusu cürufların kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2.7'de gösterilmiştir (Erdoğan, 2003; Bilgen, Kavak, Yıldırım ve Çapar, 2010).

Çizelge 2.7 : YFC kimyasal kompozisyonu.

Bileşenler	Yüksek Fırın Cürufu	Çelikhane Cürufu
CaO	36-43	48-54
CaO (Serbest)	-	1-10
SiO ₂	35-39	11-18
Al ₂ O ₃	8-12	1-4
MgO	4-12	1-4
Toplam Fe	<0.50	14-19
Toplam Mn	<0.50	1-4
Na ₂ O	<0.50	-
K ₂ O	<0.70	-
S	1.20-1.60	-
CaO/SiO ₂	1-1.20	2.80-4.40

Cürufun kimyasal bileşenlerinin, demir cevherinin kimyasal kompozisyonuna benzemesine karşın, cürufu meydana getiren alüminyum, kireç ve silis miktarları önemli

ölçüde değişiklikler göstermektedir (Çizelge 2.8). Bu değişiklikler, kok kömüründen, demir cevherinin yapısından, çeşitli demir cevherleri ile oluşturulan karışımlardan ve yüksek fırındaki sıcaklıklardan meydana gelmektedir (Bilgen ve diğ, 2010).

Çizelge 2.8 : YFC karşılaştırmalı kimyasal kompozisyonu (%).

Bileşen	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avusturalya	Türkiye
CaO	29-50	30-40	39-44	34-41
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19
Fe ₂ O ₃	0.10-0.50	-	0-0.70	0.30-2.50
MgO	0-19	8-21	1-3	3.50-7
MnO	0.20-1.50	-	0.30-1.50	1-2.50
S	0-2	1-1.60	0.60-0.80	1-2

2.7.2.3 Yüksek fırın cürufunun kullanım alanları

YFC; betonda agrega olarak, demiryollarında, bağlayıcı olarak çimentonun ikamesi olarak, briket ve tuğla imalatında, bitümlü sıcak karışımların agregası olarak, yol inşaatında dolgu malzemesi olarak, demiryolu zemin döşemesinde, cam imalatında, tarım ve çevre uygulamaları gibi kapsamlı bir kullanım alanına sahiptir (Erdoğan, 2003).

YFC doğrudan veya elenmiş olarak kullanılabilir. Beton üretiminde agrega, yol inşasında hafif dolgu malzemesi olarak doğrudan; çimento yapımı, cam sanayi ve zemin stabilizasyonunda ise öğütülmüş olarak kullanılmaktadır. (Bilgen ve diğ, 2010).

2.7.2.4 Yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkileri

YFC'nin betonda olumlu ve olumsuz istenmeyen etkileri aşağıda verilmiştir (Topçu, 2006; Erdoğan, 2003).

- ✓ Olumlu etkileri; priz süresini uzatır, taze betonun işlenebilme yeteneğini artırır, hidrasyon ısısını ve terlemeyi azaltır, sülfat dayanıklılığını artırır ve su geçirimsizliğini azaltır.

✓ Olumsuz zararlı etkileri; daha çok hava sürükleyici katkı maddesine ihtiyaç gösterir, betonun daha geç priz almasına neden olur, ilk zamanlarda beton dayanım artışının daha yavaş hızda ilerlemesine sebep olur.

2.7.2.5 YFC'nin taze beton özellikleri üzerine etkileri

✓ İşlenebilirlik ve su ihtiyacı; yüksek fırın cürufu katkılı betonlar, Portland çimentolu betonlar ile karşılaştırıldıklarında daha az suya gereksinim duyarlar. Bunun nedeni, cüruf parçacıklarının pürüzsüz yüzey yapısı ve cürufun kimyasal reaksiyonlarının uzun zaman sonra başlamasıdır (Tokyay, 2003). Klinkere göre yüksek fırın cürufunun çok az yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının az olması nedeniyle hacimce daha çok çimento hamuru oluşmasından dolayı, cüruf ilaveli betonların işlenebilirliği artmaktadır. Betonda çimentonun ikamesi olarak yüksek fırın cürufu miktarının artması ile birlikte karışımın su/bağlayıcı oranının azaldığı, bunun neticesinde, YFC'nin işlenebilirlik üzerinde pozitif bir etkisinin olduğu görülmüştür (Tokyay, 2003; Akyüz ve Öner, 2007).

✓ Terleme; Yüksek fırın cürufu katkılı betonların terleme hızları ile birlikte terleme miktarları da daha fazladır (Wainwright ve Ait-Aider, 1995). Yapılan deneysel çalışmalarda; portland çimentosunun yerine belirli oranlarda yüksek fırın cürufunun ikame edilerek kullanılmasının, hidrasyon hızında azalmaya sebep olduğu, terleme hızını ve miktarını arttırdığı, bu artışın sebebinin, çimento hamurundaki cürufun hidrasyon mekanizmasında gecikmeye neden olması ve böylece hidrasyon ürünlerinin gelişimindeki azalma olduğu, ayrıca, %55 oranında cüruf içeren betonların geleneksel betonlara göre terlemeyi yaklaşık %30 arttırdığı, cüruf ikame oranının %85 olduğu durumda ise, terleme üzerinde kesin bir etki görülmediği gözlemlenmiştir (Wainwright ve Rey, 2000).

✓ Hidrasyon ısı; YFC beton içerisinde hidrasyon ısını düşürerek beton sıcaklığını düşürmekte ve maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır (Neville, 1995; Soroka, 1993). Hidrasyon ısının az olması ve beton imalatında yüksek miktarda YFC'nin kullanılması, kütle betonlarının dökümünde oluşan yüksek sıcaklıkları ve buna dayalı olarak oluşabilecek çatlama riskini minimum seviyeye indirgemekte ve ekonomik bakımdan yarar sağlamaktadır (Osborne, 1999).

✓ Priz süresi; YFC'nin, portland çimentolu betonlara göre su ile yavaş etkileşime girmesinden dolayı betonun priz alma süresinde bir artışa sebep olmaktadır. Priz süresinde oluşan bu uzama, %50 oranının üstündeki ikame oranlarında ve 10°C'den daha düşük sıcaklıklarda etkili olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, YFC'nin çimentonun ikamesi

olarak değişim oranlarındaki artışın, betonun priz başlangıç ve bitiş sürelerinde genel olarak bir uzamaya neden olduğu saptanmıştır (Brooks, 2000).

2.7.2.6 YFC'nin sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkileri

✓ Basınç dayanımı; YFC katkılı betonların basınç dayanımları erken dönemlerde normal betona göre daha düşüktür. Bunun nedeni, cüruf ilaveli betonların geleneksel betonlara kıyasla dayanım kazanma özelliklerinin daha yavaş olmasıdır. Bu dayanımın yavaş bir biçimde kazanılmasının sebebi, YFC'nin reaksiyona girmek için çimentonun reaksiyonu neticesinde meydana gelen Ca(OH)_2 ve neme ihtiyaç duymasıdır. Bu veriler ışığında, YFC'nin hidratasyonunun, çimentonun hidratasyonundan daha sonra başladığı tespiti yapılmıştır. YFC gibi puzolanik özellik gösteren malzemeler, betonda agreganın ikamesi olarak belirli oranlarda kullanıldıklarında beton içerisinde bulunan boşlukları çok daha iyi dolduracağından dolayı betonun basınç dayanımını artırmaktadır (Gülen, 2015). Ayrıca, YFC'nin çimentonun ikamesi olarak kullanılması durumunda ise %55 oranına kadar tüm cüruf ilaveli betonlar 7 günden önce kontrol betonuna göre daha düşük basınç mukavemeti göstermişlerdir. Genel bir ifade ile, çimentoyla belirli oranlarda yer değiştirilen cüruf miktarı ve su/bağlayıcı oranı ne olursa olsun, cüruf katkılı betonların 7 günlük basınç dayanımları her zaman için kontrol betonlarındakinden daha düşük olmaktadır. Erken dayanımın olması istenilen yerlerdeki betonlarda bu hususa önem verilmesi gereklidir. %25 cüruf katkılı betonların 28 ve 91 günlük dayanımları, kontrol betonlarının dayanımları ile karşılaştırılabilecek düzeyde ya da bir miktar fazla olup, çimento ile %50 oranında yer değiştiren cüruf katkılı betonlarının dayanımı ise biraz daha düşük olmaktadır (Çakıroğlu, 2011; Fernandez ve Malhotra, 1990).

✓ Çekme dayanımı; YFC katkılı betonların çekme mukavemetleri kontrol betonlarıyla karşılaştırıldığında, belli bir YFC yüzdesine kadar biraz daha yüksek olmaktadır. Kontrol betonları ile cüruf katkılı betonların ıslak kür edilmesi, dayanımın artması için oldukça önem taşımaktadır (Fernandez ve Malhotra, 1990). Ayrıca, yapılan araştırmalar YFC katkılı betonların aynı basınç dayanımına sahip çimentolu betonlara kıyasla bir miktar daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir (Fernandez ve Malhotra, 1990; Uygunoğlu, 2006).

2.8 Beton Yol Kaplamalarının Tasarım Yöntemi

Beton yol kaplamalarının projelendirilmesinde hedef; proje trafik ömrü boyunca, yol üzerinde deformasyonların ve çatlak oluşumunun önlenmesi, üzerinden geçen trafiği emniyetli bir şekilde karşılayabilecek beton kaplamanın ve diğer üstyapı tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesi ve üstyapıda kullanılacak malzemelerin özelliklerinin saptanmasıdır (Kök, 2008).

Beton yol kaplamaların esnek kaplamalara nazaran en büyük üstünlükleri, yüksek elastik modülü ve yüksek rijitliklerinden dolayı daha fazla mukavemet gösterebilmeleri, trafik yüklerini kaplamadan yol taban zeminine doğru daha geniş alana iletebilmeleri, çevresel şartlardan daha az etkilenmeleridir. Beton plaklar tüm bu etkilere karşı koymaya çalışırlar. Bu nedenle beton plak kalınlığının bu etkileri karşılayabilecek kapasite olması gerekmektedir. Ayrıca, yol taban zeminin taşıma gücü ve diğer üstyapı tabakalarının uygun bir biçimde belirlenmesi beton kaplama dizaynında önemini korumaktadır. Rijit kaplamanın performansı, betonun mekanik özellikleri ve sağlam bir taban dayanımı ile sağlanabilir. Bu nedenle rijit kaplama dizaynında zemin dayanımı kadar, taban zeminin olumsuz etkileri göz önüne alınarak alttemel tabakası ile bu etkiler kontrol altına alınabilmektedir (Tunç, 2007).

Beton kaplamalı üstyapıların, rijitliği ve elastisite modülü yüksek olduğu için tekrarlı yükler yol taban zemini üzerinde oldukça geniş bir alana iletilmektedir. Bu nedenle beton kaplamalı yollarda yapısal kapasitenin ana kısmını beton plak sağlamaktadır. Esnek kaplamalı üstyapılarda ise bu durumun tam tersi olarak; alttemel, temel ve kaplama tabakaları hep birlikte yapısal kapasiteyi meydana getirmektedir (Kök, 2008; Tunç, 2007).

Beton kaplamada yük taşıma kapasitesinin tamamını rijit plak karşıladığı için, beton yol üstyapı dizaynında esas unsur rijit plağın dayanıklılığıdır. Bu sebeple, alttemel veya temelde oluşacak küçük çaplı değişimlerin, üstyapının yapısal kapasitesine etkisi çok az olmaktadır. Rijit kaplamalarda, kaplama ile yol taban zemini arasındaki tabaka, temel/alttemel tabakası olarak kullanılmaktadır (Kök, 2008).

Temel tabakası beton kaplamalı üstyapılarda kullanıldığında genellikle alttemel ismi almaktadır. Pompaj, don etkisi, drenaj ve şişme-büzülme etkilerinden dolayı kaplama altında temel tabakası kullanılmaktadır (Kök, 2008; TCK, 2019).

2.8.1 Beton yol kaplamalarının tasarımında kritik noktalar

Bir yol üstyapısının dizaynı; en ideal üstyapı tipini, üstyapıyı oluşturacak tabaka kalınlıklarını ve proje hizmet ömrü boyunca etkili malzeme karakteristiklerinin seçimini hedef alır. Dizayn yöntemleri üç başlık altında sınıflandırılabilir: Ampirik, rasyonel ve kataloglar. Rasyonel dizayn yöntemleri üstyapının hizmet ömrü süresince trafik ve çevresel koşullar altındaki davranışının modellenmesi ihtimalini vermektedir (Darter, 1997).

Bir beton yol kaplaması için dizayn verileri genel olarak; trafik yükü, taban zemini reaksiyonu, iklimsel etkiler, betonun dayanımı, beton plak kalınlığı, mevcut üstyapılar ve krtitik saha koşulları olarak sınıflandırılmıştır. Üstyapıların dizaynı daha çok ekonomik imkanlar bağlamında sınırlıdır ve diğer dizayn özellikleri olan fonksiyonellik ve güvenlik ikinci derecede göz önünde bulundurulması gereken parametrelerdir. Bu sebeple, ampirik yöntemlerin ve katalogların daha kısa sürede uygulanabilirlikleri nedeni ile üstyapıların tasarımında daha uygun olacakları değerlendirilmektedir (Desai, 2001).

Üstyapının taşıma kapasitesi; kaplama tabakasında oluşan termal değişimlerden etkilenmektedir. Üstyapının termal modeli; sıcaklık etkisinden, güneşin yaydığı radyasyon ve rüzgârdan etkilenmektedir (Khazanowich, 2000).

Bir üstyapının dizaynında dikkat edilmesi gereken diğer bir faktör ise iklimsel etki ve don etkisidir. Yol taban zemininde oluşabilecek suyun daha üstteki tabakalara doğru yönelimine ve burada ayrılmış halde bulunan yatay buz tabakaları ve lenslerinin oluşumuna neden olarak yukarıya doğru deplasman veya yüzey kabarmalarına neden olur (Darter, 1997).

Rijit üstyapılarda, beton plağın alt tarafında dona karşı direnç gösteren temel/alttemel tabakalarının yapılması önerilmektedir. Ayrıca, yol taban zeminindeki nem miktarı ve su seviyesindeki artış, üst tabakalardaki granüler malzemenin taşıma kapasitesinin azalmasına sebep olabilmektedir (Darter, 1997; Tunç, 2004).

Yüzeysel ve yeraltı sularının yol taban zeminine ve üstyapı tabakalarına verdiği zararın azaltılması için, kaplamada enine eğim, taban zemininde ise drenlerin kurulması gerekli olmaktadır. (Krieger, 1999; Preifer, 2001)

Kırsal yol üstyapılarının dizaynı özel nitelikler gösterir. Çünkü, trafik yükü bu bölgelerde sıklıkla değişkenlik gösterebilmektedir. Bu bakımdan bu tip yollar için trafik tahminlerinin yapımı her zaman oldukça güç olmaktadır. Bu tür yollarda, uygulanması

kolay, yapımı ekonomik ve kayma direnci yüksek üstyapılar tercih edilmelidir (Darter, 1997).

2.8.1.1 Beton yol kaplamalarının tasarımını etkileyen trafik faktörleri

Beton yol kaplamalarında tekrarlı trafik yüklerinin etkisi ile beton plakların alt ve üst bölgelerinde yorulma çatlakları ve bunun sonucunda çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu çatlaklar zamanla artarak plakta kırılmalar ve bozulmalar meydana gelmekte ve bunun neticesinde çatlak bozuklukları, çatlak kabarmaları ve pürüzlülükte artış oluşmaktadır. Ayrıca, tekrarlı trafik yükleri aynı zamanda derzlerde, desteklenmemiş plak sınırlarında ve köşe noktalarda pompaj etkisi ve plağın altında geniş defleksiyonlara neden olurlar. Kayma donatısı, yeterli beton plak kalınlığının sağlanması ile defleksiyon problemleri giderilebilir (Ecevit, 2007; TCK, 2019).

2.8.1.2 Beton yol kaplamalarının tasarımında taban zemininin etkileri

Yol taban zemininin taşıma gücü, trafik yükü ve çevresel etkilerden kaynaklanan beton plak gerilmelerinin büyüklüğüne etki eder. Taban zemininin yük taşıma kapasitesi arttığında gerilmelerin azaldığı ancak termal kıvrılma ve nem kaynaklı eğilme gerilmelerinin arttığı görülmüştür. Tasarım yapılırken yol taban zemininin tipi de önemli bir parametredir. Kullanılan malzemenin özelliğine göre drenaj katsayısı belirlenmektedir (Ağar ve diğ, 1998; Ecevit, 2007).

2.8.1.3 Beton yol kaplamalarının tasarımında iklimin etkileri

İklimsel etkiler üstyapıda önemli defleksiyonlara, gerilmelere ve deformasyonlara sebep olan nem ve sıcaklık değişimlerini kapsar. Sıcaklık ve nem; önemli ölçüde beton plakta çatlamlar ve kıvrılmalar ile eğilme gerilmelerine sebep olurlar. Bu çatlaklar yalnızca nem ve sıcaklık etkisi ile oluştuğu gibi bu etkilerin yük gerilmeleri ile birleşimi ile de meydana gelebilir. Ayrıca, donma-çözülme döngüsü betonun dayanımında azalmalara neden olabilir. Beton plakların ve temel tabakasının alt kısmındaki aşırı nem; yolda bozulmalara ve gerilme çatlamlarının artışına neden olan pompaj ve erozyona neden olur (Ağar ve diğ, 1999; Ecevit, 2007).

2.8.1.4 Beton yol kaplamalarının tasarımında beton dayanımının etkileri

Trafik hacminin fazla olduğu yollarda rijit üstyapılar yüksek dayanıma sahiptirler. Ayrıca, beton yol üstyapının ağır trafik hacmi altında çok iyi performans göstermesinin

nedeni yüksek dayanım gereksinimlerini karşılamalarıdır. Genel olarak, 28 günlük kür süresine tabi betonların basınç dayanımının 35.00 MPa ve eğilmede çekme dayanımının ise yaklaşık 5.00 MPa büyük olması önerilir (Ecevit, 2007).

2.8.1.5 Beton yol kaplamalarının tasarımında plak kalınlığının etkileri

Beton yolda kaplama kalınlığı, çatlak oluşumuna ve yorulmaya karşı dirençli ve yeterli olmalıdır. Ayrıca; tasarımda belirlenen drenaj koşulları, güvenilirlik seviyesi, yatak katsayısı ve diğer parametreler göz önünde bulundurularak beton plakta çatlak oluşmayacak şekilde bir kalınlık projelendirilmelidir (Ecevit, 2007; Tunç, 2007).

2.8.1.6 Beton yol kaplamalarının tasarımında kritik saha koşullarının etkisi

Üstyapının tasarımında birbirinden ayrı özellik gösteren saha koşullarının farklı etkileri vardır. Öncelikle trafik etkisi, iklimsel şartlar ve yol taban zeminini dikkate alınır. Takviye tabakası dizaynında saha koşulları aynı zamanda mevcut üstyapıyı da kapsar. Geometrik yapı elemanları üstyapı dizaynını etkileyen diğer önemli saha koşullarını temsil eder. (Ecevit, 2007).

2.8.2 Karayolu beton yol kaplamalarının tasarım yöntemi

Beton yol dizayn yönteminin amacı; belirli bir bölgedeki gereklilikleri karşılayacak şekilde minimum maliyet ile üstyapının ve bununla ilgili dizayn niteliklerinin belirlenmesidir (Ecevit, 2007; Kök, 2008; Tunç, 2007).

Karayolu beton yol kaplamalarında esnek üstyapılarda olduğu gibi, ampirik, ampirik-analitik ve analitik metotlar kullanılarak tasarlanmaktadır. Ülkemizde TCK Beton Yollar Üstyapı Projelendirme Rehberi kapsamında American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) tarafından yayınlanan AASHTO 1993 tasarım rehberi kullanılmaktadır. AASHTO 1993 Rehberi'nde yük nakli, drenaj katsayısı, elastisite modülleri kullanılarak rijit üstyapıda kullanılan malzemeler elastik modül ile temsil edilmiştir. AASHTO 1993 Rehberi'ne göre, rijit üstyapılarda kullanılan denklem aşağıda (2.1) de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \log_{10} W_{8.2} = & Z_R \times S_0 + 7.35 \times \log_{10}(d+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}[\Delta PSI / (4.5 - 1.5)]}{1 + [1.624 \times 10^7 / (d+1)^{8.46}]} \\ & + (4.22 - 0.32 \times P_t) \times \log_{10} \frac{S'_c \times C_d \times [d^{0.75} - 1.132]}{215.63 \times J \times [d^{0.75} - [18.42 / (E_c / k)^{0.25}]]} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Bu denklemde;

- $W_{8.2}$: 8.2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekerrür sayısı (Proje trafiği)
 Z_R : Standart sapma
 S_0 : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası
 d : Rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı (inç) (0.0254 m)
 P_0 : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi
 P_t : Nihai servis kabiliyeti indeksi
 ΔPSI : $P_0 - P_t$ (Servis kabiliyetinde azalma miktarı)
 S'_c : Betonun kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) (psi) (6.8950×10^3 Pa)
 J : Yük transfer katsayısı
 C_d : Drenaj katsayısı
 E_c : Betonun elastisite modülü (psi) (6.8950×10^3 Pa)
 k : Taban reaksiyon modülü (pci) (27679.90 kg/m^3) göstermektedir.

AASHTO 1993 rijit üstyapı projelendirmesinde kullanılacak veriler dört başlık altında aşağıda verilmiştir.

- ✓ Servis yeteneği (Performans ölçütü)
- ✓ Tasarım değişkenleri; zaman sınırlamaları, performans periyodu, analiz periyodu, trafik, güvenilirlik, çevresel etkiler.
- ✓ Malzeme özellikleri; taban zemini efektif reaksiyon modülü, üstyapı malzemelerinin özellikleri, portland çimentolu betonun kopma modülü.
- ✓ Üstyapı yapısal özellikleri; drenaj, yük nakli, derzli kaplamalar, sürekli kaplamalar.

2.8.2.1 Servis yeteneği (performans ölçütü)

Yol tasarım yönteminde servis yeteneği olarak kabul edilen performans ölçütü değeri 0-5 arasında değişmektedir. Başlangıç servis yeteneği indeksi (p_0), son servis yeteneği indeksi (p_t) şeklinde gösterilir ve (p_0) değeri artış gösteren trafik yükü ve farklı çevresel ve iklimsel şartların etkileri ile kabul edilebilir bir (p_t) (Çizelge 2.9) değerine kadar azalma eğilimi göstermektedir. AASHTO 1993 tasarım dizaynına göre (p_0) değeri beton yol üstyapıları için 4.50 olarak saptanmıştır (TCK, 2019).

Çizelge 2.9 : Performans ölçütü değeri.

Yolun Sınıfı	P_t
Devlet yolları ve otoyollar	2.50
İl yollarında	2.00

2.8.2.2 Tasarım değişkenleri

Tasarım faktörleri dört ana başlık altında ele alınır. Bu değişkenler zaman sınırlamaları, trafik, güvenilirlik ve çevresel etkilerdir.

✓ Zaman sınırlamaları; rijit üstyapı dizaynında “Servis Yeteneği” ve “Analiz Periyodu”nun belirlenmesi için gerekli olmaktadır. Servis yeteneği; yolun hizmet vermeye başladığı andan itibaren ilk takviye tabakasının yapılacağı zamana kadarki süreyi veya birden çok takviye yapılmış olması durumunda takviye faaliyetleri arası süreleri belirtir. Performans periyodu, yolun trafiğe hizmet vermeye başladığı zamandan itibaren ilk bakım ve onarım/yüzey iyileştirmesi/takviye tabakası yapılacağı ana kadar geçen süre şeklinde ifade edilmektedir. Analiz periyodu; performans periyotlarının toplamı şeklinde tanımlanır. Tavsiye edilen analiz süreleri Çizelge 2.10’da gösterilmiştir. Analiz periyotlarının, devlet yolları, il yolları ve otoyollar için 30 yıl olarak belirlenmesi ve bu zaman diliminin aynı zamanda proje süresi olarak alınması tavsiye edilmektedir (TCK, 2019).

Çizelge 2.10 : Analiz periyot süreleri.

Karayolu Durumu	Analiz Periyodu
Yüksek trafik hacmine sahip şehir içi yollar	30-50
Yüksek trafik hacmine sahip şehirlerarası yollar	20-50
Düşük trafik hacmine sahip kaplamalı yollar	15-25
Düşük trafik hacmine sahip stabilize yollar	10-20

✓ Trafik; ilk yıl için belirlenen günlük trafik (t_0) ve trafik artış katsayısı (r) olmak üzere, (t) yıl sonraki günlük trafik Denklem (2.2) ile hesaplanır.

$$t_t = t_0 \times (1+r)^t \quad (2.2)$$

Bu denklemde;

t : Tahmin edilen trafik analiz periyodu (Yıl),

t_t : Trafik analiz periyodu süresinin son yılındaki trafik değeri

t_0 : Trafik analiz periyodu süresinin ilk yılındaki günlük trafik değeri

r : Trafiğin yıllık artış oranı (%)

(t_0) ve (t_t) belirlendikten sonra (t) süresi için ortalama günlük proje trafiği (t_p) Denklem (2.3) yardımıyla hesaplanır.

$$t_p = 0.4343 \times \frac{t_t - t_0}{\log(t_t/t_0)} \quad (2.3)$$

Hesap şeridine düşen günlük standart dingil yükü tekerrür sayısı (W_g) Denklem (2.4) ile hesaplanmaktadır.

$$W_g = t_p \times TEF \times \eta / i \quad (2.4)$$

Bu denklemde;

t_p : Ortalama günlük proje trafiği

TEF : Taşıt eşdeğerlilik faktörleri

η : Şerit dağıtma faktörü

i : Yön dağıtma faktörünü göstermektedir.

Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (TEF); analiz süresince günlük ortalama trafik hacim değerleri taşıt grupları cinsinden verilmiş ise, her bir taşıt grubu sayıları, taşıt eşdeğerlik faktörleri ile çarpılır ve eşdeğer dingil sayısına dönüştürülür. TEF, projesi yapılacak yolu karakterize eden lodometre çalışmaları ve dingil yükü etütleri sonucunda belirlenecek dingil yükü dağılımı ve dingil eşdeğerlik faktörleri yardımı ile hesaplanır. Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri Çizelge 2.11’de sunulmuştur (TCK, 2019).

Çizelge 2.11 : Taşıt eşdeğerlik faktörleri.

Trafik Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörü
Treyler	4.1
Kamyon	2.9
Otobüs	3.2
Orta Yüklü Ticari Taşıt	0.6
Otomobil	0.0006

Şerit Dağıtma Faktörü (η); her iki yönden geçen trafiğin, şerit bazında dağılımının bir göstergesi olup TCK beton yollar üstyapı projelendirme rehberince Çizelge 2.12’de verilen şerit dağıtma faktörleri kullanılır (TCK, 2019).

Çizelge 2.12 : Şerit dağıtma faktörleri.

İki Yöndeki Şerit Sayısı	Şerit Dağıtma Faktörü (η)
2	1
4	0.90
6	0.80
8 veya daha fazla	0.70

Yön Dağıtma Faktörü (i): Hesaplanan eşdeğer dingil yükleri, her yön için bütün şeritlerin toplamlarını ifade eder. Projelendirme kapsamında bu trafik, yön ve şeritler bağlamında dağıtılmalıdır. Yön dağıtma faktörünün genel olarak 0.50 olarak alınması önerilmektedir (TCK, 2019).

Denklem (2.4) kullanılarak her taşıt cinsi için hesaplama yapılır. Hesaplama sonucunda genel toplam $\sum W_g$ değeri belirlenir. Yoldan analiz süresince geçecek toplam trafik yani Toplam Standart Dingil Yüğü Tekerrür Sayısı ($T_{8.2}$) Denklem (2.5) kullanılarak belirlenir.

$$T_{8.2} = \sum W_g \times 365 \times t \quad (2.5)$$

Dingil Eşdeğerlik Faktörleri (DEF); değişik dingil yükü gruplarını “Dingil Eşdeğerlik Faktörleri” kullanılarak standart dingil yükü sayısına dönüştürme işlemidir. DEF; bir dingil yükünün, başka bir dingil yükü ile bağıntısını, üstyapının hizmet yeteneğine olan etkileri yönünden ifade eden sayısal faktördür. AASHTO 1993 Tasarım Rehberinde, 8.2 ton dingil, standart dingil yükü olarak alınmaktadır. Tek dingil yüklerini, Standart Dingil (8.2 ton) sayısına dönüştürmek için Denklem (2.6) aşağıda verilmiştir.

$$X = \left(\frac{P}{P_{8.2}} \right)^n \quad (2.6)$$

Bu denklemde;

X : Dingil Eşdeğerlik Faktörü

P : Dingil Yüğü

$P_{8.2}$: 8.2 ton Dingil Yüğünü göstermektedir.

Genellikle 3.5 ile 4.5 arasında bir değere sahip (n) üssünün ülkemizde 4.4 olarak alınması önerilmektedir.

Güvenilirlik; yolun hizmet ömrü boyunca öngörülemeyen kayıplar sonucu bakım ve onarım ihtimalinin gerekli olabileceğini göz önünde bulundurur. Ayrıca, trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı üstyapının karşı koyması durumu dikkate alınarak meydana gelebilecek aksaklıkları gidermeye çalışır. Güvenilirlik seviyesi (R) değerinin, otoyollar ve devlet yollarında %95 ve il yollarında %85 alınması önerilmektedir. AASHTO 1993 Tasarım Rehberi'ne göre kullanılması önerilen (R) değerleri Çizelge 2.13'de, (R) değerine bağlı olarak Z_R standart normal sapma değeri ise Çizelge 2.14'de verilmiştir (AASHTO, 1993; TCK, 2019).

Çizelge 2.13 : Güvenirlilik seviyesi oranları.

Yol Tipi	(R), %
Otoyollar ve Devlet Yolları	80-99.9
İl Yolları	75-95
Toplayıcı Yollar	75-95
Mahalli Yollar veya Tali Yollar	50-80

Çizelge 2.14 : Standart normal sapma değerleri.

Güvenirlilik (R, %)	Z _R	Güvenirlilik (R, %)	Z _R
50	0	93	-1.476
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.090
92	-1.405	99.99	-3.750

✓ Çevresel Etkiler; sıcaklık farkları ve nem değişiklikleri, gerilme dağılımına, yük taşıma kapasitesine ve üstyapının malzeme özellikleri üzerine etkiler oluşturabilmektedir. Diğer çevresel faktörler ise; yol taban zemininde görülen şişme etkisi, don etkisi vb. diğer etkiler ifade edilebilir. Bu etkiler, üstyapının servis ömrü kabiliyetinde kayıplara neden olacağından dolayı trafiğin seyir kalitesi olumsuz yönde etkilenebilecektir (TCK, 2019).

Şişme, yol taban zemininin nem alarak genişlemesi sonucunda oluşan hacim değişikliği; don kabarması ise, benzer şekilde taban zemininde birikmiş nemin donması sonucu meydana gelen hacim değişikliği olarak ifade edilir.

2.8.2.3 Malzeme özellikleri

Taban zemini yatak katsayısı (k) zemin reaksiyon modülü olarak da adlandırılır. Beton kaplama kalınlığının dizaynından önce (k) zemin reaksiyon modülünün değerinin belirlenmesi veya seçilmesi gereklidir. (k) değeri; birim alana gelen yükün o noktada meydana gelen deformasyona bölünmesi ile hesaplanır (TCK, 2019).

$$k = P/Y \quad (2.7)$$

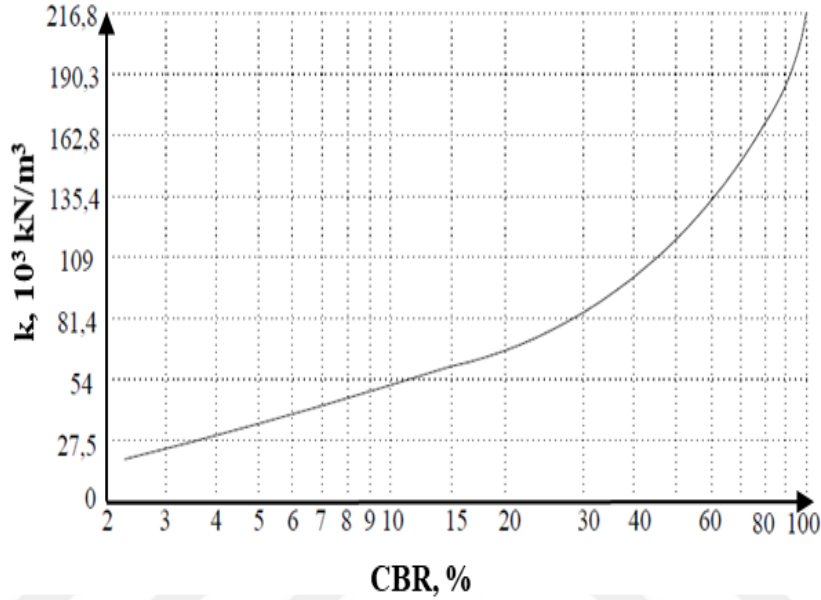
Bu denklemde;

P : Tabana gelen yük (psi) veya (kg/cm²)

Y : Çökme deformasyonu (inç) veya (cm)

k : Yatak katsayısı (psi/inç) veya (kg/cm²/cm)

Taban zeminin taşıma gücü, zeminin yoğunluğuna, cinsine ve nemlilik durumuna göre değişebilmektedir. (k) katsayısı, plak yükleme deneyi ile hesaplanamadığı durumlarda yol tabanının (CBR) değeri bulunur ve Şekil 2.21 kullanılarak eğriden yaklaşık olarak belirlenir (TCK, 2019).



Şekil 2.21 : Yatak katsayısı (k) - (CBR) arasındaki ilişki.

(k) için genelde kullanılan tipik değerler Çizelge 2.15’de verilmiştir (AASHTO, 1993).

Çizelge 2.15 : AASHTO 1993 tasarım yönteminde önerilen yatak katsayısı değerleri.

Zemin Durumu	k (pci)
Çok iyi (Kırmataş)	≥550
İyi (Çakıl)	400-550
Orta (Kum ve killi çakıl)	250-350
Zayıf (Silt ve siltli kil)	150-250
Çok zayıf (plastik kil)	150≤

Beton yol kaplama tabakası altında yer alan malzemede meydana gelebilecek destek kaybı dikkate alınarak beton plak hesaplamalarında k=350 pci alınması önerilmektedir (AASHTO, 1993).

✓ Üstyapı malzemelerinin özellikleri; Elastisite modülü, üstyapı tabakalarının ve üstyapı yol tabanı malzemelerinin mühendislik özelliğini belirtir. Elastisite modülü, normal üstyapı yükleme koşullarında malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkilerine dayanmaktadır. Portland çimentolu beton için E_c şeklinde gösterilir (TCK, 2019).

Betonun elastisite modülü, TS EN 12390-13'e göre tarafından Denklem (2.8) ile bulunması önerilmektedir (Tunç, 2007).

$$E_c = 3250 \times \sqrt{f_{ck}} + 14000 \quad (2.8)$$

Bu denklemde,

E_c : Betonun elastisite modülü (Mpa)

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

AASHTO 1993 Tasarım Rehberinde; betonun Elastisite Modülünün hesaplanması maksadıyla denklem (2.9) kullanılması önerilmiştir (AASHTO, 1993).

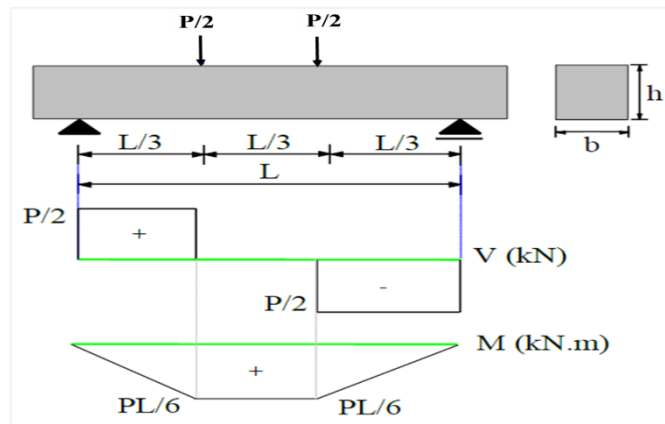
$$E_c = 6750 \times S'_c \quad (2.9)$$

Bu denklemde;

S'_c : Portland çimentolu betonun eğilmede çekme dayanımı, (psi)

E_c : Portland çimentolu betonun elastisite modülü, (psi) göstermektedir.

✓ Portland çimentolu betonun eğilmede çekme dayanımı; beton yol kaplamalı üstyapıların tasarımında kullanılmaktadır. Eğilmede çekme dayanımı (S'_c); kırılma anında ulaşılan en büyük eğilme çekme gerilmesi şeklinde de tanımlanabilir. Eğilmede çekme dayanımı, beton kirişlerin (28 günlük) orta nokta veya üç nokta yüklemesi (Şekil 2.22) ile hesaplanmaktadır (TCK, 2019).



Şekil 2.22 : Üçte bir nokta yüklemesi altında oluşan kesme ve moment diyagramları.

Bu kapsamda, üçte bir nokta yüklemesi için Denklem (2.10) ve orta nokta yükleme durumu için Denklem (2.11) bağıntıları kullanılmaktadır (TCK, 2019).

$$S'_c = (P \times L) / (b \times h^2) \quad (2.10)$$

$$S'_c = (3 \times P \times L) / (2 \times b \times h^2) \quad (2.11)$$

Burada; S'_c , eğilmede çekme dayanımı; h , kiriş yüksekliğini; b , kiriş genişliğini; P , uygulanan yükü ve L ise uzunluk olarak ifade edilmektedir.

AASHTO 1993 dizayn yöntemine göre, beton sınıfının minimum C 30/37 seçilerek hesaplamaların yapılması tavsiye edilmektedir (AASHTO, 1993).

2.8.2.4 Üstyapının yapısal özellikleri

Üstyapının yapısal özellikleri; drenaj, yük nakli ve destek kaybı olmak üzere üç bölümde incelenmektedir (TCK, 2019).

✓ Drenaj; beton kaplamalı yollarda drenaj katsayısı (C_d) için kullanılması önerilen değerler Çizelge 2.16'da verilmiştir. AASHTO deneme yolunda serbest suyun bir haftada boşaldığı kabul edilmiştir. Tasarım hesaplamalarında $C_d=1.0$ alınması önerilmektedir (AASHTO, 1993).

Çizelge 2.16 : Drenaj katsayısı değerleri.

Drenaj Kalitesi	Serbest Suyun Boşalma Süresi	Kaplamanın su içeriğine maruz kaldığı sürenin yüzdesi			
		%1-5	%1-5	%5-25	>%25
Çok İyi	1 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
Orta	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	Su drene edilemez	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Yük nakli; beton yol kaplamalarında oluşan yükü dağıtabilme yeteneği için yük transfer katsayısı (J) kullanılmaktadır. Beton kaplamaya etki eden yükü derz ve çatlak gibi süreksizlik gösteren bölgelerde bir plaktan diğer plaklara aktarılması için agrega kenetlenmesi, donatı ve bağlantılı banket betonu gerekli olmaktadır. Çizelge 2.17'de yük transfer katsayıları (J) gösterilmiştir.

Çizelge 2.17 : Yük transfer katsayıları.

Banket	Asfalt		Beton Kaplama	
Yük Transferi	Var	Yok	Var	Yok
Kaplama Tipi				
Donatılı/Donatısız Derzli	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Sürekli Donatılı Betonarme	2.9 - 3.2	-	2.3 - 2.9	-

2.8.3 Havaalanı beton yol kaplamalarının tasarım yöntemi

Havaalanı üstyapı tipleri; kullanılan metot ve malzeme özelliklerine göre; esnek, rijit (beton kaplamalı) ve kompozit üstyapı olmak üzere üç şekilde inşa edilmektedir. Beton kaplamalı üstyapı, beton veya betonarme plaklardan meydana gelir. Yapısal parametreler beton plak kaplama, temel/altemel tabakası ve yol taban zeminidir. Esnek üstyapı, yük altında elastik davranış gösteren ve kabul edilebilir deformasyonlara imkan sağlayan üstyapıdır. Yapısal parametreleri; bitümlü sıcak karışım tabakası, temel ve altemel tabakası ile yol taban zeminidir. Kompozit üstyapı ise, deforme olmuş beton kaplamanın üzerine bitümlü sıcak karışım kaplaması veya deforme olmuş bitümlü karışım tabakası üzerine rijit kaplama inşa edilmesiyle oluşan üstyapıdır (Tunç, 2003).

Havaalanı üstyapıları; pist, apron ve taksiyolları olmak üzere üç ana başlık altında incelenir.

- ✓ Pist; uçakların iniş ve kalkışları için yapılmış havaalanı üstyapı bölgesi üzerindeki belirlenmiş bölgelerdir.
- ✓ Apron; uçakların yolcu ve yük indirip bindirme, park etme, yakıt ikmali ve bakım gibi maksatlarla durması için belirlenmiş bölgedir.
- ✓ Taksiyolu; uçakların geçiş yapmaları için hazırlanmış ve havaalanının bölümleri arasında bağlantı sağlayabilme amacıyla belirlenmiş yoldur.

Bu ana başlıklara ilave olarak, hava şartları, uçağın mekaniksel sorunları veya buna benzer nedenlerden dolayı zamanında duramayan bir uçağın zarar görme ihtimalini azaltmak amacıyla pist sonuna inşa edilmiş; emniyet ve aşma bölgeleri diye isimlendirilen bölümlerde üstyapı bölümleri adı altında yer almaktadır.

Havaalanı üstyapı bölgelerinin şematik gösterimi Şekil 2.23’de verilmiştir.



Şekil 2.23 : Havaalanı üstyapı bölgelerinin şematik gösterimi.

Havaalanı üstyapıları; uçak yüklerini emniyetle karşılayabilen, doğal veya taşıma gücü artırılmış zemin üzerindeki tüm tabakaları kapsayan alanlardır. Bu bölgeler genellikle üstyapı bölgeleri olarak adlandırılmaktadır. Üstyapı kaplama tabakası, her türlü hava şartlarında güvenli sürüşü karşılayabilecek şekilde olmalıdır. Üstyapı tabakalarının kalınlıkları; etki eden yüklerden dolayı bozulmaya neden olmayacak şekilde yeterli kalınlıkta olmalıdır.

Ülkemizde havaalanı rijit üstyapı tasarım yöntemi olarak Federal Havacılık Yönetiminin önerdiği FAARFIELD tasarım programı kullanılmaktadır (FAA, 2021).

2.8.3.1 FAARFIELD metodu ile havaalanı rijit kaplama tasarımı

Havaalanı üstyapı kalınlık tasarımı, elastik tabakalı veya üç boyutlu sonlu eleman tabanlı bir yapısal analiz programı kullanılarak yapılmaktadır. Katmanlı elastik ve üç boyutlu sonlu eleman tabanlı tasarım kuramları üzerinde karmaşık dişli ve tekerlek düzenlemelerin etkisi incelenmiştir. Bu hesaplama için FAA tarafından FAARFIELD isimli bir bilgisayar programı geliştirmiştir. FAARFIELD’de toplam hasar, belirli bir trafik karışımı içinde her bir uçağın katkısının ayrı ayrı analiz edildiği kümülatif hasar faktör (Cumulative Damage Factor, CDF) konseptine dayanmaktadır. Yapısal hesaplamaları FAARFIELD içinde üç ana alt program tarafından gerçekleştirilir. Bu alt programlar LEAF (layered elastic analysis), FAAMesh (three-dimensional mesh generation for finite element analysis) ve FAASR3D (finite element processing) olarak adlandırılır. Uygun bir üstyapı

tasarımı için uçakların özellikleri programın alt bölümlerinde yer almaktadır. FAARFIELD tasarım yönteminde uçaklar farklı gruplara ayrılmıştır. Tasarımcı uçak ağırlıkları ve frekanslarını seçme ve ayarlama durumundadır. Üstyapı dizayn yönteminde uçağın toplam ağırlığı esas alınmaktadır. Üstyapı, uçağın maksimum kalkış ağırlığı için tasarlanmış olmalıdır. Tasarım; uçağın brüt ağırlığının %95'inin ana iniş takımları tarafından ve %5'inin ise iniş takımının taşıdığını varsayar. FAARFIELD tasarım programı, birçok askeri ve sivil uçaklar için üretici tarafından belirtilen brüt çalışma ağırlıklarını içerisinde bulundurmaktadır (FAA, 2021).

Uçak tipine göre yıllık kalkış tahminleri üstyapı tasarımı için önemli olmaktadır. FAARFIELD, tasarım ömrü boyunca toplam kalkış sayısını değerlendirir. Örneğin, FAARFIELD, %0'lık bir büyüme oranı ve 20 yıllık tasarım ömrü ile yıllık 250 kalkış yapan ve toplamda 5000 kalkış yapan üstyapıyı karşılayacak şekilde kabul yapar. Tasarımda, bir tesisi kullanan tüm uçakları dahil etmek her zaman gerekli değildir, bu tesisi kullanan en ağır ve geniş uçakları dikkate almak yeterlidir (FAA, 2021).

Federal Havacılık Yönetiminin (06 Temmuz 2021), AC No: 150/5320-6G numarasıyla yayınladığı genelgede FAARFIELD tasarım programında kullanılan kümülatif hasar faktörü (CDF), toplam uçak yükünün verdiği hasar miktarının hesaplanması olarak açıklanmıştır. Buna göre CDF Denklem (2.12) veya (2.13) ile hesaplanabilir.

$$CDF = (\text{Uygulanan yük tekrar sayısı}) / (\text{Başarısızlığa izin verilen tekrar sayısı}) \quad (2.12)$$

$$CDF = [(\text{Yıllık kalkış}) \times (\text{Proje ömrü})] / [(\text{Geçiş/Karşılama}) \times (\text{Başarısız karşılama})] \quad (2.13)$$

Çizelge 2.18'de farklı CDF değerlerine bağlı olarak üstyapının durumu verilmiştir.

Çizelge 2.18 : Farklı kümülatif hasar faktörü değerlerinin üstyapıya etkisi.

CDF değeri	Üstyapının kalan ömrü
1	Üstyapı yorulma ömrü kadar tamamen kullandı.
<1	Üstyapının biraz ömrü var ve CDF değeri kullanılan yaşam değerini verir.
>1	Üstyapı yorulma ömrünü aştı.

FAARFIELD tasarım süreci, beton panelin aşağıdan yukarıya çatlaması olan rijit kaplama için yalnızca bir kırılma modunu dikkate almaktadır. Beton panelin altındaki yatay gerilme sınırlanarak çatlama kontrol edilmektedir. Rijit üstyapı tasarım modeli, alttemel ve zemin katmanlarının bozulmasını açıkça dikkate almaz. FAARFIELD, tasarım koşullarını

karşılayan CDF 1.0 değerine ulaşana kadar beton katman kalınlığını yineler. FAARFIELD, beton kalınlığını uçağın ağırlığına bağlı olarak izin verilen minimum kalınlığın altına indirmez. Minimum kalınlığa ulaşırsa, tasarım süreci $CDF < 1.0$ ile durdurulur ve tasarım raporunda "Minimum katman kalınlığı kontrolü, CDF analizi tamamlanmadı." ifadesi gösterilir (FAA, 2021).

Beton Yüzey Tabakası; Beton yüzey kaymaz bir doku sağlar, yüzey suyunun alt zemine sızmasını en aza indirir ve uçak yüklemesi için yapısal destek sağlar. Beton için modül değeri FAARFIELD'de 4000000 psi (27580 MPa) olarak sabitlenmiştir ve poisson oranı 0.15 olarak belirlenmiştir.

Temel ve alttemel tabakası; rijit kaplama panelleri için yekpare bir destek sağlar. 100000 poundun üzerindeki uçaklara hizmet etmek üzere tasarlanmış üstyapıların altındaki temel için stabilize edilmiş temel gereklidir.

Çizelge 2.19 : FAA yönteminde kullanılan malzemelerin özellikleri.

Şartname	Açıklaması
P-501	Portland çimentolu beton kaplama
P-401/P-403	Stabilize temel tabakası
P-307/P-306	Stabilize edilmemiş temel tabakası
P-304	Çimento bazlı temel tabakası
P-209	Kırmataş temel tabakası
P-208	Stabilize edilmemiş temel tabakası
P-154	Alttemel tabakası

FAA yönteminde, rijit kaplamada (P-501), rijit kaplamalar altında kullanım için kabul edilebilir malzemeler: stabilize temel (P-401, P-403, P-307, P-306, P-304) ve stabilize edilmemiş temel/alttemel (P-209, P-208, P-154) kullanılmaktadır (Çizelge 2.19).

FAA (2021), AC No:150/5320-6G numarasıyla yayımladığı genelgede, rijit üstyapıların taban zemini için modül (E değeri) değerinin belirlenmesinde, zemin reaksiyon (k) modülü kullanılabilmektedir. (E) değerine dönüştürülen bir (k) değeri Denklem (2.14) yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$E_{SG} = 20.15 \times k^{1.284} \quad (2.14)$$

Bu denklemde;

E_{SG} : Zemin elastik modülü (psi)

k: Zemin reaksiyon modülünü (pci) göstermektedir.

Bununla birlikte (k) değeri CBR ile bağlantılı olarak Denklem (2.15)'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$k = 28.6926 \times \text{CBR}^{0.7788} \quad (k, \text{pci}) \quad (2.15)$$

veya CBR ile elastik modül (E) için aşağıdaki Denklem (2.16)'da verilen formül kullanılabilir.

$$E = 1500 \times \text{CBR} \quad (E, \text{psi}) \quad (2.16)$$

FAARFIELD, uçak iniş takımının beton panel altında oluşturduğu maksimum gerilme varsayımına dayalı olarak panel kalınlığını hesaplar. Yukarıdan aşağıya çatlaklara neden olan yükler (köşe yükleri gibi) tasarım için dikkate alınmaz. FAARFIELD, rijit kaplama yapılarında beton panel dışındaki katmanların kalınlığını hesaplamaz. Rijit kaplama yapısının diğer tabakalarının kalınlıkları, kullanıcı tarafından seçilmiş olmalıdır. FAARFIELD, diğer tabakalar için minimum kalınlık gereksinimlerini uygulayar. Ayrıca, FAARFIELD, aşağıdaki beş alandan tasarım girdi verilerini gerektirir: tasarım ömrü (yıl), beton eğilme dayanımı (psi), yapısal katman verileri (tip ve kalınlık), taban modülü (k veya E) ve uçak trafik karışımı (tip, ağırlık, frekans). Minimumdan daha büyük kalınlıklar için, kaplama kalınlığını en yakın 0.5 inç (1 cm) olacak şekilde yuvarlanır.

Tasarım kapsamında FAARFIELD tarafından önerilen Minimum tabaka kalınlıkları Çizelge 2.20'de, Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi kullanılarak yapılacak tasarım kapsamında zemin türü ve özellikleri ise Çizelge 2.21'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.20 : FAARFIELD tasarım yönteminde önerilen rijit kaplama minimum tabaka kalınlıkları.

Tabaka Tipi	FAA Şartname	Kaplama Etki Eden Maksimum Uçak Net Ağırlığı, lbs (kg)		
		<60000 (27215)	<100000 (45360)	≥100000 (45360)
Rijit üstyapı	P-501	6 in (150 mm)	6 in (150 mm)	6 in (150 mm)
Stabilize temel	P-401 ya da P-403; P-304; P-306	Gerekli değil	Gerekli değil	5 in (125 mm)
Temel	P-209, P-207, P-208, P-210, P-211, P-212, P-213, P-219, P-220	Gerekli değil	6 in (150 mm)	6 in (150 mm)
Alttemel	P-154	6 in (150 mm)	-	-

Çizelge 2.21: Birleşik zemin sınıflandırma sistemi.

Karışım Kodu		Grup sembolü	Zemin Modülü (k) (pci)
İri taneli zemin	Çakıllı zemin	GW	≥ 300
		GP	≥ 300
		GU	≥ 300
		GM	≥ 300
		GC	$200 \geq k \geq 300$
	Kumlu zemin	SW	$200 \geq k \geq 300$
		SP	$200 \geq k \geq 300$
		SU	$200 \geq k \geq 300$
		SM	$200 \geq k \geq 300$
		SC	$200 \geq k \geq 300$
İnce taneli zemin	Düşük Plastisiteli Siltler ve Killer (LL<50)	ML	$100 \geq k \geq 200$
		CL	$100 \geq k \geq 200$
		OL	$100 \geq k \geq 200$
	Yüksek Plastisiteli Siltler ve Killer (LL>50)	MH	$100 \geq k \geq 200$
		CH	$50 \geq k \geq 100$
		OH	$50 \geq k \geq 100$

2.9 Literatür Özetleri

Betona lif ve cüruf ilavesi sonucu betonun özelliklerinde oluşacak değişiklikleri araştırmak amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda daha çok lif ve cüruf katkısı ile betonun işlenebilmesi, basınç, çekme ve eğilme dayanımlarıyla donma çözülme ve aşınma gibi özellikleri araştırılarak varılan sonuçlar belirtilmiştir. Bu konuda yapılan ve önem arz eden araştırmalar ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

2.9.1 Lifli betonlarla ilgili literatür özeti

Yığiter (2002) yaptığı çalışmada; liflerin beton içerisine ilave edilme oranının hacimsel olarak %0.50–2.50 arasında olabileceğini, bu belirlenen değerden daha az ilave edilmesi durumunda önemli bir etki sağlanamayacağını, bunun sebebinin, yüksek oranda katılmış liflerin karışım sırasında topaklaşıp liflerin homojen dağılmaması olduğunu belirtmiştir.

Lifli katkılı betonların geleneksel betonların özelliklerini geliştirmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda; çelik lif katkısının, betonda çatlak oluşumunu önemli oranda azaltmasının yanında şekil değiştirme kapasitesi, tokluk, süneklik, yorulma, darbe direnci, azaltılmış sünme, büzülme çatlaması, geçirgenlik ve betonun çatlama sonrası davranışında

önemli gelişmeler sağladığı tespit edilmiştir. (Meng ve Khayat, 2017; Cao ve diğ, 2017; Ozyurt ve diğ, 2007; Altun ve diğ, 2007; Köksal ve diğ, 2002; Silva ve diğ, 2017; Ahmad ve Umar, 2018; Kazemi ve diğ, 2017; Sirijaroonchai ve diğ, 2010; Lee, 2017).

Qian ve Stroeven (2000), betonun yük altında yarmada çekme ve eğilme davranışlarını incelemiştir. Küçük boyutlardaki polipropilen liflerin yeterli dayanımı sağlamayacağı, ancak çelik liflerin kullanılması halinde yeterli dayanımın sağlanacağını savunmuşlardır. Ayrıca, çelik lif oranının arttıkça dayanımın daha da artacağını belirtmişlerdir.

Lofgren (2005) ile Abut ve diğ, (2022), betonda makro çelik lifler ile ilgili yapmış olduğu çalışmada, beton içerisinde çatlakların mikro seviyede başlayıp orta ve makro seviyeye ilerlediği, beton yollarda önemli bir sorun teşkil eden bu çatlakları engellemenin makro çelik lifi beton içerisine takviye etmek olduğunu, böylece makro çelik liflerin çatlakların ilerlemesine ve makro çatlaklara engel olabileceğini belirtmiştir.

Can ve diğ, (2009) beton yolların aşınmaya maruz kaldığını göz önünde tutarak beton yollarda kullanılabilecek çelik lif kullanımını normal betonla kıyaslayarak aşınma direnci etkisini araştırmışlardır. Kontrol ve çelik lifli betonlardan 1x2 m² ebatlarında 20 cm kalınlığında bloklar üretilip bu bloklardan 10x20 cm ebatlarında karotlar alındıktan sonra aşınma testi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları neticesinde çelik lif katkılı betonların aşınma direncinin daha yüksek olduğunu saptamışlardır.

Hasani ve diğ, (2021) çelik ve sentetik liflerin beton kaplama performansına etkilerini araştırmak için bazı deneysel testler yapmışlardır. Bu çalışmadaki sentetik lif, modifiye sentetik polipropilen lifdir. Düz ve lif takviyeli beton numunelerine eğilme ve basınç dayanımı ve dayanıklılık testleri uygulamışlardır. Sonuç olarak, beton kaplamalarda modifiye sentetik polipropilen lif kullanımının basınç ve eğilme dayanımını, sünekliği ve enerji emilimini artırdığını ve betonun donma-çözülme çevrimlerine karşı direncini azalttığını görmüşlerdir. Benzer şekilde çelik lifle güçlendirilmiş betonun, modifiye sentetik polipropilen lifle güçlendirilmiş betondan daha iyi eğilme performansına ve daha düşük basınç dayanımına ve işlenebilirliğe sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Çelik lif katkılı betonlarla ilgili gerçekleştirilmiş araştırmalarda; lif etkisinin betonun basınç dayanımında yaklaşık ± 25 etkiye sahip olduğu, eğilme dayanımındaki etkisinin çekme ve basınç dayanımındaki etkisinden daha fazla olduğu, nihai eğilme dayanımının normal betonlara göre %50'ye kadar daha yüksek tespit edildiği, çekme dayanımının ise

geleneksel betonlara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde liflerin betonun basınç dayanımı üzerinde önemli etkisinin bulunmadığı, %5.10 ile %9.59 oranlarında dayanımda azalmaya sebep olduğu, eğilme dayanımında ise ortalama %21.15 dayanım artışı meydana geldiği tespit edilmiştir (Min ve diğ, 2021; Juhong ve diğ, 2019; Ahmmad ve diğ, 2019).

Topçu (2006) ve Yazıcı (2007), Al-Baijat ve Sarireh (2019) farklı oranlarda çelik lif kullanılarak yaptıkları çalışmalarda özellikle %0.80 çelik lif oranından sonra beton karışımlarının işlenebilirlik yeteneğinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Song ve diğ, (2004) ile Jawad ve diğ, (2021) yaptıkları çalışmada, beton hacminin %0.50, %1.00, %1.50, %2.00 oranında çelik lif ilave ederek beton numuneleri üretmişlerdir. Daha sonra, numuneler üzerinde yapılan basınç ve eğilme deneyleri sonucuna göre çelik lif katkısı ile basınç dayanımında çok az azalma olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, çelik lif miktarına bağlı olarak eğilmede çekme dayanımında artış oluştuğunu tespit etmişlerdir. Tokluk indisi değerinin ise çelik lif miktarının artışı ile arttığını belirlemişlerdir.

Nataraja ve diğ, (1999) yaptıkları çalışmada beton içerisine, beton hacminin %0.50, %0.75 ve %1.00 (39, 59 ve 78 kg/m³) oranlarında çelik lif katmışlardır. Daha sonra eğilme dayanımı deneylerini yapmış ve betona ait birim gerilme eğrilerini incelemişlerdir. İnceleme neticesinde, tokluk oranlarının çelik lif miktarının artışı ile doğru orantılı olarak arttığını tespit etmişlerdir.

Uğurlu (1999) ve Lin (2021), çelik lif katkılı betonların basınç yükü etkisindeki davranışları incelemiş, liflerin betonun basınç dayanımında her zaman olumlu bir etkisinin olmadığı gözlemlemiştir. Çelik lif katkısının bazen betonun basınç dayanımını arttırırken bazen de dayanım kayıplarına sebebiyet verdiğini tespit etmiştir. Ayrıca liflerin uygulanan basınç yüküne göre yöneliminin, lifli betonların basınç dayanımı üzerinde etkili olduğunu belirlemiştir.

Tabak (2004), çelik lif oranının ve lif hacminin, betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi incelemiştir. Bu maksatla, narinlik oranı 45, 65 ve 80 olan üç farklı çelik lifi, %0, %1.00 ve %1.50 oranlarında kullanılarak on farklı karışım numuneleri üretmiştir. Daha sonra bu numuneler üzerinde basınç, yarmada çekme, dört noktadan yüklemeli eğilme deneyleri, ultrases hızı ölçümleri ve darbe deneyleri yapmıştır. Sonuçta, betonun eğilme dayanımının %3 ile %81 arasında değişen değerlerde arttığını gözlemlemiştir.

Altun ve diğ, (2011) yaptıkları çalışmada; farklı dayanıma sahip betonlara çelik teller 0, 30 ve 60 kg/m³ dozajlarında katılarak kiriş numuneler imal etmişlerdir. Çelik tel katkısız numuneler kontrol amaçlı üretilmiştir. Numuneler 28 gün sonunda eğilme deneyi ile kırılmış ve yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Deney neticesinde, çelik tellerin eğilme dayanımını, tokluk indeksini ve eğilme tokluğunu önemli derece geliştirdiği, enerji yutma kapasitelerinde ise artış sağladığı görülmüştür.

Soroushian ve Bayasi (1991) ile Mauricio (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, lif tipinin lif donatılı betonların performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Narinlikleri aynı olan farklı geometrilere sahip liflerle yapılan deneyler sonucunda lif katkılı betonların betonun işlenebilirliğini genel olarak düşürdüğü gözlenmiştir.

Bayramov (2004) tarafından, farklı narinlik oranlarına sahip çelik lifler, farklı oranlarda kullanılmış ve çelik lif donatılı betonların mekanik davranışına yönelik bu çalışma kapsamında, betonların yarmada çekme dayanımının arttığı, bu artışın narinliği 65 olan liflerde daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

Nili ve Afroughsabet (2010) çalışmalarında su/çimento oranları 0.36 ve 0.46 olan çelik lif ilaveli betonların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında çelik lifler %0, %0.50, %1.00 oranlarında betona katılmıştır. Lifler 60 mm ve 80 mm boyunda kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, çelik liflerin özellikle betonun yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında göstermiş oldukları performansa dikkat çekmişlerdir.

Aral (2006) yaptığı çalışmada; çelik liflerin mekanik özelliklerini incelemek için kancalı ve/veya kancasız üç tür çelik lif kullanılmıştır. Farklı lif içeren lifli ve lifsiz 12 adet beton karışımı üretilmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda, çelik lif katkılı betonların serleşmiş beton özellikleri çelik lif içermeyen betonlar ile karşılaştırılmıştır. En yüksek süneklik, kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımının çelik lif katkılı betonlardan elde edildiğini tespit etmiştir.

Ünal ve diğ, (2007) yaptıkları çalışmada; çelik lif ilaveli betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda narinlik oranları 60 ve 80 olan iki farklı lif ve 0 (kontrol), 15, 30, 45 ve 60 kg/m³ olmak üzere beş farklı lif kullanılmıştır. Sonuçta betona katılan çelik liflerin, betonun gerilme-şekil değiştirme yeteneğini ve eğilme dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir.

Çakıroğlu ve diğ, (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı geometrik şekillerdeki çelik liflerin beton içerisine ilave edilmesiyle betonun dayanımına olan etkisi

araştırılmıştır. TS 10513'e uygun olarak dört farklı tip çelik lif kullanılmıştır. Bunlar, kancalı, dalgalı, iki ucu çengelli, düz ve kancalı uçlu liflerdir. Lif oranları ise 20 kg/m³, 30 kg/m³ ve 40 kg/m³ olarak betona katılmıştır. Sonuçta, lifsiz numunelerin basınç dayanımlarının lifli numunelere göre yüksek olduğu gözlenmiştir.

Uygunoğlu (2006) yaptığı çalışmada, betona hacimce %0, %0.50, %1.00 oranlarında çelik lif ilave ederek betonun gerilme şekil değiştirme ilişkileri araştırmıştır. Narinliği 60 olan kancalı çelik lif, çimento dozajı 350 kg/m³ ve s/ç oranı 0.63 alınmıştır. Sonuçta, betona çelik ilavesinin betonun gerilme-şekil değiştirme davranışını çok fazla artırdığı ifade edilmiştir. Liflerin betonların basınç dayanımına etkisinin ise yönelim ve dağılımlarından dolayı hem olumlu hem de olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir.

Song ve Hawing (2004) yapıları araştırmalarında, narinliği 65 olan, 35 mm uzunluğunda %0.50, %1.00, %1.50, %2.00 oranlarında çelik lifler kullanılmıştır. Deneyler neticesinde, 35 mm uzunluğundaki çelik lifler için basınç dayanımının %1.50 oranına kadar çelik lif ile doğru orantılı arttığı belirtilmiştir. Çekme dayanımının ise %0.50 çelik lif oranında %19 ve %2 çelik lif oranında %98.30 oranına kadar artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

Ünal (1994) yaptığı çalışmada, betonun çimento dozajı 325 kg, s/ç oranı 0.60 ve basınç dayanımı 30 MPa olarak tasarlanmıştır. narinlik oranları 60 ve 80 olan iki lif tipi kullanılmıştır. Lif miktarları ağırlıkça 0 kg, 15 kg, 30 kg, 45 kg, 60 kg olacak şekilde beş farklı oranda kullanılmıştır. Sonuçta, betona lif ilavesinin betonun çökme değerini azalttığı belirtilmiştir. İşlenebilirlik ise lif miktarı arttıkça ters orantılı şekilde azalmıştır. Ayrıca, çelik lifler betonun tokluğunu artırmış, betonun basınç dayanımında olumlu ve olumsuz yönde etkiler belirlenmiş, eğilme dayanımındaki artışın lif narinliği ile doğru orantılı olduğu bildirilmiştir.

Taşdemir ve diğ., (2009) yaptıkları çalışmada; 80, 65 ve 55 olmak üzere üç farklı narinlikteki uçları kancalı çelik lifler kullanılmıştır. Karışımlarda 350 kg/m³ CEMI 42,5R türü çimento, kimyasal katkı çimento ağırlığının %1.35-%1.65'i arasında değişen oranlarda kullanılmıştır. Numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, çelik lif oranının artışının beton basınç dayanımına etkisinin olmadığı, çelik lif katkılı betonun çekme ve eğilme dayanımının arttığı belirlenmiştir.

Salami (2009) yaptığı araştırma çalışmasında, çelik lif katkılı betonların mekanik özelliklerini incelemiştir. Maksimum tane çapı 16 mm ve narinlikleri 64, 67, 45 olan üç tip çelik lif kullanılmıştır. Çelik lifler %0.25, %0.75 ve %1.25 oranında kullanılmıştır. Sonuç

olarak, betonun basınç dayanımı lif katkısız beton ile kıyaslandığında sırasıyla %11.11, %10.54 ve %19 azalmıştır. Çelik lif oranı arttıkça betonun yarmada çekme dayanımı artmaktadır.

Eren ve Çelik (1997) gerçekleştirdikleri çalışmada, betona narinliği 60, 75 ve 83 olan ve hacimce %0.50, %1.00, ve %2.00 oranlarında çelik lif ilave ederek deneysel araştırmalar yapmışlardır. Sonuçta, lif hacmi oranı arttıkça betonun işlenebilirliğinin azaldığını, çelik liflerin betona ilavesiyle eğilme ve yarmada çekme dayanımında artış sağlandığı bildirilmiştir.

2.9.2 Puzolan katkılı betonlarla ilgili literatür özeti

Puzolan katkılı betonlarla ilgili yapılmış araştırmalarda, betonun özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra bağlayıcı olan çimentonun yerine ikame olarak puzolanların kullanılması ile dayanımın nasıl değiştiği araştırılmıştır. Puzolan katkılı betonlar ile ilgili çalışmalar ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Öner ve Akyüz (2007) yaptıkları çalışmada, aynı işlenebilirlik için betondaki YFC miktarının artmasıyla karışımın su/bağlayıcı oranının azaldığını, bunun sonucunda da YFC'nin işlenebilirlik üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu bildirmişlerdir.

Yeau ve Kim (2005) çalışmalarında, YFC'nin gizli bağlayıcılık özelliğinin, artan cüruf yer değiştirme oranıyla birlikte erken yaşlardaki basınç mukavemeti gelişimini yavaşlattığı, ancak 28, 56 ve 91 gün gibi sonraki yaşlarda YFC'li betonların basınç mukavemetlerinin kontrol betonlarının dayanımına benzer ya da daha fazla olduğunu göstermiştir.

Fernandez ve Malhotra (1990) ve Sethuraman (2020) göre, cüruf içeren betonların 7 günlük basınç mukavemetleri her zaman için kontrol betonuna göre daha düşüktür. Erken mukavemetin istendiği bölgelerde bu duruma dikkat edilmesi önemlidir. Ayrıca, %25 cüruf katkılı betonların 28 ve 91 günlük dayanımları, kontrol betonlarının dayanımından bir miktar daha fazla olmaktadır.

Bilim (2006), beton basınç dayanımına YFC katkısının olumlu etkisinin, normal şartlarda 28. günden sonra kendini gösterdiğini bildirmektedir.

Yazıcı ve Baradan (1995), çimentonun ikamesi olarak YFC'nin %30 ve %40 gibi yüksek oranlarda yer değiştirilmesinin, özellikle erken yaşlarda bir miktar düşmeye yol

açtığını; fakat puzolanik reaksiyonun ile birlikte 28 günlük dayanımlarda bu farkın azaldığını belirtmektedir.

Öner ve Akyüz (2007) çalışmalarında, YFC katkılı betonun basınç dayanım değerinin arttığını, yaklaşık %25 oranındaki optimum bir değerden sonra ise YFC miktarındaki artışın basınç dayanımını iyileştirmedeğini belirtmişlerdir.

Yaprak ve diğ. (2004) gerçekleştirdikleri araştırmalarda; çimento ikamesi olarak %0, %10, %20 ve %30 oranlarında YFC kullanılarak beton numuneleri hazırlamış, bu numuneler üzerinde çökme, basınç ve yarmada çekme testleri yapmışlardır. Bu çalışma neticesinde, betonda YFC ikame oranı arttıkça ileriki yaşlarda basınç dayanımlarının %20'ye kadar arttığını, %30 ikame oranında ise azaldığını tespit etmişlerdir.

Öner ve Akyüz (2007) yapmış oldukları çalışmada çimento ikamesi olarak YFC'nin optimum seviyesini araştırmaya çalışmışlardır. Yapılan çalışmalarda dört farklı dozaj grubu (250, 300, 350 ve 400 kg/m³) belirlenip bu dozajlarda kontrol betonunun içerisindeki portland çimentosunun %0 ile %110'a kadar yüksek fırın cürufu kullanılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelere 365 gün standart kür uygulandıktan sonra basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre yüksek fırın cürufu ikamesinin basınç dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Megat Johari ve diğ. (2011), yapmış oldukları çalışmada portland çimentosunu %60 oranına kadar %20'lik artışlar ile yüksek fırın cürufu ile değiştirip 28 günlük elastite modüllerini ölçmüşlerdir. Deney sonuçlarına göre sırası ile %0, %20, %40 ve %60 YFC'li numunelerin elastite modülleri 44.58, 45.02, 44.84 ve 43.09 MPa olarak hesaplanmıştır. YFC'li betonlarda düşük bir miktar daha yüksek elastite modülü elde edilmiştir.

Sivasundaram ve Malhotra (1992), üç farklı dozaj grubunda (100, 125, 150 kg/m³) dozajların %50'si ile %75'i arasında YFC ikamesi kullanarak ürettikleri betonlarda eğilme mukavemetlerini incelemişlerdir. YFC'li betonların çoğunun 14 günlük eğilme dayanımlarının, kontrol betonlarına göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.

Pigeon ve Regourd (1989) ile Wu ve diğ. (2021) araştırmalarında, yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen betonlarda hidratasyon sonucunda ortaya çıkan bileşenlerin yüksek fırın cürufu ile tepkimeye girmesi sonucu betondaki boşluk miktarının azaldığı ve bu azalmanın donma-çözünme direncini arttırdığını tespit etmişlerdir.

2.9.3 Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemi ile ilgili literatür özeti

Literatürde yapılan çok az sayıda araştırma kapsamında; (Öztürk ve Özyurt, 2022) yaptıkları çalışmada; betona %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00 oranlarında çelik lif katkısı ile eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının arttığını ve karayolu beton kaplama kalınlığında sırasıyla %5.20, %9.60, %14.00 ve %19.70 oranlarında azalma meydana geldiğini, ancak maliyette ise sırasıyla %13.90, %51.30, %85.50 ve %111.50 artış oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Benzer şekilde, Amerika’da FAA (Federal Aviation Administration) ulaştırma departmanı tarafından havalimanı “Havalimanı Üstyapı Tasarımı ve Değerlendirmesi” için FAARFIELD v2.0 (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design, AC No:150/5320-6G) kaplama tasarım yazılımının 2021 yılında geliştirilmiş ve programın henüz yeni olması, ayrıca havaalanı beton kaplamalarda çelik lif, yüksek fırın cürufu ve her ikisinin birlikte kullanılması bağlamında literatürde buna benzer bir çalışmaya ulaşamamıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Bu bölümde, deneysel çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları, fiziksel özellikleri, karışımlarda kullanılan malzeme oranları ve yapılan deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

3.1.1 Çimento

Bu tez çalışmada TS EN 197-1 ile uyumlu Traçim Çimento San. ve Tic. A.Ş. tarafından üretilen CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu (PÇ) kullanılmış olup özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Fiziksel Özellikler	
Priz Başlangıcı (dk)	155
Priz Sonu (dk)	235
Hacim Sabitliği (mm)	1.00
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3720
Özgül Ağırlık	3.08
Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	19.41
Al ₂ O ₃	4.50
Fe ₂ O ₃	3.49
CaO	63.09
MgO	1.10
SO ₃	3.20
Çözünmeyen Kalıntı	0.80
Kızdırma Kaybı	3.80
Serbest Kireç	1.90
Basınç Dayanımı (MPa)	
2 Günlük Basınç Dayanımı	38.60
7 Günlük Basınç Dayanımı	57.40

3.1.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

YFC, Karçimsa Ltd.Şti. firmasından temin edilmiş ve çalışma kapsamında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. YFC'nin kimyasal ve fiziksel analizi Karçimsa Ltd.Şti. tarafından yapılmıştır. Kullanılan YFC'nin özgül ağırlığı 2.90'dır. İçeriğinde bulunan nem oranı standartta en fazla %1.00 istenirken %0.10 olarak belirlenmiştir.

Priz başlangıç süresi 145 saat, priz bitiş süresi 265 saattir. Özgül yüzeyi 4417 cm²/g, 0.045 mm elek üstünde kalan malzeme oranı %1'dir. Malzemenin tamamı 0.09 mm eleğin altında kalmıştır. Kullanılan YFC'ye ait özellikler Çizelge 3.2'de, çalışma kapsamında kullanılan YFC Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	34.01
Al ₂ O ₃	11.95
Fe ₂ O ₃	1.18
CaO	31.65
MgO	8.51
SO ₃	0.61
Na ₂ O	0.52
Mn ₂ O ₃	3.58
K ₂ O	0.71
TiO ₂	1.32
S	0.47
Cl	0.014
Fiziksel Özellikler	
Nem Muhtevası (%)	0.10
Özgül Ağırlık	2.90
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	4417
45 mm elek bakiye	%0.010
90 mm elek bakiye	%0



Şekil 3.1 : Tez çalışması kapsamında kullanılan YFC.

3.1.3 Agrega

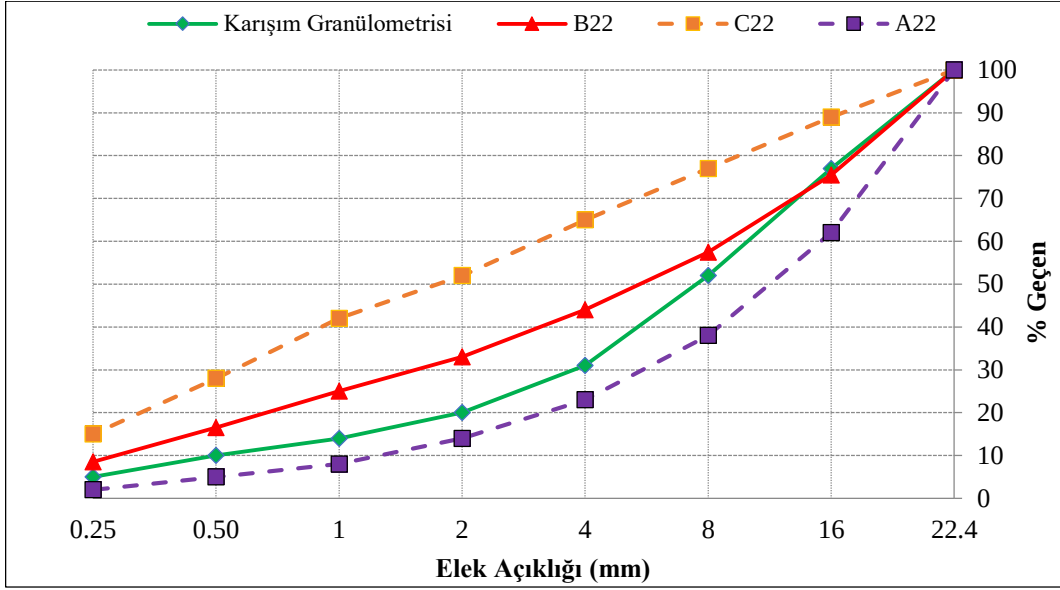
Tez çalışması kapsamında; agregalar Dalbay Taş İmalatı San. ve Tic. Ltd. Şti'den temin edilmiştir. 0-5 mm (kırma kum), 5-11 mm (kırma taş) ve 11-22 mm'lik (kırma taş) olmak üzere üç ayrı malzeme sınıfına ayrılmıştır. En büyük tane boyutu 22 mm olan beton üretiminde 0-5 mm tane boyutlu agregadan %22, 5-11 mm boyutlu agregadan %38, 11-22 mm boyutlu agregadan ise %40 oranlarında kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan agrega Şekil 3.2'de, agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te ve karışımların üretiminde kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi ile TS EN 933-1'de tanımlanan sınır değerlerine ait eğriler Şekil 3.3'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deney sonuçları firmanın Türkiye Hazır Beton Birliği İktisadi İşletmesi Deney Laboratuvarında yaptırdığı deney sonuçlarından alınmıştır.



Şekil 3.2 : Tez çalışması kapsamında kullanılan agrega.

Çizelge 3.3 : Agregaya ait fiziksel ve kimyasal özellikler.

Özellikler	0-5 mm	5-11 mm	11-22 mm	Standart
Su emme (%)	1.40	0.70	0.40	≤2.50 (TS EN 1097-6, 2002)
Yoğunluk (g/cm ³)	2.77	2.79	2.80	-
Los Angeles Aşınma Direnci (%)	-	22.00	22.00	≤30 (TS EN 1097-2, 2000)
Hacim kararlılığı-kuruma büzülmesi (%)	0.022	0.022	0.022	≤0.075 (TS EN 1367-4, 2009)
Alkali silika reaksiyonu (%)	0.030	0.030	0.030	≤0.10 (CANADA, CSA23.2 25A, 2014)



Şekil 3.3 : Agregat karışım granülometri eğrisi ile TS EN 933-1 sınır eğrileri.

Agregata ait fiziksel ve kimyasal deneylerin analizi kapsamında;

TS EN 1097-6 göre agreganın yoğunluk (g/cm^3) değerinin $\geq 2.55 \text{ g/cm}^3$ 'den büyük olması gerekmektedir. Yapılan deneyler neticesinde; 0-5 mm agregat 2.77 g/cm^3 , 5-11 mm agregat 2.79 g/cm^3 ve 11-22 mm agregat için 2.80 g/cm^3 bulunmuştur.

Kumlarda temizliği belirlemek için metilen mavisi deneyi yapılmıştır. Deney sonucu sıfıra ne kadar yakınsa kum o kadar temizdir. TS EN 933-9+A1 standardına göre yapılmış metilen mavisi deneyinde sonuç 0.30 g olarak bulunmuştur. Standartlarda ≤ 1.50 olması şartı 0-5 mm agreganın kullanılabilir limitlerde olduğunu gösterir.

Su emme yüzdeleri, 0-5, 5-11 ve 11-22 mm boyutlarındaki agregalar için sırasıyla %1.40, %0.70 ve %0.40'dır. TS EN 1097-6'ya göre su emme değerinin ≤ 2.50 'den küçük olması istenmiş ve bu şart sağlanmıştır.

CANADA CSA A23,2-25A standardına göre agregat için yapılan Alkali Silika Reaksiyon test sonucu değeri %0.03 olarak bulunmuştur. Standarda göre ≤ 0.10 'dan küçük olması şartı sağlanmıştır.

5-11 ve 11-22 malzemelere uygulanan ve aşınmayı ölçen deney Los Angeles Aşınma deneyidir. Kullanılan kaba agregat için Los Angeles aşınma yüzdesi %22 bulunmuştur. TS EN 1097-2'ye göre yapılan Los Angeles Aşınma deneyi sonuçlarına göre ≤ 30 'dan küçük olduğu için aşınma dayanımları uygundur.

TS EN 1367-2'ye göre agreganın termal bozulmaya karşı direncini belirlemek maksadıyla yapılan Magnezyum Sülfat Deneyinde bozulma %1.00 bulunmuştur. Bu değer standartta belirtilen ≤ 18 değerinden küçüktür.

TS EN 933-3'e göre yapılan Yassılık Endeksi deneyinde malzemenin yassılık endeksi %7 ve %6 olarak bulunmuştur. Bu değer standartta belirtilen ≤ 20 değerinden küçüktür.

TS EN 1367-4'e göre yapılan Hacim Kararlılığı Kuruma Büzülmesi deney sonuç değeri %0.022 olarak bulunmuştur. Bu değer standartta istenilen ≤ 0.075 şartını sağlamaktadır.

3.1.4 Kimyasal katkı

Çelik lif katkısı ile zorlaşan taze betonun işlenebilirlik yeteneğini artırmak, erken dayanım ve nihai yüksek performans sağlamak maksadıyla su/çimento oranı 0.40 olan beton karışımında bağlayıcının %1.34'ü oranında hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu kısımda kimyasal katkı için TS standartları ve deney sonucunda çıkan değerler karşılaştırılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkı özellikleri üretici firmanın kimyasal katkı analiz sertifikasından alınmıştır.

Kullanılan hiperakışkanlaştırıcının özgül ağırlığı 20 °C de 1.11 g/cm³, klor içeriği <0.10 mg, alkali bileşiklerinin içeriği 0.70 mg, %10'luk çözelti içindeki PH değeri 5.90 ve katı madde miktarı ise 42.60 mg/l'dir.

3.1.5 Karışım suyu

Tüm karışımlarda karma suyu olarak Tekirdağ/Çorlu şehir şebekesinden akan içme suyu kullanılmıştır.

3.1.6 Çelik lif

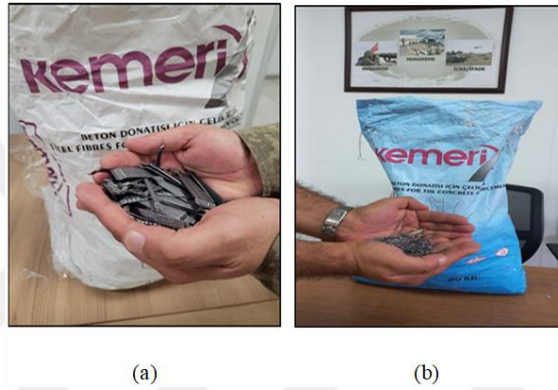
Çalışma kapsamında iki ucu kancalı iki farklı tip çelik lif kullanılmıştır. Kullanılan çelik lifler Kemerli Metal San. ve Tic. A.Ş. işletmesinden temin edilmiştir.

Numunelerde kullanılan iki farklı tip çelik liflerden birincisinin uzunluğu 60 mm, çapı 0.90 mm'dir. Boy/çap oranı ise 65'tir. İkinci çelik lifin ise uzunluğu 35 mm, çapı 0.55 mm'dir. Boy/çap oranı 65'tir. Çelik lif özellikleri firmanın çelik lif sertifikasından alınmış ve Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4 : Çelik liflerin özellikleri.

Lif Tipi	Uzunluk (mm)	Çapı (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
60/90	60	0.90	65	1150	7.85
35/55	35	0.55	65	1500	7.85

Malzeme tanıtım formlarında uygulama alanları, beton kaplamalı yollar, havaalanları, lojistik üsler, limanlar olarak tarif edilmiştir. CE sertifikası olan çelik lif TS EN 14889-1 standartlarına uygundur. Ayrıca çelik lif üreticisinin ISA 9001 ve ISO 14001 sertifikaları mevcuttur. Çalışma kapsamında kullanılan çelik lifler Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Tez kapsamında kullanılan çelik lifler: a) 60/90 çelik lif b) 35/55 çelik lif.

3.2 Metot

3.2.1 Karışımların hazırlanması

Bu çalışmada 35 mm ve 60 mm uzunluğunda iki farklı çelik lif, 0-5 mm, 5-11 ve 11-22 mm dane dağılımına sahip agregalar, CEM I 42.5 R tipi çimento, hiperakışkanlaştırıcı, dört farklı oranda YFC ile karma suyu olarak Tekirdağ/Çorlu şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Öncelikle bağlayıcısı çimento ve çimentonun ikamesi olarak %15, %20, %25 ve %30 oranlarında YFC kullanılarak beş adet lif içermeyen kontrol karışımı ile 60 mm uzunlukta iki ucu kancalı çelik lif ağırlıkça %0, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranlarında ve aynı YFC oranları için 20 adet daha beton karışımı tasarlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, optimum YFC oranı %20 olarak tespit edilmiş ve 35 mm uzunluğundaki çelik lifler %0, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranlarında, YFC ise hacimce %20 oranında betona katılmış ve YFC’siz kontrol karışımları da dahil toplam sekiz adet daha beton

karışımı tasarlanmıştır. Üretilen kontrol, 60 mm ve 35 mm uzunluğundaki çelik lif katkılı beton karışımlar ile karışımlara verilen kodların anlamları Çizelge 3.5, Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Kontrol karışımlarına ait kodlandırma.

Karışım	Kodlandırmanın anlamı
K-Ç	Lif içermeyen, bağlayıcısı çimento olan kontrol betonu numunesi,
K-Ç15	Lif içermeyen, bağlayıcısı çimento ile %15 oranında yer değiştiren YFC, kontrol betonu numunesi,
K-Ç20Y	Lif içermeyen, bağlayıcısı çimento ile %20 oranında yer değiştiren YFC, kontrol betonu numunesi,
K-Ç25Y	Lif içermeyen, bağlayıcısı çimento ile %25 oranında yer değiştiren YFC, kontrol betonu numunesi,
K-Ç30Y	Lif içermeyen, bağlayıcısı çimento ile %30 oranında yer değiştiren YFC, kontrol betonu numunesi.

Çizelge 3.6 : Çelik lifli (60 mm) karışımlara ait kodlandırma.

Karışım	Kodlandırmanın anlamı
0.75L60+Ç	%0.75 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı çimento olan numune
0.75L60+Ç15Y	%0.75 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %15 oranında YFC içeren beton numunesi
0.75L60+Ç20Y	%0.75 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %20 oranında YFC içeren beton numunesi
0.75L60+Ç25Y	%0.75 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %25 oranında YFC içeren beton numunesi
0.75L60+Ç30Y	%0.75 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %30 oranında YFC içeren beton numunesi
1L60+Ç	%1 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı çimento olan numune
1L60+Ç15Y	%1 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %15 oranında YFC içeren beton numunesi
1L60+Ç20Y	%1 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %20 oranında YFC içeren beton numunesi
1L60+Ç25Y	%1 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %25 oranında YFC içeren beton numunesi
1L60+Ç30Y	%1 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %30 oranında YFC içeren beton numunesi
1.25L60+Ç	%1.25 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı çimento olan numune.
1.25L60+Ç15Y	%1.25 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %15 oranında YFC içeren beton numunesi
1.25L60+Ç20Y	%1.25 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %20 oranında YFC içeren beton numunesi
1.25L60+Ç25Y	%1.25 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %25 oranında YFC içeren beton numunesi
1.25L60+Ç30Y	%1.25 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %30 oranında YFC içeren beton numunesi
1.50L+Ç	%1.50 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı çimento olan numune
1.50L60+Ç15Y	%1.50 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %15 oranında YFC içeren beton numunesi
1.50L60+Ç20Y	%1.50 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %20 oranında YFC içeren beton numunesi
1.50L60+Ç25Y	%1.50 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %25 oranında YFC içeren beton numunesi
1.50L60+Ç30Y	%1.50 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %30 oranında YFC içeren beton numunesi

Çizelge 3.7 : Çelik lifli (35 mm) karışımlara ait kodlandırma.

Karışım	Kodlandırmanın anlamı
0.75L35+Ç	%0.75 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı çimento olan numune
0.75L35+Ç20Y	%0.75 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %20 oranında YFC içeren beton numunesi
1L35+Ç	%1 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı çimento olan numune
1L35+Ç20Y	%1 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %20 oranında YFC içeren beton numunesi
1.25L35+Ç	%1.25 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı çimento olan numune.
1.25L35+Ç20Y	%1.25 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %20 oranında YFC içeren beton numunesi
1.50L35+Ç	%1.50 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı çimento olan numune
1.50L35+Ç20Y	%1.50 oranında çelik lif içeren ve bağlayıcısı %20 oranında YFC içeren beton numunesi

Çalışma kapsamında üretilen çelik lifli (60 ve 35mm) betonların 1 m³ için gerekli olan beton karışım oranları Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Çelik lif (60 mm) katkılı karışımların oranları.

Karışım Kodu	Bağlayıcılar (kg/m ³)		Agrega (kg/m ³)			Çelik Lif (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Su/Bağlayıcı (%)
	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	(0-5) mm	(5-11) mm	(11-22) mm				
(K-Ç)	450	0	410	709	746	0	180	6.00	0.40
(K-Ç15Y)	382.50	67.50	409	707	744	0			
(K-Ç20Y)	360	90	409	707	744	0			
(K-Ç25Y)	337.50	112.50	409	706	743	0			
(K-Ç30Y)	315	135	409	706	743	0			
(0.75L60+Ç)	450	0	406	701	738	58.88			
(0.75L60+Ç15Y)	382.50	67.50	405	699	736	58.88			
(0.75L60+Ç20Y)	360	90	405	699	736	58.88			
(0.75L60+Ç25Y)	337.50	112.50	404	698	735	58.88			
(0.75L60+Ç30Y)	315	135	404	698	735	58.88			
(1L60+Ç)	450	0	404	698	735	78.50			
(1L60+Ç15Y)	382.50	67.50	403	697	733	78.50			
(1L60+Ç20Y)	360	90	403	696	733	78.50			
(1L60+Ç25Y)	337.50	112.50	403	696	732	78.50			
(1L60+Ç30Y)	315	135	402	695	732	78.50			
(1.25L60+Ç)	450	0	403	695	732	98.13			
(1.25L60+Ç15Y)	382.50	67.50	402	694	730	98.13			
(1.25L60+Ç20Y)	360	90	401	693	730	98.13			
(1.25L60+Ç25Y)	337.50	112.50	401	693	729	98.13			
(1.25L60+Ç30Y)	315	135	401	692	729	98.13			
(1.50L60+Ç)	450	0	401	693	729	117.75			
(1.50L60+Ç15Y)	382.50	67.50	400	691	728	117.75			
(1.50L60+Ç20Y)	360	90	400	691	727	117.75			
(1.50L60+Ç25Y)	337.50	112.50	400	690	727	117.75			
(1.50L60+Ç30Y)	315	135	399	690	726	117.75			

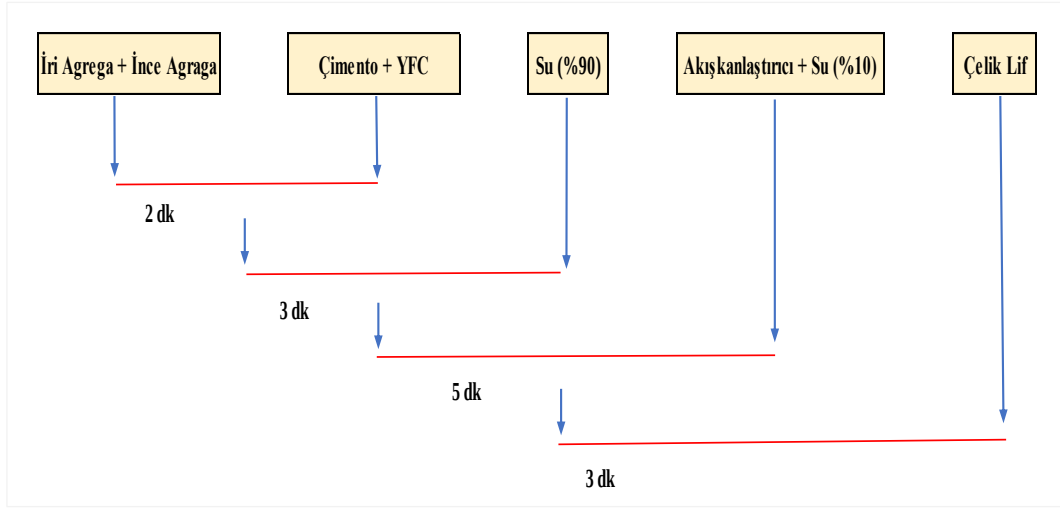
Çizelge 3.9 : Çelik lif (35 mm) katkılı karışımların oranları.

Karışım Kodu	Bağlayıcılar (kg/m ³)		Agrega (kg/m ³)			Çelik Lif (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Su/Bağlayıcı (%)
	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu	(0-5) mm	(5-11) mm	(11-22) mm				
(0.75L35+Ç)	450	0	406	701	738	58.88	180	6.00	0.40
(0.75L35+Ç20Y)	360	90	405	699	736	58.88			
(1L35+Ç)	450	0	404	698	735	78.50			
(1L35+Ç20Y)	360	90	403	696	733	78.50			
(1.25L35+Ç)	450	0	403	695	732	98.13			
(1.25L35+Ç20Y)	360	90	401	693	730	98.13			
(1.50L35+Ç)	450	0	401	693	729	117.75			
(1.50L35+Ç20Y)	360	90	400	691	727	117.75			

Karışımın izleni şu şekildedir:

- ✓ Karışımın ilave edilecek malzemeler tartılarak hazırlandıktan sonra, agregalar tane çapı büyük olandan küçük olana doğru sırası ile mikserde konulduktan sonra çimento ve YFC katılmıştır. Devamında kuru karışım elde etmek için mikserde yaklaşık 2 dk karıştırılmıştır.
- ✓ Kuru karışım elde edildikten sonra mikserde suyun %90 eklenerek 3 dk boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir.
- ✓ Daha sonra, kalan suyun %10 ile birlikte akışkanlaştırıcı birlikte karışımın katılarak 5 dk daha karıştırılma işlemi yapılmıştır.
- ✓ Beton akıcı özellik kazandıktan sonra çelik lifler eklenmiş ve liflerin beton içine homojen bir şekilde dağılması için yaklaşık 3 dk kadar daha karıştırılma işlemi yapılmıştır.

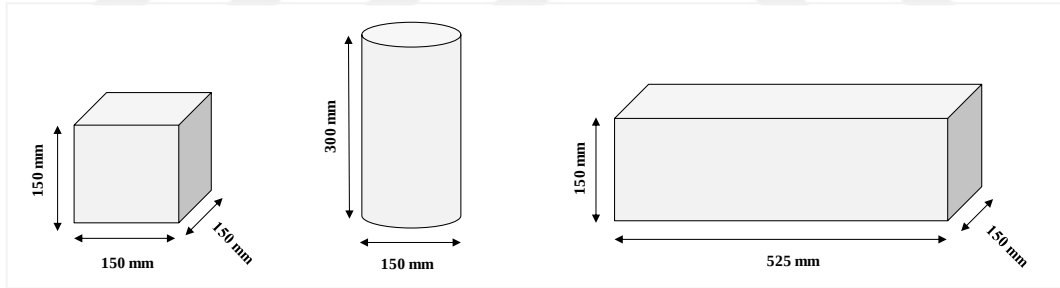
Karıştırma işlemi 13 dk sonunda tamamlanmıştır. İşlenebilirliğin sağlanması ve istenilen diğer özelliklerin elde edilebilmesi için yeterli karıştırma süresinin sağlandığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda toplam karıştırma süresi 13 dk olarak tespit edilmiştir. Karışımlar oluşturulurken izlenen adımlar Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Beton karışım numunelerinin hazırlanmasında izlenen yöntem.

3.2.2 Numune Boyutları

Basınç dayanım testleri için $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ ölçülerinde küp numuneler, yarmada çekme dayanımı için $150 \times 300 \text{ mm}$ ölçüsünde silindir numuneler ve eğilme dayanımı testleri için ise $150 \times 150 \times 525 \text{ mm}$ ölçüsünde kiriş numuneler üretilmiştir. Üretilen numune boyutları Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Üretilen beton numunelerinin şekil ve boyutları.

3.2.3 Numunelerin kuru

Üretilen numuneler laboratuvar şartlarında karışım suyunun buharlaşmasını engellemek için üstü kapalı bir şekilde 24 saat bekletilmiştir. Prizini alan numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra sıcaklığı $23 \pm 2^\circ \text{C}$ ’de olan su dolu kür havuzunda kür edilmiştir. Numuneler kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün bekletilmiştir.

Kür havuzundan çıkarılan tüm numuneler laboratuvar şartlarında bekletilerek doymuş yüzey kuru (DYK) hale getirilmişlerdir. DYK halindeki numuneler üzerinde sertleşmiş beton deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.4 Testler

Çalışma kapsamında; farklı lif ve sabit su/çimento oranında, çimento ikamesi olarak farklı miktarlarda karışıma ilave edilen YFC ile hazırlanmış beton numuneleri üzerinde, aşağıdaki testler gerçekleştirilmiştir.

3.2.4.1 Birim ağırlık tayini

Her bir karışım için taze ve sertleşmiş betonun birim ağırlıkları, hazırlanan 150 mm'lik küp beton numunelerden TS EN 12350-6 göre uygun olarak tespit edilmiştir. Bu numuneler standart ve yüzeyi düzgün metal kalıplar içinde üretilmiştir. Birim ağırlık tespiti için, kalıplar dökümden önce ve beton iki aşamada sıkıştırılarak doldurulduktan sonra tartılmıştır. Kalıpların tam dolu olmasına ve üstten taşmamasına dikkat edilmiştir. Numune ağırlığı kap hacmine bölünerek taze ve sertleşmiş beton birim ağırlıklarına ulaşılmıştır.

3.2.4.2 İşlenebilirlik kıvam tayini

Taze betonun işlenebilirliği TS EN 12350-2 göre çökme kesik konisi yardımıyla saptanmıştır. Çökme hunisi içerisine beton her üçte biri seviyesine kadar doldurulduktan sonra 25 kere şişlenerek koni üst yüzeyine kadar üç defada doldurulmuştur. Üst yüzey mala ile düzeltildikten sonra koni düşey doğrultuda sarsıntıya imkan vermeden kaldırılarak betonun ağırlığı altında ne kadar çöktüğü ölçülmüştür.

Taze betonun kıvamının çökme metoduna göre sınıflandırılması Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Taze betonun çökme sınıflandırılması (TS EN 206-1).

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

3.2.4.3 Basınç dayanımı

Üretilen numunelerin basınç dayanımının tespiti için her bir seriden üç adet 150×150×150 mm'lik küp numuneler üretilmiştir. Numunelerin dayanım artışlarını belirlemek için 7, 28 ve 90 günlük dayanımları ölçülmüştür. Numuneler, TS EN 12390-4 basınç dayanımı-deney makinelerinin özellikleri standardına uygun Aselsan Ebis markalı 300 ton basınç kapasiteli preste, TS EN 12390-3 deney numunelerinde basınç dayanımının tayini standardına uygun olarak Şekil 3.7'de gösterilen hidrolik pres kullanılmıştır.

Standartta belirtilen yükleme hızı 0.20–1.00 MPa/s (N/mm².s) aralığındadır. Bu çalışmada standardın belirttiği aralıkta kalınıp yükleme hızı 0.50 MPa/s olarak alınmıştır.



Şekil 3.7 : Basınç dayanım testi.

Basınç dayanımları, Denklem (3.1) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.1)$$

Bu denklemde;

f_c : Basınç dayanımı, MPa

F : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

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

3.2.4.4 Elastisite modülü tayini

Betonun elastisite modülü, lineer elastik bölgede uygulanan kuvvetin oluşturduğu basınç gerilmelerinin numunelerde boyuna kısalmaya oranı olarak ifade edilmektedir. Betondaki gerilme-birim deformasyon ilişkisi TS EN 12390-13 uygun olarak deneysel olarak belirlenmektedir. Karayolu tasarımında Elastisite Modülü, üstyapı tabakalarının ve üstyapı yol taban malzemelerinin mühendislik özelliğini belirtir. Portland çimentolu beton için E_c şeklinde gösterilir. AASHTO 1993 Tasarım Rehberinde beton özellikleri kısmında betonun Elastisite Modülü için aşağıdaki denklem verilmiştir (TCK, 2019).

Çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda E_c Denklem (3.2) ile hesaplanmıştır.

$$E_c = 6750 \times S'_c \quad (3.2)$$

Bu denklemde;

S'_c : Portland çimentolu betonun ortalama tahmini kopma modülü (eğilmede çekme dayanımı), (psi)

E_c : Portland çimentolu betonun elastisite modülü, (psi)

3.2.4.5 Eğilmede çekme dayanımı

Hazırlanan beton numunelerinin eğilme dayanımları; TS EN 12390-5 standardına uygun olarak 7, 28 ve 90 günlük 150x150x525 mm boyutundaki prizmatik kiriş numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Numunelerin eğilme dayanımları her grupta üç numunenin ortalaması alınarak bulunmuştur. Deney Aselsan Ebis 3000 markalı 20 ton eğilme kapasiteli preste, Standardın önerdiği yükleme hızı 0.04-0.06 MPa/s (N/mm².s) aralığıdır. Bu çalışmada tüm kirişlere 0.05 MPa/s yükleme hızı uygulanmıştır. Mesnetler arası açıklık 450 mm (L) ve mesnet ve yükler arası 150 mm (L/3) olacak şekilde ayarlanmıştır. Kiriş numunenin orta noktasındaki sehim ölçmek amacıyla açıklık ortasına karşılıklı yerleştirilen iki adet deplasman ölçerler (LVDT) kullanılmış olup, numunelerin açıklık ortası sehim 2.5 mm olana kadar yüklemeye devam edilmiştir. Deneyden elde edilen yük-sehim verileri veri kaydedici aracılığıyla bilgisayara aktarılmış olup, yük-sehim eğrileri excel programı kullanılarak çizilmiştir. Deney sonucunda bulunan değerler Denklem (3.3)'de yerine konulmuş ve her bir numune için eğilmede çekme dayanımları bulunmuştur.

$$\sigma = F \times L / (b \times h^2) \quad (3.3)$$

Bu denklemde;

- σ :Eğilmede çekme dayanımını (MPa)
- F :Maksimum yükü (N)
- L :İki mesnet arasındaki açıklık mesafesi (mm)
- b :Numunenin genişliğini (mm)
- h :Numunenin yüksekliğini (mm) göstermektedir.

Numunelere ait eğilme dayanımı deney düzeneği Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

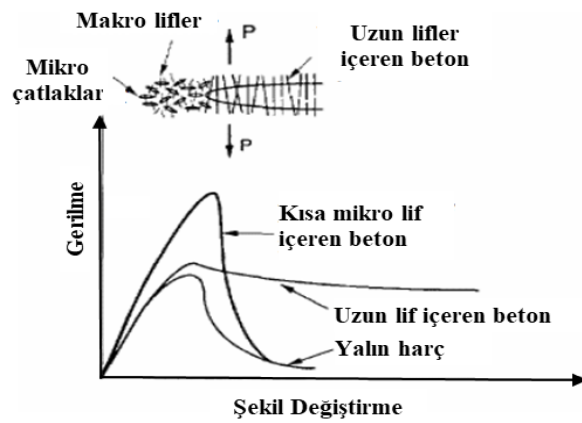


Şekil 3.8 : Numunelere ait eğilme dayanımı testi.

3.2.4.6 Enerji yutma kapasitesi (tokluk)

Çelik lif katkılı betonları niteleyen en önemli özelliklerden birisi, tokluğu yani enerji yutma kapasitesidir. Tokluk, beton içinde dağılan çelik liflerin rolüne bağlıdır ve lif katkılı betonların işlevselliği belirlenirken esas alınan bir ölçüttür. Bu özellik, çelik lifin miktarı, boyu, geometrisi, narinlik oranı, yükleme hızı ve numune boyutları gibi faktörlerden etkilenir. Enerji yutma kapasitesi, yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile bulunur. Lif katkılı betonlarda yük taşıma, maksimum yükten sonra betonun taşıma gücü azalsa da bir süre daha sürdürülmektedir (Uğurlu, 1999).

Farklı boyutlarda lif içeren ve lifsiz (yalın) betonlar için Gerilme-Şekil Değiştirme eğrileri Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 : Farklı lif boyutlarının çatlaklar arası köprü oluşturmaları.

Şekil 3.9 incelendiğinde; makro lifler betonu, mikro lifler ise çimento hamurunu güçlendirmektedir. Makro liflerin narinliğinin katkısıyla betonun kırılma enerjisi artmaktadır.

3.2.4.7 Yarmada çekme dayanımı

Yarmada çekme dayanımı deneyleri, TS EN 12390-6 standardına uygun olarak 7, 28 ve 90 günlük olmak üzere bir karışımdan üç adet 150×300 mm’lik silindir beton numuneler üzerinde yürütülmüştür. Deneyde basınç dayanımının tespitinde kullanılan pres makinesi yükleme hızı 1.6 kN/sn olacak şekilde ayarlandı. Yükün üniform bir şekilde dağılması için numunelerin alt ve üst kısmına 2.5 cm genişliğinde ve 1 cm kalınlığında ahşap plakalar numune boyunca yerleştirilerek yük uygulandı. Deney sonucunda, her bir karışıma ait numunelerin ortalaması alınarak yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımları, Denklem (3.4) yardımı ile belirlenmiştir.

$$\sigma = 2 \times F / (\pi \times L \times d) \quad (3.4)$$

Bu denklemde;

σ :Yarmada çekme dayanımı, (MPa)

F :Maksimum yükü, (N)

L :Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, (mm)

d :Numunenin seçilen en kesit boyutunu (mm), göstermektedir.

Numunelere ait eğilme dayanımı deney düzeneği Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Numunelere ait yarmada çekme dayanımı testi.

3.2.4.8 Betonun donma-çözülme ve buz çözücü maddelere karşı dayanımı

Bu deney beton kaplamalı yolun servis ömrü boyunca maruz kalacağı çevresel şartlar karşısında göstereceği performansı belirlemek maksadıyla yapılmıştır. Deney kapsamında üretilen numunelerin TSE CEN/TS 12390-9 standardına göre donma çözülme direnci test edilmiştir. Bu standartta betonun donma-çözülmesi için Referans Yöntem ve Alternatif Yöntemler olmak üzere iki farklı ana metottan bahsedilmektedir. Bu çalışmada Alternatif Yöntemlerden CDF testi (Capillary suction Deicing salts and Freeze thaw test) esas alınmıştır. Bu yöntem; numune üretim yönteminin kolaylığı, deney süresinin kısalığı ve

numunelerin sadece deney yüzeyinden etkiye maruz kalması dolayısıyla ortam şartlarına en yakın donma-çözülme deneyi olarak görülmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bu kapsamda, numunelerin donma-çözülme etkisine karşı direnci $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 4 saat, $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 4 saat kalacak şekilde 28 donma-çözülme döngüsü sonunda kabuk atma (pullanma) yoluyla uzaklaşan kütlenin ölçülmesiyle değerlendirilmiştir. Pullanma parçaları numuneden ayrılmış ve bu parçalar toplanıp tartılmıştır. Numune metrekaresi başına gram olarak sonuçlar hesaplanmıştır.

Donma çözülme direnci kategorileri Çizelge 3.11'de verilmiştir. TCK Karayolları Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi uyarınca, beton kaplamanın inşa edildiği bölgenin iklimsel koşullarına göre donma çözülme direnci kategorisi FT2 olarak alınmıştır.

Çizelge 3.11 : Donma çözülme direnci kategorileri

Kategori	Kütle Kaybı (28 gün)
FT0	-
FT1	Ortalama $< 1.0\text{ kg/m}^2$ Tek değer $< 1.5\text{ kg/m}^2$
FT2	Ortalama $< 0.5\text{ kg/m}^2$

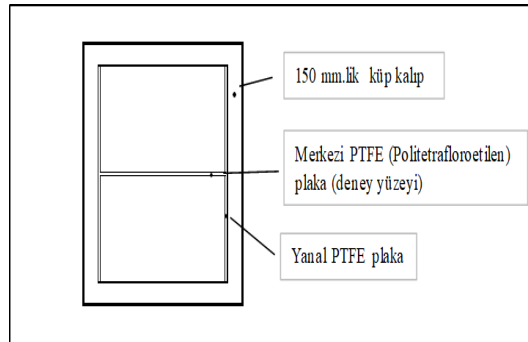
Çizelge 3.11'de;

FT0: Donma-Çözülme olayı gerçekleşmeyen yerler,

FT1: Donma-Çözülme olayı gerçekleşen yerler,

FT2: Donma-Çözülme olayı olan ve buz çözücü maddelerin kullanıldığı yerler olarak tanımlanmıştır.

CDF yönteminde $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ küp numunelerin PTFE (politetrafloroetilen) levha ile ortadan ikiye bölünmesi ile numuneler elde edilir (Şekil 3.11). PTFE plakaya temas eden yüzey alanı deney yüzeyidir.



Şekil 3.11 : Numune boyutları ve elde edişi.

Deney öncesinde;

- ✓ Taze beton, kalıplara yerleştirildikten sonra kalıplar 20 ± 2 °C’de bir gün süreyle kurumaya karşı korunmuşlardır.
- ✓ 24 ± 2 saat sonra numuneler kalıplardan çıkarılıp 20 ± 2 °C sıcaklığa sahip şebeke suyu ile doldurulmuş bir kür havuzuna yerleştirilmişlerdir.
- ✓ Numuneler 7 gün sonunda kür havuzundan çıkarılıp deneyler başlayana kadar 21 gün süreyle 20 ± 2 °C ve $\%65\pm 5$ bağıl neme sahip kür odasına konulmuşlardır.

Deney öncesi işlemler tamamlandıktan sonra, numuneler 28 günlük olunca 7 gün süresince kapiler olarak deney sıvısı ($\%97$ musluk suyu ve $\%3$ NaCl) emdirilerek doygun hale getirilmişlerdir. Deney sıvısı emdirme işlemi kapalı kapta yapılmış ve su yüksekliği aralıklarla kontrol edilmiştir. Numuneler 35 günlük olunca deneye başlanmıştır. Üretilen numuneler, donma-çözülme çevrimlerinin yapılacağı kabin ve çevrimlere ait sıcaklık zaman grafiği Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Üretilen numuneler, donma-çözülme kabini ve çevrimleri.

Pullanma miktarının ölçülmesi bağlamında;

- ✓ Numunelerin yüzeylerinden çıkan malzeme, su püskürtülerek yıkanmış ve fırçalama yaparak malzeme çıkarılmış ve çıkan malzemeler kap içinde toplanmış,
- ✓ Kaptaki toplanan ve pullanmış malzemeyi de içeren çözelti filtreden geçirilmiş,
- ✓ Kağıt filtre daha sonra 24 saat süreyle kurutulmuş ve 20 ± 2 °C sıcaklıkta, $\%65\pm 5$ bağıl nemli ortamda (60 ± 5) dakika süreyle soğutulmuş,
- ✓ Kurutulmuş filtre kağıdı 0.1 g hassasiyetle tartılmıştır.

Deney neticesinde denklem (3.5) yardımıyla hesaplamalar yapılmıştır.

$$m_n = (\sum \mu_s / A) \times 10^6 \quad (3.5)$$

Bu denklemde;

$$m_n = \text{CDF ağırlık kaybı (g/m}^2\text{)}$$

$\mu_s = n$ çevrim sonunda kopan numune miktarı (g)

$A =$ Yüzey alanı (m^2)

Kış aylarında betonun donması ve havaların ısınması ile birlikte çözülmesi sonucu beton kaplamalı yol yüzeylerinde bozulmalar meydana gelmektedir. Bu deney, beton yol kaplamasının servis ömrü boyunca donma çözülme karşısında nasıl bir davranış sergilediğini incelemek ve YFC ile çelik lif katkıların nasıl etkiye sahip olduğunu belirlemek açısından literatüre katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

3.2.4.9 Aşınma dayanımı

Beton yol kaplamaları, yüzeyine etki eden aşındırıcı malzemeler ve yüklemeler sonucu aşınmaya maruz kalmaktadır. Aşınmaya maruz kalan bu kaplamalarda deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu sebeple, kaplamaların yeterli basınç ve çekme dayanımına sahip olmasının yanı sıra yeterli aşınma direnci göstermesi de istenmektedir (Song, 2004).

Aşınma deneyi için ASTM C 944/C 944M'ye uygun şekilde 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler hazırlanmış 28 günlük kür süresi sonunda deney yapılmıştır. Her bir karışım için toplam üç adet küp numune üretilmiştir. Numunelerin tartımı alınarak 0 dk ölçüm değeri kaydedilmiştir. Daha sonra deney numuneleri üzerine 197 N kuvvet uygulanacak şekilde 200 devir/dakika hızında dönen aşındırıcı disk altında 6 dk boyunca maruz bırakılmış ve aşınma sonucu ağırlık değişim değerleri ölçülmüş ve sonuçlar ağırlık kaybı (%) olarak Eşitlik (3.6)'dan hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık Kaybı (\%)} = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100 \quad (3.6)$$

Eşitlikte;

$m_1 =$ Aşınma öncesi numunenin ağırlığı (gr)

$m_2 =$ Aşınma sonrası numunenin ağırlığı (gr)

3.2.4.10 Elektriksel özdirenç ve iletkenlik ölçümü

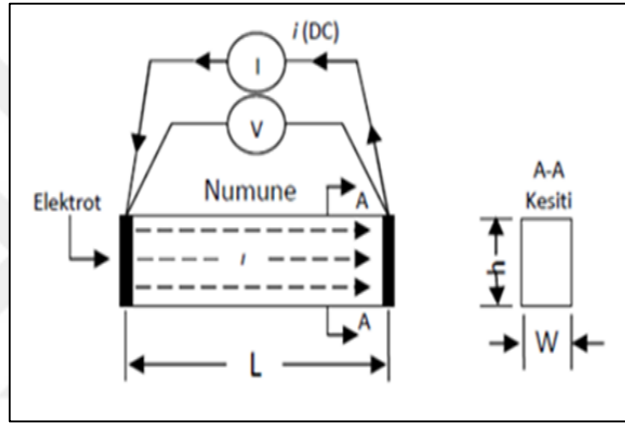
Lifsiz kontrol ve lifli (35 ve 60 mm) beton karışımlarının elektriksel özdirenç ölçümlerinin yapılması amacıyla her bir karışımdan üç adet 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde silindir numuneler üretilmiştir. Numuneler prizini alması için 24 saat beklendikten sonra kalıplardan çıkartılmış ve daha sonra kür havuzunda 28 gün küre tabi tutulmuş ve etüvde 105 ± 5 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra numunelerin elektriksel özdirencini ölçmek için iki problu ölçüm yapma tekniği kullanılmıştır (Şekil

3.13). Güç kaynağının eksi ve artı kutupları bakır elektroda bağlanarak devre tamamlanmıştır. Daha sonra, güç kaynağı vasıtasıyla tüm numunelere sabit 60 voltluk gerilim verilerek her bir numuneden geçen akım değerleri miliamper (mA) olarak dijital multimetre ile ölçülmüştür. Akım ve gerilim değerleri tespit edilen numunelerin elektriksel özdirençleri ve iletkenlikleri sırasıyla Denklem (3.7) ve (3.8) ile bulunmuştur.

$$P = R \times \left(\frac{A}{L} \right) \quad (3.7)$$

$$C = \frac{1}{P} \quad (3.8)$$

Denklemde; P, elektriksel özdirenci ($k\Omega.m$); C, iletkenliği (S/m); L, bakır elektrotlar arası mesafeyi (m); R, hesaplanan direnci (Ω) ve A, numunenin alanını (m^2) göstermektedir.



Şekil 3.13 : Elektriksel özdirenç ölçüm düzeneği.

3.2.4.11 Isıtma deneyi

Elektriksel özdirenç deneylerinde kullanılan lifsiz kontrol, çelik lifli numunelerinin iletkenliğini arttırmak amacıyla; 28 günlük, 100x200 mm boyutlarındaki silindirik numuneler, elektrik akımı ile birlikte sıcaklık artışını belirlemek için yapılan deneylerde de kullanılmıştır.

Numunelere 220 volt şebeke gerilimi uygulanmıştır. Numuneler eşit uzunluklarda dört bölüme ayrılarak, sıcaklık ölçümleri 5 dk aralıklarla dijital lazer ısıölçer yardımıyla yapılmış, daha sonra numunelerin zamana bağlı sıcaklık artış verileri belirlenip grafik haline getirilmiştir.

3.2.4.12 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-Işını kırınım (XRD) analizi

Tez kapsamında belirlenmiş olan beton karışımı esaslarına uygun olarak, çelik lif (60 mm) %0 (kontrol) %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranlarında, YFC ise %20 oranında

kullanılarak 28 gün küre tabi tutulmuş 15 cm'lik küp numuneler oluşturulmuş ve bu numunelerin mikroyapısal analizi yapılmıştır. Numunelerin mikro yapısı, X-Işını Kırınım (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Benzer şekilde, elik lifin kristalografisini belirlemek için X-Işını Kırınım (XRD) testi yapılmıştır. XRD sonuçları, 0 ila 90 derece arasında değişen iki teta (2θ) değeri için hesaplanmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde, ilk olarak çimento ve çimentonun ikamesi olarak %0, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında YFC ile ikame edilmiş kontrol betonları üzerinde araştırma yapılmıştır. Çalışmanın devamında, %0, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranlarında çelik lif (60 mm) takviyeli ve kontrol betonu ile aynı YFC oranlarında ikame edilmiş betonlar üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Araştırma kapsamında elde edilen bulgular analiz edilerek optimum YFC oranı tespit edilmiştir. Tespit edilen optimum %20 YFC oranı ile 35 mm boyundaki çelik lif %0, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranlarında kullanılarak üretilen beton numuneleri üzerinde de gerekli deneyler gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan bu tüm karışımlar üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yürütülmüş olup, deney sonuçları esas alınarak AASHTO 1993 ve FAARFIELD beton kaplama tasarım yöntemleri kullanılarak farklı taşıma gücüne sahip taban zeminleri ile farklı trafik yükleri altında beton plak (kaplama) kalınlık ve karayolu tasarımı için maliyet hesaplamaları yapılmış ve aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

4.1 Taze ve sertleşmiş beton deneyleri

4.1.1 Birim ağırlık deney sonuçları

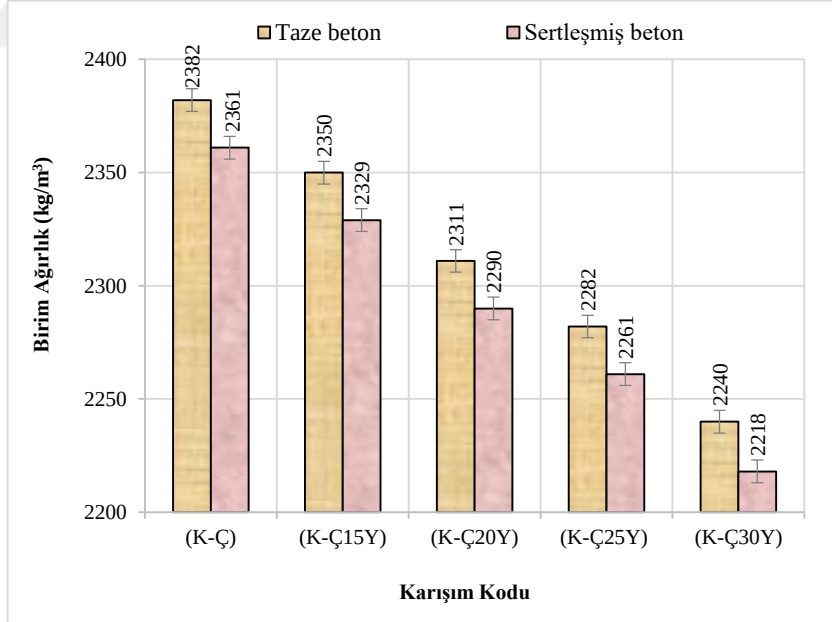
4.1.1.1 Kontrol numunelerinin birim ağırlık deney sonuçları

Numunelerin birim ağırlıkları, TS EN 12350-6'ya göre 150 mm'lik küp numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Üretilen beton numuneleri kalıplara yerleştirilmeden önce, hacmi belirli olan bir kap içerisine vibrasyonla yerleştirilmiş ve taze beton tartılarak ağırlığı bulunmuştur. Elde edilen bu ağırlık değerinin kalıbın hacmine bölünmesiyle birim ağırlıklar elde edilmiştir.

Kontrol betonlarının taze ve sertleşmiş beton birim ağırlıkları Çizelge 4.1'de, birim ağırlıklarının katkı oranına göre değişimi ise Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Kontrol numunelerinin birim ağırlık değerleri.

Karışım Kodu	Birim Ağırlık (Kg/m ³)	
	Taze beton	Sertleşmiş beton
(K-Ç)	2382	2361
(K-Ç15Y)	2350	2329
(K-Ç20Y)	2311	2290
(K-Ç25Y)	2282	2261
(K-Ç30Y)	2240	2218



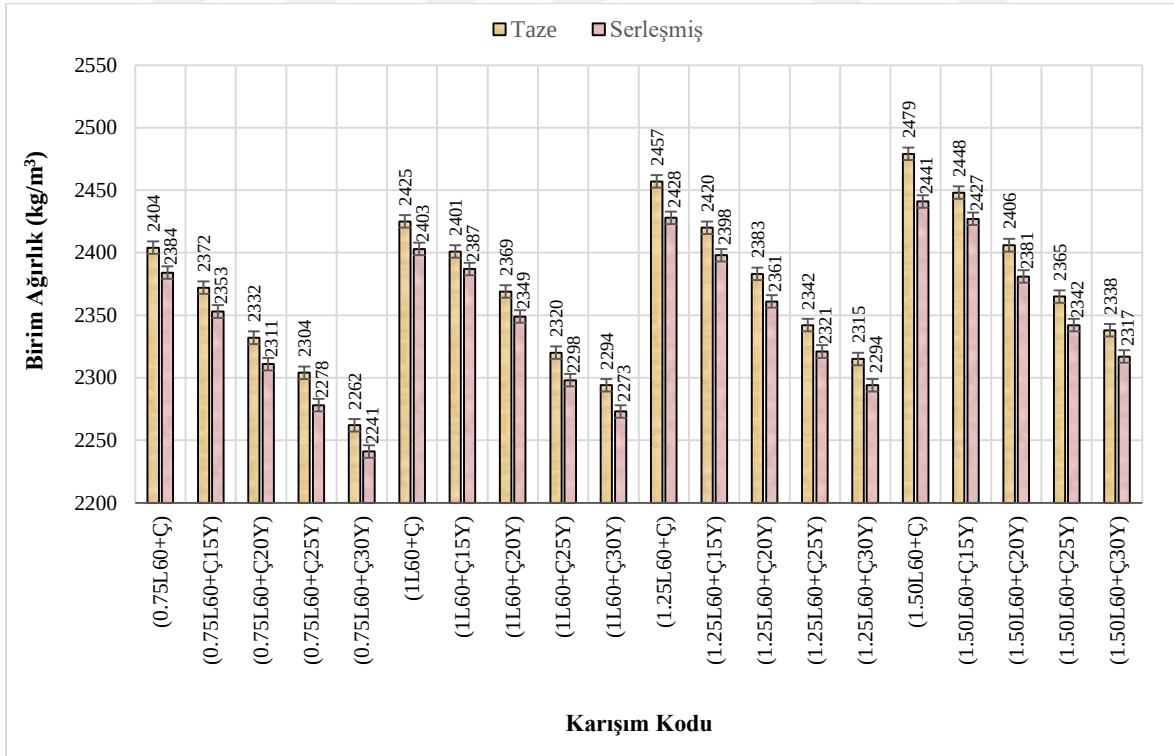
Şekil 4.1 : Kontrol numunelerinin birim ağırlıkları.

4.1.1.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin birim ağırlık deney sonuçları

Numunelerin YFC ikameli betonlarda birim ağırlık deney sonuçları Çizelge 4.2’de, numunelerin birim ağırlık-katkı oranı ilişkisi ise Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Çelik lif (60 mm) katkılı betonların taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları.

Karışım Kodu	Birim Ağırlık (Kg/m ³)	
	Taze	Sertleşmiş
(0.75L60+Ç)	2404	2384
(0.75L60+Ç15Y)	2372	2353
(0.75L60+Ç20Y)	2332	2311
(0.75L60+Ç25Y)	2304	2278
(0.75L60+Ç30Y)	2262	2241
(1L60+Ç)	2425	2403
(1L60+Ç15Y)	2401	2387
(1L60+Ç20Y)	2369	2349
(1L60+Ç25Y)	2320	2298
(1L60+Ç30Y)	2294	2273
(1.25L60+Ç)	2457	2428
(1.25L60+Ç15Y)	2420	2398
(1.25L60+Ç20Y)	2383	2361
(1.25L60+Ç25Y)	2342	2321
(1.25L60+Ç30Y)	2315	2294
(1.50L60+Ç)	2479	2441
(1.50L60+Ç15Y)	2448	2427
(1.50L60+Ç20Y)	2406	2381
(1.50L60+Ç25Y)	2365	2342
(1.50L60+Ç30Y)	2338	2317



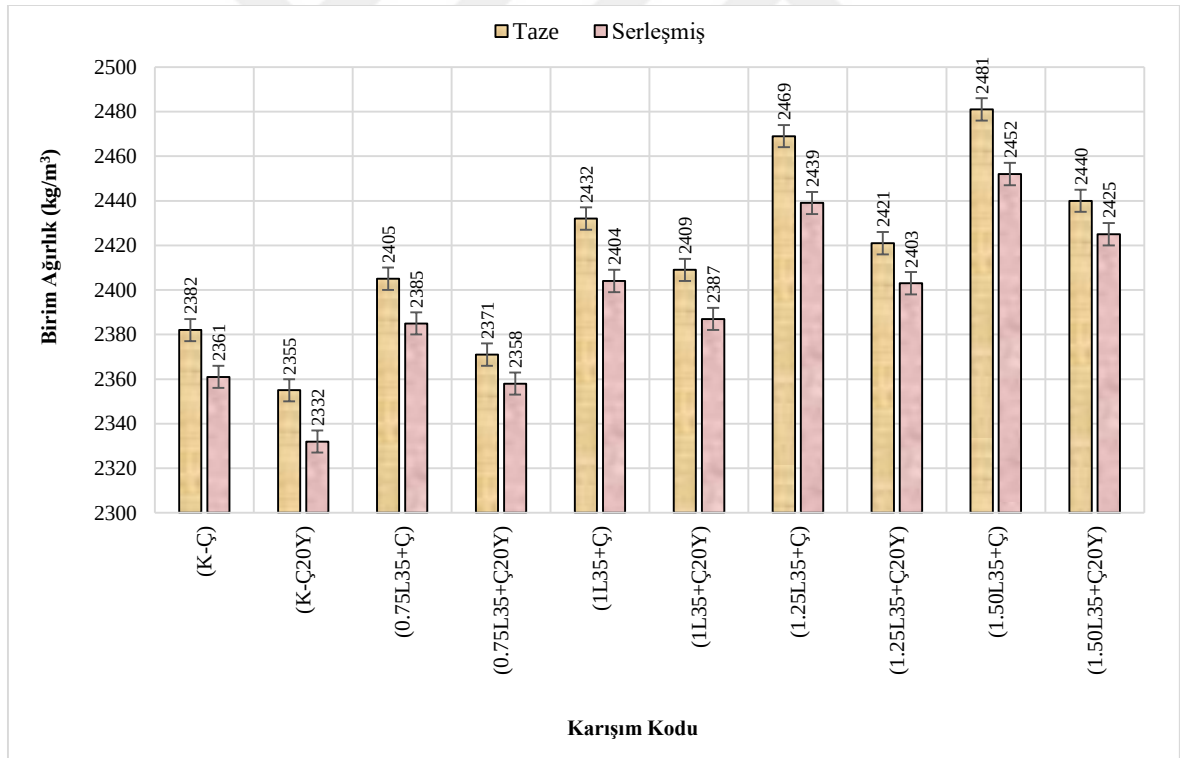
Şekil 4.2 : Çelik lif (60 mm) katkılı betonların birim ağırlıkları.

4.1.1.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin birim ağırlık deney sonuçları

Kontrol ve %20 YFC katkılı taze ve sertleşmiş beton birim ağırlıkları Çizelge 4.3’de, numunelerin birim ağırlık-katkı oranı ilişkisi ise Şekil 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Çelik lifli (35 mm) betonların birim ağırlıkları.

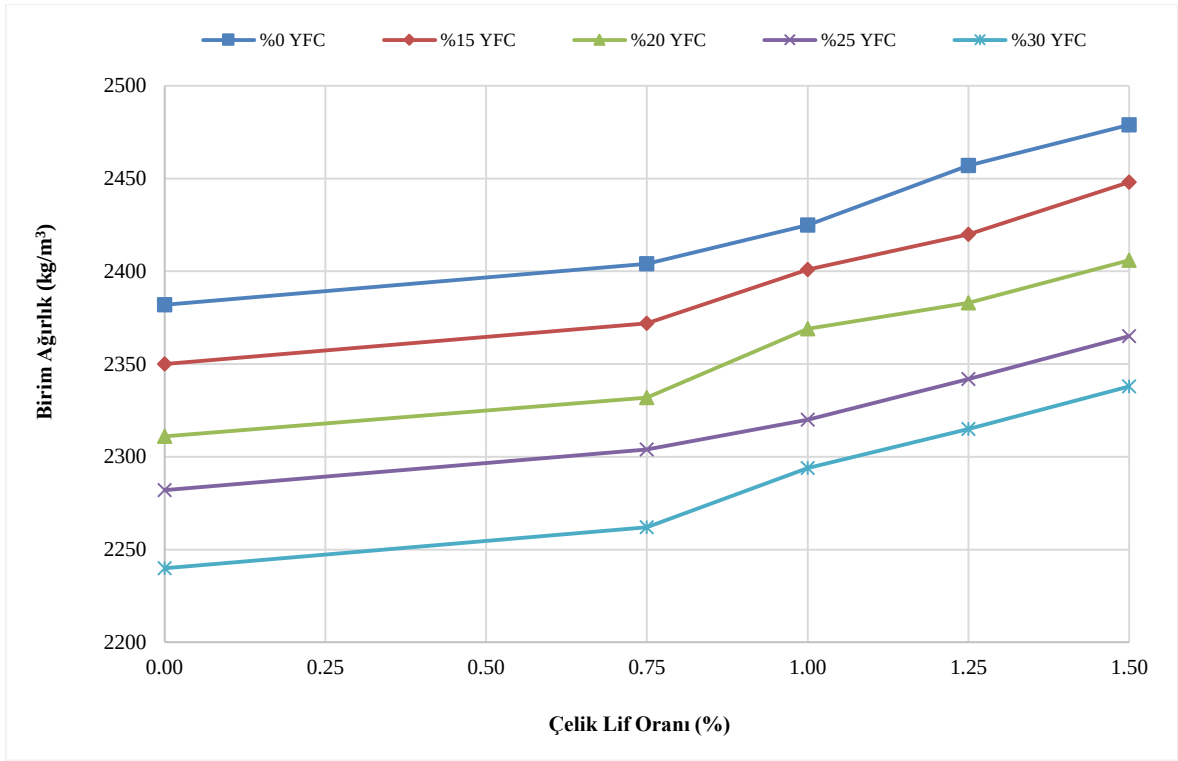
Karışım Kodu	Birim Ağırlık (Kg/m ³)	
	Taze	Serleşmiş
(K-Ç)	2382	2361
(K-Ç20Y)	2355	2332
(0.75L35+Ç)	2405	2385
(0.75L35+Ç20Y)	2371	2358
(1L35+Ç)	2432	2404
(1L35+Ç20Y)	2409	2387
(1.25L35+Ç)	2469	2439
(1.25L35+Ç20Y)	2421	2403
(1.50L35+Ç)	2481	2452
(1.50L35+Ç20Y)	2440	2425



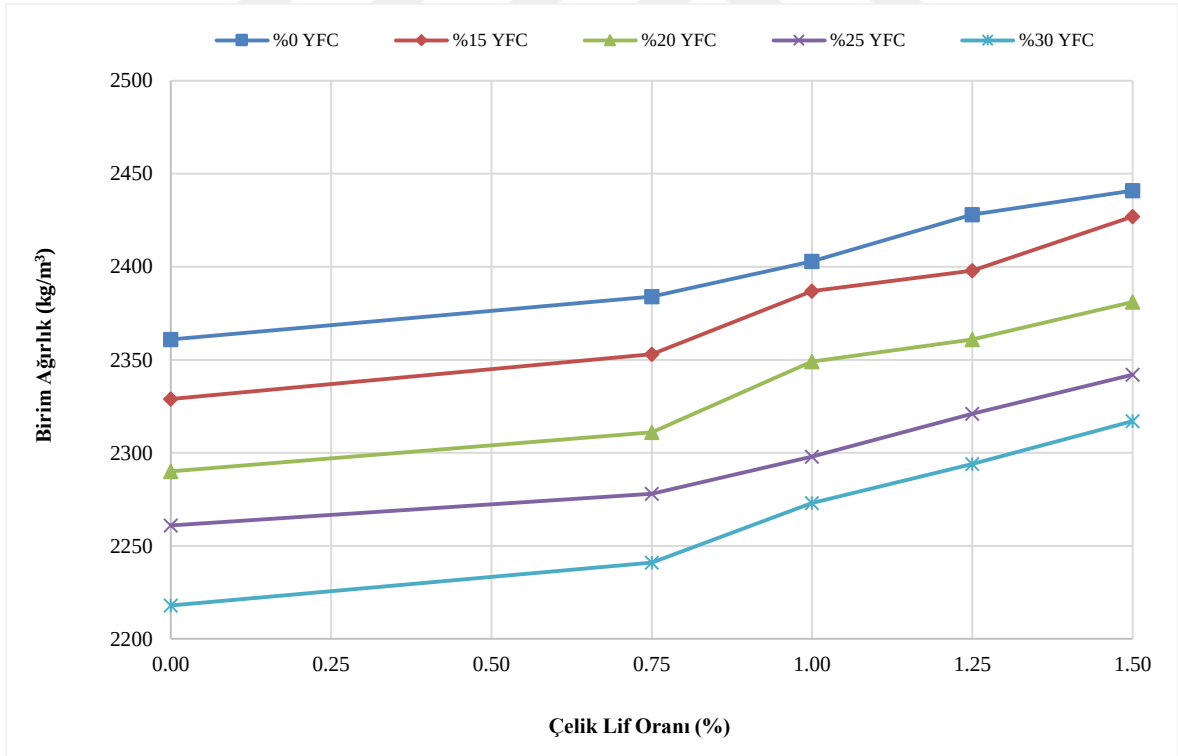
Şekil 4.3 : Çelik lifli (35 mm) betonların birim ağırlıkları.

4.1.1.4 Numunelerin birim ağırlık deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Farklı oranlardaki YFC ve çelik lif (60 mm) katkılı taze ve sertleşmiş beton numunelerinin birim ağırlıklarının değişimi Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

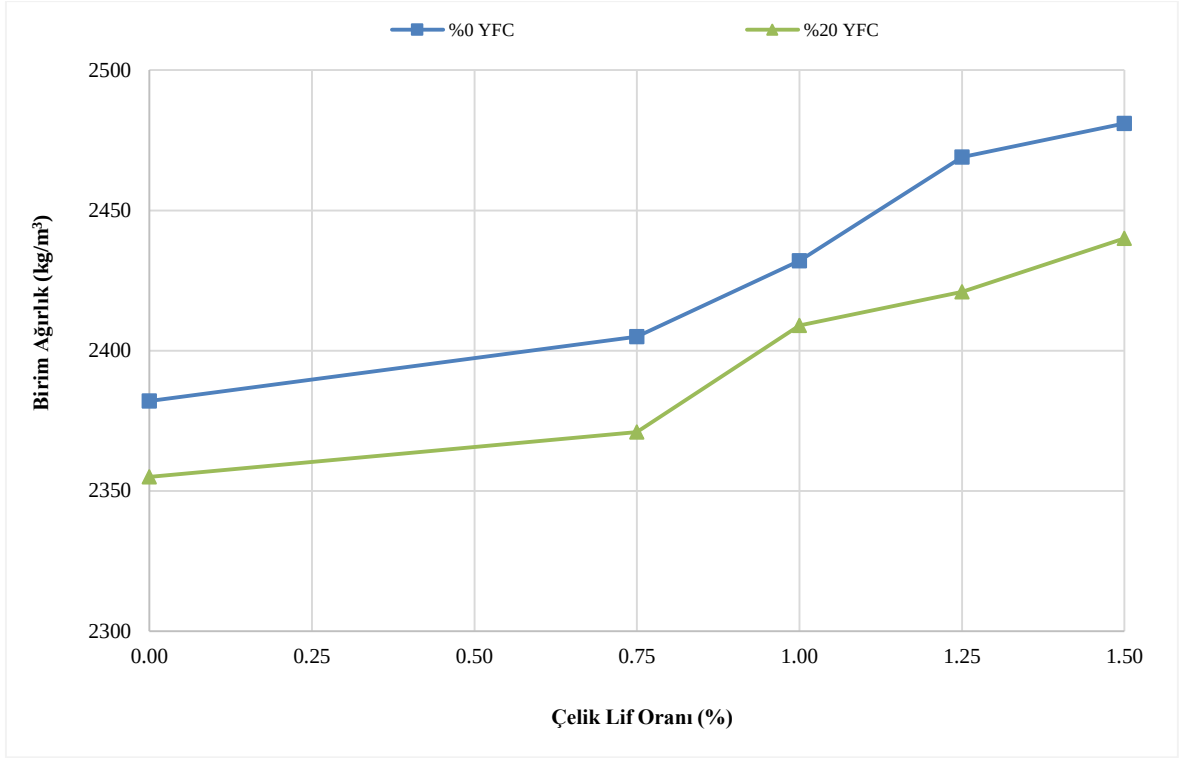


Şekil 4.4 : Taze betonun birim ağırlığının çelik lif (60 mm) ve YFC ile değişimi.

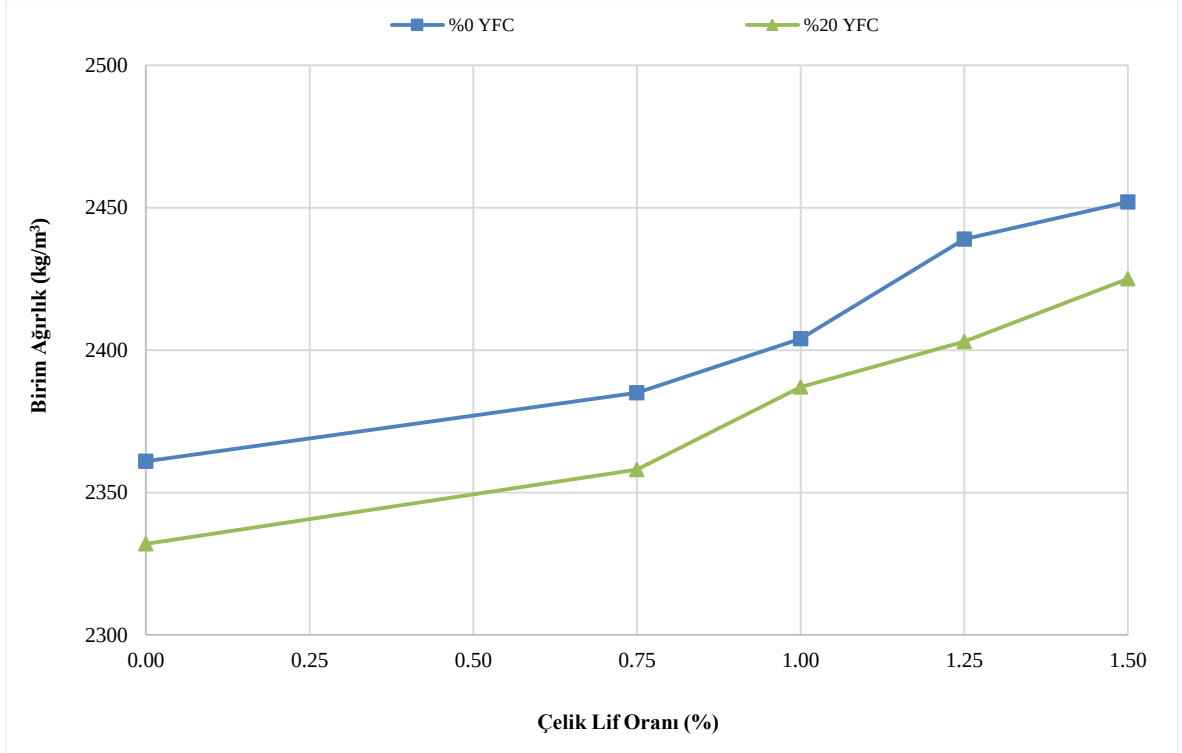


Şekil 4.5 : Sertleşmiş betonun birim ağırlığının çelik lif (60 mm) ve YFC ile değişimi.

Ayrıca, %20 YFC ve çelik lif (35 mm) katkılı taze ve sertleşmiş betonların birim ağırlıklarındaki değişimi ise Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Taze betonun birim ağırlığının çelik lif (35 mm) ve %20 YFC oranına göre değişimi.



Şekil 4.7 : Sertleşmiş betonun birim ağırlığının çelik lif (35 mm) ve %20 YFC oranına göre değişimi.

Betona ilave edilen YFC, taze ve sertleşmiş betonun birim ağırlıklarında bir azalışa neden olurken, çelik lif miktarının artması ile beton birim ağırlıkları artmıştır. Çimentonun ikamesi olarak kullanılan YFC'nin özgül ağırlığının (2.90) çimentonun özgül ağırlığından (3.08) daha az olması beton birim ağırlıklarının azalmasına sebep olmuş, çelik lif ise yoğunluğunun 7.85 g/cm^3 olmasından dolayı beton birim ağırlıklarını arttırmıştır. Karışımlarda kullanılan çelik liflerin yoğunluğu, agreganın yoğunluğundan çok daha büyük olduğu için çelik liflerin betona katılma oranları arttıkça taze ve sertleşmiş betonun birim ağırlıklarının da arttığı gözlemlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda; çelik lif kullanımının, betonun birim hacim ağırlığını arttırdığı ve bu artışın kullanım hacmine ve görünüm oranına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir (Tabak, 2004). Ayrıca yapılan bir başka çalışmada, tüm liflerin betonun birim ağırlığını, kendi birim ağırlıkları ölçüsünde etkilediği ve çelik liflerin diğer liflere nazaran daha ağır olduğu ve bu ağırlığın lif miktarı arttıkça artmakta olduğu gözlemlenmiştir (Ekincioglu, 2003).

4.1.2 İşlenebilirlik (slump) deney sonuçları

Betona ilave edilen çelik lifler agrega ile çok zor karışırlar, özellikle lif miktarının artması ile lifler birbirlerine kenetlenerek üniform olmayan bir karışıma neden olurlar. Liflerin demet olmasına topaklaşma denir. Eğer betonda topaklaşma az olursa beton yüksek işlenebilirliğe sahip olur. Yüksek bir işlenebilirlik genel olarak karışıma süperakışkanlaştırıcı ilave edilmesiyle elde edilir. Karışımın ince daneli malzemenin yüzdesi ne kadar fazla ise lif dağılımı daha kolay olmaktadır. Yapılan araştırmalarda, betona lif katkısıyla işlenebilirlikte önemli derecede azalmalar görülmüştür. Bu azalma üzerindeki en önemli iki parametre, lif hacmi ve lifin uzunluk/çap oranı yani narinliğidir (Ekincioglu, 2003).

Çalışma kapsamında üretilen numunelerde TS EN 12350-2 göre taze betonun kıvamı ve işlenebilirliğini tespit etmek için slump (çökme) deneyi yapılmıştır.

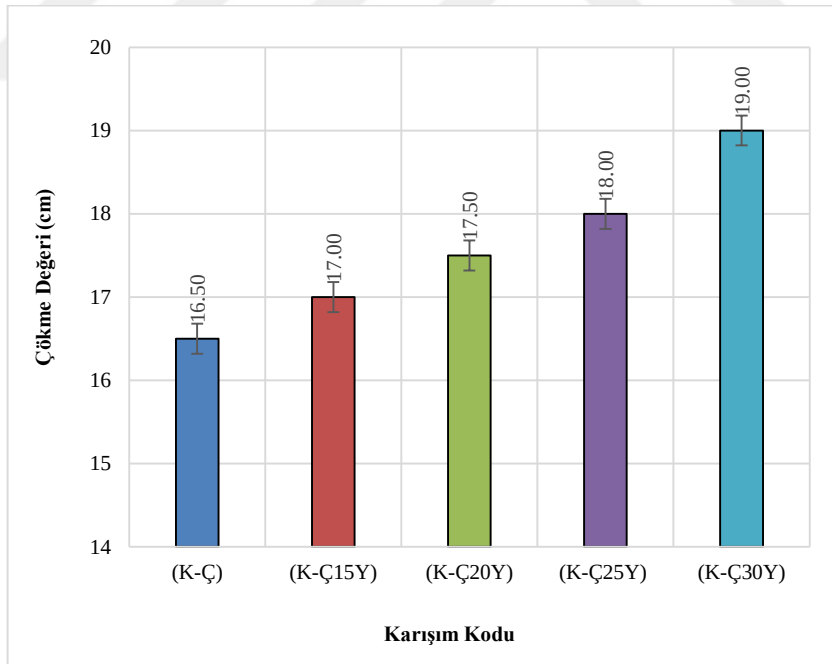
Slump deneyinde, çökme konisi içerisine beton her üçte biri seviyesine kadar doldurulduktan sonra 25 kere şişlenerek koni üst yüzeyine kadar üç defada doldurulmuştur. Üst yüzey mala ile düzeltildikten sonra koni düşey doğrultuda sarsıntıya imkân vermeden kaldırılarak betonun ağırlığı altında ne kadar çöktüğü ölçülmüştür.

4.1.2.1 Kontrol numunelerinin slump deney sonuçları

Kontrol betonların slump (çökme) değerleri ve çökme sınıfları (TS EN 206) Çizelge 4.4'te, bu değerlerin katkı oranına göre değişimi ise Şekil 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Kontrol numunelerin çökme değerleri.

Karışım Kodu	Çökme Değeri (cm)	Çökme Sınıfı
(K-Ç)	16.50	S4
(K-Ç15Y)	17.00	
(K-Ç20Y)	17.50	
(K-Ç25Y)	18.00	
(K-Ç30Y)	19.00	



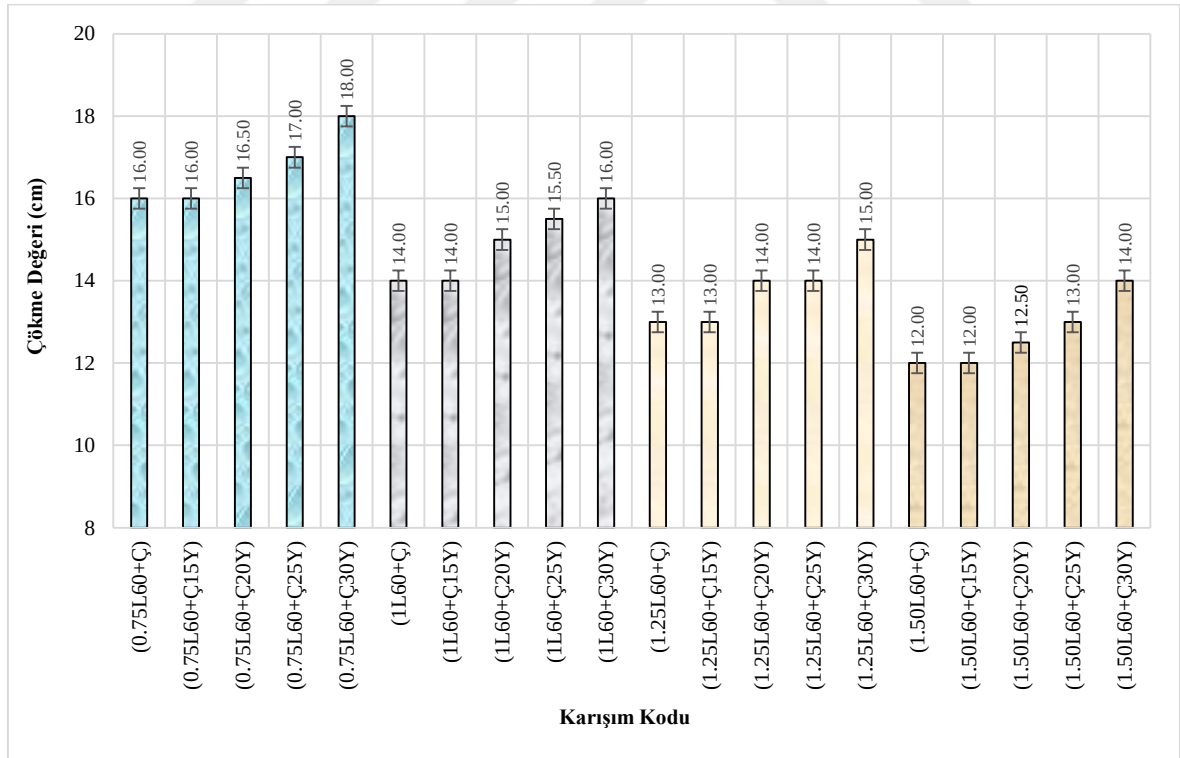
Şekil 4.8 : YFC'nin çökme değerine etkisi.

4.1.2.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin slump deney sonuçları

Farklı oranlardaki çelik lif (60 mm) katkılı ve YFC ikameli betonların slump deney sonuçları Çizelge 4.5'de, numunelerin slump-katkı oranı ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin çökme değerleri.

Karışım Kodu	Çökme Değeri (cm)	Çökme Sınıfı
(0.75L60+Ç)	16.00	S4
(0.75L60+Ç15Y)	16.00	S4
(0.75L60+Ç20Y)	16.50	S4
(0.75L60+Ç25Y)	17.00	S4
(0.75L60+Ç30Y)	18.00	S4
(1L60+Ç)	14.00	S3
(1L60+Ç15Y)	14.00	S3
(1L60+Ç20Y)	15.00	S3
(1L60+Ç25Y)	15.50	S3
(1L60+Ç30Y)	16.00	S4
(1.25L60+Ç)	13.00	S3
(1.25L60+Ç15Y)	13.00	S3
(1.25L60+Ç20Y)	14.00	S3
(1.25L60+Ç25Y)	14.00	S3
(1.25L60+Ç30Y)	15.00	S3
(1.50L60+Ç)	12.00	S3
(1.50L60+Ç15Y)	12.00	S3
(1.50L60+Ç20Y)	12.50	S3
(1.50L60+Ç25Y)	13.00	S3
(1.50L60+Ç30Y)	14.00	S3



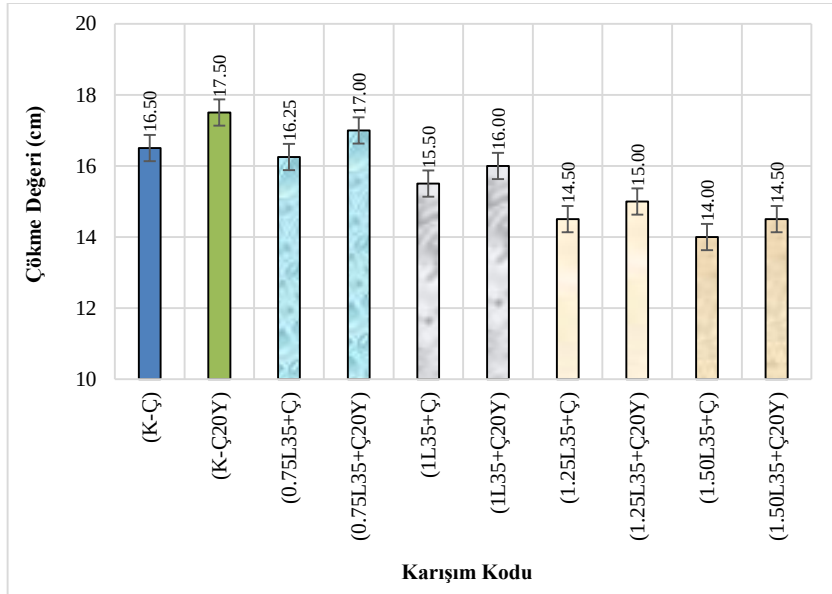
Şekil 4.9 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin çökme değerleri.

4.1.2.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerinin slump deney sonuçları

YFC katkılı numunelerden basınç dayanımının en yüksek değerinin elde edildiği optimum %20 YFC oranı ile aynı çelik lif (35 mm) oranları kullanılarak beton numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan beton numunelerinin slump sonuçları Çizelge 4.6’da, bu slump değerlerinin katkı oranı ile değişimi etkisi ise Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin çökme değerleri.

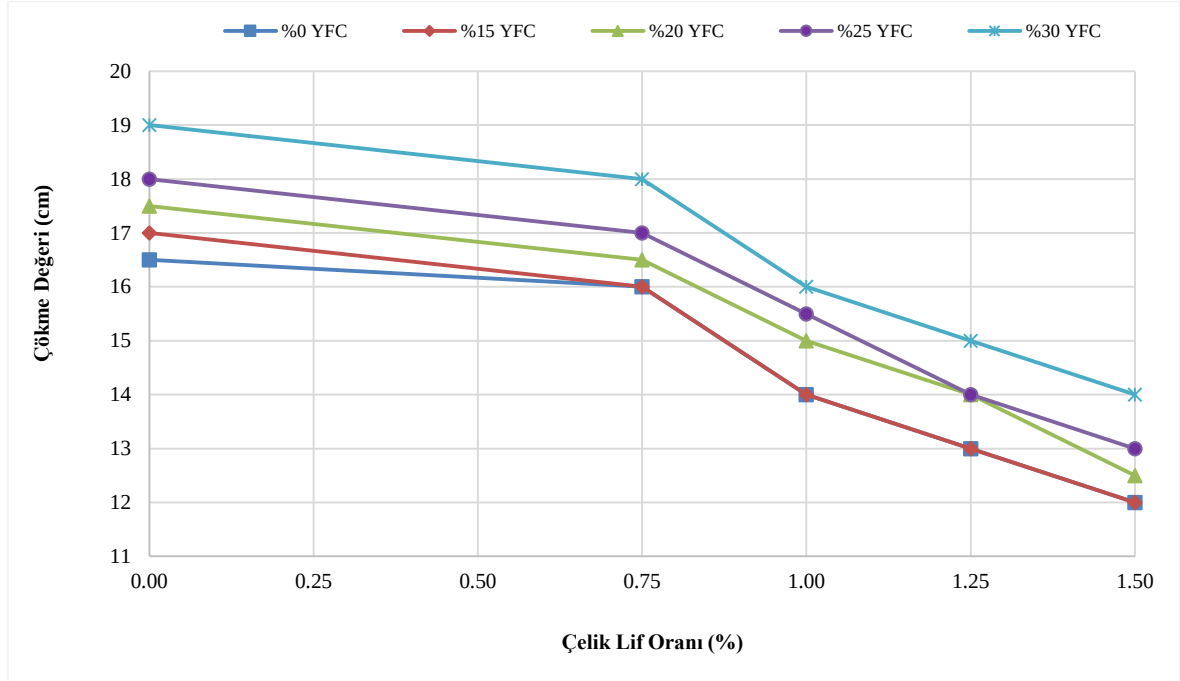
Karışım Kodu	Çökme Değeri (cm)	Çökme Sınıfı
(K-Ç)	16.50	S4
(K-Ç20Y)	17.50	S4
(0.75L35+Ç)	16.25	S4
(0.75L35+Ç20Y)	17.00	S4
(1L35+Ç)	15.50	S3
(1L35+Ç20Y)	16.00	S4
(1.25L35+Ç)	14.50	S3
(1.25L35+Ç20Y)	15.00	S3
(1.50L35+Ç)	14.00	S3
(1.50L35+Ç20Y)	14.50	S3



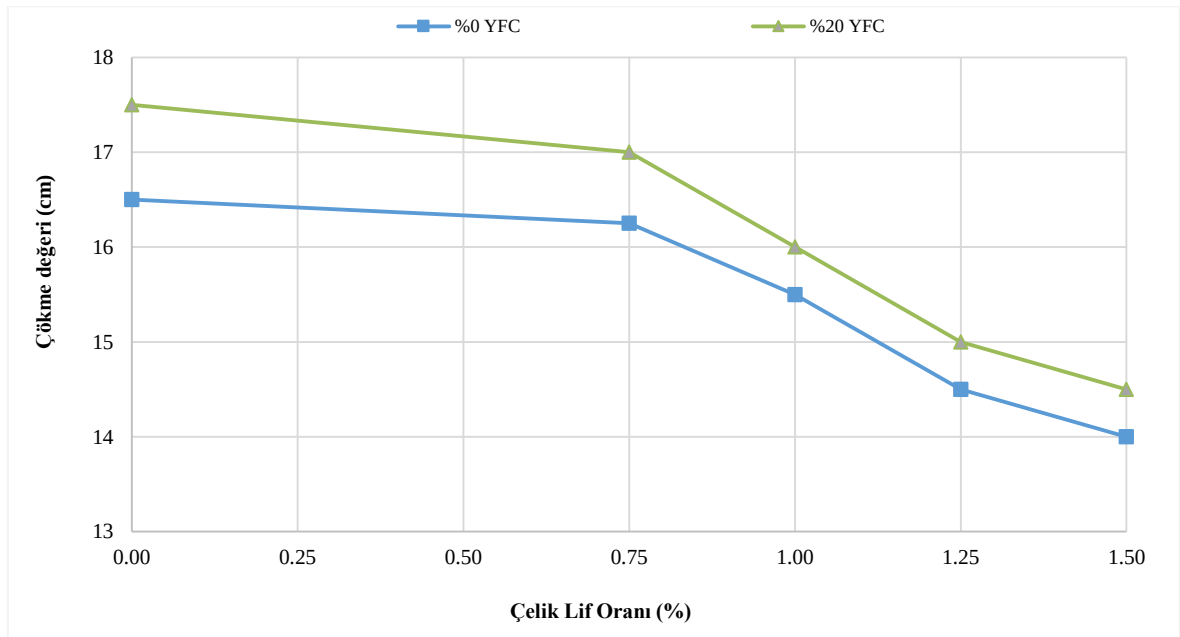
Şekil 4.10 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin çökme değerleri.

4.1.2.4 Numunelerin slump deney sonuçlarının değerlendirilmesi

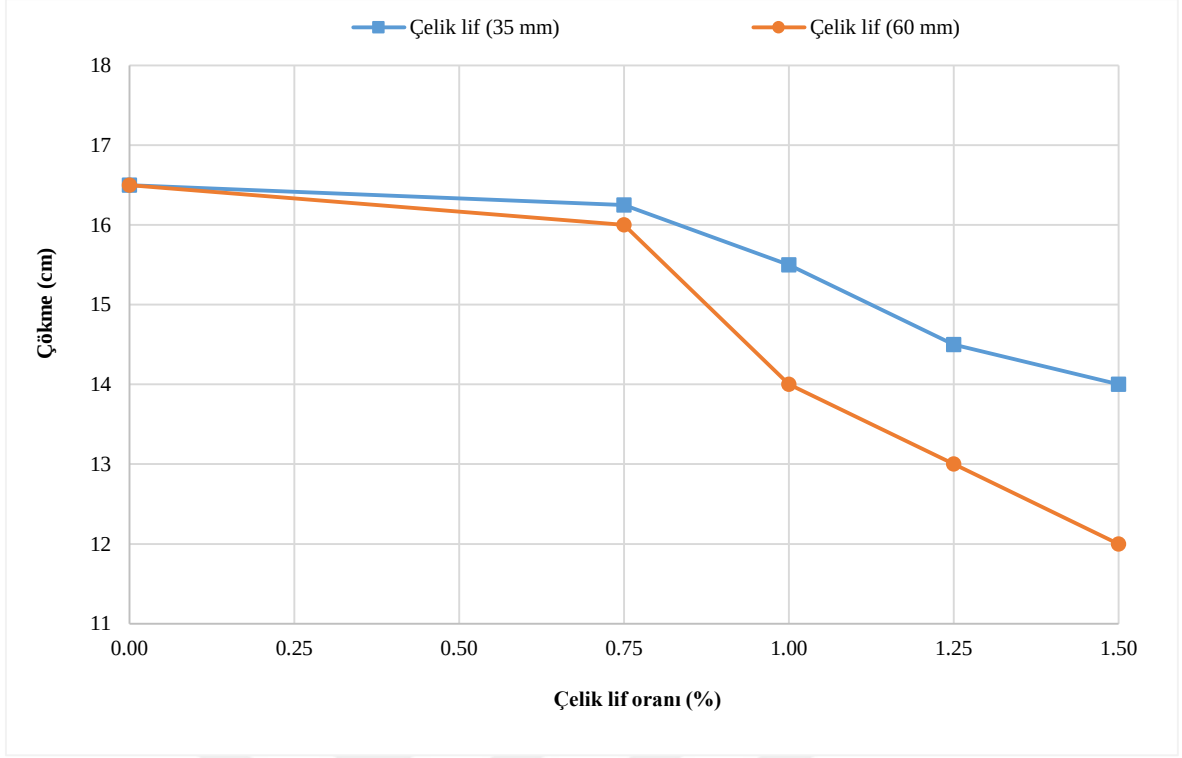
Çelik lif (60 mm) ve YFC ikame oranları ile çelik lif (35 mm) ve %20 YFC ikame oranları ve arasındaki işlenebilirlik ilişkisi Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de, YFC içermeyen, çelik lif katkılı (35 mm ve 60 mm) numunelere ait çökme değerinin karşılaştırmalı grafiği ise Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.11 : Çelik lif (60 mm) ve YFC’nin çökme değerine etkisi.



Şekil 4.12 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin çökme değerine etkisi.



Şekil 4.13 : Çelik lif (35 mm ve 60 mm) katkılı numunelerin çökme değerine etkisi.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 incelendiğinde, beton karışımlarının içerisindeki çelik lif oranı arttıkça çökme değerinin azaldığı, bir başka deyişle işlenebilirliğin zorlaştığı görülmüştür. Şekil 4.13’de ise, uzun lifli betonun kısa lif türüne göre daha az işlenebilirliğe sahip olduğunu tespit edilmiştir.

Ayrıca, karışım içerisinde çimentonun ikmesi olarak kullanılan YFC oranının artmasıyla YFC’nin çelik lif ilaveli betonların işlenebilirliğini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Lif katkılı betonlarda lif hacminin artması ile işlenebilirliğin azaldığı, bu sebeple işlenebilirliğin belli bir seviyede tutulabilmesi için önlem alınması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, çelik lif ilave edilmiş betonlarda YFC kullanımının taze betondaki işlenebilirliği kontrol betonuna göre belli bir oranda iyileştirdiği görülmüştür. Bunun sebebinin, YFC’nin klinkere göre yüzey pürüzlülüğünün az olması (YFC’nin blaine değeri: 4417 cm²/g; çimentonun blaine değeri: 3720 cm²/g) ve özgül ağırlığının çimentodan az olması olarak değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmalarda, betona ilave edilen çelik liflerin karışım oranlarına bağlı olarak betonların işlenebilirlik özelliklerini etkilediği hatta çelik lif oranı arttıkça betonun işlenebilirliğinin azaldığı görülmüştür (Acun, 2000; Türk, Başsürücü ve Bitkin, 2021). Ayrıca, çelik liflerin her hacim ve görünüm oranında taze betonun işlenebilirlik özelliğini

düşürdüğü ve özellikle lif hacmi %1’den fazla olan betonlarda işlenebilirlikte oldukça düşme görüldüğü gözlemlenmiştir (Tabak, 2004).

4.1.3 Basınç dayanımı deney sonuçları

Bağlayıcı olarak çimento ve çimentonun ikamesi olarak farklı oranlarda kullanılan YFC ilaveli kontrol numuneleri ile çelik lif (60 mm) katkılı karışımlar kalıplara yerleştirilip 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Daha sonra prizini alan numuneler kalıplardan çıkarılarak sıcaklığı 23 ± 2 °C’de olan kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün bekletilmiştir. Tüm numuneler kür süresinin sonunda havuzdan çıkarılıp laboratuvar ortamında bekletilerek doymun yüzey kuru (DYK) hale getirilmiştir. DYK halindeki 150x150x150 mm ölçülerinde üç adet küp numune test edilmiştir. Test sonucunda optimum YFC oranı %20 olarak tespit edilmiştir. Basınç dayanımına tabi tutulmuş numuneler Şekil 4.14’de verilmiştir.



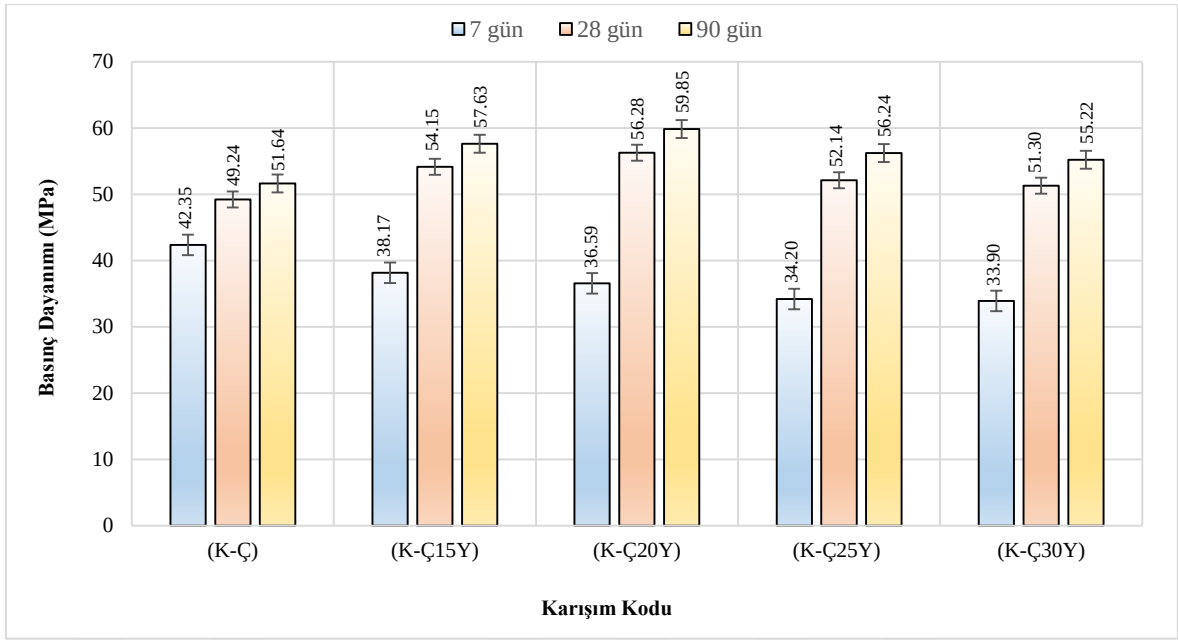
Şekil 4.14 : Basınç dayanımı için test cihazı ve deneye tabi tutulmuş numune.

4.1.3.1 Kontrol numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları

Kontrol numunelerin basınç dayanımları her grupta üç numunenin ortalaması alınarak 7, 28 ve 90 gün olarak belirlenmiştir. Üretilen kontrol betonlarına ait basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.7’de, basınç dayanımlarının katkı oranına göre değişimi ise Şekil 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Kontrol numunelerinin basınç dayanım değerleri.

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(K-Ç)	42.35	49.24	51.64
(K-Ç15Y)	38.17	54.15	57.63
(K-Ç20Y)	36.59	56.28	59.85
(K-Ç25Y)	34.20	52.14	56.24
(K-Ç30Y)	33.90	51.30	55.22



Şekil 4.15 : Kontrol numunelerinin basınç dayanımları.

Şekil 4.15’de görüldüğü gibi, sadece çimento ile üretilmiş (K-Ç) kontrol numunesine göre YFC ikamesi ile 7 gün kür süresine tabi tutulmuş numunelerin basınç dayanımında azalma, 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarında ise artış meydana gelmiştir. Bu artış (K-Ç20Y) numunesinde maksimum değere ulaşmış, bu değerden sonra artış miktarında azalma meydana gelmiştir.

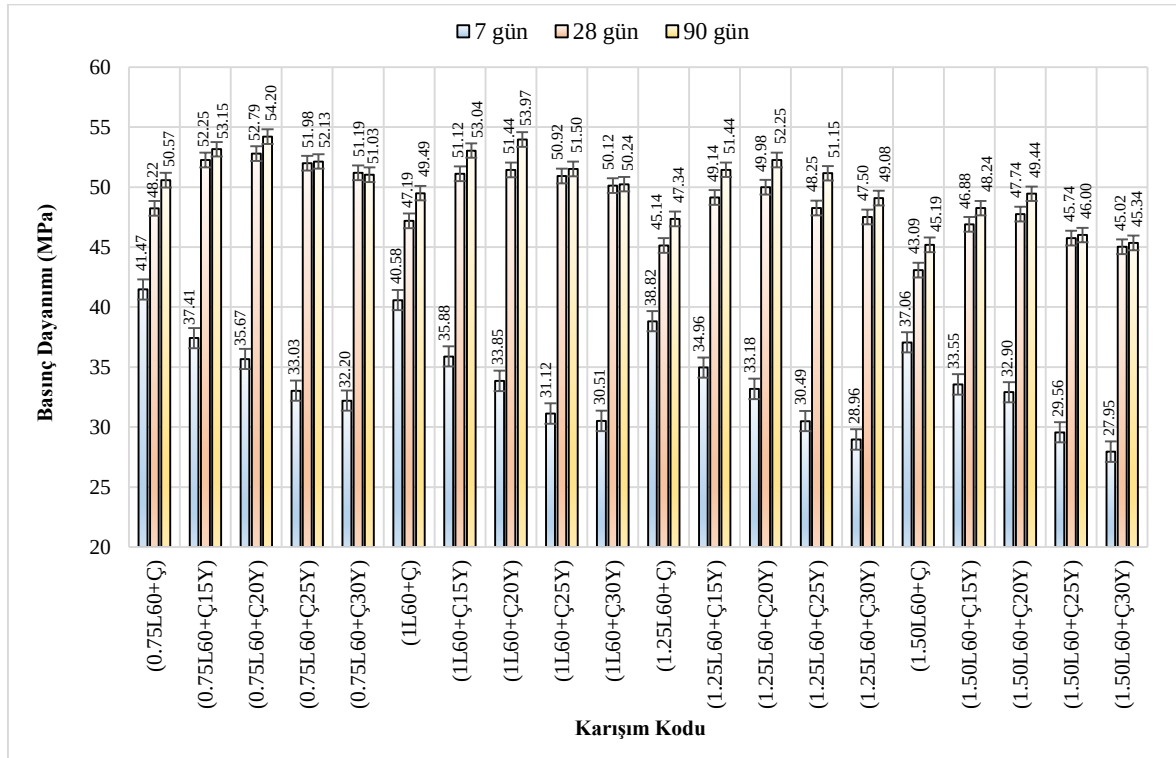
Betonun 28 günlük kür süresi dikkate alındığında; basınç dayanımındaki artışın referans kontrol betona kıyasla, %15, %20, %25 ve %30 YFC ikameli betonlarda sırasıyla %9.97, %14.30, %5.89 ve %4.18 oranlarında meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durumun sebebinin; YFC’nin hidratasyonunun, çimentonun hidratasyonundan daha sonra başlamasından dolayı, YFC katkılı betonların basınç dayanımları erken dönemlerde normal betona göre daha düşük, uzun dönemlerde ise puzolonik özelliğinden dolayı basınç dayanımlarının daha fazla olduğu gösterilebilir. Literatürde yapılan çalışmada, beton karışımında çimentonun %40 oranında YFC ile değiştirilmesiyle, kontrol betonuna kıyasla %40'a kadar mukavemette artış olduğu gözlemlenmiştir (Prasanna, Srinivasu ve Ramachandra, 2021).

4.1.3.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları

Çelik lif katkılı numunelerin farklı oranlarda YFC ikameli betonlarda basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir. Çelik lif ve YFC katkısının basınç dayanımına etkisi ise Şekil 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin basınç dayanım değerleri.

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(0.75L60+Ç)	41.47	48.22	50.57
(0.75L60+Ç15Y)	37.41	52.25	53.15
(0.75L60+Ç20Y)	35.67	52.79	54.20
(0.75L60+Ç25Y)	33.03	51.98	52.13
(0.75L60+Ç30Y)	32.20	51.19	51.03
(1L60+Ç)	40.58	47.19	49.49
(1L60+Ç15Y)	35.88	51.12	53.04
(1L60+Ç20Y)	33.85	51.44	53.97
(1L60+Ç25Y)	31.12	50.92	51.50
(1L60+Ç30Y)	30.51	50.12	50.24
(1.25L60+Ç)	38.82	45.14	47.34
(1.25L60+Ç15Y)	34.96	49.14	51.44
(1.25L60+Ç20Y)	33.18	49.98	52.25
(1.25L60+Ç25Y)	30.49	48.25	51.15
(1.25L60+Ç30Y)	28.96	47.50	49.08
(1.50L60+Ç)	37.06	43.09	45.19
(1.50L60+Ç15Y)	33.55	46.88	48.24
(1.50L60+Ç20Y)	32.90	47.74	49.44
(1.50L60+Ç25Y)	29.56	45.74	46.00
(1.50L60+Ç30Y)	27.95	45.02	45.34



Şekil 4.16 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin basınç dayanım grafiği.

Şekil 4.16 incelendiğinde;

7, 28 ve 90 gün kür süresine tabi lif katkılı numunelerin kontrol numunelerine kıyasla basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Sadece lif katkılı numuneler için ise %20 YFC oranına kadar basınç dayanımında artış, bu optimum değerden sonra azalış meydana geldiği tespit edilmiştir.

28 günlük kür süresi sonucunda lif katkılı numunelerin kontrol numunelerine göre basınç dayanımındaki azalma sırasıyla;

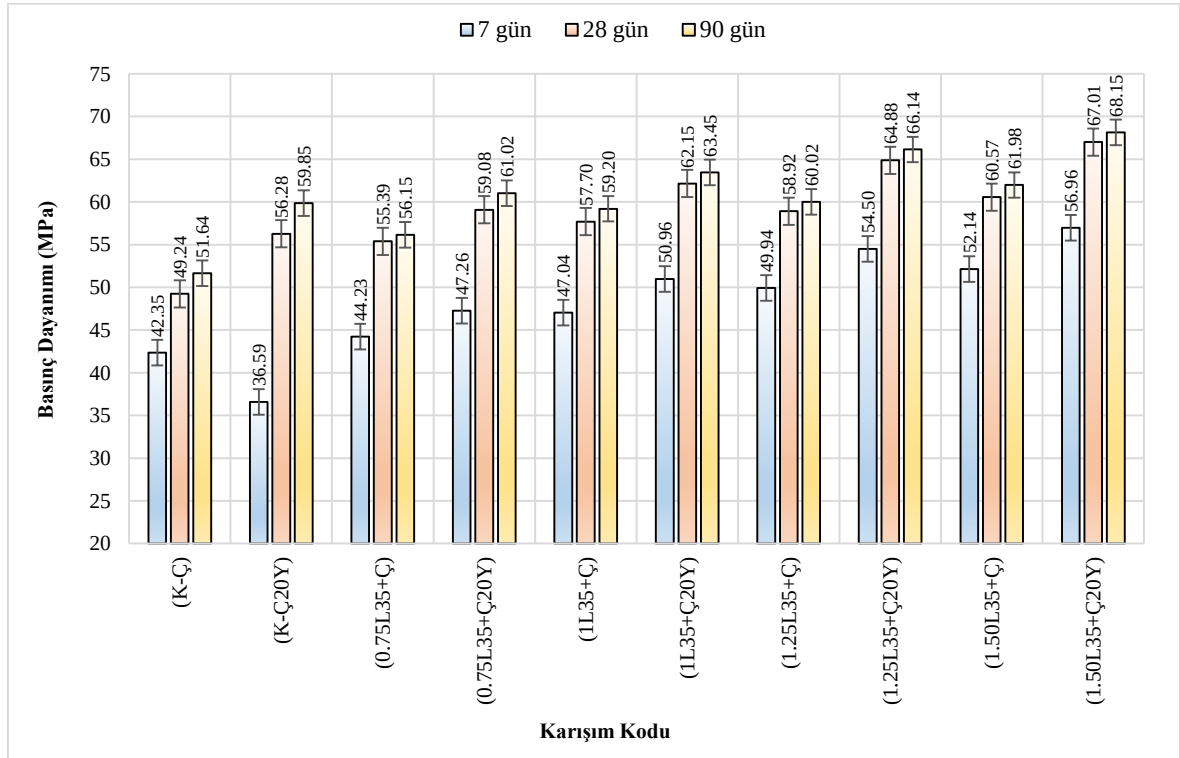
- ✓ %0.75 çelik lif katkılı (0.75L60+Ç), (0.75L60+Ç15Y), (0.75L60+Ç20Y), (0.75L60+Ç25Y) ve (0.75L60+Ç30Y) numunelerde %2.07, %3.51, %6.20, %0.31 ve %0.21;
- ✓ %1.00 çelik lif katkılı (1L60+Ç), (1L60+Ç15Y), (1L60+Ç20Y), (1L60+Ç25Y) ve (1L60+Ç30Y) numunelerde %4.16, %5.60, %8.60, %2.34 ve %2.30;
- ✓ %1.25 çelik lif katkılı (1.25L60+Ç), (1.25L60+Ç15Y), (1.25L60+Ç20Y), (1.25L60+Ç25Y) ve (1.25L60+Ç30Y) numunelerde %8.33, %9.25, %11.19, %7.46 ve %7.41;
- ✓ %1.50 çelik lif katkılı (1.50L60+Ç), (1.50L60+Ç15Y), (1.50L60+Ç20Y), (1.50L60+Ç25Y) ve (1.50L60+Ç30Y) numunelerde %12.49, %13.43, %15.17, %12.27 ve %12.24 olarak tespit edilmiştir.

4.1.3.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları

YFC katkılı numunelerden basınç dayanımının en yüksek değerinin elde edildiği optimum %20 YFC oranı ile farklı oranlardaki çelik lif (35 mm) kullanılarak beton numuneleri hazırlanmıştır. Beton numunelerinin basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.9’da, çelik lifin basınç dayanımına etkisi Şekil 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin %20 YFC ikameli betonlarda basınç dayanım değerleri.

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(K-Ç)	42.35	49.24	51.64
(K-Ç20Y)	36.59	56.28	59.85
(0.75L35+Ç)	44.23	55.39	56.15
(0.75L35+Ç20Y)	47.26	59.08	61.02
(1L35+Ç)	47.04	57.70	59.20
(1L35+Ç20Y)	50.96	62.15	63.45
(1.25L35+Ç)	49.94	58.92	60.02
(1.25L35+Ç20Y)	54.50	64.88	66.14
(1.50L35+Ç)	52.14	60.57	61.98
(1.50L35+Ç20Y)	56.96	67.01	68.15



Şekil 4.17 : Kontrol ve çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin basınç dayanımı.

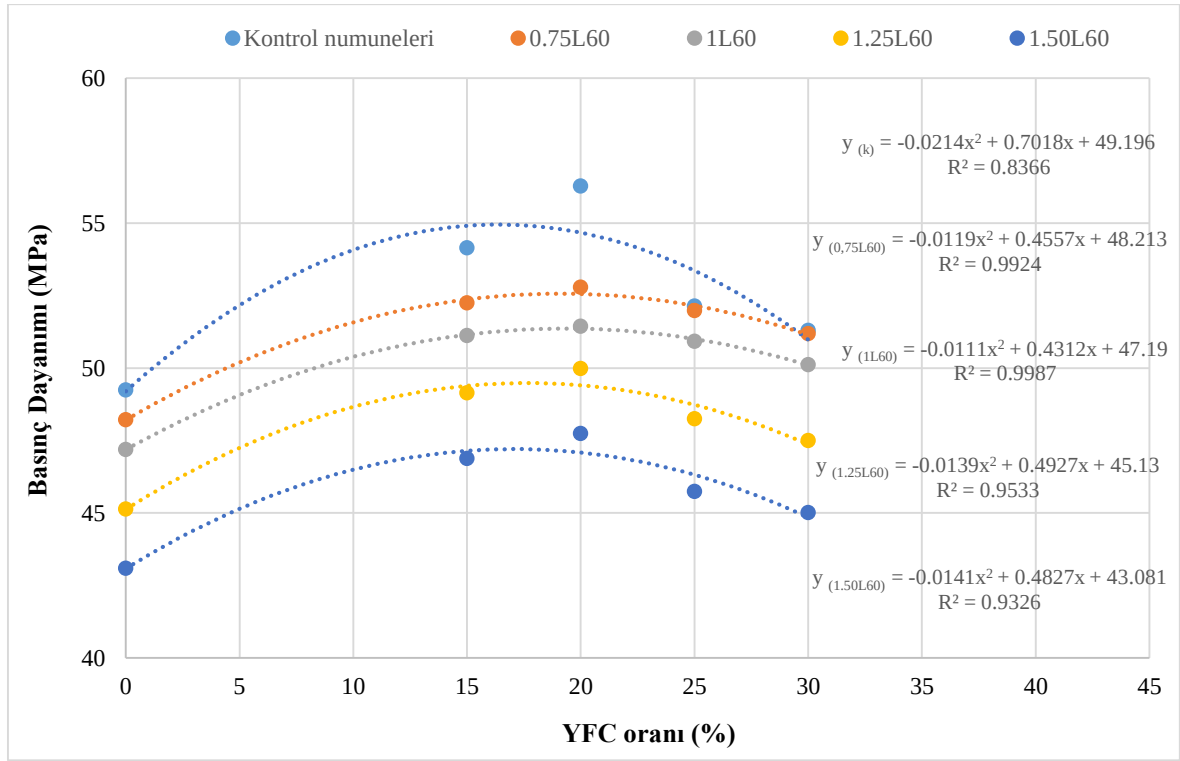
Şekil 4.17 incelendiğinde; çelik lif (35 mm) katkısı ile numunelerin basınç dayanım değeri kontrol numunelerine (K-Ç, K-Ç20Y) göre artış göstermiştir. Bu artış miktarı 28 günlük dayanım için sırasıyla;

- ✓ (0.75L35+Ç) ve (0.75L35+Ç20Y) numuneleri için %12.48 ve %4.98; çelik lif (60 mm) ile kıyaslandığında (0.75L60+Ç) ve (0.75L60+Ç20Y) numuneleri için ise sırasıyla %14.91 ve %11.92,
- ✓ (1L35+Ç) ve (1L35+Ç20Y) numuneleri için %17.18 ve %10.43; çelik lif (60 mm) ile kıyaslandığında, (1L60+Ç) ve (1L60+Ç20Y) numuneleri için ise %22.27 ve %20.82,
- ✓ (1.25L35+Ç) ve (1.25L35+Ç20Y) numuneleri için %19.66 ve %15.28; çelik lif (60 mm) ile kıyaslandığında, (1.25L60+Ç) ve (1.25L60+Ç20Y) numuneleri için ise %30.53 ve %29.81,
- ✓ (1.50L35+Ç) ve (1.50L35+Ç20Y) numuneleri için %23.01 ve %19.07; çelik lif (60 mm) ile kıyaslandığında (1.50L60+Ç) ve (1.50L60+Ç20Y) numuneleri için ise %40.57 ve %40.36 daha fazla dayanım artışı meydana gelmiştir.

Yapılan deneysel çalışma kapsamında; farklı oranlarda çimentonun ikamesi olarak kullanılan YFC'nin %20 oranına kadar betonun basınç dayanımını artırdığı, buna karşın YFC'li karışımlara farklı oranlarında çelik lif (60 mm) ilavesi ile betonun basınç dayanımında azalış meydana geldiği; 35 mm'lik çelik lif katkılı betonlarda ise kontrol numunelerine kıyasla basınç dayanımında artış meydana geldiği, lif katkılı (35 mm) %20 YFC'li numunelerde basınç dayanımının en yüksek değeri aldığı tespit edilmiştir. Çalışmada beton basınç dayanımında elde edilen artış ve azalış miktarına paralel olarak literatürde lif takviyeli betonlarla ilgili çalışmada, betona lif ilave edilmesinin basınç dayanımının yaklaşık olarak ± 25 oranına kadar değişim gösterdiği gözlemlenmiştir (Pierre, 2000).

4.1.3.4 Numunelerin basınç dayanımını deney sonuçlarının değerlendirilmesi

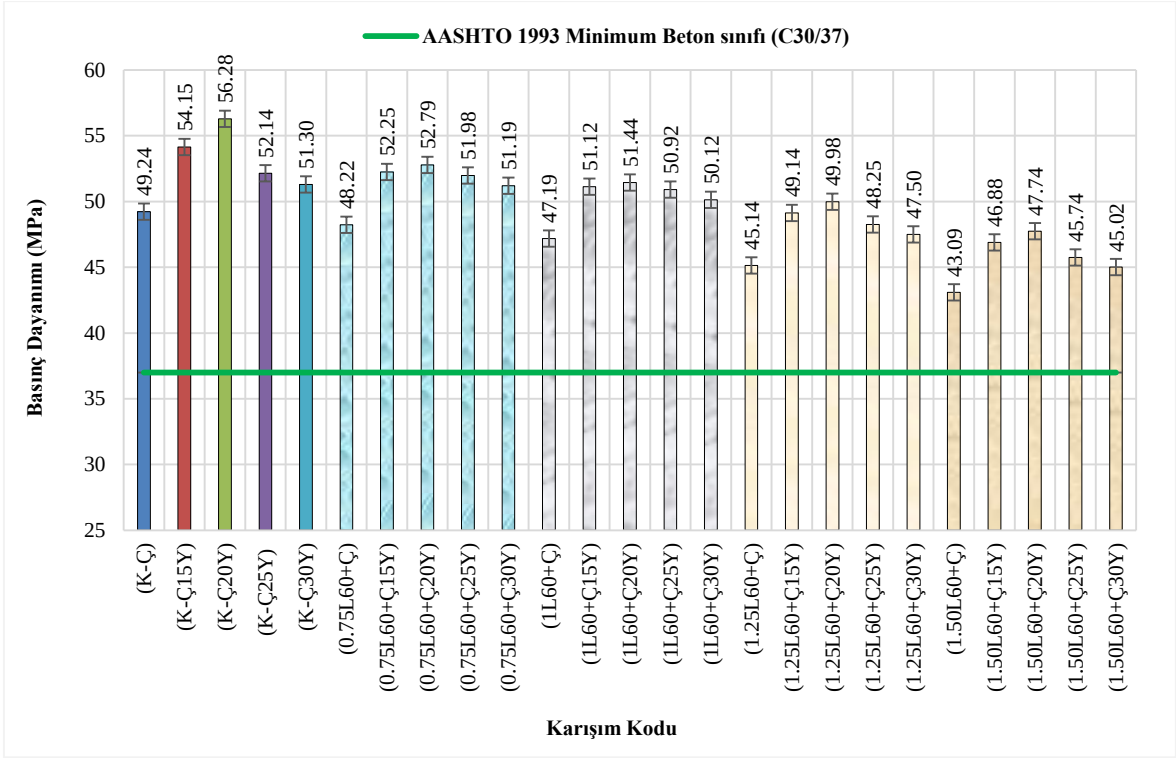
%0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 çelik lif (60 mm) katkılı 28 günlük numunelerin %15, %20, %25 ve %30 YFC oranına bağlı olarak basınç dayanımının tahmini için basınç dayanımı-YFC oranı regresyon analizi sonuçları Şekil 4.18'de verilmiştir.



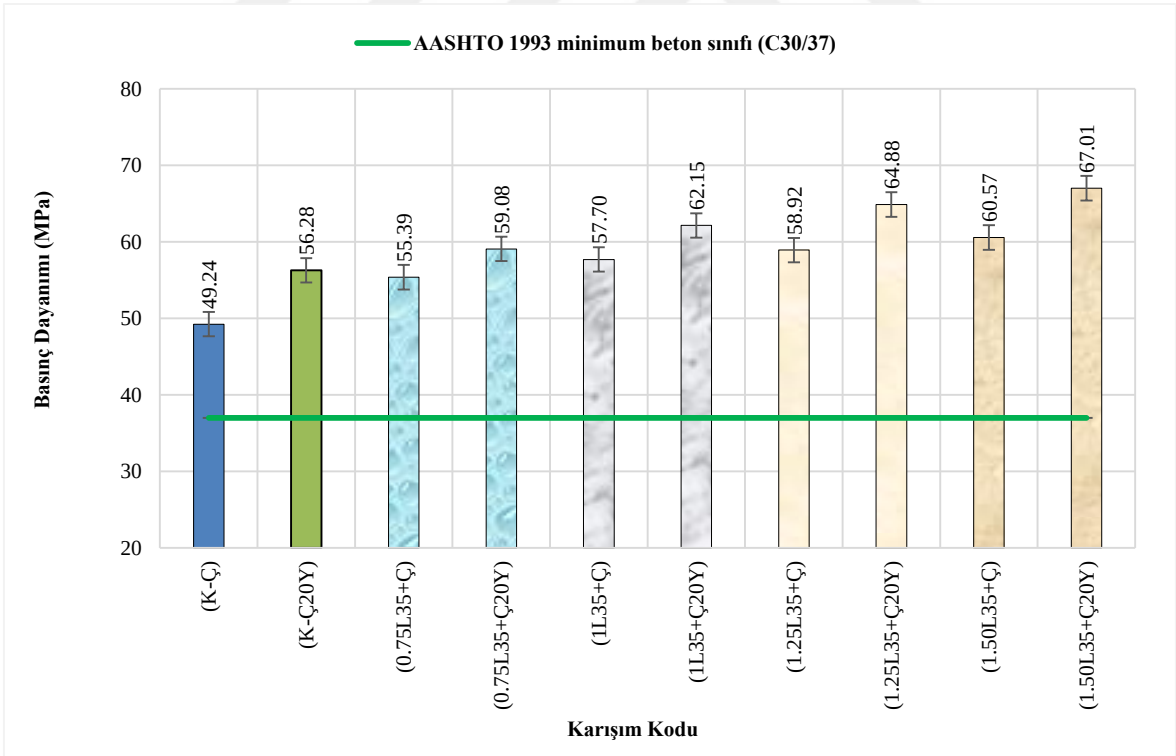
Şekil 4.18 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin Basınç Dayanımı-YFC oranı ilişkisi.

Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin basınç dayanımı-YFC oranı ilişkisi eğilim çizgileri incelendiğinde, 2. dereceden parabolik bir eğri oluşturmaktadır. Bu ilişkinin regresyon katsayısı R^2 'nin 1'e yakın olması, YFC oranıyla basınç dayanımı arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.

TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre beton dayanım sınıfı olarak minimum C30/37 MPa seçilmesi önerilmektedir. Yapılan çalışma kapsamında çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin 28 günlük basınç dayanımı C30/37 MPa ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında tespit edilen optimum %20 YFC ile çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait sonuçlar ise Şekil 4.20'de verilmiştir.



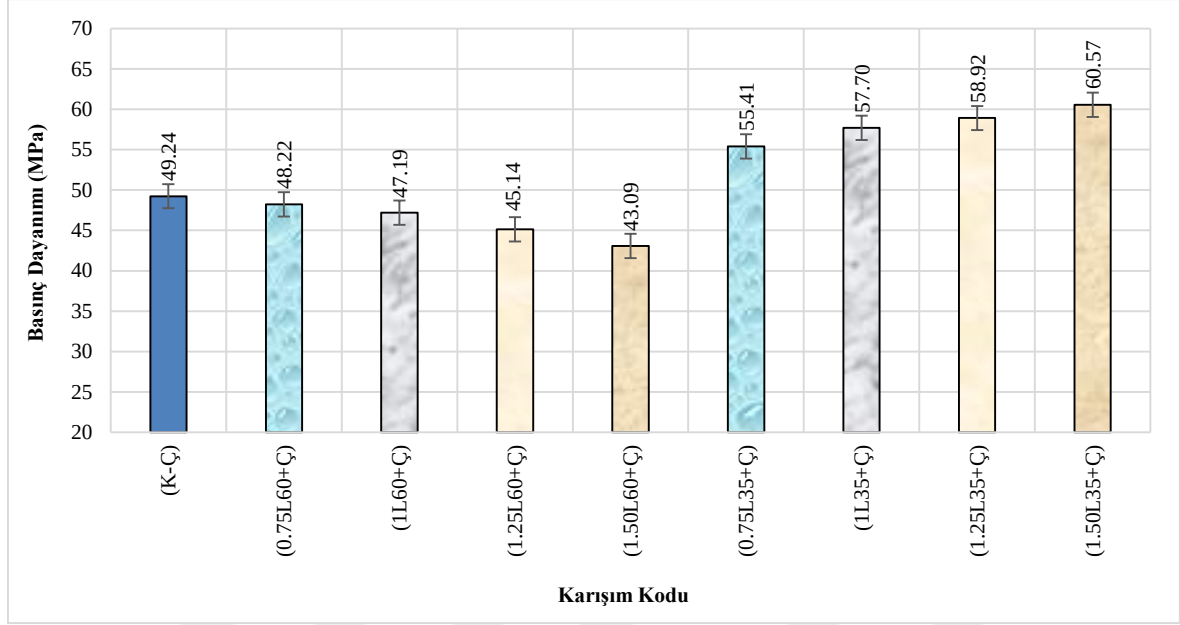
Şekil 4.19 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin basınç dayanımının tasarım kriteri.



Şekil 4.20 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin basınç dayanımının tasarım kriteri.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 incelendiğinde; 28 günlük basınç dayanımı sonunda tüm numunelerin TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre istenen minimum beton basınç dayanımı C30/37 şartlarını sağladığı tespit edilmiştir.

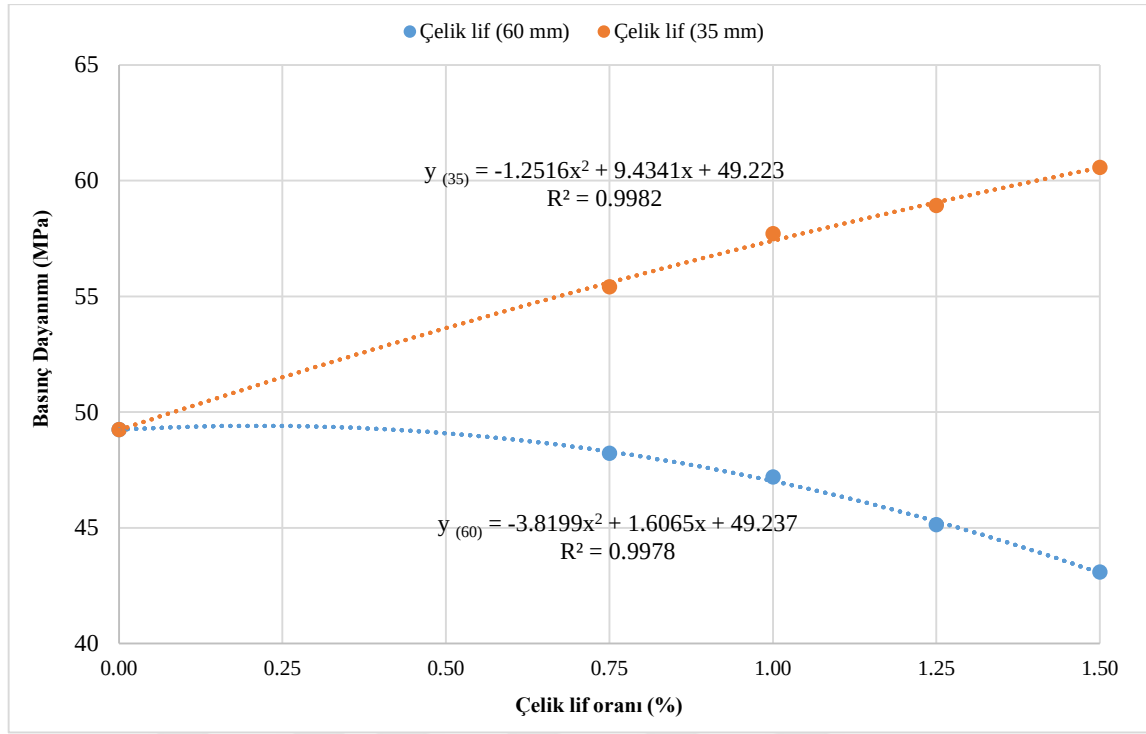
Bağlayıcısı sadece çimentolu ve farklı oranlarda çelik lif katkılı (35 mm ve 60 mm) numunelerin 28 günlük basınç dayanımına etkisi Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 : Çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelerin basınç dayanımına etkisi

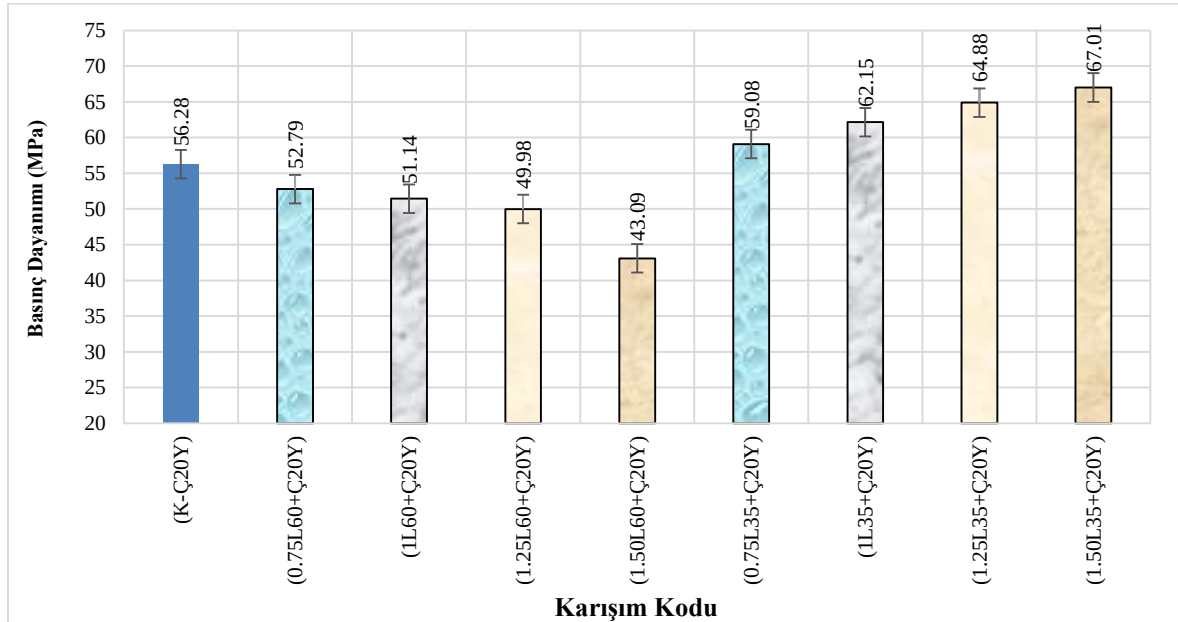
Şekil 4.21 incelendiğinde, çelik lif (60 mm) katkısının kontrol numunesine göre basınç dayanımı düşürdüğü, dayanımdaki bu azalmanın (0.75L60+Ç), (1L60+Ç), (1.25L60+Ç) ve (1.50L60+Ç) için sırasıyla %2.07, %4.16, %8.33 ve %12.49 olduğu; çelik lif (35 mm) katkısının ise kontrol numunesine göre basınç dayanımı artırdığı, dayanımdaki bu artışın (0.75L35+Ç), (1L35+Ç), (1.25L35+Ç) ve (1.50L35+Ç) için sırasıyla %12.53, %17.18, %19.66 ve %23.01 olduğu tespit edilmiştir.

Farklı oranlarda çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelere ait basınç dayanımının tahmini için regresyon analizi yapılmış, analiz sonucu Şekil 4.22’de verilmiştir. Basınç dayanımı-çelik lif oranı eğilim çizgisi incelendiğinde, bu ilişkinin regresyon katsayısı R^2 ’nin 1’e yakın olması, çelik lif katkılı numunelerin lif oranı ile basınç dayanımı arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.22 : Basınç dayanımı-Çelik lif (35 ve 60 mm) oranı ilişkisi.

Farklı oranlarda çelik lif (35 ve 60 mm) ve bağlayıcısı çimentonun ikamesi olarak optimum %20 YFC katkılı numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının katkı oranına göre değişim etkisi Şekil 4.23'te gösterilmiştir.

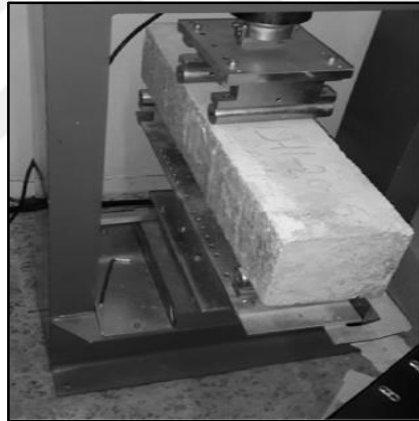


Şekil 4.23 : Çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin basınç dayanımına etkisi.

Şekil 4.23 incelendiğinde, çelik lif (60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin kontrol numunesine göre basınç dayanımında düşüş olduğu, dayanımdaki bu azalmanın (0.75L60+Ç20Y), (1L60+Ç20Y), (1.25L60+Ç20Y) ve (1.50L60+Ç20Y) için sırasıyla %6.20, %8.60, %11.19 ve %23.44 olduğu; çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin ise kontrol numunesine göre basınç dayanımında artış olduğu, dayanımdaki bu artışın (0.75L35+Ç20Y), (1L35+Ç20Y), (1.25L35+Ç20Y) ve (1.50L35+Ç20Y) için sırasıyla %4.98, %10.43, %15.28 ve %19.07 olduğu tespit edilmiştir.

4.1.4 Eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları

Hazırlanan beton numunelerinin eğilmede çekme dayanımları; 7, 28 ve 90 günlük 150x150x525 mm boyutundaki kiriş numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Numunelerin eğilme dayanımları her grupta üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Eğilmede çekme dayanımı deneyleri Şekil 4.24’de verildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



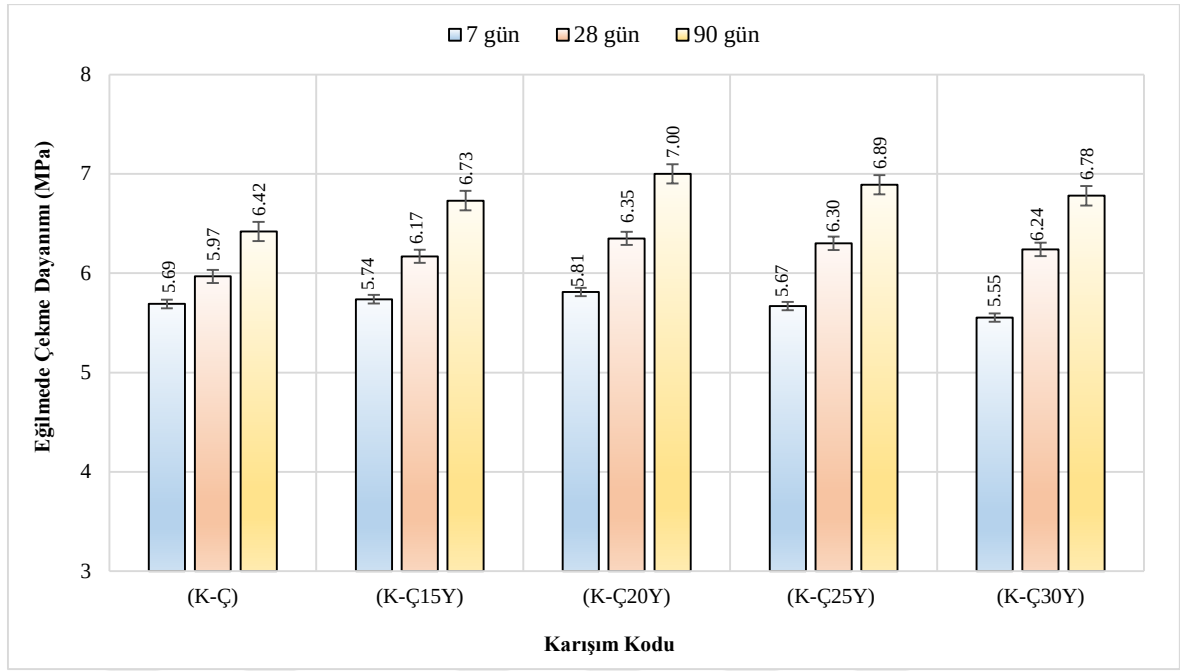
Şekil 4.24 : Kontrol ve YFC katkılı beton numunelerinin eğilme dayanımının tespiti

4.1.4.1 Kontrol numunelerinin eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları

Üretilen kontrol betonlarına ait 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.10’da, bu değerlerin katkı oranına göre değişimi ise Şekil 4.25’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 : Kontrol numunelerinin eğilmede çekme dayanımı değerleri.

Karışım Kodu	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(K-Ç)	5.69	5.97	6.42
(K-Ç15Y)	5.74	6.17	6.73
(K-Ç20Y)	5.81	6.35	7.00
(K-Ç25Y)	5.67	6.30	6.89
(K-Ç30Y)	5.55	6.24	6.78



Şekil 4.25 : Eğilme dayanımı kontrol numuneleri sonuçları.

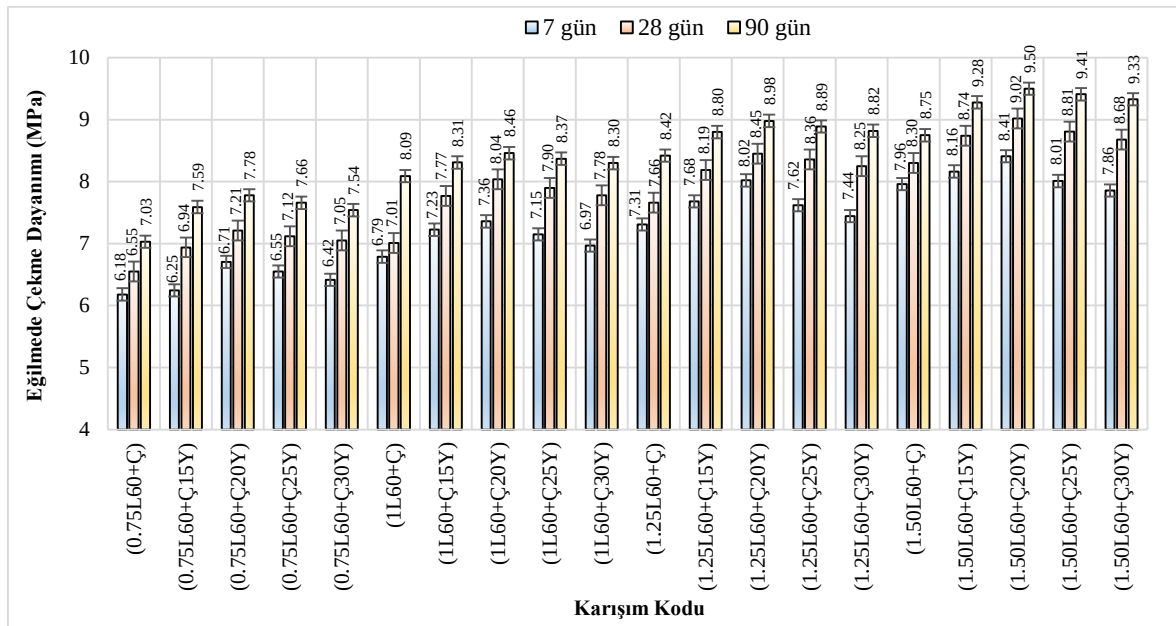
Şekil 4.25 incelendiğinde, sadece çimento ile üretilmiş (K-Ç) kontrol numunesine göre, YFC katkısı ile hazırlanan 7, 28 ve 90 günlük numunelerin tamamının eğilme dayanımlarında artış meydana gelmiştir. Bu artış (K-Ç20Y) numunesinde maksimum değere ulaşmış, bu değerden sonra artış miktarında azalma meydana gelmiştir. Betonun 28 günlük kür süresi dikkate alındığında, eğilme dayanımındaki artışın referans kontrol betona kıyasla, (K-Ç15Y), (K-Ç20Y), (K-Ç25Y) ve (K-Ç30Y) betonlar için sırasıyla, %3.35, %6.37, %5.53 ve %4.52 oranlarında artış olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 90 günlük küre sahip numunelerin eğilme dayanımları 28 günlük küre tabi tutulmuş numunelere kıyasla, (K-Ç15Y), (K-Ç20Y), (K-Ç25Y) ve (K-Ç30Y) betonlar için ise sırasıyla, %9.08, %10.24, %9.37 ve %8.65 oranlarında artış göstermiştir. Bu artışlar dikkate alındığında, kür süresinin uzamasıyla numunelerin eğilme dayanımlarında da artışın devam ettiği görülmüştür. Bunun sebebinin, 90 günlük eğilmede çekme dayanımı değerlerinin, YFC'nin yavaş gelişen hidrasyon reaksiyonlarından ötürü uzun kür sürelerinde daha fazla artış göstermesi şeklinde değerlendirilmektedir (Katlav, 2022; Türk, Katlav ve Turgüt, 2022)

4.1.4.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları

Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin farklı oranlarda YFC ikameli betonlarda eğilmede çekme dayanım sonuçları Çizelge 4.11'de, eğilmede çekme dayanımının katkı oranına bağlı olarak etkisi ise Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanım sonuçları.

Karışım Kodu	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(0.75L+Ç)	6.18	6.55	7.03
(0.75L+Ç15Y)	6.25	6.94	7.59
(0.75L+Ç20Y)	6.71	7.21	7.78
(0.75L+Ç25Y)	6.55	7.12	7.66
(0.75L+Ç30Y)	6.42	7.05	7.54
(1L+Ç)	6.79	7.01	8.09
(1L+Ç15Y)	7.23	7.77	8.31
(1L+Ç20Y)	7.36	8.04	8.46
(1L+Ç25Y)	7.15	7.90	8.37
(1L+Ç30Y)	6.97	7.78	8.30
(1.25L+Ç)	7.31	7.66	8.42
(1.25L+Ç15Y)	7.68	8.19	8.80
(1.25L+Ç20Y)	8.02	8.45	8.98
(1.25L+Ç25Y)	7.62	8.36	8.89
(1.25L+Ç30Y)	7.44	8.25	8.82
(1.50L+Ç)	7.96	8.30	8.75
(1.50L+Ç15Y)	8.16	8.74	9.28
(1.50L+Ç20Y)	8.41	9.02	9.50
(1.50L+Ç25Y)	8.01	8.81	9.41
(1.50L+Ç30Y)	7.86	8.68	9.33



Şekil 4.26 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı.

Şekil 4.26 incelendiğinde;

7, 28 ve 90 gün gün kür süresi sonunda tüm lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre eğilmede çekme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, eğilmede çekme dayanımındaki bu artış %20 YFC oranında pik yapmış, bu optimum değerden sonra ise azalış meydana geldiği tespit edilmiştir.

28 günlük kür süresi sonucunda çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin kontrol numunelerine göre eğilmede çekme dayanımındaki artış;

✓ (0.75L60+Ç), (0.75L60+Ç15Y), (0.75L60+Ç20Y), (0.75L60+Ç25Y) ve (0.75L60+Ç30Y) numunelerinde sırasıyla, %9.77, %12.48, %13.54, %13.02 ve %12.98;

✓ (1L60+Ç), (1L60+Ç15Y), (1L60+Ç20Y), (1L60+Ç25Y) ve (1L60+Ç30Y) numunelerinde sırasıyla, %17.48, %25.93, %26.61, %25.40 ve %24.68;

✓ (1.25L60+Ç), (1.25L60+Ç15Y), (1.25L60+Ç20Y), (1.25L60+Ç25Y) ve (1.25L60+Ç30Y) numunelerinde sırasıyla, %28.37, %32.74, %33.07, %32.70 ve %32.21;

✓ (1.50L60+Ç), (1.50L60+Ç15Y), (1.50L60+Ç20Y), (1.50L60+Ç25Y) ve (1.50L60+Ç30Y) numunelerinde sırasıyla, %39.10, %41.65, %42.05, %39.84 ve %39.10 olduğu tespit edilmiştir.

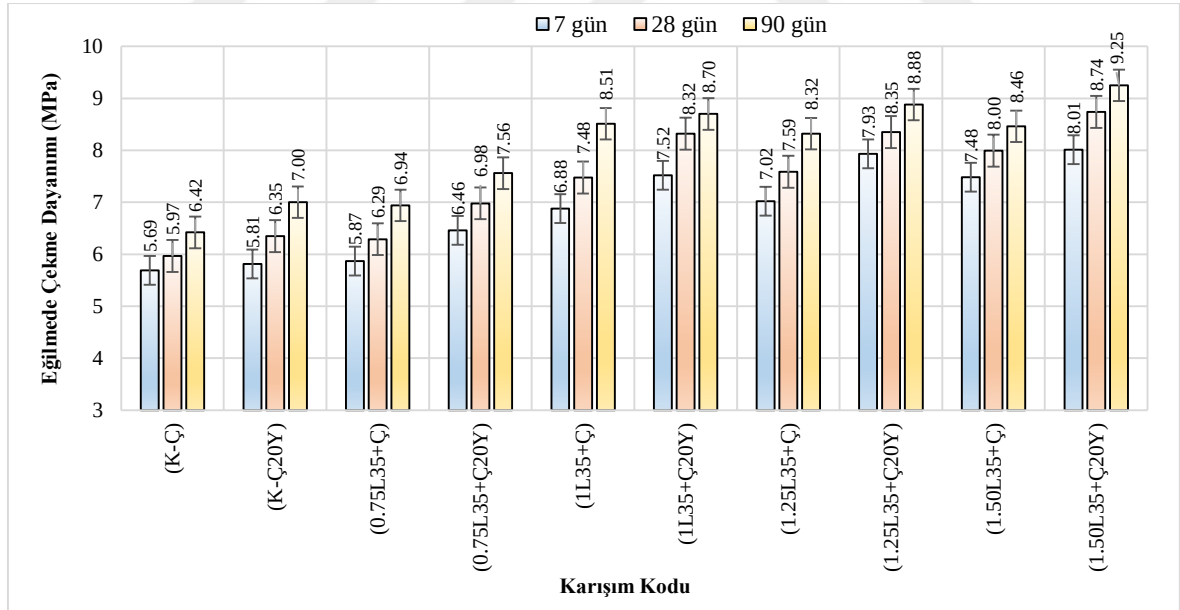
Literatürde yapılan çalışmada, çelik lif katkılı betonun mekanik özellikleri incelenmiş, çelik lifler hacimce %0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00 oranlarında betona ilave edilmiştir. Çalışma sonucunda, betonun eğilmede çekme dayanımındaki artışın çelik lif oranı %1.50 ve %2.00 için sırası ile %98.30 ve %126.60 olduğu gözlemlenmiştir (Song, 2004). Ayrıca, yapılan başka bir çalışmada da, betona ilave edilen liflerin önemli ölçüde eğilmede çekme dayanımını artırdığı görülmüştür (Katlav ve diğ, 2022; Türk, Kına ve Öztekin, 2020; Kına, 2019).

4.1.4.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları

YFC katkılı numunelerden eğilme dayanımının en yüksek değerinin elde edildiği optimum %20 YFC oranı ile 35 mm uzunluğundaki çelik lif kullanılarak beton numuneleri hazırlanmıştır. Beton numunelerinin eğilmede çekme dayanım sonuçları Çizelge 4.12’de, katkı oranının eğilmede çekme dayanımına etkisi ise Şekil 4.27’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin %20 YFC ikameli betonlarda eğilmede çekme dayanım değerleri

Karışım Kodu	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(K-Ç)	5.69	5.97	6.42
(K-Ç20Y)	5.81	6.35	7.00
(0.75L35+Ç)	5.87	6.29	6.94
(0.75L35+Ç20Y)	6.46	6.98	7.56
(1L35+Ç)	6.88	7.48	8.51
(1L35+Ç20Y)	7.52	8.32	8.70
(1.25L35+Ç)	7.02	7.59	8.32
(1.25L35+Ç20Y)	7.93	8.35	8.88
(1.50L35+Ç)	7.48	8.00	8.46
(1.50L35+Ç20Y)	8.01	8.74	9.25



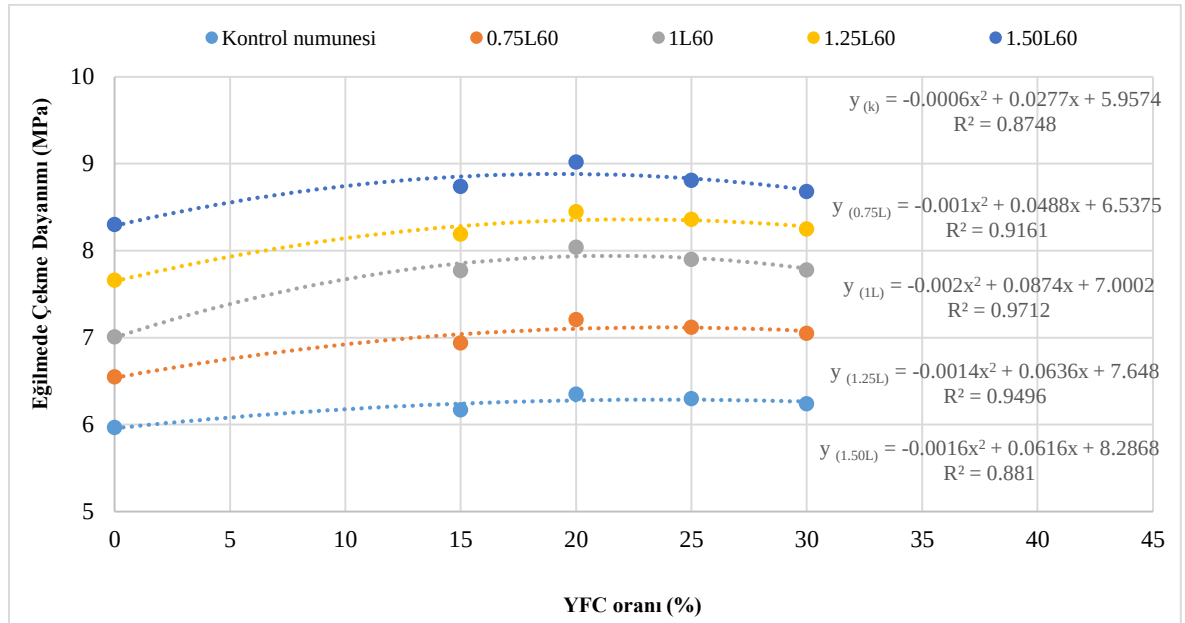
Şekil 4.27 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin eğilme dayanımı.

Şekil 4.27 incelendiğinde; çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerlerinde kontrol numunelerine göre artış olduğu görülürken, çelik lif (60 mm) katkılı numunelerde ise azalma olduğu tespit edilmiştir. Eğilmede çekme dayanımındaki bu artış ve azalış;

- ✓ (0.75L35+Ç) ve (0.75L35+Ç20Y) numuneleri için artış sırasıyla, %5.41 ve %9.92 olarak tespit edilirken, (0.75L60+Ç) ve (0.75L60+Ç20Y) numuneleri için eğilmede çekme dayanımında azalma ise sırasıyla, %5.02 ve %3.66 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ (1L35+Ç) ve (1L35+Ç20Y) numuneleri için artış sırasıyla, %25.32 ve %31.02 olarak tespit edilirken, (1L60+Ç) ve (1L60+Ç20Y) numuneleri için eğilmede çekme dayanımında artış ise sırasıyla, %1.33 ve %2.17 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ (1.25L35+Ç) ve (1.25L35+Ç20Y) numuneleri için artış sırasıyla, %27.15 ve %31.50 olarak tespit edilirken, (1.25L60+Ç) ve (1.25L60+Ç20Y) numuneleri için eğilmede çekme dayanımında azalma ise sırasıyla, %3.97 ve %1.12 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ (1.50L35+Ç) ve (1.50L35+Ç20Y) numuneleri için artış sırasıyla, %33.99 ve %37.64 olarak tespit edilirken, (1.50L60+Ç) ve (1.50L60+Ç20Y) numuneleri için eğilmede çekme dayanımında azalma ise sırasıyla, %6.03 ve %4.76 olarak tespit edilmiştir.

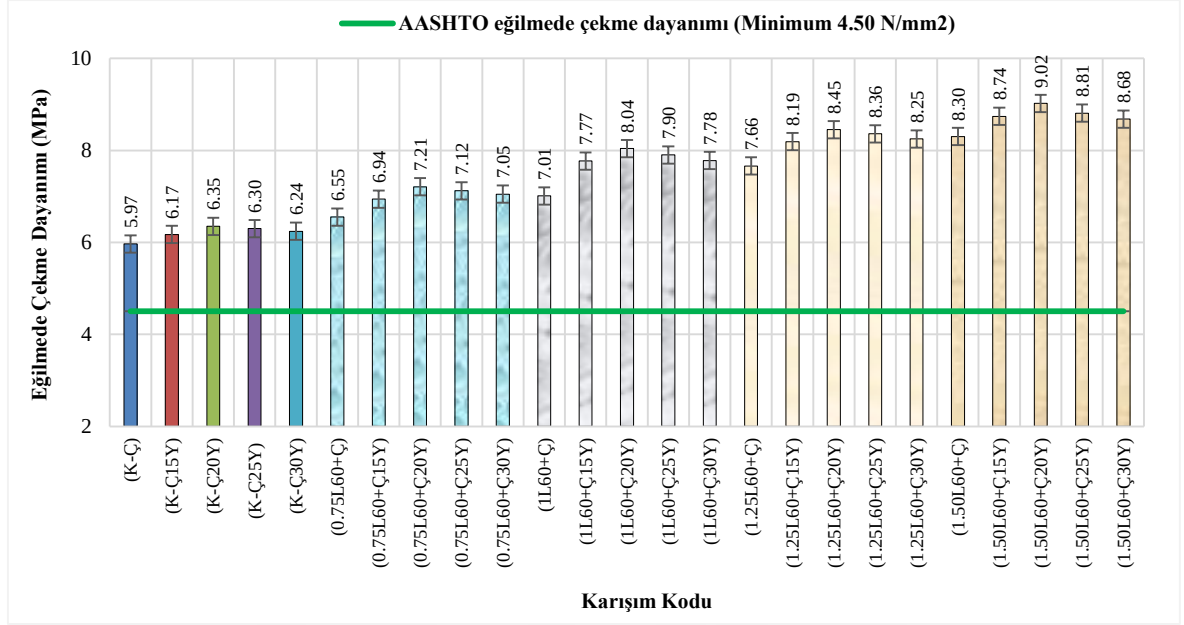
4.1.4.4 Numunelerin eğilmede çekme dayanımını deney sonuçlarının değerlendirilmesi

%0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 çelik lif (60 mm) katkılı 28 günlük numunelerin %15, %20, %25 ve %30 YFC oranına bağlı olarak eğilmede çekme dayanımının tahmini için eğilmede çekme dayanımı-YFC oranı regresyon analizi sonuçları Şekil 4.28’de verilmiştir.

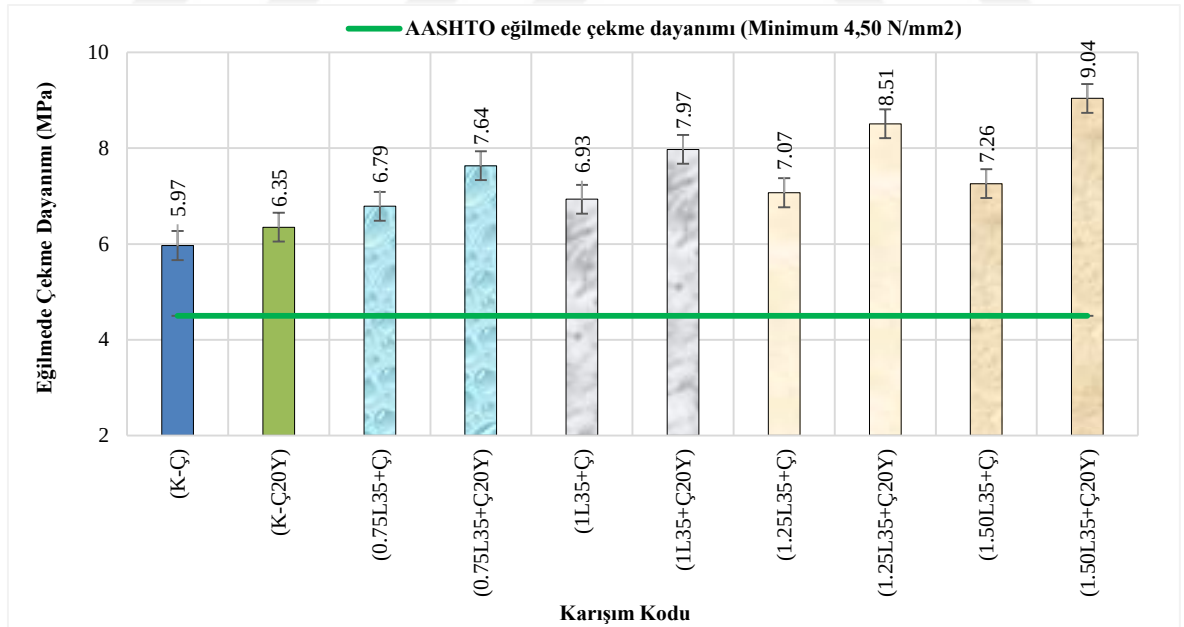


Şekil 4.28 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin Eğilmede Çekme Dayanımı-YFC oranı ilişkisi.

TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre 28 günlük eğilmede çekme dayanımı 4.50 N/mm^2 'den büyük olmalıdır. Yapılan çalışma kapsamında çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin eğilme dayanımının tasarım kriteri

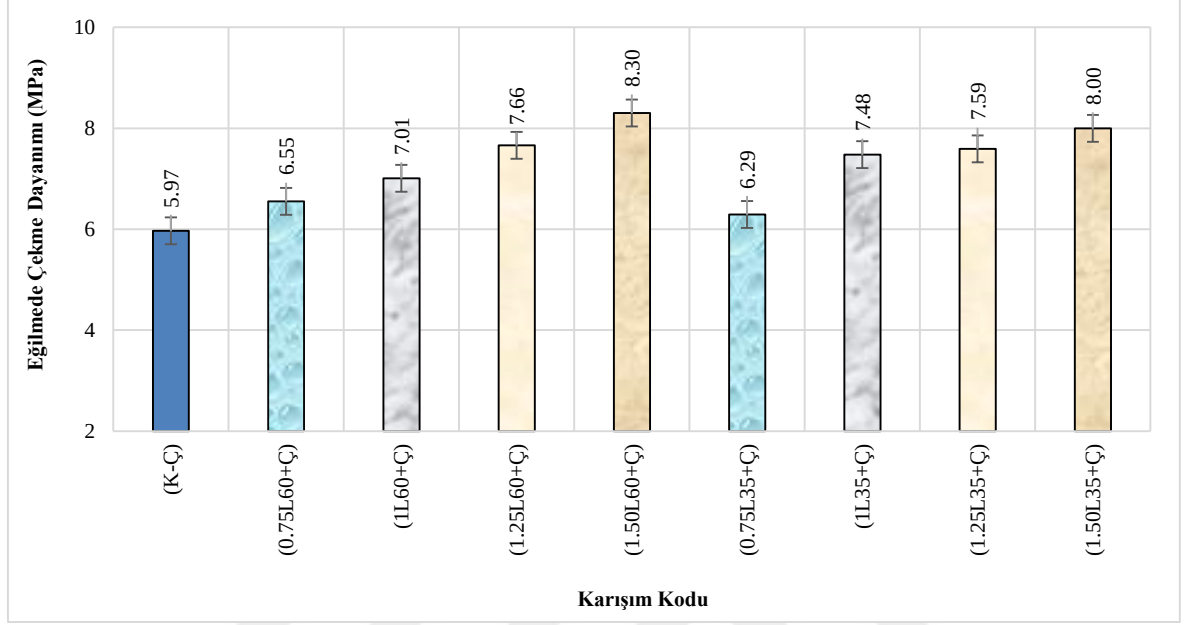


Şekil 4.30 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin eğilme dayanımının tasarım kriteri.

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30 incelendiğinde; 28 günlük eğilme dayanımı sonunda tüm numunelerin TCK Beton Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre istenen

minimum karakteristik eğilmede çekme dayanımı (4.50 N/mm^2) şartını sağladığı tespit edilmiştir.

Farklı oranlarda çelik lif katkı (35 ve 60 mm) aynı narinlik değerine sahip numunelerin 28 günlük eğilme dayanım sonuçları Şekil 4.31’de gösterilmiştir.

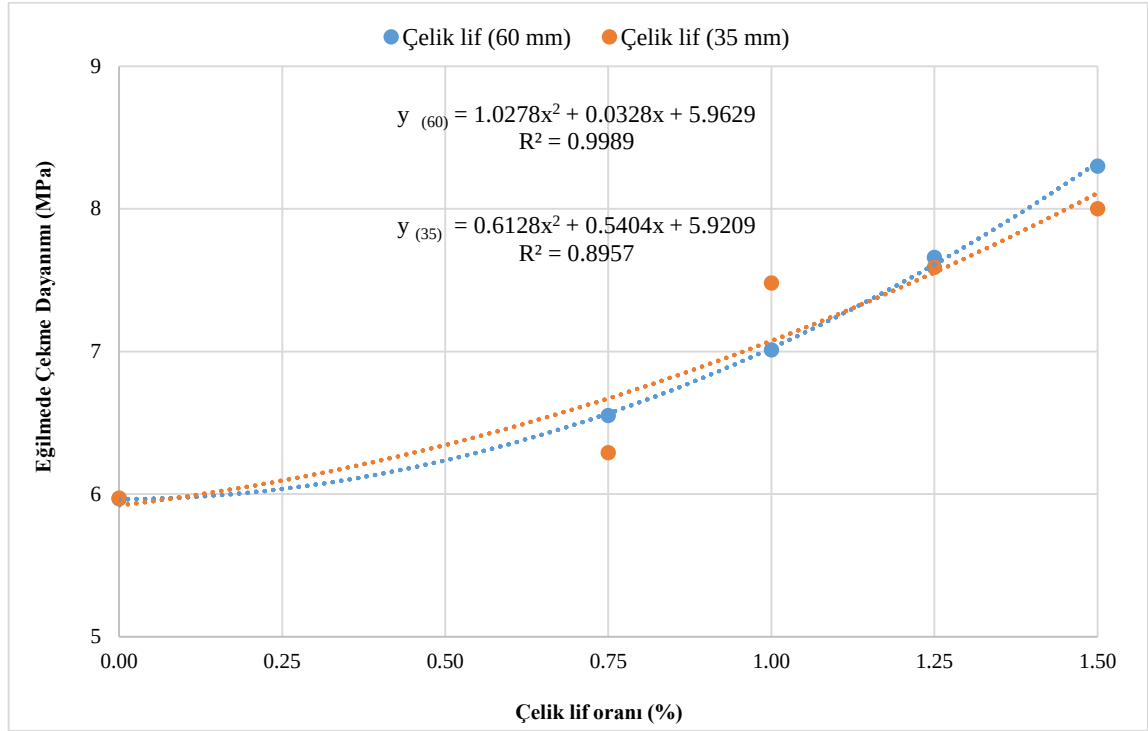


Şekil 4.31 : Çelik lif (35 ve 60 mm) katkıli numunelerin eğilme dayanımı.

Şekil 4.31 incelendiğinde; YFC katkısız sadece çelik lif katkıli numuneler değerlendirildiğinde, en düşük eğilmede çekme dayanımının (K-Ç) kontrol numunesinde, en yüksek eğilme dayanımının (1.50L60+Ç) numunesinde elde edildiği, çelik lif (35 mm) katkıli numuneler içerisinde sadece %0.75 çelik lif katkıli (0.75L35+Ç) numunenin eğilme dayanımının (0.75L60+Ç) numunesinden büyük olduğu, diğer eğilme dayanımlarının çelik lif (60 mm) katkıli numunelerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin kontrol numunesine göre eğilmede çekme dayanımındaki artış (0.75L60+Ç), (1L60+Ç), (1.25L60+Ç) ve (1.50L60+Ç) numuneleri için sırasıyla, %9.77, %17.48, %28.37 ve %39.10; çelik lif (35 mm) katkıli numunelerde ise bu artış (0.75L35+Ç), (1L35+Ç), (1.25L35+Ç) ve (1.50L35+Ç) numuneleri için sırasıyla, %13.77, %16.21, %18.49 ve %21.68 olarak tespit edilmiştir.

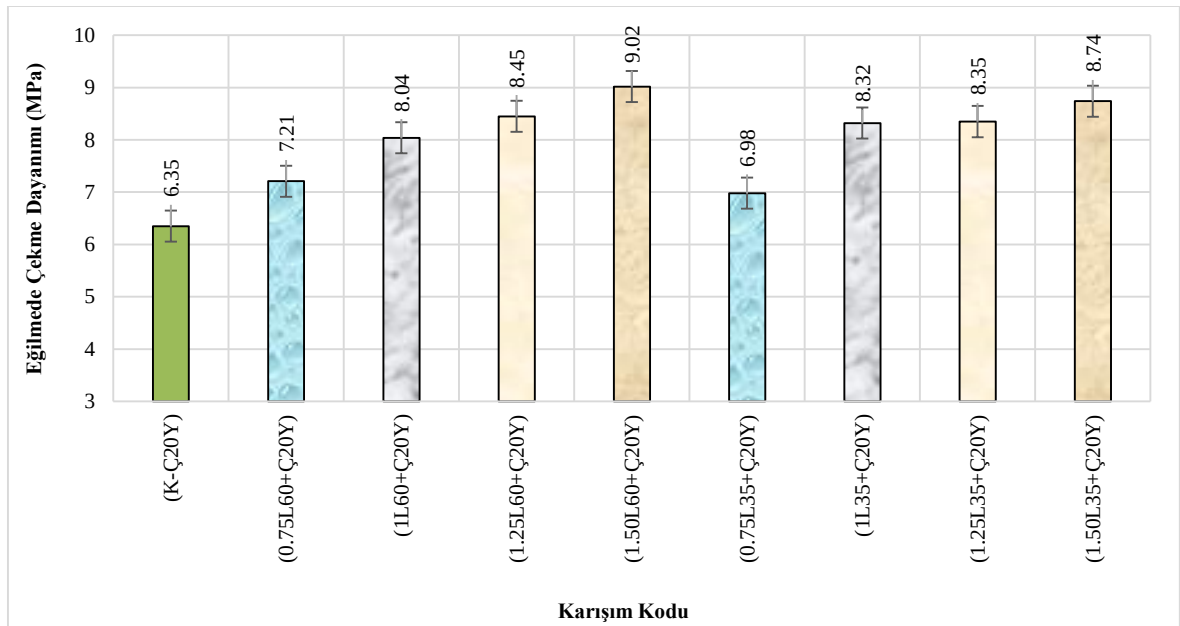
YFC katkısız, farklı oranlarda çelik lif (35 ve 60 mm) katkıli numuneler için regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 4.32). Eğilmede çekme dayanımı-çelik lif oranı eğilim çizgisi incelendiğinde regresyon katsayısı R^2 'nin 1'e yakın olması, çelik lif katkıli

numunelerin lif oranı ile eğilmede çekme dayanımı arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.32 : Eğilmede çekme dayanımı-Çelik lif oranı ilişkisi.

Farklı oranlarda çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin 28 günlük eğilmede çekme dayanım sonuçları Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



Şekil 4.33 : Çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin eğilme dayanımı.

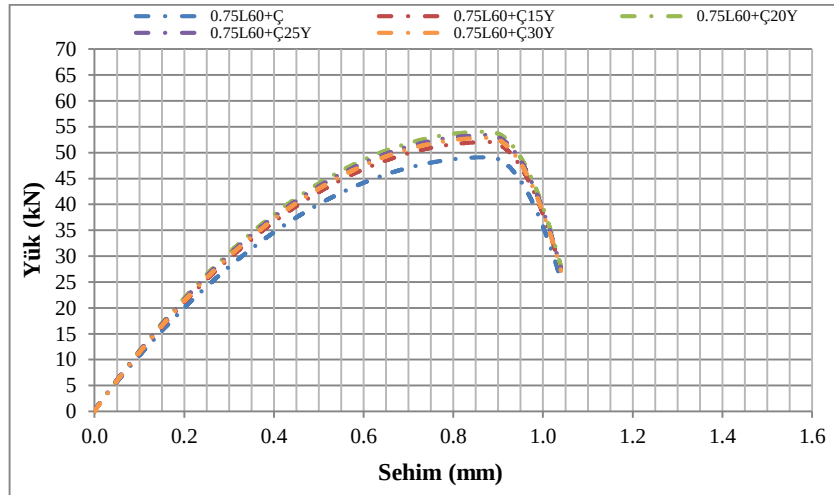
Şekil 4.33 incelendiğinde, farklı oranlarda çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin hepsinin kontrol numunesine göre eğilmede çekme dayanımında artış olduğu ve kontrol numunesi (K-Ç20Y) en düşük eğilmede çekme dayanımına sahipken, en yüksek eğilmede çekme dayanımının (1.50L60+Ç20Y) numunesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin kontrol numunesine göre eğilme dayanımındaki artış (0.75L60+Ç20Y), (1L60+Ç20Y), (1.25L60+Ç20Y) ve (1.50L60+Ç20Y) numuneleri için sırasıyla, %13.54, %26.61, %33.07 ve %42.05 olarak bulunmuştur.

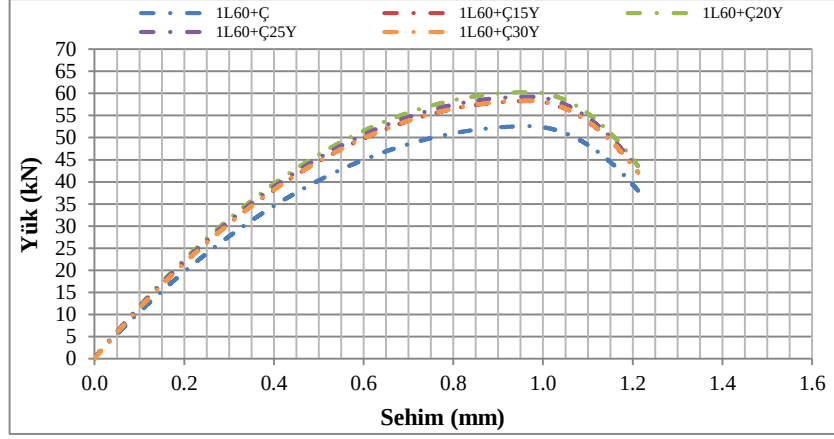
Ayrıca, çelik lif (35 mm) katkılı numunelerde ise bu artış (0.75L35+Ç20Y), (1L35+Ç20Y), (1.25L35+Ç20Y) ve (1.50L35+Ç20Y) numuneleri için sırasıyla, %20.24, %25.59, %34.00 ve %42.36 olarak hesaplanmıştır.

4.1.4.5 Yük-sehim eğrileri ve eğilme tokluğu

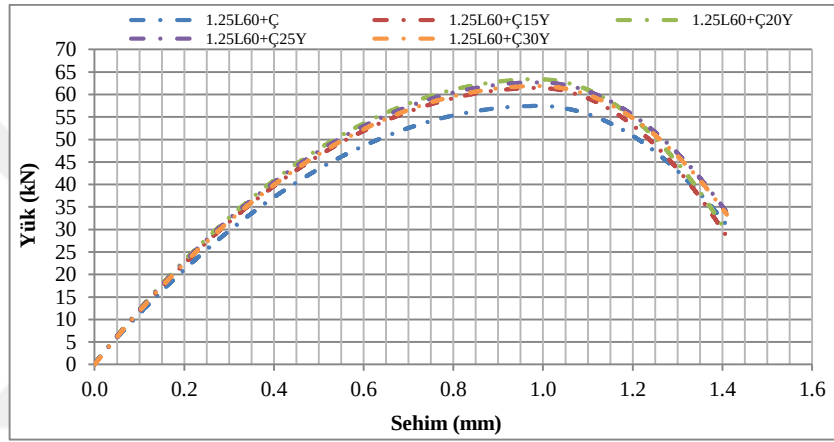
Lifsiz kontrol ve çelik lifli (60 mm) numunelerin sehim kontrollü dört noktalı eğilme deneyinden elde edilen yük-açıklık ortası sehim eğrileri Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de verilmiştir.



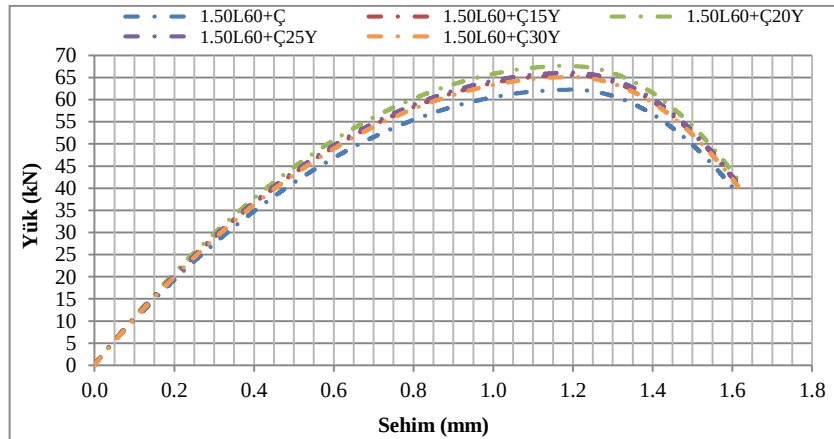
Şekil 4.34 : Çelik lif (%0.75) katkılı karışımların yük-sehim eğrileri.



Şekil 4.35 : Çelik lif (%1.00) katkılı lifli karışımların yük-sehim eğrileri

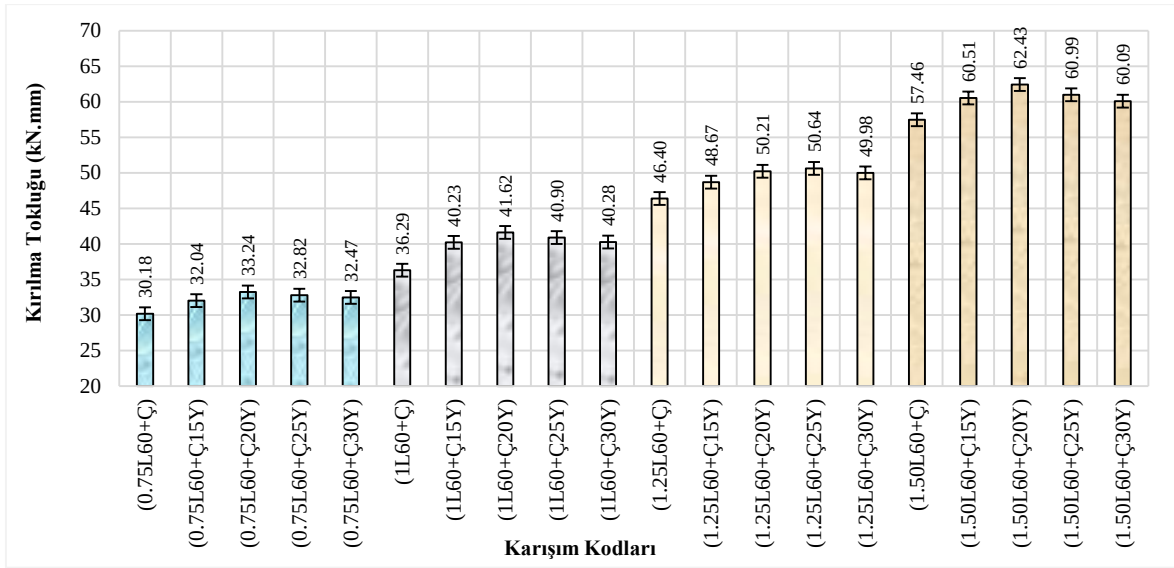


Şekil 4.36 : Çelik lif (%1.25) katkılı lifli karışımların yük-sehim eğrileri.



Şekil 4.37 : Çelik lif (%1.50) katkılı lifli karışımların yük-sehim eğrileri.

Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin sehim kontrollü dört noktalı eğilme testinden elde edilen yük-açıklık ortası sehim eğrilerinin altındaki alanların hesaplanmasıyla elde edilen tokluk değerleri Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.38 : Çelik lifli (60 mm) numunelere ait tokluk değerleri.

Genel olarak lif katkısı ile tüm numunelerde kırılma tokluğu değerleri artmıştır. Kırılma tokluğu değeri en yüksek %1.50 çelik lif içeren (1.50L+Ç20Y) numunesinde, en düşük kırılma tokluğunun ise %0.75 çelik lif içeren (0.75L+Ç) numunesinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin, beton içindeki çelik lifin çekme dayanımlarının yüksek olması ve beton matrisle arasındaki aderans nedeni ile betonun tokluk değerini artırdıkları olarak yorumlanmaktadır. Ayrıca, literatürde yapılan çalışmada çelik liflerin kırılma tokluğu değerini artırdıkları sonucuna ulaşılmıştır (Türk ve Nehdi, 2021).

4.1.5 Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Kontrol ve çelik lif katkılı karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla Ø150x300 mm ölçülerinde üç adet silindir numune test edilmiştir (Şekil 4.39).



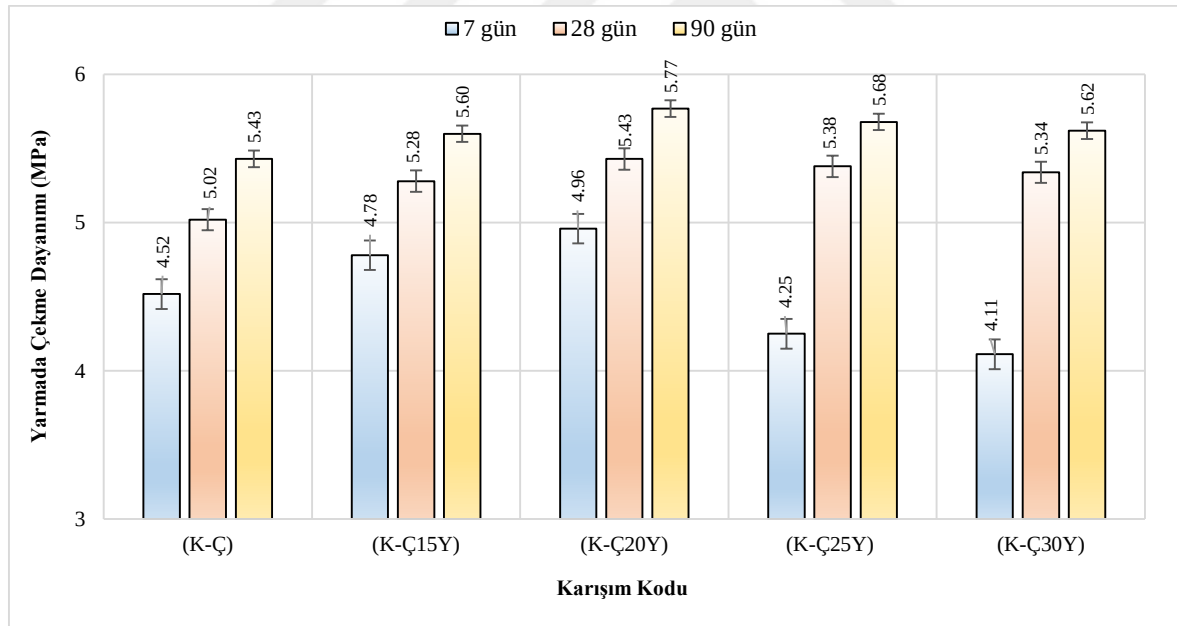
Şekil 4.39 : Kontrol ve lifli numunelere ait yarmada çekme dayanımı.

4.1.5.1 Kontrol numunelerinin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Kontrol numunelerin yarmada çekme dayanımları her grupta üç numunenin ortalaması alınarak 7, 28 ve 90 gün kür süreleri için belirlenmiştir. Üretilen kontrol numunelerine ait yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.13’de, katkı oranının yarmada çekme dayanımına etkisi ise Şekil 4.40’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 : Kontrol numunelerinin yarmada çekme dayanımı.

Karışım Kodu	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(K-Ç)	4.52	5.02	5.43
(K-Ç15Y)	4.78	5.28	5.60
(K-Ç20Y)	4.96	5.43	5.77
(K-Ç25Y)	4.25	5.38	5.68
(K-Ç30Y)	4.11	5.34	5.62



Şekil 4.40 : Kontrol numuneleri yarmada çekme dayanımı sonuçları.

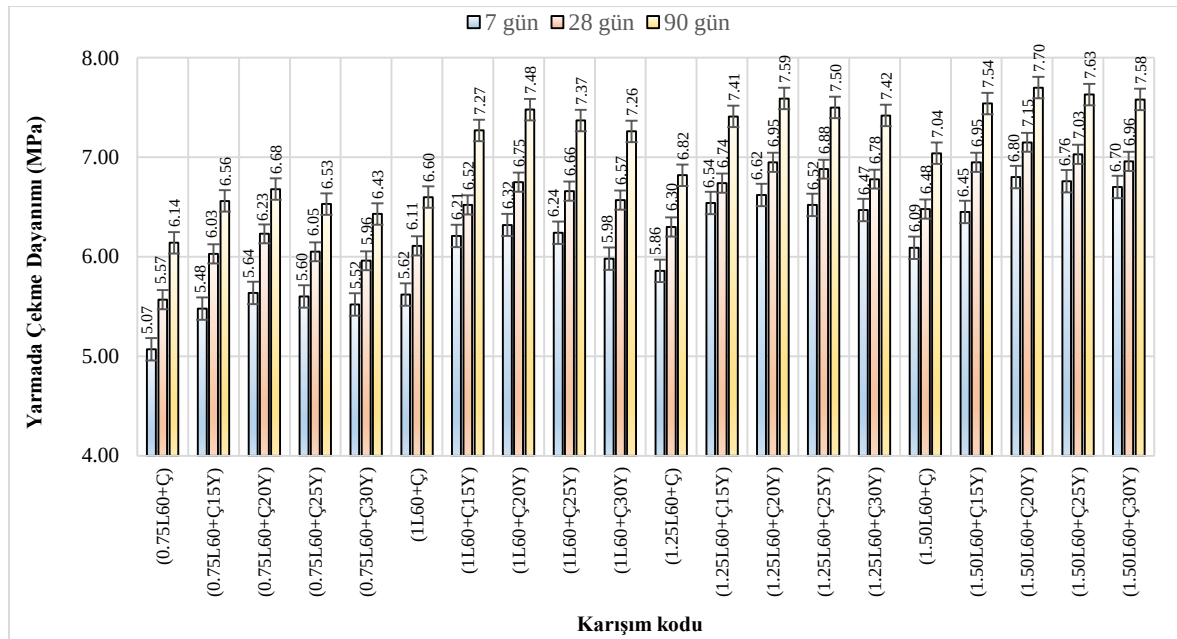
Şekil 4.40 incelendiğinde, YFC ikame miktarına bağlı olarak beton numunelerin yarmada çekme dayanımı değerlerinde artış meydana gelmektedir. Betonun 28 günlük kür süresi dikkate alındığında, yarmada çekme dayanımındaki bu artışın (K-Ç)’ye kıyasla, (K-Ç15Y), (K-Ç30Y), (K-Ç25Y) ve (K-Ç30Y) YFC ikameli betonlarda sırasıyla %5.18, %8.17, %7.17 ve %6.37 oranlarında daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

4.1.5.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin farklı oranlarda YFC ikameli betonlarda yarmada çekme dayanım sonuçları Çizelge 4.14’de, katkı oranının yarmada çekme dayanımına etkisi ise Şekil 4.41’de verilmiştir.

Çizelge 4.14 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanım sonuçları.

Karışım Kodu	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(0.75L60+Ç)	5.07	5.57	6.14
(0.75L60+Ç15Y)	5.48	6.03	6.56
(0.75L60+Ç20Y)	5.64	6.23	6.68
(0.75L60+Ç25Y)	5.60	6.05	6.53
(0.75L60+Ç30Y)	5.52	5.96	6.43
(1L60+Ç)	5.62	6.11	6.60
(1L60+Ç15Y)	6.21	6.52	7.27
(1L60+Ç20Y)	6.32	6.75	7.48
(1L60+Ç25Y)	6.24	6.66	7.37
(1L60+Ç30Y)	5.98	6.57	7.26
(1.25L60+Ç)	5.86	6.30	6.82
(1.25L60+Ç15Y)	6.54	6.74	7.41
(1.25L60+Ç20Y)	6.62	6.95	7.59
(1.25L60+Ç25Y)	6.52	6.88	7.50
(1.25L60+Ç30Y)	6.47	6.78	7.42
(1.50L60+Ç)	6.09	6.48	7.04
(1.50L60+Ç15Y)	6.45	6.95	7.54
(1.50L60+Ç20Y)	6.80	7.15	7.70
(1.50L60+Ç25Y)	6.76	7.03	7.63
(1.50L60+Ç30Y)	6.70	6.96	7.58



Şekil 4.41 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı.

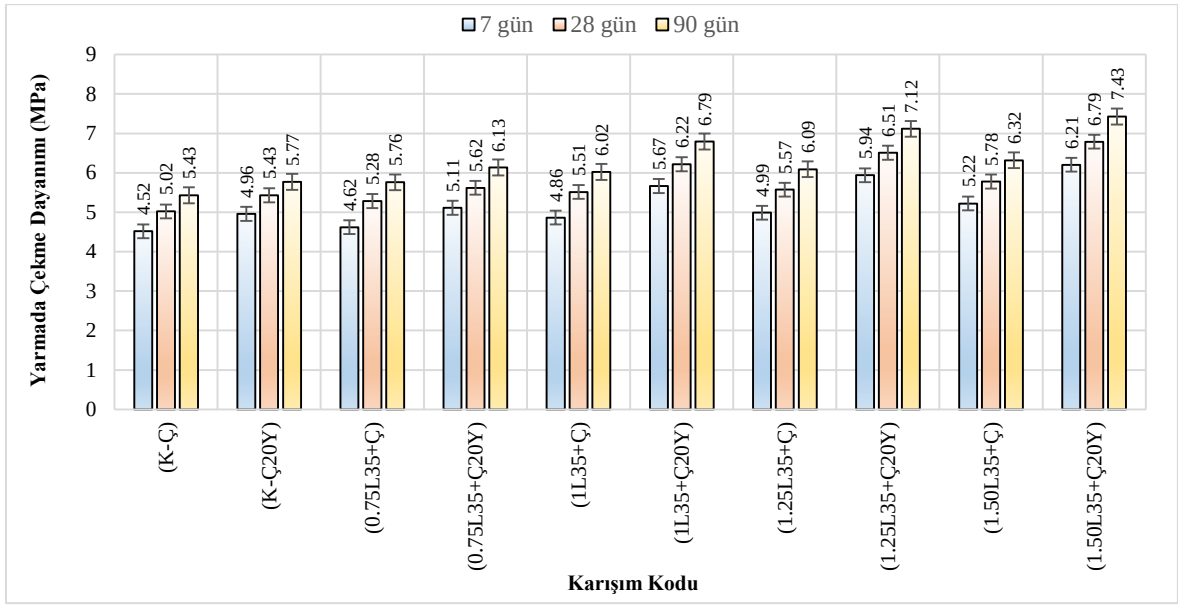
Şekil 4.41 incelendiğinde; çelik lif katkısı ile beton numunelerin yarmada çekme dayanımı değerlerinde referans kontrol betonuna göre artış meydana gelmektedir. 28 günlük yarmada çekme dayanımındaki bu artışın, farklı oranlarda YFC ikameli betonlarda kontrol betonuna göre sırasıyla; %0.75 çelik lif katkısı ile %10.96, %14.20, %14.73, %12.45 ve %11.61; %1.00 çelik lif katkısı ile %21.71, %23.48, %24.31, %23.79 ve %23.03; %1.25 çelik lif katkısı ile %25.50, %27.65, %27.99, %27.88 ve %26.97; %1.50 çelik lif katkısı ile %29.08, %31.63, %31.68, %30.67 ve %30.34 oranlarında daha fazla çıktığı gözlemlenmiştir.

4.1.5.3 Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

YFC katkılı numunelerden yarmada çekme dayanımının en yüksek değerinin elde edildiği optimum %20 YFC oranı ile çelik lif (35 mm) kullanılarak beton numuneleri hazırlanmıştır. Beton numunelerinin yarmada çekme dayanım sonuçları Çizelge 4.15’de, çelik lif katkısının yarmada çekme değerine etkisi ise Şekil 4.42’de verilmiştir.

Çizelge 4.15 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin %20 YFC ikameli betonlarda yarmada çekme dayanım değerleri.

Karışım Kodu	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(K-Ç)	4.52	5.02	5.43
(K-Ç20Y)	4.96	5.43	5.77
(0.75L35+Ç)	4.62	5.28	5.76
(0.75L35+Ç20Y)	5.11	5.62	6.13
(1L35+Ç)	4.86	5.51	6.02
(1L35+Ç20Y)	5.67	6.22	6.79
(1.25L35+Ç)	4.99	5.57	6.09
(1.25L35+Ç20Y)	5.94	6.51	7.12
(1.50L35+Ç)	5.22	5.78	6.32
(1.50L35+Ç20Y)	6.21	6.79	7.43



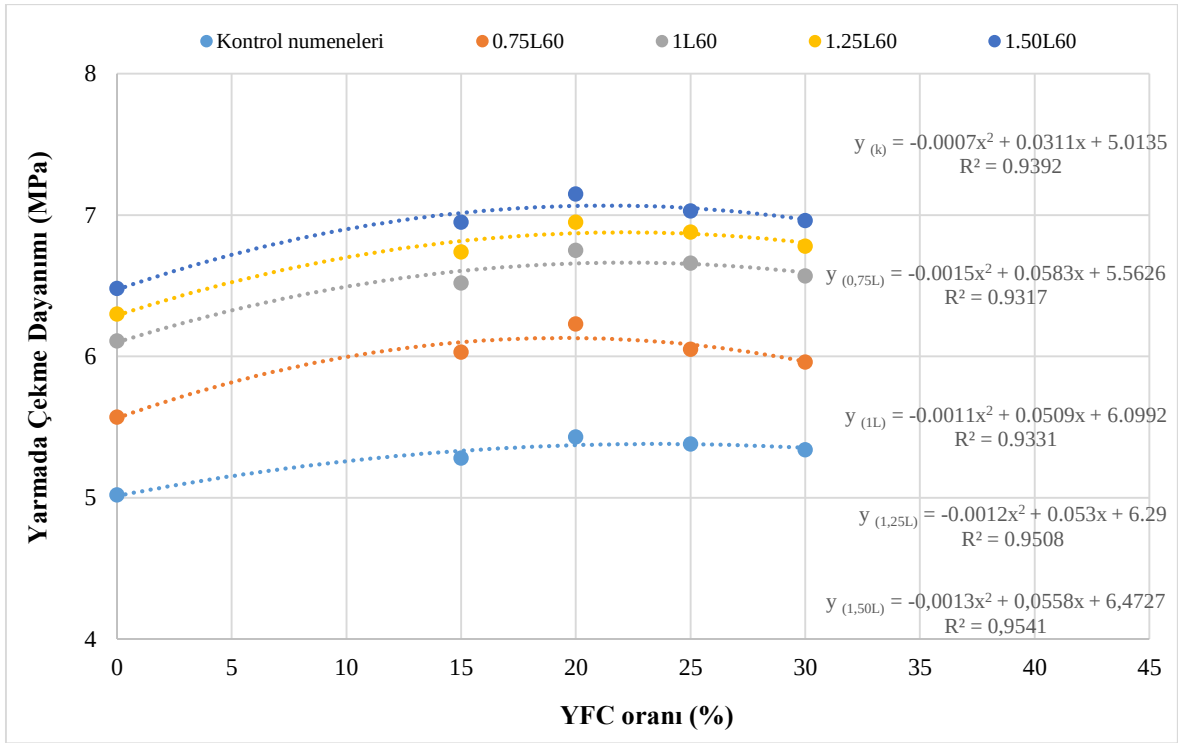
Şekil 4.42 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı

Şekil 4.42 incelendiğinde; çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin çekme dayanım değeri kontrol numunelerine göre artış, çelik lifli (60 mm) numunelerine göre ise çekme dayanımında azalma meydana gelmiştir. Dayanımdaki bu artış ve azalış miktarı 28 günlük dayanım için sırasıyla;

- ✓ (0.75L35+Ç) ve (0.75L35+Ç20Y) numuneleri için %5.21 ve %3.50 olarak tespit edilmiştir. (0.75L60+Ç) ve (0.75L60+Ç20Y) numunelerine göre ise çekme dayanımında azalma meydana gelmiş, bu azalma sırasıyla %5.46 ve %10.85 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ (1L35+Ç) ve (1L35+Ç20Y) numuneleri için %9.86 ve %14.55 olarak tespit edilmiştir. (1L60+Ç) ve (1L60+Ç20Y) göre ise çekme dayanımında azalma meydana gelmiş, bu azalma sırasıyla %10.79 ve %8.52 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ (1.25L35+Ç) ve (1.25L35+Ç20Y) numuneleri için %11.02 ve %19.89 olarak tespit edilmiştir. (1.25L60+Ç) ve (1.25L60+Ç20Y) göre ise çekme dayanımında azalma meydana gelmiş, bu azalma sırasıyla %13.04 ve %6.76 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ (1.50L35+Ç) ve (1.50L35+Ç20Y) numuneleri için %15.07 ve %25.05 olarak tespit edilmiştir. (1.50L60+Ç) ve (1.50L60+Ç20Y) göre ise çekme dayanımında azalma meydana gelmiş, bu azalma sırasıyla %12.18 ve %5.30 olarak tespit edilmiştir.

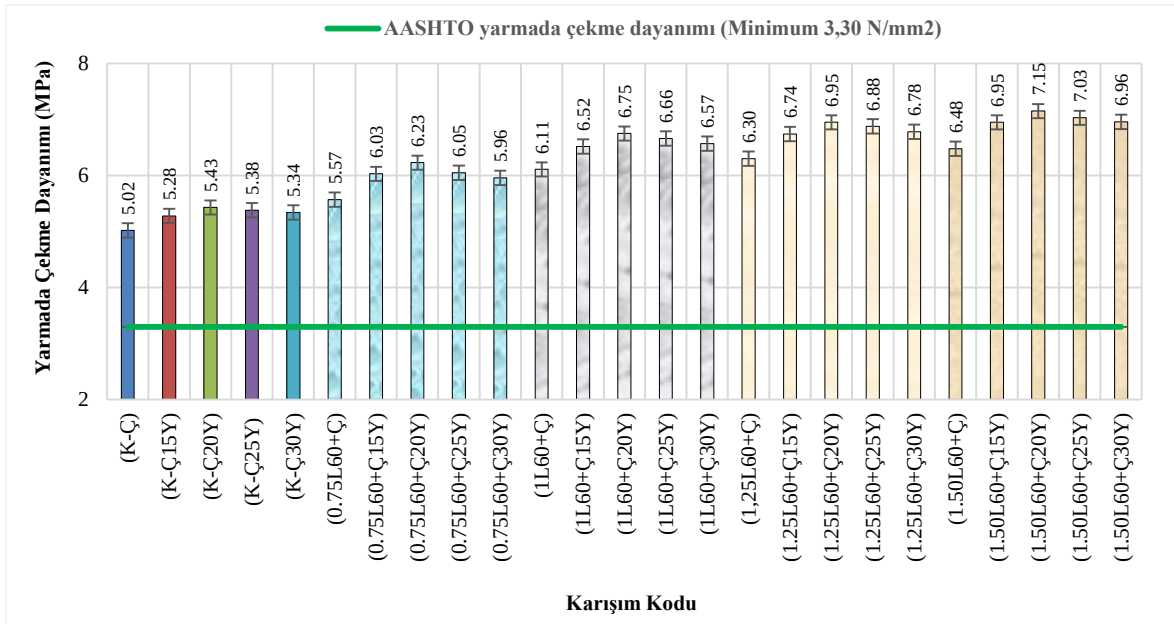
4.1.5.4 Numunelerin yarmada çekme dayanımını deney sonuçlarının değerlendirilmesi

%0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 çelik lif (60 mm) katkılı 28 günlük numunelerin %15, %20, %25 ve %30 YFC oranına bağlı olarak yarmada çekme dayanımının tahmini için yarmada çekme dayanımı-YFC oranı regresyon analizi sonuçları Şekil 4.43’de verilmiştir.

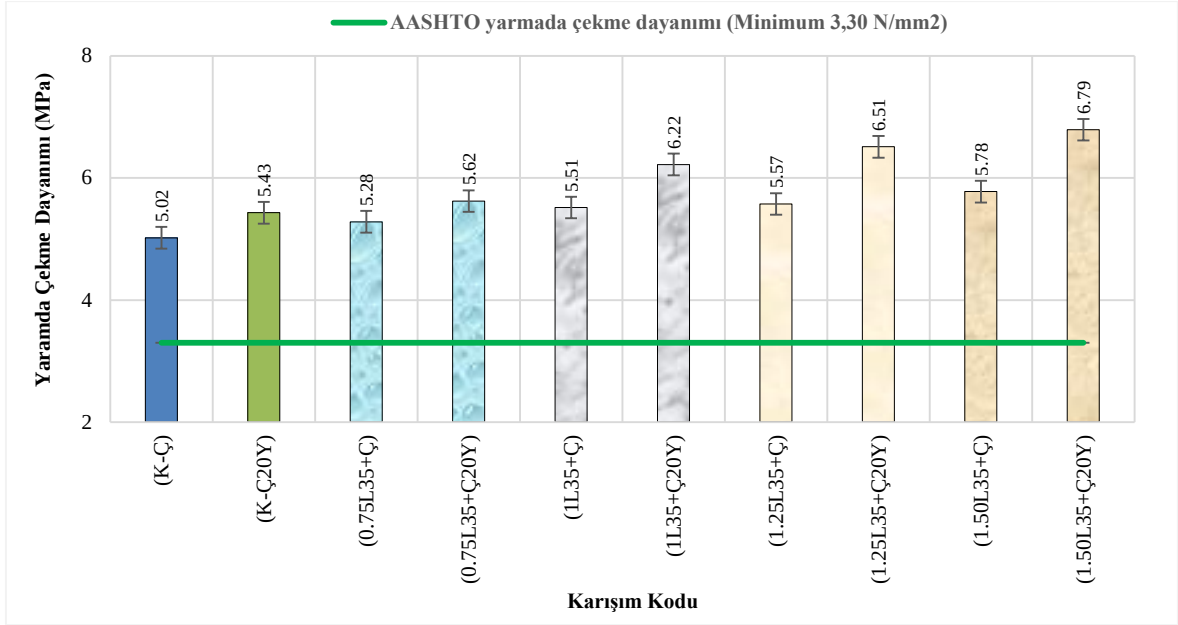


Şekil 4.43 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin Yarmada çekme dayanımı-YFC oranı ilişkisi.

TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre 28 günlük çekme dayanımı 3.30 N/mm^2 'den büyük olmalıdır. Yapılan çalışma kapsamında numunelerin yarmada çekme dayanımı karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'de gösterilmiştir.



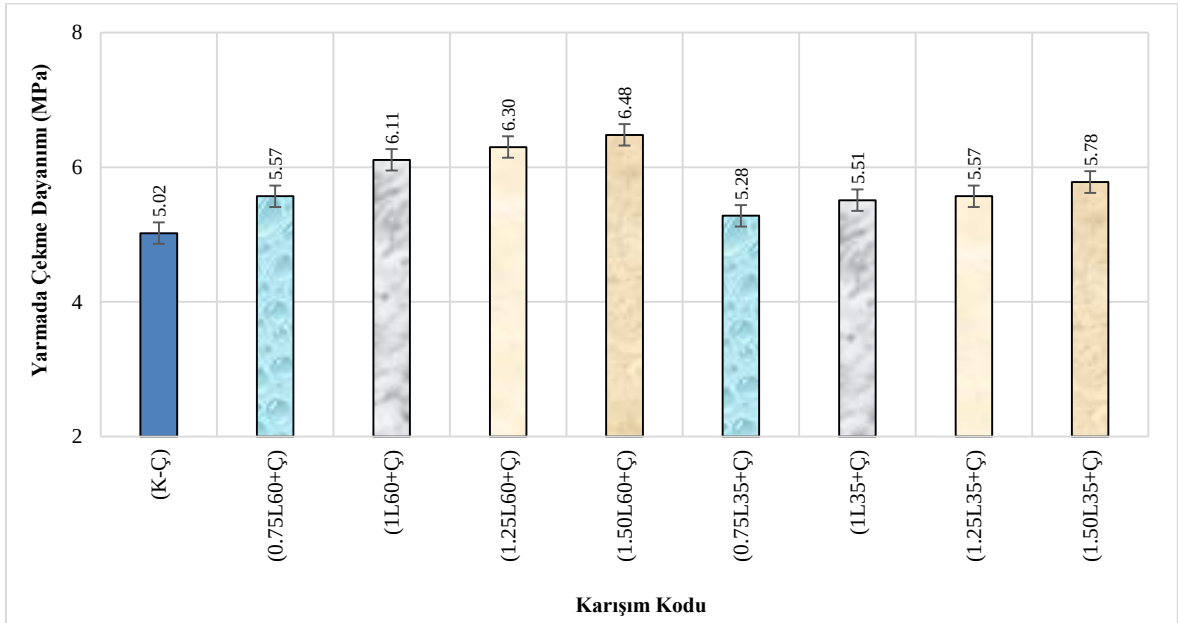
Şekil 4.44 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımının tasarım kriteri.



Şekil 4.45 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımının tasarım kriteri.

Şekil 4.44 ve Şekil 4.45 incelendiğinde; tüm numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanım değerlerinin, TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre istenen minimum yarmada çekme dayanım (3.30 N/mm^2) şartını sağladığı tespit edilmiştir.

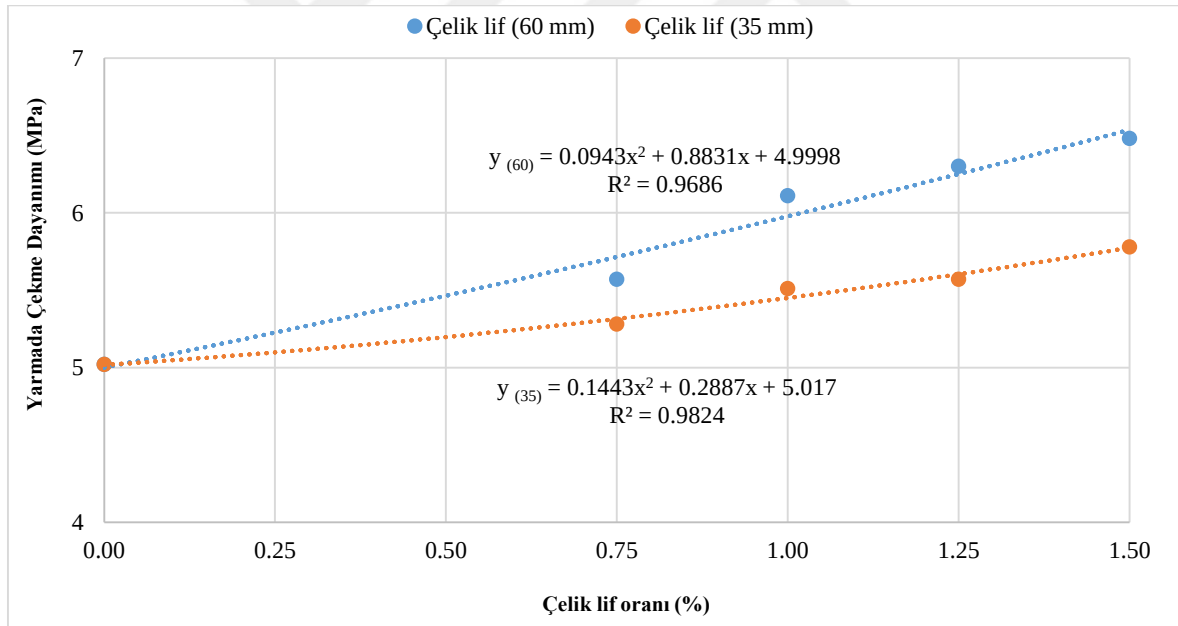
Farklı oranlarda çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanım sonuçları Şekil 4.46’da gösterilmiştir.



Şekil 4.46 : Çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı.

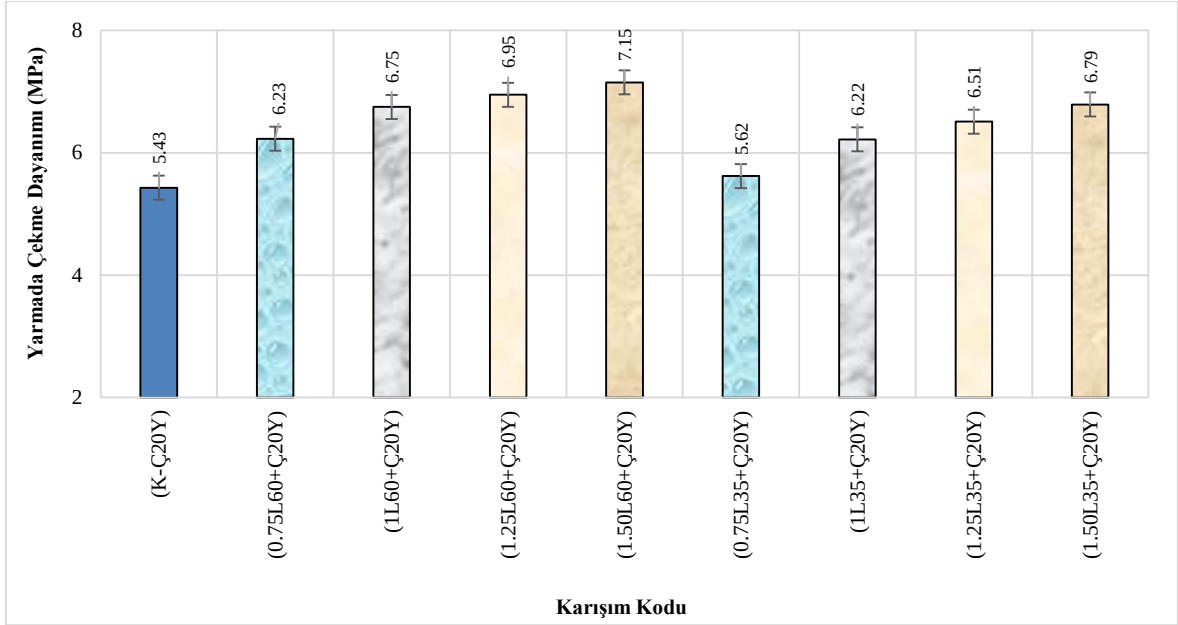
Şekil 4.46 incelendiğinde YFC katkısız sadece çelik lif katkılı numunelerde, en düşük yarmada çekme dayanımının (K-Ç) kontrol numunesinde, en yüksek yarmada çekme dayanımının (1.50L60+Ç) elde edildiği, çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımlarının çelik lif (60 mm) katkılı numunelerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin kontrol numunesine göre yarmada çekme dayanımındaki artış (0.75L60+Ç), (1L60+Ç), (1.25L60+Ç) ve (1.50L60+Ç) numuneleri için sırasıyla, %10.96, %21.71, %25.50 ve %29.08; çelik lif (35 mm) katkılı numunelerde ise bu artış (0.75L35+Ç), (1L35+Ç), (1.25L35+Ç) ve (1.50L35+Ç) numuneleri için sırasıyla, %5.18, %9.76, %10.96 ve %15.14 olarak tespit edilmiştir.

Farklı oranlarda çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı tahmini için regresyon analizi yapılmış, regresyon sonucu Şekil 4.47’de verilmiştir. Yarmada çekme dayanımı-çelik lif oranı eğilim çizgisi incelendiğinde regresyon katsayısı R^2 ’nin 1’e yakın olması, çelik lif katkılı numunelerin lif oranı ile yarmada çekme dayanımı arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.47 : Çelik lif oranının yarmada çekme dayanımına etkisi.

Farklı oranlarda çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanım sonuçları Şekil 4.48’de gösterilmiştir.



Şekil 4.48 : Çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımı.

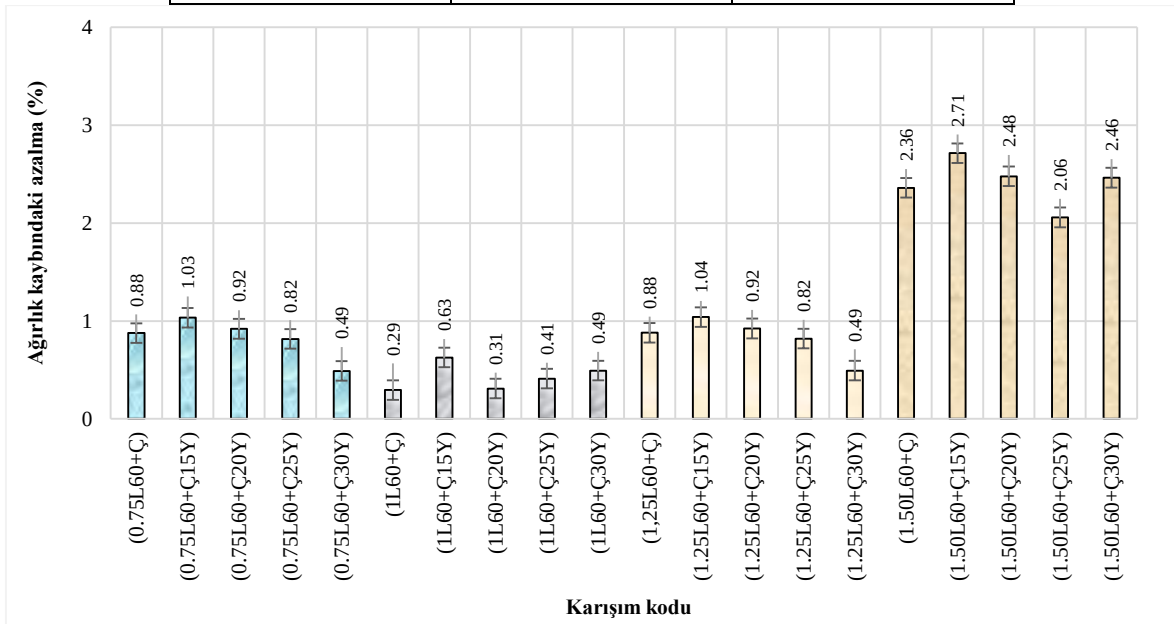
Şekil 4.48 incelendiğinde, farklı oranlarda çelik lif (35 ve 60 mm) ve %20 YFC katkılı numunelerin hepsinin kontrol numunesine göre yarmada çekme dayanımının arttığı, en düşük yarmada çekme dayanımının kontrol numunesinde (K-Ç20Y) olduğu, en yüksek yarmada çekme dayanımının (1.50L60+Ç20Y) numunesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin kontrol numunesine göre yarmada çekme dayanımındaki artış (0.75L60+Ç20Y), (1L60+Ç20Y), (1.25L60+Ç20Y) ve (1.50L60+Ç20Y) numuneleri için sırasıyla, %14.73, %24.31, %27.99 ve %31.68; çelik lif (35 mm) katkılı numunelerde ise bu artış (0.75L35+Ç20Y), (1L35+Ç20Y), (1.25L35+Ç20Y) ve (1.50L35+Ç20Y) numuneleri için sırasıyla, %3.50, %14.55, %19.89 ve %25.05 olarak tespit edilmiştir.

4.1.6. Betonun donma-çözülme ve buz çözücü maddelere karşı dayanımı sonuçları

Küp numuneler üzerinde gerçekleştirilen 28 çevrimlik donma-çözülme etkisi sonunda elde edilen ağırlık kayıpları sonuçları Çizelge 4.16'da, katkı oranı ile numunelerin ağırlık kaybı (%) ilişkisi ise Şekil 4.49'da verilmiştir.

Çizelge 4.16 : Donma-çözülme deneyi sonuçları.

Karışım Kodu	Ağırlık Kaybı (g/m ²)	Kontrol numunesine göre ağırlık kaybı azalma (%)
	28 çevrim sayısı	
(K-Ç)	342	
(K-Ç15Y)	484	
(K-Ç20Y)	326	
(K-Ç25Y)	245	
(K-Ç30Y)	204	
(0.75L60+Ç)	339	0.88
(0.75L60+Ç15Y)	479	1.03
(0.75L60+Ç20Y)	323	0.92
(0.75L60+Ç25Y)	243	0.82
(0.75L60+Ç30Y)	203	0.49
(1L60+Ç)	341	0.29
(1L60+Ç15Y)	481	0.63
(1L60+Ç20Y)	325	0.31
(1L60+Ç25Y)	244	0.41
(1L60+Ç30Y)	203	0.49
(1.25L60+Ç)	339	0.88
(1.25L60+Ç15Y)	479	1.04
(1.25L60+Ç20Y)	323	0.92
(1.25L60+Ç25Y)	243	0.82
(1.25L60+Ç30Y)	203	0.49
(1.50L60+Ç)	334	2.36
(1.50L60+Ç15Y)	471	2.71
(1.50L60+Ç20Y)	318	2.48
(1.50L60+Ç25Y)	240	2.06
(1.50L60+Ç30Y)	199	2.46

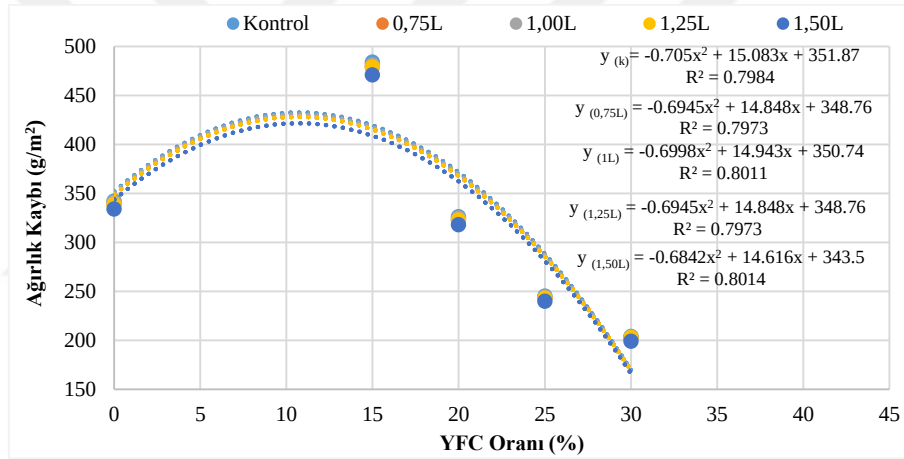


Şekil 4.49 : Lif katkılı beton numunelerin donma-çözülme ağırlık kayıpları (%).

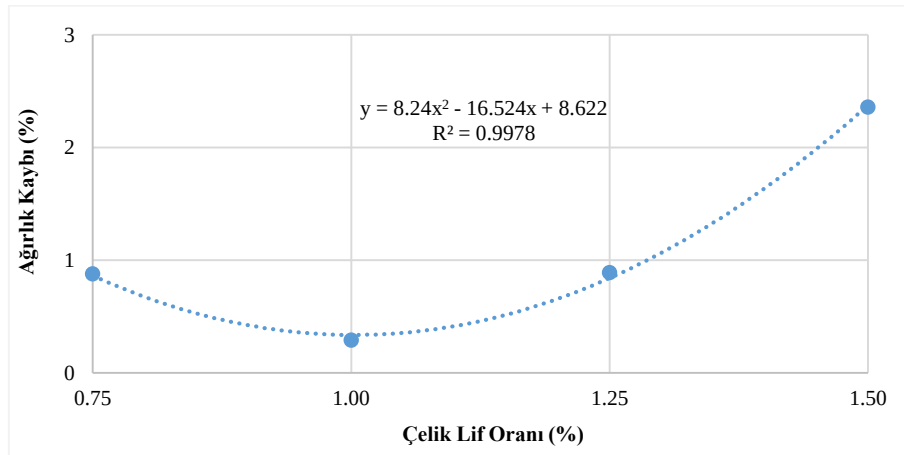
Şekil 4.49 incelendiğinde; TCK Beton Yollar Teknik Şartnamesi uyarınca, 28 çevrim donma-çözülme etkisi sonucunda kütle kaybının 0.50 kg/m^2 'den küçük olması şartının sağlandığı tespit edilmiştir.

Kontrol numuneleri içerisinde ağırlık kaybının en fazla %15 YFC içeren (K-Ç15Y) numunesine ait olduğu, bu kontrol numunesinden itibaren YFC artışı ile ağırlık kaybında azalış meydana geldiği, bu davranış üzerinde YFC ilaveli numunelerinin daha gözenekli bir yapıya sahip olması ve buna bağlı donma neticesinde betonda oluşan iç gerilimin daha düşük olmasının rol oynadığı düşünülmektedir. %0.75, %1.00 ve %1.25 çelik lif katkılı numunelerin ağırlık kaybı üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığı, ortalama %0.5-2.5 oranında ağırlık kaybında azalış olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca, YFC oranına bağlı olarak ağırlık kaybı (g/m^2) arasındaki ilişki Şekil 4.50'de, YFC katkısız lifli numunelere (60 mm) ait ilişki Şekil 4.51'de verilmiştir.



Şekil 4.50 : Beton numunelerin donma-çözülme ağırlık kayıpları-YFC oranı ilişkisi.



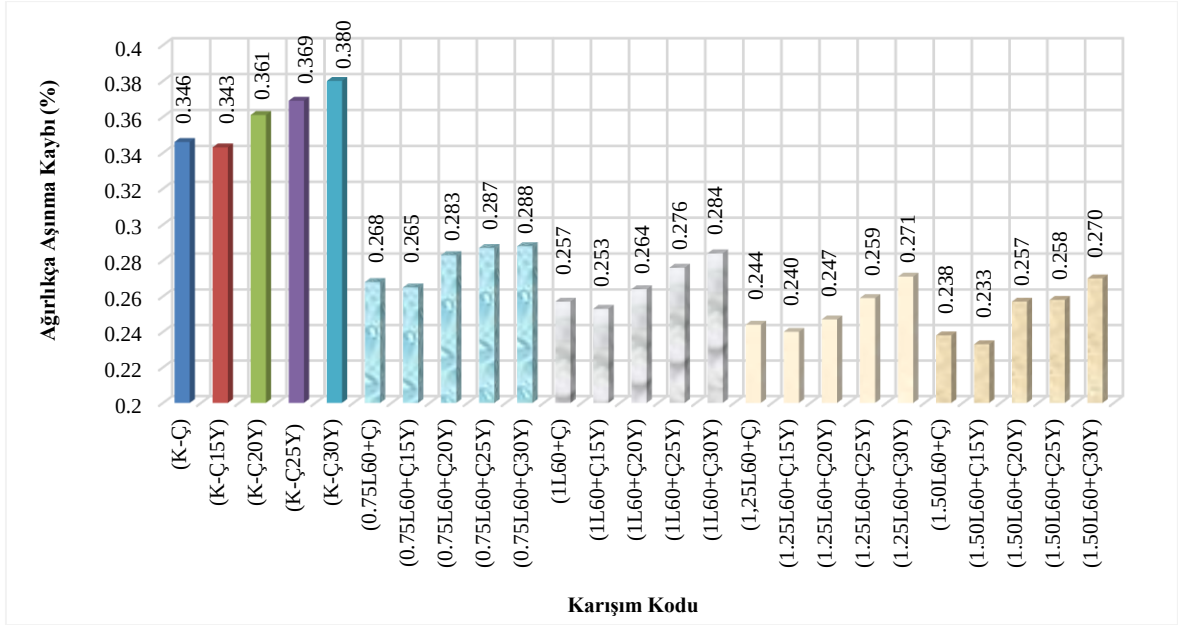
Şekil 4.51 : Lifli numunelere ait Ağırlık kayıpları-Çelik lif oranı ilişkisi grafiği.

4.1.7. Betonun aşınma direnci

Hazırlanan beton numunelerinin aşınma dayanımları, 28 günlük kür süresi sonunda 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılan aşınma deneyi ile belirlenmiştir. Her bir karışım için toplam üç adet küp numune üretilmiştir. Üretilen çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük aşınma deneyi sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.17’de, katkı oranının aşınma kaybına etkisi ise Şekil 4.52’de verilmiştir.

Çizelge 4.17 : Üretilen betonların aşınma kaybı değerleri.

Karışım Kodu	Ağırlıkça Aşınma Kaybı (%)
(K-Ç)	0.346
(K-Ç15Y)	0.343
(K-Ç20Y)	0.361
(K-Ç25Y)	0.369
(K-Ç30Y)	0.380
(0.75L60+Ç)	0.268
(0.75L60+Ç15Y)	0.265
(0.75L60+Ç20Y)	0.283
(0.75L60+Ç25Y)	0.287
(0.75L60+Ç30Y)	0.288
(L60+Ç)	0.257
(L60+Ç15Y)	0.253
(L60+Ç20Y)	0.264
(L60+Ç25Y)	0.276
(L60+Ç30Y)	0.284
(1.25L60+Ç)	0.244
(1.25L60+Ç15Y)	0.240
(1.25L60+Ç20Y)	0.247
(1.25L60+Ç25Y)	0.259
(1.25L60+Ç30Y)	0.271
(1.50L60+Ç)	0.238
(1.50L60+Ç15Y)	0.233
(1.50L60+Ç20Y)	0.257
(1.50L60+Ç25Y)	0.258
(1.50L60+Ç30Y)	0.270



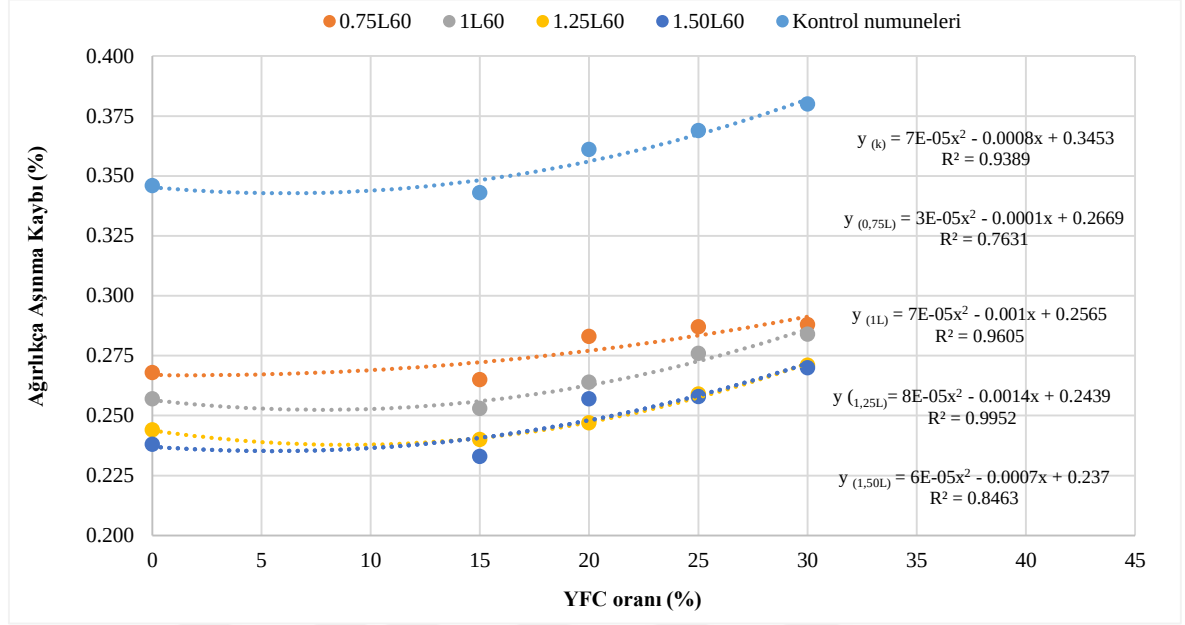
Şekil 4.52 : Ağırlıkça aşınma kaybı.

Şekil 4.52’de görüldüğü gibi kontrol numunelerinde en düşük aşınma miktarı (K-Ç15Y) numunesindedir. (K-Ç20Y), (K-Ç25Y) ve (K-Ç30Y) numunelerinin aşınma değerleri ise birbirlerine yakın değerlerdedir. YFC ikamesi %15’den fazla olan numunelerde, YFC ikamesi arttıkça aşınma miktarlarının da arttığı görülmüştür. Bu artışın YFC ilaveli numunelerinin daha gözenekli bir yapıya sahip olması ve buna bağlı donma neticesinde betonda oluşan iç gerilimin daha düşük olmasının rol oynadığı düşünülmektedir. Ayrıca, Pektaş (2015) çalışmasında %20 YFC içeren numunelerin en fazla ağırlık kaybına sebep olduğunu tespit etmiştir.

Çelik lif ilaveli betonların aşınma kaybı incelendiğinde çelik lif (60 mm) miktarının artışı ile aşınma kaybının azaldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda;

- ✓ %0.75 çelik lif ilaveli numunelerin kontrol numunelerine göre aşınma kaybındaki azalma sırasıyla %22.54, %22.74, %21.61, %22.22 ve %24.21,
- ✓ %1.00 çelik lif ilaveli numunelerin kontrol numunelerine göre aşınma kaybındaki azalma sırasıyla %25.72, %26.24, %26.87, %25.20 ve %25.26,
- ✓ %1.25 çelik lif ilaveli numunelerin kontrol numunelerine göre aşınma kaybındaki azalma sırasıyla %29.48, %30.03, %31.58, %29.81 ve %28.68,
- ✓ %1.50 çelik lif ilaveli numunelerin kontrol numunelerine göre aşınma kaybındaki azalma sırasıyla %31.21, %32.07, %28.81, %30.08 ve %28.95 olarak tespit edilmiştir.

Üretilen numunelere ait ağırlıkça Aşınma kaybı-YFC oranı ilişkisi Şekil 4.53’de verilmiştir.



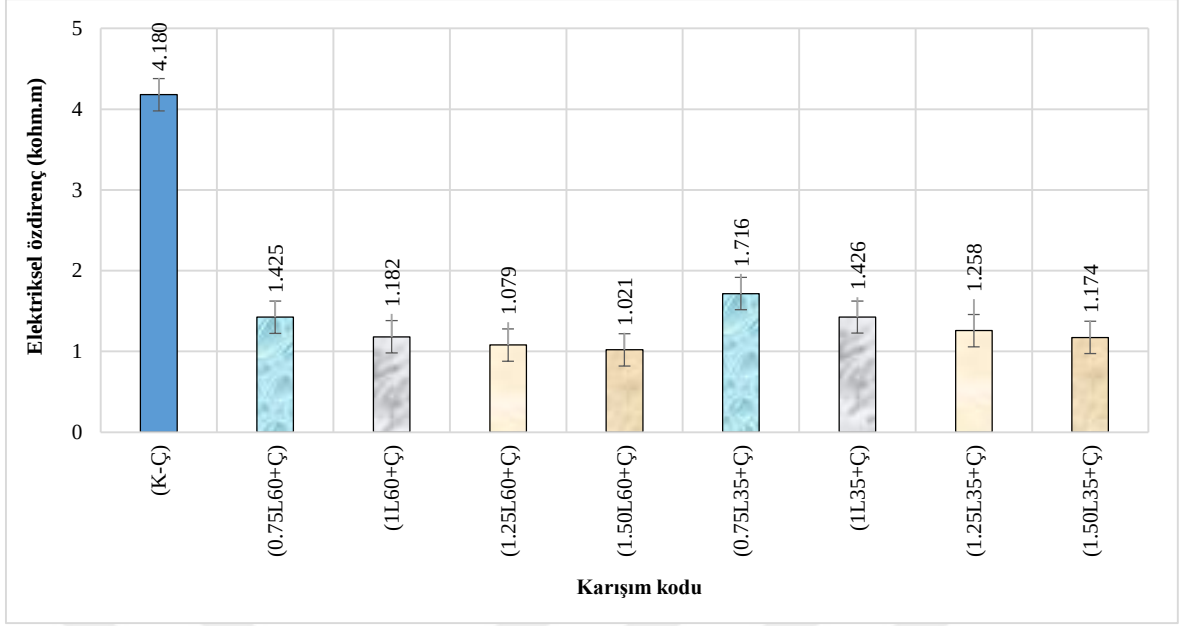
Şekil 4.53 : Aşınma kaybı- YFC oranı ilişkisi.

4.1.8 Elektriksel özdirenç deneyi

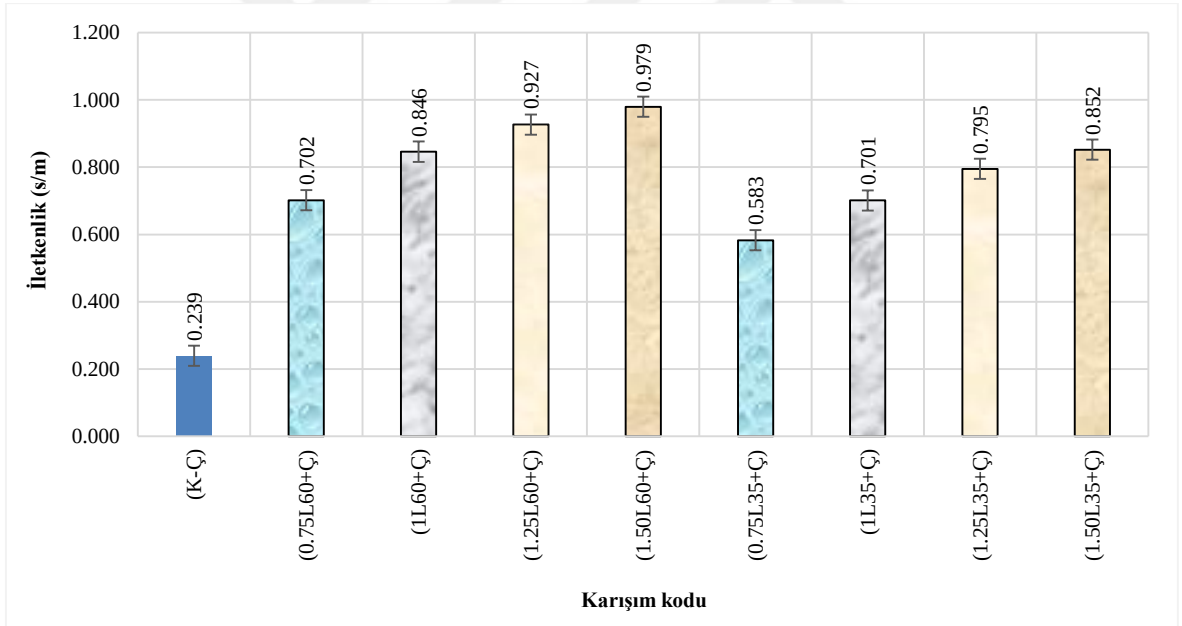
Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) beton karışımlarının 28 günlük elektriksel özdirençlerinin belirlenmesi amacıyla 2 adet Ø100x200 mm ölçülerinde silindir numuneler test edilmiştir. Bu amaçla, numunelerin sabit 60 volt gerilim altındaki direnç (R), akım (I), elektriksel özdirenç (P) ve iletkenlik (C) değerleri belirlenerek Çizelge 4.18’te verilmiştir. Ayrıca, numunelere ait elektriksel özdirenç ve iletkenlik Şekil 4.54 ve Şekil 4.55’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.18 : Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) beton numunelerine ait elektriksel özdirenç deney sonuçları.

Karışım Kodu	V (volt)	I (Amper)	R (ohm)	A (m ²)	L (m)	P (kohm.m)	C (s/m)
(K-Ç)	60	0.006	10649.682	0.0785	0.200	4.180	0.239
(0.75L60+Ç)		0.017	3630.573			1.425	0.702
(1L60+Ç)		0.020	3011.465			1.182	0.846
(1.25L60+Ç)		0.022	2749.045			1.079	0.927
(1.50L60+Ç)		0.023	2601.274			1.021	0.979
(0.75L35+Ç)		0.014	4371.975			1.716	0.583
(1L35+Ç)		0.017	3633.121			1.426	0.701
(1.25L35+Ç)		0.019	3205.096			1.258	0.795
(1.50L35+Ç)		0.020	2991.083			1.174	0.852



Şekil 4.54 : Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) numunelere ait elektriksel özdirenç değerleri.



Şekil 4.55 : Kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) numunelere ait iletkenlik değerleri.

Şekil 4.54 ve Şekil 4.55 incelendiğinde, lifsiz kontrol beton numunesine kıyasla, tüm lif katkılı beton numunelerinin elektriksel iletkenliğinin daha yüksek olması, numunelere katılan çelik liflerin elektriksel özdirenci düşürdüğünü göstermektedir. İlaveeten, en yüksek iletkenlik değeri 0.979 s/m ile (1.50L60+Ç) karışımından elde edilmiş ve buna bağlı olarakta numunenin elektriksel özdirenç değeri de 1.021 kohm.m ile en düşük olmuştur.

Ayrıca, lifsiz kontrol numunenin 4.180 kohm.m ile en yüksek elektriksel özdirenç sahip olduğu ve sonuçta 0.239 s/m ile en az iletkenliğe sahip olduğu görülürken, lif takviyeli numunelerde ise en düşük iletkenlik değeri 0.583 s/m ile (0.75L35+Ç) karışımından elde edilmiştir. Karışımlara ilave edilen lif oranının hacimce (%0.75'den %1, %1.25'e ve %1.5'a) artması ise, numunelerin daha fazla iletken özellik göstermesine sebep olmuştur. Literatürde gerçekleştirilen araştırmalarda da numunelere katılan liflerin elektriksel özdirenci düşürdüğü görülmüştür (Boğa, 2017; Çiçek, 2021; Türk ve Turgut, 2021; Türk ve diğ., 2022).

Lif katkılı karışımlara eklenen liflerin boyu incelendiğinde, 60 mm uzunluğundaki çelik lif içeren tüm lifli karışımların aynı lif oranına sahip 35 mm uzunluğundaki karışımlara oranla, daha düşük elektriksel özdirenç ve daha yüksek iletkenlik özelliği gösterdiği görülmüştür. Bu durum uzunluk artışının lifler arası bağlantıyı daha iyi sağlaması ile numune boyunca doğrusal bir iletken yol oluşturmaya dayandırılabilir (Chen, 2004). Benzer davranışlar literatürde karşılaşılan diğer çalışmalarla da desteklenmektedir. Yapılan bir diğer araştırmada da yüksek uzunluğa sahip liflere sahip numunelerin elektriksel iletkenliğinin çok daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür (Cleven, Raupach ve Matschei, 2021).

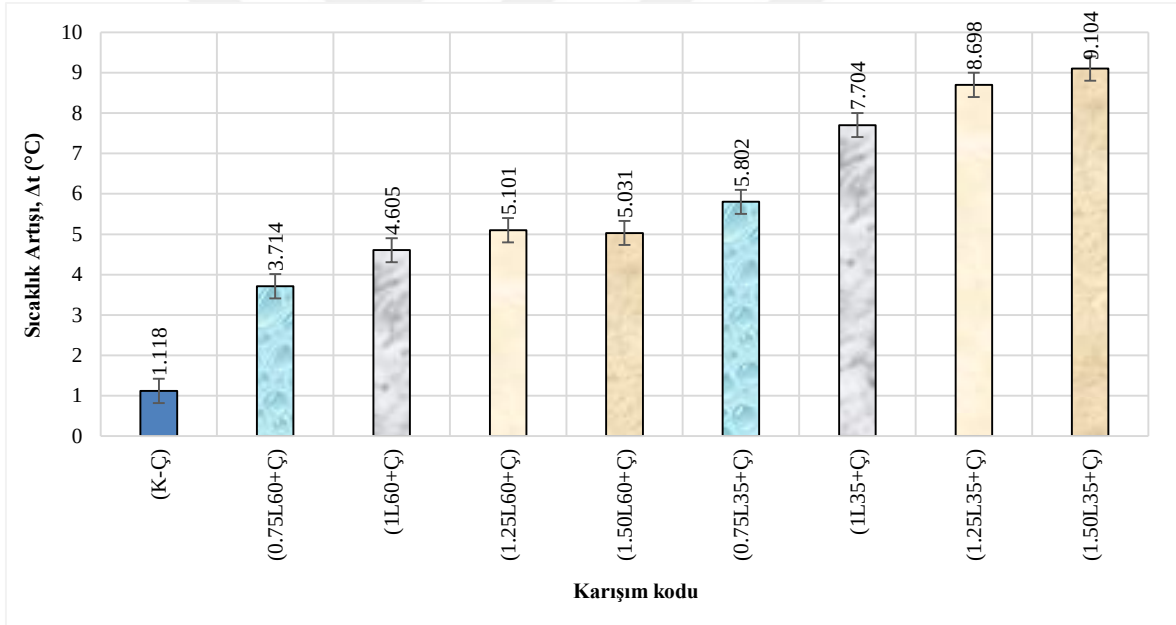
Çelik lif katkılı beton karışımlarına ait elektriksel özdirenç ve mekanik özellikler birlikte değerlendirildiğinde, lifsiz kontrol numunelere kıyasla, karışımlara çelik lif katılması ile numunelerin elektriksel özdirençlerinin azalması ve iletkenliklerinin artmasının yanında mekanik özelliklerinin de iyileştiği tespit edilmiştir (Huang, 2009; Çiçek, 2021; Türk ve Turgut, 2021; Türk ve diğ., 2022).

4.1.8.1 Numunelerin ısıtılması

Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) karışımların elektrik akımı ile sıcaklık artışını belirlemek için iki adet 100x200 mm ölçülerinde silindir numune test edilmiştir. Numunelere 220 volt şebeke gerilimi uygulanmış ve bu gerilim altındaki numunelerin 30. dakikadaki sıcaklık artışı değerleri (°C), numunelerin akım verilmeden önceki ilk sıcaklıkları esas alınarak belirlenmiştir (Çizelge 4.19 ve Şekil 4.56).

Çizelge 4.19 : Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) karışım numunelerine ait ısıtma deney sonuçları.

Karışım Kodu	Sıcaklık Artışı, Δt (°C)
(K-Ç)	1.118
(0.75L60+Ç)	3.714
(1L60+Ç)	4.605
(1.25L60+Ç)	5.101
(1.50L60+Ç)	5.031
(0.75L35+Ç)	5.802
(1L35+Ç)	7.704
(1.25L35+Ç)	8.698
(1.50L35+Ç)	9.104



Şekil 4.56 : Lifsiz kontrol, çelik lifli (35 ve 60 mm) karışım numunelerinin 30. dakikadaki sıcaklık artışı değerleri.

Şekil 4.56 incelendiğinde, 30 dakikalık zaman dilimi içerisindeki elektrik akımı ile en fazla sıcaklık artışı 9.104 °C ile (1.50L35+Ç) karışımından elde edilmiştir. En düşük sıcaklık artışı ise 1.118 °C ile lifsiz kontrol numunesinden ölçülmüştür. Ayrıca, lif katkılı numuneler içerisinde en düşük 30. dakikadaki sıcaklık artışı 3.714 °C ile (0.75L60+Ç) karışımından elde edilmiştir. Numunelere lif katılmasının numunelerin sıcaklık artışında genellikle olumlu bir etki gösterdiği görülmüştür (Çiçek, 2021).

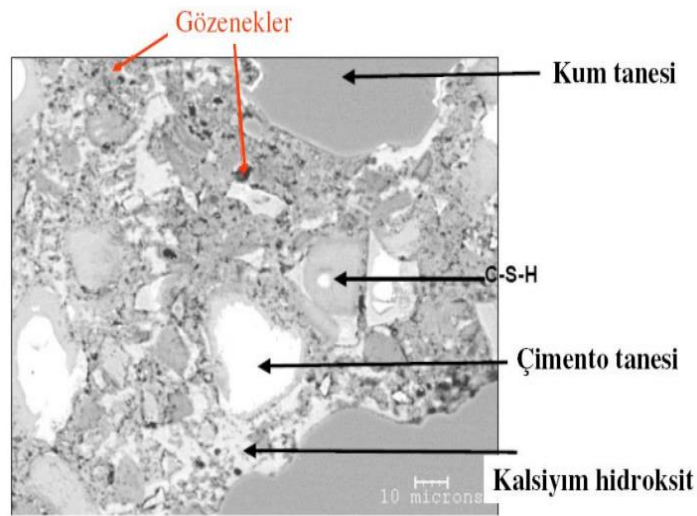
Aynı lif oranına sahip tüm lif katkılı numuneler dikkate alındığında, 35 mm boyundaki çelik lif içeren lifli numunelerin, elektrik akımı ile en yüksek sıcaklık artışına sahip olduğu görülmüştür. Çünkü 35 mm boyunda çelik lif içeren karışımların, 60 mm boyundaki karışımlara kıyasla matris içerisine sürüklenen hava içeriğinin daha az olmasından dolayı, bu karışımlara ait numunelerin sıcaklık artışından olumlu etkilendiği değerlendirilmiş ve literatürde Türk ve diğ, (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Ayrıca, çelik lif katkılı numunelerin elektrik akımı ile sıcaklık artışları, lifsiz kontrol numunenin sıcaklık değişiminden çok daha yüksek çıkarak ölçümlerin güvenilir sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir.

4.1.9 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve XRD analizi

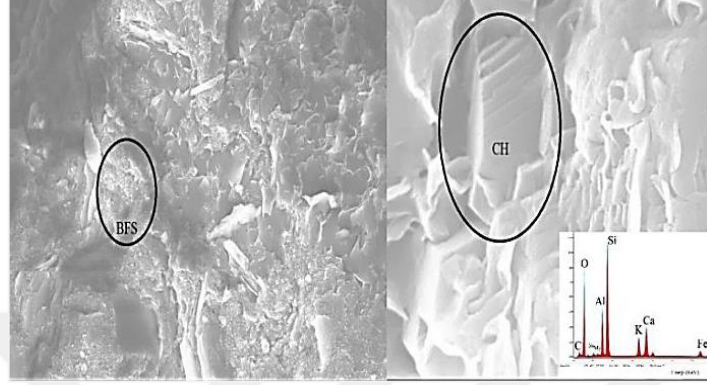
SEM görüntüleri 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. SEM analizi; kontrol numunelerinden sadece çimento içeren (K-Ç) numunesi ve YFC'li numunelerde ise, optimum YFC oranının elde edildiği %20YFC katkılı numuneler (K-Ç20Y) kullanılarak yapılmıştır. Çelik lif (35 ve 60 mm) katkılı numunelerde ise literatürde yapılan çalışmalar kapsamında çelik lifin analizi kapsamında %1.50 çelik lif katkılı numunelerin (1.50L60-Ç20Y) ve (1.50L35-Ç20Y) analizi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, numunelerden ince bir kesit alınarak cam bir tabağa konulmuş ve incelenmiştir. (K-Ç) ve (K-Ç20Y) numunelerine ait mikroyapısal SEM görüntüleri Şekil 4.57 ve Şekil 4.58'de gösterilmiştir.



Şekil 4.57 : (K-Ç) numunesine ait SEM görüntüsü.

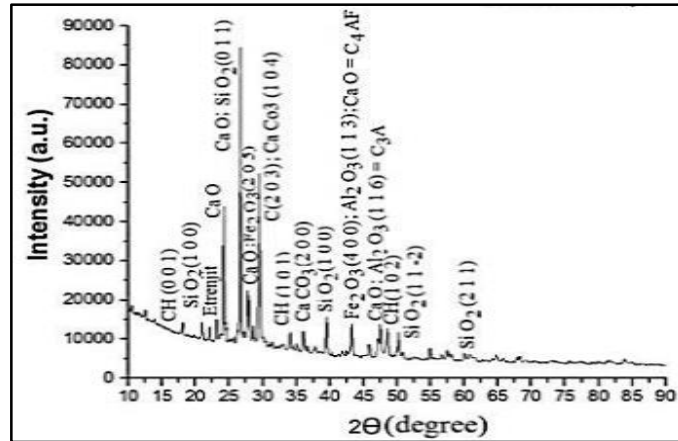
Şekil 4.57’de kontrol numunesi (K-Ç) analiz edildiğinde, çok fazla miktarda boşluk içerdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, hidratasyon sonucunda açığa çıkan (C-S-H) jelleri, CH taneleri ve diğer hidratasyon ürünleri analiz görüntüsünde verilmiştir. Betonda oluşan boşluklar geçirimli bir yapıya sebep olduklarından dolayı basınç ve eğilme dayanımı azaltmakta ve her türlü olumsuz etkiye karşı betonun direncini zayıflatmaktadır.



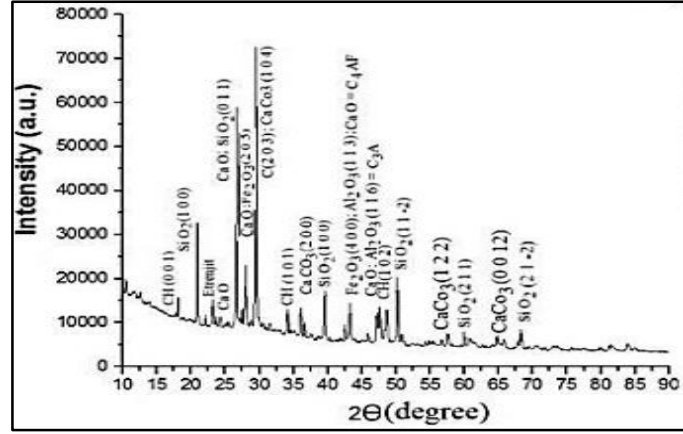
Şekil 4.58 : (K-Ç20Y) numunesine ait SEM görüntüsü.

Benzer şekilde Şekil 4.58’de verilen (K-Ç20Y) numunesi incelendiğinde, YFC ilaveli numunelerde yüksek miktarda Si, O ve Al olduğu görülmüştür. Ayrıca, SEM görüntüsünde altıgen şeklinde CH oluşumu izlenmiştir. İlaveten, YFC’nin çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile reaksiyonu sonucunda oluşan C-S-H jelleri yüksek oranda hidrolik bağlayıcı ürün oluşturmakta ve bunun sonucunda da YFC’nin basınç ve eğilme dayanımlarını artırdığı değerlendirilmektedir.

Kontrol numuneleri (K-Ç) ve (K-Ç20Y) numunelerine ait XRD sonuçları, 0 ila 90 derece arasında değişen iki teta (2θ) değeri için hesaplanmış ve Şekil 4.59 ve Şekil 4.60’da verilmiştir.



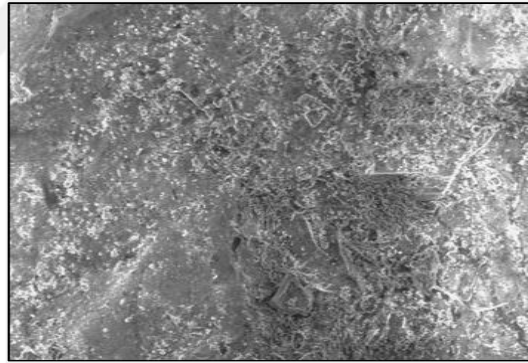
Şekil 4.59 : (K-Ç) numunesine ait XRD görüntüsü.



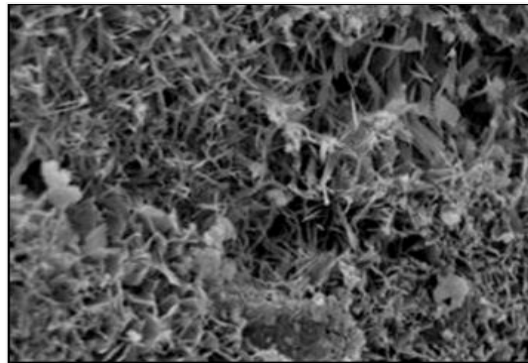
Şekil 4.60 : (K-Ç20Y) numunesine ait XRD görüntüsü.

Şekil 4.60 incelendiğinde, YFC'nin optimum değeri olan %20 oranında kalsiyum hidrat silikatın (C–S–H) pik yaptığı görülmüştür. Bunun sonucunda ise, YFC'nin bu (C–S–H) boşluklarını doldurduğu ve basınç dayanımının %20 YFC oranında optimum değere ulaştığı gözlemlenmiştir.

%1.50 çelik lif katkılı numunelerin (1.50L60-Ç20Y) ve (1.50L35-Ç20Y) SEM analizi kapsamında görüntüleri Şekil 4.61 ve Şekil 4.62'de verilmiştir.



Şekil 4.61 : (1,50L60-Ç20Y) numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil 4.62 : (1,50L35-Ç20Y) numunelerine ait SEM görüntüsü.

Numunelerden ince bir kesit alınarak cam bir tabağa bırakılmış ve inceleme yapılmıştır. İnceleme neticesinde, %20 YFC katkılı lifli betonun SEM görüntüleri, çelik lif ile beton matris arasında iyi bir bağ olduğunu, YFC'nin ise C-S-H boşluklarını doldurduğunu göstermiştir. Bunun sonucunda ise YFC katkılı lifli numunelerin basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımlarını artırdığı tespitleri yapılmıştır.

4.2 Karayolu beton yol kaplama tasarımı

Karayolu beton kaplama tasarımı; %0, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranlarında çelik lif (60 mm) ile güçlendirilmiş, YFC oranı %0, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında ikame edilmiş beton numuneleri ile çelik lif (35 mm) ve optimum %20 YFC oranı esas alınarak AASHTO (1993) tasarım rehberine göre hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca, beton yol kaplama kalınlık hesaplamalarında yedi ayrı proje trafiği ve beş ayrı zemin durumu dikkate alınmıştır. Proje trafiği seçiminde, hafif taşıt trafiği olarak yıllık ortalama günlük ağır taşıt trafiğinin (YOGATT) 500'den küçük olduğu veya başka bir ifade ile 8.2 tonluk standart eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısı ($W_{8.2}$)'nin 3.1×10^6 'dan küçük olduğu 1×10^6 standart dingil yükü tekerrürü alınmıştır. Ağır taşıt trafiği olarak ise YOGATT değerinin 500'den büyük olduğu 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 standart dingil yükü tekerrürleri alınmıştır (Tatlı, 2004).

Tasarımda, beton kaplamanın performansı için $W_{8.2}$ 'nin, kaplamanın performansı üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak AASHTO 1993 tasarım yönteminde verilen Denklem (2.1) ile beton kaplama kalınlığı (d) hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan ortak parametreler Çizelge 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.20 : Yol kaplama betonunun tasarımında kullanılan ortak parametreler.

Parametreler	Seçilen Değer
8.2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı, $W_{8.2}$	1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6
Yük transfer katsayısı, J	2.70
Drenaj katsayısı, C_d	1
Trafik tahmini ve performans tahmininin standart hatası, S_0	0.35
%95 R_E için, Standart normal sapma, Z_R	-1.645
Servis yeteneği kaybı, ΔPSI (psi), $\Delta PSI = P_0 - P_t$ = 4.5-2.5	2

Ayrıca, beton yol kaplamasının tasarımında kullanılan minimum dayanım gereksinimleri Çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.21 : Beton kaplamalı yol tasarımında minimum basınç, eğilme, yarmada çekme dayanım değerleri.

Küp Basınç Dayanımı, f_{ck} (N/mm ²)	Eğilmede Çekme Dayanımı f_{cbt} (N/mm ²)	Yarmada Çekme Dayanımı f_{sk} (N/mm ²)
Min. C 30/37	Min. 4.50	Min. 3.30

4.2.1 Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) beton yol kaplama tasarımı

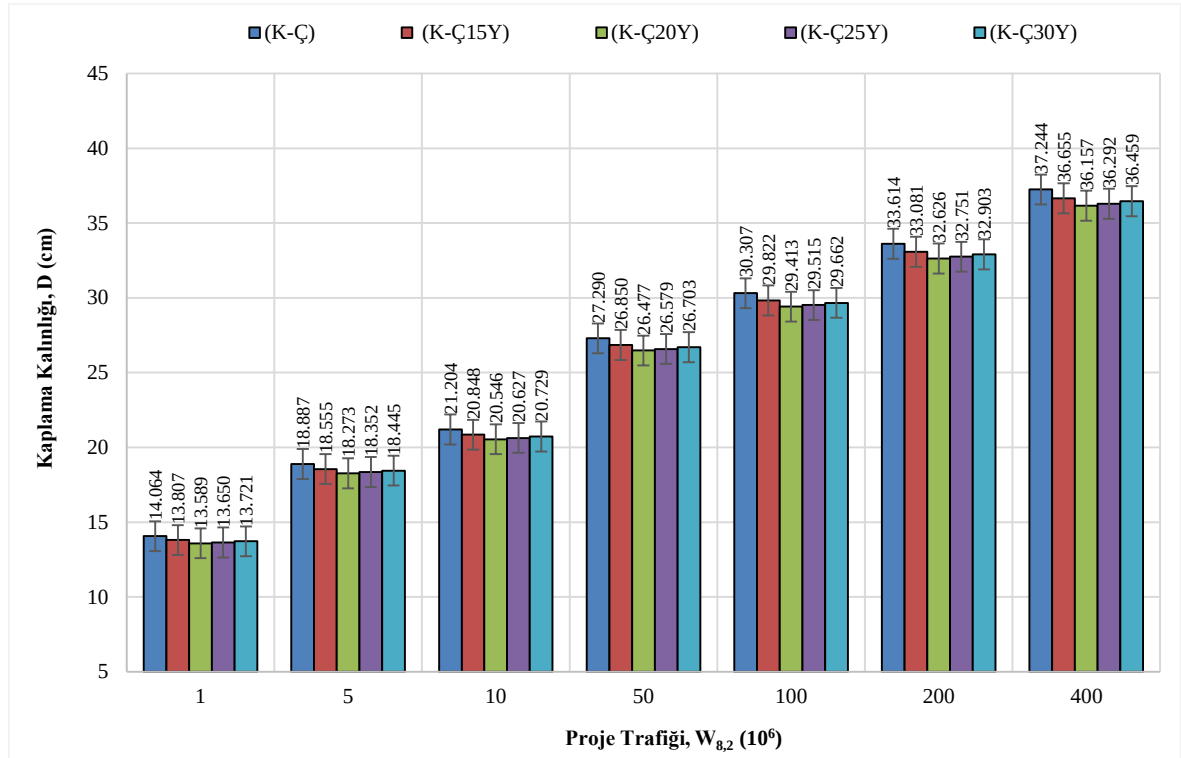
4.2.1.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

Kontrol numunelerinin tasarımında kullanılacak eğilmede çekme dayanımı (S'_c) ve betonun elastisite modülü (E_c) değerleri Çizelge 4.22’de verilmiştir.

Çizelge 4.22 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç15Y)	54.15	5.28	6.17	894.88	6040458
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(K-Ç25Y)	52.14	5.38	6.30	913.74	6167728
(K-Ç30Y)	51.30	5.34	6.24	905.04	6108988

Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.63'te gösterilmiştir.



Şekil 4.63 : Kontrol numunelerine ait $W_{8,2}$ – D değişim grafiği.

Şekil 4.63 incelendiğinde, eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısı arttıkça üstyapı beton kaplama kalınlığının arttığı, YFC oranının artışı ile beton kaplama kalınlığında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Beton kaplama kalınlığındaki bu azalış 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için YFC içermeyen kontrol numunesine (K-Ç) göre sırasıyla;

- ✓ %15 YFC katkılı numunelerde (K-Ç15Y); %1.82, %1.76, %1.68, %1.61, %1.60, %1.59 ve %1.58.
- ✓ %20 YFC katkılı numunelerde (K-Ç20Y); %3.38, %3.25, %3.10, %2.98, %2.95, %2.94 ve %2.92,
- ✓ %25 YFC katkılı numunelerde (K-Ç25Y); %2.94, %2.84, %2.72, %2.61, %2.61, %2.57 ve %2.56,
- ✓ %30 YFC katkılı numunelerde (K-Ç30Y); %2.44, %2.34, %2.24, %2.15, %2.13, %2.12 ve %2.11 olarak tespit edilmiştir.

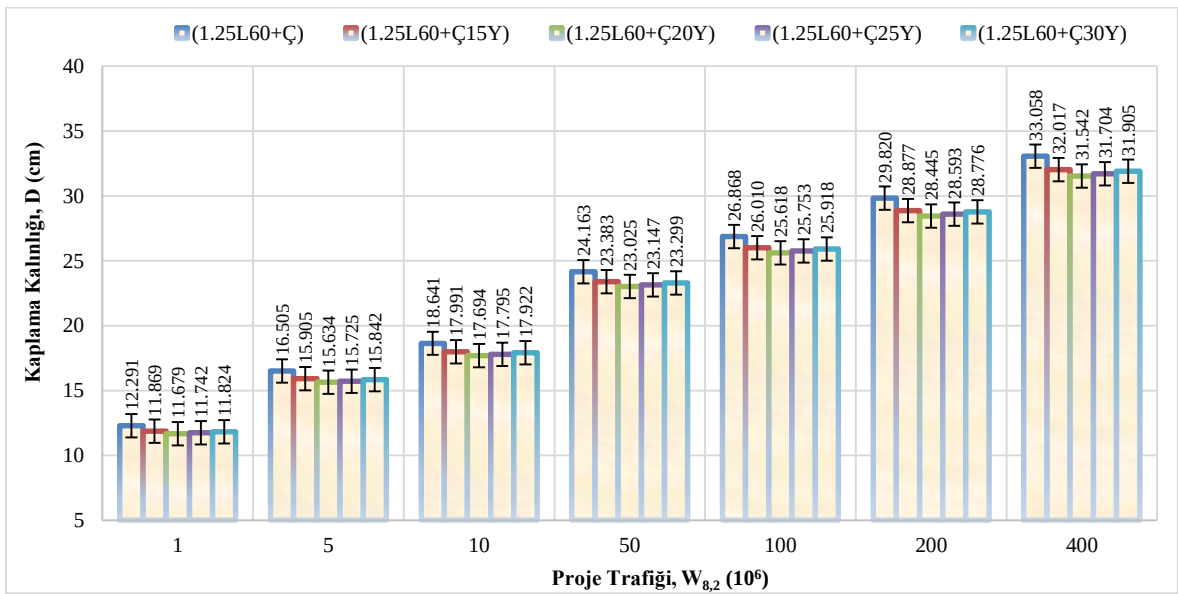
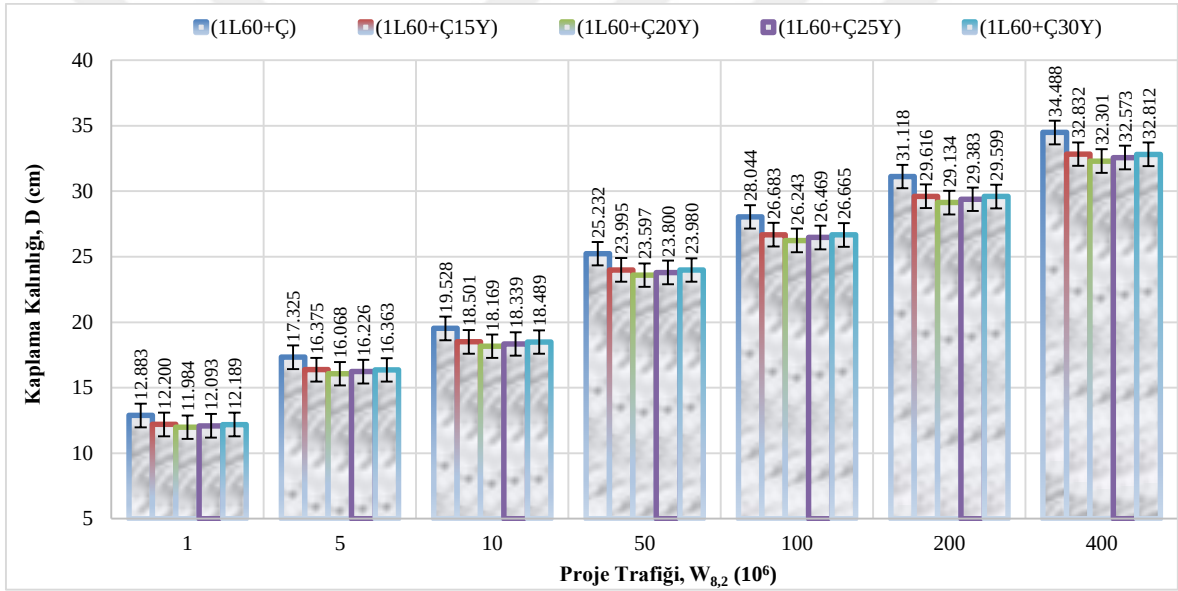
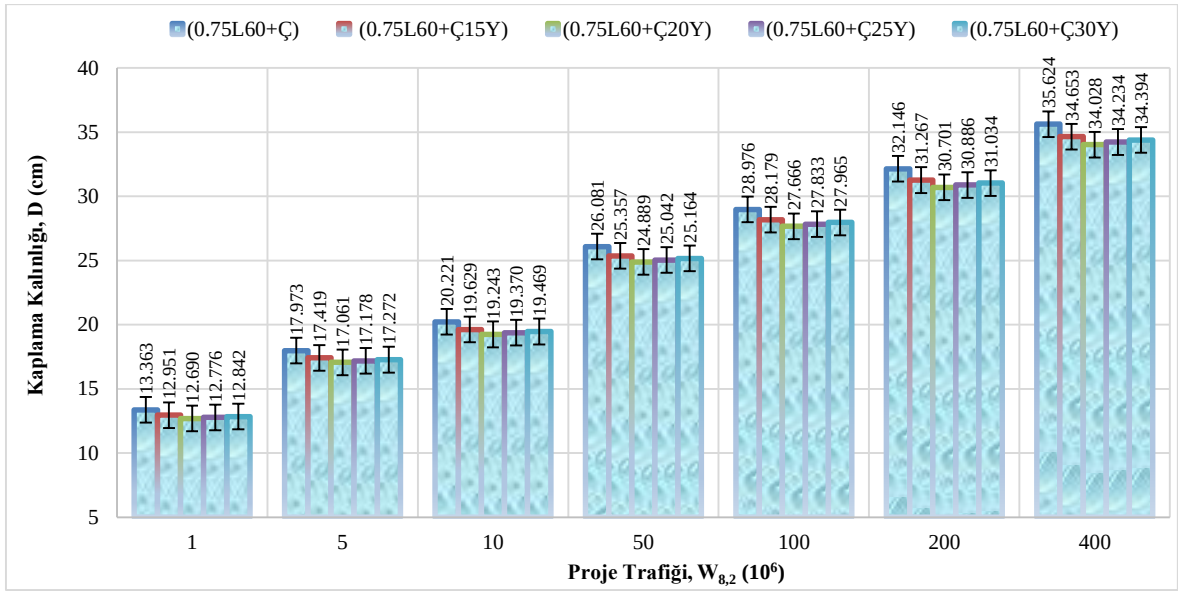
4.2.1.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

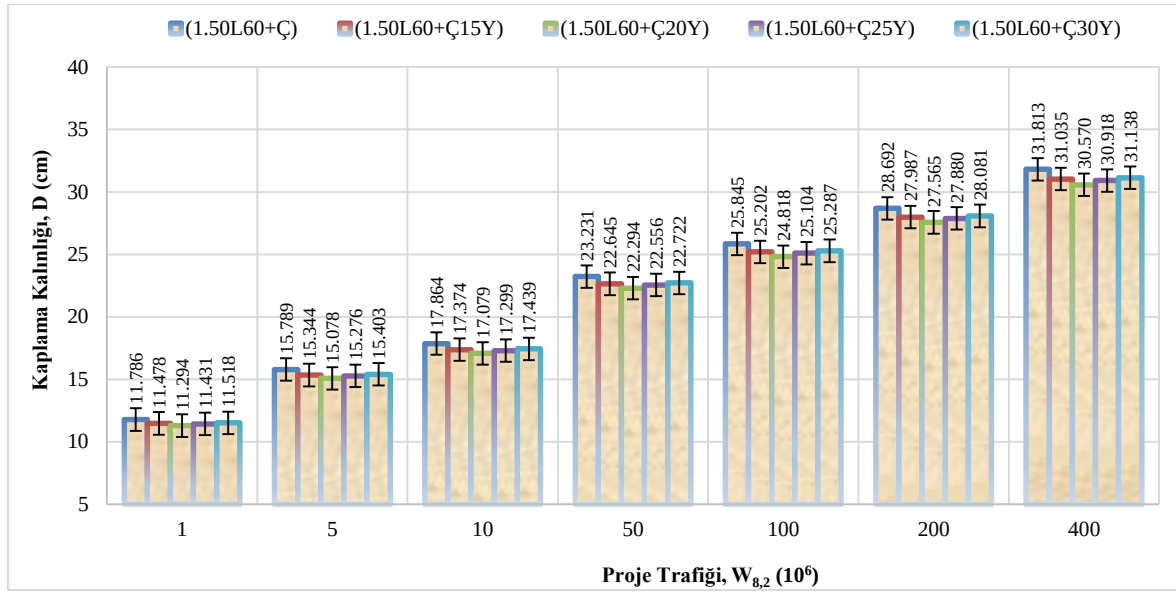
Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.23'de verilmiştir.

Çizelge 4.23 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(0.75L60+Ç)	48.22	5.57	6.55	950.00	6412479
(0.75L60+Ç15Y)	52.25	6.03	6.94	1006.56	6794291
(0.75L60+Ç20Y)	52.79	6.23	7.21	1045.72	7058622
(0.75L60+Ç25Y)	51.98	6.05	7.12	1032.67	6970512
(0.75L60+Ç30Y)	51.19	5.96	7.05	1022.52	6901982
(1L60+Ç)	47.19	6.11	7.01	1016.71	6862821
(1L60+Ç15Y)	51.12	6.52	7.77	1126.94	7606865
(1L60+Ç20Y)	51.44	6.75	8.04	1166.10	7871196
(1L60+Ç25Y)	50.92	6.66	7.90	1145.80	7734135
(1L60+Ç30Y)	50.12	6.57	7.78	1128.39	7616655
(1.25L60+Ç)	45.14	6.30	7.66	1110.99	7499174
(1.25L60+Ç15Y)	49.14	6.74	8.19	1187.86	8018047
(1.25L60+Ç20Y)	49.98	6.95	8.45	1225.57	8272588
(1.25L60+Ç25Y)	48.25	6.88	8.36	1212.52	8184477
(1.25L60+Ç30Y)	47.50	6.78	8.25	1196.56	8076787
(1.50L60+Ç)	43.09	6.48	8.30	1203.81	8125737
(1.50L60+Ç15Y)	46.88	6.95	8.74	1267.63	8556499
(1.50L60+Ç20Y)	47.74	7.15	9.02	1308.24	8830620
(1.50L60+Ç25Y)	45.74	7.03	8.81	1277.78	8625029
(1.50L60+Ç30Y)	45.02	6.96	8.68	1258.93	8497759

Farklı oranlarda çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.64'de gösterilmiştir.





Şekil 4.64 : Çelik lifli (60 mm) numunelere ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.

Şekil 4.64 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin kontrol numunelerine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L60+Ç) numunesinde, %4.98, %4.84, %4.64, %4.43, %4.39, %4.37 ve %4.35,
- (0.75L60+Ç15Y) numunesinde, %6.20, %6.12, %5.85, %5.56, %5.51, %5.48 ve %5.46,
- (0.75L60+Ç20Y) numunesinde, %6.63, %6.62, %6.34, %6.00, %5.94, %5.90 ve %5.89,
- (0.75L60+Ç25Y) numunesinde, %6.40, %6.39, %6.10, %5.78, %5.70, %5.69 ve %5.67,
- (0.75L60+Ç30Y) numunesinde, %6.41, %6.36, %6.08, %5.76, %5.72, %5.68 ve %5.66 olarak hesaplanmıştır.
- (1L60+Ç) numunesinde, %8.40, %8.27, %7.91, %7.54, %7.47, %7.43 ve %7.40,
- (1L60+Ç15Y) numunesinde, %11.64, %11.75, %11.26, %10.63, %10.53, %10.47 ve %10.43,
- (1L60+Ç20Y) numunesinde, %11.81, %12.07, %11.57, %10.88, %10.78, %10.70 ve %10.66,
- (1L60+Ç25Y) numunesinde, %11.41, %11.58, %11.09, %10.45, %10.32, %10.28 ve %10.25,

- (1L60+Ç30Y) numunesinde, %11.16, %11.29, %10.81, %10.20, %10.10, %10.04 ve %10.00 olarak hesaplanmıştır.
- (1.25L60+Ç) numunesinde, %12.60, %12.61, %12.09, %11.46, %11.35, %11.29 ve %11.24,
- (1.25L60+Ç15Y) numunesinde, %14.04, %14.28, %13.71, %12.91, %12.78, %12.71 ve %12.65,
- (1.25L60+Ç20Y) numunesinde, %14.06, %14.44, %13.88, %13.04, %12.90, %12.81 ve %12.76,
- (1.25L60+Ç25Y) numunesinde, %13.97, %14.31, %13.73, %12.91, %12.75, %12.70 ve %12.64,
- (1.25L60+Ç30Y) numunesinde, %13.83, %14.11, %13.54, %12.75, %12.62, %12.54 ve %12.49 olarak hesaplanmıştır.
- (1.50L60+Ç) numunesinde, %16.20, %16.41, %15.75, %14.87, %14.73, %14.64 ve %14.58,
- (1.50L60+Ç15Y) numunesinde, %16.87, %17.30, %16.67, %15.66, %15.49, %15.40 ve %15.33,
- (1.50L60+Ç20Y) numunesinde, %16.89, %17.48, %16.87, %15.80, %15.62, %15.51 ve %15.45,
- (1.50L60+Ç25Y) numunesinde, %16.26, %16.76, %16.13, %15.14, %14.94, %14.87 ve %14.81,
- (1.50L60+Ç30Y) numunesinde, %16.06, %16.50, %15.87, %14.91, %14.75, 14.66 ve %14.59 olarak hesaplanmıştır.

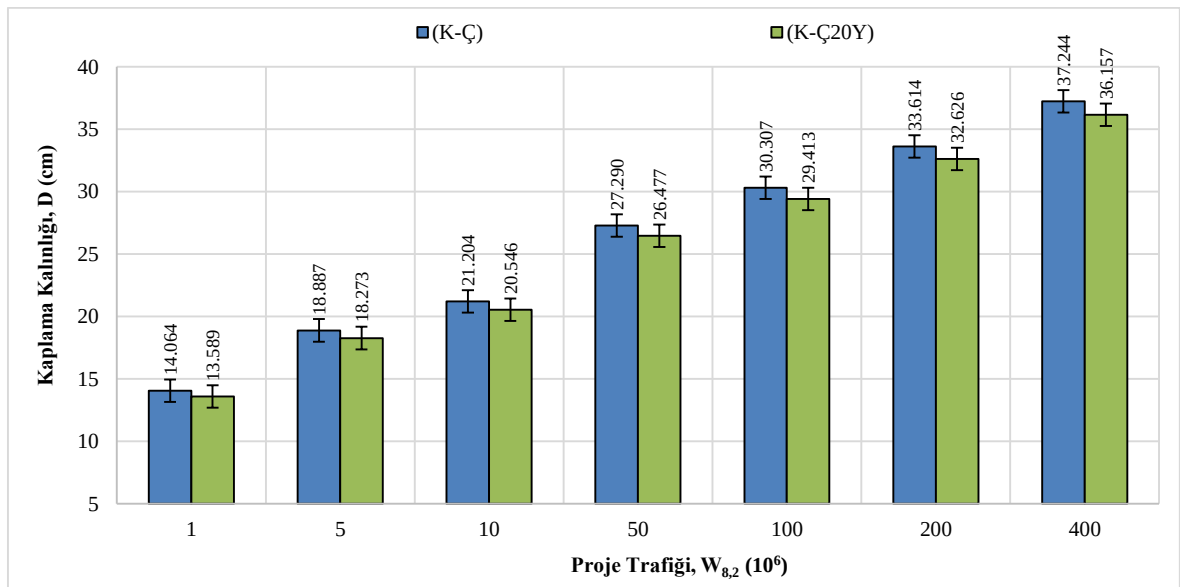
4.2.1.3 Çelik lif (35 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

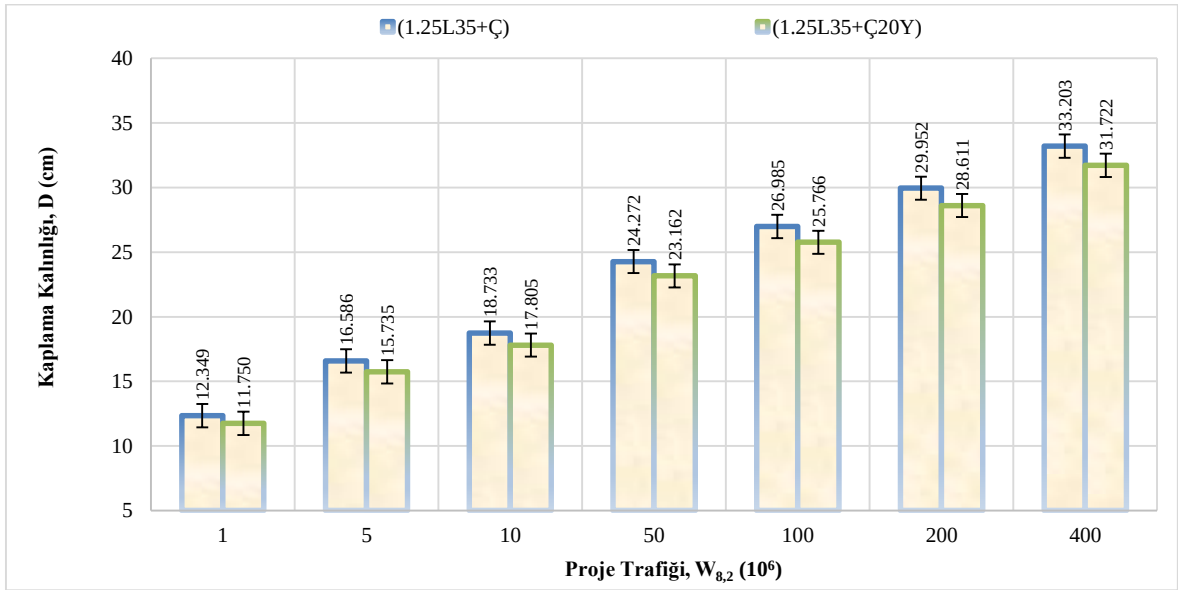
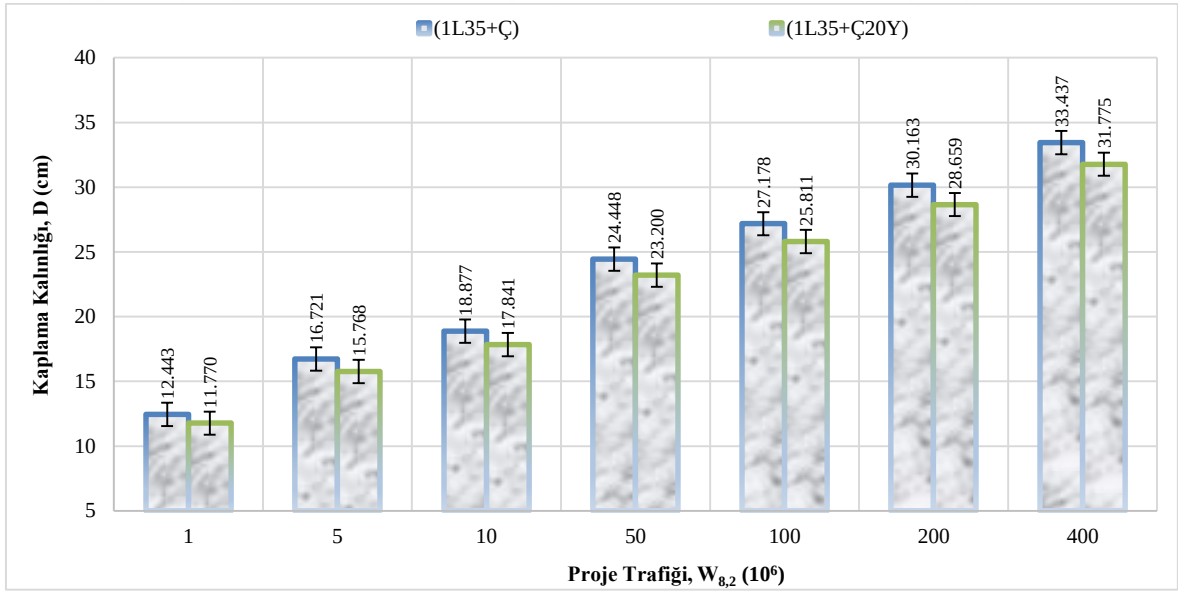
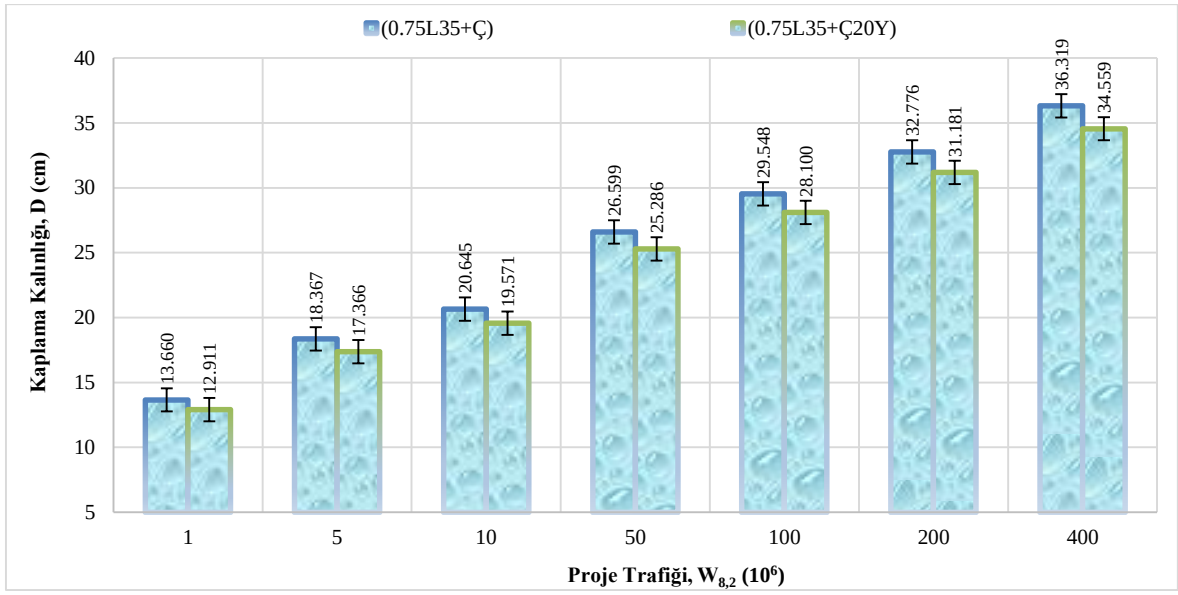
Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkıli numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.24'de verilmiştir.

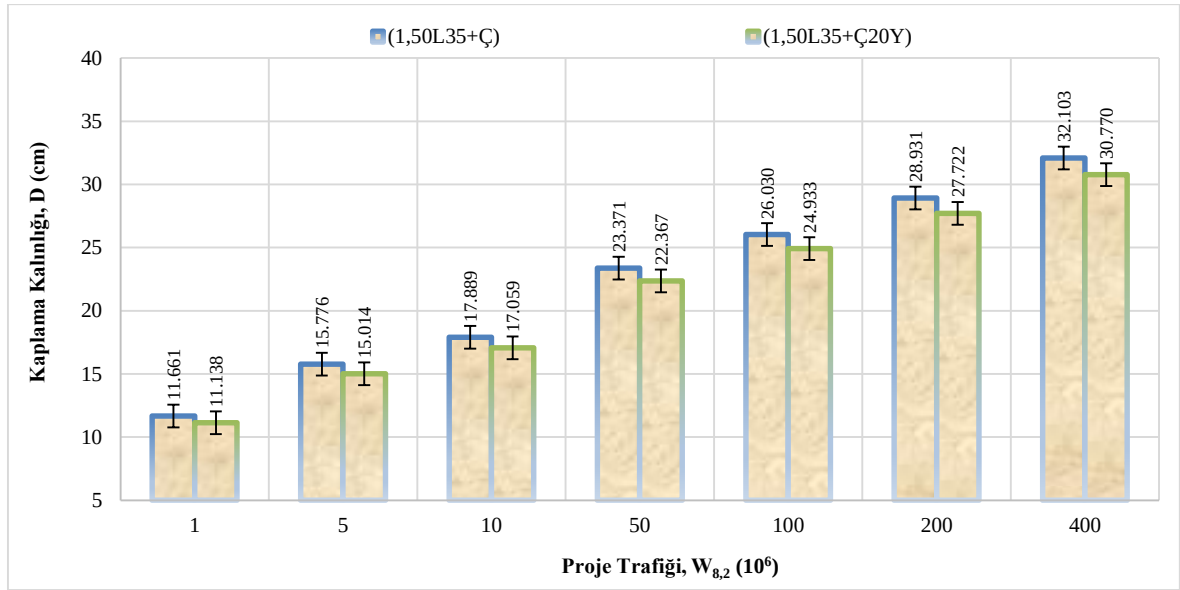
Çizelge 4.24 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(0.75L35+Ç)	55.41	5.28	6.29	912.29	6157938
(0.75L35+Ç20Y)	59.08	5.62	6.98	1012.36	6833451
(1L35+Ç)	57.70	5.51	7.48	1084.88	7322953
(1L35+Ç20Y)	62.15	6.22	8.32	1206.71	8145317
(1.25L35+Ç)	58.92	5.57	7.59	1100.84	7430644
(1.25L35+Ç20Y)	64.88	6.51	8.35	1211.06	8174687
(1.50L35+Ç)	60.57	5.78	8.00	1160.30	7832036
(1.50L35+Ç20Y)	67.01	6.79	8.74	1267.63	8556499

Farklı oranlarda çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.65'te gösterilmiştir.







Şekil 4.65 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.

Şekil 4.65 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L35+Ç) numunesinde, %2.87, %2.76, %2.64, %2.53, %2.61, %2.49 ve 2.48,
- (0.75L35+Ç20Y) numunesinde, %4.99, %4.96, %4.75, %4.50, %4.46, %4.43 ve %4.42,
- (1L35+Ç) numunesinde, %11.52, %11.47, %10.97, %10.42, %10.33, %10.27 ve %10.22,
- (1L35+Ç20Y) numunesinde, %13.38, %13.71, %13.17, %12.38, %12.25, %12.16 ve %12.12,
- (1.25L35+Ç) numunesinde, %12.19, %12.18, %11.66, %11.06, %10.96, %10.90 ve %10.85,
- (1.25L35+Ç20Y) numunesinde, %13.53, %13.89, %13.34, %12.52, %12.40, %12.31 ve %12.27,
- (1.50L35+Ç) numunesinde, %14.57, %14.69, %14.09, %13.33, %13.20, %13.12 ve %13.07,
- (1.50L35+Ç20Y) numunesinde, %15.53, %16.03, %15.44, %14.48, %14.32, %14.22 ve %14.19 olarak hesaplanmıştır.

4.2.2 Taşıma gücü zayıf zeminlerde (siltli ve siltli kil) beton yol kaplama tasarımı

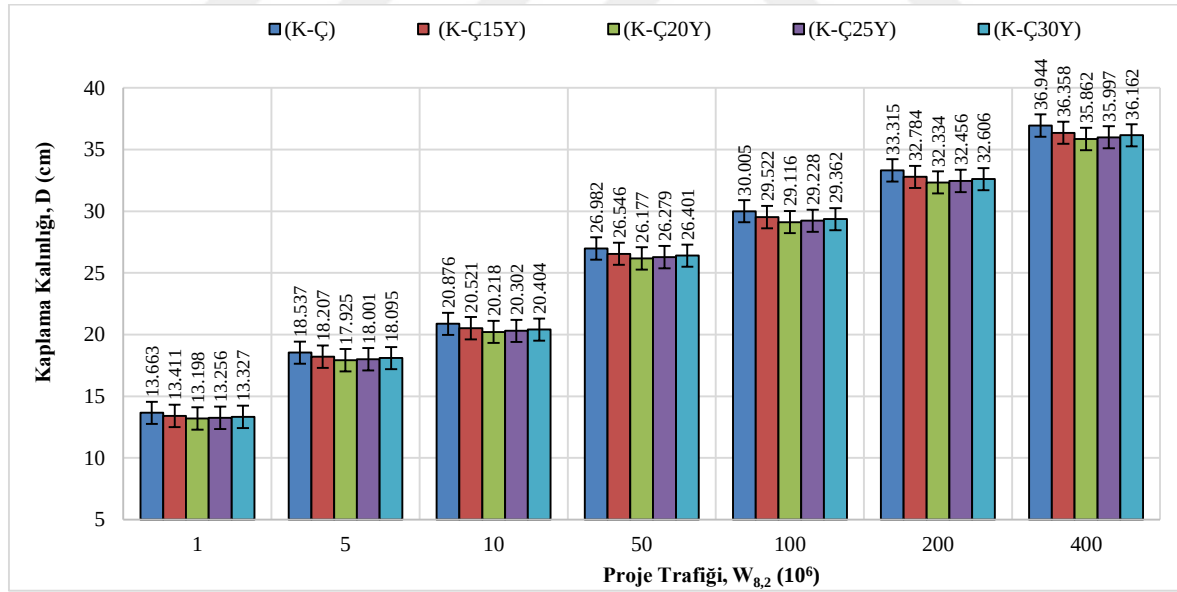
4.2.2.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

Kontrol numunelerinin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.25’de verilmiştir.

Çizelge 4.25 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç15Y)	54.15	5.28	6.17	894.88	6040458
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(K-Ç25Y)	52.14	5.38	6.30	913.74	6167728
(K-Ç30Y)	51.30	5.34	6.24	905.04	6108988

Farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.66’da gösterilmiştir.



Şekil 4.66 : Kontrol numunelerine ait $W_{8.2}$ – D değişim grafiği.

Şekil 4.66 incelendiğinde, eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısı arttıkça üstyapı beton kaplama kalınlığının arttığı, YFC oranının artışı ile beton kaplama kalınlığında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Beton kaplama kalınlığındaki bu azalış 1×10^6 , 5×10^6 ,

10×10⁶, 50×10⁶, 100×10⁶, 200×10⁶ ve 400×10⁶ proje trafikleri için YFC içermeyen kontrol numunesine (K-Ç) göre sırasıyla;

- ✓ %15 YFC katkılı numunelerde (K-Ç15Y); %1.84, %1.78, %1.70, %1.62, %1.61, %1.59 ve %1.58,
- ✓ %20 YFC katkılı numunelerde (K-Ç20Y); %3.40, %3.30, %3.15, %2.98, %2.96, %2.94 ve %2.93,
- ✓ %25 YFC katkılı numunelerde (K-Ç25Y); %2.97, %2.89, %2.75, %2.61, %2.59, %2.58 ve %2.56,
- ✓ %30 YFC katkılı numunelerde (K-Ç30Y); %2.45, %2.38, %2.26, %2.16, %2.14, %2.13 ve %2.12 olarak tespit edilmiştir.

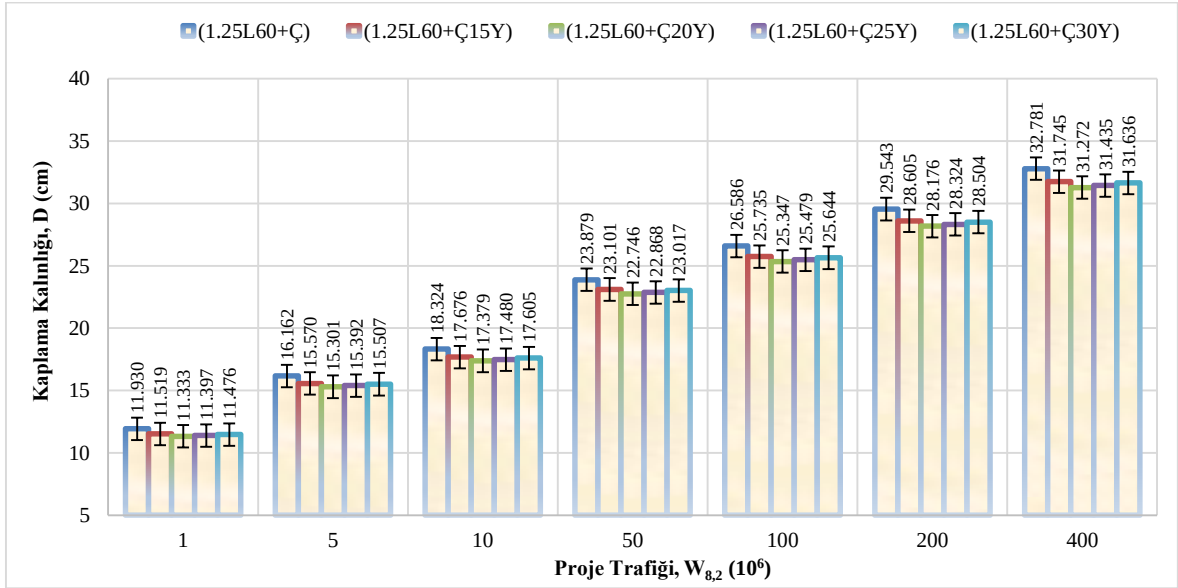
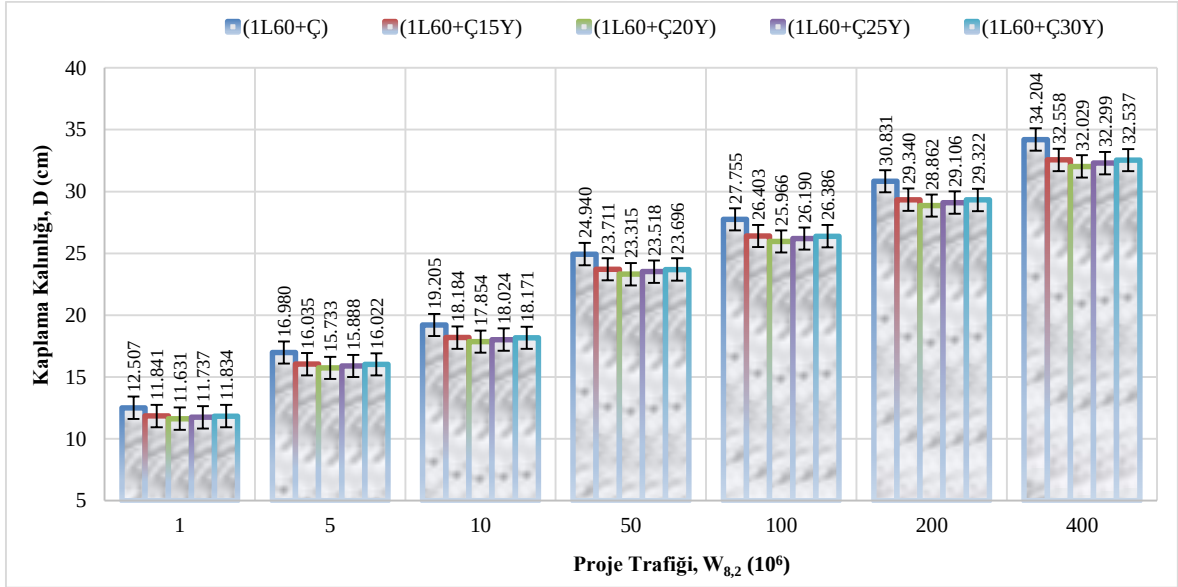
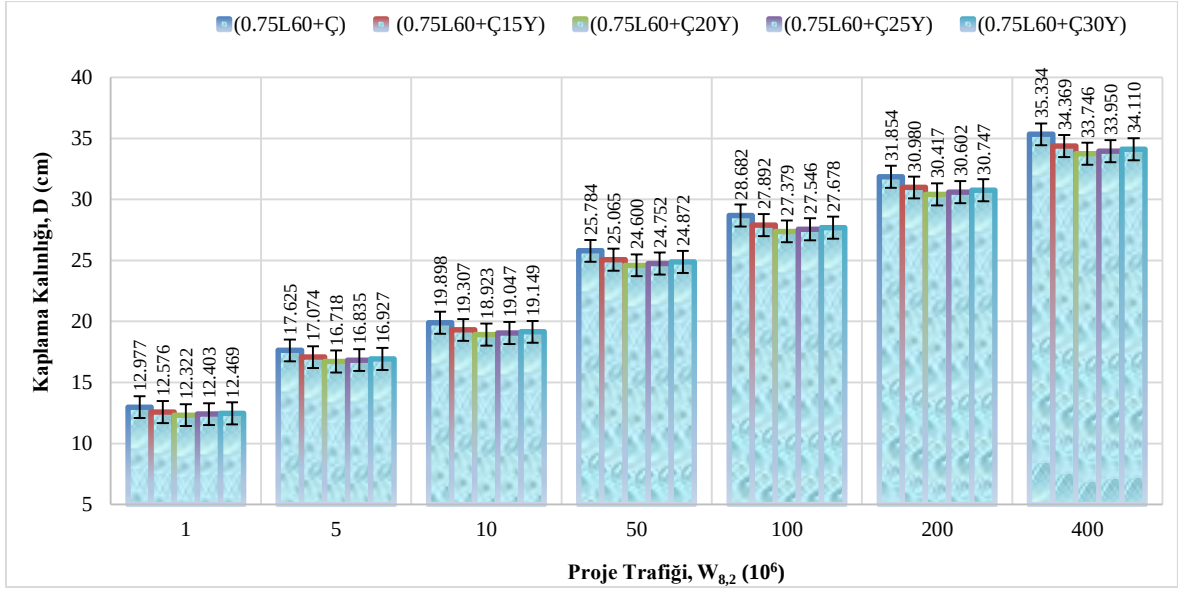
4.2.2.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

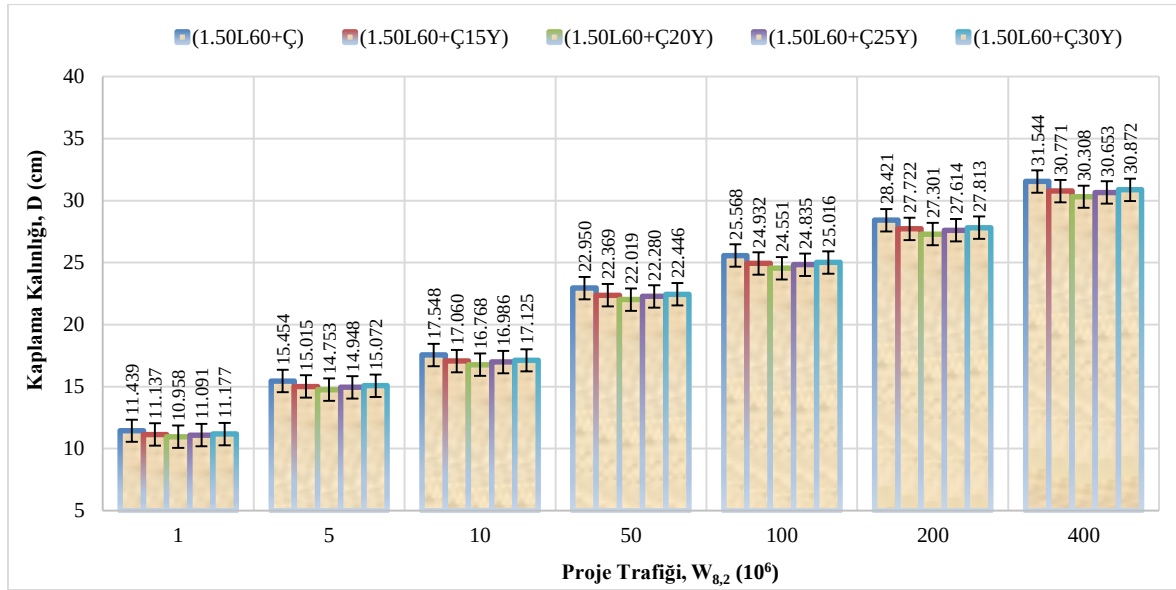
Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.26'da verilmiştir.

Çizelge 4.26 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı, (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı, (MPa)	S' _c (psi)	E _c (psi)
(0.75L60+Ç)	48.22	5.57	6.55	950.00	6412479
(0.75L60+Ç15Y)	52.25	6.03	6.94	1006.56	6794291
(0.75L60+Ç20Y)	52.79	6.23	7.21	1045.72	7058622
(0.75L60+Ç25Y)	51.98	6.05	7.12	1032.67	6970512
(0.75L60+Ç30Y)	51.19	5.96	7.05	1022.52	6901982
(1L60+Ç)	47.19	6.11	7.01	1016.71	6862821
(1L60+Ç15Y)	51.12	6.52	7.77	1126.94	7606865
(1L60+Ç20Y)	51.44	6.75	8.04	1166.10	7871196
(1L60+Ç25Y)	50.92	6.66	7.90	1145.80	7734135
(1L60+Ç30Y)	50.12	6.57	7.78	1128.39	7616655
(1.25L60+Ç)	45.14	6.30	7.66	1110.99	7499174
(1.25L60+Ç15Y)	49.14	6.74	8.19	1187.86	8018047
(1.25L60+Ç20Y)	49.98	6.95	8.45	1225.57	8272588
(1.25L60+Ç25Y)	48.25	6.88	8.36	1212.52	8184477
(1.25L60+Ç30Y)	47.50	6.78	8.25	1196.56	8076787
(1.50L60+Ç)	43.09	6.48	8.30	1203.81	8125737
(1.50L60+Ç15Y)	46.88	6.95	8.74	1267.63	8556499
(1.50L60+Ç20Y)	47.74	7.15	9.02	1308.24	8830620
(1.50L60+Ç25Y)	45.74	7.03	8.81	1277.78	8625029
(1.50L60+Ç30Y)	45.02	6.96	8.68	1258.93	8497759

Farklı oranlarda çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.67'de gösterilmiştir.





Şekil 4.67 : Çelik lifli (60 mm) numunele ait $W_{8,2}$ – D değişim grafiği.

Şekil 4.67 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L60+Ç) numunesinde, %5.02, %4.92, %4.68, %4.44, %4.41, %4.38 ve %4.36,
- (0.75L60+Ç15Y) numunesinde, %6.23, %6.22, %5.92, %5.58, %5.52, %5.50 ve %5.47,
- (0.75L60+Ç20Y) numunesinde, %6.64, %6.73, %6.41, %6.03, %5.97, %5.93 ve %5.90,
- (0.75L60+Ç25Y) numunesinde, %6.44, %6.48, %6.18, %5.81, %5.75, %5.71 ve %5.69,
- (0.75L60+Ç30Y) numunesinde, %6.44, %6.46, %6.15, %5.79, %5.74, %5.70 ve %5.68,
- (1L60+Ç) numunesinde, %8.46, %8.40, %8.01, %7.57, %7.50, %7.46 ve %7.42,
- (1L60+Ç15Y) numunesinde, %11.70, %11.93, %11.39, %10.68, %10.57, %10.51 ve %10.45,
- (1L60+Ç20Y) numunesinde, %11.87, %12.23, %11.70, %10.94, %10.82, %10.74 ve %10.69,
- (1L60+Ç25Y) numunesinde, %11.46, %11.74, %11.22, %10.51, %10.39, %10.32 ve %10.27,

- (1L60+Ç30Y) numunesinde, %11.21, %11.45, %10.94, %10.25, %10.14, %10.07 ve %10.02,
- (1.25L60+Ç) numunesinde, %12.68, %12.81, %12.23, %11.50, %11.39, %11.32 ve %11.27,
- (1.25L60+Ç15Y) numunesinde, %14.11, %14.48, %13.86, %12.97, %12.83, %12.75 ve %12.69,
- (1.25L60+Ç20Y) numunesinde, %14.13, %14.64, %14.05, %13.11, %12.95, %12.86 ve %12.80,
- (1.25L60+Ç25Y) numunesinde, %14.03, %14.49, %13.90, %12.98, %12.83, %12.73 ve %12.67,
- (1.25L60+Ç30Y) numunesinde, %13.89, %14.30, %13.72, %12.82, %12.66, %12.58 ve %12.52;
- (1.50L60+Ç) numunesinde, %16.27, %16.63, %15.94, %14.95, %14.79, %14.69 ve %14.62,
- (1.50L60+Ç15Y) numunesinde, %16.96, %17.53, %16.86, %15.74, %15.55, %15.44 ve %15.37,
- (1.50L60+Ç20Y) numunesinde, %16.97, %17.70, %17.07, %15.88, %15.68, %15.57 ve %15.49,
- (1.50L60+Ç25Y) numunesinde, %16.33, %16.96, %16.33, %15.22, %15.03, %14.92 ve %14.85,
- (1.50L60+Ç30Y) numunesinde, %16.13, %16.70, %16.07, %14.98, %14.80, 14.70 ve %14.63 olarak hesaplanmıştır.

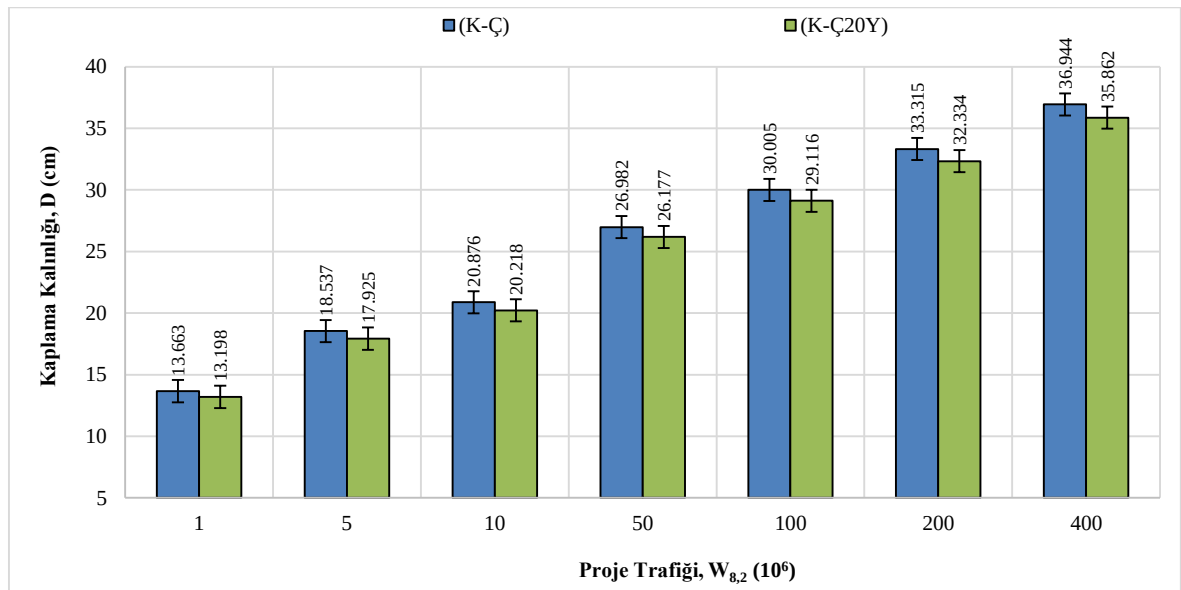
4.2.2.3 Çelik lif (35 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

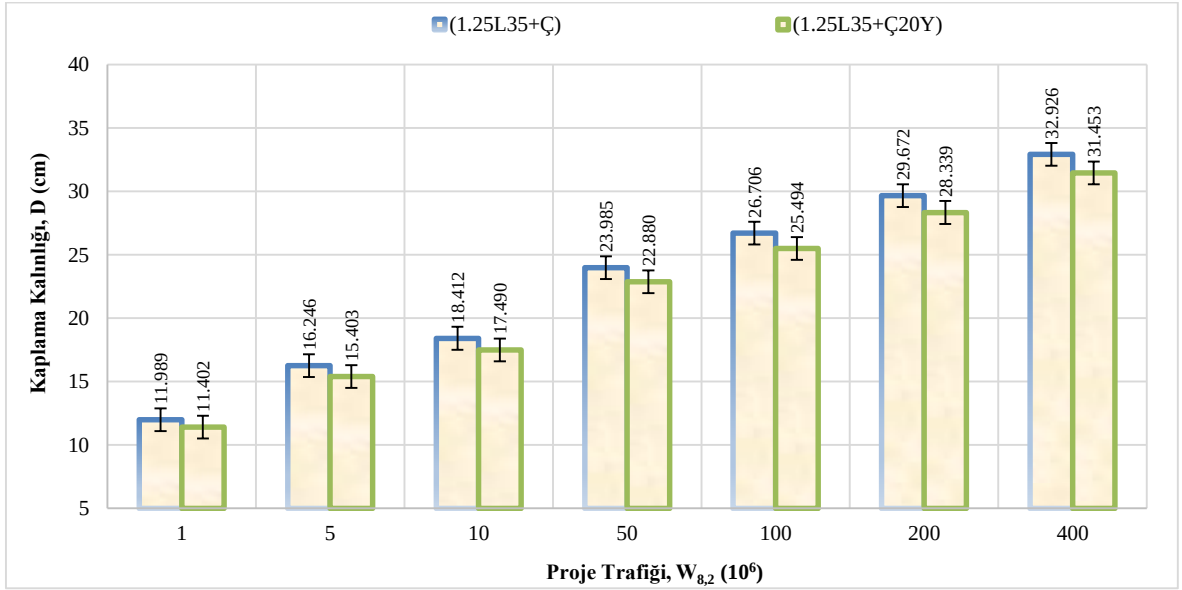
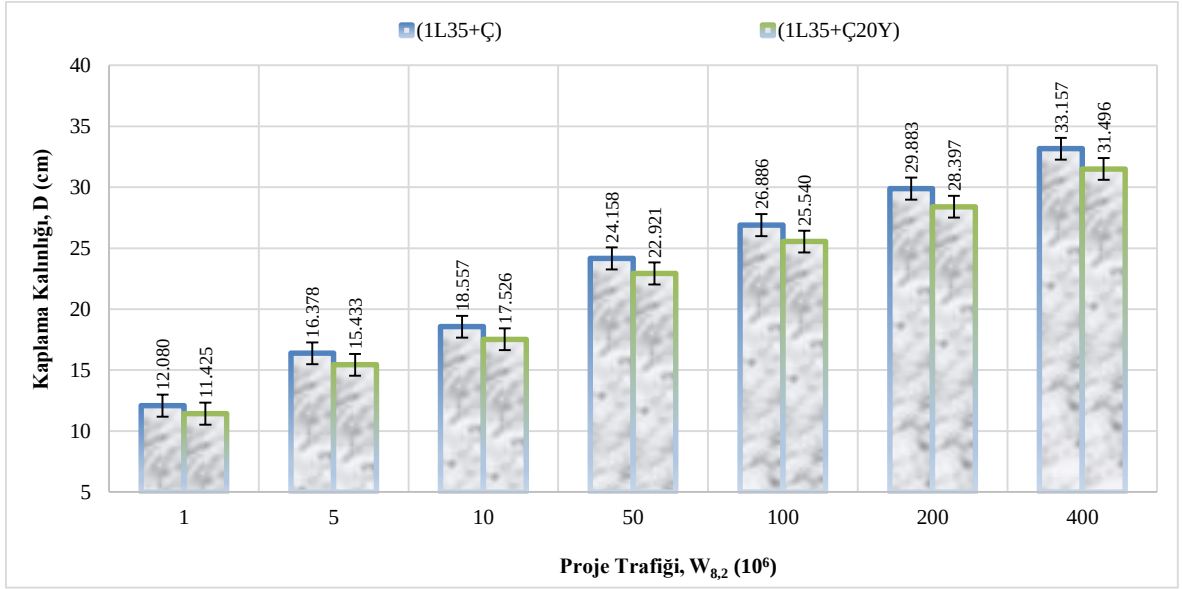
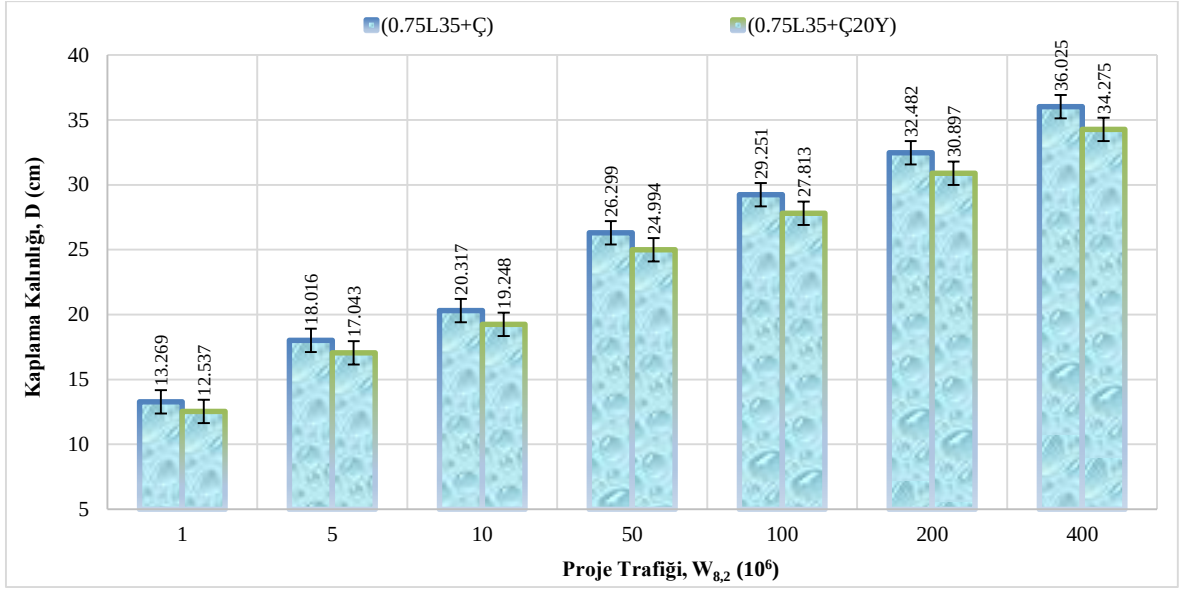
Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkıli numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.27'de verilmiştir.

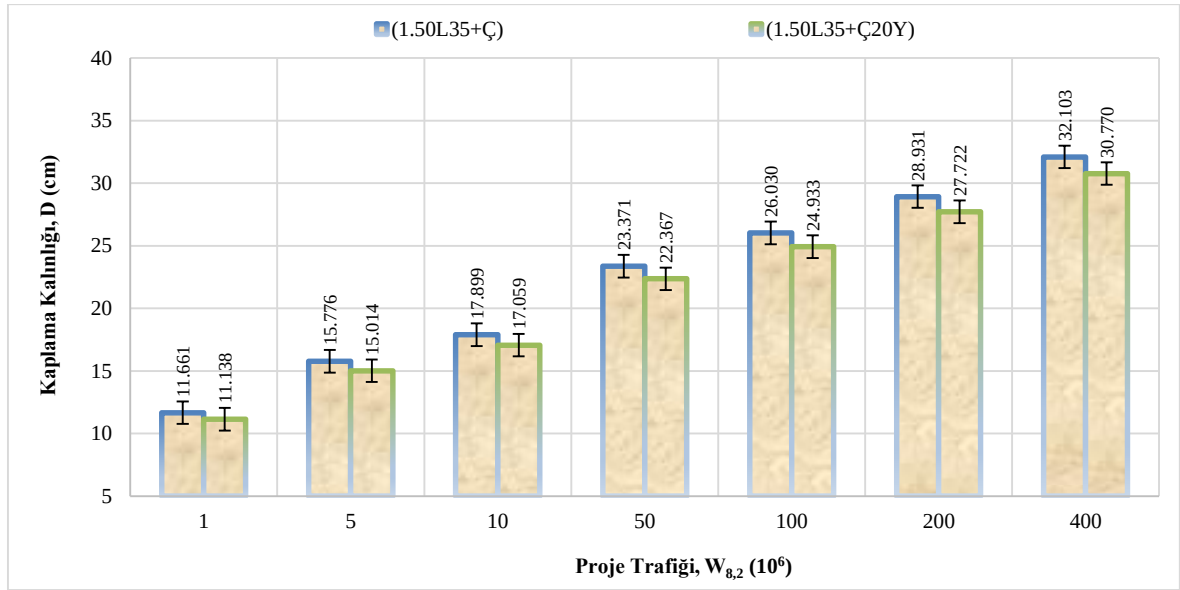
Çizelge 4.27 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(0.75L35+Ç)	55.41	5.28	6.29	912.29	6157938
(0.75L35+Ç20Y)	59.08	5.62	6.98	1012.36	6833451
(1L35+Ç)	57.70	5.51	7.48	1084.88	7322953
(1L35+Ç20Y)	62.15	6.22	8.32	1206.71	8145317
(1.25L35+Ç)	58.92	5.57	7.59	1100.84	7430644
(1.25L35+Ç20Y)	64.88	6.51	8.35	1211.06	8174687
(1.50L35+Ç)	60.57	5.78	8.00	1160.30	7832036
(1.50L35+Ç20Y)	67.01	6.79	8.74	1267.63	8556499

Farklı oranlarda çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.68’te gösterilmiştir.







Şekil 4.68 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.

Şekil 4.68 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L35+Ç) numunesinde, %2.20, %2.17, %2.06, %1.96, %1.95, %1.93 ve 1.92,
- (0.75L35+Ç20Y) numunesinde, %1.72, %1.91, %1.69, %1.58, %1.56, %1.55 ve %1.54,
- (1L35+Ç) numunesinde, %11.58, %11.65, %11.11, %10.47, %10.40, %10.30 ve %10.25,
- (1L35+Ç20Y) numunesinde, %13.43, %13.90, %13.32, %12.44, %12.28, %12.18 ve %12.17,
- (1.25L35+Ç) numunesinde, %12.25, %12.36, %11.80, %11.11, %11.00, %10.93 ve %10.88,
- (1.25L35+Ç20Y) numunesinde, %13.61, %14.07, %13.49, %12.59, %12.44, %12.36 ve %12.30,
- (1.50L35+Ç) numunesinde, %14.65, %14.89, %14.26, %13.39, %13.25, %13.16 ve %13.10,
- (1.50L35+Ç20Y) numunesinde, %15.61, %16.24, %15.63, %14.55, %14.37, %14.27 ve %14.20 olarak hesaplanmıştır.

4.2.3 Taşıma gücü orta sınıf zeminlerde (kum ve killi çakıl) ($k=300$ pci) beton plak kalınlık tasarımı

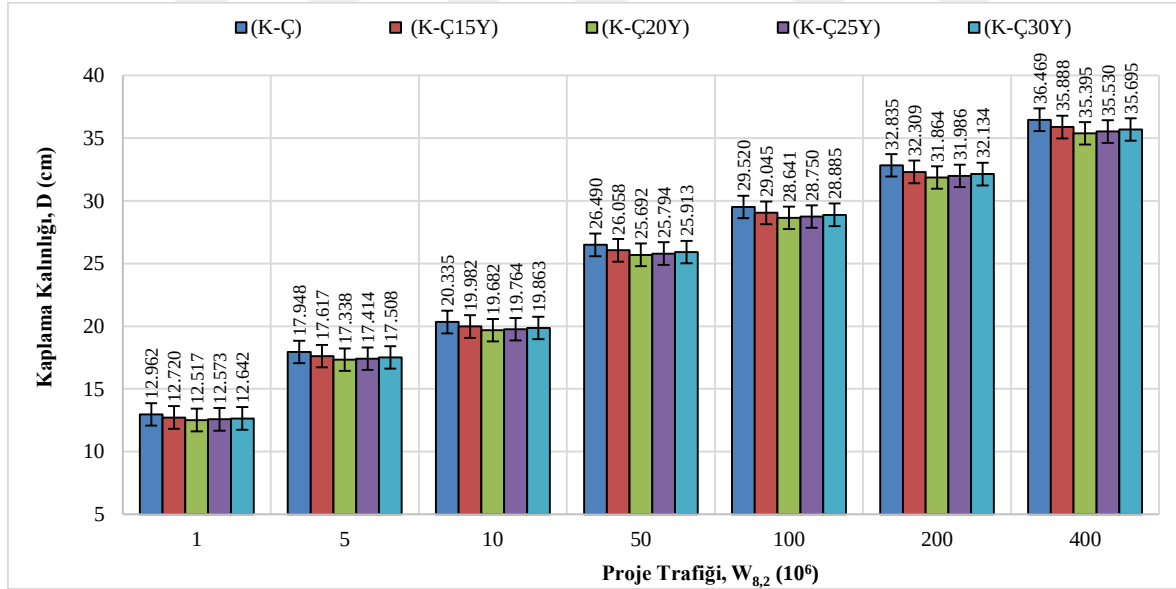
4.2.3.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

Kontrol numunelerinin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.28’de verilmiştir.

Çizelge 4.28 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı, (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı, (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç15Y)	54.15	5.28	6.17	894.88	6040458
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(K-Ç25Y)	52.14	5.38	6.30	913.74	6167728
(K-Ç30Y)	51.30	5.34	6.24	905.04	6108988

Farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.69’da gösterilmiştir.



Şekil 4.69 : Kontrol numunelerine ait $W_{8,2}$ – D değişim grafiği.

Şekil 4.69 incelendiğinde, eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısı arttıkça üstyapı beton kaplama kalınlığının arttığı, YFC oranının artışı ile beton kaplama kalınlığında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

Beton kaplama kalınlığındaki bu azalış 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için YFC içermeyen kontrol numunesine (K-Ç) göre sırasıyla;

- ✓ %15 YFC katkılı numunelerde (K-Ç15Y); %1.86, %1.84, %1.74, %1.63, %1.61, %1.60 ve %1.59,
- ✓ %20 YFC katkılı numunelerde (K-Ç20Y); %3.43, %3.40, %3.21, %3.01, %2.98, %2.96 ve %2.95,
- ✓ %25 YFC katkılı numunelerde (K-Ç25Y); %3.00, %2.97, %2.81, %2.63, %2.61, %2.58 ve %2.58,
- ✓ %30 YFC katkılı numunelerde (K-Ç30Y); %2.47, %2.45, %2.32, %2.18, %2.15, %2.14 ve %2.12 olarak tespit edilmiştir.

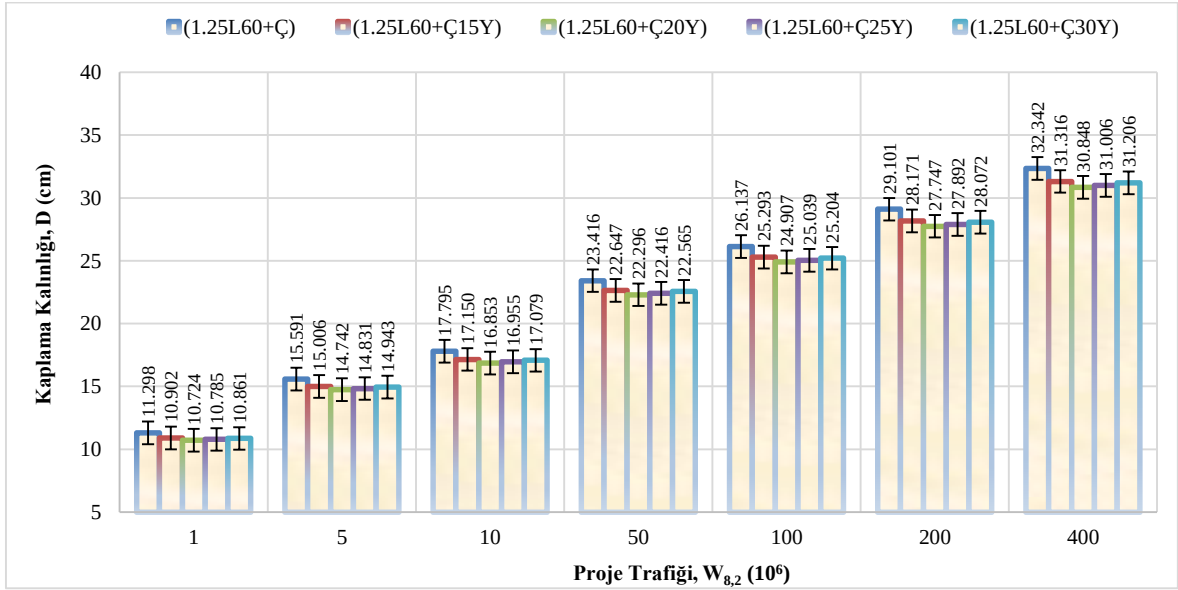
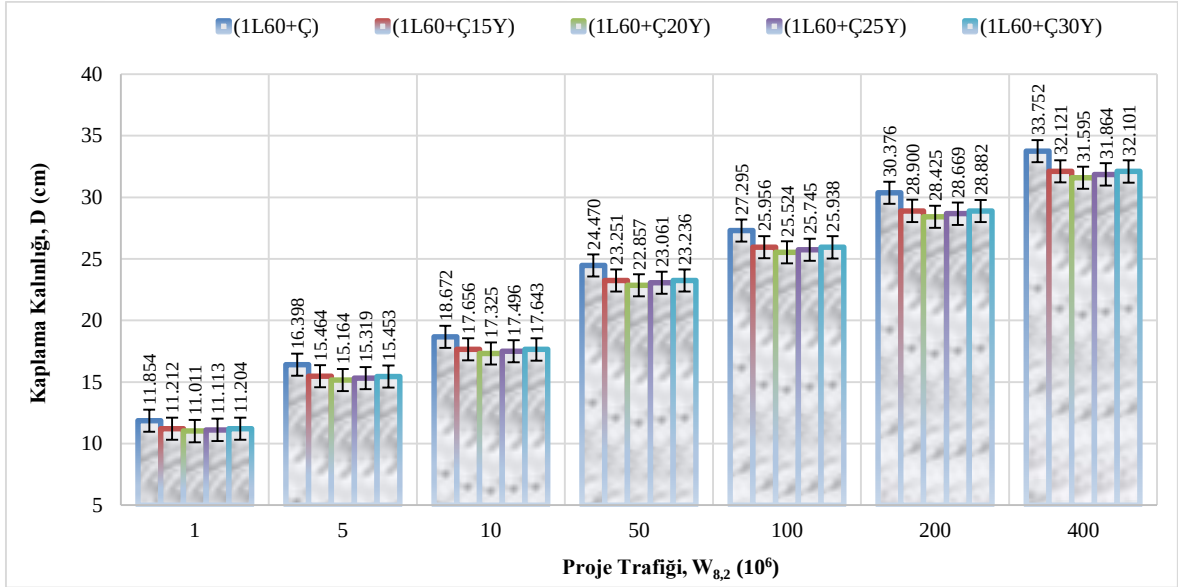
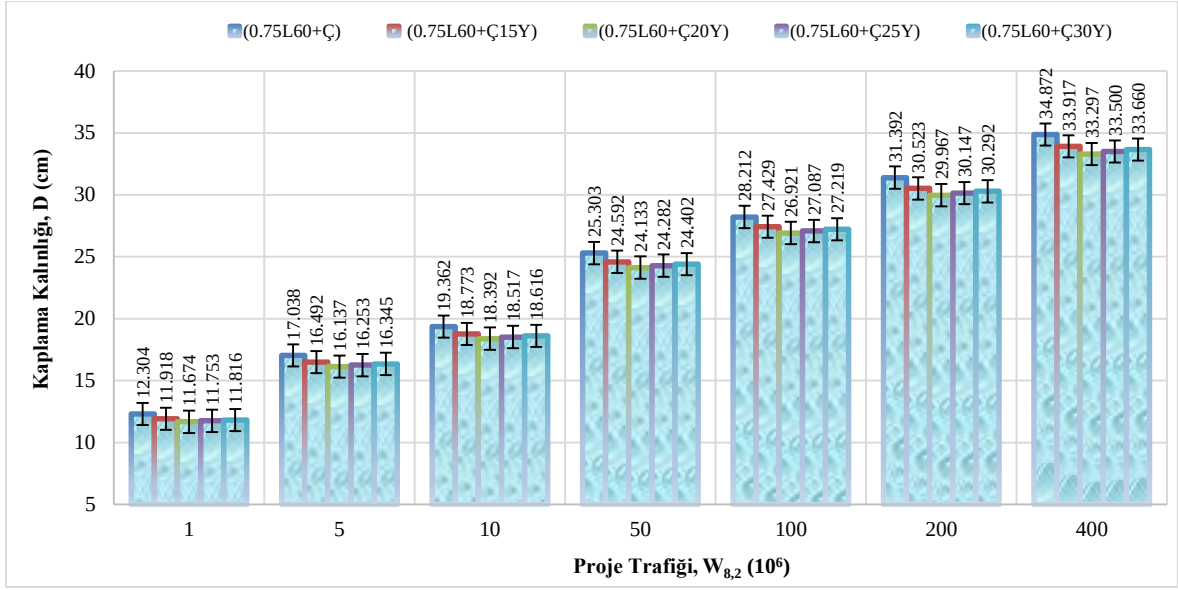
4.2.3.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

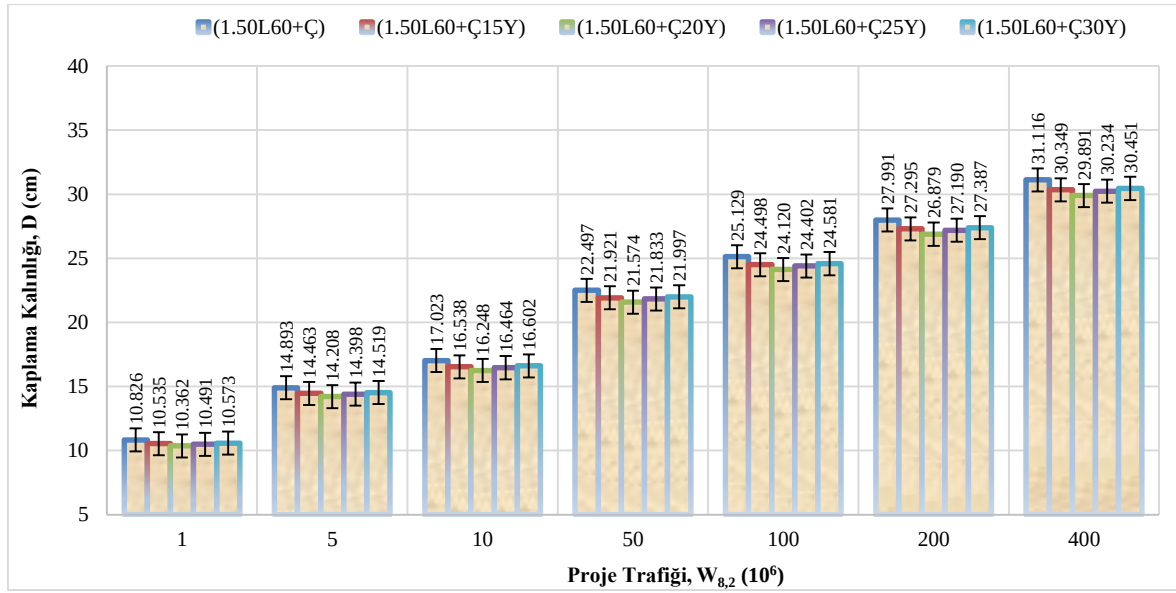
Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.29'da verilmiştir.

Çizelge 4.29 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı, (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı, (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(0.75L60+Ç)	48.22	5.57	6.55	950.00	6412479
(0.75L60+Ç15Y)	52.25	6.03	6.94	1006.56	6794291
(0.75L60+Ç20Y)	52.79	6.23	7.21	1045.72	7058622
(0.75L60+Ç25Y)	51.98	6.05	7.12	1032.67	6970512
(0.75L60+Ç30Y)	51.19	5.96	7.05	1022.52	6901982
(1L60+Ç)	47.19	6.11	7.01	1016.71	6862821
(1L60+Ç15Y)	51.12	6.52	7.77	1126.94	7606865
(1L60+Ç20Y)	51.44	6.75	8.04	1166.10	7871196
(1L60+Ç25Y)	50.92	6.66	7.90	1145.80	7734135
(1L60+Ç30Y)	50.12	6.57	7.78	1128.39	7616655
(1.25L60+Ç)	45.14	6.30	7.66	1110.99	7499174
(1.25L60+Ç15Y)	49.14	6.74	8.19	1187.86	8018047
(1.25L60+Ç20Y)	49.98	6.95	8.45	1225.57	8272588
(1.25L60+Ç25Y)	48.25	6.88	8.36	1212.52	8184477
(1.25L60+Ç30Y)	47.50	6.78	8.25	1196.56	8076787
(1.50L60+Ç)	43.09	6.48	8.30	1203.81	8125737
(1.50L60+Ç15Y)	46.88	6.95	8.74	1267.63	8556499
(1.50L60+Ç20Y)	47.74	7.15	9.02	1308.24	8830620
(1.50L60+Ç25Y)	45.74	7.03	8.81	1277.78	8625029
(1.50L60+Ç30Y)	45.02	6.96	8.68	1258.93	8497759

Farklı oranlarda çelik lif katkılı numunelerin, farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.70'de gösterilmiştir.





Şekil 4.70 : Çelik lifli (60 mm) numunelere ait $W_{8,2} - D$ değişim grafiği.

Şekil 4.70 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunesine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L60+Ç) numunesinde, %5.08, %5.07, %4.78, %4.48, %4.43, %4.39 ve %4.38,
- (0.75L60+Ç15Y) numunesinde, %6.31, %6.39, %6.05, %5.62, %5.56, %5.53 ve %5.49,
- (0.75L60+Ç20Y) numunesinde, %6.74, %6.93, %6.56, %6.07, %6.00, %5.95 ve %5.93,
- (0.75L60+Ç25Y) numunesinde, %6.53, %6.67, %6.31, %5.86, %5.79, %5.75 ve %5.71,
- (0.75L60+Ç30Y) numunesinde, %6.53, %6.64, %6.28, %5.83, %5.77, %5.73 ve %5.70;
- (1L60+Ç) numunesinde, %8.54, %8.63, %8.18, %7.62, %7.54, %7.49 ve %7.45,
- (1L60+Ç15Y) numunesinde, %11.86, %12.23, %11.64, %10.77, %10.63, %10.55 ve %10.50,
- (1L60+Ç20Y) numunesinde, %12.03, %12.54, %11.98, %11.03, %10.88, %10.79 ve %10.74,
- (1L60+Ç25Y) numunesinde, %11.62, %12.03, %11.48, %10.60, %10.45, %10.37 ve %10.32,

- (1L60+Ç30Y) numunesinde, %11.37, %11.74, %11.18, %10.33, %10.20, %10.12 ve %10.07;
- (1.25L60+Ç) numunesinde, %12.84, %13.13, %12.49, %11.60, %11.46, %11.37 ve %11.32,
- (1.25L60+Ç15Y) numunesinde, %14.30, %14.82, %14.17, %13.09, %12.92, %12.81 ve %12.74,
- (1.25L60+Ç20Y) numunesinde, %14.33, %14.97, %14.38, %13.22, %13.04, %12.92 ve %12.85,
- (1.25L60+Ç25Y) numunesinde, %14.22, %14.83, %14.21, %13.10, %12.91, %12.80 ve %12.73,
- (1.25L60+Ç30Y) numunesinde, %14.08, %14.65, %14.02, %12.92, %12.74, %12.64 ve %12.57;
- (1.50L60+Ç) numunesinde, %16.48, %17.02, %16.29, %15.07, %14.87, %14.75 ve %14.68,
- (1.50L60+Ç15Y) numunesinde, %17.18, %17.91, %17.24, %15.88, %15.65, %15.52 ve %15.43,
- (1.50L60+Ç20Y) numunesinde, %17.22, %18.05, %17.45, %16.03, %15.78, %15.64 ve %15.55,
- (1.50L60+Ç25Y) numunesinde, %16.56, %17.32, %16.69, %15.36, %15.12, %15.00 ve %14.91,
- (1.50L60+Ç30Y) numunesinde, %16.36, %17.07, %16.41, %15.11, %14.90, 14.77 ve %14.69 olarak hesaplanmıştır.

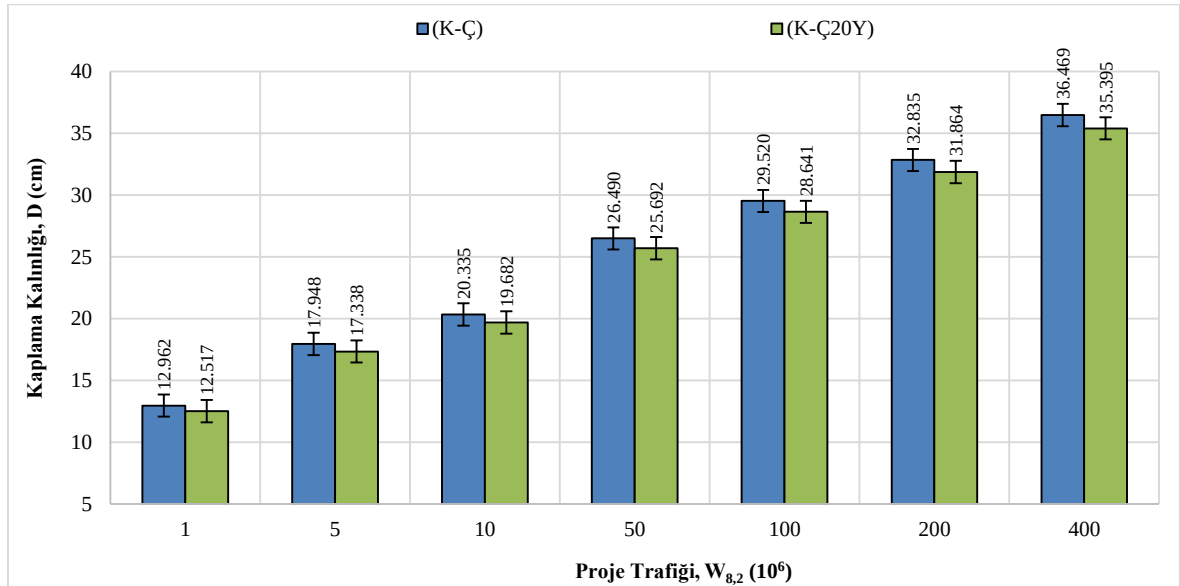
4.2.3.3 Çelik lif (35 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

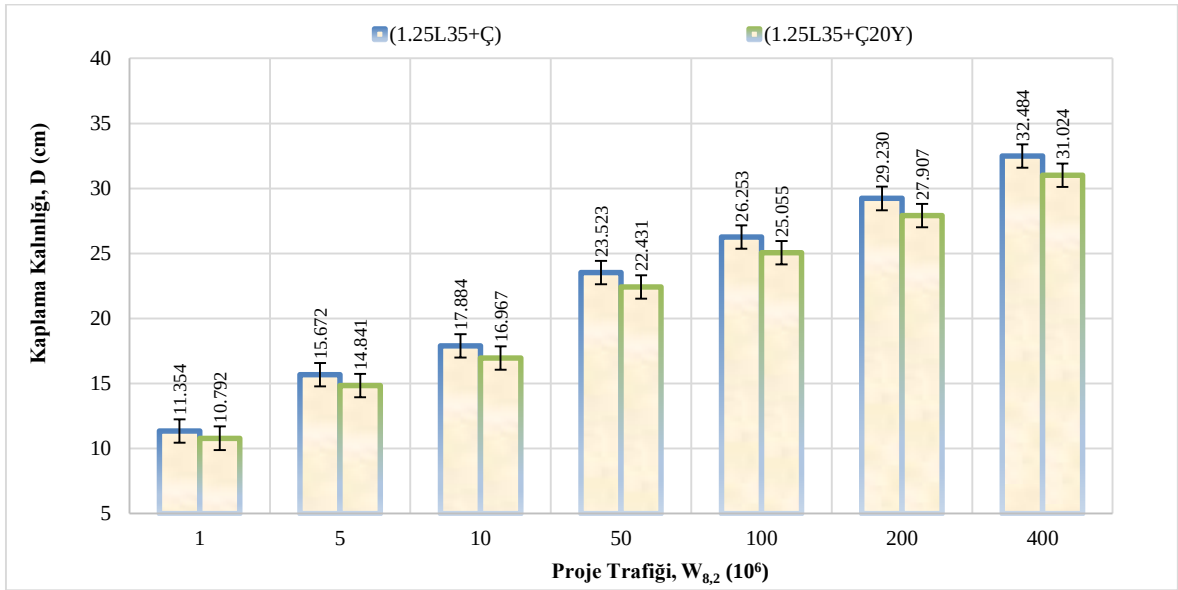
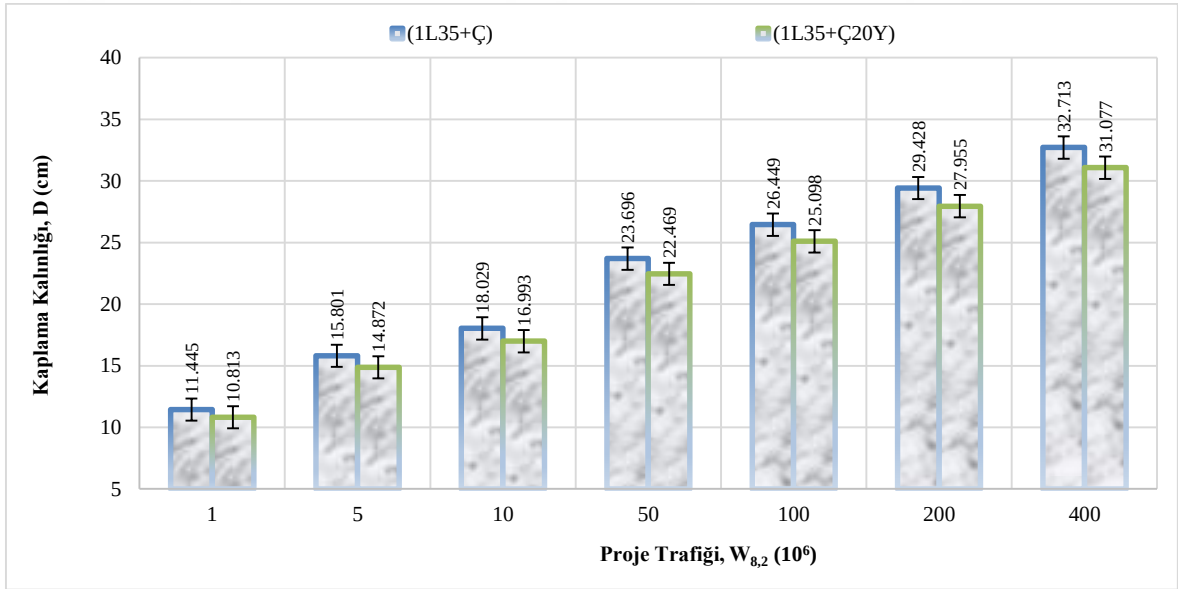
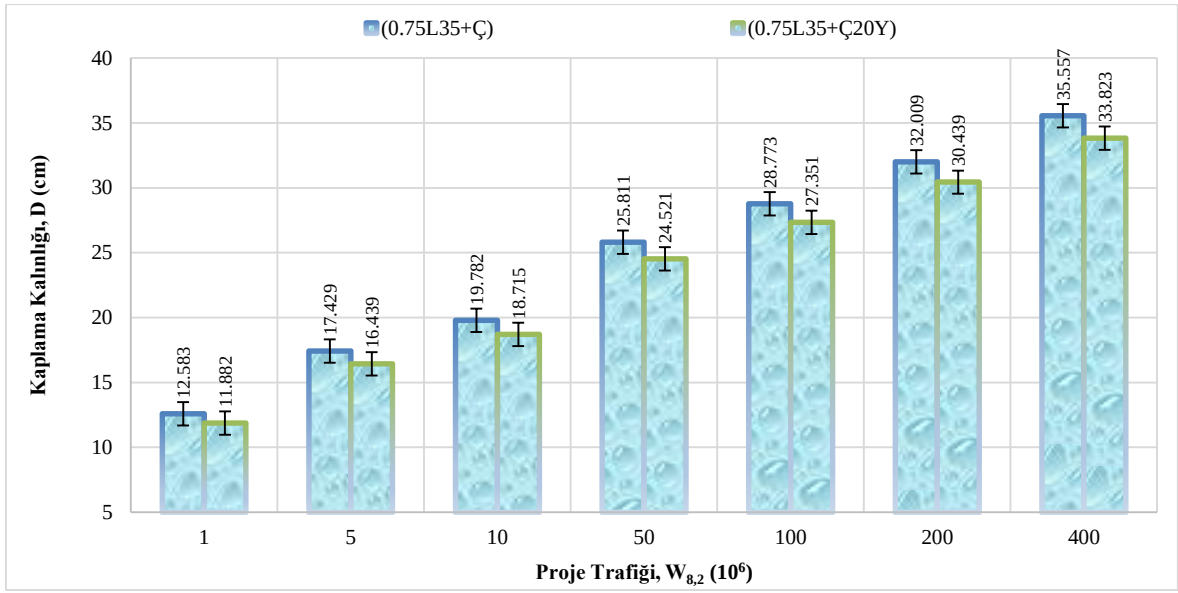
Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkıli numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.30'da verilmiştir.

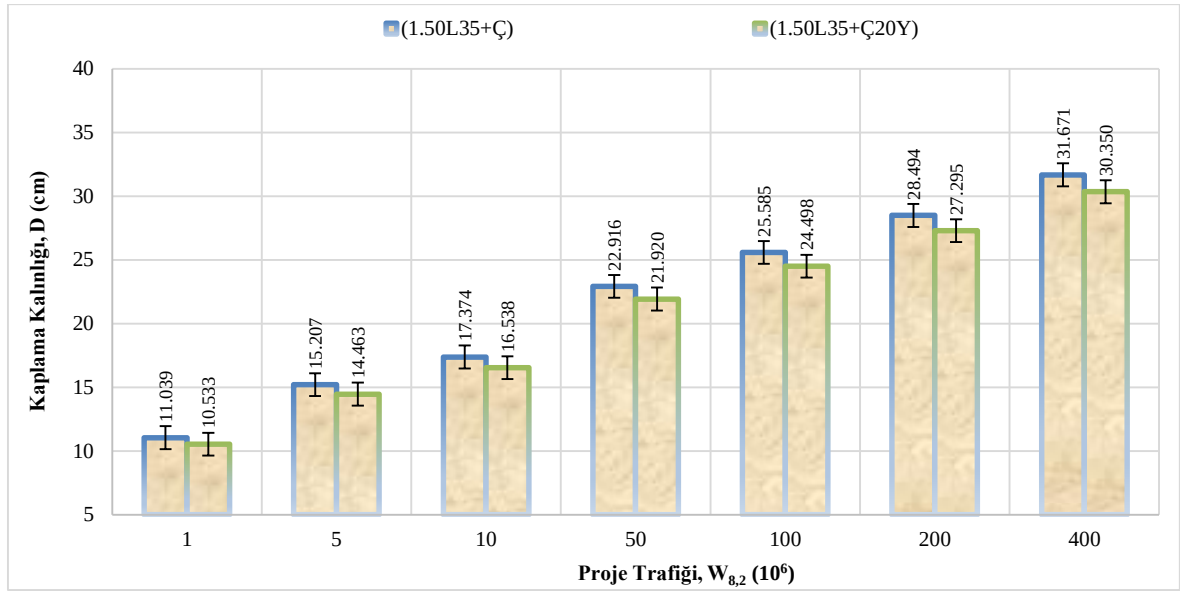
Çizelge 4.30 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(0.75L35+Ç)	55.39	5.28	6.29	912.29	6157938
(0.75L35+Ç20Y)	59.08	5.62	6.98	1012.36	6833451
(1L35+Ç)	57.70	5.51	7.48	1084.88	7322953
(1L35+Ç20Y)	62.15	6.22	8.32	1206.71	8145317
(1.25L35+Ç)	58.92	5.57	7.59	1100.84	7430644
(1.25L35+Ç20Y)	64.88	6.51	8.35	1211.06	8174687
(1.50L35+Ç)	60.57	5.78	8.00	1160.30	7832036
(1.50L35+Ç20Y)	67.01	6.79	8.74	1267.63	8556499

Farklı oranlarda çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.71’de gösterilmiştir.







Şekil 4.71 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.

Şekil 4.71 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L35+Ç) numunesinde, %2.92, %2.89, %2.72, %2.56, %2.53, %2.51 ve 2.50,
- (0.75L35+Ç20Y) numunesinde, %5.07, %5.19, %4.92, %4.56, %4.51, %4.47 ve %4.44,
- (1L35+Ç) numunesinde, %11.70, %11.96, %11.34, %10.55, %10.40, %10.37 ve %10.30,
- (1L35+Ç20Y) numunesinde, %13.62, %14.23, %13.67, %12.55, %12.37, %12.27 ve %12.20,
- (1.25L35+Ç) numunesinde, %12.40, %12.68, %12.05, %11.20, %11.07, %10.98 ve %10.93,
- (1.25L35+Ç20Y) numunesinde, %13.78, %14.40, %13.80, %12.69, %12.52, %12.42 ve %12.35,
- (1.50L35+Ç) numunesinde, %14.83, %15.27, %14.56, %13.49, %13.33, %13.22 ve %13.16,
- (1.50L35+Ç20Y) numunesinde, %15.85, %16.58, %15.98, %14.68, %14.46, %14.34 ve %14.25 olarak hesaplanmıştır.

4.2.4 Taşıma gücü iyi sınıf zeminlerde (çakıl) beton plak kalınlık tasarımı

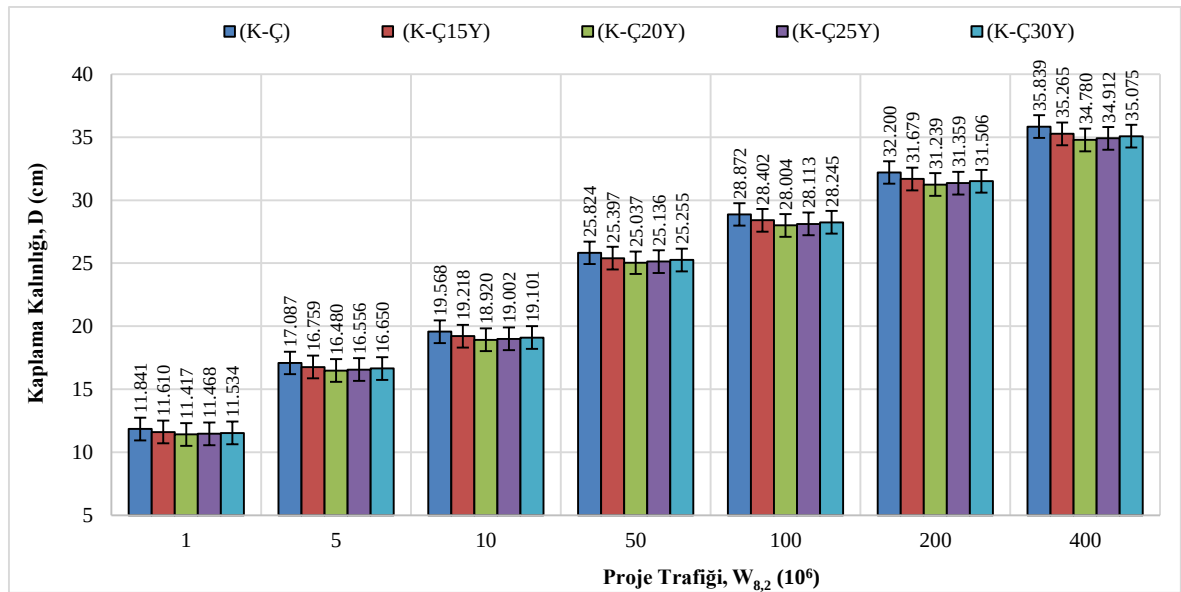
4.2.4.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

Kontrol numunelerinin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.31’de verilmiştir.

Çizelge 4.31 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç15Y)	54.15	5.28	6.17	894.88	6040458
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(K-Ç25Y)	52.14	5.38	6.30	913.74	6167728
(K-Ç30Y)	51.30	5.34	6.24	905.04	6108988

Farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.72’de gösterilmiştir.



Şekil 4.72 : Kontrol numunelerine ait $W_{8.2}$ – D değişimi.

Şekil 4.72 incelendiğinde, eşdeğer dingil yükü tekrür sayısı arttıkça üstyapı beton kaplama kalınlığının arttığı, YFC oranının artışı ile beton kaplama kalınlığında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

Beton kaplama kalınlığındaki bu azalış 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için YFC içermeyen kontrol numunesine (K-Ç) göre sırasıyla;

- ✓ %15 YFC katkılı numunelerde (K-Ç15Y); %1.95, %1.92, %1.79, %1.65, %1.63, %1.62 ve %1.60,
- ✓ %20 YFC katkılı numunelerde (K-Ç20Y); %3.58, %3.55, %3.31, 3.05, %3.01, %2.98 ve %2.96,
- ✓ %25 YFC katkılı numunelerde (K-Ç25Y); %3.15, %3.11, %2.89, %2.67, %2.63, %2.61 ve %2.59,
- ✓ %30 YFC katkılı numunelerde (K-Ç30Y); %2.60, %2.56, %2.39, %2.20, %2.17, %2.15 ve %2.13 olarak tespit edilmiştir.

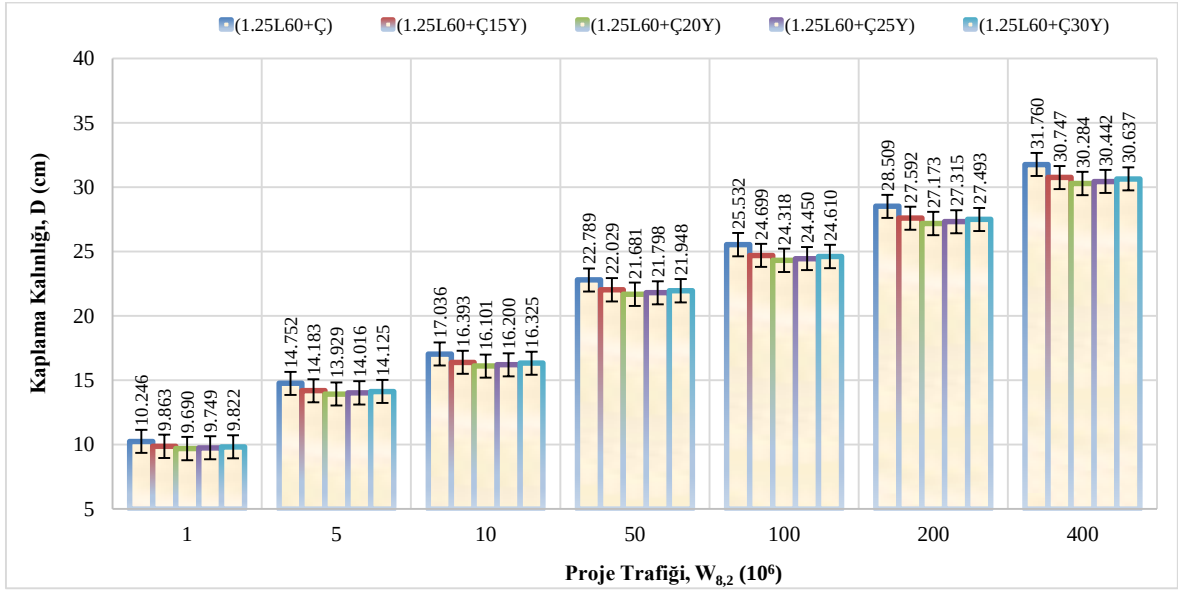
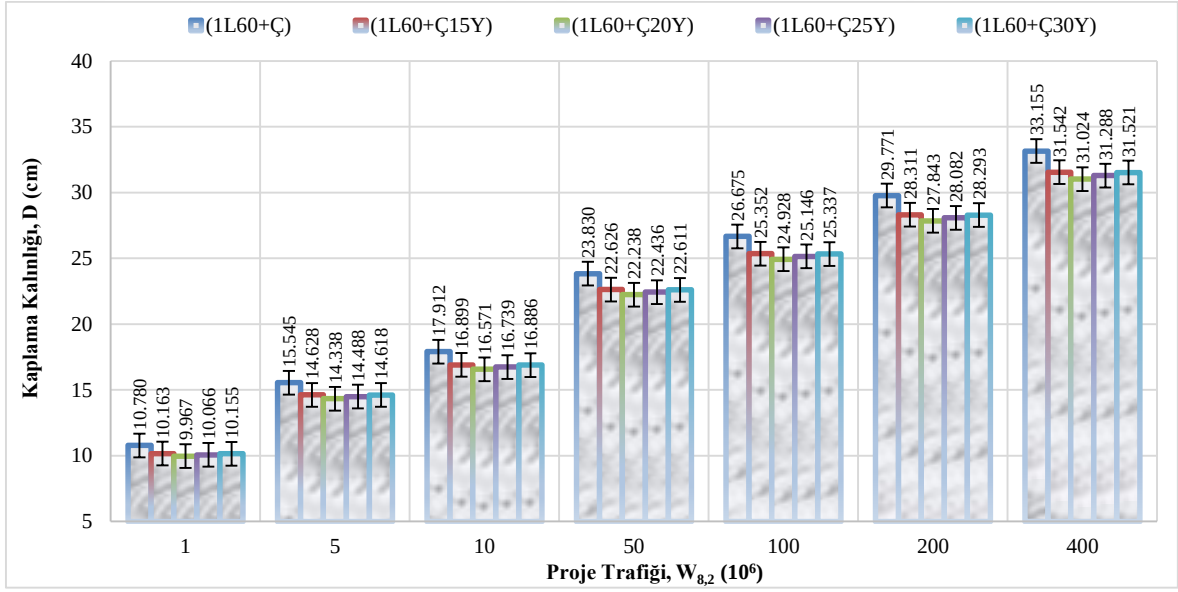
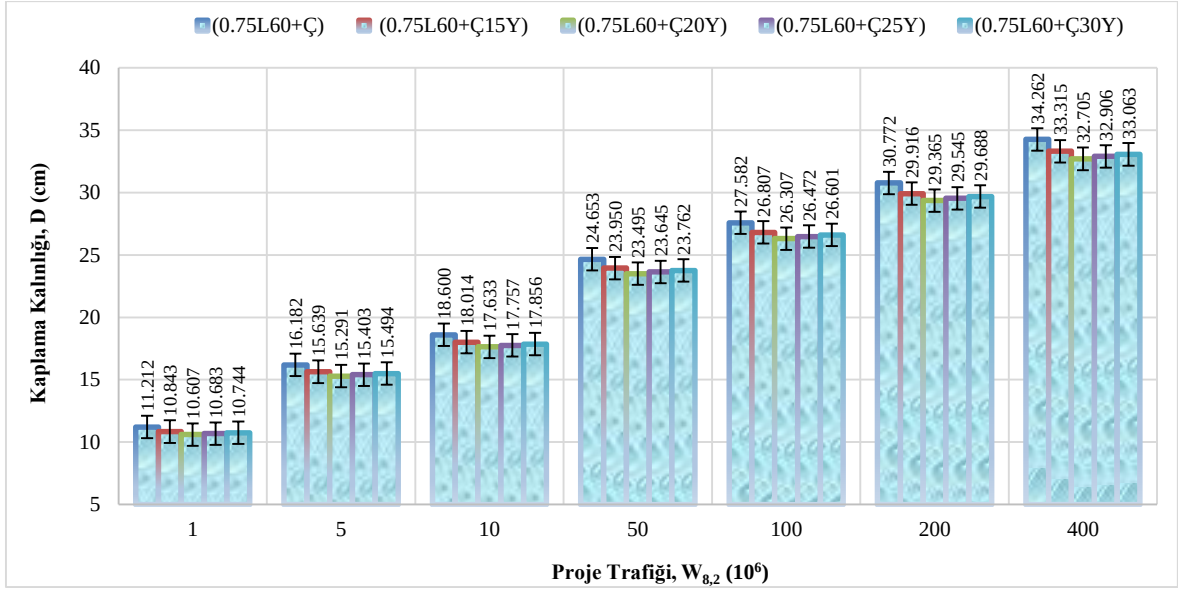
4.2.4.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

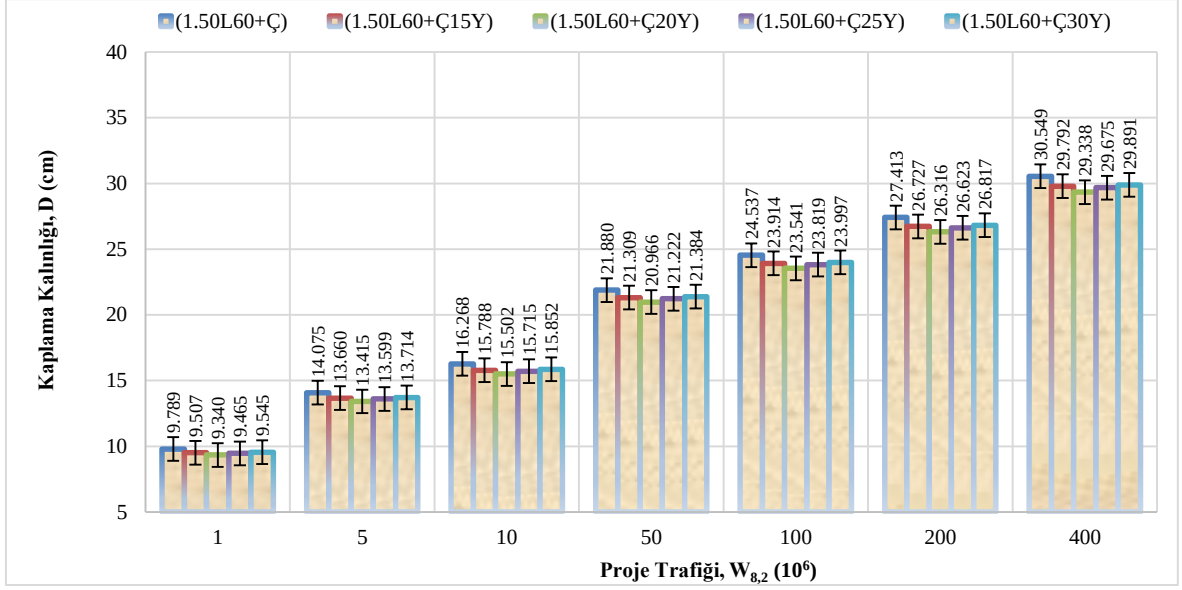
Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.32'de verilmiştir.

Çizelge 4.32 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(0.75L60+Ç)	48.22	5.57	6.55	950.00	6412479
(0.75L60+Ç15Y)	52.25	6.03	6.94	1006.56	6794291
(0.75L60+Ç20Y)	52.79	6.23	7.21	1045.72	7058622
(0.75L60+Ç25Y)	51.98	6.05	7.12	1032.67	6970512
(0.75L60+Ç30Y)	51.19	5.96	7.05	1022.52	6901982
(1L60+Ç)	47.19	6.11	7.01	1016.71	6862821
(1L60+Ç15Y)	51.12	6.52	7.77	1126.94	7606865
(1L60+Ç20Y)	51.44	6.75	8.04	1166.10	7871196
(1L60+Ç25Y)	50.92	6.66	7.90	1145.80	7734135
(1L60+Ç30Y)	50.12	6.57	7.78	1128.39	7616655
(1.25L60+Ç)	45.14	6.30	7.66	1110.99	7499174
(1.25L60+Ç15Y)	49.14	6.74	8.19	1187.86	8018047
(1.25L60+Ç20Y)	49.98	6.95	8.45	1225.57	8272588
(1.25L60+Ç25Y)	48.25	6.88	8.36	1212.52	8184477
(1.25L60+Ç30Y)	47.50	6.78	8.25	1196.56	8076787
(1.50L60+Ç)	43.09	6.48	8.30	1203.81	8125737
(1.50L60+Ç15Y)	46.88	6.95	8.74	1267.63	8556499
(1.50L60+Ç20Y)	47.74	7.15	9.02	1308.24	8830620
(1.50L60+Ç25Y)	45.74	7.03	8.81	1277.78	8625029
(1.50L60+Ç30Y)	45.02	6.96	8.68	1258.93	8497759

Farklı oranlarda çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.73’de gösterilmiştir.





Şekil 4.73 : Çelik lifli (60 mm) numunelere ait $W_{8,2} - D$ değişimi.

Şekil 4.73 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunesine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L60+Ç) numunesinde, %5.32, %5.29, %4.95, %4.53, %4.47, %4.43 ve %4.40,
- (0.75L60+Ç15Y) numunesinde, %6.61, %6.68, %6.26, %5.70, %5.62, %5.56 ve %5.53,
- (0.75L60+Ç20Y) numunesinde, %7.10, %7.21, %6.81, %6.16, %6.06, %6.00 ve %5.97,
- (0.75L60+Ç25Y) numunesinde, %6.84, %6.97, %6.55, %5.93, %5.84, %5.78 ve %5.75,
- (0.75L60+Ç30Y) numunesinde, %6.85, %6.94, %6.52, %5.91, %5.82, %5.77 ve %5.74;
- (1L60+Ç) numunesinde, %8.97, %9.02, %8.46, %7.72, %7.61, %7.54 ve %7.49,
- (1L60+Ç15Y) numunesinde, %12.47, %12.72, %12.07, %10.91, %10.74, %10.63 ve %10.56,
- (1L60+Ç20Y) numunesinde, %12.70, %12.99, %12.42, %11.18, %10.98, %10.87 ve %10.80,
- (1L60+Ç25Y) numunesinde, %12.23, %12.49, %11.91, %10.74, %10.55, %10.45 ve %10.38,

- (1L60+Ç30Y) numunesinde, %11.96, %12.20, %11.60, %10.47, %10.30, %10.20 ve %10.13;
- (1.25L60+Ç) numunesinde, %13.47, %13.66, %12.94, %11.75, %11.57, %11.46 ve %11.38,
- (1.25L60+Ç15Y) numunesinde, %15.05, %15.37, %14.70, %13.26, %13.04, %12.90 ve %12.81,
- (1.25L60+Ç20Y) numunesinde, %15.13, %15.47, %14.90, %13.40, %13.16, %13.02 ve %12.93,
- (1.25L60+Ç25Y) numunesinde, %14.99, %15.34, %14.74, %13.28, %13.03, %12.89 ve %12.80,
- (1.25L60+Ç30Y) numunesinde, %14.84, %15.16, %14.53, %13.09, %12.87, 12.74 ve %12.65;
- (1.50L60+Ç) numunesinde, %17.33, %17.62, %16.86, %15.27, %15.02, %14.87 ve %14.76,
- (1.50L60+Ç15Y) numunesinde, %18.11, %18.49, %17.84, %16.10, %15.80, %15.63 ve %15.52,
- (1.50L60+Ç20Y) numunesinde, %18.19, %18.60, %18.07, %16.26, %15.94, %15.76 ve %15.65,
- (1.50L60+Ç25Y) numunesinde, %17.47, %17.86, %17.29, %15.57, %15.27, %15.10 ve %15.00,
- (1.50L60+Ç30Y) numunesinde, %17.25, %17.63, %17.01, %15.33, %15.04, 14.88 ve %14.78 olarak hesaplanmıştır.

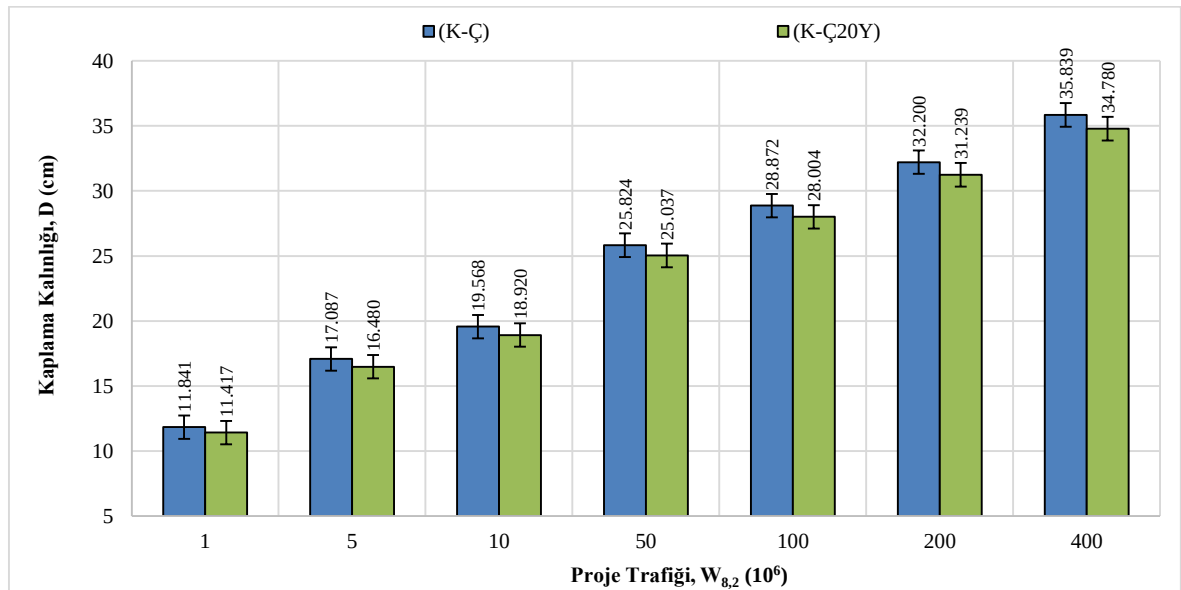
4.2.4.3 Çelik lif (35 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

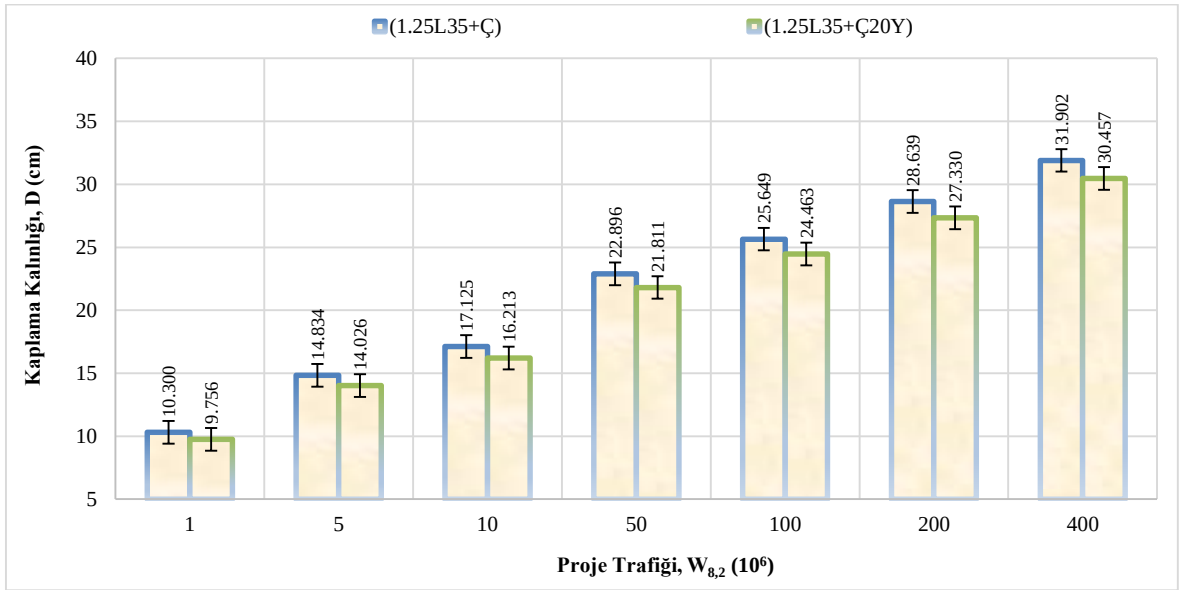
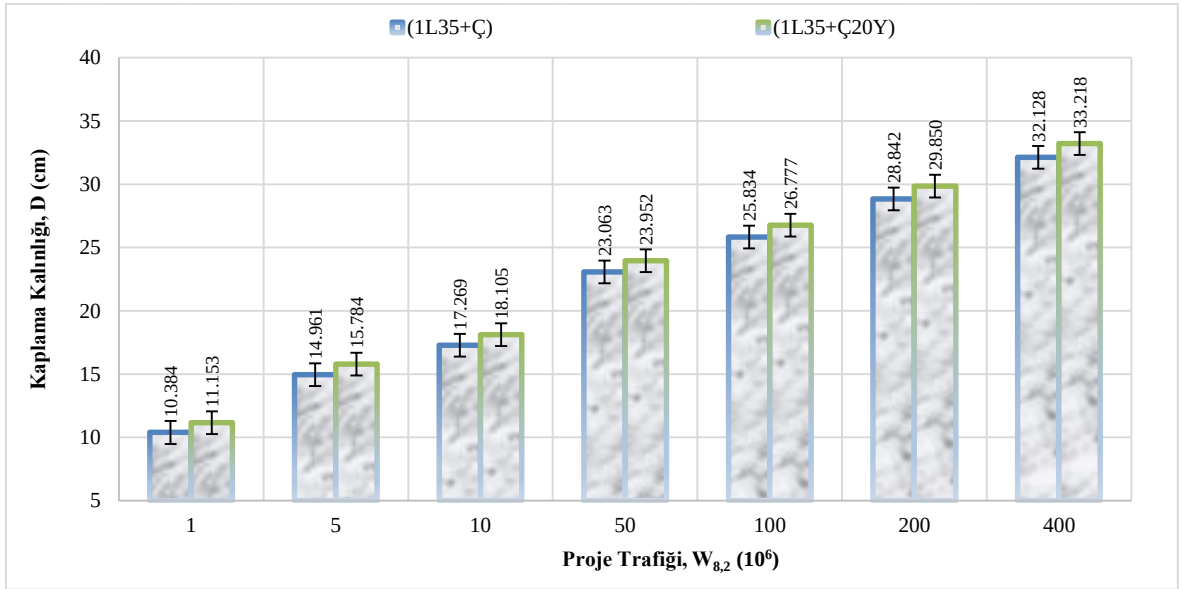
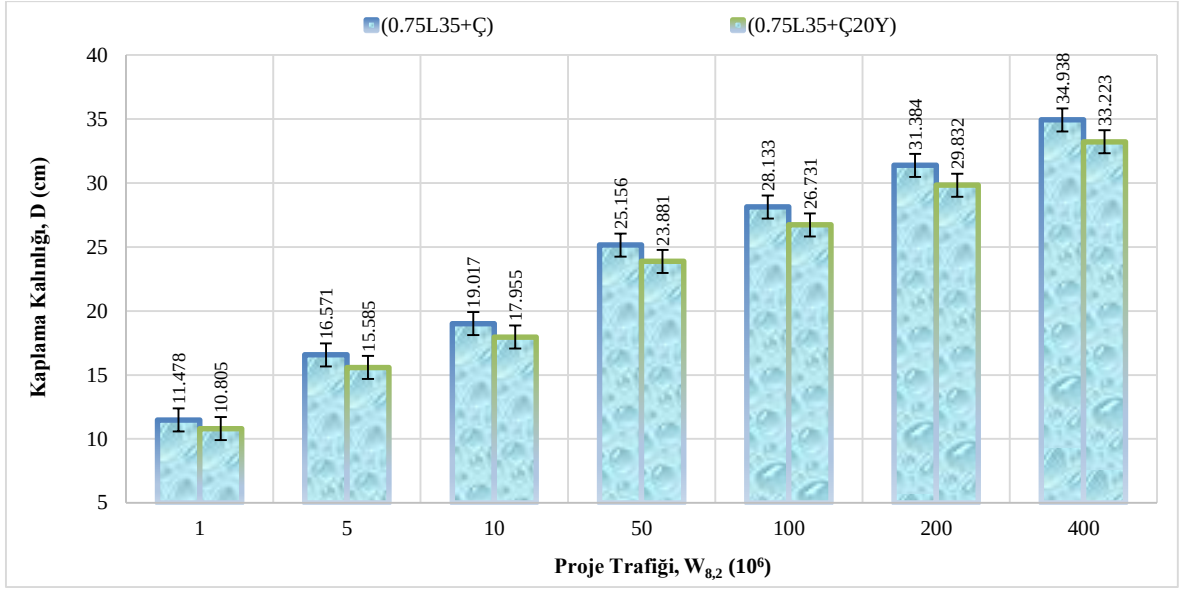
Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkıli numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.33'de verilmiştir.

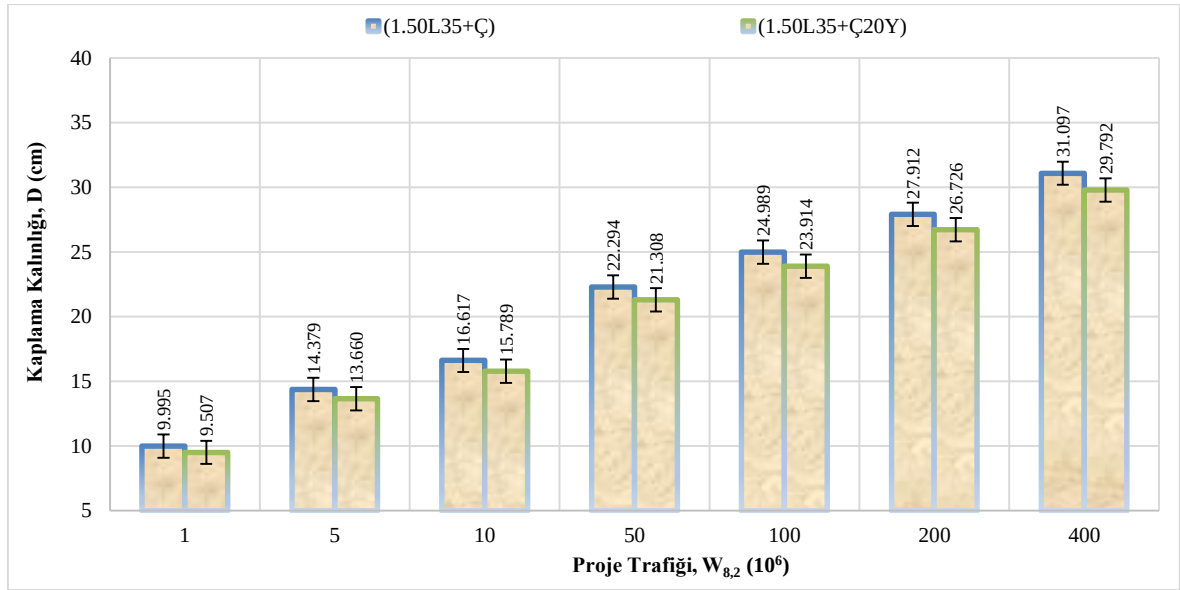
Çizelge 4.33 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(0.75L35+Ç)	55.39	5.28	6.29	912.29	6157938
(0.75L35+Ç20Y)	59.08	5.62	6.98	1012.36	6833451
(1L35+Ç)	57.70	5.51	7.48	1084.88	7322953
(1L35+Ç20Y)	62.15	6.22	8.32	1206.71	8145317
(1.25L35+Ç)	58.92	5.57	7.59	1100.84	7430644
(1.25L35+Ç20Y)	64.88	6.51	8.35	1.211.06	8174687
(1.50L35+Ç)	60.57	5.78	8.00	1160.30	7832036
(1.50L35+Ç20Y)	67.01	6.79	8.74	1267.63	8556499

Farklı oranlarda çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin farklı proje trafikleri için) kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.74’de gösterilmiştir.







Şekil 4.74 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.

Şekil 4.74 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L35+Ç) numunesinde, %3.07, %3.02, %2.82, %2.59, %2.56, %2.53 ve 2.52,
- (0.75L35+Ç20Y) numunesinde, %5.36, %5.43, %5.10, %4.62, %4.54, %4.50 ve %4.48,
- (1L35+Ç) numunesinde, %12.31, %12.44, %11.75, %10.69, %10.52, %10.43 ve %10.35,
- (1L35+Ç20Y) numunesinde, %14.39, %14.72, %14.14, %12.72, %12.49, %12.36 ve %12.27,
- (1.25L35+Ç) numunesinde, %13.02, %13.19, %12.49, %11.34, %11.16, %11.06 ve %10.99,
- (1.25L35+Ç20Y) numunesinde, %14.55, %14.89, %14.31, %12.88, %12.64, %12.51 ve %12.43,
- (1.50L35+Ç) numunesinde, %15.59, %15.85, %15.08, %13.67, %13.45, %13.32 ve %13.23,
- (1.50L35+Ç20Y) numunesinde, %16.73, %17.11, %16.55, %14.89, %14.60, %14.45 ve %14.34 olarak hesaplanmıştır.

4.2.5 Taşıma gücü çok iyi sınıf zeminlerde (kırmataş) beton plak kalınlık tasarımı

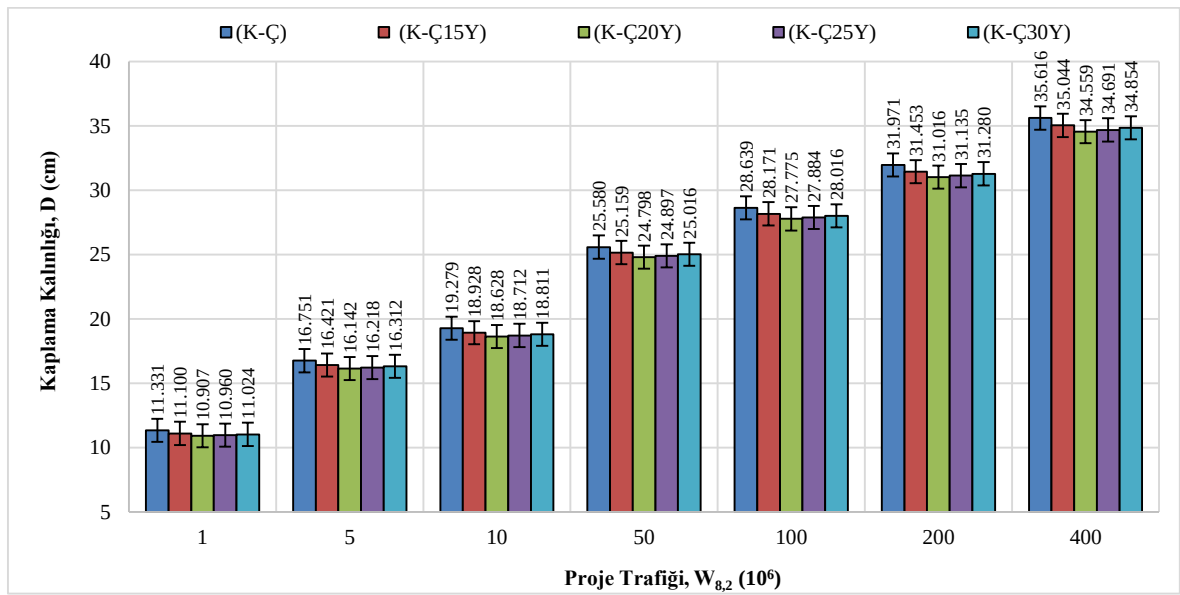
4.2.5.1 Kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

Kontrol numunelerinin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.34'de verilmiştir.

Çizelge 4.34 : Kontrol numunelerine ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç15Y)	54.15	5.28	6.17	894.88	6040458
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(K-Ç25Y)	52.14	5.38	6.30	913.74	6167728
(K-Ç30Y)	51.30	5.34	6.24	905.04	6108988

Farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.75'de gösterilmiştir.



Şekil 4.75 : Kontrol numunelerine ait $W_{8,2}$ – D değişimi.

Şekil 4.75 incelendiğinde, eşdeğer dingil yükü tekrür sayısı arttıkça üstyapı beton kaplama kalınlığının arttığı, YFC oranının artışı ile beton kaplama kalınlığında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

✓ Beton kaplama kalınlığındaki bu azalış 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için YFC içermeyen kontrol numunesine (K-Ç) göre sırasıyla;

- %15 YFC katkılı numunelerde (K-Ç15Y); %2.04, %1.97, %1.82, %1.65, %1.63, %1.62 ve %1.60,
- %20 YFC katkılı numunelerde (K-Ç20Y); %3.74, %3.64, %3.37, 3.06, %3.02, %2.99 ve %2.97,
- %25 YFC katkılı numunelerde (K-Ç25Y); %3.27, %3.18, %2.94, %2.67, %2.63, %2.61 ve %2.60,
- %30 YFC katkılı numunelerde (K-Ç30Y); %2.71, %2.62, %2.42, %2.20, %2.17, %2.16 ve %2.14 olarak tespit edilmiştir.

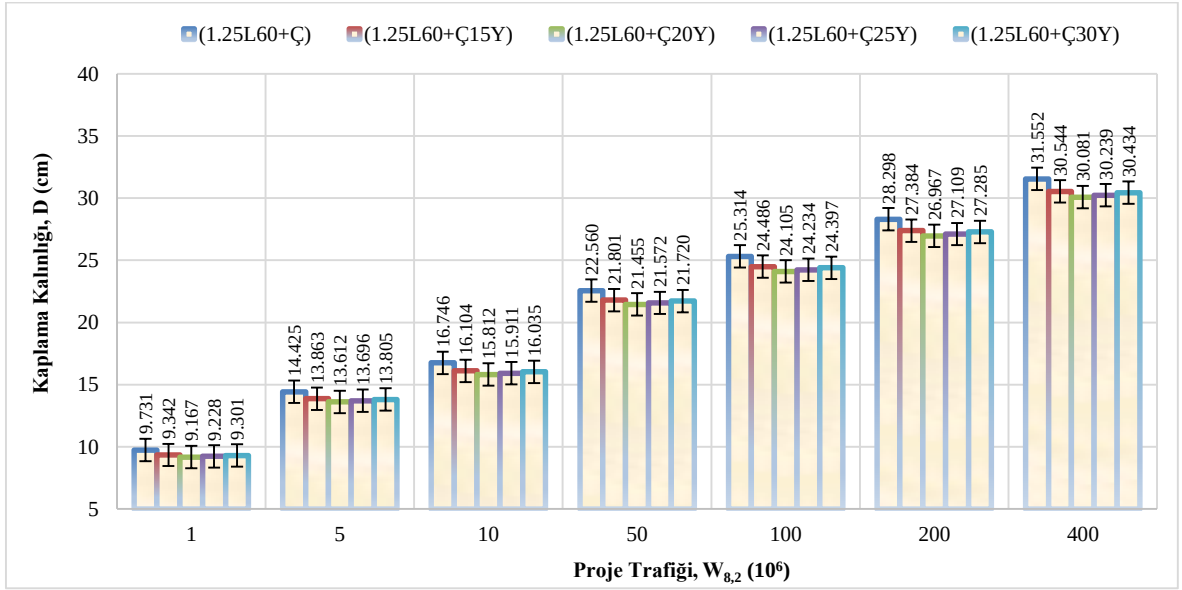
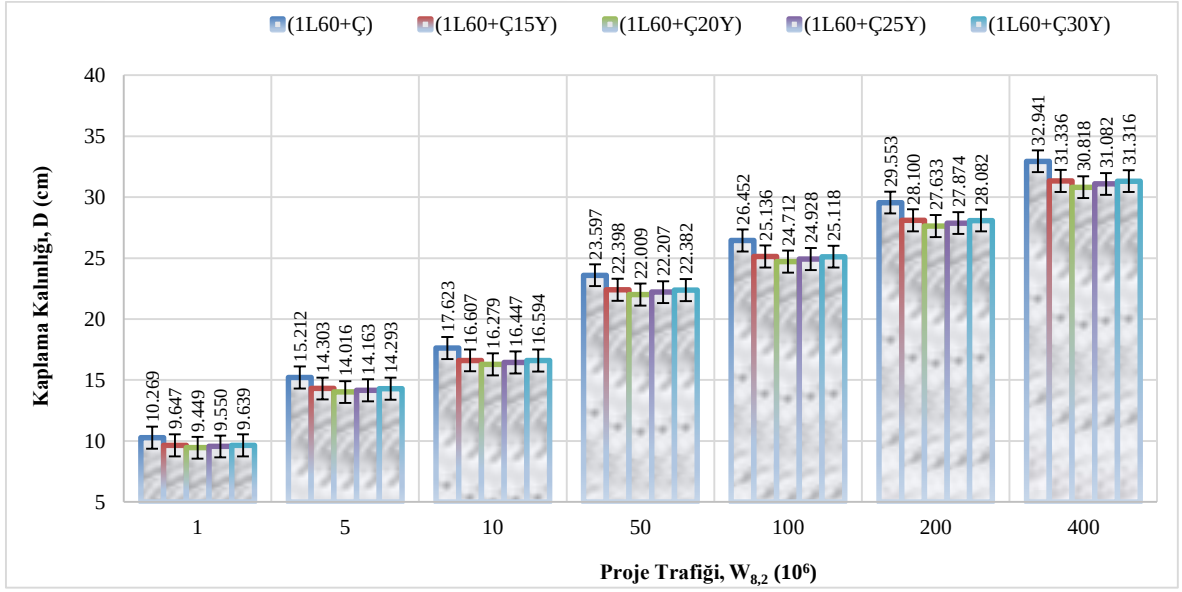
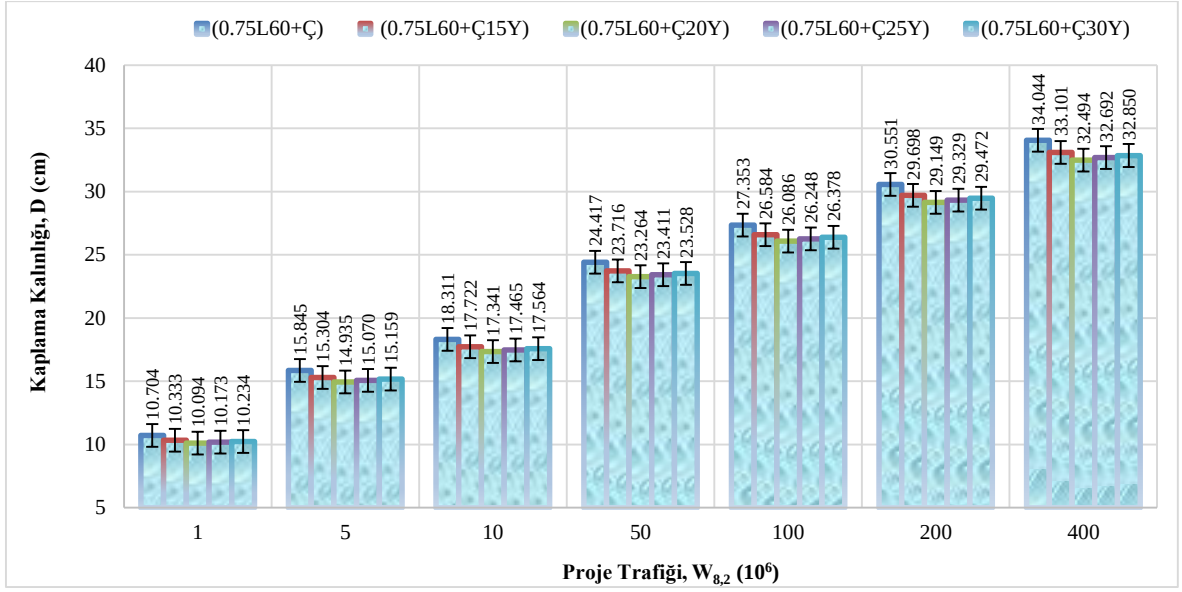
4.2.5.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

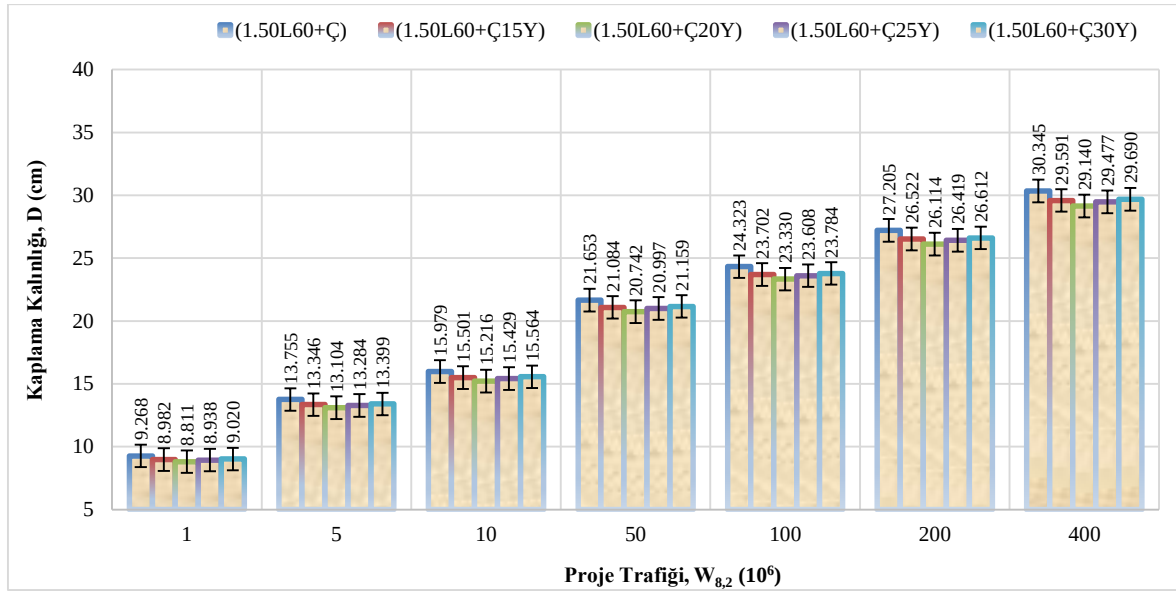
Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.35'de verilmiştir.

Çizelge 4.35 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(0.75L60+Ç)	48.22	5.57	6.55	950.00	6412479
(0.75L60+Ç15Y)	52.25	6.03	6.94	1006.56	6794291
(0.75L60+Ç20Y)	52.79	6.23	7.21	1045.72	7058622
(0.75L60+Ç25Y)	51.98	6.05	7.12	1032.67	6970512
(0.75L60+Ç30Y)	51.19	5.96	7.05	1022.52	6901982
(1L60+Ç)	47.19	6.11	7.01	1016.71	6862821
(1L60+Ç15Y)	51.12	6.52	7.77	1126.94	7606865
(1L60+Ç20Y)	51.44	6.75	8.04	1166.10	7871196
(1L60+Ç25Y)	50.92	6.66	7.90	1145.80	7734135
(1L60+Ç30Y)	50.12	6.57	7.78	1128.39	7616655
(1.25L60+Ç)	45.14	6.30	7.66	1110.99	7499174
(1.25L60+Ç15Y)	49.14	6.74	8.19	1187.86	8018047
(1.25L60+Ç20Y)	49.98	6.95	8.45	1225.57	8272588
(1.25L60+Ç25Y)	48.25	6.88	8.36	1212.52	8184477
(1.25L60+Ç30Y)	47.50	6.78	8.25	1196.56	8076787
(1.50L60+Ç)	43.09	6.48	8.30	1203.81	8125737
(1.50L60+Ç15Y)	46.88	6.95	8.74	1267.63	8556499
(1.50L60+Ç20Y)	47.74	7.15	9.02	1308.24	8830620
(1.50L60+Ç25Y)	45.74	7.03	8.81	1277.78	8625029
(1.50L60+Ç30Y)	45.02	6.96	8.68	1258.93	8497759

Farklı oranlarda çelik lif katkılı numunelerin farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.76’da gösterilmiştir.





Şekil 4.76 : Çelik lif (60 mm) katkılı numenelere ait $W_{8,2}$ – D değışimi.

Şekil 4.76 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunesine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L60+Ç) numunesinde, %5.54, %5.41, %5.02, %4.55, %4.49, %4.44 ve %4.41,
- (0.75L60+Ç15Y) numunesinde, %6.91, %6.81, %6.37, %5.73, %5.64, %5.58 ve %5.54,
- (0.75L60+Ç20Y) numunesinde, %7.45, %7.47, %6.91, %6.19, %6.08, %6.02 ve %5.98,
- (0.75L60+Ç25Y) numunesinde, %7.18, %7.08, %6.66, %5.97, %5.87, %5.80 ve %5.76,
- (0.75L60+Ç30Y) numunesinde, %7.17, %7.07, %6.63, %5.95, %5.85, %5.78 ve %5.75,
- (1L60+Ç) numunesinde, %9.37, %9.19, %8.59, %7.75, %7.64, %7.56 ve %7.51,
- (1L60+Ç15Y) numunesinde, %13.09, %12.90, %12.27, %10.97, %10.77, %10.66 ve %10.58,
- (1L60+Ç20Y) numunesinde, %13.37, %13.17, %12.61, %11.25, %11.03, %10.91 ve %10.83,
- (1L60+Ç25Y) numunesinde, %12.86, %12.67, %12.11, %10.80, %10.60, %10.47 ve %10.40,

- (1L60+Ç30Y) numunesinde, %12.56, %12.38, %11.79, %10.53, %10.34, %10.22 ve %10.15,
- (1.25L60+Ç) numunesinde, %14.12, %13.89, %13.14, %11.81, %11.61, %11.49 ve %11.41,
- (1.25L60+Ç15Y) numunesinde, %15.84, %15.58, %14.92, %13.35, %13.08, %12.94 ve %12.84,
- (1.25L60+Ç20Y) numunesinde, %15.95, %15.67, %15.12, %13.48, %13.21, %13.05 ve %12.96,
- (1.25L60+Ç25Y) numunesinde, %15.81, %15.55, %14.97, %13.35, %13.09, %12.93 ve %12.83,
- (1.25L60+Ç30Y) numunesinde, %15.62, %15.37, %14.76, %13.18, %12.92, 12.77 ve %12.68,
- (1.50L60+Ç) numunesinde, %18.20, %17.88, %17.12, %15.35, %15.07, %14.91 ve %14.80,
- (1.50L60+Ç15Y) numunesinde, %19.08, %18.73, %18.11, %16.19, %15.86, %15.68 ve %15.56,
- (1.50L60+Ç20Y) numunesinde, %19.21, %18.82, %18.32, %16.36, %16.00, %15.81 ve %15.68,
- (1.50L60+Ç25Y) numunesinde, %18.45, %18.09, %17.55, %15.67, %15.34, %15.15 ve %15.03,
- (1.50L60+Ç30Y) numunesinde, %18.18, %17.86, %17.26, %15.42, %15.11, 14.92 ve %14.82 olarak hesaplanmıştır.

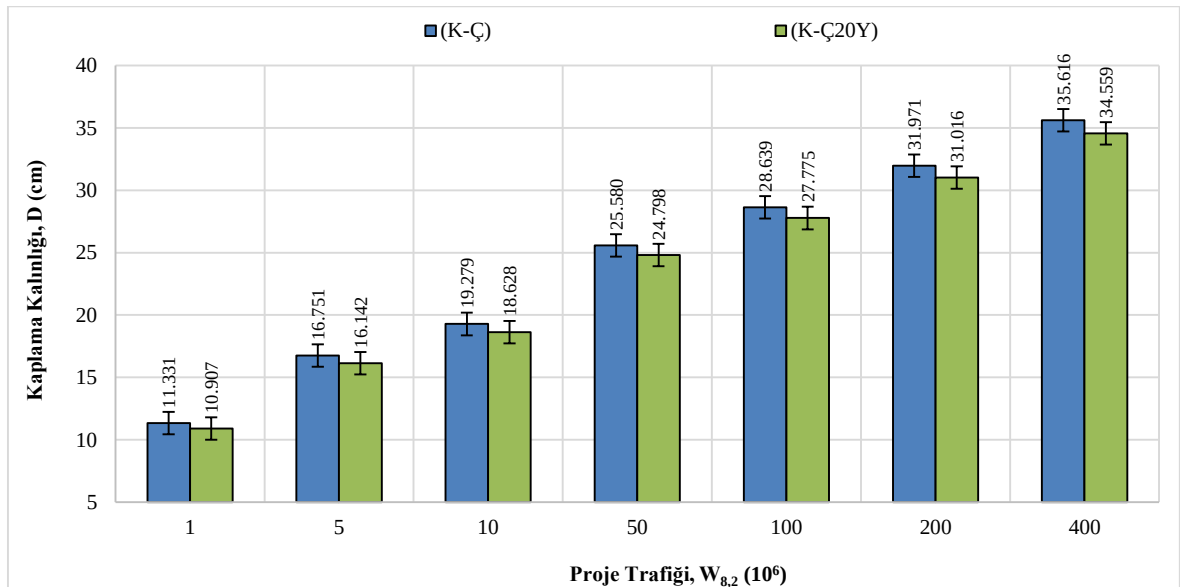
4.2.5.3 Çelik lif (35 mm) katkıli numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

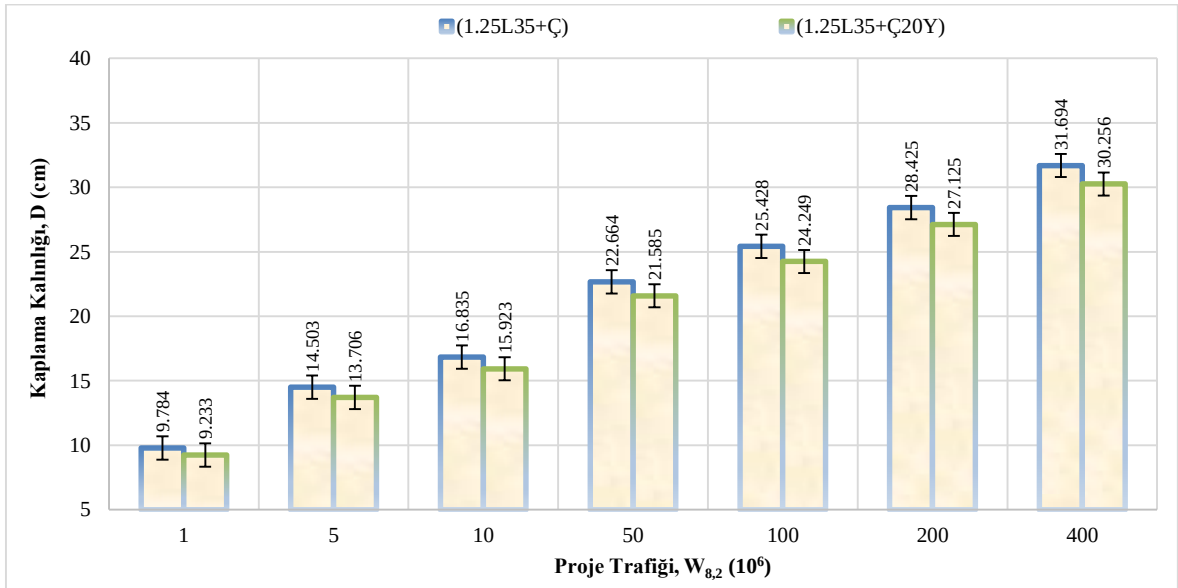
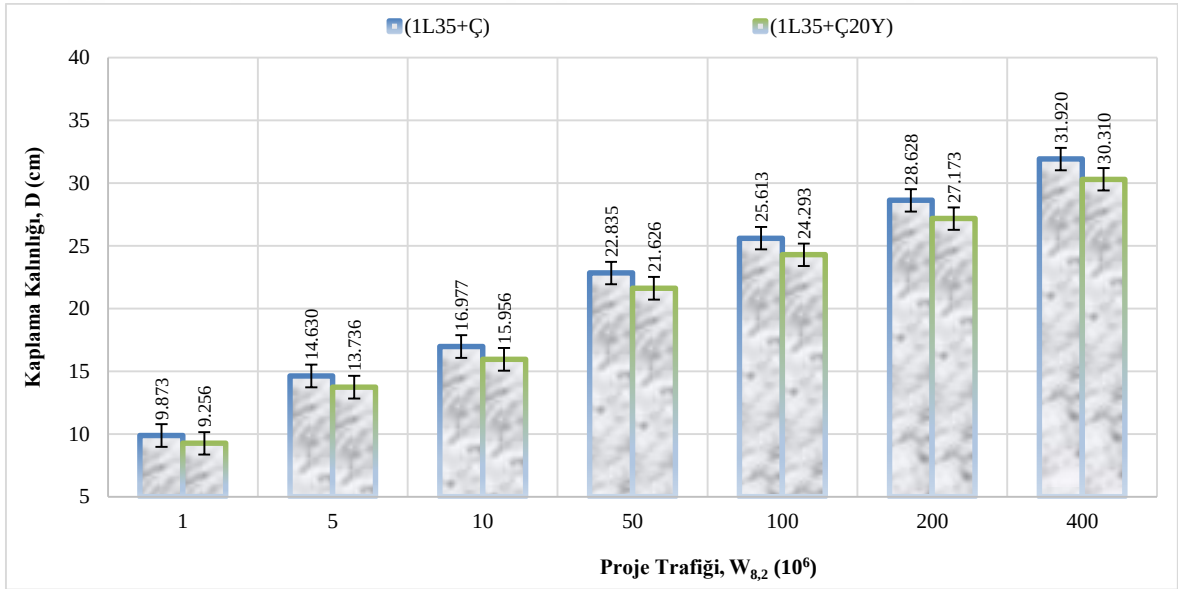
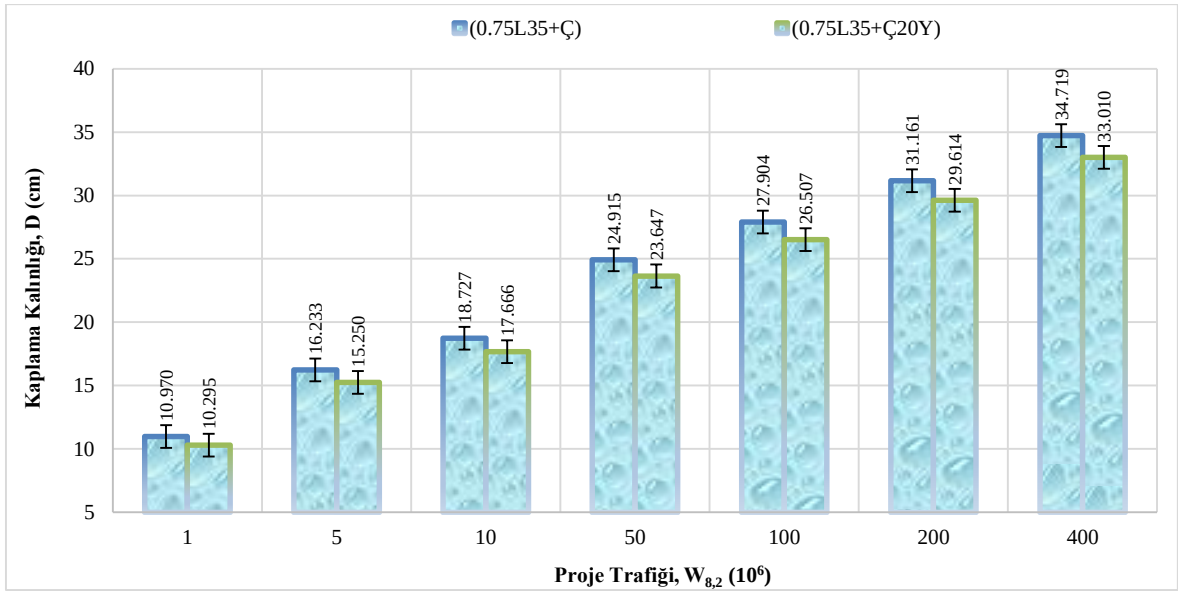
Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkıli numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Çizelge 4.36'da verilmiştir.

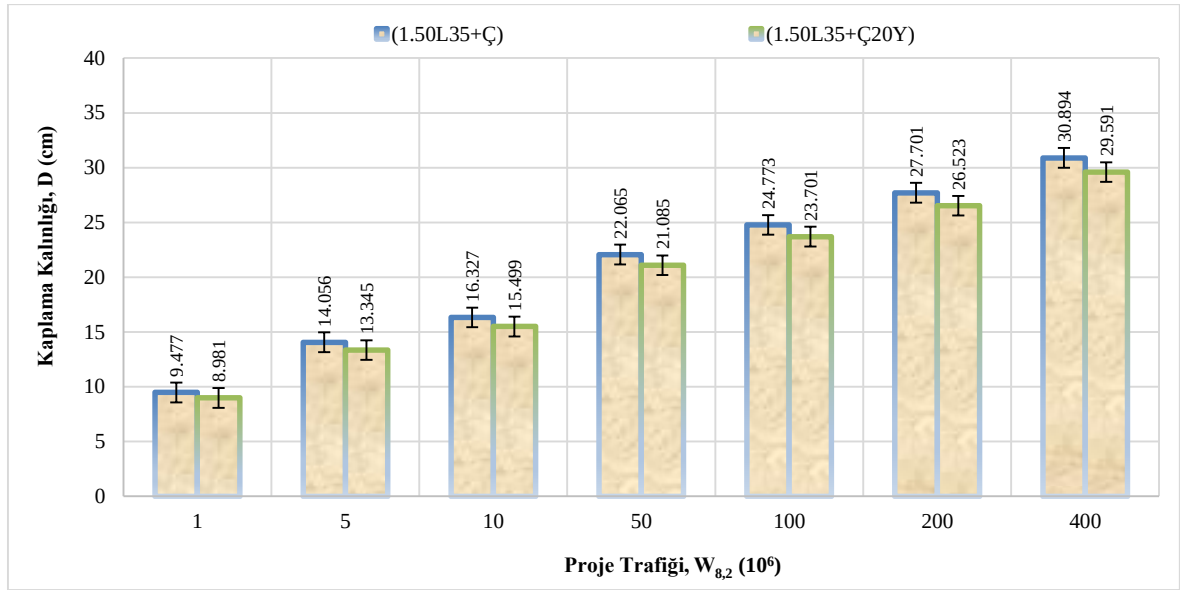
Çizelge 4.36 : Çelik lif (35 mm) katkılı numunelere ait 28 günlük S'_c ve E_c değerleri.

Karışım Kodu	Küp basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49.24	5.02	5.97	865.44	5841720
(K-Ç20Y)	56.28	5.43	6.35	920.99	6216678
(0.75L35+Ç)	55.39	5.28	6.29	912.29	6157938
(0.75L35+Ç20Y)	59.08	5.62	6.98	1012.36	6833451
(1L35+Ç)	57.70	5.51	7.48	1084.88	7322953
(1L35+Ç20Y)	62.15	6.22	8.32	1206.71	8145317
(1.25L35+Ç)	58.92	5.57	7.59	1100.84	7430644
(1.25L35+Ç20Y)	64.88	6.51	8.35	1211.06	8174687
(1.50L35+Ç)	60.57	5.78	8.00	1160.30	7832036
(1.50L35+Ç20Y)	67.01	6.79	8.74	1267.63	8556499

Farklı oranlarda çelik lif (35 mm) katkılı numunelerin farklı proje trafikleri için kaplama kalınlıkları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği Şekil 4.77'de gösterilmiştir.







Şekil 4.77 : Çelik lif (35 mm) ve %20 YFC katkılı beton numunelerine ait $W_{8,2} - D$ değişimi.

Şekil 4.77 incelendiğinde; çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre beton kaplama kalınlığında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 proje trafikleri için sırasıyla;

- (0.75L35+Ç) numunesinde, %3.18, %3.09, %2.86, %2.60, %2.56, %2.53 ve 2.52,
- (0.75L35+Ç20Y) numunesinde, %5.61, %5.52, %5.17, %4.64, %4.56, %4.52 ve %4.48,
- (1L35+Ç) numunesinde, %12.87, %12.66, %11.94, %10.73, %10.56, %10.46 ve %10.38,
- (1L35+Ç20Y) numunesinde, %15.14, %14.90, %14.34, %12.79, %12.54, %12.39 ve %12.30,
- (1.25L35+Ç) numunesinde, %13.65, %13.42, %12.67, %11.40, %11.21, %11.09 ve %11.01,
- (1.25L35+Ç20Y) numunesinde, %15.35, %15.09, %14.52, %12.96, %12.69, %12.55 ve %12.45,
- (1.50L35+Ç) numunesinde, %16.36, %16.09, %15.31, %13.74, %13.50, %13.36 ve %13.26,
- (1.50L35+Ç20Y) numunesinde, %17.65, %17.32, %16.80, %14.97, %14.67, %14.49 ve %14.38 olarak hesaplanmıştır.

4.3. Havaalanı beton yol kaplama tasarımı

Havaalanı beton kaplama tasarımı; %0, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranlarında çelik lif (60 mm) ile güçlendirilmiş, YFC oranı %0, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında ikame edilmiş beton numuneleri esas alınarak dört farklı zemin durumunda göre FAARFIELD v2.0 (FAA, 2021) tasarım rehberine göre hesaplamalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, Çizelge 4.37’de verilen bir uçak karışımından gelen mekanik yüklere dayalı olarak FAARFIELD v2.0 çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu uçak karışımı, 2021 yılı itibarıyla Türk Hava Yolları filosunda en yaygın dört uçak olduğu için uçuşlarda seçilmiştir (URL-1, 2021). İlgili brüt ağırlıklar, varsayılan yıllık kalkışlar ve trafikteki yıllık büyüme yüzdesi de Çizelge 4.37’de verilmiştir. B777-300 ER tipi uçak filosundaki en ağır ve geniş gövdeli uçaktır. Ayrıca, B737-800 tipi uçak diğer geniş gövdeli uçak, A330-200, ve A321-200 türü uçaklar ise dar gövdeli uçaklar olarak sınıflandırılmaktadır. Yıllık kalkış sayısı, Türk Hava Yolları filosundaki her bir uçağın yıllık kalkış sayısı ile orantılı olarak seçilmiştir.

FAARFIELD v2.0 programında betonun elastisite modülü sabit tutulmuş ve 4000000 psi olarak alınması önerilmiştir. Ayrıca program tarafından stabilize temel ve temel kalınlıkları için minimum değerler belirlenmiştir. Minimum değerler, kaplamaya etki eden maksimum uçak net ağırlığına göre belirlenmektedir. Çalışmada verilen uçakların ağırlıkları 45360 kg (100000 lbs) den büyük olduğu için stabilize temel tabakası (P-401/P-403) minimum 5 inç, kırmataş temel tabakası (P-209) için minimum 6 inç alınması önerilmiştir. Ayrıca alttemel kullanılmasına gerek olmadığı belirtilmiştir.

Çizelge 4.37 : FAARFIELD v2.0 programında verilen uçakların listesi, brüt ağırlıkları.

Uçak cinsi	Brüt ağırlık (Kg)	Yıllık kalkış	Yıllık Büyüme (%)
B777-300 ER	352441	1200	2
B737-800	79243	3600	2
A321-200 std	89400	3600	2
A330-300 std	230900	2400	2

4.3.1 Çakıllı zeminlerde havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

FAARFIELD programında zemin reaksiyon modülünün (k) belirlenmesinde Birleşik Zemin Sınıflandırma Sisteminin kullanılması önerilmektedir. Bu bağlamda çakıllı zeminler için $k \geq 300$ olması istenmektedir. Çalışmada çakıllı zeminler için $k=300$ pci alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Kaplama kalınlıkları FAARFIELD v.2 (FAA, 2021) programı yardımıyla hesaplanarak belirlenmiştir.

4.3.1.1 Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

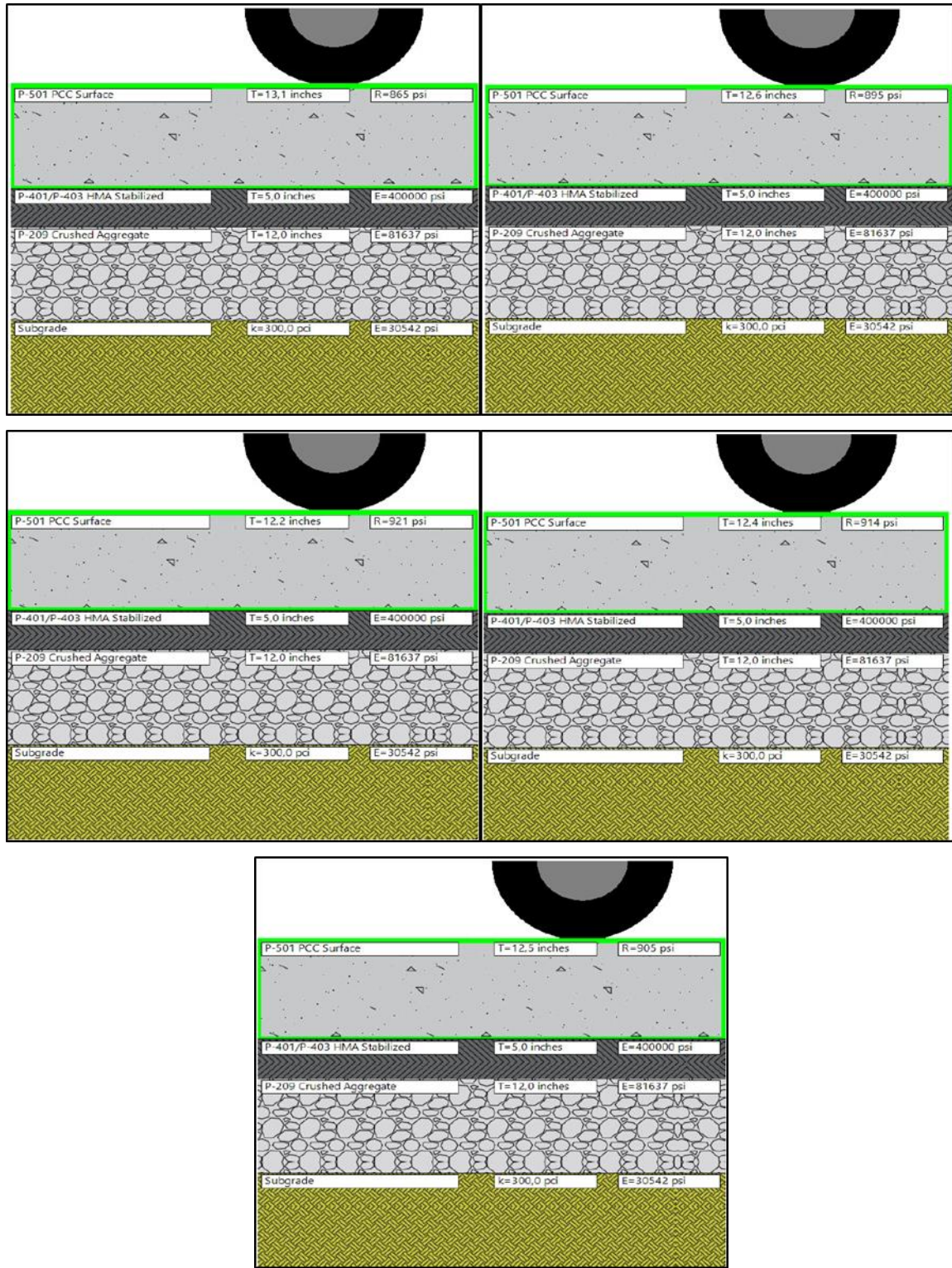
Kontrol numuneleri için havaalanı üstyapı beton kaplama kalınlıkları Çizelge 4.38’de, tabaka kalınlıkları Çizelge 4.39’da ve kesit görünüşleri Şekil 4.78’de verilmiştir.

Çizelge 4.38 : Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık değerleri

Karışım Kodu	k (pci)	E (psi)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	FAARFIELD v2.0 (R), (psi)	D (inç)	D (cm)
(K-Ç)	300	4000000	5.97	865.44	13.10	33.28
(K-Ç15Y)			6.17	894.88	12.60	32.00
(K-Ç20Y)			6.35	920.99	12.20	30.99
(K-Ç25Y)			6.30	913.74	12.40	31.50
(K-Ç30Y)			6.24	905.04	12.50	31.75

Çizelge 4.39 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.

Karışım Kodu	Üstyapı	FAA Şartname	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)
K-Ç	Rijit üstyapı	P-501	13.10	33.27
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154		
	Toplam:		30.10	76.45
K-Ç15Y	Rijit üstyapı	P-501	12.60	32.00
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.60	75.18
K-Ç20Y	Rijit üstyapı	P-501	12.20	30.99
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.20	74.17
K-Ç25Y	Rijit üstyapı	P-501	12.40	31.50
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.40	74.68
K-Ç30Y	Rijit üstyapı	P-501	12.50	31.75
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.50	74.93



Şekil 4.78 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı kesit görünüşü.

Çakıllı zeminlerde, kontrol beton numunelerinin havaalanı üstyapı kalınlıkları değerlendirildiğinde, %15, %20, %25 ve %30 YFC katkılı numunelerin beton kaplama kalınlığında kontrol numunesine göre azalma meydana gelmiştir. Bu azalma sırasıyla %3.82, %6.87, %5.34 ve %4.58 olarak tespit edilmiştir.

4.3.1.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

%0.75, %1, %1.25 ve %1.50 oranlarında çelik lif (60 mm) katkılı ve bağlayıcısı çimento ikamesi olarak %15, %20, %25 ve %30 oranlarında YFC ile yer değiştiren beton numunelerin kaplama kalınlıkları FAARFIELD v.2 programı yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve üstyapı beton kaplama kalınlıkları Çizelge 4.40'da, üstyapı tabaka kalınlıkları Çizelge 4.41'de tabaka kesitleri Şekil 4.79'de verilmiştir.

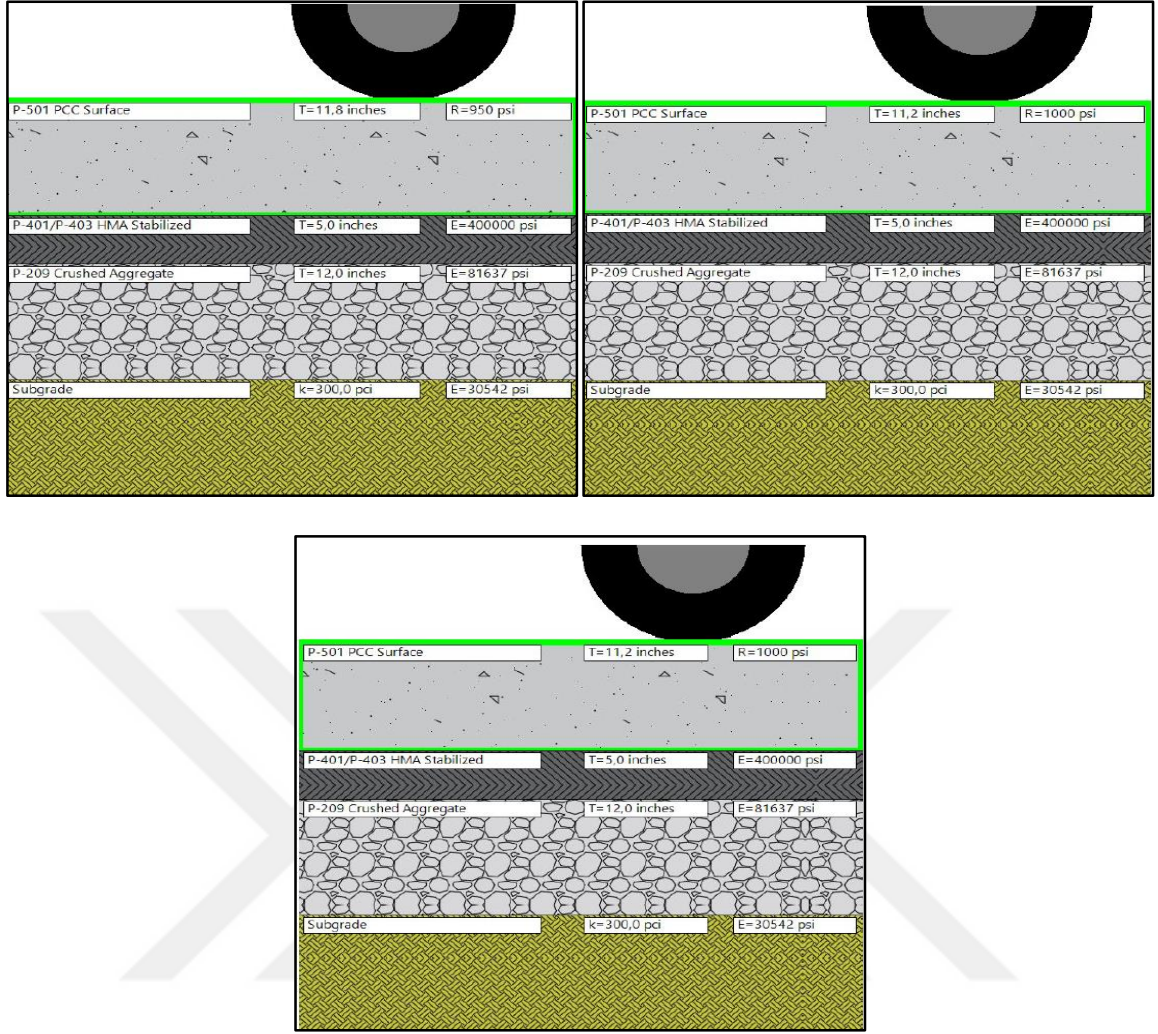
Çizelge 4.40 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin havaalanı beton plak kalınlık değerleri.

Karışım kodu	k (pci)	E (psi)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	FAARFIELD v2.0 (R), (psi)	D (inç)	D (cm)
(0.75L60+Ç)	300	4000000	6.55	949.99	11.80	29.97
(0.75L60+Ç15Y)			6.94	1006.56	11.20	28.45
(0.75L60+Ç20Y)			7.21	1045.72		
(0.75L60+Ç25Y)			7.12	1032.67		
(0.75L60+Ç30Y)			7.05	1022.51		
(1L60+Ç)	300	4000000	7.01	1016.71		
(1L60+Ç15Y)			7.77	1126.94		
(1L60+Ç20Y)			8.04	1166.10		
(1L60+Ç25Y)			7.90	1145.80		
(1L60+Ç30Y)			7.78	1128.39		
(1.25L60+Ç)			7.66	1110.99		
(1.25L60+Ç15Y)			8.19	1187.86		
(1.25L60+Ç20Y)			8.45	1225.57		
(1.25L60+Ç25Y)			8.36	1212.51		
(1.25L60+Ç30Y)			8.25	1196.56		
(1.50L60+Ç)			8.30	1203.81		
(1.50L60+Ç15Y)			8.74	1267.63		
(1.50L60+Ç20Y)			9.02	1308.24		
(1.50L60+Ç25Y)			8.81	1277.78		
(1.50L60+Ç30Y)			8.68	1258.92		

FAARFIELD programında eğilmede çekme dayanımının 500 ile 1000 psi (3.45 ile 6.90 MPa) arasında alınması önerilmiştir. Bu sebeple, 1000 psi'dan büyük değerlerde numunelerin eğilmede çekme dayanımı 1000 psi olarak alınmıştır.

Çizelge 4.41 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.

Karışım Kodu	Üstyapı	FAA Şartname	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)
(0.75L60+Ç)	Rijit üstyapı	P-501	11.80	29.97
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		28.80	73.15
(0.75L60+Ç15Y), (0.75L60+Ç20Y), (0.75L60+Ç25Y) ve (0.75L60+Ç30Y)	Rijit üstyapı	P-501	11.20	28.45
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		28.20	71.63
(1L60+Ç), (1L60+Ç15Y), (1L60+Ç20Y), (1L60+Ç25Y), (1L60+Ç30Y), (1.25L60+Ç), (1.25L60+Ç15Y), (1.25L60+Ç20Y), (1.25L60+Ç25Y), (1.25L60+Ç30Y), (1.50L60+Ç), (1.50L60+Ç15Y), (1.50L60+Ç20Y), (1.50L60+Ç25Y) ve (1.50L60+Ç30Y)	Rijit üstyapı	P-501	11.20	28.45
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		28.20	71.63



Şekil 4.79 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı kesit görünüşü.

4.3.2 Kumlu zeminlerde havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

Kumlu zeminler için birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre (k) değerinin $200 \geq k \geq 300$ olması istenmektedir. Çalışmada çakıllı zeminler için $k=250$ pci alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Kaplama kalınlıkları FAARFIELD v.2 programı yardımıyla hesaplanarak belirlenmiştir.

4.3.2.1 Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

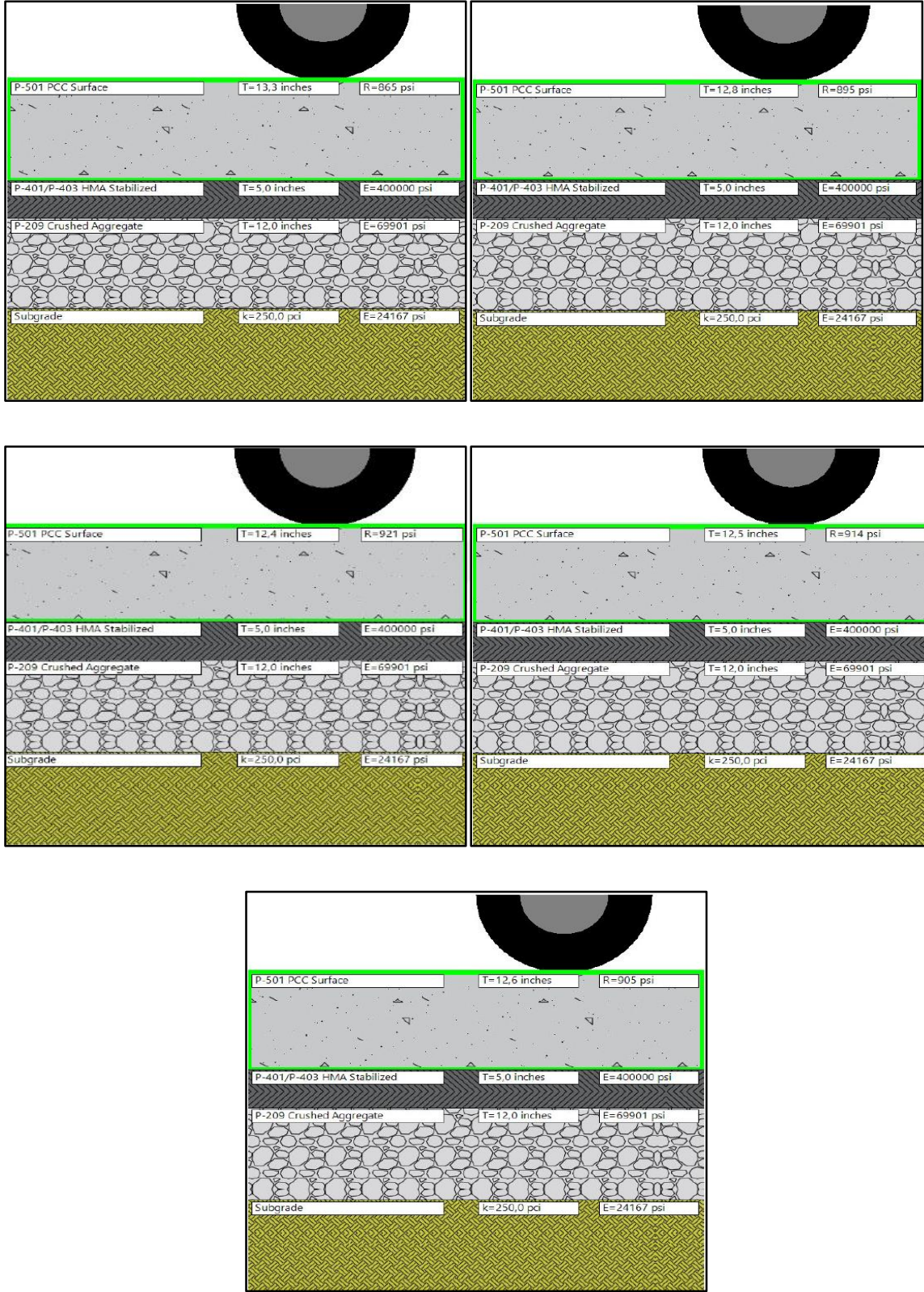
Kontrol numuneleri için havaalanı üstyapı beton kaplama kalınlıkları Çizelge 4.42'de, tabaka kalınlıkları Çizelge 4.43'de ve kesit görünüşleri Şekil 4.80'de verilmiştir.

Çizelge 4.42 : Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık değerleri

Karışım kodu	k (pci)	E (psi)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	FAARFIELD v2.0 (R), (psi)	D (inç)	D (cm)
(K-Ç)	250	4000000	5.97	865.44	13.30	33.78
(K-Ç15Y)			6.17	894.88	12.80	32.51
(K-Ç20Y)			6.35	920.99	12.40	31.50
(K-Ç25Y)			6.30	913.74	12.50	31.75
(K-Ç30Y)			6.24	905.04	12.60	32.00

Çizelge 4.43 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.

Karışım Kodu	Üstyapı	FAA Şartname	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)
K-Ç	Rijit üstyapı	P-501	13.30	33.78
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		30.30	76.96
K-Ç15Y	Rijit üstyapı	P-501	12.80	32.51
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.80	75.69
K-Ç20Y	Rijit üstyapı	P-501	12.40	31.50
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.40	74.68
K-Ç25Y	Rijit üstyapı	P-501	12.50	31.75
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.50	74.93
K-Ç30Y	Rijit üstyapı	P-501	12.60	32.00
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.60	75.18



Şekil 4.80 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı kesit görünüşü

4.3.2.2 Çelik lif (60 mm) katkılı beton numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

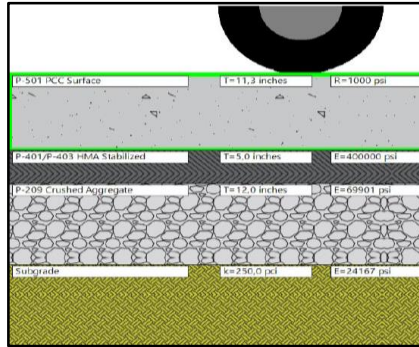
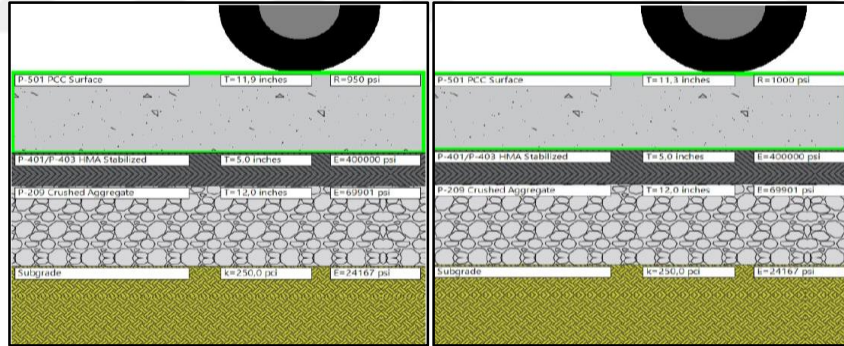
%0.75, %1, %1.25 ve %1.50 oranlarında çelik lif (60 mm) katkılı ve bağlayıcısı çimento ikamesi olarak %15, %20, %25 ve %30 oranlarında YFC ile yer değiştiren beton numunelerin kaplama kalınlıkları FAARFIELD v.2 programı yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve üstyapı beton kaplama kalınlıkları Çizelge 4.44’de, üstyapı tabaka kalınlıkları Çizelge 4.45’de, tabaka kesitleri Şekil 4.81’de verilmiştir.

Çizelge 4.44 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin havaalanı beton plak kalınlık değerleri.

Karışım kodu	k (pci)	E (psi)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	FAARFIELD v2.0 (R), (psi)	D (inç)	D (cm)
(0.75L60+Ç)	250	4000000	6.55	949.99	11.90	30.23
(0.75L60+Ç15Y)			6.94	1006.56	11.30	28.70
(0.75L60+Ç20Y)			7.21	1045.72		
(0.75L60+Ç25Y)			7.12	1032.67		
(0.75L60+Ç30Y)			7.05	1022.51		
(1L60+Ç)	250	4000000	7.01	1016.71		
(1L60+Ç15Y)			7.77	1126.94		
(1L60+Ç20Y)			8.04	1166.10		
(1L60+Ç25Y)			7.90	1145.80		
(1L60+Ç30Y)			7.78	1128.39		
(1.25L60+Ç)			7.66	1110.99		
(1.25L60+Ç15Y)			8.19	1187.86		
(1.25L60+Ç20Y)			8.45	1225.57		
(1.25L60+Ç25Y)			8.36	1212.51		
(1.25L60+Ç30Y)			8.25	1196.56		
(1.50L60+Ç)			8.30	1203.81		
(1.50L60+Ç15Y)			8.74	1267.63		
(1.50L60+Ç20Y)			9.02	1308.24		
(1.50L60+Ç25Y)			8.81	1277.78		
(1.50L60+Ç30Y)			8.68	1258.92		

Çizelge 4.45 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.

Karışım Kodu	Üstyapı	FAA Şartname	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)
(0.75L60+Ç)	Rijit üstyapı	P-501	11.90	30.23
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		28.90	73.41
(0.75L60+Ç15Y), (0.75L60+Ç20Y), (0.75L60+Ç25Y) ve (0.75L60+Ç30Y)	Rijit üstyapı	P-501	11.30	28.70
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		28.30	71.88
(1L60+Ç), (1L60+Ç15Y), (1L60+Ç20Y), (1L60+Ç25Y), (1L60+Ç30Y), (1.25L60+Ç), (1.25L60+Ç15Y), (1.25L60+Ç20Y), (1.25L60+Ç25Y), (1.25L60+Ç30Y), (1.50L60+Ç), (1.50L60+Ç15Y), (1.50L60+Ç20Y), (1.50L60+Ç25Y) ve (1.50L60+Ç30Y)	Rijit üstyapı	P-501	11.30	28.70
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		28.30	71.88



Şekil 4.81 : Çelik lif (60 mm) katkılı beton numunelerin üstyapı kesit görünüşü.

4.3.3 Düşük plastisiteli siltli ve killi zeminlerde havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

Düşük plastisiteli siltli ve killi zeminler için FAARFIELD tarafından birleşik zemin sınıflandırma sisteminde (k) değeri için $100 \geq k \geq 200$ olması istenmektedir. Çalışmada çakıllı zeminler için $k=150$ pci alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Kaplama kalınlıkları FAARFIELD v.2 programı yardımıyla hesaplanarak belirlenmiştir.

4.3.3.1 Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

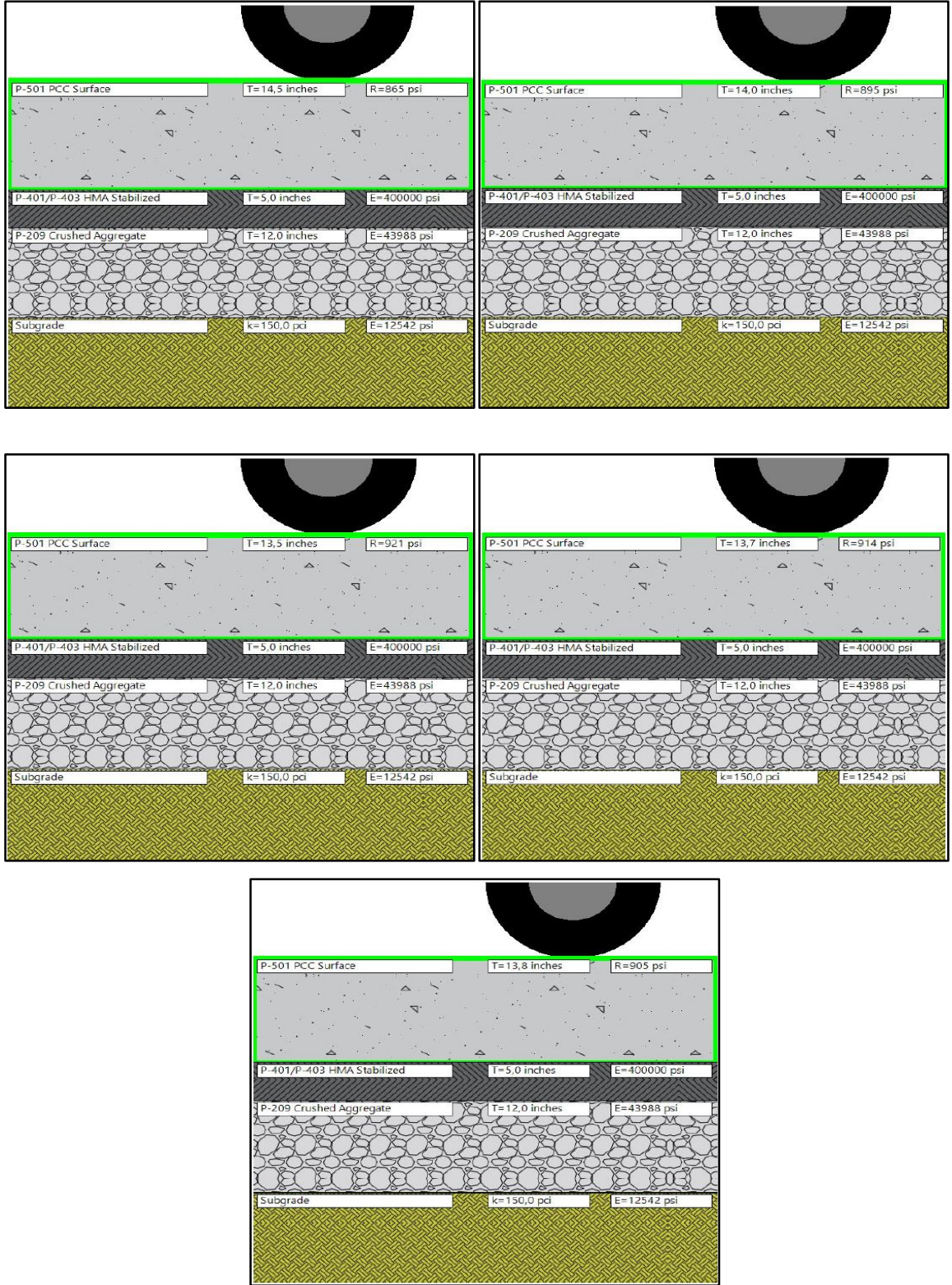
Kontrol numuneleri için havaalanı üstyapı beton kaplama kalınlıkları Çizelge 4.46'da, tabaka kalınlıkları Çizelge 4.47'de ve kesit görünüşleri Şekil 4.82'de verilmiştir.

Çizelge 4.46 : Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık değerleri

Karışım kodu	k (pci)	E (psi)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	FAARFIELD v2.0 (R), (psi)	D (inç)	D (cm)
(K-Ç)	150	4000000	5.97	865.44	14.50	36.83
(K-Ç15Y)			6.17	894.88	14.00	35.56
(K-Ç20Y)			6.35	920.99	13.50	34.29
(K-Ç25Y)			6.30	913.74	13.70	34.80
(K-Ç30Y)			6.24	905.04	13.80	35.05

Çizelge 4.47 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.

Karışım Kodu	Üstyapı	FAA Şartname	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)
K-Ç	Rijit üstyapı	P-501	14.50	36.83
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		31.50	80.01
K-Ç15Y	Rijit üstyapı	P-501	14.00	35.56
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		31.00	78.74
K-Ç20Y	Rijit üstyapı	P-501	13.50	34.29
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		30.50	77.47
K-Ç25Y	Rijit üstyapı	P-501	13.70	34.80
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		30.70	77.98
K-Ç30Y	Rijit üstyapı	P-501	13.80	35.05
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		30.80	78.23



Şekil 4.82 : Kontrol numunelerinin üstyapı kesit görünüşü.

4.3.3.2 Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

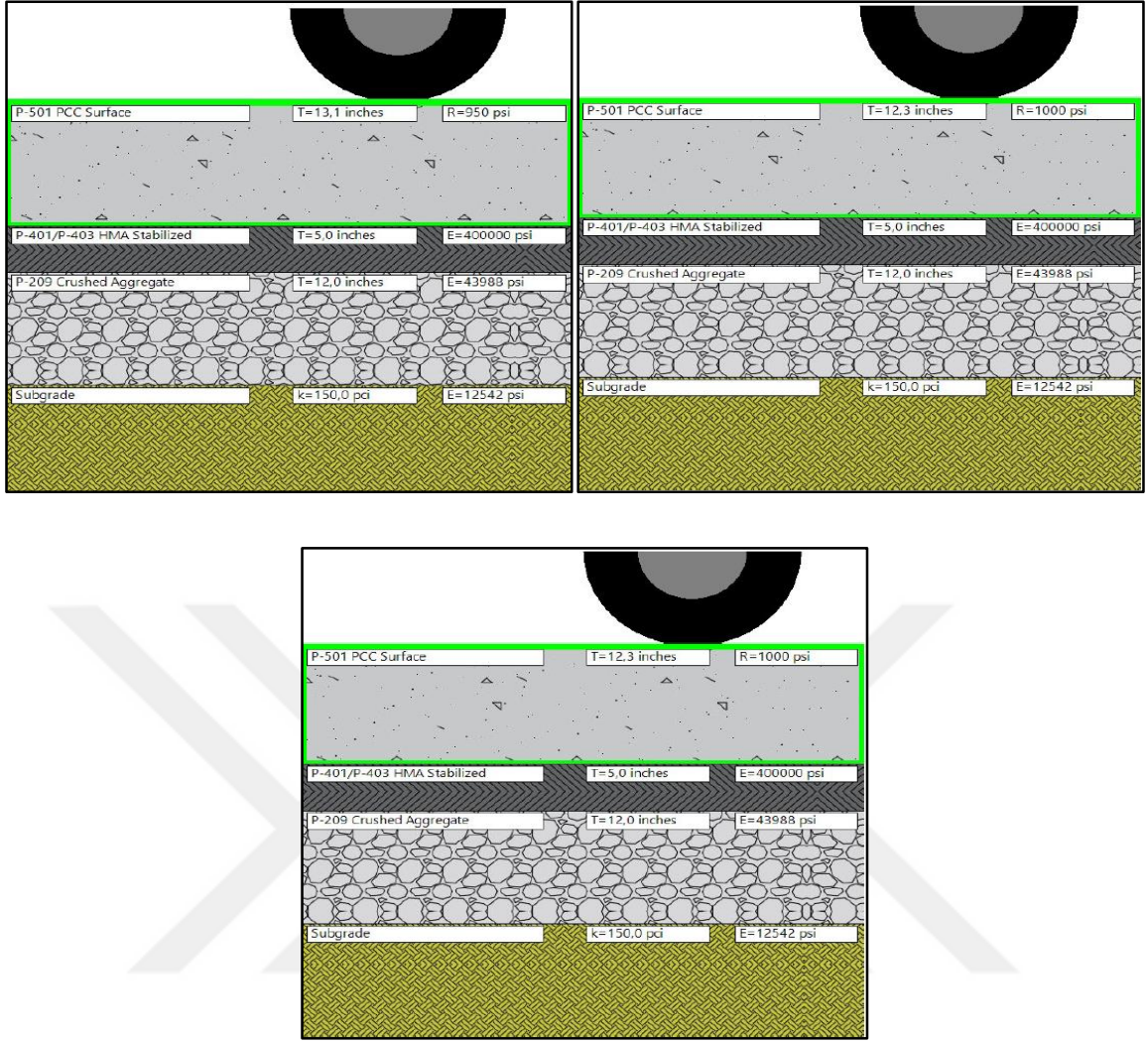
Çelik lif (60 mm) katkılı ve bağlayıcısı çimento ikamesi olarak farklı oranlarda YFC ile yer değiştiren numunelerin kaplama kalınlıkları FAARFIELD v.2 programı yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş üstyapı beton kaplama kalınlıkları Çizelge 4.48’de, üstyapı tabaka kalınlıkları Çizelge 4.49’de tabaka kesitleri Şekil 4.83’de verilmiştir.

Çizelge 4.48 : Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin havaalanı beton plak kalınlık değerleri.

Karışım kodu	k (pci)	E (psi)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	FAARFIELD v2.0 (R), (psi)	D (inç)	D (cm)
(0.75L60+Ç)	150	4000000	6.55	949.99	13.10	33.27
(0.75L60+Ç15Y)			6.94	1006.56	12.30	31.24
(0.75L60+Ç20Y)			7.21	1045.72		
(0.75L60+Ç25Y)			7.12	1032.67		
(0.75L60+Ç30Y)			7.05	1022.51		
(1L60+Ç)	150	4000000	7.01	1016.71		
(1L60+Ç15Y)			7.77	1126.94		
(1L60+Ç20Y)			8.04	1166.10		
(1L60+Ç25Y)			7.90	1145.80		
(1L60+Ç30Y)			7.78	1128.39		
(1.25L60+Ç)			7.66	1110.99		
(1.25L60+Ç15Y)			8.19	1187.86		
(1.25L60+Ç20Y)			8.45	1225.57		
(1.25L60+Ç25Y)			8.36	1212.51		
(1.25L60+Ç30Y)			8.25	1196.56		
(1.50L60+Ç)			8.30	1203.81		
(1.50L60+Ç15Y)			8.74	1267.63		
(1.50L60+Ç20Y)			9.02	1308.24		
(1.50L60+Ç25Y)			8.81	1277.78		
(1.50L60+Ç30Y)			8.68	1258.92		

Çizelge 4.49 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.

Karışım Kodu	Üstyapı	FAA Şartname	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)
(0.75L60+Ç)	Rijit üstyapı	P-501	13.10	33.27
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		30.10	76.45
(0.75L60+Ç15Y), (0.75L60+Ç20Y), (0.75L60+Ç25Y) ve (0.75L60+Ç30Y)	Rijit üstyapı	P-501	12.30	31.24
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.30	74.42
(1L60+Ç), (1L60+Ç15Y), (1L60+Ç20Y), (1L60+Ç25Y), (1L60+Ç30Y), (1.25L60+Ç), (1.25L60+Ç15Y), (1.25L60+Ç20Y), (1.25L60+Ç25Y), (1.25L60+Ç30Y), (1.50L60+Ç), (1.50L60+Ç15Y), (1.50L60+Ç20Y), (1.50L60+Ç25Y) ve (1.50L60+Ç30Y)	Rijit üstyapı	P-501	12.30	31.24
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		29.30	74.42



Şekil 4.83 : Numunelerin havaalanı üstyapı kesit görünüşü.

4.3.4 Yüksek plastisiteli siltli ve killi zeminlerde havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

Yüksek plastisiteli siltli ve killi zeminler için FAARFIELD tarafından zemin reaksiyon modülünün (k) belirlenmesinde birleşik zemin sınıflandırma sisteminde $50 \leq k \leq 100$ olması istenmektedir. Çalışmada yüksek plastisiteli siltli ve killi zeminlerde için $k=75$ pci alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Kaplama kalınlıkları FAARFIELD v.2 programı yardımıyla hesaplanarak belirlenmiştir.

4.3.4.1 Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık tasarımı

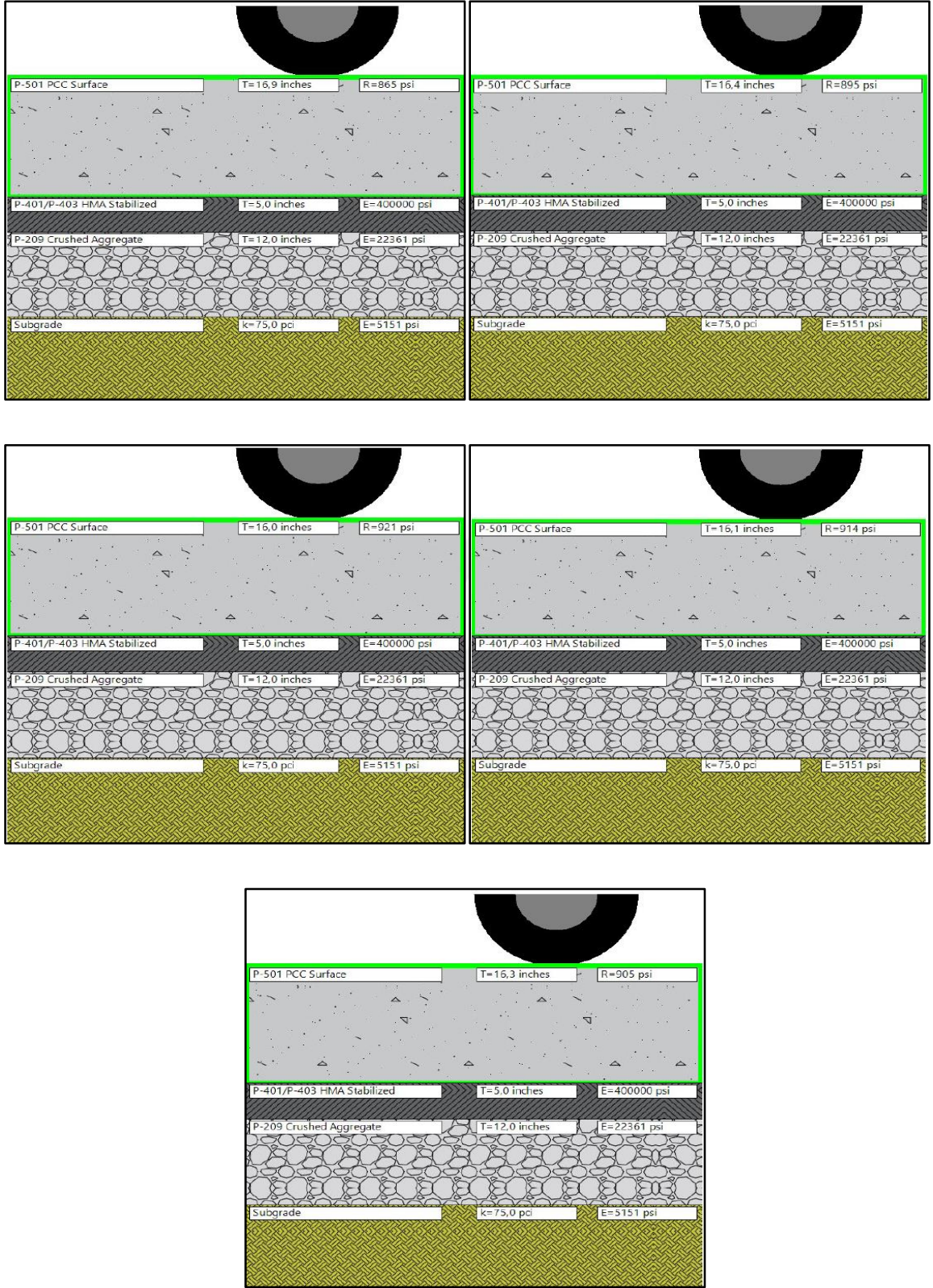
Kontrol numuneleri için havaalanı üstyapı beton kaplama kalınlıkları Çizelge 4.50’de, tabaka kalınlıkları Çizelge 4.51’de ve kesit görünüşleri Şekil 4.84’de verilmiştir.

Çizelge 4.50 : Kontrol numunelerinin havaalanı beton plak kalınlık değerleri

Karışım kodu	k (pci)	E (psi)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	FAARFIELD v2.0 (R), (psi)	D (inç)	D (cm)
(K-Ç)	75	4000000	5.97	865.44	16.90	42.93
(K-Ç15Y)			6.17	894.88	16.40	41.66
(K-Ç20Y)			6.35	920.99	16.00	40.64
(K-Ç25Y)			6.30	913.74	16.10	40.89
(K-Ç30Y)			6.24	905.04	16.30	41.40

Çizelge 4.51 : Kontrol numunelerinin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.

Karışım Kodu	Üstyapı	FAA Şartname	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)
K-Ç	Rijit üstyapı	P-501	16.90	42.93
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		33.90	86.11
K-Ç15Y	Rijit üstyapı	P-501	16.40	41.66
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		33.40	84.84
K-Ç20Y	Rijit üstyapı	P-501	16.00	40.64
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		33.00	83.82
K-Ç25Y	Rijit üstyapı	P-501	16.10	40.89
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		33.10	84.07
K-Ç30Y	Rijit üstyapı	P-501	16.30	41.40
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		33.30	84.58



Şekil 4.84 : Kontrol numunesinin üstü yapı kesit görünüşü

4.3.4.2 Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin beton plak kalınlık tasarımı

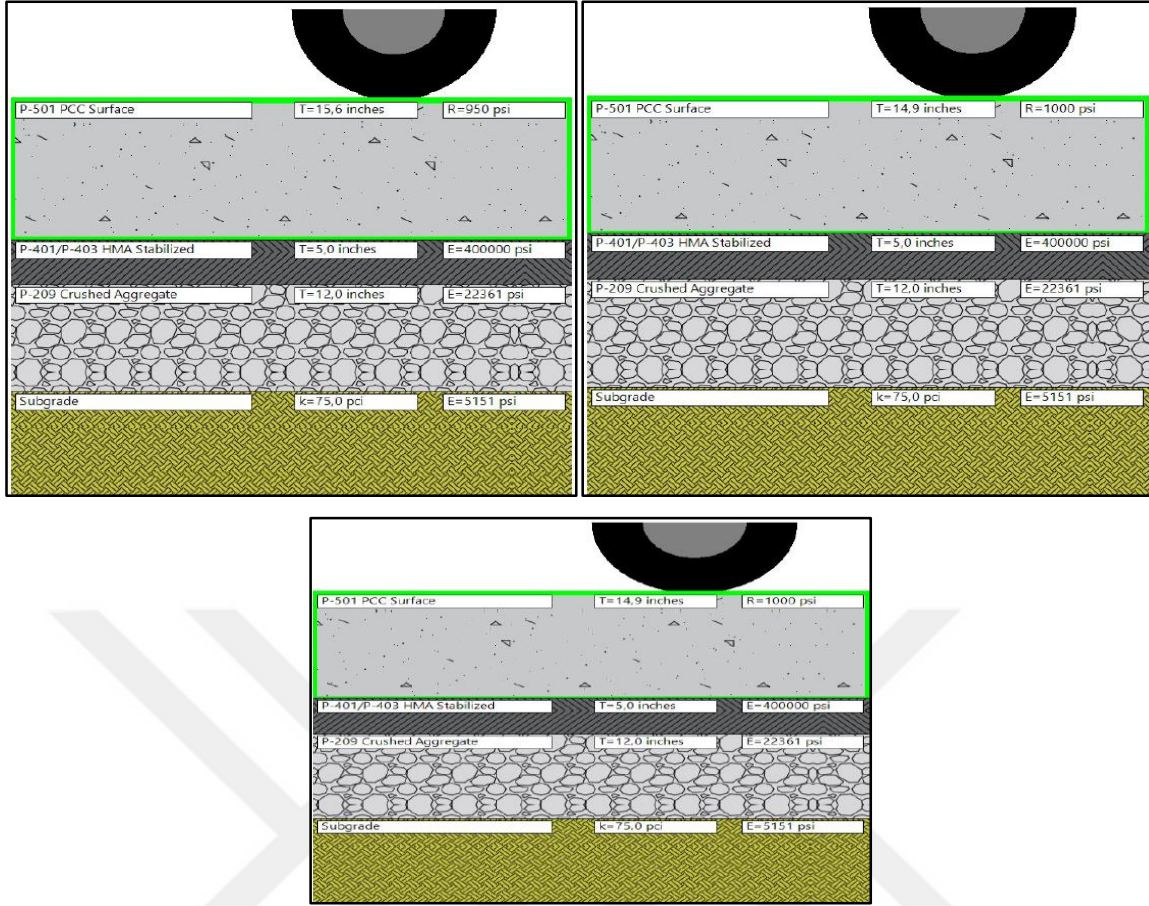
Yüksek plastisiteli siltli ve killi zeminler için farklı oranlarda çelik lif (60 mm) ve YFC katkıli numunelerin kaplama kalınlıkları FAARFIELD v.2 programı yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve üstyapı beton kaplama kalınlıkları Çizelge 4.52’de, üstyapı tabaka kalınlıkları Çizelge 4.53’de tabaka kesitleri Şekil 4.85’de verilmiştir.

Çizelge 4.52 : Çelik lif (60 mm) katkıli numunelerin havaalanı beton plak kalınlık değerleri.

Karışım kodu	k (pci)	E (psi)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	FAARFIELD v2.0 (R), (psi)	D (inç)	D (cm)
(0.75L60+Ç)	75	4000000	6.55	949.99	15.60	39.62
(0.75L60+Ç15Y)			6.94	1006.56	14.90	37.85
(0.75L60+Ç20Y)			7.21	1045.72		
(0,75L60+Ç25Y)			7,12	1032,67		
(0,75L60+Ç30Y)			7,05	1022,51		
(1L60+Ç)	75	4000000	7.01	1016.71		
(1L60+Ç15Y)			7.77	1126.94		
(1L60+Ç20Y)			8.04	1166.10		
(1L60+Ç25Y)			7.90	1145.80		
(1L60+Ç30Y)			7.78	1128.39		
(1.25L60+Ç)			7.66	1110.99		
(1.25L60+Ç15Y)			8.19	1187.86		
(1.25L60+Ç20Y)			8.45	1225.57		
(1.25L60+Ç25Y)			8.36	1212.51		
(1.25L60+Ç30Y)			8.25	1196.56		
(1.50L60+Ç)			8.30	1203.81		
(1.50L60+Ç15Y)			8.74	1267.63		
(1.50L60+Ç20Y)			9.02	1308.24		
(1.50L60+Ç25Y)			8.81	1277.78		
(1.50L60+Ç30Y)			8.68	1258.92		

Çizelge 4.53 : Çelik lifli (60 mm) numunelerin havaalanı üstyapı tabaka dizaynı.

Karışım Kodu	Üstyapı	FAA Şartname	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)
(0.75L60+Ç)	Rijit üstyapı	P-501	15.60	39.62
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		32.60	82.80
(0.75L60+Ç15Y), (0.75L60+Ç20Y), (0.75L60+Ç25Y) ve (0.75L60+Ç30Y)	Rijit üstyapı	P-501	14.90	37.85
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		31.90	81.03
(1L60+Ç), (1L60+Ç15Y), (1L60+Ç20Y), (1L60+Ç25Y), (1L60+Ç30Y), (1.25L60+Ç), (1.25L60+Ç15Y), (1.25L60+Ç20Y), (1.25L60+Ç25Y), (1.25L60+Ç30Y), (1.50L60+Ç), (1.50L60+Ç15Y), (1.50L60+Ç20Y), (1.50L60+Ç25Y) ve (1.50L60+Ç30Y)	Rijit üstyapı	P-501	14.90	37.85
	Stabilize temel tabakası	P-401	5.00	12.70
	Kırmataş temel tabakası	P-209	12.00	30.48
	Alttemel	P-154	-	-
	Toplam:		31.90	81.03



Şekil 4.85 : Çelik lif (60 mm) katkıli beton numunelerinin havaalanı üstyapı kesit görünüşü.

4.4 Karayolu beton yol kaplaması maliyet analizi

Kontrol ve çelik lif katkıli numunelerin karayolu beton kaplama kalınlığı maliyet analizinde, Tekirdağ ili 2022 Nisan ayı fiyatları esas alınmıştır. Beton plak altına AASHTO tarafından önerilen 20 cm kalınlığındaki plentmiks temel (PMT) yapılması tüm numuneler için uygulandığından maliyet analizi kapsamına dâhil edilmemiştir. Maliyet analizi kapsamında kullanılan birim fiyatlar Çizelge 4.54’de sunulmuştur.

Çizelge 4.54 : Maliyet analizi için birim fiyatlar.

Malzemeler	Birimi	Birim Fiyatı (₺)
Çimento	₺/Ton	1510
Mineral katkı		720
Su		22.40
(0-5) mm Agrega		60
(5-11) mm Agrega		60
(11-22) mm Agrega		60
Kimyasal katkı		15890
Çelik lif (60 mm)		13500

4.4.1 Kontrol numunelerine ait numunelerin maliyet analizi

Kontrol numuneleri için maliyet analizi Çizelge 4.55’de, çelik lif (60 mm) katkı numunelere ait maliyet analizi ise Çizelge 4.56’de verilmiştir.

Çizelge 4.55 : Kontrol numunelerine ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	Malzemeler	Miktar (kg)	₺/Ton	₺/m³	Toplam Maliyet içindeki %'si
(K-Ç)	Çimento, (3.80)	450	1510	679.50	76.28
	Mineral katkı, (2.90)	0	0	0	0
	Su	180	22.40	4.03	0.45
	(0-5) mm Agreg, (2.77 g/cm³)	410	60	24.60	2.76
	(5-11) mm Agreg, (2.79 g/cm³)	709	60	42.54	4.78
	(11-22) mm Agreg, (2.80 g/cm³)	746	60	44.76	5.02
	Kimyasal katkı, (1.11 g/cm³)	6	15890	95.34	10.70
	Toplam:			890.77	100
(K-Ç15Y)	Çimento	382.50	1510	577.58	68.99
	Mineral katkı	67.50	720	48.60	5.81
	Su	180	22.40	4.03	0.48
	(0-5) mm Agreg	409	60	24.54	2.93
	(5-11) mm Agreg	707	60	42.42	5.07
	(11-22) mm Agreg	744	60	44.64	5.33
	Kimyasal katkı	6	15890	95.34	11.39
	Toplam:			837.15	100
(K-Ç20Y)	Çimento	360	1510	543.60	66.34
	Mineral katkı	90	720	64.80	7.91
	Su	180	22.40	4.03	0.49
	(0-5) mm Agreg	409	60	24.54	2.99
	(5-11) mm Agreg	707	60	42.42	5.18
	(11-22) mm Agreg	744	60	44.64	5.45
	Kimyasal katkı	6	15890	95.34	11.64
	Toplam:			819.37	100
(K-Ç25Y)	Çimento	337.50	1510	509.63	63.59
	Mineral katkı	112.50	720	81	10.11
	Su	180	22.40	4.03	0.50
	(0-5) mm Agreg	409	60	24.54	3.06
	(5-11) mm Agreg	706	60	42.36	5.29
	(11-22) mm Agreg	743	60	44.58	5.56
	Kimyasal katkı	6	15890	95.34	11.90
	Toplam:			801.48	100
(K-Ç30Y)	Çimento	315	1510	475.65	60.69
	Mineral katkı	135	720	97.20	12.40
	Su	180	22.40	4.03	0.51
	(0-5) mm Agreg	409	60	24.54	3.13
	(5-11) mm Agreg	706	60	42.36	5.41
	(11-22) mm Agreg	743	60	44.58	5.69
	Kimyasal katkı	6	15890	95.34	12.17
	Toplam:			783.70	100

Çizelge 4.56 : Çelik lifli (60 mm) beton numunelerine ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	Bağlayıcılar (kg/m ³)		Agrega (kg/m ³)			Çelik Lif (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Toplam Maliyet (₺/m ³)	1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)
	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu	(0-5) mm	(5-11) mm	(11-22) mm					
(K-Ç)	450	0	410	709	746	0	180	6.00	890.77	8.91
(K-Ç15Y)	382.50	67.50	409	707	744	0			837.15	8.37
(K-Ç20Y)	360	90	409	707	744	0			819.37	8.19
(K-Ç25Y)	337.50	112.50	409	706	743	0			801.48	8.01
(K-Ç30Y)	315	135	409	706	743	0			783.70	7.84
(0.75L60+Ç)	450	0	406	701	738	58.88			1684.45	16.84
(0.75L60+Ç15Y)	382.50	67.50	405	699	736	58.88			1630.83	16.31
(0.75L60+Ç20Y)	360	90	405	699	736	58.88			1613.05	16.13
(0.75L60+Ç25Y)	337.50	112.50	404	698	735	58.88			1595.10	15.95
(0.75L60+Ç30Y)	315	135	404	698	735	58.88			1577.32	15.77
(1L60+Ç)	450	0	404	698	735	78.50			1948.84	19.49
(1L60+Ç15Y)	382.50	67.50	403	697	733	78.50			1895.28	18.95
(1L60+Ç20Y)	360	90	403	696	733	78.50			1877.44	18.77
(1L60+Ç25Y)	337.50	112.50	403	696	732	78.50			1859.61	18.60
(1L60+Ç30Y)	315	135	402	695	732	78.50			1841.71	18.42
(1.25L60+Ç)	450	0	403	695	732	98.13			2213.43	22.13
(1.25L60+Ç15Y)	382.50	67.50	402	694	730	98.13			2159.86	21.60
(1.25L60+Ç20Y)	360	90	401	693	730	98.13			2141.97	21.42
(1.25L60+Ç25Y)	337.50	112.50	401	693	729	98.13			2124.13	21.24
(1.25L60+Ç30Y)	315	135	401	692	729	98.13			2106.30	21.06
(1.50L60+Ç)	450	0	401	693	729	117.75			2477.88	24.78
(1.50L60+Ç15Y)	382.50	67.50	400	691	728	117.75			2424.31	24.24
(1.50L60+Ç20Y)	360	90	400	691	727	117.75			2406.48	24.06
(1.50L60+Ç25Y)	337.50	112.50	400	690	727	117.75			2388.64	23.89
(1.50L60+Ç30Y)	315	135	399	690	726	117.75			2370.75	23.71

4.4.2 Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin beton plak maliyet analizi

Çelik lif (%0.75) ve YFC'li numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.57'de verilmiştir.

Çizelge 4.57 : Çelik lif (%0.75) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%0.75 Çelik Lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığında ki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%0.75 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığında azalmanın maliyete etkisi (₺)	%0.75 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(0.75L60+Ç)	1	14.064	13.363	4.98	8.91	16.84	16.00	79.67
	5	18.887	17.973	4.84			16.03	79.95
	10	21.204	20.221	4.64			16.06	80.33
	50	27.290	26.081	4.43			16.10	80.72
	100	30.307	28.976	4.39			16.10	80.80
	200	33.614	32.146	4.37			16.11	80.84
	400	37.244	35.624	4.35			16.11	80.87
(0.75L60+Ç15Y)	1	13.807	12.951	6.20	8.37	16.31	15.30	82.73
	5	18.555	17.419	6.12			15.31	82.89
	10	20.848	19.629	5.85			15.35	83.42
	50	26.850	25.357	5.56			15.40	83.97
	100	29.822	28.179	5.51			15.41	84.07
	200	33.081	31.267	5.48			15.41	84.13
	400	36.655	34.653	5.46			15.42	84.17
(0.75L60+Ç20Y)	1	13.589	12.690	6.62	8.19	16.13	15.06	83.84
	5	18.273	17.061	6.63			15.06	83.81
	10	20.546	19.243	6.34			15.11	84.38
	50	26.477	24.889	6.00			15.16	85.06
	100	29.413	27.666	5.94			15.17	85.17
	200	32.626	30.701	5.90			15.18	85.25
	400	36.157	34.028	5.89			15.18	85.28
(0.75L60+Ç25Y)	1	13.650	12.776	6.40	8.01	15.95	14.93	86.28
	5	18.352	17.178	6.39			14.93	86.29
	10	20.627	19.370	6.10			14.98	86.89
	50	26.579	25.042	5.78			15.03	87.51
	100	29.515	27.833	5.70			15.04	87.68
	200	32.751	30.886	5.69			15.04	87.69
	400	36.292	34.234	5.67			15.05	87.74
(0.75L60+Ç30Y)	1	13.721	12.842	6.41	7.84	15.77	14.76	88.37
	5	18.445	17.272	6.36			14.77	88.46
	10	20.729	19.469	6.08			14.81	89.03
	50	26.703	25.164	5.76			14.86	89.66
	100	29.662	27.965	5.72			14.87	89.75
	200	32.903	31.034	5.68			14.88	89.83
	400	36.459	34.394	5.66			14.88	89.87

Çizelge 4.57 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %0.75 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %79.67 en fazla ise %89.87 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.00) ve YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.58’de verilmiştir.

Çizelge 4.58 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	$W_{8,2}$ (10 ³)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1 çelik lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1L60+Ç)	1	14.064	12.883	8.40	8.91	19.49	17.85	100.41
	5	18.887	17.325	8.27			17.88	100.69
	10	21.204	19.528	7.91			17.95	101.48
	50	27.290	25.232	7.54			18.02	102.29
	100	30.307	28.044	7.47			18.03	102.44
	200	33.614	31.118	7.43			18.04	102.53
	400	37.244	34.488	7.40			18.05	102.59
(1L60+Ç15Y)	1	13.807	12.200	11.64	8.37	18.95	16.75	100.03
	5	18.555	16.375	11.75			16.73	99.81
	10	20.848	18.501	11.26			16.82	100.91
	50	26.850	23.995	10.63			16.94	102.32
	100	29.822	26.683	10.53			16.96	102.56
	200	33.081	29.616	10.47			16.97	102.69
	400	36.655	32.832	10.43			16.98	102.79
(1L60+Ç20Y)	1	13.589	11.984	11.81	8.19	18.77	16.56	102.06
	5	18.273	16.068	12.07			16.51	101.49
	10	20.546	18.169	11.57			16.60	102.62
	50	26.477	23.597	10.88			16.73	104.21
	100	29.413	26.243	10.78			16.75	104.44
	200	32.626	29.134	10.70			16.76	104.60
	400	36.157	32.301	10.66			16.77	104.70
(1L60+Ç25Y)	1	13.650	12.093	11.41	8.01	18.60	16.47	105.56
	5	18.352	16.226	11.58			16.44	105.14
	10	20.627	18.339	11.09			16.53	106.28
	50	26.579	23.800	10.45			16.65	107.76
	100	29.515	26.469	10.32			16.68	108.08
	200	32.751	29.383	10.28			16.68	108.16
	400	36.292	32.573	10.25			16.69	108.25
(1L60+Ç30Y)	1	13.721	12.189	11.16	7.84	18.42	16.36	108.77
	5	18.445	16.363	11.29			16.34	108.47
	10	20.729	18.489	10.81			16.43	109.60
	50	26.703	23.980	10.20			16.54	111.04
	100	29.662	26.665	10.10			16.56	111.26
	200	32.903	29.599	10.04			16.57	111.40
	400	36.459	32.812	10.00			16.57	111.49

Çizelge 4.58 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.00 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %99.81 en fazla ise %111.49 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Farklı oranlarda çelik lif (%1.25) ve YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.59’da verilmiştir.

Çizelge 4.59 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	$W_{8,2}$ (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.25 çelik lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1.25 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.25 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.25L60+Ç)	1	14.064	12.291	12.61	8.91	22.13	19.34	117.16
	5	18.887	16.505	12.61			19.34	117.14
	10	21.204	18.641	12.09			19.46	118.45
	50	27.290	24.163	11.46			19.60	120.01
	100	30.307	26.868	11.35			19.62	120.29
	200	33.614	29.820	11.29			19.64	120.43
	400	37.244	33.058	11.24			19.65	120.56
(1.25L60+Ç15Y)	1	13.807	11.869	14.04	8.37	21.60	18.57	121.79
	5	18.555	15.905	14.28			18.51	121.17
	10	20.848	17.991	13.71			18.64	122.64
	50	26.850	23.383	12.91			18.81	124.69
	100	29.822	26.010	12.78			18.84	125.02
	200	33.081	28.877	12.71			18.85	125.22
	400	36.655	32.017	12.65			18.87	125.36
(1.25L60+Ç20Y)	1	13.589	11.679	14.06	8.19	21.42	18.41	124.67
	5	18.273	15.634	14.44			18.33	123.66
	10	20.546	17.694	13.88			18.45	125.12
	50	26.477	23.025	13.04			18.63	127.33
	100	29.413	25.618	12.90			18.66	127.69
	200	32.626	28.445	12.81			18.67	127.92
	400	36.157	31.542	12.76			18.69	128.05
(1.25L60+Ç25Y)	1	13.650	11.742	13.97	8.01	21.24	18.27	127.99
	5	18.352	15.725	14.31			18.20	127.10
	10	20.627	17.795	13.73			18.32	128.64
	50	26.579	23.147	12.91			18.50	130.81
	100	29.515	25.753	12.75			18.53	131.25
	200	32.751	28.593	12.70			18.54	131.38
	400	36.292	31.704	12.64			18.56	131.53
(1.25L60+Ç30Y)	1	13.721	11.824	13.83	7.84	21.06	18.15	131.60
	5	18.445	15.842	14.11			18.09	130.83
	10	20.729	17.922	13.54			18.21	132.37
	50	26.703	23.299	12.75			18.38	134.51
	100	29.662	25.918	12.62			18.40	134.84
	200	32.903	28.776	12.54			18.42	135.05
	400	36.459	31.905	12.49			18.43	135.19

Çizelge 4.59 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.25 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %117.14 en fazla ise %135.19 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.50) ve YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.60'da verilmiştir.

Çizelge 4.60 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.50 çelik lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1.50 çelik lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.50 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.50L60+Ç)	1	14.064	11.786	16.20	8.91	24.78	20.76	133.11
	5	18.887	15.789	16.41			20.71	132.53
	10	21.204	17.864	15.75			20.88	134.35
	50	27.290	23.231	14.87			21.09	136.80
	100	30.307	25.845	14.73			21.13	137.21
	200	33.614	28.692	14.64			21.15	137.44
	400	37.244	31.813	14.58			21.17	137.61
(1.50L60+Ç15Y)	1	13.807	11.478	16.87	8.37	24.24	20.15	140.73
	5	18.555	15.344	17.30			20.05	139.48
	10	20.848	17.374	16.67			20.20	141.33
	50	26.850	22.645	15.66			20.45	144.24
	100	29.822	25.202	15.49			20.49	144.73
	200	33.081	27.987	15.40			20.51	145.00
	400	36.655	31.035	15.33			20.53	145.20
(1.50L60+Ç20Y)	1	13.589	11.294	16.89	8.19	24.06	20.00	144.10
	5	18.273	15.078	17.48			19.86	142.36
	10	20.546	17.079	16.87			20.00	144.14
	50	26.477	22.294	15.80			20.26	147.29
	100	29.413	24.818	15.62			20.31	147.82
	200	32.626	27.565	15.51			20.33	148.14
	400	36.157	30.570	15.45			20.35	148.32
(1.50L60+Ç25Y)	1	13.650	11.431	16.26	8.01	23.89	20.00	149.58
	5	18.352	15.276	16.76			19.88	148.08
	10	20.627	17.299	16.13			20.03	149.95
	50	26.579	22.556	15.14			20.27	152.92
	100	29.515	25.104	14.94			20.32	153.49
	200	32.751	27.880	14.87			20.33	153.71
	400	36.292	30.918	14.81			20.35	153.90
(1.50L60+Ç30Y)	1	13.721	11.518	16.06	7.84	23.71	19.90	153.94
	5	18.445	15.403	16.50			19.80	152.60
	10	20.729	17.439	15.87			19.94	154.49
	50	26.703	22.722	14.91			20.17	157.41
	100	29.662	25.287	14.75			20.21	157.89
	200	32.903	28.081	14.66			20.23	158.17
	400	36.459	31.138	14.59			20.25	158.36

Çizelge 4.60 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.50 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %133.11 en fazla ise %158.36 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

4.4.3 Taşıma gücü zayıf zeminlerde (siltli ve siltli kil) çelik lif (60 mm) katkı numunelerin beton plak maliyet analizi

Çelik lif (%0.75) ve YFC katkı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.61’de verilmiştir.

Çizelge 4.61 : Çelik lif (%0.75) katkı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	$W_{8.2}$ (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%0.75 çelik lif katkı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığında ki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%0.75 Çelik Lif katkı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%0.75 çelik lif katkı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(0.75L60+Ç)	1	13.663	12.977	5.02	8.91	16.84	16.00	79.61
	5	18.537	17.625	4.92			16.02	79.80
	10	20.876	19.898	4.68			16.06	80.24
	50	26.982	25.784	4.44			16.10	80.70
	100	30.005	28.682	4.41			16.10	80.76
	200	33.315	31.854	4.38			16.11	80.81
	400	36.944	35.334	4.36			16.11	80.86
(0.75L60+Ç15Y)	1	13.411	12.576	6.23	8.37	16.31	15.29	82.67
	5	18.207	17.074	6.22			15.29	82.69
	10	20.521	19.307	5.92			15.34	83.28
	50	26.546	25.065	5.58			15.40	83.94
	100	29.522	27.892	5.52			15.41	84.05
	200	32.784	30.980	5.50			15.41	84.09
	400	36.358	34.369	5.47			15.42	84.15
(0.75L60+Ç20Y)	1	13.198	12.322	6.64	8.19	16.13	15.06	83.79
	5	17.925	16.718	6.73			15.04	83.61
	10	20.218	18.923	6.41			15.10	84.25
	50	26.177	24.600	6.03			15.16	85.00
	100	29.116	27.379	5.97			15.17	85.12
	200	32.334	30.417	5.93			15.17	85.19
	400	35.862	33.746	5.90			15.18	85.25
(0.75L60+Ç25Y)	1	13.256	12.403	6.44	8.01	15.95	14.92	86.21
	5	18.001	16.835	6.48			14.92	86.13
	10	20.302	19.047	6.18			14.97	86.72
	50	26.279	24.752	5.81			15.02	87.46
	100	29.228	27.546	5.75			15.03	87.57
	200	32.456	30.602	5.71			15.04	87.65
	400	35.997	33.950	5.69			15.04	87.70
(0.75L60+Ç30Y)	1	13.327	12.469	6.44	7.84	15.77	14.76	88.30
	5	18.095	16.927	6.46			14.75	88.27
	10	20.404	19.149	6.15			14.80	88.89
	50	26.401	24.872	5.79			14.86	89.61
	100	29.362	27.678	5.74			14.87	89.72
	200	32.606	30.747	5.70			14.87	89.79
	400	36.162	34.110	5.68			14.88	89.84

Çizelge 4.61 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %0.75 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %79.61 en fazla ise %89.89 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.00) ve YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.62’de verilmiştir.

Çizelge 4.62 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1 çelik lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1 çelik lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1L60+Ç)	1	13.663	12.507	8.46	8.91	19.49	17.84	100.27
	5	18.537	16.980	8.40			17.85	100.40
	10	20.876	19.205	8.01			17.93	101.27
	50	26.982	24.940	7.57			18.01	102.22
	100	30.005	27.755	7.50			18.03	102.37
	200	33.315	30.831	7.46			18.04	102.47
	400	36.944	34.204	7.42			18.04	102.55
(1L60+Ç15Y)	1	13.411	11.841	11.70	8.37	18.95	16.73	99.90
	5	18.207	16.035	11.93			16.69	99.39
	10	20.521	18.184	11.39			16.79	100.62
	50	26.546	23.711	10.68			16.93	102.22
	100	29.522	26.403	10.57			16.95	102.48
	200	32.784	29.340	10.51			16.96	102.61
	400	36.358	32.558	10.45			16.97	102.74
(1L60+Ç20Y)	1	13.198	11.631	11.87	8.19	18.77	16.55	101.92
	5	17.925	15.733	12.23			16.48	101.11
	10	20.218	17.854	11.70			16.58	102.33
	50	26.177	23.315	10.94			16.72	104.08
	100	29.116	25.966	10.82			16.74	104.35
	200	32.334	28.862	10.74			16.76	104.53
	400	35.862	32.029	10.69			16.77	104.64
(1L60+Ç25Y)	1	13.256	11.737	11.46	8.01	18.60	16.47	105.44
	5	18.001	15.888	11.74			16.41	104.78
	10	20.302	18.024	11.22			16.51	105.98
	50	26.279	23.518	10.51			16.64	107.65
	100	29.228	26.190	10.39			16.66	107.91
	200	32.456	29.106	10.32			16.68	108.07
	400	35.997	32.299	10.27			16.69	108.19
(1L60+Ç30Y)	1	13.327	11.834	11.21	7.84	18.42	16.35	108.67
	5	18.095	16.022	11.45			16.31	108.08
	10	20.404	18.171	10.94			16.40	109.29
	50	26.401	23.696	10.25			16.53	110.92
	100	29.362	26.386	10.14			16.55	111.18
	200	32.606	29.322	10.07			16.56	111.33
	400	36.162	32.537	10.02			16.57	111.45

Çizelge 4.62 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.00 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için

üstyapı tabaka kalınlığında en az %99.39 en fazla ise %111.45 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Farklı oranlarda çelik lif (%1.25) ve YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.63’de verilmiştir.

Çizelge 4.63 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.25 çelik lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1.25 çelik lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.25 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.25L60+Ç)	1	13.663	11.930	12.68	8.91	22.13	19.33	116.98
	5	18.537	16.162	12.81			19.30	116.65
	10	20.876	18.324	12.23			19.43	118.10
	50	26.982	23.879	11.50			19.59	119.90
	100	30.005	26.586	11.39			19.61	120.17
	200	33.315	29.543	11.32			19.63	120.35
	400	36.944	32.781	11.27			19.64	120.48
(1.25L60+Ç15Y)	1	13.411	11.519	14.11	8.37	21.60	18.55	121.60
	5	18.207	15.570	14.48			18.47	120.64
	10	20.521	17.676	13.86			18.60	122.24
	50	26.546	23.101	12.97			18.80	124.53
	100	29.522	25.735	12.83			18.83	124.91
	200	32.784	28.605	12.75			18.85	125.12
	400	36.358	31.745	12.69			18.86	125.27
(1.25L60+Ç20Y)	1	13.198	11.333	14.13	8.19	21.42	18.39	124.49
	5	17.925	15.301	14.64			18.28	123.15
	10	20.218	17.379	14.05			18.41	124.70
	50	26.177	22.746	13.11			18.61	127.15
	100	29.116	25.347	12.95			18.65	127.57
	200	32.334	28.176	12.86			18.67	127.80
	400	35.862	31.272	12.80			18.68	127.96
(1.25L60+Ç25Y)	1	13.256	11.397	14.03	8.01	21.24	18.26	127.86
	5	18.001	15.392	14.49			18.16	126.62
	10	20.302	17.480	13.90			18.29	128.19
	50	26.279	22.868	12.98			18.48	130.62
	100	29.228	25.479	12.83			18.52	131.03
	200	32.456	28.324	12.73			18.54	131.28
	400	35.997	31.435	12.67			18.55	131.44
(1.25L60+Ç30Y)	1	13.327	11.476	13.89	7.84	21.06	18.14	131.42
	5	18.095	15.507	14.30			18.05	130.32
	10	20.404	17.605	13.72			18.17	131.89
	50	26.401	23.017	12.82			18.36	134.32
	100	29.362	25.644	12.66			18.40	134.73
	200	32.606	28.504	12.58			18.41	134.95
	400	36.162	31.636	12.52			18.43	135.12

Çizelge 4.63 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.25 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %116.65 en fazla ise %135.12 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.50) ve YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.64’de verilmiştir.

Çizelge 4.64 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	$W_{8.2}$ (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.50 çelik lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1.50 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.50 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.50L60+Ç)	1	13.663	11.439	16.27	8.91	24.78	20.75	132.90
	5	18.537	15.454	16.63			20.66	131.91
	10	20.876	17.548	15.94			20.83	133.82
	50	26.982	22.950	14.95			21.08	136.60
	100	30.005	25.568	14.79			21.11	137.04
	200	33.315	28.421	14.69			21.14	137.31
	400	36.944	31.544	14.62			21.16	137.51
(1.50L60+Ç15Y)	1	13.411	11.137	16.96	8.37	24.24	20.13	140.49
	5	18.207	15.015	17.53			19.99	138.82
	10	20.521	17.060	16.86			20.16	140.76
	50	26.546	22.369	15.74			20.43	144.02
	100	29.522	24.932	15.55			20.47	144.56
	200	32.784	27.722	15.44			20.50	144.88
	400	36.358	30.771	15.37			20.52	145.09
(1.50L60+Ç20Y)	1	13.198	10.958	16.97	8.19	24.06	19.98	143.86
	5	17.925	14.753	17.70			19.81	141.73
	10	20.218	16.768	17.07			19.96	143.57
	50	26.177	22.019	15.88			20.24	147.04
	100	29.116	24.551	15.68			20.29	147.65
	200	32.334	27.301	15.57			20.32	147.98
	400	35.862	30.308	15.49			20.34	148.21
(1.50L60+Ç25Y)	1	13.256	11.091	16.33	8.01	23.89	19.99	149.36
	5	18.001	14.948	16.96			19.84	147.48
	10	20.302	16.986	16.33			19.99	149.35
	50	26.279	22.280	15.22			20.25	152.67
	100	29.228	24.835	15.03			20.30	153.24
	200	32.456	27.614	14.92			20.32	153.57
	400	35.997	30.653	14.85			20.34	153.78
(1.50L60+Ç30Y)	1	13.327	11.177	16.13	7.84	23.71	19.88	153.70
	5	18.095	15.072	16.70			19.75	151.98
	10	20.404	17.125	16.07			19.90	153.89
	50	26.401	22.446	14.98			20.16	157.19
	100	29.362	25.016	14.80			20.20	157.72
	200	32.606	27.813	14.70			20.22	158.04
	400	36.162	30.872	14.63			20.24	158.26

Çizelge 4.64 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.50 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %132.90 en fazla ise %158.26 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

4.4.4 Taşıma gücü orta sınıf (kum ve killi çakıl) zeminlerde çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin beton plak maliyet analizi

Çelik lif (%0.75) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.65’de verilmiştir.

Çizelge 4.65 : Çelik lif (%0.75) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8.2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%0.75 Çelik Lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%0.75 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%0.75 Çelik Lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(0.75L60+Ç)	1	12.962	12.304	5.08	8.91	16.84	15.99	79.50
	5	17.948	17.038	5.07			15.99	79.52
	10	20.335	19.362	4.78			16.04	80.05
	50	26.490	25.303	4.48			16.09	80.63
	100	29.520	28.212	4.43			16.10	80.72
	200	32.835	31.392	4.39			16.10	80.79
	400	36.469	34.872	4.38			16.11	80.82
(0.75L60+Ç15Y)	1	12.720	11.918	6.31	8.37	16.31	15.28	82.52
	5	17.617	16.492	6.39			15.27	82.37
	10	19.982	18.773	6.05			15.32	83.02
	50	26.058	24.592	5.62			15.39	83.85
	100	29.045	27.429	5.56			15.40	83.97
	200	32.309	30.523	5.53			15.41	84.04
	400	35.888	33.917	5.49			15.41	84.11
(0.75L60+Ç20Y)	1	12.517	11.674	6.74	8.19	16.13	15.04	83.60
	5	17.338	16.137	6.93			15.01	83.22
	10	19.682	18.392	6.56			15.07	83.96
	50	25.692	24.133	6.07			15.15	84.91
	100	28.641	26.921	6.00			15.16	85.04
	200	31.864	29.967	5.95			15.17	85.14
	400	35.395	33.297	5.93			15.17	85.20
(0.75L60+Ç25Y)	1	12.573	11.753	6.53	8.01	15.95	14.91	86.03
	5	17.414	16.253	6.67			14.89	85.75
	10	19.764	18.517	6.31			14.94	86.46
	50	25.794	24.282	5.86			15.02	87.36
	100	28.750	27.087	5.79			15.03	87.50
	200	31.986	30.147	5.75			15.03	87.58
	400	35.530	33.500	5.71			15.04	87.65
(0.75L60+Ç30Y)	1	12.642	11.816	6.53	7.84	15.77	14.74	88.12
	5	17.508	16.345	6.64			14.73	87.89
	10	19.863	18.616	6.28			14.78	88.63
	50	25.913	24.402	5.83			14.85	89.53
	100	28.885	27.219	5.77			14.86	89.66
	200	32.134	30.292	5.73			14.87	89.73
	400	35.695	33.660	5.70			14.87	89.79

Çizelge 4.65 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %0.75 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %79.50 en fazla ise %89.79 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.00) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.66’de verilmiştir.

Çizelge 4.66 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	$W_{8,2}$ (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1 Çelik Lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1 Çelik Lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1L60+Ç)	1	12.962	11.854	8.54	8.91	19.49	17.82	100.09
	5	17.948	16.398	8.63			17.81	99.89
	10	20.335	18.672	8.18			17.89	100.88
	50	26.490	24.470	7.62			18.00	102.10
	100	29.520	27.295	7.54			18.02	102.29
	200	32.835	30.376	7.49			18.03	102.40
	400	36.469	33.752	7.45			18.04	102.48
(1L60+Ç15Y)	1	12.720	11.212	11.86	8.37	18.95	16.70	99.54
	5	17.617	15.464	12.23			16.64	98.72
	10	19.982	17.656	11.64			16.75	100.04
	50	26.058	23.251	10.77			16.91	102.01
	100	29.045	25.956	10.63			16.94	102.32
	200	32.309	28.900	10.55			16.95	102.51
	400	35.888	32.121	10.50			16.96	102.63
(1L60+Ç20Y)	1	12.517	11.011	12.03	8.19	18.77	16.52	101.56
	5	17.338	15.164	12.54			16.42	100.40
	10	19.682	17.325	11.98			16.53	101.69
	50	25.692	22.857	11.03			16.70	103.85
	100	28.641	25.524	10.88			16.73	104.20
	200	31.864	28.425	10.79			16.75	104.40
	400	35.395	31.595	10.74			16.76	104.53
(1L60+Ç25Y)	1	12.573	11.113	11.62	8.01	18.60	16.44	105.07
	5	17.414	15.319	12.03			16.36	104.10
	10	19.764	17.496	11.48			16.46	105.39
	50	25.794	23.061	10.60			16.63	107.44
	100	28.750	25.745	10.45			16.65	107.77
	200	31.986	28.669	10.37			16.67	107.96
	400	35.530	31.864	10.32			16.68	108.09
(1L60+Ç30Y)	1	12.642	11.204	11.37	7.84	18.42	16.32	108.28
	5	17.508	15.453	11.74			16.26	107.42
	10	19.863	17.643	11.18			16.36	108.74
	50	25.913	23.236	10.33			16.51	110.72
	100	28.885	25.938	10.20			16.54	111.03
	200	32.134	28.882	10.12			16.55	111.22
	400	35.695	32.101	10.07			16.56	111.34

Çizelge 4.66 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.00 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %98.72 en fazla ise %111.34 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.25) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.67’de verilmiştir.

Çizelge 4.67 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.25 Çelik Lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1.25 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.25 Çelik Lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.25L60+Ç)	1	12.962	11.298	12.84	8.91	22.13	19.29	116.59
	5	17.948	15.591	13.13			19.23	115.85
	10	20.335	17.795	12.49			19.37	117.45
	50	26.490	23.416	11.60			19.57	119.65
	100	29.520	26.137	11.46			19.60	120.01
	200	32.835	29.101	11.37			19.62	120.23
	400	36.469	32.342	11.32			19.63	120.36
(1.25L60+Ç15Y)	1	12.720	10.902	14.30	8.37	21.60	18.51	121.12
	5	17.617	15.006	14.82			18.40	119.76
	10	19.982	17.150	14.17			18.54	121.44
	50	26.058	22.647	13.09			18.77	124.23
	100	29.045	25.293	12.92			18.81	124.68
	200	32.309	28.171	12.81			18.83	124.96
	400	35.888	31.316	12.74			18.85	125.13
(1.25L60+Ç20Y)	1	12.517	10.724	14.33	8.19	21.42	18.35	123.96
	5	17.338	14.742	14.97			18.21	122.28
	10	19.682	16.853	14.38			18.34	123.83
	50	25.692	22.296	13.22			18.59	126.86
	100	28.641	24.907	13.04			18.63	127.34
	200	31.864	27.747	12.92			18.65	127.64
	400	35.395	30.848	12.85			18.67	127.84
(1.25L60+Ç25Y)	1	12.573	10.785	14.22	8.01	21.24	18.22	127.33
	5	17.414	14.831	14.83			18.09	125.71
	10	19.764	16.955	14.21			18.22	127.36
	50	25.794	22.416	13.10			18.46	130.32
	100	28.750	25.039	12.91			18.50	130.82
	200	31.986	27.892	12.80			18.52	131.10
	400	35.530	31.006	12.73			18.54	131.28
(1.25L60+Ç30Y)	1	12.642	10.861	14.08	7.84	21.06	18.10	130.91
	5	17.508	14.943	14.65			17.98	129.38
	10	19.863	17.079	14.02			18.11	131.09
	50	25.913	22.565	12.92			18.34	134.04
	100	28.885	25.204	12.74			18.38	134.52
	200	32.134	28.072	12.64			18.40	134.79
	400	35.695	31.206	12.57			18.41	134.97

Çizelge 4.67 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.25 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %115.85 en fazla ise %134.97 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.50) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.68’de verilmiştir.

Çizelge 4.68 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.50 Çelik Lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1.50 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.50 Çelik Lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.50L60+Ç)	1	12.962	10.826	16.48	8.91	24.78	20.70	132.33
	5	17.948	14.893	17.02			20.56	130.83
	10	20.335	17.023	16.29			20.74	132.86
	50	26.490	22.497	15.07			21.04	136.25
	100	29.520	25.129	14.87			21.09	136.80
	200	32.835	27.991	14.75			21.12	137.14
	400	36.469	31.116	14.68			21.14	137.34
(1.50L60+Ç15Y)	1	12.720	10.535	17.18	8.37	24.24	20.08	139.84
	5	17.617	14.463	17.91			19.90	137.74
	10	19.982	16.538	17.24			20.06	139.68
	50	26.058	21.921	15.88			20.39	143.62
	100	29.045	24.498	15.65			20.45	144.26
	200	32.309	27.295	15.52			20.48	144.65
	400	35.888	30.349	15.43			20.50	144.90
(1.50L60+Ç20Y)	1	12.517	10.362	17.22	8.19	24.06	19.92	143.13
	5	17.338	14.208	18.05			19.72	140.67
	10	19.682	16.248	17.45			19.87	142.45
	50	25.692	21.574	16.03			20.21	146.62
	100	28.641	24.120	15.78			20.27	147.34
	200	31.864	26.879	15.64			20.30	147.75
	400	35.395	29.891	15.55			20.32	148.03
(1.50L60+Ç25Y)	1	12.573	10.491	16.56	8.01	23.89	19.93	148.67
	5	17.414	14.398	17.32			19.75	146.41
	10	19.764	16.464	16.69			19.90	148.28
	50	25.794	21.833	15.36			20.22	152.26
	100	28.750	24.402	15.12			20.27	152.96
	200	31.986	27.190	15.00			20.30	153.34
	400	35.530	30.234	14.91			20.33	153.61
(1.50L60+Ç30Y)	1	12.642	10.573	16.36	7.84	23.71	19.83	153.01
	5	17.508	14.519	17.07			19.66	150.86
	10	19.863	16.602	16.41			19.82	152.85
	50	25.913	21.997	15.11			20.12	156.79
	100	28.885	24.581	14.90			20.18	157.44
	200	32.134	27.387	14.77			20.21	157.82
	400	35.695	30.451	14.69			20.22	158.06

Çizelge 4.68 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.50 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %132.33 en fazla ise %158.06 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

4.4.5 Taşıma gücü iyi zeminlerde (çakıl) zeminlerde çelik lif (60 mm) katkı numunelerin beton plak maliyet analizi

Çelik lif (%0.75) ve farklı oranlarda YFC katkı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.69’da verilmiştir.

Çizelge 4.69 : Çelik lif (%0.75) katkı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%0.75 Çelik Lif katkı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%0.75 Çelik Lif katkı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%0.75 Çelik Lif katkı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(0.75L60+Ç)	1	11.841	11.212	5.32	8.91	16.84	15.95	79.04
	5	17.087	16.182	5.29			15.95	79.09
	10	19.568	18.600	4.95			16.01	79.75
	50	25.824	24.653	4.53			16.08	80.53
	100	28.872	27.582	4.47			16.09	80.65
	200	32.200	30.772	4.43			16.10	80.72
	400	35.839	34.262	4.40			16.10	80.78
(0.75L60+Ç15Y)	1	11.610	10.843	6.61	8.37	16.31	15.23	81.94
	5	16.759	15.639	6.68			15.22	81.79
	10	19.218	18.014	6.26			15.29	82.60
	50	25.397	23.950	5.70			15.38	83.70
	100	28.402	26.807	5.62			15.39	83.87
	200	31.679	29.916	5.56			15.40	83.97
	400	35.265	33.315	5.53			15.41	84.03
(0.75L60+Ç20Y)	1	11.417	10.607	7.10	8.19	16.13	14.99	82.89
	5	16.480	15.291	7.21			14.97	82.66
	10	18.920	17.633	6.81			15.03	83.47
	50	25.037	23.495	6.16			15.14	84.74
	100	28.004	26.307	6.06			15.15	84.94
	200	31.239	29.365	6.00			15.16	85.05
	400	34.780	32.705	5.97			15.17	85.12
(0.75L60+Ç25Y)	1	11.468	10.683	6.84	8.01	15.95	14.86	85.40
	5	16.556	15.403	6.97			14.84	85.16
	10	19.002	17.757	6.55			14.91	85.98
	50	25.136	23.645	5.93			15.00	87.21
	100	28.113	26.472	5.84			15.02	87.40
	200	31.359	29.545	5.78			15.03	87.51
	400	34.912	32.906	5.75			15.03	87.58
(0.75L60+Ç30Y)	1	11.534	10.744	6.85	7.84	15.77	14.69	87.48
	5	16.650	15.494	6.94			14.68	87.30
	10	19.101	17.856	6.52			14.75	88.15
	50	25.255	23.762	5.91			14.84	89.36
	100	28.245	26.601	5.82			14.86	89.56
	200	31.506	29.688	5.77			14.86	89.65
	400	35.075	33.063	5.74			14.87	89.72

Çizelge 4.69 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %0.75 çelik lif katkı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %79.04 en fazla ise %89.72 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.00) ve farklı oranlarda YFC katkı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.70’de verilmiştir.

Çizelge 4.70 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1 Çelik Lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1 Çelik Lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1L60+Ç)	1	11.841	10.780	8.97	8.91	19.49	17.74	99.17
	5	17.087	15.545	9.02			17.73	99.04
	10	19.568	17.912	8.46			17.84	100.27
	50	25.824	23.830	7.72			17.98	101.89
	100	28.872	26.675	7.61			18.01	102.13
	200	32.200	29.771	7.54			18.02	102.28
	400	35.839	33.155	7.49			18.03	102.39
(1L60+Ç15Y)	1	11.610	10.163	12.47	8.37	18.95	16.59	98.17
	5	16.759	14.628	12.72			16.54	97.61
	10	19.218	16.899	12.07			16.67	99.08
	50	25.397	22.626	10.91			16.88	101.69
	100	28.402	25.352	10.74			16.92	102.08
	200	31.679	28.311	10.63			16.94	102.33
	400	35.265	31.542	10.56			16.95	102.49
(1L60+Ç20Y)	1	11.417	9.967	12.70	8.19	18.77	16.39	100.03
	5	16.480	14.338	12.99			16.34	99.36
	10	18.920	16.571	12.42			16.44	100.68
	50	25.037	22.238	11.18			16.68	103.52
	100	28.004	24.928	10.98			16.71	103.96
	200	31.239	27.843	10.87			16.73	104.22
	400	34.780	31.024	10.80			16.75	104.38
(1L60+Ç25Y)	1	11.468	10.066	12.23	8.01	18.60	16.32	103.66
	5	16.556	14.488	12.49			16.27	103.05
	10	19.002	16.739	11.91			16.38	104.39
	50	25.136	22.436	10.74			16.60	107.10
	100	28.113	25.146	10.55			16.63	107.54
	200	31.359	28.082	10.45			16.65	107.78
	400	34.912	31.288	10.38			16.67	107.93
(1L60+Ç30Y)	1	11.534	10.155	11.96	7.84	18.42	16.21	106.90
	5	16.650	14.618	12.20			16.17	106.32
	10	19.101	16.886	11.60			16.28	107.75
	50	25.255	22.611	10.47			16.49	110.40
	100	28.245	25.337	10.30			16.52	110.80
	200	31.506	28.293	10.20			16.54	111.04
	400	35.075	31.521	10.13			16.55	111.19

Çizelge 4.70 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.00 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %97.61 en fazla ise %111.19 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.25) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.71’de verilmiştir.

Çizelge 4.71 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	$W_{8.2}$ (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.25 Çelik Lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1.25 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.25 Çelik Lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.25L60+Ç)	1	11.841	10.246	13.47	8.91	22.13	19.15	115.01
	5	17.087	14.752	13.66			19.11	114.54
	10	19.568	17.036	12.94			19.27	116.33
	50	25.824	22.789	11.75			19.53	119.28
	100	28.872	25.532	11.57			19.57	119.74
	200	32.200	28.509	11.46			19.60	120.00
	400	35.839	31.760	11.38			19.61	120.20
(1.25L60+Ç15Y)	1	11.610	9.863	15.05	8.37	21.60	18.35	119.17
	5	16.759	14.183	15.37			18.28	118.35
	10	19.218	16.393	14.70			18.42	120.08
	50	25.397	22.029	13.26			18.73	123.79
	100	28.402	24.699	13.04			18.78	124.36
	200	31.679	27.592	12.90			18.81	124.72
	400	35.265	30.747	12.81			18.83	124.94
(1.25L60+Ç20Y)	1	11.417	9.690	15.13	8.19	21.42	18.18	121.87
	5	16.480	13.929	15.47			18.11	120.96
	10	18.920	16.101	14.90			18.23	122.46
	50	25.037	21.681	13.40			18.55	126.38
	100	28.004	24.318	13.16			18.60	127.01
	200	31.239	27.173	13.02			18.63	127.39
	400	34.780	30.284	12.93			18.65	127.62
(1.25L60+Ç25Y)	1	11.468	9.749	14.99	8.01	21.24	18.06	125.29
	5	16.556	14.016	15.34			17.98	124.37
	10	19.002	16.200	14.74			18.11	125.95
	50	25.136	21.798	13.28			18.42	129.84
	100	28.113	24.450	13.03			18.47	130.50
	200	31.359	27.315	12.89			18.50	130.85
	400	34.912	30.442	12.80			18.52	131.09
(1.25L60+Ç30Y)	1	11.534	9.822	14.84	7.84	21.06	17.94	128.87
	5	16.650	14.125	15.16			17.87	128.01
	10	19.101	16.325	14.53			18.00	129.70
	50	25.255	21.948	13.09			18.30	133.57
	100	28.245	24.610	12.87			18.35	134.18
	200	31.506	27.493	12.74			18.38	134.53
	400	35.075	30.637	12.65			18.40	134.76

Çizelge 4.71 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.25 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %115.01 en fazla ise %134.76 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.50) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.72’de verilmiştir.

Çizelge 4.72 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8.2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.50 çelik lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1.50 çelik lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.50 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.50L60+Ç)	1	11.841	9.789	17.33	8.91	24.78	20.48	129.95
	5	17.087	14.075	17.62			20.41	129.15
	10	19.568	16.268	16.86			20.60	131.26
	50	25.824	21.880	15.27			20.99	135.68
	100	28.872	24.537	15.02			21.06	136.40
	200	32.200	27.413	14.87			21.10	136.82
	400	35.839	30.549	14.76			21.12	137.11
(1.50L60+Ç15Y)	1	11.610	9.507	18.11	8.37	24.24	19.85	137.13
	5	16.759	13.660	18.49			19.76	136.05
	10	19.218	15.788	17.84			19.92	137.92
	50	25.397	21.309	16.10			20.34	142.98
	100	28.402	23.914	15.80			20.41	143.83
	200	31.679	26.727	15.63			20.45	144.33
	400	35.265	29.792	15.52			20.48	144.64
(1.50L60+Ç20Y)	1	11.417	9.340	18.19	8.19	24.06	19.69	140.26
	5	16.480	13.415	18.60			19.59	139.08
	10	18.920	15.502	18.07			19.72	140.63
	50	25.037	20.966	16.26			20.15	145.94
	100	28.004	23.541	15.94			20.23	146.89
	200	31.239	26.316	15.76			20.27	147.41
	400	34.780	29.338	15.65			20.30	147.74
(1.50L60+Ç25Y)	1	11.468	9.465	17.47	8.01	23.89	19.71	145.97
	5	16.556	13.599	17.86			19.62	144.81
	10	19.002	15.715	17.29			19.76	146.49
	50	25.136	21.222	15.57			20.17	151.62
	100	28.113	23.819	15.27			20.24	152.51
	200	31.359	26.623	15.10			20.28	153.02
	400	34.912	29.675	15.00			20.30	153.32
(1.50L60+Ç30Y)	1	11.534	9.545	17.25	7.84	23.71	19.62	150.33
	5	16.650	13.714	17.63			19.53	149.17
	10	19.101	15.852	17.01			19.68	151.06
	50	25.255	21.384	15.33			20.07	156.14
	100	28.245	23.997	15.04			20.14	157.01
	200	31.506	26.817	14.88			20.18	157.49
	400	35.075	29.891	14.78			20.20	157.80

Çizelge 4.72 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.50 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %129.95 en fazla ise %157.80 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

4.4.6 Taşıma gücü çok iyi zeminlerde (kırmataş) zeminlerde çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin beton plak maliyet analizi

Çelik lif (%0.75) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.73’de verilmiştir.

Çizelge 4.73 : Çelik lif (%0.75) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8.2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%0.75 Çelik Lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%0.75 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%0.75 Çelik Lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(0.75L60+Ç)	1	11.331	10.704	5.54	8.91	16.84	15.91	78.63
	5	16.751	15.845	5.41			15.93	78.86
	10	19.279	18.311	5.02			16.00	79.61
	50	25.580	24.417	4.55			16.08	80.50
	100	28.639	27.353	4.49			16.09	80.61
	200	31.971	30.551	4.44			16.10	80.70
	400	35.616	34.044	4.41			16.10	80.75
(0.75L60+Ç15Y)	1	11.100	10.333	6.91	8.37	16.31	15.18	81.35
	5	16.421	15.304	6.81			15.20	81.55
	10	18.928	17.722	6.37			15.27	82.39
	50	25.159	23.716	5.73			15.37	83.64
	100	28.171	26.584	5.64			15.39	83.83
	200	31.453	29.698	5.58			15.40	83.94
	400	35.044	33.101	5.54			15.40	84.01
(0.75L60+Ç20Y)	1	10.907	10.094	7.45	8.19	16.13	14.93	82.19
	5	16.142	14.935	7.47			14.92	82.15
	10	18.628	17.341	6.91			15.02	83.26
	50	24.798	23.264	6.19			15.13	84.69
	100	27.775	26.086	6.08			15.15	84.89
	200	31.016	29.149	6.02			15.16	85.01
	400	34.559	32.494	5.98			15.17	85.10
(0.75L60+Ç25Y)	1	10.960	10.173	7.18	8.01	15.95	14.81	84.72
	5	16.218	15.070	7.08			14.82	84.93
	10	18.712	17.465	6.66			14.89	85.76
	50	24.897	23.411	5.97			15.00	87.14
	100	27.884	26.248	5.87			15.02	87.34
	200	31.135	29.329	5.80			15.03	87.48
	400	34.691	32.692	5.76			15.03	87.55
(0.75L60+Ç30Y)	1	11.024	10.234	7.17	7.84	15.77	14.64	86.84
	5	16.312	15.159	7.07			14.66	87.04
	10	18.811	17.564	6.63			14.73	87.92
	50	25.016	23.528	5.95			14.83	89.29
	100	28.016	26.378	5.85			14.85	89.50
	200	31.280	29.472	5.78			14.86	89.63
	400	34.854	32.850	5.75			14.87	89.69

Çizelge 4.73 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %0.75 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %78.63 en fazla ise %89.69 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.00) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.74’de verilmiştir.

Çizelge 4.74 : Çelik lif (%1.00) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8.2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1 çelik lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1L60+Ç)	1	11.331	10.269	9.37	8.91	19.49	17.66	98.28
	5	16.751	15.212	9.19			17.70	98.68
	10	19.279	17.623	8.59			17.81	99.99
	50	25.580	23.597	7.75			17.98	101.81
	100	28.639	26.452	7.64			18.00	102.07
	200	31.971	29.553	7.56			18.01	102.23
	400	35.616	32.941	7.51			18.02	102.35
(1L60+Ç15Y)	1	11.100	9.647	13.09	8.37	18.95	16.47	96.76
	5	16.421	14.303	12.90			16.51	97.19
	10	18.928	16.607	12.27			16.63	98.63
	50	25.159	22.398	10.97			16.87	101.55
	100	28.171	25.136	10.77			16.91	102.00
	200	31.453	28.100	10.66			16.93	102.26
	400	35.044	31.336	10.58			16.95	102.44
(1L60+Ç20Y)	1	10.907	9.449	13.37	8.19	18.77	16.26	98.50
	5	16.142	14.016	13.17			16.30	98.95
	10	18.628	16.279	12.61			16.41	100.23
	50	24.798	22.009	11.25			16.66	103.36
	100	27.775	24.712	11.03			16.70	103.86
	200	31.016	27.633	10.91			16.73	104.14
	400	34.559	30.818	10.83			16.74	104.33
(1L60+Ç25Y)	1	10.960	9.550	12.86	8.01	18.60	16.20	102.18
	5	16.218	14.163	12.67			16.24	102.62
	10	18.712	16.447	12.11			16.34	103.93
	50	24.897	22.207	10.80			16.59	106.95
	100	27.884	24.928	10.60			16.62	107.42
	200	31.135	27.874	10.47			16.65	107.72
	400	34.691	31.082	10.40			16.66	107.88
(1L60+Ç30Y)	1	11.024	9.639	12.56	7.84	18.42	16.10	105.49
	5	16.312	14.293	12.38			16.14	105.91
	10	18.811	16.594	11.79			16.25	107.30
	50	25.016	22.382	10.53			16.48	110.26
	100	28.016	25.118	10.34			16.51	110.69
	200	31.280	28.082	10.22			16.53	110.98
	400	34.854	31.316	10.15			16.55	111.15

Çizelge 4.74 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.00 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %96.76 en fazla ise %111.15 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.25) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.75’de verilmiştir.

Çizelge 4.75 : Çelik lif (%1.25) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	$W_{8,2}$ (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.25 çelik lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1.25 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.25 çelik lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.25L60+Ç)	1	11.331	9.731	14.12	8.91	22.13	19.01	113.39
	5	16.751	14.425	13.89			19.06	113.97
	10	19.279	16.746	13.14			19.23	115.84
	50	25.580	22.560	11.81			19.52	119.15
	100	28.639	25.314	11.61			19.56	119.64
	200	31.971	28.298	11.49			19.59	119.94
	400	35.616	31.552	11.41			19.61	120.13
(1.25L60+Ç15Y)	1	11.100	9.342	15.84	8.37	21.60	18.18	117.15
	5	16.421	13.863	15.58			18.23	117.82
	10	18.928	16.104	14.92			18.38	119.50
	50	25.159	21.801	13.35			18.72	123.57
	100	28.171	24.486	13.08			18.77	124.25
	200	31.453	27.384	12.94			18.80	124.62
	400	35.044	30.544	12.84			18.82	124.87
(1.25L60+Ç20Y)	1	10.907	9.167	15.95	8.19	21.42	18.00	119.71
	5	16.142	13.612	15.67			18.06	120.44
	10	18.628	15.812	15.12			18.18	121.89
	50	24.798	21.455	13.48			18.53	126.18
	100	27.775	24.105	13.21			18.59	126.87
	200	31.016	26.967	13.05			18.62	127.29
	400	34.559	30.081	12.96			18.64	127.54
(1.25L60+Ç25Y)	1	10.960	9.228	15.81	8.01	21.24	17.88	123.14
	5	16.218	13.696	15.55			17.94	123.81
	10	18.712	15.911	14.97			18.06	125.35
	50	24.897	21.572	13.35			18.40	129.63
	100	27.884	24.234	13.09			18.46	130.34
	200	31.135	27.109	12.93			18.49	130.76
	400	34.691	30.239	12.83			18.52	131.01
(1.25L60+Ç30Y)	1	11.024	9.301	15.62	7.84	21.06	17.77	126.78
	5	16.312	13.805	15.37			17.83	127.46
	10	18.811	16.035	14.76			17.95	129.10
	50	25.016	21.720	13.18			18.29	133.34
	100	28.016	24.397	12.92			18.34	134.04
	200	31.280	27.285	12.77			18.37	134.43
	400	34.854	30.434	12.68			18.39	134.68

Çizelge 4.75 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.25 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %113.39 en fazla ise %134.68 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

Çelik lif (%1.50) ve farklı oranlarda YFC katkılı numunelere ait maliyet analizi Çizelge 4.76’da verilmiştir.

Çizelge 4.76 : Çelik lif (%1.50) katkılı numunelere ait maliyet analizi.

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1.50 Çelik Lif katkılı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² . 1 cm maliyeti (₺)	%1.50 Çelik Lif katkılı numunelerin 1 m ² . 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1.50 Çelik Lif katkılı numunelerin, kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1.50L60+Ç)	1	11.841	9.789	17.33	8.91	24.78	20.48	129.95
	5	17.087	14.075	17.62			20.41	129.15
	10	19.568	16.268	16.86			20.60	131.26
	50	25.824	21.880	15.27			20.99	135.68
	100	28.872	24.537	15.02			21.06	136.40
	200	32.200	27.413	14.87			21.10	136.82
	400	35.839	30.549	14.76			21.12	137.11
(1.50L60+Ç15Y)	1	11.610	9.507	18.11	8.37	24.24	19.85	137.13
	5	16.759	13.660	18.49			19.76	136.05
	10	19.218	15.788	17.84			19.92	137.92
	50	25.397	21.309	16.10			20.34	142.98
	100	28.402	23.914	15.80			20.41	143.83
	200	31.679	26.727	15.63			20.45	144.33
	400	35.265	29.792	15.52			20.48	144.64
(1.50L60+Ç20Y)	1	11.417	9.340	18.19	8.19	24.06	19.69	140.26
	5	16.480	13.415	18.60			19.59	139.08
	10	18.920	15.502	18.07			19.72	140.63
	50	25.037	20.966	16.26			20.15	145.94
	100	28.004	23.541	15.94			20.23	146.89
	200	31.239	26.316	15.76			20.27	147.41
	400	34.780	29.338	15.65			20.30	147.74
(1.50L60+Ç25Y)	1	11.468	9.465	17.47	8.01	23.89	19.71	145.97
	5	16.556	13.599	17.86			19.62	144.81
	10	19.002	15.715	17.29			19.76	146.49
	50	25.136	21.222	15.57			20.17	151.62
	100	28.113	23.819	15.27			20.24	152.51
	200	31.359	26.623	15.10			20.28	153.02
	400	34.912	29.675	15.00			20.30	153.32
(1.50L60+Ç30Y)	1	11.534	9.545	17.25	7.84	23.71	19.62	150.33
	5	16.650	13.714	17.63			19.53	149.17
	10	19.101	15.852	17.01			19.68	151.06
	50	25.255	21.384	15.33			20.07	156.14
	100	28.245	23.997	15.04			20.14	157.01
	200	31.506	26.817	14.88			20.18	157.49
	400	35.075	29.891	14.78			20.20	157.80

Çizelge 4.76 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1.50 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için üstyapı tabaka kalınlığında en az %129.95 en fazla ise %157.80 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

5. SONUÇLAR

Yürütülen tez çalışmasında, iki farklı çelik lif (35 ve 60 mm) ve %15, %20, %25 ve %30 oranlarında YFC kullanılarak üretilen beton numuneleri üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Öncelikle, bağlayıcı olarak çimento ve çimentonun ikamesi olarak aynı oranlarda YFC kullanılarak kontrol numuneleri üzerinde araştırma yapılmıştır. Çalışmanın devamında, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 oranlarında çelik lif (60 mm) ile güçlendirilmiş ve aynı oranlarda YFC ile ikame edilmiş betonlar üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında elde edilen sonuçlar analiz edilerek optimum YFC oranı tespit edilmiştir. Optimum %20 YFC oranı ile çelik lif (35 mm) benzer şekilde aynı oranlarda kullanılarak üretilen beton numuneleri üzerinde çalışma yapılmıştır. Hazırlanan bu karışımlara ait işlenebilirlik, çökme, eğilmede çekme, yarmada çekme, donma-çözülme, aşınma direnci, elektriksel özdirenç, iletkenlik ve ısınma, SEM ve XRD analizi testleri yapılmıştır. Test sonuçları esas alınarak AASHTO 1993 ve FAARFIELD beton kaplama tasarım yöntemleri ile farklı taşıma gücüne sahip taban zeminleri ile farklı trafik yükleri altında beton plak (kaplama) kalınlık ve karayolu tasarımı için maliyet hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan testlerden elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

Lifsiz, YFC katkılı numunelerde;

- ✓ Çimento yerine ağırlıkça %0, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında YFC kullanılması ile kontrol karışımına göre daha işlenebilir ve akıcı bir beton karakteristiği elde edilmiştir.
- ✓ YFC ikamesi ile 7 gün kür süresine tabi tutulmuş numunelerin basınç dayanımında azalma, 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarında ise artış meydana gelmiştir. Kontrol betona kıyasla en yüksek artışlar, 28 ve 90 günlük numuneler için sırasıyla %14.30 ve %15.90 olarak %20 YFC oranında elde edilmiştir. Kür süresinin uzamasıyla basınç dayanımlarında da artışın devam ettiği görülmüştür.
- ✓ YFC katkısı ile birlikte 7, 28 ve 90 günlük numunelerin tamamının eğilmede çekme dayanımlarında kontrol numunesine göre artış meydana gelmiştir. En yüksek artışlar, 28 ve 90 günlük numuneler için sırasıyla %6.42 ve %9.03 olarak %20 YFC oranında meydana

gelmiştir. Kür süresinin YFC katkılı numunelerin eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

✓ YFC ilaveli 7 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımları kontrol betonuna (K-Ç) kıyasla, (K-Ç15Y) ve (K-Ç20Y) numunelerinde artış, (K-Ç25Y) ve (K-Ç30Y) numunelerinde ise azalışa neden olmuştur. Ancak, 28 ve 90 günlük küre sahip numunelerin tamamının yarmada çekme dayanımlarında kontrol numunesine kıyasla artış meydana gelmiştir. Kontrol betonuna kıyasla en yüksek artışlar, 28 ve 90 günlük numuneler için sırasıyla, %8.17 ve %6.26 olarak %20YFC oranından elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, kür süresinin artmasıyla birlikte YFC katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımlarının 28 ve 90 günlük kür esas alındığında arttığı görülmüştür.

✓ Lif katkısız en düşük aşınma miktarının %15 YFC katkılı beton numunesinde gerçekleştiği, YFC ikamesi %15'den fazla olan numunelerde, YFC ikamesi arttıkça aşınma miktarlarının da arttığı görülmüştür. Bu artışın YFC ilaveli numunelerinin daha gözenekli bir yapıya sahip olması ve buna bağlı donma neticesinde betonda oluşan iç gerilimin daha düşük olmasının rol oynadığı düşünülmektedir.

✓ Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımı kapsamında; farklı trafik yükleri altında ve farklı taşıma gücüne sahip zeminler üzerine inşa edilecek YFC katkılı beton numunelerin beton kaplama kalınlıklarını azalttığı tespit edilmiştir.

✓ YFC katkılı beton dayanımlarının pik yaptığı %20 YFC oranı dikkate alındığında, beton karışımında çimento yerine bu oranda YFC ikamesi ile hem kullanılacak çimento maliyetinde hem de çimentonun oluşturduğu karbon salınımında azalma meydana geleceği, bununla birlikte; YFC'nin çevreye vermiş olduğu fiziki zararın ortadan kalkacağı ve ekonomiye bir katma değer sağlayacağı değerlendirilmiştir.

Farklı oranlarda çelik lif katkılı ve bağlayıcısı çimentonun yerine farklı oranlarda YFC ile ikame edilen (Lif+YFC katkılı-birleşik etki) numunelerde;

✓ Taze ve sertleşmiş betonun birim ağırlıklarında YFC miktarı arttıkça azalma meydana geldiği görülmüştür.

✓ Çelik lif (35 ve 60 mm) katkısı ile numunelerin çökme değerinde azalma meydana gelmiş, karışımın işlenebilirlik yeteneği azalmıştır.

✓ Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin 7 gün kür süresi sonunda basınç dayanımında azalma, 28 ve 90 gün kür süresine tabi numunelerin basınç dayanımında ise %20 YFC oranına kadar artış, bu değerden sonra azalma meydana gelmiştir. Optimum %20 YFC

ilaveleli lifli (35 mm) numunelerin 7, 28 ve 90 gün kür süresi sonunda ise basınç dayanımında artış meydana geldiği görülmüştür.

✓ Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı tüm kür sürelerinde %20 YFC oranı için pik yapmış, bu optimum değerden sonra azalma meydana gelmiştir. %20 YFC katkılı ve çelik lif (35 mm) ilaveli numunelerde ise 7, 28 ve 90 günlük kür süresi sonunda çelik lif hacmi arttıkça eğilmede ve yarmada çekme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir.

✓ Çelik lif (60 mm) katkılı numunelerin donma-çözülme sonucunda ağırlık kaybı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, ortalama %0.5-2.5 oranında ağırlık kaybında azalış olduğu, en büyük artışın ise %15 YFC oranında olduğu tespit edilmiştir.

✓ Çelik lif (60 mm) ilaveli betonların aşınma kaybı incelendiğinde, çelik lif miktarının artışı ile aşınma kaybının azaldığı tespit edilmiştir.

✓ Karayolu ve havaalanı tasarımında, farklı trafik yükleri altında taşıma gücü farklı taban zemininde betona farklı oranlarda çelik lif ve YFC ilave edilmesiyle, beton yol kaplama tasarımı için istenen basınç, eğilmede ve yarmada çekme dayanımları ile donma çözülme direnci şartlarının sağlandığı ve rijit yol üstyapı tabaka kalınlıklarının azaldığı görülmüştür.

✓ Farklı oranlarda çelik lif ilaveli (60 mm) numunelerin %20 YFC oranında beton kaplama kalınlığının en az olduğu görülmüştür. Çelik lif miktarı arttıkça kaplama kalınlığının azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde çelik lif (35 mm) katkısı ile beton kaplama kalınlığında azalma olduğu tespit edilmiştir.

YFC katkısız, lifli (60 mm) numunelerde;

✓ Beton karışımlarının içerisindeki çelik lif oranı arttıkça çökme değerinin azaldığı, bir başka deyişle işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür. Liflerle takviye edilen betonlarda lif hacminin artması ile işlenebilirliğin özellikle %0.75 çelik lif oranından sonra oldukça azaldığı ve bu azalmayla birlikte çökme derecesinin %1.50 çelik lif oranında S3 kıvam sınıfına geldiği tespit edilmiştir.

✓ Çelik lif miktarına bağlı olarak beton numunelerin basınç dayanımları değerlerinde bütün kür süreleri için kontrol numunesine kıyasla azalma meydana gelmiştir. Basınç dayanımındaki bu azalmalar 28 günlük küre tabi (0.75L60+Ç), (1L60+Ç), (1.25L60+Ç) ve (1.50L60+Ç) numuneleri için sırasıyla %2.07, %4.16, %8.33 ve %12.49 oranlarında meydana gelmiştir.

- ✓ Beton numunelerin eğilme dayanımı değerlerinde kontrol betonuna göre artış meydana gelmiştir. Betonun 28 günlük kür süresi dikkate alındığında, eğilme dayanımındaki bu artışın kontrol betona kıyasla, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 çelik lif katkılı numuneler için sırasıyla %9.77, %17.48, %28.37 ve %39.10'a kadar yüksek oranda olduğu görülmüştür. Bu durum, karışımlara ilave edilen çelik liflerin matristeki çatlakları köprüleyerek çatlak başlamasını ve büyümesini engellemesi ve geciktirmesi ile açıklanmıştır.
- ✓ Çelik lif ilavesi tüm numunelerde kırılma tokluğu değerleri artmıştır. Eğilme tokluğu değerleri en yüksek %1.50 çelik lif içeren numunelerde meydana gelmiştir. Beton içindeki çelik lifler yüksek çekme dayanımları ve beton matrisle arasındaki aderans nedeni ile betonun tokluğunu artırdıkları değerlendirilmiştir.
- ✓ Çelik lif katkısı ile beton numunelerin yarmada çekme dayanımı değerlerinde kontrol betonuna göre artış meydana gelmektedir. 28 günlük yarmada çekme dayanımındaki bu artışın kontrol betona kıyasla %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50 çelik lif katkılı numuneler için sırasıyla %10.96, %21.71, %25.50 ve %29.08'a kadar olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, uzun liflerin kısa liflere kıyasla çimento matris ile aderansının daha yüksek olması ve betonda oluşan çekme gerilmelerini kısa liflere kıyasla daha etkili aktarmaları olarak değerlendirilmiştir.
- ✓ Numunelerin donma-çözülme işleminde 28 çevrim sonucunda oluşan kütle kaybının 0.50 kg/m^2 'den küçük olması şartını sağladığı tespit edilmiştir. Numuneler içerisinde en fazla kütle kaybının %1.50 çelik lif içeren (1.50L+Ç) betonlarda meydana geldiği görülmüştür. Kontrol numunesine göre kütle kayıplarının (0.75L60+Ç), (1L60+Ç), (1.25L60+Ç) ve (1.50L60+Ç) numuneleri için sırasıyla, %0.88, %0.29, %0.88 ve %2.34 oranında azaldığı dolayısıyla donma-çözülme dirençlerinin arttığı görülmektedir. Bunun, çelik lif katkılı numunelerin aderans dayanımının daha fazla olması sebebiyle donma neticesinde betonda oluşan iç gerilimi daha iyi kısıtlamasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.
- ✓ Çelik lif takviyeli karışımlara ait elektriksel özdirenç ve mekanik özellikler birlikte değerlendirildiğinde, lifsiz referans numunelere kıyasla, karışımlara çelik lif ilave edilmesi ile numunelerin elektriksel özdirençlerinin azalması ve iletkenliklerinin artmasının yanında mekanik özellikleri ile eğilme performansının da iyileştiği görülmüştür.
- ✓ Çelik lif ilaveli betonların aşınma kaybı incelendiğinde, çelik lif miktarının artışı ile aşınma kaybının azaldığı tespit edilmiştir.

✓ Karayolu ve havaalanı tasarımı kapsamında, farklı trafik yükleri altında taşıma gücü farklı taban zemininde betona çelik lif ilave edilmesiyle, beton yol kaplama tasarımı için istenen basınç, eğilme, çekme dayanımı ile donma-çözülme direnci şartlarının sağlandığı, rijit yol üstyapı tabaka kalınlıklarının azaldığı, buna karşın yapım maliyetlerinin arttığı görülmüştür. Ancak, çelik lif katkısıyla betonun çatlak gelişimine karşı direncinin ve sünekliğinin artması, eğilme dayanımı ve tokluğunun üzerinde önemli bir etkisinin olması ve dolayısıyla beton yolların hizmet ömürleri boyunca çoğunlukla zorlu çevre koşullarına maruz kalmaları sebebiyle uzun vadede fayda/maliyet analizinin ekonomik olarak olumsuz bir etkisinin olmayacağı değerlendirilmektedir.



KAYNAKLAR

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials.** (1993). Washington, D.C.
- Abut, Y., Yildirim, S. T., Ozturk, O. & Ozyurt, N. (2022).** A comparative study on the performance of RCC for pavements casted in laboratory and field, *International Journal Pavement Engineering*, 23, 1777–1790.
- Acun, S. (2000).** *Yüksek dayanımlı beton üretiminde dizayn parametresi olarak lifsel katkıların irdelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ağar, E., Sütaş, İ. & Öztaş, G. (1998).** *Beton Yollar*, İstanbul.
- Ağar, E., Sütaş, İ. & Öztaş, G. (1999).** *Rijit Beton Yol Üstyapısı*, İstanbul.
- Ahmad, S. & Umar A. (2018).** Rheological and mechanical properties of self-compacting concrete with glass and polyvinyl alcohol fibres. *J. Build. Eng.*, 17 (2018) 65-74.
- Ahmmad, A., Sallal, A. & Mustafa Ö. (2019).** Experimental investigation on the effect of steel fibers on the flexural behavior and ductility of high-strength concrete hollow beams, *Hindawi Advances in Civil Engineering*, 13.
- Al-Baijat, H. & Sarireh, M. (2019).** The use of fine blast furnace slag in improvement of properties of concrete, *Open Journal of Civil Engineering*, 9 (2), 95-105.
- Altun, F. & Aktaş, B. (2011).** Çelik tel katkılı hafif betonun eğilme tokluğunun incelenmesi, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (2).
- Altun, F., Haktanir, T. & Ari, K. (2007).** Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams. *Construction and Building Materials*, 21 (3), 654-661.
- Aral, M. (2006).** *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı-bir optimum tasarımı*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arslan, A. (1993).** Çelik Lifli Betonların Özellikleri ve Kullanım Potansiyeli, *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, sayı:369, 29-33.
- Arslan, F. (2014).** *Taş mastik asfalt karışımlarda istanbul çevresindeki cebeci dolomitli kireçtaşı, gölcük - kumtaşı ve karatepe - bazalt kullanımının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ASTM C618 (2019).** *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, Retrieved from http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE_PAGES/D4354.htm
- Avcı, B. E. (2013).** *Çelik tel donatı ve atık lastik tozu katkılı rijit üstyapıların mukavemet yönünden analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bakış, A. (2018).** Atık çelik lif takviyeli pomza içeren reaktif pudra betonun rijit kaplama imalatında kullanımı, *Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (1), 63-71.

- Baradan, B., Yazıcı, H. & Aydın, S. (2015).** *Beton*. İzmir.
- Battal, Ö. (2012).** *Beton yollarda yüzeydeki sürtünme katsayısı kaybının yapay sinir ağlarıyla belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.
- Bayasi, Z. & Soroushian, P. (1991).** Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 88, 129-134.
- Bayramov, F. (2004).** *Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı*, (Doktora Tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bentur A. & Mindess, S. (2007).** *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. New York, USA.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S. T. & Çapar, Ö. F. (2010).** Yüksek fırın cürufunun inşaat sektöründeki yeri ve önemi, 2. *Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi Bildirileri*, sayfa: 506-513, Mersin.
- Bilim, C. (2006).** *Yüksek fırın cüruf katkısının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği*, (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Boğa, A. R. (2017).** Harçların mekanik ve elektriksel iletkenlik özelliklerine karbon lifi ve çelikhane cürufu kullanımının etkisi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17 (3), 1066-1075.
- Boztepe, M. (2011).** *Beton yollardaki farklı yüzey tiplerinin gürültü düzeyi üzerindeki etkisinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Brooks, J. J., Johari, M. A. M. & Mazloom, M. (2000).** Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 22 (2), 293-301.
- Can, Ö., Durmuş, G., Subaşı, S., Yıldız, K. & Arslan, M. (2009).** Lif katkılı betonların aşınma direnci üzerindeki etkileri. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
- CAN/CSA-A23.2-25A-14 (2014).** *Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars*, Canadian Standards Association.
- Cao, M. L., Li, L. & Xu, L. (2017).** Relations between rheological and mechanical properties of fiber reinforced mortar. *Comput. Concr.*, 20 (4), 449-459.
- Chen, B., Wu, K. & Yao, W. (2004).** Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites, *Cement and Concrete Composites*, 26 (3), 291-297.
- Cleven, S., Raupach, M. & Matschei, T. (2021).** Electrical resistivity of steel fibre-reinforced concrete-influencing parameters, *Materials*, 14 (5), 3408-3420.
- Çakıroğlu, M. A., Kasap, S. & Erenoğlu, E. (2011).** Betona değişik geometrik formlarda çelik lif eklenmesinin basınç dayanımına etkisi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 Mayıs 2011, Turkey.
- Çetin, O. (2009).** *Beton Yollarda Yeni Teknolojiler Silindire Sıkıştırılabilen Beton*, (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Çiçek, N. (2021).** *Karma çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonun elektriksel öz direnci üzerinde lif kombinasyonu, lif hacmi ve mikro lif boyunun etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Darter, M. I., Von Quintus, Y. J. & Jiang, E. B. (1997).** Catalog of recommended design features, National Research Council *Project*, (pp.1-32). Washington/USA.
- Dayı, M. (2006).** *Doğal ve yapay puzolanların kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Desai, C. S. (2001).** *User's manual for the DSC-2D code for the 2002 design guide*, (Doctoral Thesis). Institute of Structural Concrete, Arizona State University.
- Doğan, O. (2006).** *Esnek üst yapı devlet yollarındaki bozulmaların bulanık mantık ile tahmini* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Düzgün, O. A. (2001).** *Çelik lifler ile üretilen hafif betonların bazı özelliklerinin araştırması* (Yüksek Lisans Tezi), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ecevit, O. (2007).** *Karayollarında rijit üst yapı uygulamaları ve tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi), İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Edis, E. (2007).** *Asfalt ve beton kaplamalı yolların maliyet yönünden karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi), Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.
- Ekincioglu, Ö. (2003).** *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı—bir optimum tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Er, A. (2011).** *Özel öğütülmüş lastik atığı içeren asfalt betonunun performans özelliklerinin belirlenmesi* (Doktora Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Erdoğan, T. (2003).** *Beton*, Ankara.
- Eren, Ö. & Çelik, T. (1997).** Çengelli çelik liflerin yüksek mukavemetli betona etkisi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, 3. Teknik Kongre, ODTÜ, Ankara, 267-276.
- Ersoy, H. Y. (2001).** *Kompozit Malzeme*, İstanbul.
- FAA, AC No: 150/5320-6G** *Standardized method of reporting airport pavement strength-pcn, u.s.department of transportation federal aviation administration.* (2021). U.S.A.
- Fernandez, L. & Malhotra, V. M. (1990).** Mechanical properties, abrasion resistance and chloride permeability of concrete incorporating granulated blast furnace slag. *Cement, Concrete and Aggregates*, 12 (2), 87-100.
- Fernandez, L. & Malhotra, V. M. (1990).** Mechanical properties, abrasion resistance and chloride permeability of concrete incorporating granulated blast-furnace slag. *Cement, Concrete and Aggregates*, 12 (2), 87-100.
- Fındık, F. S. (2005).** *Karayolu esnek üst yapıları alttemel tabakasının stabilizasyonunda hafif agregaların kullanılabilirliği* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- Gopalakrishnan, K., Ceylan, H., Kim, S., Yang, S. & Abdulla, H. (2015).** Electrically conductive mortar characterization for self-heating airfield concrete pavement mix design, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8 (5), 315-324.
- Gökçe, O. (2015).** Tünellerde çelik hasır yerine çelik tel kullanımının mekanik açıdan araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Gülen, F. (2015).** Yüksek fırın cürufu üretimindeki standart sapmanın beton basınç dayanımı üzerindeki etkisi ve girdilere göre 90-günlük dayanımın modellenmesi, 9. *Ulusal Beton Kongresi*, Antalya, 16-18 Nisan 2015.
- Gündeşli, U. (2008).** Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Hannant, D. J. (1987).** *Fiber Cements and Fiber Concrete*. UK, Wiley.
- Hasan, M., Nejad, F. M., Sobhani, J. & Chini, M. (2021).** Mechanical and durability properties of steel fibre reinforced concrete overlay: Experimental results and numerical simulation, *Constructions and Building Materials*.
- Holschemacher, K., Mueller, T. & Ribakov, Y. (2010).** Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design*, 31 (5), 2604-2615.
- Huang, B. S., Chen, X. W. & Shu, X. (2009).** Effects of electrically conductive additives laboratory-measured properties of asphalt mixtures. *Journal of Materials In Civil Engineering*, 21 (10), 612-617.
- Humad A. M., Kothari, A., Provis, J. L. & Cwirzen, A. (2019).** The effect of blast furnace slag ratio on setting, strength, and shrinkage of alkali-activated pastes and concretes. *Materials*, 6 (9), 1-10.
- Ilcalı, M., Tayfur, S., Özen, H. & Sönmez, E. K. (2001).** *Asfalt ve Uygulamaları*. İstanbul.
- Jawad, A., Rebeca, M. G., Maciej S., Jesús de, P. G., Riadh, M. M. A. & Enas, E. H. (2021).** Effects of steel fibers (SF) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) on recycled aggregate concrete, *Materials*, 24 (14).
- Jin-Young, L., Jin-Seok, C., Tian-Feng, Y., Young-Soo, Y., & Denis, M. (2019.)** Comparing properties of concrete containing electric arc furnace slag and granulated blast furnace slag, *Materials*, 12 (9), 1-11.
- Juhong, H., Mengmeng, Z., Jingyu C. & Xiaofang, L. (2019).** Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 209, 577-591.
- Katlav, M. (2022).** Çelik lifli KYB ile üretilen V-şekilli betonarme katlanmış plak elemanların kalınlığı üzerinde farklı lif kombinasyonunun etkisi (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Katlav, M., Turk, K. & Turgut. P. (2022).** Research into effect of hybrid steel fibers on the V-shaped RC folded plate thickness, *Structures*, v (44), 665-679.
- Kazemi, M. T., Golsorkhtabar, H., Beygi, M. H. A. & Gholamitabar, M. (2017).** Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of

fracture and size effect methods. *Construction and Building Materials*, 142, 482–489.

- Khazanowich, L., Yu, H. T., Rao, S., Galasova, K., Shats, E. & Jones, R., (2000).** *ISLAB2000: Finite Element Analysis Program for Rigid and Composite Pavements*, USA.
- Kına, C. (2019).** *Yüksek Performanslı Kendiliğinden Yerleşen Karma Lifli Beton Geliştirilmesi* (Doktora Tezi). İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Kızıllığın, B. (2009).** *Çelik ve karbon lifli harçların sülfat etkilerine dayanıklılığının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kök, E. (2008).** *Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve türkiye uygulamaları* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Köksal, F., Eyyubov, C. & Özcan, D. M. (2002).** Çelik tel içeriğinin betonun mekanik özelliklerine etkisi. *5. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, İstanbul*, 25-27 Eylül, s. 169-179.
- Krieger, B. (1999).** *Current state of development of low-noise concrete pavement: Road and Highway*, USA.
- Kuloğlu, N., Özdemir, M. A. & Kök, B. V. (2007).** Havaalanı Esnek Üstyapı Tasarım Metotlarının Değerlendirilmesi, *7. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul.
- Lee, J. H. (2017).** Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, 168, 216-225.
- Lin, S. K. & Wu, C. H. (2021).** Improvement of bond strength and durability of recycled aggregate concrete incorporating high volume blast furnace slag, *Materials*, 14 (13), 3708.
- Lofgren, I. (2005).** *Fibre-reinforced concrete for industrial construction*. (Doctoral Thesis), Chalmers University of Technology, Sweden.
- Mauricio, P., Lambert, H. & Andrés, C. (2022).** Experimental evaluation of load transfer efficiency of non-dowelled concrete pavements, *GRADEVINAR*, 74.
- Megat Johari, M. A., Brooks, J. J., Kabir, S. & Rivard, P. (2011).** Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete, *Constr. Build. Mater.*, 25, 2639–2648.
- Meng, W. N. & Khayat K. H. (2017).** Improving flexural performance of ultra-high performance concrete by rheology control of suspending mortar. *Compos. Part B*, 117, 26–34.
- Min, K. D., Yeol, Y. & Rishi, G. (2021).** Machine learning-based prediction for compressive and flexural strengths of steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 266, Part B, 121117.
- Nataraja, M. C. Dhang, N., & Gupta, A. P. (1999).** Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement & Concrete Composites*, 21 (5-6), 383-390.
- Neville, A. M. (1995).** *Properties of Concrete*, UK.

- Newman, J. & Choo, B. S. (2003).** *Advanced Concrete Technology*, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Nili, M. & Afroughsabet, V. (2010).** Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 37, 879-886.
- Okur, F. (2008).** Havaalanı Üstyapı Tasarım Yöntemleri (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Osborne, G. J. (1999).** Durability of portland blast-furnace slag cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 21 (2), 11-21.
- Ozyurt, N., Mason, T. O. & Shah, S. P. (2007).** Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs. *Cement Concrete Composite*, 29 (2), 70-79.
- Öner, A. & Akyüz, S. (2007).** An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Composites*, 29 (2), 505-514.
- Öztürk, O. & Özyurt, N. (2022).** Sustainability and cost-effectiveness of steel and polypropylene fiber reinforced concrete pavement mixtures, *Journal of Cleaner Production*, 17 (1).
- Pan, P., Wu, S., Xiao, F., Pang, L. & Xiao, Y. (2015).** Conductive Asphalt Concrete: A Review On Structure Design, Performance, And Practical Applications, *Journal Of Intelligent Material Systems and Structures*, 26 (7), 755-769.
- Pektaş, M. R. (2015).** *Silindirle sıkıştırılabilen yol betonlarının kalıcılık özellikleri* (Yüksek Lisans Tezi). Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Pfeifer, L. (2001).** *Beton kaplamanın asıl şartnamesi ve taşıma gücü tasarımı için bir sistem*, Almanya.
- Pierre, R. (2000).** Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRFC): An overview, *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes*, Lyon, France, September 13-15.
- Pigeon, M. & Regourd, M. (1989).** Freezing-thawing durability of three cements with various granulated blast furnace slag contents, *3rd Int. Confr. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 2(5), 979-997, Trondheim.
- Prasanna, P. K., Srinivasu, K. & Ramachandra, A. (2021).** Strength and durability of fiber reinforced concrete with partial replacement of cement by Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Materials Today: Proceedings*.
- Rodrigues, A. L. M. V., Mendes, Á. Á. F., Gomes, V., Battagin, A. F., Saade, M. R. M. & Da Silva, M. G. (2022).** Environmental and mechanical evaluation of blended cements with high mineral admixture content. *Structural Materials*, 9, 1-11.
- Qian, C. X. & Stroeven, P. (2000).** Development of hybrid polypropylene-stell fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 63-69.
- Sahmaran, M. & Yurtseven, A. & Yaman, I. O. (2005).** Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete, *Building and Environment*, 40 (3), 1672- 1677.

- Salami, E. (2009).** *Çelik liflerin farklı dayanıma sahip betonların mekanik özelliklerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Sarı, M. (2013).** Farklı tipteki liflerin betonun mekanik davranışına etkisi (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sekban, İ. (2007).** *Çelik lif katkısının tekrarlı yük etkisindeki geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların davranışlarına etkisinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), K.T.Ü., Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon.
- Sertbaş, B. (2006).** Kendiliğinden yerleşen betonlarda polipropilen lif kullanımının işlenebilirliğe etkisi (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sethuraman, M. K., Siva, A., Erick, I. & Saavedra, F. (2020).** Mechanical and flexural performance of self-compacting concrete with natural fiber, *Revista De La Construcción*, 19 (2).
- Silva, M. A., Pepe, M., Andrade, R. G. M., Pfeil, M.S. & Toledo Filho, R. D. (2017).** Rheological and mechanical behavior of high strength steel fiber-river gravel self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 150, 606-618.
- Sirijaroonchai, K., El-Tawil, S. & Parra-Montesinos G. (2010).** Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading. *Cement Concrete Composite*, 32 (1), 62–72.
- Sivasundaram, V. & Malhotra, V. M. (1992).** Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag, *ACI Mater. J.*, (89), 554–563.
- Song, P. S. & Hwang, S. (2004).** Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18 (2), 669–673.
- Soroka, I. (1993).** *Concrete in Hot Environments* (Doctoral Thesis). National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa.
- Süme, E. (2016).** *Geri dönüşüm argegasının beton yol kaplamasında kullanılabilirliği* (Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Tabak, V. (2004).** *Çelik lifli betonda lif ve lif boy/çap oranlarının değişiminin betonun mekanik özelliklerine etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Tang, Z., Li, Z., Qian, J. & Wang, K. (2005).** Experimental study on deicing performance of carbon fiber reinforced conductive concrete. *Journal of Materials Science & Technology*, 21 (1), 113-117.
- Tanrıverdi, T. (2013).** *Silis dumanı ve ince kumun poroz kaplama betonuna etkilerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.
- Tanyıldızı, M. M. (2010).** *AASHTO metodunda rijit üstyapı beton kaplama kalınlığına etki eden parametrelerin irdelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Açar A. Ş. & Yerlikaya, M. (2005).** Çelik tel donatılı betonların performansa dayalı tasarımı, 6. *Ulusal Beton Kongresi*, 33-44, İstanbul.
- Taşdemir, M. A., Taşdemir, C., Özbek, E., & Altay, B. (2000).** YFC inceliğinin betonun özelliklerine ve mikroyapısına etkisi. *Çimento ve Beton Dünyası*, 4 (24), 19-36.
- Tatlı, B. (2004).** *Esnek ve rijit üstyapıların performans maliyetlerinin karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi (2019).** Ankara.
- TCK Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi (2019).** Ankara.
- THBB (2003).** Beton yollar, *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 427 (2), 38-44.
- Tokyay, M. & Erdoğan, K. (1997).** Cürüflü çimentoların gözden geçirilmesi ve durum raporu, *TÇMB*, Ankara.
- Tokyay, M. (2003).** Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar. *TÇMB*, Ankara.
- Topçu, İ. B. (2006).** *Beton Teknolojisi*. Eskişehir.
- Türk, K., Çiçek, N., Katlav M. & Turğut P. (2022).** Karma çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonun elektriksel direnci. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10 (2), 482-494.
- Türk, K. & Turğut, P. (2021).** *Karayolu ve Havaalanı Pistlerindeki Kar ve Buzlanmanın Önlenmesinde Kullanılan Isınabilen Karma Lifli Kendiliğinden Yerleşen Beton Plak*, Türk Patent ve Marka Kurumu, Ekim 2021.
- Türk K., Katlav M. & Turğut P. (2022).** Karma lif takviyeli KYB karışımlarının işlenebilirlik ve mühendislik özelliklerinin araştırılması, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11 (2), 400-410.
- Turk, K., Oztekin, E. & Kına, C. (2019).** Self-compacting concrete with blended short and long fibres: experimental investigation on the role of fibre blend proportion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, sayfa:1-14.
- Turk, K., Bassurucu, M. & Bitkin, R. E. (2021).** Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber. *Construction and Building Materials*, 266, 120944.
- Turk, K., Kına, C. & Oztekin, E. (2020).** Effect of macro and micro fiber volume on the flexural performance of hybrid fiber reinforced SCC. *Advances in Concrete Construction*.
- Turk, K. & Nehdi, M. L. (2021).** Flexural toughness of sustainable ECC with high-volume substitution of cement and silica sand. *Construction and Building Materials*, 2021;270.
- TS 10513 (1992).** Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS 6365 EN 1262 (2005).** Yüzey aktif maddeler-Çözeltilerin veya dispersiyonların pH değerlerinin tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS 781 ISO 758 (1998).** Sanayide kullanılan sıvı kimyasal ürünler - 20°C'da yoğunluk tayini. *Türk Standardı*, Ankara.

- TS EN 1008 (2003).** Beton-karma suyu-numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 1097-1 (2011).** Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (mikro-Deval). *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 1097-2 (2000).** Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler, Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 1097-6 (2012).** Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 12350-2 (2019).** Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 12350-6 (2019).** Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 12390-13 (2021).** Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 13: Basınç altında sekant elastisite modülünün tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 12390-3 (2019).** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 12390-4 (2019).** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 4: Basınç dayanımı - Deney makinelerinin özellikleri. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 12390-5 (2021).** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 12390-6 (2010).** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 1367-2 (2010).** Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 1367-4 (2009).** Agregaların ısı ve bozunma özellikleri için deneyler - Bölüm 4: Kuruma çekmesinin tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 14889-1 (2006).** Lifler – Betonda kullanım için – Bölüm 1: Çelik lifler – Tarifler, özellikler ve uygunluk. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 197-1 (2012).** Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 480-10 (2010).** Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Deney yöntemleri - Bölüm 10: Suda çözünabilir klorür muhtevası tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 480-12 (2008).** Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Deney metotları - bölüm 12: Alkali muhtevasının tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 480-8 (2012).** Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için- Deney metotları- Bölüm 8: Katı madde muhtevası tayini. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 933-1 (2012).** Agregaların geometrik özellikleri için deneyler, Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-eleme metodu. *Türk Standardı*, Ankara.
- TS EN 933-3 (2012).** Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - Yassılık endeksi. *Türk Standardı*, Ankara.

- TS EN 933-9+A1 (2014).** Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 9: İnce tanelerin tayini - Metilen mavisi deneyi. *Türk Standardı*, Ankara.
- TSE CEN/TS 12390-9 (2012).** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 9: Donma çözülme direnci-Yüzeysel kabuk atma (yüzeysel yıpranma). *Türk Standardı*, Ankara.
- Tunç, A. (2003).** *Havaalanı Mühendisliği ve Uygulamaları*, Ankara.
- Tunç, A. (2004).** *Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları*, Ankara.
- Tunç, A. (2007).** *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Ankara.
- Uğurlu, A. (1999).** *Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton*, Ankara.
- Umar, F. & Ağar, E. (1991).** *Yol Üstyapısı*. İstanbul.
- Url-1** <<http://web.shgm.gov.tr/tr/kurumsal/4547-istatistikler>>, data retrieved 31.09.2022.
- Url-2** <<http://www.pavementinteractive.org>>, data retrieved 31.09.2022.
- Uygunoğlu T., Ünal, O., & Gençel, O. (2006).** Çelik liflerin beton basınç ve eğilme özelliklerine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 23-30
- Ünal, O. (1994).** *Isıl işlem uygulamasının lifli beton özelliklerine etkisi*. (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T., & Gençel, O. (2007).** Çelik liflerin beton basınç ve eğilme özelliklerine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 25-30.
- Üstümkol, F. N. E. (2006).** *Endüstriyel atıkların esnek yol üstyapısında kullanılabilirliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Wainwright, P. J. & Ait-Aider, H. (1995).** The Influence of cement source and slag additions on the bleeding of concrete. *Cement and Concrete research*, 25 (7), pp.1445-1456.
- Wainwright, P. J. & Rey, N. (2000).** The influence of ground granulated blastfurnace slag (ggbs) additions and time delay on the bleeding of concrete. *Cement and Concrete*, 22 (2000), 253-257.
- Wu, F., Li, H. & Yang, K. (2021).** Effects of mechanical activation on physical and chemical characteristics of coal-gasification slag, *Coatings*, 11, pp. 902.
- Xi, Y. & Olsgard, P. J. (2000).** Effects of deicing agents (magnesium chloride and sodium chloride) on corrosion of truck components, *Colorado Department of Transportation*, 12 (3), 171-183.
- Yaprak, H. (2004).** Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun süper akışkanlaştırıcı katkılı beton özelliklerine etkisi, *Beton 2004 Kongresi, Turkey*.
- Yazıcı, Ş. & Baradan, B. (1995).** Uçucu kül katkılı yüksek dayanımlı beton. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, Bildiriler Kitabı*, 59-71, Ankara.
- Yazıcı, Ş. (2017).** Çelik lif boyu ve kullanım oranının çelik lifli betonun özelliklerine etkisi. *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*. (ISITES2017, Baku - Azerbaijan).

- Yeau, K. Y. & Kim, E. K. (2005).** An experimental study on corrosion resistance of concrete with blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 35, 1391-1399.
- Yerlikaya, M. (2003).** Çelik tel donatılı betonların deprem etkisi altında davranışları. *Kocaeli Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, sayfa:302-304.
- Yiğiter, H. (2002).** *Yüksek performanslı betonların süneklik özelliklerinin araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İzmir.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet Mahmut TANYILDIZI

ÖĞRENİM DURUMU :

Lisans :1997, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans :2010, Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalı
Doktora :2022, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- (2003-Devam) Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK)'nde İstihkam Subayı olarak görev yapıyor.

YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZİNDEN VE DİĞER ARAŞTIRMALARDAN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.)

- **Geçkil T., Tanyıldızı M. M. & İnce C. B. (2022).** Investigation of the benefit-cost relationship of using blast furnace slag added concretes as road pavement on soils with weak bearing strength, *Gradevinar, (SCI-Expanded) (Paper ID:3570-2022-Accept)*
- **Geçkil T., Tanyıldızı M. M. & İnce C. B. (2022).** Physical, rheological and microstructural properties of waste LDPE and TEOA modified bitumens, *Journal of the Chinese Institute of Engineers, 45/6 - 477/487 (SCI-Expanded).*
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M. & İnce, C. B. (2021).** Yüksek fırın cürufu ile stabilize edilmiş killi bir zeminin rijit kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (27), 158-170.*
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M. & İnce, C. B., & Yıldırım E. S. (2020).** Influence of a clay ground stabilized with blast furnace slag on flexible road pavement thickness and cost, *Naturengs, 1(2), 17-31.*
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M. & Yıldırım E. S. (2020).** Yüksek fırın cürufu ile stabilize edilmiş killi bir zeminin yol esnek üstyapı tabaka kalınlıklarına ve maliyetine etkileri, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32 (2) , 509-520.*
- **Tanyıldızı, M. M. & Geçkil, T. (2019).** Zemin taşıma gücünün rijit ve esnek üstyapıların kalınlıklarına ve maliyetlerine etkisi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 31 (2), 399-406.*
- **Tanyıldızı, M. M. & Geçkil, T. (2019).** AASHTO metodunda rijit ve esnek üstyapıların projelendirilmesinde kullanılan parametrelerin incelenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31 (1), 187-194.*
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M. & Yıldırım, E. S. (2020).** Yol altındaki killi bir zeminin uçucu kül ile iyileştirilmesinin karayolu üstyapısına ve maliyetine etkileri, *Savunma Bilimleri Dergisi, (38), 1-21.*

- **Geçkil T., Tanyıldızı M. M. & İnce C. B. (2022).** Investigation of the usage of fiber concrete with blast furnace slag (BFS) additives as road pavement on very weak bearing strength soil. *8th International Black Sea Coastline Countries Scientific Research Conference*, (pp. 298-308). Sofia, Bulgaria, August 29-30.
- **Geçkil T., Tanyıldızı M. M. & İnce C. B. (2022).** The effect of blast furnace slag-additive concretes on road pavement thickness for different base soils. *8th International Black Sea Coastline Countries Scientific Research Conference*, (pp. 309-324). Sofia, Bulgaria, August 29-30.
- **Geçkil T., Tanyıldızı M. M. & İnce C. B. (2021).** Effect of microsilica additive on the properties of asphalt, *2nd International Baku Conference On Scientific Research*, April 28-30, 2021, Baku, AZERBAIJAN.
- **Geçkil T., İssi, S., İnce C. B. & Tanyıldızı M. M. (2021).** Effects of pırına on the stability of hot mixed asphalt pavements, *Euro Asia 8th. International Congress On Applied Sciences*, March 15-16, 2021 Tashkent, Uzbekistan.
- **Geçkil T., İnce C. B., Tanyıldızı M. M. & Tüzün E. (2021).** Nanosilika katkısının bitümün fiziksel özelliklerine etkisi, *International European Conference On Interdisciplinary Scientific Researches-III*, January 15-16, 2021/Comrat State University/Comrat, Moldavia.
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M., & Yıldırım E. S. (2019).** Kireç ile güçlendirilmiş killi bir zeminin rijit ve esnek üstyapıların kalınlıklarına ve maliyetlerine etkisi, *III. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi – Mühendislik*, Nevşehir, Turkey.
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M., & Yıldırım E. S. (2019).** Uçucu kül ile dayanımı artırılmış killi bir zeminin yol üstyapısına etkileri, *I. Uluslararası Bilim ve İnovasyon Kongresi*, 26-29 Ağustos 2019, Pamukkale, Denizli, Türkiye.
- **Kuloğlu, N., Kök, B. V., Yılmaz, M. & Tanyıldızı, M. M. (2011).** AASHTO metodunda rijit üstyapı kaplama kalınlığına etki eden parametrelerin incelenmesi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.