



Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)

Cilt 9 - Sayı 2: 516-548 / Mart 2026
(Volume 9 - Issue 2: 516-548 / March 2026)

ZAYIF ZEMİNLERDE YFC VE ÇELİK LİFLİ BETON YOLLARIN İLK YAPIM MALİYETİ VE CO₂ EMİSYONUNA ETKİSİ

Mehmet Mahmut TANYILDIZI¹, Bahadır KARABAŞ^{2*}

¹National Defence University, Land Non-Commissioned Officer Vocational School Directorate, 10185, Balıkesir, Türkiye

²Inönü University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 44280, Malatya, Türkiye

Özet: Bu çalışmada, Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ve çelik lif ile üretilen betonların, taşıma kapasitesi son derece zayıf olan plastik kil zeminler üzerinde beton yol kaplaması olarak kullanılabilirliği ile kaplama kalınlığı ve maliyet üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, ağırlıkça %0, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 oranlarında çelik lif içeren ve çimento ikamesi olarak ağırlıkça %0, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında YFC kullanılan 25 farklı beton serisi hazırlanmıştır. Numuneler, 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda basınç, eğilme ve çekme dayanımı deneylerine tabi tutulmuş ve sonuçlar kontrol numunesi referans alınarak yorumlanmıştır. Değerlendirme neticesinde çelik lif ilaveli numunelerin AASHTO 1993 yardımıyla beton kaplama kalınlıkları hesaplanmış ve kontrol betonu ile karşılaştırılarak maliyet analizi yapılmıştır. Deneyler neticesinde, kontrol numunelerinde YFC katkısı ile basınç dayanımlarının arttığı, çelik lif katkılı numunelerde az da olsa basınç dayanımının azaldığı, eğilme ve çekme dayanımlarının çelik lif katkısı ile artış eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. ASHTO 1993 tasarım yöntemi kullanılarak yapılan beton kaplama kalınlığı hesaplamalarında, taşıma kapasitesi oldukça düşük olan plastik kil zeminler üzerine inşa edilecek beton yol kaplamaları için, YFC katkılı-lifsiz numunelerin beton kaplama kalınlığını %1,58–3,38 oranında azalttığı, bunun sonucunda maliyetin %7,51–14,16 oranlarında azaldığı, çelik lif katkılı numuneler için beton kaplama kalınlığının %4,35–18,66 aralığında azaldığı, ancak çelik lif kullanımının toplam birim maliyet içindeki payını artırması nedeniyle maliyetlerde belirgin bir yükselme eğiliminin ortaya çıktığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, ilk yapım esnasında hesaplanan CO₂ emisyonlarının da, lif kullanımı ve proje trafiğine bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yüksek fırın cürufu, Rijit üstyapı, Çelik lif, AASHTO 1993 tasarım metodu, Maliyet analizi

Effect of GGBFS and Steel Fiber-Reinforced Concrete Pavements on Initial Construction Cost and CO₂ Emissions over Weak Subgrades

Abstract: In this study, the applicability of concretes produced with Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and steel fibers as concrete pavement on highly weak plastic clay soils, and their effects on pavement thickness and cost, were evaluated. In this context, 25 different concrete mixtures were prepared with steel fiber contents of 0%, 0.75%, 1.00%, 1.25%, and 1.50% by weight and GGBFS replacing cement at 0%, 15%, 20%, 25%, and 30% by weight. The specimens underwent compressive, flexural, and tensile strength tests at 7, 28, and 90 days of curing, and the outcomes were evaluated with respect to the control specimen. Based on the evaluation, pavement thicknesses of the steel fiber-reinforced specimens were calculated using AASHTO 1993 and compared with the control concrete to perform a cost analysis. The experiments revealed that the compressive strengths of the control specimens increased with the addition of GGBFS, while compressive strength slightly decreased in specimens containing steel fibers; flexural and tensile strengths tended to increase with the addition of steel fibers. According to concrete pavement thickness calculations performed using the AASHTO 1993 design method, for concrete pavements to be constructed on very low-bearing-capacity plastic clay soils, the GGBFS-added, fiberless specimens reduced pavement thickness by 1.58%–3.38%, resulting in a cost reduction of 7.51%–14.16%. For mixtures containing steel fibers, the concrete pavement thickness decreased in the range of 4.35%–18.66%; however, an upward trend in total construction costs was observed due to the increase in the share of steel fibers within the overall unit cost. Similarly, the CO₂ emissions calculated during initial construction were also found to increase, depending on fiber use and projected traffic.

Keywords: Blast furnace slag, Rigid pavement, Steel fibre, AASHTO 1993 design method, Cost analysis

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Inönü University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 44280, Malatya, Türkiye

E mail: karabasbaha@gmail.com (B. KARABAŞ)

Mehmet Mahmut TANYILDIZI  <https://orcid.org/0000-0001-5992-2665>

Bahadır KARABAŞ  <https://orcid.org/0000-0003-0416-9121>

Gönderi: 24 Aralık 2025

Kabul: 28 Ocak 2026

Yayınlanma: 15 Mart 2026

Received: December 24, 2025

Accepted: January 28, 2026

Published: March 15, 2026

Cite as: Tanyıldızı, M. M., & Karabaş, B. (2026). Effect of GGBFS and steel fiber-reinforced concrete pavements on initial construction cost and CO₂ emissions over weak subgrades. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 9(2), 516–548.

1. Giriş

Son yıllarda beton teknolojisinde görülen hızlı gelişime paralel olarak, betonun basınç, çekme, eğilme vb. diğer özelliklerini artırabilmek için betonun bileşenlerine ikame edilecek çeşitli elementlerin, beton yapımında

kullanılabilecek katkı maddelerinin ve betonun dayanımına etkisi araştırma konusu olmuştur. Yapılan bu çalışmalar ışığında, fiber donatı, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb. katkıların beton yol kaplamalarında kullanımı artarak devam etmektedir. Çevresel kirlenmeye neden



olan bu kömür kaynaklı atık cürufurların şehir içi ve kırsal yollarda, otoyollarda, beton üretiminde, sivil ve askeri havaalanı pistlerinde puzolan malzeme olarak kullanılması günümüz şartlarında ağır taşıt trafik yükleri sebebiyle bir zorunluluk haline gelmiştir. Özellikle YFC'nin, beton bileşimindeki maliyeti en yüksek bileşenlerden biri olan çimentonun yerine ikame edilebilme miktarının belirlenmesi maliyet etkinliği açısından faydalı olmaktadır. Ayrıca, betonun yük taşıma kapasitesi özelliklerinin artırılması maksadıyla değişik kimyasallar ile birlikte çeşitli türlerde çelik lifler de kullanılmaktadır. Beton bileşenlerine çelik lif katılması ile çatlak oluşumu düşük, enerji yutma kapasitesi daha yüksek, kırılma oluşumu esnasında daha sünek davranış gösterebilen malzemeler ortaya çıkmaktadır. Karayolu üstyapıları; çevresel etkiler ile artan trafik yüklerine maruz kalan alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan sistemlerdir. Üstyapılar, maruz kaldıkları yükler karşısındaki davranışları ve kullanılan malzeme türüne bağlı olarak rijit ve esnek üstyapılar olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmaktadır. Kaplama yapımında portland çimentosu kullanılan yapılara beton yol, inşasında bağlayıcı olarak asfalt kullanılan yapılar ise esnek yol olarak tanımlanmaktadır (Tunç, 2001; Geçkil vd., 2021, Geçkil vd., 2025a, Karabaş, 2025;).

Proje trafiği yüksek beton yol üstyapıların tasarımında; esas alınan tasarım süresi boyunca kaplamanın maruz kalacağı trafik yükünü emniyetli ve güvenli bir şekilde alt tabakalara iletirken büyük deformasyonlar oluşturmayacak şekilde beton kaplama kalınlığının hesaplanması ve üstyapıda kullanılacak malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir (Bayrak, 2007; KBYÜPR, 2019; Geçkil vd., 2024; Geçkil vd., 2025b).

Çelik lif katkılı betonların en yaygın kullanım yerlerinden biri, elastik zemin üzerine inşa edilen beton plaklardır. Gerilmeleri daha geniş bir alana yaymaları ve mikro çatlak oluşumu sırasında köprüleme etkisi göstermeleri nedeniyle çelik lifler, kırılma beton davranışını daha sünek ve dayanıklı bir yapıya dönüştürmektedir. Bu sayede betondaki gerilme dağılımı değişmekte ve yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde artmaktadır (Topçu,

2006; Holschemacher vd., 2010). Çelik lifli betonlarla ilgili yapılmış farklı araştırmalarda; lif katkılı betonların basınç dayanımı üzerinde ± 25 etkisi olduğu, çekme ve basınç dayanımındaki etkisinin eğilme dayanımındaki etkisinden daha az olduğu, normal betonlara göre eğilme dayanımının %50'ye kadar, çekme dayanımının da daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Arslan, 1993; Uğurlu, 1999; Düzgün, 2001; Erdoğan, 2003; Sekban, 2007; Gökçe, 2015). Benzer şekilde betonda çimentonun ikamesi olarak kullanılan YFC ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda; YFC'nin çimento ile %20 ikamesine kadar basınç dayanımını artırdığı, çekme mukavemetlerinin geleneksel betonlar ile karşılaştırıldığında, kıyaslanabilecek ya da biraz daha düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir (Fernandez ve Malhotra, 1990).

Bu çalışmada, yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak, çimentonun ikamesi olarak ağırlıkça %0, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 oranlarında çelik lif ve %0, %15, %20, %25 ve %30 YFC kullanılarak üretilen betonların, plastik kil gibi taşıma gücü çok zayıf zeminler için beton yol kaplamalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu doğrultuda üretilen betonlara basınç, eğilme ve çekme dayanımı deneyleri uygulanmış; elde edilen sonuçlar doğrultusunda betonların karayolu beton yol kaplamalarında kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Ayrıca, çelik lifli ve çimento ikameli YFC'nin beton yol kaplamalarında AASHTO 1993 tasarım yöntemi yardımıyla beton yol kaplama kalınlıkları belirlenerek kontrol numunelerine göre güncel maliyetleri hesaplanmıştır. Ayrıca, ilk yapım esnasında meydana gelen CO₂ emisyonları hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Bu bakımdan çalışmamızın literatüre katkıda bulunacak nadir çalışmalardan olabileceği değerlendirilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çimento

Çalışmamızda TS EN 197-1 (2012a) ile uyumlu CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu tercih edilmiştir. Kullanılan çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler		Kimyasal Özellikler (%)		Basınç Dayanımı (%)	
Priz Başlangıcı	155 dk	SiO ₂	19,41	2 Günlük	38,60
Priz Sonu	235 dk	Al ₂ O ₃	4,50	7 Günlük	57,40
Hacim Sabitliği	1,00 mm	Fe ₂ O ₃	3,49	-	-
Özgül Yüzey	3.720,00 cm ² /gr	CaO	63,09	-	-
Özgül Ağırlık	3,08 gr/cm ³	MgO	1,10	-	-
-	-	SO ₃	3,20	-	-
-	-	Kızdırma Kaybı	3,80	-	-
-	-	Çözünmeyen Kalıntı	0,80	-	-
-	-	Serbest Kireç	1,90	-	-

2.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Çalışma kapsamında kullanılan YFC, Çimento ile ağırlıkça ikame edilerek kullanılmıştır. Kullanılan YFC'ye ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2'de, YFC'ye ait görünüm ise Şekil 1'de sunulmuştur.

2.3. Agregalar

Çalışmada kullanılan agregalar; kırma kum (0-5 mm) ile kırma taş (5-11 mm ve 11-22 mm) olmak üzere üç farklı

fraksiyon halinde sınıflandırılmıştır. Beton numunelerinin üretiminde, 0-5 mm boyutlu kırma kum %22, 5-11 mm boyutlu kırma taş %38 ve 11-22 mm boyutlu kırma taş %40 oranlarında kullanılmıştır. Agregalara ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3'te ve karışımın granülometri eğrisi Şekil 2'de standartlara uygun olarak aşağıdaki gibi verilmiştir (TS EN 933-1, 2012b).

Tablo 2. YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

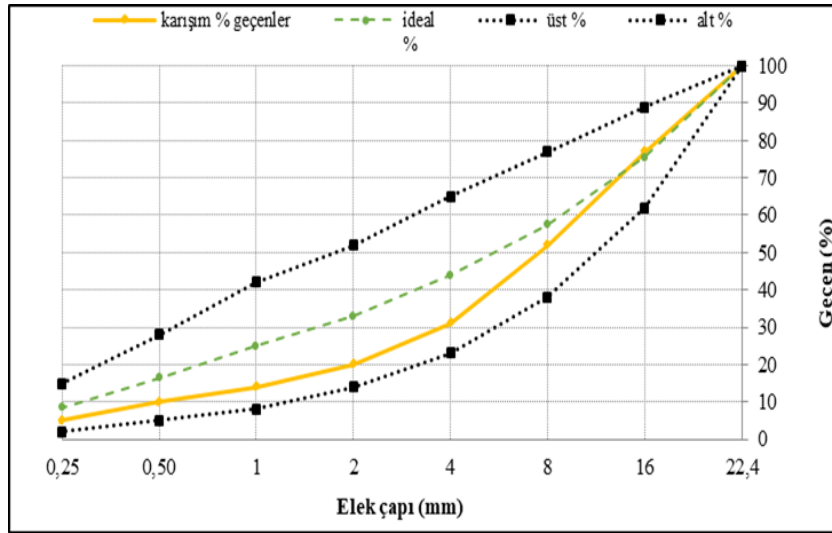
Kimyasal Özellikler (%)		Fiziksel Özellikler (%)	
SiO ₂	34,01	Nem Muhtevası	% 0,10
Al ₂ O ₃	11,95	Özgül Ağırlık	2,90 g/cm ³
Fe ₂ O ₃	1,18	Özgül Yüzey (Blaine)	4.417 cm ² /g
CaO	31,65	45 mm elek bakiye	% 0,010
MgO	8,51	90 mm elek bakiye	% 0
SO ₃	0,61	-	-
Na ₂ O	0,52	-	-
Mn ₂ O ₃	3,58	-	-
K ₂ O	0,71	-	-
TiO ₂	1,32	-	-
S	0,47	-	-
Cl	0,014	-	-



Şekil 1. Çalışma kapsamında kullanılan YFC.

Tablo 3. Çalışma kapsamında kullanılan agregaya ait kimyasal ve fiziksel özellikler

Özellikler	0-5 mm	5-11 mm	11-22 mm	Standart
Su emme (%)	1,40	0,70	0,40	≤ 2,5 (TS EN 1097-6)
Özgül ağırlık (kg/m ³)	2,77	2,79	2,80	-
İri agregaların parçalanmaya karşı direnci (%) (Micro Deval Aşınma Direnci)	-	18,00	18,00	≤ 25 (TS EN 1097-2)
Hacim kararlılığı-kuruma büzülmesi (%)	0,022	0,022	0,022	≤ 0,075 (TS EN 1367-4)
Alkali silika reaksiyonu (%)	0,030	0,030	0,030	≤ 0,10 (CSA23.2 25A)



Şekil 2. Agrega karışımının granülometri eğrisi.

2.4. Karışım Suyu

Beton numunelerinin üretiminde kullanılan su, şehir şebekesinden temin edilen içme suyu niteliğindedir.

2.5. Kimyasal Katkı

Çelik lif ilavesi nedeniyle işlenebilirliği azalan taze betonun işlenebilirliğini artırmak ve yüksek performans elde etmek amacıyla, su/çimento oranı 0,40 olan beton karışımlarında hiper akışkanlaştırıcı, bağlayıcı miktarının %1,34'ü oranında kullanılmıştır. TS 781 (1998) standardına göre kimyasal katkıların 20 °C'de özgül ağırlıklarının 1,08–1,12 g/cm³ aralığında olması gerektiği belirtilmektedir. Bu çalışmada kullanılan hiper akışkanlaştırıcının 20 °C'deki özgül ağırlığı 1,11 g/cm³ olarak belirlenmiştir.

2.6. Çelik Lif

Çalışmada beton numunelerinde kullanılan çelik liflerin uzunluğu 60 mm, çapı 0,90 mm olup boy/çap oranı 65'tir. Metalik renkte, parlak ve yapıştırılmış özellikte olan çelik liflerin çekme dayanımı 1.150 N/mm²'dir. Çelik liflere ait teknik özellikler Tablo 4'te, kullanılan çelik lifin görünümü ise Şekil 3'te sunulmuştur.

Tablo 4. Çelik lifin özellikleri

Özellikler	Açıklama
Uzunluğu (mm)	60
Çapı (mm)	0,90
Narinlik	65
Tel Çekme Dayanımı (N/mm ²)	1.150,00
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	7,85
Standartlar	TS EN 14889-1



Şekil 3. Çalışma kapsamında kullanılan çelik lif.

2.7. Beton Karışımların Hazırlanması

Bu çalışmada üretilen betonlarda CEM I 42,5 R tipi çimento, 0–5 mm, 5–11 mm ve 11–22 mm dane dağılımına sahip agregalar, şebeke suyu, 0,90 mm çapında ve 60 mm uzunluğunda iki ucu kancalı çelik lifler ile YFC kullanılmıştır. Beton karışımlarında su/çimento oranı 0,40 olarak sabit tutulmuş; çelik lif oranı ağırlıkça %0, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50, YFC oranı ise ağırlıkça %0, %15, %20, %25 ve %30 olacak şekilde betona ilave edilmiştir. Öncelikle beş adet kontrol numunesi betonu tasarlanmıştır. Üretilen kontrol betonları ile karışımlara verilen kodların anlamları Tablo 5'de verilmiştir.

Çelik lif ile birlikte bağlayıcı olarak çimento ve çimentonun belirli oranlarda YFC ile ikame edildiği toplam 25 adet ek beton numunesi tasarlanmıştır. Çelik lif katkısı ile üretilen betonlar ile karışımlara verilen kodların anlamları Tablo 6'da verilmiştir.

Üretilen kontrol ve lifli betonların 1 m³ için gerekli olan beton karışım oranları Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'deki oranlar için izlenen adımlar Şekil 4'de gösterilmiştir.

Tablo 5. Üretilen kontrol betonu karışımlarına verilen kodlar ve anlamları

Karışım Kodu	Karışıma Verilen Kodun Anlamı
(K-Ç)	Çelik lif içermeyen ve yalnızca çimento kullanılan kontrol beton numunesi
(K-Ç15Y)	Çelik lif içermeyen ve çimentonun %15 YFC ikameli beton numunesi
(K-Ç20Y)	Çelik lif içermeyen ve çimentonun %20 YFC ikameli beton numunesi
(K-Ç25Y)	Çelik lif içermeyen ve çimentonun %25 YFC ikameli beton numunesi
(K-Ç30Y)	Çelik lif içermeyen ve çimentonun %30 YFC ikameli beton numunesi

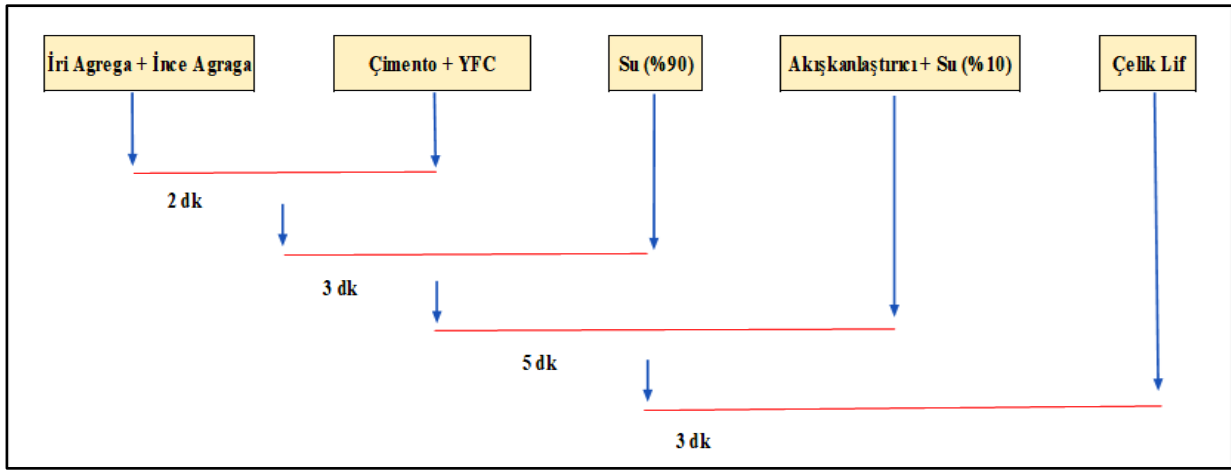
Tablo 6. Çelik lif katkısı ile üretilen betonlar ile karışımlara verilen kodların anlamları

Karışım Kodu	Karışıma Verilen Kodun Anlamı
(0,75L+Ç)	%0,75 çelik lif katkılı ve bağlayıcısı çimento olan beton numunesi
(0,75L+Ç15Y)	%0,75 çelik lif içeren ve çimentonun %15 YFC ikameli beton numunesi
(0,75L+Ç20Y)	%0,75 çelik lif içeren ve çimentonun %20 YFC ikameli beton numunesi
(0,75L+Ç25Y)	%0,75 çelik lif içeren ve çimentonun %25 YFC ikameli beton numunesi
(0,75L+Ç30Y)	%0,75 çelik lif içeren ve çimentonun %30 YFC ikameli beton numunesi
(1L+Ç)	%1 çelik lif katkılı ve bağlayıcısı çimento olan beton numunesi
(1L+Ç15Y)	%1 çelik lif içeren ve çimentonun %15 YFC ikameli beton numunesi
(1L+Ç20Y)	%1 çelik lif içeren ve çimentonun %20 YFC ikameli beton numunesi
(1L+Ç25Y)	%1 çelik lif içeren ve çimentonun %25 YFC ikameli beton numunesi
(1L+Ç30Y)	%1 çelik lif içeren ve çimentonun %30 YFC ikameli beton numunesi
(1,25L+Ç)	%1,25 çelik lif katkılı ve bağlayıcısı çimento olan beton numunesi
(1,25L+Ç15Y)	%1,25 çelik lif içeren ve çimentonun %15 YFC ikameli beton numunesi
(1,25L+Ç20Y)	%1,25 çelik lif içeren ve çimentonun %20 YFC ikameli beton numunesi
(1,25L+Ç25Y)	%1,25 çelik lif içeren ve çimentonun %25 YFC ikameli beton numunesi
(1,25L+Ç30Y)	%1,25 çelik lif içeren ve çimentonun %30 YFC ikameli beton numunesi
(1,50L+Ç)	%1,5 çelik lif katkılı ve bağlayıcısı çimento olan beton numunesi
(1,50L+Ç15Y)	%1,5 çelik lif içeren ve çimentonun %15 YFC ikameli beton numunesi
(1,50L+Ç20Y)	%1,5 çelik lif içeren ve çimentonun %20 YFC ikameli beton numunesi
(1,50L+Ç25Y)	%1,5 çelik lif içeren ve çimentonun %25 YFC ikameli beton numunesi
(1,50L+Ç30Y)	%1,5 çelik lif içeren ve çimentonun %30 YFC ikameli beton numunesi

Tablo 7. Karışım oranları

Karışım Kodu	Bağlayıcılar (kg/m ³)		Agrega (kg/m ³)			Çelik Lif (kg/m ³)	Diğer
	Çimento	YFC	(0-5) mm Agrega	(5-11) mm Agrega	(11-22) mm Agrega		
(K-Ç)	450	0	410	709	746	0	
(K-Ç15Y)	382,50	67,50	409	707	744		
(K-Ç20Y)	360	90	409	707	744		
(K-Ç25Y)	337,50	112,50	409	706	743		
(K-Ç30Y)	315	135	409	706	743		
(0,75L+Ç)	450	0	406	701	738	58,88	
(0,75L+Ç15Y)	382,50	67,50	405	699	736		
(0,75L+Ç20Y)	360	90	405	699	736		
(0,75L+Ç25Y)	337,50	112,50	404	698	735		
(0,75L+Ç30Y)	315	135	404	698	735		
(1L+Ç)	450	0	404	698	735	78,50	*
(1L+Ç15Y)	382,50	67,50	403	697	733		
(1L+Ç20Y)	360	90	403	696	733		
(1L+Ç25Y)	337,50	112,50	403	696	732		
(1L+Ç30Y)	315	135	402	695	732		
(1,25L+Ç)	450	0	403	695	732	98,13	
(1,25L+Ç15Y)	382,50	67,50	402	694	730		
(1,25L+Ç20Y)	360	90	401	693	730		
(1,25L+Ç25Y)	337,50	112,50	401	693	729		
(1,25L+Ç30Y)	315	135	401	692	729		
(1,50L+Ç)	450	0	401	693	729	117,75	
(1,50L+Ç15Y)	382,50	67,50	400	691	728		
(1,50L+Ç20Y)	360	90	400	691	727		
(1,50L+Ç25Y)	337,50	112,50	400	690	727		
(1,50L+Ç30Y)	315	135	399	690	726		

*Bütün karışımlar için su 180 kg/m³, akışkanlaştırıcı 6 kg/m³ ve su/bağlayıcı oranı (%) 0,4.



Şekil 4. beton karışım numunelerinin hazırlanmasında izlenen yöntem.

2.8. Rijit Üst Yapısı Tasarımı Yapılması

Karayolu beton yol (rijit üstyapı) tasarımında temel amaç, proje tasarım ömrü boyunca etkili olan trafik yüklerini, aşırı deformasyon ve çatlak oluşumuna izin vermeden güvenli bir biçimde taşıyabilecek üstyapı tabakalarının kalınlıklarını belirlemek ve bu tabakaları oluşturan malzemelerin mühendislik özelliklerini tanımlamaktır. Bu çerçevede, rijit üstyapı performansının değerlendirilmesinde 8,2 tonluk standart eşdeğer tek dingil yükü tekrar sayısının (W_{8,2}) beton kaplama performansı üzerindeki etkisi esas alınmış ve bu ilişkiyi ifade eden AASHTO 1993 bağıntısı eşitlik 1’de sunulmuştur. Beton kaplama kalınlığı (d) ise eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır (AASHTO, 1993).

$$\log_{10}(T_{8,2})=Z_R \cdot S_0 + 7,35 \cdot \log_{10}(d+1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5} \right]}{1 + \frac{1,624 \cdot 10^9}{(d+1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 \cdot P_t) \cdot \log_{10} \left[\frac{S' \cdot c \cdot d \cdot (d^{0,75} - 1,132)}{215,63 \cdot J \cdot [d^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c/k)^{0,25}}]} \right] \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

W_{8,2} : Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı (8,2 ton)

S₀ : Toplam standart sapma

Z_R : Standart normal sapma

ΔPSI : İlk tasarım servis yeteneği (p₀) ile son servis yeteneği indeksi (p_t) arasındaki fark

d : Kaplamanın plak kalınlığı (inç) (0,0254 m)

S’c : Beton için kopma modülü (psi) (6,8950×10³ Pa)

C_d : Yol drenaj katsayısı

J : Yük transfer katsayısı

E_c : Beton için elastisite modülü (psi) (6,8950×10³

k : Taban reaksiyon modülü (pci) (27679,9 kg/m³) göstermektedir.

Tablo 9. Tavsiye edilen güvenilirlik değerleri

Yolun sınıfı	Güvenilirlik değeri, R (%)	Standart normal sapma, Z _R
Otoyollar	95	-1.645
Devlet Yolu	85	-1.037
İl İç Yollar	70	-0.524

2.8.1. Servis yeteneği

Rijit üstyapı tasarımında kaplamanın performans göstergesi olarak servis yeteneği değeri 0–5 aralığında tanımlanmaktadır. Başlangıç servis yeteneği değeri (p₀) ve son servis yeteneği değeri (p_t) olarak ifade edilen bu parametre, artan trafik yükleri ve çevresel koşulların etkisiyle zamanla (p₀) değerinden belirli bir (p_t) değerine doğru azalmaktadır. AASHTO 1993 yöntemine göre rijit üstyapılar için başlangıç servis yeteneği değeri (p₀) 4,5 olarak kabul edilmektedir (KBYÜPR, 2019). Bu çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda p₀ = 4,5 alınmış ve Tablo 8’e göre p_t değeri 2,5 olarak seçilmiştir.

Tablo 8. Son servis yeteneği değeri

Yolun Sınıfı	P _t
Devlet yolları ve otoyollarda	2,5
İl yollarında	2,0

2.8.2. Güvenilirlik

Güvenilirlik, trafik yükleri etkisiyle üstyapıda oluşabilecek bozulmalara karşı belirli bir emniyet düzeyi sağlayarak bu bozulmaların sınırlandırılması olarak tanımlanmaktadır. Güvenilirlik seviyesi, Tablo 9’dan yararlanılarak seçilmektedir (KBYÜPR, 2019). Çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda devlet yolları ve otoyollar ve için Tablo 9’dan R değeri %95 ve seçilen (R) değerine bağlı olarak Z_R değeri -1,645 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, beton yol tasarımı için toplam standart sapma değerinin (S₀) 0,35 olarak alınması önerilmektedir (KBYÜPR, 2019).

2.8.3. Taban zemini efektif reaksiyon modülü (k)

Taban zemini için belirlenen efektif reaksiyon modülü (k), beton (rijit) üstyapı tasarımında efektif yatak katsayısı olarak da tanımlanmaktadır. Beton kaplama (rijit plak) kalınlığının hesaplanabilmesi için öncelikle (k) değerinin belirlenmesi gerekmektedir olup, bu değer eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmaktadır (KBYÜPR, 2019).

$$k = P/Y \quad (2)$$

Burada P, taban zeminine etkiyen yükü (kg/cm² veya psi); Y, meydana gelen çökme deformasyonunu (cm veya inç) ve k ise yatak katsayısını, diğer bir ifadeyle efektif reaksiyon modülünü (psi/inç veya kg/cm²/cm) temsil etmektedir. k değeri; zeminin nem içeriği, taşıma kapasitesi, sıklık durumu ve zemin türüne bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. k için yaygın olarak kullanılan tipik değerler Tablo 10'da sunulmuştur (AASHTO, 1993).

Tablo 10. Taban Zemini Reaksiyon Modülü Değerleri (AASHTO, 1993)

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

2.8.4. Elastisite modülü (E_c) ve portland çimentolu betonun kopma modülü (S'_c)

TS EN 12390-13 (2021)'e göre betonun "j" günlük elastisite modülü değeri (E_{cj}) eşitlik 3'de verilen denklem ile hesaplanır.

$$E_{cj} = 3250 \sqrt{f_{ckj}} + 14.000 \text{ MPa} \quad (3)$$

Burada; f_{ckj} , betonun "j" günlük karakteristik silindirik basınç dayanımını (MPa, j = 28 gün), E_{cj} ise betonun "j" günlük elastisite modülünü (MPa) tanımlamaktadır.

AASHTO tasarım rehberinde, beton sınıflarına bağlı olarak elastisite modülü (E_c) değerleri eşitlik 4 kullanılarak belirlenmektedir. Bu kapsamda E_c, portland çimentolu betonun elastisite modülünü (psi) (6,8950×10³ Pa), S'_c ise portland çimentolu betonun yaklaşık kopma modülünü (psi) (6,8950×10³ Pa) ifade etmektedir.

$$E_c = 6750 \times S'_c \quad (4)$$

Çekme dayanımı ve kopma modülü (S'_c), 'Beton kirişin kırılma anındaki en yüksek eğilme-çekme gerilmesi' olarak ifade edilir. Eğilmede çekme dayanımı, belirli boyuttaki beton bir kirişin 28 günlük kür sonunda üç nokta veya orta nokta yüklemesi altında kırılması ile hesaplanmaktadır. Eğilme dirençleri veya kopma modülleri, bu yüklemeler altında üçte bir nokta yüklemesi için eşitlik 5 ve orta nokta yükleme durumu için eşitlik 6 bağıntıları ile hesaplanmaktadır (KBYÜPR, 2019).

$$S'_c = (P \times L) / (b \times h^2) \quad (5)$$

$$S'_c = (3 \times P \times L) / (2 \times b \times h^2) \quad (6)$$

Burada; S'_c, eğilme direnci veya kopma modülünü; h, kiriş yüksekliğini; P, uygulanan yükü; b, kiriş genişliğini ve L ise uzunluk olarak ifade edilmektedir.

2.8.5. Drenaj

Beton üstyapı tasarımında drenaj katsayısının (C_d) rijit üstyapılar için önerilen değerleri, Tablo 11'de verilmiştir. Bu çalışmada, C_d değeri 1 alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır.

2.8.6. Yük transfer katsayısı (J)

Beton yol üstyapı projelendirilmesinde, derzlerde beton kaplamanın yük aktarma yeteneğini belirten ve yük nakil katsayısı olarak isimlendirilen (J) parametresi dikkate alınmaktadır. Projelendirme şekline bağlı olarak yük transfer katsayıları Tablo 12'de gösterilmiştir. Bu çalışmada, J=2,7 alınarak tüm hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 11. Beton üstyapı için önerilen drenaj katsayısı (C_d)

Drenaj Kalitesi	Serbest Suyun Boşalma Süresi	Kaplamanın doygunluk seviyesine yakın su içeriğine maruz kaldığı sürenin yüzdesi			
		<%1	%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

Tablo 12. Önerilen yük transfer katsayıları

Banket	Asfalt		Beton Kaplama	
Yük Transferi	Var	Yok	Var	Yok
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	-

2.9. Rijit Üst Yapısı Tasarımı için İlk Yapım Esnasındaki CO₂ Emisyonlarının Hesaplanması

Rijit üstyapı, granüler temel tabakası üzerine inşa edilen ve portland çimentosundan üretilen beton plaktan meydana gelmektedir. Beton plak yapımında kullanılan beton üretiminde başlıca girdiler çimento, agrega, su, kimyasal katkı ve bazı durumlarda mineral katkılardır. Bu girdiler içinde en fazla emisyonu neden olan bileşen çimentodur. Rijit üstyapı tasarımında ilk yapım esnasında meydana gelen CO₂ salınımının tespit edilmesi, konunun sadece mühendislik ve ekonomik şartlar altında değerlendirilmesi yanı sıra çevresel hassasiyette özellik küresel ısınmanın kontrol altına alınması bakımından önem arz ettiği düşünülmektedir. Ayrıca, Kyoto Protokolünde atmosfere salınan sera gazının %5,2 oranında kalması belirlenen hedefler arasında yer almıştır. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan küresel ısınma ve iklim değişikliğinin nedeni olarak, sera gazının %95'ini (Morita vd., 2011) oluşturan CO₂ gösterilmiştir. Bu bakımda ilk yapım esnasında ortaya çıkan CO₂ emisyon hesaplarında söz konusu kullanılan malzemelerin üretimi esnasında salınan malzeme miktarı esas alınmıştır. Portland çimentosu, üretimi esnasındaki yüksek enerji tüketimi ve klinkerleşme reaksiyonları nedeniyle, 1 kg portland çimentosu çimento üretimi sırasında yaklaşık 0,9 kg CO₂ salındığı belirlenmiştir. (IPCC, 2006; Andrew, 2018; Yeşilyurt ve Kocadağistan, 2023; Mansouri vd., 2024). Yüksek fırın cürufunun ise atık bir malzeme olması ve son haline gelmesi için özel bir üretim tekniği kullanılmaması nedeniyle sıfır CO₂ emisyonu dikkate alınmıştır. Atık malzemelerinin hesaplamalara sıfır emisyonu olarak katılabileceği literatür (O'Brien vd., 2009) ile desteklenmiştir. Agreganın üretilmesi esnasında ortaya çıkan birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 6.5 kg/ton (Giustozzi vd., 2015) ve su içinde CO₂ emisyon değeri 0.3 kg/ton (Safaei, 2019) olarak alınmıştır. 1 kg çelik lifin üretiminde 2,2 kg CO₂ meydana geldiği (Xu, 2010) göz önüne alınarak CO₂ emisyon miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca, 1kg polikarboksilat eter (PCE) esaslı hiper akışkanlaştırıcı için 1,11 kg CO₂ meydana geldiği (Schiefer, 2023) göz önüne alınmıştır.

İlk yapım esnasında salınan CO₂ miktarının belirlenmesinde Tier 1 yaklaşımı (IPCC 2006 ve IPCC 2019) dikkate alınarak yapılmıştır. Emisyonlar Denklem 7 temelinde, birim kg/m³ CO₂ salınım değerleri esas alınarak hesaplanmıştır.

$$E_{CO_2} = DA \times FE \quad (7)$$

Burada;

E_{CO₂}: Karbondioksit emisyonunu (kg),

DA: Aktivite Verisi Birimi (ton veya kg),

FE: Emisyon Faktörü (kg/TJ) (birim CO₂ emisyon miktarı),

DA: Esas alınan birimdeki malzeme ağırlığı (kg).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Lifsiz kontrol ve lif katkılı çimento ikameli YFC'li karışımlar için 150x150x150 mm ölçülerinde üç adet küp numune test edilmiştir. Kontrol ve %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 çelik lif katkılı numunelere ait basınç dayanımı sonuçları Tablo 13'de, basınç dayanım grafiği ise Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi, çelik lif katkılı numunelerde 28 gün kür süresine tabi betonlarda çimento ikamesi olarak %20 değerine kadar artış, bu değerden sonra ise dayanımda azalma meydana gelmiştir. TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine (2019) göre beton dayanım sınıfı olarak 28 günlük kür edilmiş numuneler için minimum C30/37 MPa seçilmesi önerilmektedir. Yapılan çalışma kapsamında 28 günlük numunelerin basınç dayanımı C30/37 MPa ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 6 incelendiğinde; 28 günlük basınç dayanımı sonunda tüm numunelerin TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre istenen minimum karakteristik basınç dayanımı (C 30/37) şartını sağladığı tespit edilmiştir.

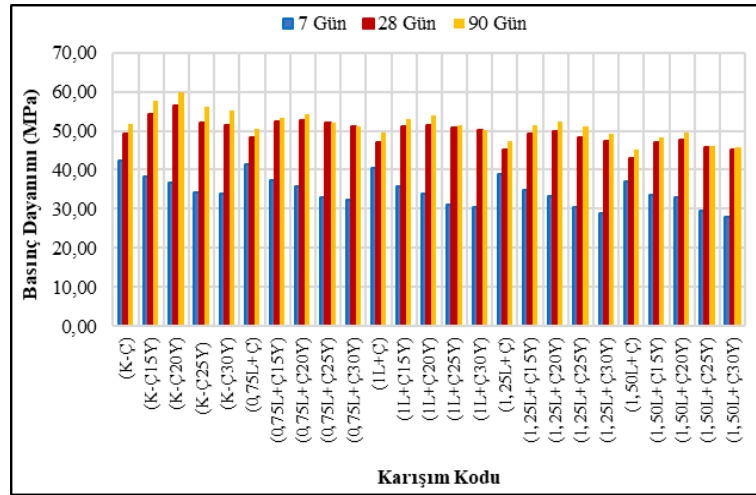
3.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Beton numunelerinin eğilme dayanımları; 150x150x525 mm boyutundaki kiriş numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde dört noktalı eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Kontrol ve %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 çelik lif katkılı numunelere ait eğilme dayanımları Tablo 14'de verilen sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir.

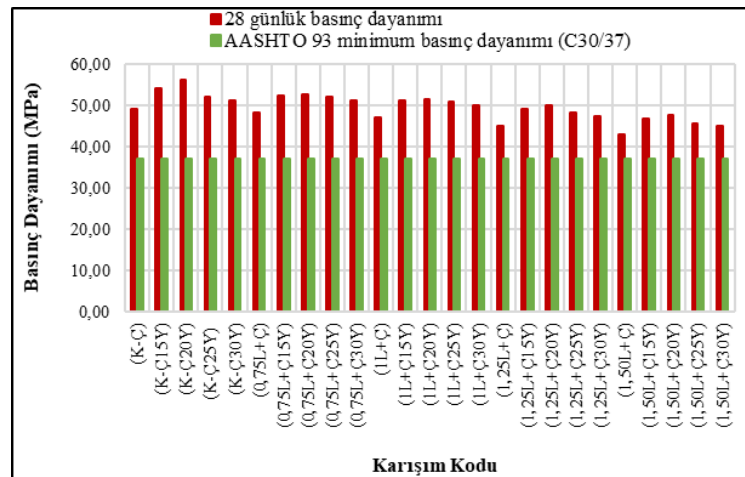
Şekil 7'de görüldüğü gibi, betonun 28 günlük kür süresi dikkate alındığında, kontrol numunesine göre tüm YFC katkılı numunelerin eğilme dayanımında artış olduğu, en yüksek eğilme dayanımının çimentonun ikamesi olarak kullanılan %20 YFC oranında meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu artış oranı %15, %20, %25 ve %30 YFC katkılı beton numunelerinde sırası ile %3,40, %6,42, %5,58 ve %4,58 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 çelik lif katkılı numunelerde kontrol numunesine (K-Ç) göre eğilme dayanımındaki artış sırasıyla %9,77, %17,48, %28,37 ve %39,10 olarak tespit edilmiştir. TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre 28 günlük eğilme dayanımı 4,50 N/mm²'den büyük olmalıdır. Yapılan çalışma kapsamında 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde; 28 günlük eğilme dayanımı sonunda tüm numunelerin TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre istenen minimum karakteristik eğilme dayanımı (4,50 N/mm²) şartını sağladığı tespit edilmiştir.

Tablo 13. Kontrol ve çelik lif katkılı numunelerin basınç dayanım değerleri

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(K-Ç)	4,235E+01	4,924E+01	5,164E+01
(K-Ç15Y)	3,817E+01	5,415E+01	5,763E+01
(K-Ç20Y)	3,659E+01	5,628E+01	5,985E+01
(K-Ç25Y)	3,420E+01	5,214E+01	5,624E+01
(K-Ç30Y)	3,390E+01	5,130E+01	5,522E+01
(0,75L+Ç)	4,147E+01	4,822E+01	5,057E+01
(0,75L+Ç15Y)	3,741E+01	5,225E+01	5,315E+01
(0,75L+Ç20Y)	3,567E+01	5,279E+01	5,420E+01
(0,75L+Ç25Y)	3,303E+01	5,198E+01	5,213E+01
(0,75L+Ç30Y)	3,220E+01	5,119E+01	5,103E+01
(1L+Ç)	4,058E+01	4,719E+01	4,949E+01
(1L+Ç15Y)	3,588E+01	5,112E+01	5,304E+01
(1L+Ç20Y)	3,385E+01	5,144E+01	5,397E+01
(1L+Ç25Y)	3,112E+01	5,092E+01	5,150E+01
(1L+Ç30Y)	3,051E+01	5,012E+01	5,024E+01
(1,25L+Ç)	3,882E+01	4,514E+01	4,734E+01
(1,25L+Ç15Y)	3,496E+01	4,914E+01	5,144E+01
(1,25L+Ç20Y)	3,318E+01	4,998E+01	5,225E+01
(1,25L+Ç25Y)	3,049E+01	4,825E+01	5,115E+01
(1,25L+Ç30Y)	2,896E+01	4,750E+01	4,908E+01
(1,50L+Ç)	3,706E+01	4,309E+01	4,519E+01
(1,50L+Ç15Y)	3,355E+01	4,688E+01	4,824E+01
(1,50L+Ç20Y)	3,290E+01	4,774E+01	4,944E+01
(1,50L+Ç25Y)	2,956E+01	4,574E+01	4,600E+01
(1,50L+Ç30Y)	2,795E+01	4,502E+01	4,534E+01



Şekil 5. Kontrol ve çelik lif katkılı numunelerin basınç dayanım grafiği



Şekil 6. Beton numunelerin basınç dayanımının tasarım kriteri grafiği.

3.3. Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

Kontrol, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 çelik lif katkıları karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük çekme dayanımını belirlemek amacıyla Ø150x300 mm ölçülerinde üç adet silindirik numune test edilmiştir. Çekme dayanımı sonuçları Tablo 15'de verilmiştir. Sonuçlar Şekil 9'da gösterilmiştir.

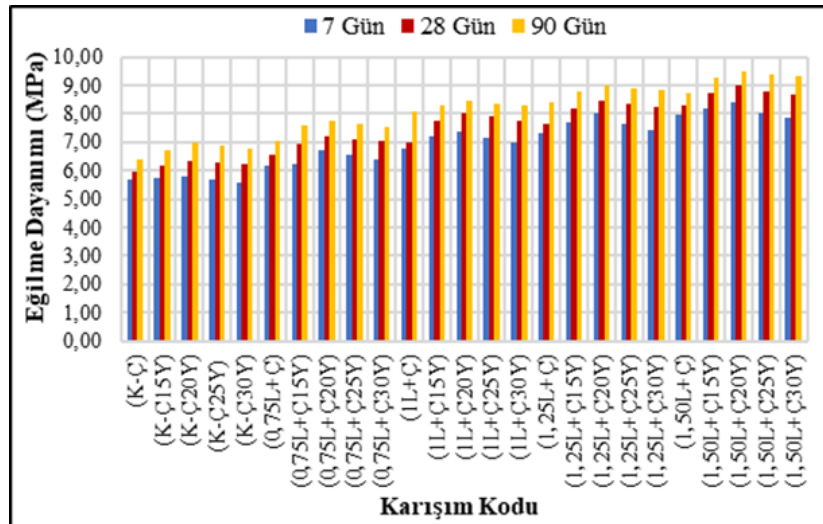
Şekil 9'da görüldüğü gibi, betonun 28 günlük kür süresi dikkate alındığında, kontrol numunesine göre tüm YFC katkıları numunelerin çekme dayanımında artış olduğu, en yüksek çekme dayanımının çimentonun ikamesi olarak kullanılan %20 YFC oranında meydana geldiği tespit

edilmiştir. Bu artış oranı %15, %20, %25 ve %30 YFC katkıları beton numunelerinde sırası ile %5,18, %8,17, %7,17 ve %6,37 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 çelik lif katkıları numunelerde kontrol numunesine (K-Ç) göre çekme dayanımındaki artış sırasıyla %10,96, %21,71, %25,50 ve %29,08 olarak tespit edilmiştir.

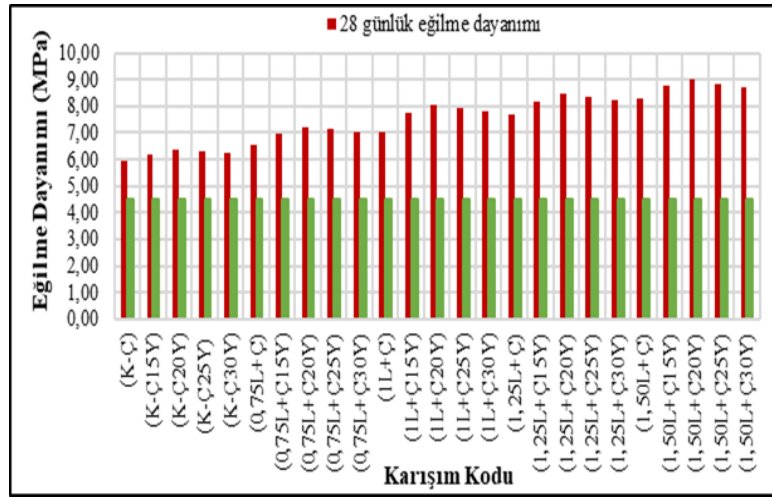
TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre 28 günlük çekme dayanımı 3,30 N/mm²'den büyük olmalıdır. Yapılan çalışma kapsamında 28 günlük numunelerin çekme dayanımı karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 10'da gösterilmiştir.

Tablo 14. Kontrol ve çelik lif katkıları numunelerin eğilme dayanımı değerleri

Karışım Kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(K-Ç)	5,690E+00	5,970E+00	6,420E+00
(K-Ç15Y)	5,740E+00	6,170E+00	6,730E+00
(K-Ç20Y)	5,810E+00	6,350E+00	7,000E+00
(K-Ç25Y)	5,670E+00	6,300E+00	6,890E+00
(K-Ç30Y)	5,550E+00	6,240E+00	6,780E+00
(0,75L+Ç)	6,180E+00	6,550E+00	7,030E+00
(0,75L+Ç15Y)	6,250E+00	6,940E+00	7,590E+00
(0,75L+Ç20Y)	6,710E+00	7,210E+00	7,780E+00
(0,75L+Ç25Y)	6,550E+00	7,120E+00	7,660E+00
(0,75L+Ç30Y)	6,420E+00	7,050E+00	7,540E+00
(1L+Ç)	6,790E+00	7,010E+00	8,090E+00
(1L+Ç15Y)	7,230E+00	7,770E+00	8,310E+00
(1L+Ç20Y)	7,360E+00	8,040E+00	8,460E+00
(1L+Ç25Y)	7,150E+00	7,900E+00	8,370E+00
(1L+Ç30Y)	6,970E+00	7,780E+00	8,300E+00
(1,25L+Ç)	7,310E+00	7,660E+00	8,420E+00
(1,25L+Ç15Y)	7,680E+00	8,190E+00	8,800E+00
(1,25L+Ç20Y)	8,020E+00	8,450E+00	8,980E+00
(1,25L+Ç25Y)	7,620E+00	8,360E+00	8,890E+00
(1,25L+Ç30Y)	7,440E+00	8,250E+00	8,820E+00
(1,50L+Ç)	7,960E+00	8,300E+00	8,750E+00
(1,50L+Ç15Y)	8,160E+00	8,740E+00	9,280E+00
(1,50L+Ç20Y)	8,410E+00	9,020E+00	9,500E+00
(1,50L+Ç25Y)	8,010E+00	8,810E+00	9,410E+00
(1,50L+Ç30Y)	7,860E+00	8,680E+00	9,330E+00



Şekil 7. Kontrol ve çelik lif katkıları numunelerin eğilme dayanımı grafiği.



Şekil 8. Numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı tasarım kriteri.

3.4. AASHTO Metodu ile Beton Yol Kaplama Kalınlığı Tasarım Sonuçları

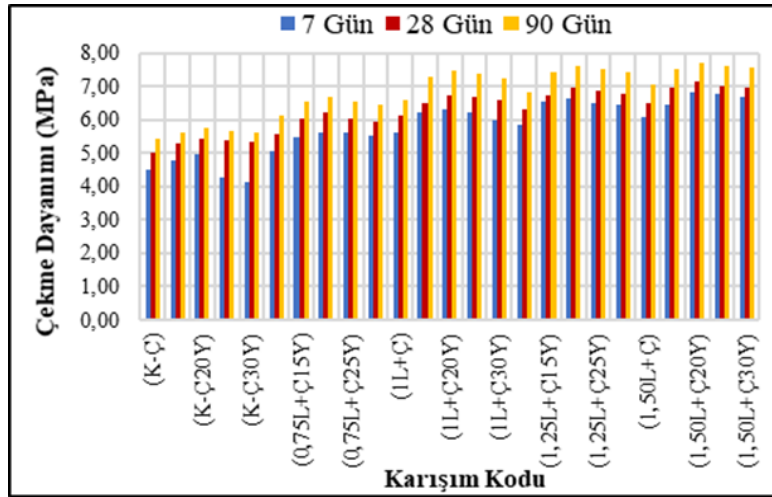
Karayolu rijit üstyapı tasarımı; %0, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 oranlarında çelik lif katkı, %0, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında YFC ile ikame edilmiş beton numuneleri esas alınarak AASHTO 1993 tasarım rehberine göre tüm hesaplamalar yapılmıştır. Rijit üstyapı kalınlık hesaplamalarında taşıma gücü çok zayıf (plastik kil) zemin durumuna göre yedi ayrı proje trafiği belirlenmiştir. Proje trafiği seçiminde, hafif taşıt trafik değerinin belirlenmesinde $W_{8,2}$ 'nin $3,1 \times 10^6$ 'dan küçük

olduğu 1×10^6 standart dingil yükü tekrerrü veya başka bir ifade ile yıllık ortalama günlük ağır taşıt trafiğinin (YOGATT) 500'den küçük olduğu değer alınmıştır. Ağır taşıt trafik değerinin belirlenmesinde 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 tekrerrüleri alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan ortak parametreler Tablo 16'da verilmiştir.

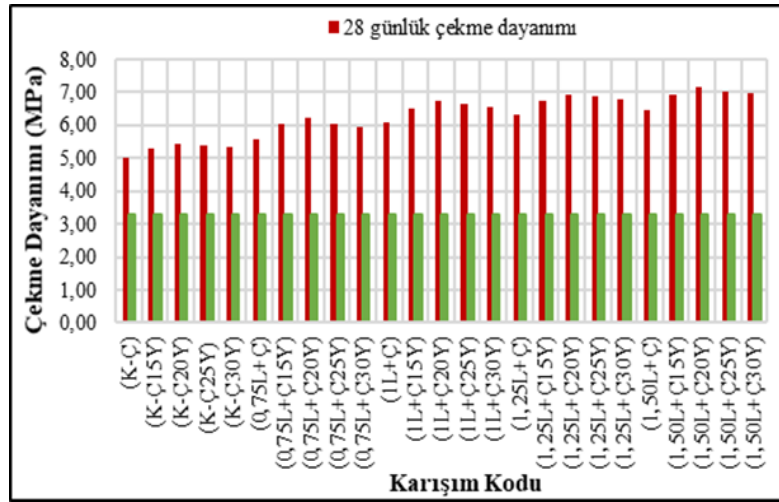
Ayrıca, beton yol kaplamasının tasarımında kullanılan minimum dayanım gereksinimleri Tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 15. Kontrol ve çelik lif katkı numunelerin çekme dayanımı değerleri

Karışım Kodu	Çekme Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
(K-Ç)	4,520E+00	5,020E+00	5,430E+00
(K-Ç15Y)	4,780E+00	5,280E+00	5,600E+00
(K-Ç20Y)	4,960E+00	5,430E+00	5,770E+00
(K-Ç25Y)	4,250E+00	5,380E+00	5,680E+00
(K-Ç30Y)	4,110E+00	5,340E+00	5,620E+00
(0,75L+Ç)	5,070E+00	5,570E+00	6,140E+00
(0,75L+Ç15Y)	5,480E+00	6,030E+00	6,560E+00
(0,75L+Ç20Y)	5,640E+00	6,230E+00	6,680E+00
(0,75L+Ç25Y)	5,600E+00	6,050E+00	6,530E+00
(0,75L+Ç30Y)	5,520E+00	5,960E+00	6,430E+00
(1L+Ç)	5,620E+00	6,110E+00	6,600E+00
(1L+Ç15Y)	6,210E+00	6,520E+00	7,270E+00
(1L+Ç20Y)	6,320E+00	6,750E+00	7,480E+00
(1L+Ç25Y)	6,240E+00	6,660E+00	7,370E+00
(1L+Ç30Y)	5,980E+00	6,570E+00	7,260E+00
(1,25L+Ç)	5,860E+00	6,300E+00	6,820E+00
(1,25L+Ç15Y)	6,540E+00	6,740E+00	7,410E+00
(1,25L+Ç20Y)	6,620E+00	6,950E+00	7,590E+00
(1,25L+Ç25Y)	6,520E+00	6,880E+00	7,500E+00
(1,25L+Ç30Y)	6,470E+00	6,780E+00	7,420E+00
(1,50L+Ç)	6,090E+00	6,480E+00	7,040E+00
(1,50L+Ç15Y)	6,450E+00	6,950E+00	7,540E+00
(1,50L+Ç20Y)	6,800E+00	7,150E+00	7,700E+00
(1,50L+Ç25Y)	6,760E+00	7,030E+00	7,630E+00
(1,50L+Ç30Y)	6,700E+00	6,960E+00	7,580E+00



Şekil 9. Kontrol ve çelik lif katkılı numunelerin çekme dayanımı grafiği.



Şekil 10. Numunelerin çekme dayanım tasarım kriteri.

Tablo 16. Yol kaplama betonunun tasarımında kullanılan ortak parametreler

Parametreler	Seçilen Değer
8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı	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
Performans tahmininin standart hatası, S_0	0,35
%95 R_E için, Standart normal sapma, Z_R	-1,645
Servis yeteneği kaybı, ΔPSI (psi)	2

Tablo 17. Minimum karakteristik basınç, eğilme, yarmada çekme dayanım değerleri

Karakteristik Küp Basınç Dayanımı, f_{ck} (N/mm ²)	Eğilme Dayanımı f_{cbt} (N/mm ²)	Yarmada Çekme Dayanımı f_{sk} (N/mm ²)
Min. C 30/37	Min. 4,50	Min. 3,30

3.4.1. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) (k=150 pci) kontrol numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

Kontrol numunelerinin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Tablo 18'de verilmiştir. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (k=150 pci) farklı proje trafikleri için (1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6)

kaplama kalınlıkları eşitlik 1 yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 19'da verilmiştir. Kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği ise Şekil 11'de gösterilmiştir.

3.4.2. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) (k=150 pci) %0,75 çelik lif katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

%0,75 Çelik lif katkılı numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Tablo 20'de verilmiştir.

Çok zayıf zeminlerde (plastik kil) (k=150 pci) farklı proje trafikleri için (1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6) kaplama kalınlıkları Denklem 1 yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 21'de verilmiştir. Kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği ise Şekil 12'de gösterilmiştir.

Şekil 12 incelendiğinde, taşıma gücü çok zayıf olan zeminlerde %0,75 çelik lif katkılı beton numunelerinin, kontrol numunesine kıyasla beton kaplama kalınlığında azalma sağladığı görülmektedir. Proje trafik yüklerine göre elde edilen kaplama kalınlığı azalmaları aşağıda sunulmuştur. 1×10^6 proje trafiği için, kaplama kalınlığındaki azalma oranları (0,75L+Ç) numunesinde %4,98, (0,75L+Ç15Y) numunesinde %6,20, (0,75L+Ç20Y) numunesinde %6,63, (0,75L+Ç25Y) numunesinde %6,40 ve (0,75L+Ç30Y) numunesinde %6,41 olarak hesaplanmıştır.

5×10^6 proje trafiği için, söz konusu azalma oranları sırasıyla %4,84, %6,12, %6,62, %6,39 ve %6,36 olarak belirlenmiştir. 10×10^6 proje trafiği için, beton kaplama kalınlığındaki azalma; (0,75L+Ç) numunesinde %4,64, (0,75L+Ç15Y) numunesinde %5,85, (0,75L+Ç20Y) numunesinde %6,34, (0,75L+Ç25Y) numunesinde %6,10 ve (0,75L+Ç30Y) numunesinde %6,08 düzeyindedir.

50×10^6 proje trafiği için bu oranlar sırasıyla %4,43, %5,56, %6,00, %5,78 ve %5,76 olarak hesaplanmıştır. 100×10^6 proje trafiği için, kaplama kalınlığındaki azalma oranları %4,39, %5,51, %5,94, %5,70 ve %5,72 olarak elde edilmiştir. 200×10^6 proje trafiğinde, söz konusu azalmalar %4,37, %5,48, %5,90, %5,69 ve %5,68 olarak belirlenmiştir. 400×10^6 proje trafiği için ise kaplama kalınlığı azalma oranlarının sırasıyla %4,35, %5,46, %5,89, %5,67 ve %5,66 olduğu görülmektedir.

3.4.3. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) (k=150 pci) %1 çelik lif katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

%1 Çelik lif katkılı numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Tablo 22'de verilmiştir.

Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde farklı proje trafikleri için (1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6) kaplama kalınlıkları Denklem 1 yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 23'de verilmiştir. Kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği ise Şekil 13'de gösterilmiştir.

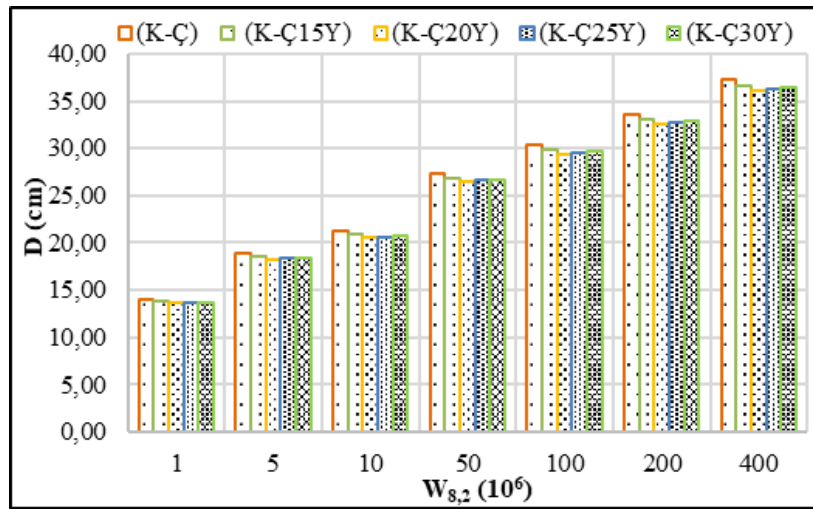
Şekil 13 incelendiğinde, taşıma gücü çok zayıf olan zeminlerde %1 çelik lif katkılı beton numunelerinin, kontrol numunesine kıyasla beton kaplama kalınlığında azalma sağladığı görülmektedir. Proje trafik yüklerine bağlı olarak elde edilen kaplama kalınlığı azalmaları aşağıda sunulmuştur. 1×10^6 proje trafiği için, kaplama kalınlığındaki azalma oranları; (1L+Ç) numunesinde %8,40, (1L+Ç15Y) numunesinde %11,64, (1L+Ç20Y) numunesinde %11,81, (1L+Ç25Y) numunesinde %11,41 ve (1L+Ç30Y) numunesinde %11,16 olarak hesaplanmıştır. 5×10^6 proje trafiği için, söz konusu azalma oranları sırasıyla %8,27, %11,75, %12,07, %11,58 ve %11,29 olarak belirlenmiştir. 10×10^6 proje trafiği için, beton kaplama kalınlığındaki azalma; (1L+Ç) numunesinde %7,91, (1L+Ç15Y) numunesinde %11,26, (1L+Ç20Y) numunesinde %11,57, (1L+Ç25Y) numunesinde %11,09 ve (1L+Ç30Y) numunesinde %10,81 düzeyindedir. 50×10^6 proje trafiği için, kaplama kalınlığı azalma oranları sırasıyla %7,54, %10,63, %10,88, %10,45 ve %10,20 olarak hesaplanmıştır. 100×10^6 proje trafiği için, bu oranlar %7,47, %10,53, %10,78, %10,32 ve %10,10 şeklinde elde edilmiştir. 200×10^6 proje trafiğinde, beton kaplama kalınlığındaki azalmalar %7,43, %10,47, %10,70, %10,28 ve %10,04 olarak belirlenmiştir. 400×10^6 proje trafiği için ise, kaplama kalınlığı azalma oranlarının sırasıyla %7,40, %10,43, %10,66, %10,25 ve %10,00 olduğu görülmektedir.

Tablo 18. Kontrol numunelerine ait S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Karakteristik küp basınç dayanımı, (28 gün) (fck) (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-Ç)	49,24	5,02	5,97	865,44	5.841.719,70
(K-Ç15Y)	54,15	5,28	6,17	894,88	6.040.457,61
(K-Ç20Y)	56,28	5,43	6,35	920,99	6.216.678,42
(K-Ç25Y)	52,14	5,38	6,30	913,74	6.167.728,19
(K-Ç30Y)	51,30	5,34	6,24	905,04	6.108.987,92

Tablo 19. Kontrol numuneleri beton kaplama kalınlık değerleri

Karışım Kodu	$W_{8,2}$ (10^6)	k (pci)	D (inç)	D (cm)
(K-Ç)	1	150	5,537	14,064
	5		7,436	18,887
	10		8,348	21,204
	50		10,744	27,290
	100		11,932	30,307
	200		13,234	33,614
	400		14,663	37,244
(K-Ç15Y)	1		5,436	13,807
	5		7,305	18,555
	10		8,208	20,848
	50		10,571	26,850
	100		11,741	29,822
	200		13,024	33,081
	400		14,431	36,655
(K-Ç20Y)	1		5,350	13,589
	5		7,194	18,273
	10		8,089	20,546
	50		10,424	26,477
	100		11,580	29,413
	200		12,845	32,626
	400		14,235	36,157
(K-Ç25Y)	1		5,374	13,650
	5		7,225	18,352
	10		8,121	20,627
	50		10,464	26,579
	100		11,620	29,515
	200		12,894	32,751
	400		14,288	36,292
(K-Ç30Y)	1		5,402	13,721
	5		7,262	18,445
	10		8,161	20,729
	50		10,513	26,703
	100		11,678	29,662
	200		12,954	32,903
	400		14,354	36,459



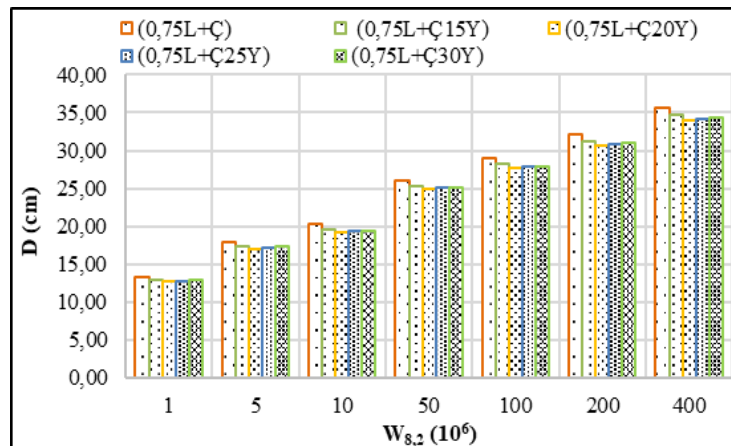
Şekil 11. Kontrol numunelerine ait $W_{8,2}$ – D değişim grafiği.

Tablo 20. %0,75 çelik lif katkılı numunelere ait S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Karakteristik küp basınç dayanımı, (28 gün) (fck) (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(0,75L+Ç)	48,22	5,57	6,55	950,00	6.412.479,31
(0,75L+Ç15Y)	52,25	6,03	6,94	1.006,56	6.794.291,06
(0,75L+Ç20Y)	52,79	6,23	7,21	1.045,72	7.058.622,26
(0,75L+Ç25Y)	51,98	6,05	7,12	1.032,67	6.970.511,86
(0,75L+Ç30Y)	51,19	5,96	7,05	1.022,52	6.901.981,55

Tablo 21. %0,75 çelik lif katkılı numunelere ait beton kaplama kalınlık değerleri

Karışım Kodu	$W_{8,2}$ (10^6)	k (pci)	D (inç)	D (cm)
(0,75L+Ç)	1	150	5,261	13,363
	5		7,076	17,973
	10		7,961	20,221
	50		10,268	26,081
	100		11,408	28,976
	200		12,656	32,146
	400		14,025	35,624
(0,75L+Ç15Y)	1		5,099	12,951
	5		6,858	17,419
	10		7,728	19,629
	50		9,983	25,357
	100		11,094	28,179
	200		12,310	31,267
	400		13,643	34,653
(0,75L+Ç20Y)	1		4,996	12,690
	5		6,717	17,061
	10		7,576	19,243
	50		9,799	24,889
	100		10,892	27,666
	200		12,087	30,701
	400		13,397	34,028
(0,75L+Ç25Y)	1		5,030	12,776
	5		6,763	17,178
	10		7,626	19,370
	50		9,859	25,042
	100		10,958	27,833
	200		12,160	30,886
	400		13,478	34,234
(0,75L+Ç30Y)	1		5,056	12,842
	5		6,800	17,272
	10		7,665	19,469
	50		9,907	25,164
	100		11,010	27,965
	200		12,218	31,034
	400		13,541	34,394



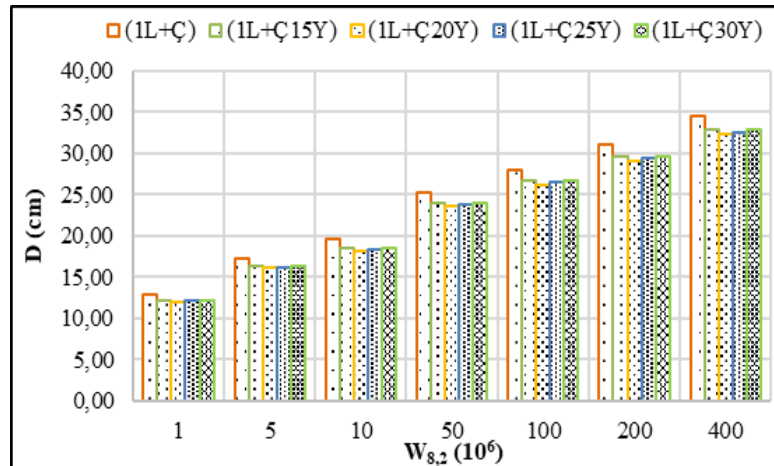
Şekil 12. %0,75 çelik lif katkılı numunelere ait $W_{8,2}$ – D değişim grafiği

Tablo 22. %1 çelik lif katkılı numunelere ait S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Karakteristik küp basınç dayanımı, (28 gün) (f_{ck}) (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(1L+Ç)	47,19	6,11	7,01	1.016,71	6.862.821,37
(1L+Ç15Y)	51,12	6,52	7,77	1.126,94	7.606.864,77
(1L+Ç20Y)	51,44	6,75	8,04	1.166,10	7.871.195,98
(1L+Ç25Y)	50,92	6,66	7,90	1.145,80	7.734.135,35
(1L+Ç30Y)	50,12	6,57	7,78	1.128,39	7.616.654,82

Tablo 23. %1 Çelik lif katkılı numunelere ait beton kaplama kalınlık değerleri

Karışım Kodu	$W_{8,2}$ (10^6)	k (pci)	D (inç)	D (cm)
(1L+Ç)	1	150	5,072	12,883
	5		6,821	17,325
	10		7,688	19,528
	50		9,934	25,232
	100		11,041	28,044
	200		12,251	31,118
	400		13,578	34,488
(1L+Ç15Y)	1		4,803	12,200
	5		6,447	16,375
	10		7,284	18,501
	50		9,447	23,995
	100		10,505	26,683
	200		11,660	29,616
	400		12,926	32,832
(1L+Ç20Y)	1		4,718	11,984
	5		6,326	16,068
	10		7,153	18,169
	50		9,290	23,597
	100		10,332	26,243
	200		11,470	29,134
	400		12,717	32,301
(1L+Ç25Y)	1		4,761	12,093
	5		6,388	16,226
	10		7,220	18,339
	50		9,370	23,800
	100		10,421	26,469
	200		11,568	29,383
	400		12,824	32,573
(1L+Ç30Y)	1		4,799	12,189
	5		6,442	16,363
	10		7,279	18,489
	50		9,441	23,980
	100		10,498	26,665
	200		11,653	29,599
	400		12,918	32,812



Şekil 13. %1 çelik lif katkılı numunelere ait $W_{8,2}$ – D değişim grafiği.

3.4.4. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) (k=150 pci) %1,25 çelik lif katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

%1,25 çelik lif katkılı numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Tablo 24'de verilmiştir.

Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde farklı proje trafikleri

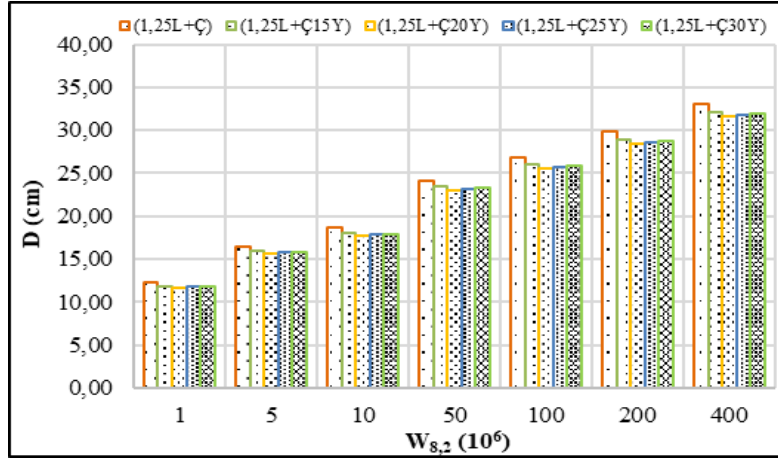
için (1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6) kaplama kalınlıkları Denklem 1 yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 25'de verilmiştir. Kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği ise Şekil 14'te gösterilmiştir.

Tablo 24. %1,25 çelik lif katkılı numunelere ait S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Karakteristik küp basınç dayanımı, (28 gün) (fck) (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(1,25L+Ç)	45,14	6,30	7,66	1.110,99	7.499.174,28
(1,25L+Ç15Y)	49,14	6,74	8,19	1.187,86	8.018.046,65
(1,25L+Ç20Y)	49,98	6,95	8,45	1.225,57	8.272.587,81
(1,25L+Ç25Y)	48,25	6,88	8,36	1.212,52	8.184.477,41
(1,25L+Ç30Y)	47,50	6,78	8,25	1.196,56	8.076.786,92

Tablo 25. %1,25 çelik lif katkılı numunelere ait beton kaplama kalınlık değerleri

Karışım Kodu	$W_{8,2}$ (10^6)	k (pci)	D (inç)	D (cm)
(1,25L+Ç)	1	150	4,839	12,291
	5		6,498	16,505
	10		7,339	18,641
	50		9,513	24,163
	100		10,578	26,868
	200		11,740	29,820
	400		13,015	33,058
(1,25L+Ç15Y)	1		4,673	11,869
	5		6,262	15,905
	10		7,083	17,991
	50		9,206	23,383
	100		10,240	26,010
	200		11,369	28,877
	400		12,605	32,017
(1,25L+Ç20Y)	1		4,598	11,679
	5		6,155	15,634
	10		6,966	17,694
	50		9,065	23,025
	100		10,086	25,618
	200		11,199	28,445
	400		12,418	31,542
(1,25L+Ç25Y)	1		4,623	11,742
	5		6,191	15,725
	10		7,006	17,795
	50		9,113	23,147
	100		10,139	25,753
	200		11,257	28,593
	400		12,482	31,704
(1,25L+Ç30Y)	1		4,655	11,824
	5		6,237	15,842
	10		7,056	17,922
	50		9,173	23,299
	100		10,204	25,918
	200		11,329	28,776
	400		12,561	31,905



Şekil 14. %1,25 çelik lif katkılı numunelere ait $W_{8,2}$ - D değişim grafiği.

Şekil 14 incelendiğinde, taşıma gücü çok zayıf olan zeminlerde %1,25 çelik lif katkılı beton numunelerinin, kontrol numunesine kıyasla beton kaplama kalınlığında belirgin bir azalma sağladığı görülmektedir. Proje trafik yüklerine göre elde edilen kaplama kalınlığı azalmaları aşağıda sunulmuştur. 1×10^6 proje trafiği için, kaplama kalınlığındaki azalma oranları; (1,25L+Ç) numunesinde %12,61, (1,25L+Ç15Y) numunesinde %14,04, (1,25L+Ç20Y) numunesinde %14,06, (1,25L+Ç25Y) numunesinde %13,97 ve (1,25L+Ç30Y) numunesinde %13,83 olarak hesaplanmıştır.

5×10^6 proje trafiği için, söz konusu azalma oranları sırasıyla %12,62, %14,28, %14,44, %14,31 ve %14,11 olarak belirlenmiştir. 10×10^6 proje trafiği için, beton kaplama kalınlığındaki azalma; (1,25L+Ç) numunesinde %12,09, (1,25L+Ç15Y) numunesinde %13,71, (1,25L+Ç20Y) numunesinde %13,88, (1,25L+Ç25Y) numunesinde %13,73 ve (1,25L+Ç30Y) numunesinde %13,54 düzeyindedir. 50×10^6 proje trafiği için, bu oranlar sırasıyla %11,46, %12,91, %13,04, %12,91 ve %12,75 olarak hesaplanmıştır. 100×10^6 proje trafiği için, kaplama kalınlığındaki azalma oranları %11,35, %12,78, %12,90, %12,75 ve %12,62 olarak elde edilmiştir. 200×10^6 proje trafiği için, söz konusu azalmalar %11,29, %12,71, %12,81, %12,70 ve %12,54 olarak belirlenmiştir. 400×10^6 proje trafiği için ise beton kaplama kalınlığındaki azalma oranlarının sırasıyla %11,24, %12,65, %12,76, %12,64 ve %12,49 olduğu görülmektedir.

3.4.5. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) ($k=150$ pci) %1,50 çelik lif katkılı numunelerinin beton yol kaplama tasarımı

%1,50 çelik lif katkılı numunelerin tasarımında kullanılacak S'_c ve E_c değerleri Tablo 26'da verilmiştir.

Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde farklı proje trafikleri için (1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6) kaplama kalınlıkları Denklem 1 yardımıyla hesaplanarak belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 27'de verilmiştir. Kaplama kalınlıklarının trafikle değişim grafiği ise Şekil 15'de gösterilmiştir.

Şekil 15 incelendiğinde, taşıma gücü çok zayıf olan zeminlerde %1,50 çelik lif katkılı beton numunelerinin, kontrol numunesine kıyasla beton kaplama kalınlığında belirgin bir azalma sağladığı görülmektedir. Proje trafik yüklerine göre elde edilen kaplama kalınlığı azalmaları aşağıda sunulmuştur. 1×10^6 proje trafiği için kaplama kalınlığındaki azalma oranları; (1,50L+Ç) numunesinde %16,20, (1,50L+Ç15Y) numunesinde %16,87, (1,50L+Ç20Y) numunesinde %16,89, (1,50L+Ç25Y) numunesinde %16,26 ve (1,50L+Ç30Y) numunesinde %16,06 olarak hesaplanmıştır.

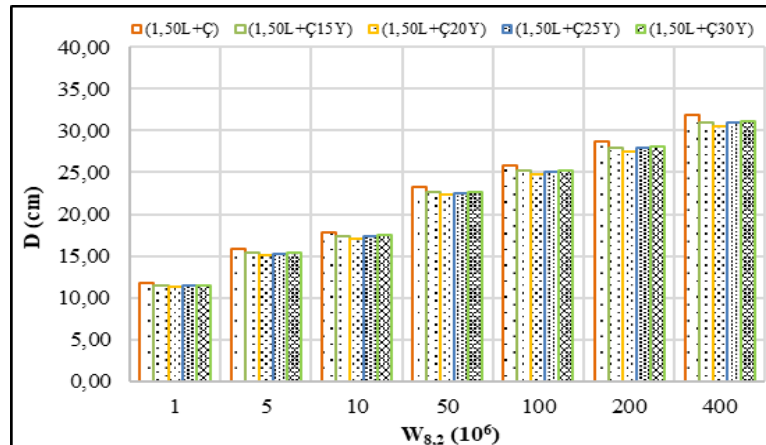
5×10^6 proje trafiği için söz konusu azalma oranları sırasıyla %16,41, %17,30, %17,48, %16,76 ve %16,50 olarak belirlenmiştir. 10×10^6 proje trafiği için beton kaplama kalınlığındaki azalma; (1,50L+Ç) numunesinde %15,75, (1,50L+Ç15Y) numunesinde %16,67, (1,50L+Ç20Y) numunesinde %16,87, (1,50L+Ç25Y) numunesinde %16,13 ve (1,50L+Ç30Y) numunesinde %15,87 düzeyindedir. 50×10^6 proje trafiği için bu oranlar sırasıyla %14,87, %15,66, %15,80, %15,14 ve %14,91 olarak hesaplanmıştır. 100×10^6 proje trafiği için kaplama kalınlığındaki azalma oranları %14,73, %15,49, %15,62, %14,94 ve %14,75 olarak elde edilmiştir. 200×10^6 proje trafiğinde, söz konusu azalmalar sırasıyla %14,64, %15,40, %15,51, %14,87 ve %14,66 olarak belirlenmiştir. 400×10^6 proje trafiği için ise beton kaplama kalınlığı azalma oranlarının; (1,50L+Ç), (1,50L+Ç15Y), (1,50L+Ç20Y), (1,50L+Ç25Y) ve (1,50L+Ç30Y) numuneleri için sırasıyla %14,58, %15,33, %15,45, %14,81 ve %14,59 olduğu görülmektedir.

Tablo 26. %1,50 çelik lif katkılı numunelere ait S'_c ve E_c değerleri

Karışım Kodu	Karakteristik küp basınç dayanımı, (28 gün) (fck) (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (28 gün) (MPa)	S'_c (psi)	E_c (psi)
(1,50L+Ç)	43,09	6,48	8,30	1.203,81	8.125.737,14
(1,50L+Ç15Y)	46,88	6,95	8,74	1.267,63	8.556.499,11
(1,50L+Ç20Y)	47,74	7,15	9,02	1.308,24	8.830.620,36
(1,50L+Ç25Y)	45,74	7,03	8,81	1.277,78	8.625.029,42
(1,50L+Ç30Y)	45,02	6,96	8,68	1.258,93	8.497.758,84

Tablo 27. %1,50 çelik lif katkılı numunelere ait beton kaplama kalınlık değerleri

Karışım Kodu	$W_{8,2}$ (10 ⁶)	k (pci)	D (inç)	D (cm)
(1,50L+Ç)	1		4,640	11,786
	5		6,216	15,789
	10		7,033	17,864
	50		9,146	23,231
	100		10,175	25,845
	200		11,296	28,692
(1,50L+Ç15Y)	400		12,525	31,813
	1		4,519	11,478
	5		6,041	15,344
	10		6,840	17,374
	50		8,916	22,645
	100		9,922	25,202
(1,50L+Ç20Y)	200		11,019	27,987
	400		12,219	31,035
	1	150	4,447	11,294
	5		5,936	15,078
	10		6,724	17,079
	50		8,777	22,294
(1,50L+Ç25Y)	100		9,771	24,818
	200		10,853	27,565
	400		12,036	30,570
	1		4,500	11,431
	5		6,014	15,276
	10		6,811	17,299
(1,50L+Ç30Y)	50		8,880	22,556
	100		9,884	25,104
	200		10,977	27,880
	400		12,172	30,918
	1		4,535	11,518
	5		6,064	15,403
(1,50L+Ç30Y)	10		6,866	17,439
	50		8,946	22,722
	100		9,956	25,287
	200		11,056	28,081
	400		12,259	31,138



Şekil 15. %1,50 çelik lif katkılı numunelere ait $W_{8,2}$ – D değişim grafiği.

3.5. Rijit Üstyapının Maliyet Analizi

Kontrol numunesi ile %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 oranlarında çelik lif içeren beton numunelerine ait karayolu beton kaplama kalınlığına yönelik maliyet analizleri, 2025 yılı birim fiyatları esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Beton kaplama altında tüm numuneler için AASHTO tarafından önerilen 20 cm

kalınlığındaki plentmiks temel (PMT) tabakasının uygulanması ortak olduğundan, bu tabaka maliyet analizi kapsamı dışında bırakılmıştır. Analizlerde kullanılan birim fiyatlar Tablo 28'de verilmiştir. Kontrol ile %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 çelik lif katkılı numunelere ait birim fiyatlar Tablo 28 yardımı ile hesaplanmış ve Tablo 29'da verilmiştir.

Tablo 28. Maliyet analizi için birim fiyatları (KGM, 2025)

Malzemeler	Birimi	Birim Fiyatı (₺)
Çimento, (3,80 gr/cm ³)		1.510,00
Mineral katkı, (2,90 gr/cm ³)		720,00
Su		22,40
(0-5) mm Agregası, (2,77 gr/cm ³)		60,00
(5-11) mm Agregası, (2,79 gr/cm ³)	₺/Ton	60,00
(11-22) mm Agregası, (2,80 gr/cm ³)		60,00
Kimyasal katkı, (1,08 gr/cm ³) (Yeni nesil Hiper akışkanlaştırıcı)		15.890,00
Çelik lif, 7,85 gr/cm ³		13.500,00

Tablo 29. Kontrol ve %0,75, %1,00, %1,25, %1,50 çelik lif katkılı numunelere ait birim fiyatlar

Karışım Kodu	Bağlayıcılar (kg/m³)		Agrega (kg/m³)			Çelik Lif (kg/m³)	Su (kg/m³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m³)	Toplam Maliyet (£/m³)	1 m², 1 cm maliyeti (£)
	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu	(0-5)	(5-11)	(11-22)					
			mm Agrega	mm Agrega	mm Agrega					
(K-Ç)	450	0	410	709	746	0			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
(0,75L+Ç)	450	0	406	701	738	58,88			1.684,45	16,84
(0,75L+Ç15Y)	382,50	67,50	405	699	736	58,88			1.630,83	16,31
(0,75L+Ç20Y)	360	90	405	699	736	58,88			1.613,05	16,13
(0,75L+Ç25Y)	337,50	112,50	404	698	735	58,88			1.595,10	15,95
(0,75L+Ç30Y)	315	135	404	698	735	58,88			1.577,32	15,77
(L+Ç)	450	0	404	698	735	78,50			1.948,84	19,49
(L+Ç15Y)	382,50	67,50	403	697	733	78,50			1.895,28	18,95
(L+Ç20Y)	360	90	403	696	733	78,50	180	6	1.877,44	18,77
(L+Ç25Y)	337,50	112,50	403	696	732	78,50			1.859,61	18,60
(L+Ç30Y)	315	135	402	695	732	78,50			1.841,71	18,42
(1,25L+Ç)	450	0	403	695	732	98,13			2.213,43	22,13
(1,25L+Ç15Y)	382,50	67,50	402	694	730	98,13			2.159,86	21,60
(1,25L+Ç20Y)	360	90	401	693	730	98,13			2.141,97	21,42
(1,25L+Ç25Y)	337,50	112,50	401	693	729	98,13			2.124,13	21,24
(1,25L+Ç30Y)	315	135	401	692	729	98,13			2.106,30	21,06
(1,50L+Ç)	450	0	401	693	729	117,75			2.477,88	24,78
(1,50L+Ç15Y)	382,50	67,50	400	691	728	117,75			2.424,31	24,24
(1,50L+Ç20Y)	360	90	400	691	727	117,75			2.406,48	24,06
(1,50L+Ç25Y)	337,50	112,50	400	690	727	117,75			2.388,64	23,89
(1,50L+Ç30Y)	315	135	399	690	726	117,75			2.370,75	23,71

3.5.1. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) %0,75 çelik lif katkılı numunelerin maliyet analizi

Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) %0,75 çelik lif katkılı numunelere ait maliyet analizi Tablo 30'da

verilmiştir. Tablo 30 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %0,75 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için (1×10⁶, 5×10⁶, 10×10⁶, 50×10⁶,

100×10⁶, 200×10⁶ ve 400×10⁶) üstyapı tabaka kalınlığında en az %79,67 en fazla ise %89,87 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

3.5.2. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) %1,00 çelik lif katkılı numunelerin maliyet analizi

Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) %1,00 çelik lif katkılı numunelere ait maliyet analizi Tablo 31'de verilmiştir.

Tablo 31 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1,00 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için (1×10⁶, 5×10⁶, 10×10⁶, 50×10⁶, 100×10⁶, 200×10⁶ ve 400×10⁶) üstyapı tabaka kalınlığında en az %99,81 en fazla ise %111,49 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

3.5.3. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) %1,25 çelik lif katkılı numunelerin maliyet analizi

Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) %1,25 çelik lif katkılı numunelere ait maliyet analizi Tablo 32'de verilmiştir.

Tablo 32 incelendiğinde, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1,25 çelik lif katkılı beton kullanılması durumunda, farklı proje trafikleri için (1×10⁶, 5×10⁶, 10×10⁶, 50×10⁶, 100×10⁶, 200×10⁶ ve 400×10⁶) üstyapı tabaka kalınlığında en az %117,14 en fazla ise %135,19 oranında maliyet artışı meydana gelmektedir.

3.5.4. Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) %1,50 çelik lif katkılı numunelerin maliyet analizi

Taşıma gücü çok zayıf zeminlerde (plastik kil) %1,50 çelik lif katkılı numunelere ait maliyet analizi Tablo 33'de verilmiştir.

Tablo 33'ün incelenmesi sonucunda, beton kaplama kalınlığı tasarımında kontrol numunesi yerine %1,50 çelik lif katkılı betonun tercih edilmesi durumunda, 1×10⁶, 5×10⁶, 10×10⁶, 50×10⁶, 100×10⁶, 200×10⁶ ve 400×10⁶ proje trafiği seviyeleri için üstyapı tabaka kalınlığına bağlı maliyetlerde en düşük %133,11, en yüksek ise %158,36 oranında artış meydana geldiği belirlenmiştir. Benzer biçimde, literatürde Öztürk ve Özyurt (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, betona %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00 oranlarında çelik lif ilavesinin eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını artırdığı, buna karşılık beton kaplama kalınlığında sırasıyla %5,20, %9,60, %14,00 ve %19,70 oranlarında azalma sağladığı rapor edilmiştir. Ancak aynı çalışmada maliyetlerin sırasıyla %13,90, %51,30, %85,50 ve %111,50 oranlarında arttığı ifade edilmiş olup, elde edilen bulguların bu çalışma sonuçlarıyla uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

3.6. Tasarımlar için İlk Yapım Esnasındaki CO₂ Emisyonlarının Hesaplanması

Kontrol ve %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 çelik lif katkılı numunelerin karayolu beton kaplama kalınlığı hesaplamaları tamamlandıktan sonra ilk yapım esnasındaki CO₂ salınım miktarları hesaplanmıştır.

Hesaplamalar neticesindeki sonuçlar Tablo 34'de sunulmuştur.

Yapılan tasarımlar incelendiğinde; YFC katkısının atık bir malzeme olması nedeniyle hazırlanan karışımlarda YFC oranının artması ile birlikte ilk yapım esnasında meydana gelen CO₂ salınım miktarlarında azalma meydana geldiği, ancak çelik lif katkısının kullanıldığı karışımlarda çelik lif oranının artmasının karışımlardaki CO₂ emisyonlarını arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, 1×10⁶, 5×10⁶, 10×10⁶, 50×10⁶, 100×10⁶, 200×10⁶ ve 400×10⁶ standart dingil yükü tekerrürleri için tasarımlar neticesinde birim m² bazında hesaplanan ilk yapım esnasında meydana gelen CO₂ emisyonları Tablo 35-38'da görülmektedir.

Tablo 30-33 incelendiğinde, %0,75, %1, %1,25, %1,5 oranlarında çelik lif katkılı tasarımlarda, çelik lif oranı arttıkça tabaka kalınlığında azalma görüldüğü, ancak tabaka kalınlığında meydana gelen azalmaya rağmen, Tablo 35-38 incelendiğinde %0,75, %1, %1,25, %1,5 oranlarında çelik lif katkılı tasarımlarda sırasıyla ilk yapım esnasında meydana gelen CO₂ emisyonlarının sırasıyla %24,03 - %34,72, %28,89 - %41,36, %31,86 - %49,94, %34,97 - %58,52 artış meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durumda YFC'nin CO₂ emisyonu azaltmada tek başına emisyonu azaltmada yeterli olmadığı çelik lif oranının artmasının karışımlardaki CO₂ emisyonlarını arttırdığı tespit edilmiştir.

Tablo 30. %0,75 Çelik lif katkılı numunelere ait maliyet

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 (%)
(0,75L+Ç)	1,00	14,064	13,363	4,98			16,00	79,67
	5,00	18,887	17,973	4,84			16,03	79,95
	10,00	21,204	20,221	4,64			16,06	80,33
	50,00	27,290	26,081	4,43	8,91	16,84	16,10	80,72
	100,00	30,307	28,976	4,39			16,10	80,80
	200,00	33,614	32,146	4,37			16,11	80,84
	400,00	37,244	35,624	4,35			16,11	80,87
(0,75L+Ç15Y)	1,00	13,807	12,951	6,20			15,30	82,73
	5,00	18,555	17,419	6,12			15,31	82,89
	10,00	20,848	19,629	5,85			15,35	83,42
	50,00	26,850	25,357	5,56	8,37	16,31	15,40	83,97
	100,00	29,822	28,179	5,51			15,41	84,07
	200,00	33,081	31,267	5,48			15,41	84,13
	400,00	36,655	34,653	5,46			15,42	84,17
(0,75L+Ç20Y)	1,00	13,589	12,690	6,62			15,06	83,84
	5,00	18,273	17,061	6,63			15,06	83,81
	10,00	20,546	19,243	6,34			15,11	84,38
	50,00	26,477	24,889	6,00	8,19	16,13	15,16	85,06
	100,00	29,413	27,666	5,94			15,17	85,17
	200,00	32,626	30,701	5,90			15,18	85,25
	400,00	36,157	34,028	5,89			15,18	85,28
(0,75L+Ç25Y)	1,00	13,650	12,776	6,40			14,93	86,28
	5,00	18,352	17,178	6,39			14,93	86,29
	10,00	20,627	19,370	6,10			14,98	86,89
	50,00	26,579	25,042	5,78	8,01	15,95	15,03	87,51
	100,00	29,515	27,833	5,70			15,04	87,68
	200,00	32,751	30,886	5,69			15,04	87,69
	400,00	36,292	34,234	5,67			15,05	87,74
(0,75L+Ç30Y)	1,00	13,721	12,842	6,41			14,76	88,37
	5,00	18,445	17,272	6,36			14,77	88,46
	10,00	20,729	19,469	6,08			14,81	89,03
	50,00	26,703	25,164	5,76	7,84	15,77	14,86	89,66
	100,00	29,662	27,965	5,72			14,87	89,75
	200,00	32,903	31,034	5,68			14,88	89,83
	400,00	36,459	34,394	5,66			14,88	89,87

Tablo 31. %1,00 çelik lif 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 (%)
(1L+Ç)	1,00	14,064	12,883	8,40			17,85	100,41
	5,00	18,887	17,325	8,27			17,88	100,69
	10,00	21,204	19,528	7,91			17,95	101,48
	50,00	27,290	25,232	7,54	8,91	19,49	18,02	102,29
	100,00	30,307	28,044	7,47			18,03	102,44
	200,00	33,614	31,118	7,43			18,04	102,53
	400,00	37,244	34,488	7,40			18,05	102,59
	1,00	13,807	12,200	11,64			16,75	100,03
(1L+Ç15Y)	5,00	18,555	16,375	11,75			16,73	99,81
	10,00	20,848	18,501	11,26			16,82	100,91
	50,00	26,850	23,995	10,63	8,37	18,95	16,94	102,32
	100,00	29,822	26,683	10,53			16,96	102,56
	200,00	33,081	29,616	10,47			16,97	102,69
	400,00	36,655	32,832	10,43			16,98	102,79
	1,00	13,589	11,984	11,81			16,56	102,06
	5,00	18,273	16,068	12,07			16,51	101,49
(1L+Ç20Y)	10,00	20,546	18,169	11,57			16,60	102,62
	50,00	26,477	23,597	10,88	8,19	18,77	16,73	104,21
	100,00	29,413	26,243	10,78			16,75	104,44
	200,00	32,626	29,134	10,70			16,76	104,60
	400,00	36,157	32,301	10,66			16,77	104,70
	1,00	13,650	12,093	11,41			16,47	105,56
	5,00	18,352	16,226	11,58			16,44	105,14
	10,00	20,627	18,339	11,09			16,53	106,28
(1L+Ç25Y)	50,00	26,579	23,800	10,45	8,01	18,60	16,65	107,76
	100,00	29,515	26,469	10,32			16,68	108,08
	200,00	32,751	29,383	10,28			16,68	108,16
	400,00	36,292	32,573	10,25			16,69	108,25
	1,00	13,721	12,189	11,16			16,36	108,77
	5,00	18,445	16,363	11,29			16,34	108,47
	10,00	20,729	18,489	10,81			16,43	109,60
	50,00	26,703	23,980	10,20	7,84	18,42	16,54	111,04
(1L+Ç30Y)	100,00	29,662	26,665	10,10			16,56	111,26
	200,00	32,903	29,599	10,04			16,57	111,40
	400,00	36,459	32,812	10,00			16,57	111,49

Tablo 32. %1,25 çelik lif katkılı numunelere ait maliyet analizi

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak kalınlığı (cm)	%1,25 Çelik Lif katkı beton plak kalınlığı (cm)	Beton plak kalınlığındaki azalma (%)	Kontrol numunesi 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	%1,25 Çelik Lif katkı numunelerin 1 m ² , 1 cm maliyeti (₺)	Beton plak kalınlığındaki azalmanın maliyete etkisi (₺)	%1,25 Çelik Lif katkı numunelerin kontrol numunelerine göre maliyet artışı (%)
(1,25L+Ç)	1,00	14,064	12,291	12,61			19,34	117,16
	5,00	18,887	16,505	12,61			19,34	117,14
	10,00	21,204	18,641	12,09			19,46	118,45
	50,00	27,290	24,163	11,46	8,91	22,13	19,60	120,01
	100,00	30,307	26,868	11,35			19,62	120,29
	200,00	33,614	29,820	11,29			19,64	120,43
	400,00	37,244	33,058	11,24			19,65	120,56
	1,00	13,807	11,869	14,04			18,57	121,79
(1,25L+Ç15Y)	5,00	18,555	15,905	14,28			18,51	121,17
	10,00	20,848	17,991	13,71			18,64	122,64
	50,00	26,850	23,383	12,91	8,37	21,60	18,81	124,69
	100,00	29,822	26,010	12,78			18,84	125,02
	200,00	33,081	28,877	12,71			18,85	125,22
	400,00	36,655	32,017	12,65			18,87	125,36
	1,00	13,589	11,679	14,06			18,41	124,67
	5,00	18,273	15,634	14,44			18,33	123,66
(1,25L+Ç20Y)	10,00	20,546	17,694	13,88			18,45	125,12
	50,00	26,477	23,025	13,04	8,19	21,42	18,63	127,33
	100,00	29,413	25,618	12,90			18,66	127,69
	200,00	32,626	28,445	12,81			18,67	127,92
	400,00	36,157	31,542	12,76			18,69	128,05
	1,00	13,650	11,742	13,97			18,27	127,99
	5,00	18,352	15,725	14,31			18,20	127,10
	10,00	20,627	17,795	13,73			18,32	128,64
(1,25L+Ç25Y)	50,00	26,579	23,147	12,91	8,01	21,24	18,50	130,81
	100,00	29,515	25,753	12,75			18,53	131,25
	200,00	32,751	28,593	12,70			18,54	131,38
	400,00	36,292	31,704	12,64			18,56	131,53
	1,00	13,721	11,824	13,83			18,15	131,60
	5,00	18,445	15,842	14,11			18,09	130,83
	10,00	20,729	17,922	13,54			18,21	132,37
	50,00	26,703	23,299	12,75	7,84	21,06	18,38	134,51
(1,25L+Ç30Y)	100,00	29,662	25,918	12,62			18,40	134,84
	200,00	32,903	28,776	12,54			18,42	135,05
	400,00	36,459	31,905	12,49			18,43	135,19

Tablo 33. %1,50 çelik lif 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 (%)
(1,50L+Ç)	1,00	14,064	11,786	16,20			20,76	133,11
	5,00	18,887	15,789	16,41			20,71	132,53
	10,00	21,204	17,864	15,75			20,88	134,35
	50,00	27,290	23,231	14,87	8,91	24,78	21,09	136,80
	100,00	30,307	25,845	14,73			21,13	137,21
	200,00	33,614	28,692	14,64			21,15	137,44
	400,00	37,244	31,813	14,58			21,17	137,61
(1,50L+Ç15Y)	1,00	13,807	11,478	16,87			20,15	140,73
	5,00	18,555	15,344	17,30			20,05	139,48
	10,00	20,848	17,374	16,67			20,20	141,33
	50,00	26,850	22,645	15,66	8,37	24,24	20,45	144,24
	100,00	29,822	25,202	15,49			20,49	144,73
	200,00	33,081	27,987	15,40			20,51	145,00
	400,00	36,655	31,035	15,33			20,53	145,20
(1,50L+Ç20Y)	1,00	13,589	11,294	16,89			20,00	144,10
	5,00	18,273	15,078	17,48			19,86	142,36
	10,00	20,546	17,079	16,87			20,00	144,14
	50,00	26,477	22,294	15,80	8,19	24,06	20,26	147,29
	100,00	29,413	24,818	15,62			20,31	147,82
	200,00	32,626	27,565	15,51			20,33	148,14
	400,00	36,157	30,570	15,45			20,35	148,32
(1,50L+Ç25Y)	1,00	13,650	11,431	16,26			20,00	149,58
	5,00	18,352	15,276	16,76			19,88	148,08
	10,00	20,627	17,299	16,13			20,03	149,95
	50,00	26,579	22,556	15,14	8,01	23,89	20,27	152,92
	100,00	29,515	25,104	14,94			20,32	153,49
	200,00	32,751	27,880	14,87			20,33	153,71
	400,00	36,292	30,918	14,81			20,35	153,90
(1,50L+Ç30Y)	1,00	13,721	11,518	16,06			19,90	153,94
	5,00	18,445	15,403	16,50			19,80	152,60
	10,00	20,729	17,439	15,87			19,94	154,49
	50,00	26,703	22,722	14,91	7,84	23,71	20,17	157,41
	100,00	29,662	25,287	14,75			20,21	157,89
	200,00	32,903	28,081	14,66			20,23	158,17
	400,00	36,459	31,138	14,59			20,25	158,36

Tablo 34. Kontrol ve %0,75, %1,00, %1,25, %1,50 çelik lif katkılı karışımların birim m³ için ait ilk yapım esnasındaki CO₂ salınım miktarları

Karışım Kodu	Bağlayıcılar (kg/m ³)		Agrega (kg/m ³)			Çelik Lif (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Toplam CO ₂ Emisyonu (CO ₂ kg/m ³)	1 m ² , 1 cm (CO ₂ kg/m ³)
	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu	(0-5) mm Agrega	(5-11) mm Agrega	(11-22) mm Agrega					
(K-Ç)	450	0	410	709	746	0			423,84	4,24
(K-Ç15Y)	382,50	67,50	409	707	744	0			363,05	3,63
(K-Ç20Y)	360	90	409	707	744	0			342,80	3,43
(K-Ç25Y)	337,50	112,50	409	706	743	0			322,54	3,23
(K-Ç30Y)	315	135	409	706	743	0			302,29	3,02
(0,75L+Ç)	450	0	406	701	738	58,88			553,24	5,53
(0,75L+Ç15Y)	382,50	67,50	405	699	736	58,88			492,46	4,92
(0,75L+Ç20Y)	360	90	405	699	736	58,88			472,21	4,72
(0,75L+Ç25Y)	337,50	112,50	404	698	735	58,88			451,94	4,52
(0,75L+Ç30Y)	315	135	404	698	735	58,88			431,69	4,32
(L+Ç)	450	0	404	698	735	78,50			596,35	5,96
(L+Ç15Y)	382,50	67,50	403	697	733	78,50			535,58	5,36
(L+Ç20Y)	360	90	403	696	733	78,50	180	6	515,32	5,15
(L+Ç25Y)	337,50	112,50	403	696	732	78,50			495,07	4,95
(L+Ç30Y)	315	135	402	695	732	78,50			474,80	4,75
(1,25L+Ç)	450	0	403	695	732	98,13			639,50	6,39
(1,25L+Ç15Y)	382,50	67,50	402	694	730	98,13			578,72	5,79
(1,25L+Ç20Y)	360	90	401	693	730	98,13			558,46	5,58
(1,25L+Ç25Y)	337,50	112,50	401	693	729	98,13			538,20	5,38
(1,25L+Ç30Y)	315	135	401	692	729	98,13			517,94	5,18
(1,50L+Ç)	450	0	401	693	729	117,75			682,61	6,83
(1,50L+Ç15Y)	382,50	67,50	400	691	728	117,75			621,84	6,22
(1,50L+Ç20Y)	360	90	400	691	727	117,75			601,58	6,02
(1,50L+Ç25Y)	337,50	112,50	400	690	727	117,75			581,32	5,81
(1,50L+Ç30Y)	315	135	399	690	726	117,75			561,06	5,61

Tablo 35. %0,75 çelik lif katkılı tasarımların ilk yapım esnasındaki CO₂ salınım miktarları

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak CO ₂ (kg)	%0,75 Çelik Lif katkılı beton plak CO ₂ (kg)	Beton plak CO ₂ (kg) Artışı	Beton plak CO ₂ (%) Artışı
(0,75L+Ç)	1	59,61	73,93	14,32	24,03
	5	80,05	99,43	19,38	24,22
	10	89,87	111,87	22,00	24,48
	50	115,66	144,29	28,63	24,75
	100	128,45	160,31	31,86	24,80
	200	142,47	177,85	35,38	24,83
	400	157,85	197,09	39,23	24,85
(0,75L+Ç15Y)	1	50,13	63,78	13,65	27,23
	5	67,36	85,78	18,42	27,34
	10	75,69	96,66	20,98	27,71
	50	97,48	124,87	27,39	28,10
	100	108,27	138,77	30,50	28,17
	200	120,10	153,98	33,88	28,21
	400	133,08	170,65	37,57	28,24
(0,75L+Ç20Y)	1	46,58	59,92	13,34	28,64
	5	62,64	80,56	17,92	28,61
	10	70,43	90,87	20,43	29,01
	50	90,76	117,53	26,76	29,49
	100	100,83	130,64	29,81	29,57
	200	111,84	144,97	33,13	29,62
	400	123,95	160,68	36,74	29,64
(0,75L+Ç25Y)	1	44,03	57,74	13,71	31,15
	5	59,19	77,63	18,44	31,16
	10	66,53	87,54	21,01	31,58
	50	85,73	113,17	27,45	32,02
	100	95,20	125,79	30,59	32,13
	200	105,64	139,59	33,95	32,14
	400	117,06	154,72	37,66	32,17
(0,75L+Ç30Y)	1	41,48	55,44	13,96	33,66
	5	55,76	74,56	18,80	33,72
	10	62,66	84,05	21,38	34,13
	50	80,72	108,63	27,91	34,58
	100	89,67	120,72	31,06	34,64
	200	99,46	133,97	34,51	34,69
	400	110,21	148,48	38,26	34,72

Tablo 36. %1 çelik lif katkılı tasarımların ilk yapım esnasındaki CO₂ salınım miktarları

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak CO ₂ (kg)	%1 Çelik Lif katkılı beton plak CO ₂ (kg)	Beton plak CO ₂ (kg) Artışı	Beton plak CO ₂ (%) Artışı
(1L+Ç)	1	59,61	76,83	17,22	28,89
	5	80,05	103,32	23,27	29,07
	10	89,87	116,46	26,59	29,58
	50	115,66	150,47	34,81	30,09
	100	128,45	167,24	38,79	30,20
	200	142,47	185,57	43,11	30,26
	400	157,85	205,67	47,82	30,29
(L+Ç15Y)	1	50,13	65,34	15,21	30,35
	5	67,36	87,70	20,34	30,19
	10	75,69	99,09	23,40	30,91
	50	97,48	128,51	31,03	31,83
	100	108,27	142,91	34,64	31,99
	200	120,10	158,62	38,52	32,07
	400	133,08	175,84	42,76	32,13
(L+Ç20Y)	1	46,58	61,76	15,17	32,57
	5	62,64	82,80	20,16	32,19
	10	70,43	93,63	23,20	32,93
	50	90,76	121,60	30,84	33,97
	100	100,83	135,24	34,41	34,12
	200	111,84	150,13	38,29	34,24
	400	123,95	166,45	42,51	34,29
(L+Ç25Y)	1	44,03	59,87	15,84	35,98
	5	59,19	80,33	21,14	35,71
	10	66,53	90,79	24,26	36,46
	50	85,73	117,83	32,10	37,44
	100	95,20	131,04	35,84	37,65
	200	105,64	145,47	39,83	37,70
	400	117,06	161,26	44,20	37,76
(L+Ç30Y)	1	41,48	57,87	16,40	39,53
	5	55,76	77,69	21,93	39,34
	10	62,66	87,79	25,12	40,10
	50	80,72	113,86	33,14	41,05
	100	89,67	126,61	36,94	41,20
	200	99,46	140,54	41,07	41,30
	400	110,21	155,79	45,58	41,36

Tablo 37. %1,25 çelik lif katkılı tasarımların ilk yapım esnasındaki CO₂ salınım miktarları

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak CO ₂ (kg)	%1 Çelik Lif katkılı beton plak CO ₂ (kg)	Beton plak CO ₂ (kg) Artışı	Beton plak CO ₂ (%) Artışı
(1,25L+Ç)	1	59,61	78,60	18,99	31,86
	5	80,05	105,55	25,50	31,85
	10	89,87	119,21	29,34	32,64
	50	115,66	154,52	38,86	33,59
	100	128,45	171,82	43,37	33,76
	200	142,47	190,70	48,23	33,85
	400	157,85	211,40	53,55	33,92
(1,25L+Ç15Y)	1	50,13	68,69	18,56	37,03
	5	67,36	92,05	24,68	36,64
	10	75,69	104,12	28,43	37,56
	50	97,48	135,32	37,84	38,82
	100	108,27	150,52	42,25	39,03
	200	120,10	167,12	47,01	39,15
	400	133,08	185,29	52,21	39,23
(1,25L+Ç20Y)	1	46,58	65,22	18,64	40,01
	5	62,64	87,31	24,67	39,38
	10	70,43	98,81	28,38	40,29
	50	90,76	128,58	37,82	41,67
	100	100,83	143,07	42,24	41,89
	200	111,84	158,85	47,01	42,03
	400	123,95	176,15	52,20	42,11
(1,25L+Ç25Y)	1	44,03	63,20	19,17	43,54
	5	59,19	84,63	25,44	42,98
	10	66,53	95,77	29,24	43,95
	50	85,73	124,58	38,85	45,32
	100	95,20	138,60	43,40	45,59
	200	105,64	153,89	48,25	45,68
	400	117,06	170,63	53,57	45,77
(1,25L+Ç30Y)	1	41,48	61,24	19,76	47,65
	5	55,76	82,05	26,29	47,16
	10	62,66	92,83	30,16	48,14
	50	80,72	120,68	39,95	49,50
	100	89,67	134,24	44,57	49,71
	200	99,46	149,04	49,58	49,85
	400	110,21	165,25	55,04	49,94

Tablo 38. %1,5 Çelik Lif Katkılı tasarımların ilk yapım esnasındaki CO₂ salınım miktarları

Karışım Kodu	W _{8,2} (10 ⁶)	Kontrol numunesi beton plak CO ₂ (kg)	%1 Çelik Lif katkılı beton plak CO ₂ (kg)	Beton plak CO ₂ (kg) Artışı	Beton plak CO ₂ (%) Artışı
(1,5L+Ç)	1	59,61	80,45	20,84	34,97
	5	80,05	107,78	27,73	34,64
	10	89,87	121,94	32,07	35,69
	50	115,66	158,58	42,91	37,10
	100	128,45	176,42	47,97	37,34
	200	142,47	195,86	53,39	37,47
	400	157,85	217,16	59,31	37,57
(1,5L+Ç15Y)	1	50,13	71,37	21,25	42,39
	5	67,36	95,41	28,05	41,64
	10	75,69	108,04	32,35	42,74
	50	97,48	140,82	43,34	44,46
	100	108,27	156,72	48,45	44,75
	200	120,10	174,03	53,93	44,91
	400	133,08	192,99	59,91	45,02
(1,5L+Ç20Y)	1	46,58	67,94	21,36	45,85
	5	62,64	90,71	28,07	44,80
	10	70,43	102,74	32,31	45,88
	50	90,76	134,12	43,35	47,76
	100	100,83	149,30	48,47	48,07
	200	111,84	165,83	53,98	48,27
	400	123,95	183,90	59,96	48,37
(1,5L+Ç25Y)	1	44,03	66,45	22,42	50,93
	5	59,19	88,80	29,61	50,02
	10	66,53	100,56	34,03	51,15
	50	85,73	131,12	45,40	52,95
	100	95,20	145,94	50,74	53,30
	200	105,64	162,07	56,44	53,43
	400	117,06	179,73	62,68	53,54
(1,5L+Ç30Y)	1	41,48	64,62	23,15	55,80
	5	55,76	86,42	30,66	54,99
	10	62,66	97,84	35,18	56,15
	50	80,72	127,48	46,76	57,93
	100	89,67	141,88	52,21	58,23
	200	99,46	157,55	58,09	58,40
	400	110,21	174,70	64,49	58,52

4. Sonuç ve Öneriler

Bir seri parametrik incelemelerin sunulduğu çalışmada, taşıma gücü çok zayıf (plastik kil) zeminlerde, %0, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında çimento ile ikame edilmiş beton numuneleri esas alınarak %0, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 oranlarında çelik lif ile güçlendirilmiş numunelerin, beton basınç, eğilmede ve çekme dayanımları tespit edilmiş ve kontrol numuneleri

referans alınarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme neticesinde numunelerin AASTO 1993 yöntemi ile kaplama kalınlıkları hesaplanmış ve kontrol numunelerine göre maliyet analizi yapılmıştır. Bu kapsamda üretilen beton numunelerinden elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

* YFC ikamesi uygulanarak üretilen ve 7 gün kür edilen beton numunelerinde basınç dayanımında düşüş gözlenirken, 28 ve 90 günlük kür sürelerine sahip

numunelerde basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. Söz konusu artışın, çimentonun %20 oranında YFC ile ikame edildiği numunelerde en yüksek seviyeye ulaştığı, bu oranın aşılmasıyla birlikte dayanım artış hızının azaldığı belirlenmiştir. Betonun 28 günlük kür süresi esas alındığında, basınç dayanımındaki artışın kontrol betonuna kıyasla %15, %20, %25 ve %30 YFC ikameli betonlarda sırasıyla %9,97, %14,30, %5,89 ve %4,18 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, çelik lif miktarındaki artışa bağlı olarak beton numunelerinin basınç dayanımı değerlerinde kontrol numunesine göre azalma meydana gelmiş; bu azalmanın %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 çelik lif içeren numunelerde sırasıyla %2,07, %4,16, %8,33 ve %12,49 düzeylerinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Sadece çimento kullanılarak üretilen kontrol numunesi (K-Ç) esas alındığında, YFC katkısı içeren ve 7, 28 ve 90 gün kür edilen tüm numunelerin eğilme dayanımlarında artış olduğu görülmüştür. Bu artışın, çimentonun %20 oranında YFC ile ikame edildiği betonlarda maksimum seviyeye ulaştığı, daha yüksek ikame oranlarında ise artış miktarının azaldığı belirlenmiştir. 28 günlük kür süresi dikkate alındığında, eğilme dayanımındaki artışın kontrol betona göre %15, %20, %25 ve %30 YFC ikameli betonlarda sırasıyla %3,40, %6,42, %5,58 ve %4,58 oranlarında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, çelik lif katkısının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1,50 oranlarında çelik lif içeren numunelerin eğilme dayanımlarının kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %9,77, %17,48, %28,37 ve %39,10 oranlarında arttığı belirlenmiştir.

* Çekme dayanımının; 7 günlük beton numunelerinde çimentonun yerine %20 YFC ikameli numunelerde en yüksek dayanım değerine ulaştığı, bu değerden sonra %25 ve %30 YFC ikameli numunelerde ise kontrol betonuna göre azalma meydana gelmiştir. 28 ve 90 gün küre tabi numunelerde, çekme dayanımının kontrol numunelerine göre artış gösterdiği, maksimum dayanımın %20 YFC ikameli numunelerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. 28 günlük çekme dayanımındaki bu artışın kontrol betona kıyasla sırasıyla %5,18, %8,17, %7,17 ve %6,37 oranlarında meydana geldiği görülmüştür. Çelik lif katkısı ile beton numunelerin çekme dayanımı değerlerinde referans kontrol betonuna göre artış meydana gelmektedir. 28 günlük 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 oranlarında daha fazla çıktığı gözlenmiştir.

* Hesaplamalar neticesinde; taşıma gücü çok zayıf zeminler (plastik kil) üzerine inşa edilecek YFC katkılı numunelerin 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 ve 400×10^6 farklı proje trafiğinde, beton kaplama kalınlığını %1,58-3,38 oranında azalttığı,

bunun sonucunda maliyetin %7,51-%14,16 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Çelik lif katkılı numuneler için beton kaplama kalınlığının ortalama %4,35-18,66 oranında azaldığı, ancak maliyetin %79,58-135,55 oranlarında arttığı tespit edilmiştir.

* %0,75, %1, %1,25, %1,5 oranlarında çelik lif katkılı tasarımlarda sırasıyla ilk yapım esnasında meydana gelen CO₂ emisyonlarının sırasıyla %24,03 - %34,72, %28,89 - %41,36, %31,86 - %49,94, %34,97 - %58,52 artış meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durumda YFC'nin CO₂ emisyonu azaltmada tek başına emisyonu azaltmada yeterli olmadığı çelik lif oranının artmasının karışımlardaki CO₂ emisyonlarını arttırdığı tespit edilmiştir.

* Çelik lifin ilk yapımdaki CO₂ emisyonu meydana getirmesi, bunun yanında tasarlanan yolun servis ömrü boyunca sağlayacağı durabilite göz önüne alındığında konunun daha detaylı bir çalışmada ele alınması arzu edilmektedir. Ayrıca, çelik lifin sadece taşıma kapasitesi değil, dinamik trafik yükleri altındaki "yorulma ömrü" avantajına da gelecek çalışmalarda değerlendirilmelidir.

Çalışma sonucunda, değişik trafik yükü altında taşıma gücü çok zayıf bir zemine çimento ikameli YFC ve çelik lif ilave edilmesiyle, beton yol kaplama tasarımı için istenen basınç, eğilme ve çekme dayanımı şartlarının sağlandığı, rijit yol üstyapı tabaka kalınlıklarının azaldığı, ancak çelik lif kullanılan karışımlarda, liflerin birim maliyet içindeki yüksek payı nedeniyle, yapım maliyetlerinde belirgin bir artış belirlenmiştir. Ayrıca söz konusu tasarımlarda maliyet analizlerine paralel tasarımlarda çelik lif oranın ve proje trafiğinin artmasının CO₂ emisyonlarında artış meydana getirdiği belirlenmiştir. Çelik lif tasarımlarının değerlendirilmesinde, tabaka kalınlığının azaltılmasını tek başına yeterli olmadığı bunun yanında; yapım maliyetleri ve ilk yapım esnasında meydana CO₂ emisyonlarının detaylı olarak değerlendirilmesinin önemi bu çalışma ile vurgulanmaya çalışılmıştır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	M.M.T	B.K
K	50	50
T	50	50
Y	50	50
VTI	50	50
VAY	50	50
KT	50	50
YZ	50	50
KI	50	50
GR	50	50
PY	50	50
FA	50	50

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çalışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi, FDK-2022-2837 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. (1993). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C
- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195–217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- Arslan, A. (1993). Çelik lifli betonların özellikleri ve kullanım potansiyeli. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 369, 29–33.
- Bayrak, O. Ü. (2007). *Rijit üstyapı tasarımına yeni bir yaklaşım* (Doktora tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Canadian Standards Association. (2014). *Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars* (CAN/CSA-A23.2-25A-14).
- Düzgün, O. A. (2001). *Çelik lifler ile üretilen hafif betonların bazı özelliklerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- 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.

- Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2021). Siyah karbon stabilizasyonlu zeminin rijit kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8(3), 1372–1384.
- Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2024). Metakaolin kullanılarak kum bir zemine yapılan zemin ıslahının rijit kaplama kalınlığına ve maliyetine etkilerinin araştırılması. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(5), 11–12.
- Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2025a). Öğütülmüş pomza taşı ile stabilize edilen kumlu zeminin esnek üstyapı tasarımına etkisinin araştırılması. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 11(1), 176–192.
- Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2025b). Cam tozu kullanılarak iyileştirilen zeminin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve maliyetinin araştırılması. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 5(1), 80–98.
- Giustozzi, F., Flintsch, G. W., & Crispino, M. (2015). Environmental impact analysis of low carbon road-foundation layers. *International Journal of Sustainable Transportation*, 9, 73–79.
- Gökçe, O. (2015). *Tünellerde çelik hasır yerine çelik tel kullanımının mekanik açıdan araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Holschemacher, K., Mueller, T., & Ribakov, Y. (2010). Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials & Design*, 31(5), 2604–2615. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.025>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories* (H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). IGES.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories> (Erişim tarihi: 26 Kasım 2025)
- Karabaş, B. (2025). *Çeşitli katkı malzemeleri ile stabilize edilen yol taban zeminlerinin karayolu üstyapısına etkileri ve sürdürülebilirliği* (Doktora tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2019). *Karayolları beton yol üstyapıları projelendirme rehberi (KBYÜPR)*. Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2025). *Karayolları Genel Müdürlüğü birim fiyatları*. <https://www.kgm.gov.tr> (Erişim tarihi: 14 Aralık 2025)
- Mansouri, S., Shahraki, F., Sadeghi, J., Koohestanian, E., & Sardashti Birjandi, M. R. (2024). Experimental investigation of energy consumption and CO₂ emission in cement kiln in effect of replacement natural pozzolan by method of grinding clinker and pozzolan separately. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 43(1).
- Morita, Y., Shimizu, K., Kato, H., Shibahara, H., & Yamasaki, T. (2011). A study for the measurement of environmental impact resulting from railway construction. In *Proceedings of the Joint Rail Conference (JRC)* (pp. 453–559). ASME, Pueblo, CO, USA.
- O'Brien, K. R., Ménaché, J., & O'Moore, L. M. (2009). Impact of fly ash content and fly ash transportation distance on embodied greenhouse gas emissions and water consumption in concrete. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 621–629.
- Öztürk, O., & Özyurt, N. (2022). Sustainability and cost-effectiveness of steel and polypropylene fiber reinforced concrete pavement mixtures. *Journal of Cleaner Production*,

- 17(1).
- Safaei, M., Oni, A. O., Gemechu, E. D., & Kumar, A. (2019). Evaluation of energy and greenhouse gas emissions of bitumen-derived transportation fuels from toe-to-heel air injection extraction technology. *Fuel*, 256, 1159. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.1159>
- Schiefer, C., & Plank, J. (2023). CO₂ emission of polycarboxylate superplasticizers (PCEs) used in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 427, 138785.
- Sekban, İ. (2007). *Çelik lif katkısının tekrarlı yük etkisindeki geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların davranışlarına etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Topçu, İ. B. (2006). *Beton teknolojisi*. Uğur Ofset A.Ş.
- Tunç, A. (2001). *Yol malzemeleri ve uygulamaları*. Türkiye.
- Türk Standartları Enstitüsü. (1998). *Sanayide kullanılan sıvı kimyasal ürünler – -20 °C’de yoğunluk tayini* (TS 781).
- Türk Standartları Enstitüsü. (2000). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler – Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar* (TS EN 1097-2).
- Türk Standartları Enstitüsü. (2002). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler – Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini* (TS EN 1097-6).
- Türk Standartları Enstitüsü. (2006). *Lifler – Betonda kullanım için – Bölüm 1: Çelik lifler – Tarifler, özellikler ve uygunluk* (TS EN 14889-1).
- Türk Standartları Enstitüsü. (2009). *Agregaların ısı ve bozunma özellikleri için deneyler – Bölüm 4: Kuruma çekmesinin tayini* (TS EN 1367-4).
- Türk Standartları Enstitüsü. (2012a). *Çimento – Bölüm 1: Genel çimentolar – Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri* (TS EN 197-1).
- Türk Standartları Enstitüsü. (2012b). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler – Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini – Eleme metodu* (TS EN 933-1).
- Türk Standartları Enstitüsü. (2019). *TCK beton yol kaplamaları teknik şartnamesi*.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2021). *Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 13: Basınç altında sekant elastisite modülünün tayini* (TS EN 12390-13).
- Uğurlu, A. (1999). *Çelik liflerle güçlendirilmiş beton* (2. baskı, Yayın No: MLC 878). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- Xu, C., & Cang, D. (2010). A brief overview of low CO₂ emission technologies for iron and steel making. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 17(3), 1–7.
- Yeşilyurt, M., & Kocadağıstan, B. (2023). Carbon footprint evaluation of a ready-mixed concrete plant. *Nanoera*, 3(1), 8–15.