

Reaktif Pudra Beton ile İnşa Edilecek Rijit Yol Kaplamasının Maliyet Hesaplaması

Abdulrezzak BAKIŞ¹, Fatih HATTATOĞLU², Osman Ünsal BAYRAK²

ÖZET: Bu çalışmada, rijit kaplama kalınlık ve maliyet hesaplamaları için, C30/37 betonu, lifli Reaktif Pudra Beton (Lifli RPB) ve lifsiz Reaktif Pudra Beton (Lifsiz RPB) olmak üzere 3 tip beton seçilmiştir. Betonların basınç ve eğilme dayanım sonuçlarıyla, beton yol kaplama kalınlıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan beton yol kaplama kalınlık değerleri ile rijit kaplama maliyet hesapları yapılmıştır. Hesaplamalarda; 8.2 Ton Eşdeğer Tek Dingil Yüğü Tekerrür Sayısı ($W_{8.2}$) 10×10^6 olan rijit yol kaplamasında, lifsiz RPB kaplama kalınlığı 17.15 cm, lifli RPB kaplama kalınlığı 17.17 cm ve C30/37 beton kaplama kalınlığı 23.04 cm olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, maliyet olarak $W_{8.2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km uzunluktaki beton yol için, lifsiz RPB kaplama maliyetinin, C30/37 beton kaplama maliyetinden %19.51 daha ekonomik olduğu ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton yol, reaktif pudra beton (rpb), rijit kaplama kalınlığı, rijit kaplama maliyeti

Cost Calculation of Rigid Pavement to Be Built With Reactive Powder Concrete

ABSTRACT: In this study, 3 types of concrete as C30/37 concrete, fibrous Reactive Powder Concrete (fibrous RPC) and non-fibrous Reactive Powder Concrete (non-fibrous RPC) were chosen for rigid pavement thickness and cost calculations. Concrete pavement thicknesses were calculated according to compressive and flexural strength results. Also calculated concrete pavement thickness values and rigid pavement cost calculations were done. In the study, non-fibrous RPC pavement thickness was calculated as 17.15 cm, fibrous RPC pavement thickness was calculated as 17.17 cm and C30/37 concrete pavement thickness was calculated as 23.04 cm in rigid pavement that is 8.2 Tones Equivalent Single-Axe Load Absolute Frequency ($W_{8.2}$) 10×10^6 . At the end of study, as cost for 1 km length of concrete pavement according to $W_{8.2}=10 \times 10^6$ value, it was found out that cost of non-fibrous RPC pavement is 19.51% more economic than the cost of C30/37 concrete pavement.

Keywords: Concrete road, reactive powder concrete (rpc), rigid pavement thickness, rigid pavement cost

¹ Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı, Bitlis, Türkiye

² Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı, Erzurum, Türkiye
Sorumlu yazar/Corresponding Author: Abdulrezzak BAKIŞ, abakis@beu.edu.tr

GİRİŞ

Rijit üstyapı, alt temel ve üzerine yapılan beton kaplamadan meydana gelmektedir. Rijit üstyapı tasarımında amaç, üstyapıdaki tabaka kalınlıklarını ve üstyapıda kullanılan malzemelerin özelliklerini belirlemektir (Bayrak, 2007). Birçok kurum, yolun trafiğe açıldığında tek yöndeki günlük ticari taşıt sayısının 5000'den fazla olması halinde beton kaplama yapılmasını öngörmektedir (Tunç, 2007). Her geçen gün artan ticari taşıt sayıları göz önüne alınarak yakın gelecekte yol üstyapısı olarak beton kaplamaların yaygınlaşacağı beklenmektedir (Bakış, 2015). Betona lifler katılarak geleneksel kür işlemlerinin dışında özel kürler uygulanarak Ultra Yüksek Performanslı Betonlar üretilebilmektedir. Bu beton sınıfında bulunan betonlardan birisi Reaktif Pudra Betondur (RPB).

Reaktif Pudra Beton ifadesinde; pudra kelimesi, RPB'yi oluşturan malzemelerin pudra tane boyutunda olmasından, reaktiflik kelimesi, puzolanik aktivitenin sıcak kür işlemi ile yeniden tekrarlamasından ve beton kelimesi ise diğer betonlar gibi çimento matrisli olmasından dolayı gelmektedir (İpek, 2009). Reaktif Pudra Beton (RPB), beton tipleri içerisinde en yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip, genellikle çimento, silis dumanı, kuvars kumu, kuvars tozu (pudrası), çelik lif, su ve süperakışkanlaştırıcılar ile özel kürler uygulanarak oluşturulan ultra yüksek performanslı bir betondur (Bakış, 2015). Normal çimento içerikli kompozitler ile karşılaştırıldığında RPB'nin en belirgin özelliği düşük boşluk oranı ve güçlendirilmiş çimento matrisidir (Dallaire et al., 1998). RPB, normal dayanımlı betonlara nazaran daha iyi direnç göstermektedir (Na-Hyun et al., 2012). RPB üretiminde sıkı tane yerleşimi hedefiyle agrega gradasyonu seçilebildiği gibi, kesikli granülometri işlenebilirlik artışı açısından önerilebilmektedir (Ünsal ve Şen, 2008; Yazıcı et al., 2008). RPB üretimlerinde agrega olarak genellikle kuvars kullanılmaktadır. Özel beton üretimleriyle basınç ve eğilme dayanımları düşük agregaların, beton yol kaplama inşasında kullanılabilirliği sağlanabilmektedir (Işık et al., 2015). RPB' de su/bağlayıcı oranı çok düşük olup 0.12-0.15 seviyesindedir (Roux et al., 1996; Bakış, 2015). Su/bağlayıcı oranı azaldıkça RPB'nin geçirgenliği azalmaktadır (Tam et al., 2012). Betona eklenen süperakışkanlaştırıcı gibi kimyasal katkı maddeleri, betonun bazı özelliklerini

iyileştirmek veya betona ek yeni özellikler kazandırmak amacıyla kullanılmaktadır. RPB' de su/bağlayıcı oranı çok düşük olduğundan en büyük sıkıntı karıştırma işleminde meydana gelmektedir. Karıştırma işleminin kolaylaştırılıp betona işlenebilirlik özelliğinin verilmesi için süperakışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır. Üretimde beton karıştırma işlemine süperakışkanlaştırıcı etkisi kendini gösterene kadar devam edilmelidir. Süperakışkanlaştırıcı etkisi görülene kadar karışım sert kıvamda olup karıştırma işlemi zorlaşmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı etkisi beton karıştırıcısının gücüne göre 10-15 dakika sürebilmektedir. Mikser gücü ve hızı arttığında karıştırma süresi kısalmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı etkisi görüldüğünde ise karışım katı kıvamdan sıvı hale geçmektedir. RPB' de kullanılan çimento miktarına göre diğer malzeme miktarları ağırlıkça oranlandırılır. Çimento miktarına göre diğer malzemeler bu oranın ağırlıkça yüzdeleri şeklinde dilimlere ayrılır ve karışım oluşturulur (Bakış, 2015). RPB kaplamalar, normal betonlara nazaran daha yüksek basınç ve eğilme dayanıma sahip olduklarından daha düşük kalınlıkta inşa edilebilirler. Bu şekilde malzeme tasarrufu ve ekonomik kazanç sağlanır.

Rijit kaplama üretim maliyetinin düşürülmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, rijit üstyapı kaplaması için C30/37 betonu, lifli RPB ve liffsiz RPB olmak üzere 3 tip beton seçilmiştir. Deneysel olarak hesaplanan basınç ve eğilme dayanımlarına göre beton kaplama kalınlıkları bulunmuştur. Kaplama kalınlıkları göz önüne alınarak tüm rijit üstyapıların maliyet hesapları yapılmıştır. Çalışmada kaplama kalınlıkları ve maliyet hesaplama sonuçları göz önüne alınarak, rijit üstyapıların ekonomik karşılaştırması yapılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada tüm tip beton karışımlarında TS EN 197-1 standartlarına uygun CEM II A-M (P-L) 42.5 R türü çimento kullanılmıştır. RPB numuneler lifli ve liffsiz olmak üzere 2 tipte üretilmiştir. C30/37 kontrol numunesi için karışımda kırma taş kalker agregası, beton karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

C30/37 Beton Karışım Oranları

C30/37 beton üretiminde karışıma giren miktarların kg cinsinden değerleri Çizelge 1'de görülmektedir.

Çizelge 1. C30/37beton karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg m ⁻³)
Çimento	450
0-4 mm	799
4-8 mm	385
8-16 mm	565
Su	189
TOPLAM	2 388

C30/37 normal dayanımlı beton numune kalıpları; basınç numuneleri için 150x150x150 mm, eğilme numuneleri için ise 50x50x300 mm'dir. Numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiştir. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan C30/37 betonlar 28 günlük 20±1°C standart su kürüne alınmıştır.

Lifli ve Lifsiz Reaktif Pudra Beton Karışım Oranları

Literatürde Reaktif Pudra Betonların karışım tasarımı için yerli ve yabancı herhangi bir standarda

rastlanılmamıştır. Bu nedenle karışımı oluşturan taneli malzemelerin sıkı bir yapı oluşturacak şekilde oranlanması için farklı karışım teorileri kullanılmaktadır (İpek, 2009; Bakış, 2015). Bu teoriler, Mooney'in süspansiyon viskozite modelinden türemiştir (Larrard and Sedran, 1994; İpek, 2009; Bakış, 2015). Mooney'in modelinden faydalanılarak ortaya çıkan farklı karışım tasarımlarından genel olarak kullanılan oranlar 1 birim cinsinden Çizelge 2'de görülmektedir (Richard and Cheyrezy, 1995).

Çizelge 2. Tipik RPB betonların çimentoya göre karışımın oranları (Richard and Cheyrezy, 1995)

Malzemeler	RPB200				RPB800	
	Lifsiz		Lifli		Silis Agregalar	Çelik Agregalar
Portland Çimentosu	1	1	1	1	1	1
Silis Dumanı	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
Kum(150–600 µm)	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	-
Kırılmış Kuvars(d ₅₀ =10 µm)	-	0.39	-	0.39	0.39	0.39
Süperakışkanlaştırıcı	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
Çelik Tel (L=12 mm)	-	-	0.175	0.175	-	-
Çelik Tel (L=3 mm)	-	-	-	-	0.63	0.63
Çelik agregalar(< 800 µm)	-	-	-	-	-	1.49
Su	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19

RPB konusu hakkında ilk çalışmaları yapan araştırmacılar RPB'yi RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki tip olarak isimlendirmişlerdir. Bunlarda RPB200 olarak adlandırılan tip normal beton üretim teknikleri ile üretilebilirken RPB800 normal betondan farklı

üretim teknikleri ile üretilmektedir. Bu çalışmada RPB karışımlarında Mooney'in süspansiyon viskozite model oranlaması göz önüne alınmıştır. Lifsiz RPB karışım oranları Çizelge 3'de görülmektedir.

Çizelge 3. Lifsiz RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg m ⁻³)
Çimento	821
Silis Dumanı	189
Kuvars Kum (0.15-0.6 mm)	902
Kuvars Pudra (0-0.045 mm)	320
Süperakışkanlaştırıcı	16
Su	140
TOPLAM	2 388

Lifli RPB karışım oranları Çizelge 4’de görülmektedir.

Çizelge 4. Lifli RPB karışım oranları

Malzemeler	Miktar (kg m ⁻³)
Çimento	769
Silis Dumanı	177
Kuvars Kum (0.15-0.6 mm)	845
Kuvars Pudra (0-0.045 mm)	300
Süperakışkanlaştırıcı	15
Çelik Lifler (L=22 mm) (Çap=0.55 mm)	135
Su	147
TOPLAM	2 388

Numune kalıpları basınç numuneleri için 50x50x50 mm, eğilme numuneleri için 50x50x300 mm’dir. Tüm üretimlerde priz süresince herhangi bir sıkıştırma basıncı uygulanmamıştır. Numuneler kalıplara şişlenerek yerleştirilmiştir. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan lifli ve lifsiz RPB’ler, 28 günlük 20±1°C standart su kürüne alınmıştır. C30/37 beton, lifli ve lifsiz RPB numunelere 28 günlük 20±1°C standart su kürü sonrası basınç ve eğilme deneyleri uygulanmıştır (TS EN 12390-3, 2010; TS EN 12390-5, 2010).

Rijit Üstyapı Kaplama Kalınlık Hesap Yöntemi

DeneySEL çalışmalarından sonra rijit üstyapıların beton kaplama kalınlık ve üstyapı maliyet hesaplamaları yapılmıştır.

Çalışmada C30/37 betonu, lifli ve lifsiz RPB’ler rijit yol kaplaması olarak değerlendirilmiştir.

Rijit kaplamanın performansı için AASHTO yol testinden Eşitlik 1 elde edilmiştir (AASHTO, 1993):

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

Burada;

$W_{8,2}$: 8.2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı

- Z_R : Standart normal sapma
 S_o : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası
 D : Rijit plak kalınlığı, inç
 ΔPSI : $P_o - P_t$ (Servis kabiliyetinde azalma miktarı)
 P_o : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi
 P_t : Nihai servis kabiliyeti indeksi
 S_c' : Betonun Kopma Modülü (Eğilmede çekme mukavemeti), psi
 J : Yük transfer katsayısı
 C_d : Drenaj katsayısı
 E_c : Betonun Elastisite Modülü, psi
 k : Yatak katsayısı, psi

Tüm rijit kaplama kalınlık hesaplamalarında standart olarak $W_{8,2} = 10 \times 10^6$ alınmıştır. Güvenilirlik seviyesi ve güvenilirliğin standart normal sapması (Z_R) yolun sınıfına bağlı olarak Çizelge 5'den seçilmektedir (Güngör ve Sağlık, 2008).

Çizelge 5. Tavsiye edilen güvenilirlik değerleri (Güngör ve Sağlık, 2008)

Yolun Sınıfı	Şartname Güvenilirlik Değeri R %	Standart Normal Sapma Z_R
Otoyollar	95	-1.645
Devlet Yolu	85	-1.037
İl Yolu	70	-0.524

Çizelge 5' de görüldüğü gibi, tüm rijit kaplama kalınlık hesaplamalarında Standart Normal Sapma (Z_R) değeri %85 güvenilirlik değerine göre -1,037 alınmıştır. Güngör ve Sağlık (2008)' e göre trafik ve performans tahmininin bileşik toplam standart sapma (S_o) değeri ortalama 0.45 alınabilmektedir. Tüm rijit kaplama kalınlık hesaplamalarında trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası (S_o) değeri 0.45, $P_o = 4.5$ ve $P_t = 2.5$ alınmıştır. Tüm rijit kaplamaların Kopma Modülü (S_c') (Eğilmede çekme

mukavemeti), eğilme deneyleri sonucu hesaplanan eğilme dayanım değerleridir. Bu değerler eğilme deney cihazında MPa cinsinden hesaplanmıştır. Kalınlık hesaplamalarında MPa birimi Eşitlik 1 gereği psi birimine dönüştürülmüştür. Beton kaplamanın derzlerde veya çatlaklarda yükü dağıtabilme yeteneği için yük transfer katsayısı (J), bir parametre olarak göz önüne alınmaktadır (AASHTO, 1993). Çizelge 6'da yük transfer katsayıları verilmiştir. J değeri tüm hesaplamalarda 2.9 alınmıştır.

Çizelge 6. Tavsiye edilen yük transfer katsayıları (AASHTO, 1993)

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

Beton kaplamalarda drenaj katsayısı (C_d) gösterilmiştir. Tüm hesaplamalarda C_d değeri 1 için tavsiye edilen değerler, Çizelge 7’de olarak alınmıştır.

Çizelge 7. Tavsiye edilen drenaj katsayıları (AASHTO, 1993)

Drenaj Kalitesi	Suyun Uzaklaştırma Süresi	Kaplamanın Doğunluk Seviyesine Yakın Su İçeriğine Maruz Kaldığı Sürenin Yüzdesi			
		<%1	%1-5	%5-25	>%25
Çok iyi	2 saat	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
İyi	1 gün	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Vasat	1 hafta	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Kötü	1 ay	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Çok Kötü	Dren yok	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Betonun Elastisite Modülünün, Eşitlik 2 ile bulunması önerilmektedir (TS500, 2000):

$$E_c = 3250 \sqrt{f_{ck}} + 14000 \quad (2)$$

Burada;

E_c : Betonun Elastisite Modülü (MPa)

f_{ck} : Betonun karakteristik silindirik basınç mukavemeti (MPa)

TS500 (2000)’e göre betonun karakteristik silindirik basınç mukavemeti, küp basınç mukavemetinin 0.8 katı alınabilir. Deneysel çalışmalar sonucu bulunan küp basınç dayanımlarının 0.8 katı alınarak, numunelerin karakteristik silindirik basınç mukavemetleri hesaplanmıştır. Eşitlik 2 ile numunelerin Elastik Modülleri hesaplanmıştır.

Esnek kaplamalarda zemin taşıma gücü Efektif Esneklik Modülü (M_R) ile tanımlanırken beton kaplamalarda ise zeminin taşıma gücü Efektif Yatak Katsayısı (Zemin Reaksiyon Modülü) ile tanımlanmaktadır. Zemin yatak katsayısı (k) ile Esneklik Modülü (M_R) arasında Eşitlik 3’de belirtilen ilişki vardır (Tunç, 2007):

$$k = M_R / 19.4 \quad (3)$$

Burada;

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

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

Rijit tüm kaplama üstyapı kalınlık hesaplamalarında, zemin özellikleri benzer kabul edilerek, M_R değeri 7500 psi alınmıştır. Zemin yatak katsayısı (k), Eşitlik 3 ile 387 psi olarak hesaplanmıştır. Tüm rijit kaplama kalınlıkları Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır. Hesaplama için gerekli tüm değerler Eşitlik 1’de yerine konularak rijit kaplama kalınlığı (D) hesaplanmıştır. Eşitlik 1 ile kaplama kalınlığı (D) inç olarak bulunmuş ve cm’ye çevrilmiştir. Rijit alt temel kalınlığı 20 cm alınmıştır.

Rijit Üstyapı Maliyet Hesaplama Yöntemi

Toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir beton yolun 1 km maliyeti $W_{8.2} = 10 \times 10^6$ değerine göre hesaplanmıştır. Rijit üstyapı maliyet hesaplamalarında, C30/37 beton kaplama ile lifli ve liffsiz RPB yol kaplama tipleri değerlendirilmiştir. Tasarım hesapları, beton kesitinde yaklaşık %0.67 oranında donatı kullanılması gerektiğini göstermektedir (Edis, 2007). Çalışmada, C30/37 normal dayanımlı derzsiz ve sürekli donatılı beton kaplama maliyet hesaplamasında, 1 m³ betonda 60 adet ve 12 mm çaplı toplam 53.27 kg ağırlığında donatı kullanıldığı kabul edilmiştir. Çalışmada, C30/37 betonu için 1 m³ karışımda Çizelge 1’de, liffsiz RPB için 1 m³ karışımda Çizelge 3’de ve lifli RPB için ise 1 m³ karışımda Çizelge 4’de miktarları belirtilen malzemeler kullanılmıştır. Yolun toplam yüzey alanı 24 000 m² olarak hesaplanmıştır. Tüm rijit üstyapı yol kaplamalarının sürekli donatılı-derzsiz olarak inşa edildiği varsayılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA**Basınç ve Eğilme Deney Sonuçlarına Göre Kaplama Kalınlık Hesaplaması**

Kaplama kalınlıkları Eşitlik 1'den hesaplanmıştır. Tüm sonuçlar Çizelge 8'de gösterilmiştir.

Çizelge 8. Numunelerin deney ve hesaplama sonuçları

Beton Tipi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Karakteristik Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Kaplama Kalınlığı (cm)
C30/37	37	4.55	30	31 801	23.04
Lifsiz RPB	75	7.27	60	39 174	17.15
Lifli RPB	106	7.38	84.8	43 928	17.17

C30/37 Betonu için karakteristik silindir basınç dayanımı hesabında, ortalama basınç dayanımının 0.8 katı alınarak $37 \times 0.8 = 30$ MPa olarak bulunmuştur. C30/37 Betonu için Elastisite Modülü, Eşitlik 2'den;

$E_c = 3250 \sqrt{30} + 14000 = 31\ 801$ MPa olarak bulunmuştur.

Lifsiz RPB için karakteristik silindir basınç dayanımı hesabında, ortalama basınç dayanımının 0.8 katı alınarak $75 \times 0.8 = 60$ MPa olarak bulunmuştur. Lifsiz RPB için Elastisite Modülü, Eşitlik 2'den;

$E_c = 3250 \sqrt{60} + 14000 = 39\ 174$ MPa olarak bulunmuştur.

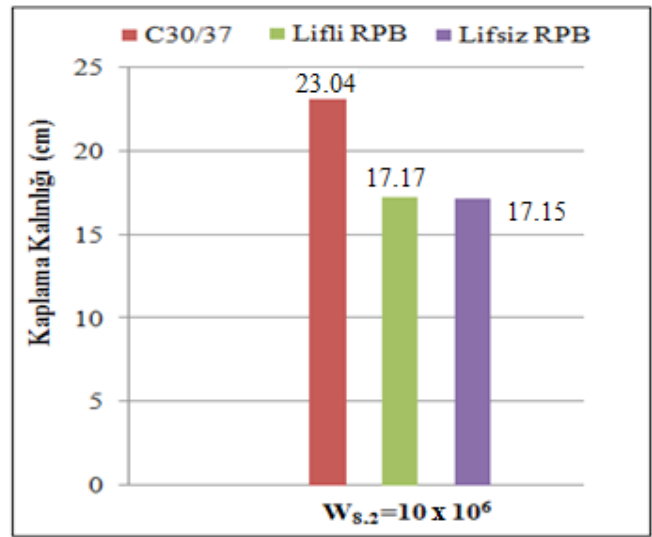
Lifli RPB için karakteristik silindir basınç dayanımı hesabında, ortalama basınç dayanımının 0.8 katı alınarak $106 \times 0.8 = 84,80$ MPa olarak bulunmuştur. Lifli RPB için Elastisite Modülü, Eşitlik 2'den;

$E_c = 3250 \sqrt{84,80} + 14000 = 43\ 928$ MPa olarak bulunmuştur.

Kaplama kalınlığı hesaplamalarında Eşitlik 1'de istenen tüm değerler yazılmış, hesaplama yapılarak kaplama kalınlıkları (D) inç olarak bulunmuştur. İnç birimi cm'ye çevrilerek Çizelge 8'e cm cinsinden yazılmıştır. Rijit alttemel kalınlığı esnek üstyapı alttemel kalınlığına eşit kabul edilerek 20 cm alınmıştır.

Tüm hesaplamalarda $W_{8.2} = 10 \times 10^6$, $Z_R = -1.037$, $S_o = 0.45$, $P_o = 4.5$, $P_t = 2.5$, $\Delta PSI = 2$, $C_d = 1$, $J = 2.9$ ve $k = 387$ psi alınmıştır. Tabaka kalınlığı hesaplamalarında numunelerin eğilme dayanımları önem taşımaktadır. Lifsiz ve lifli RPB'lerin eğilme dayanımları birbirine çok yakın çıkmıştır. Eğilme dayanımları birbirine yakın olmasından dolayı lifsiz ve lifli RPB'lerin kaplama kalınlıkları birbirine yaklaşık eşit değerlerde çıkmıştır. Kaplama kalınlığının belirlenmesinde basınç dayanım

değerlerinden ziyade eğilme dayanım değerleri önem taşımaktadır. C30/37 betonuyla karşılaştırıldığında C30/37 betonun eğilme dayanımı lifli ve lifsiz RPB'lere nazaran düşük çıktığından kaplama kalınlığı yüksek bulunmuştur. Lifli RPB kaplama, Lifsiz RPB kaplama ve C30/37 beton kaplama kalınlık karşılaştırması Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Üstyapı kaplama kalınlık karşılaştırması

Şekil 1'de eşit trafik yükü altında lifli ve lifsiz RPB kaplamanın, C30/37 beton kaplamaya nazaran daha düşük bir kalınlıkta inşa edilebileceği anlaşılmaktadır.

C30/37 Beton Kaplamalı Üstyapı Maliyet Hesabı

C30/37 beton kaplamalı üstyapı maliyet hesabı için 1 m³ karışımda Çizelge 1'de görülen malzeme

miktarları göz önüne alınmıştır. Yolun toplam yüzey fiyatlar Çizelge 9'da oluşturulmuştur. alanı 24 000 m² alınmıştır. Tabaka cinslerine göre birim

Çizelge 9. C30/37 tabaka cinslerine göre birim fiyatlar (KGM, 2014; ÇŞB, 2014)

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/16.023/K-1	Her Dozda Demirli Beton	m ³	55.21
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	22.76
04.009/53C	Çimento zati bedeli	Ton	138
Y.23.014	Ø 8- Ø 12 mm nervürlü beton çelik çubuğu bedeli ve işçilik	Ton	1 905.86

$W_{8.2}=10 \times 10^6$ değerine göre C30/37 normal dayanımlı beton yol kaplama kalınlığı Eşitlik 1 ile hesaplanarak 23.04 cm bulunmuştur. $W_{8.2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir rijit yolun 1 km maliyeti Çizelge 10'da görülmektedir.

Çizelge 10. 1 km uzunluktaki C30/37 rijit üstyapı toplam maliyeti

$W_{8.2}=10 \times 10^6$, R=%85, Pt=2.5, C30/37 beton kaplama kalınlığı=23.04 cm, Alttemel= 20 cm, Çimento= 450 kg m ⁻³					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4 800	m ³	22.76	109 248
2	C30/37 beton kaplama dökümü	5 529.60	m ³	55.21	305 289
3	Çimento zati bedeli	2 488.32	Ton	138.00	343 388
4	Demir zati bedeli ve işçiliği	294.56	Ton	1 905.86	561 390
TOPLAM					1 319 315

Lifsiz RPB Kaplamalı Üstyapı Maliyet Hesabı

Lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı için 1 m³ karışımda Çizelge 3'de görülen malzeme miktarları göz önüne alınmıştır. Yolun toplam yüzey alanı 24 000

m² alınmıştır. Tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 11'de oluşturulmuştur.

Çizelge 11. Lifsiz RPB tabaka cinslerine göre birim fiyatlar (KGM, 2014; ÇŞB, 2014)

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	22.76
KGM/16.002/K-1	Her Dozda Demirsiz Beton	m ³	55.11
04.009/53C	Çimento zati bedeli	Ton	138
04.379/B02	Yüksek Oranda Su Azaltıcı (Süperakışkanlaştırıcı)	Ton	1 584
04.007/A	Silis agrega	Ton	200

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre lifsiz RPB yol kaplama kalınlığı Eşitlik 1 ile hesaplanarak 17.15 cm bulunmuştur. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir geleneksel lifsiz RPB kaplamalı yolun 1 km maliyeti Çizelge 12'de görülmektedir.

Çizelge 12. 1 km uzunluktaki lifsiz RPB üstyapı toplam maliyeti

$W_{8,2}=10 \times 10^6$, R=%85, Pt= 2.5, Lifsiz RPB kaplama kalınlığı=17.15 cm, Alttemel= 20 cm, Çimento= 821 kg m ⁻³					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4 800	m ³	22.76	109 248
2	Lifsiz RPB kaplama dökümü	4 116	m ³	55.11	226 833
3	Çimento zati bedeli	3 379.24	Ton	138	466 335
4	Süperakışkanlaştırıcı	65.86	Ton	1 584	104 322
5	Silis dumanı bedeli	777.92	Ton	200	155 584
TOPLAM					1 062 322

Lifli RPB Kaplamalı Üstyapı Maliyet Hesabı

Lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyet hesabı için 1 m³ karışımda Çizelge 4'de görülen malzeme miktarları

göz önüne alınmıştır. Yolun toplam yüzey alanı 24 000 m² alınmıştır. Tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 13'de oluşturulmuştur.

Çizelge 13. Lifli RPB tabaka cinslerine göre birim fiyatlar (KGM, 2014; ÇŞB, 2014)

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	22.76
KGM/16.002/K-1	Her Dozda Demirsiz Beton	m ³	55.11
04.009/53C	Çimento zati bedeli	Ton	138
04.379/B02	Yüksek Oranda Su Azaltıcı (Süperakışkanlaştırıcı)	Ton	1 584
04.007/A	Silis agrega	Ton	200
04.375/04A	Çelik Lifler	Ton	2 244

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre lifli RPB yol kaplama kalınlığı Eşitlik 1 ile hesaplanarak 17.17 cm bulunmuştur. $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform

genişliği 24 metre olan bölünmüş bir lifli RPB kaplamalı yolun 1 km maliyeti Çizelge 14'de görülmektedir.

Çizelge 14. 1 km uzunluktaki lifli RPB üstyapı toplam maliyeti

$W_{8,2}=10 \times 10^6$, $R=\%85$, $P_t=2.5$, Lifli RPB kaplama kalınlığı=17.17 cm, Alttemel=20 cm, Çimento=769 kg m ⁻³ , Çelik lif=135 kg m ⁻³					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4 800	m ³	22.76	109 248
2	Lifli RPB kaplama dökümü	4 120.80	m ³	55.11	227 097
3	Çimento zati bedeli	3 168.90	Ton	138	437 308
4	Süperakışkanlaştırıcı	61.81	Ton	1 584	97 907
5	Silis dumanı bedeli	729.38	Ton	200	145 876
6	Çelik lif bedeli	556.31	Ton	2 244	1 248 360
TOPLAM					2 265 796

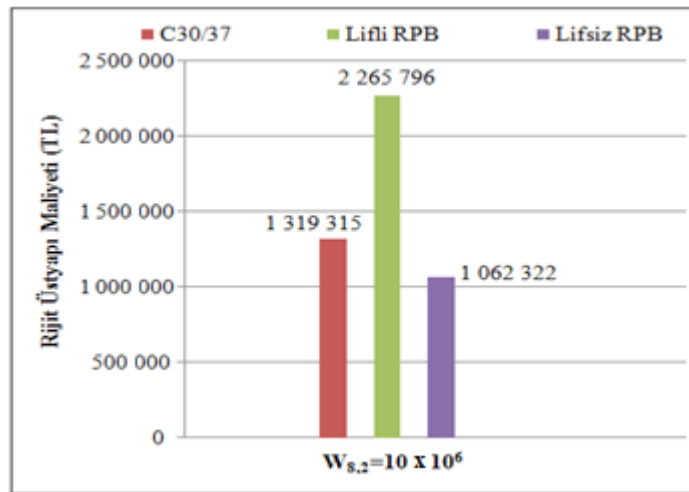
Lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyeti Çizelge 15’de görüldüğü gibi C30/37 normal dayanımlı sürekli donatılı-derzsiz rijit üstyapı maliyeti ile kıyaslandığında,

lifsiz RPB kaplamalı üstyapıların ilk yapım maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 15. Rijit üstyapı maliyetleri

Üstyapı Tipi	Maliyet (TL)
C30/37	1 319 315
Lifli RPB	2 265 796
Lifsiz RPB	1 062 322

Şekil 2’de rijit üstyapı maliyet karşılaştırması görülmektedir.

**Şekil 2.** Rijit üstyapı maliyet karşılaştırması

Şekil 2’de eşit trafik yükü altında lifli RPB kaplama maliyetinin, C30/37 beton kaplama maliyetinden daha yüksek, lifsiz RPB kaplama maliyetinin ise, C30/37 beton kaplama maliyetinden daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Lifli RPB karışımı içerisinde kullanılan çelik lifler, lifli RPB kaplama maliyetini artırmıştır.

SONUÇ

Rijit kaplama üretim maliyetinin düşürülmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, rijit üstyapı kaplaması için C30/37 betonu, lifli RPB ve lifsiz RPB olmak üzere 3 tip beton seçilmiştir. Numunelerin basınç deneyleri TS EN 12390-3 (2010)’a göre hesaplanmıştır. Numunelerin eğilme deneyleri ise TS EN 12390-5 (2010)’a göre hesaplanmıştır. Eğilme deneylerinde yükleme olarak orta noktadan yüklemeli deney düzeneği tercih edilmiştir. Deneysel olarak hesaplanan basınç ve eğilme dayanımlarına göre beton kaplama kalınlıkları bulunmuştur. Kaplama kalınlıkları göz önüne alınarak tüm rijit üstyapıların maliyet hesapları yapılmıştır. Çalışmada kaplama kalınlıkları ve maliyet hesaplama sonuçları göz önüne alınarak, rijit üstyapıların ekonomik karşılaştırması yapılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 28 günlük standart su kürü sonrası beton basınç dayanımı; lifli RPB’ de 106 MPa, lifsiz RPB’ de 75 MPa, C30/37 betonda ise 37 MPa olarak hesaplanmıştır. Lifsiz RPB’nin basınç dayanımının C30/37 beton basınç dayanımından yaklaşık 2 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Lifli RPB’nin basınç dayanımının ise C30/37 beton basınç dayanımından yaklaşık 3 kat daha yüksek olduğu görülmüştür.

- 28 günlük standart su kürü sonrası beton eğilme dayanımı; lifli RPB’ de 7.38 MPa, lifsiz RPB’ de 7.27 MPa, C30/37 betonda ise 4.55 MPa olarak hesaplanmıştır. Lifsiz RPB’nin eğilme dayanımının

C30/37 beton eğilme dayanımından yaklaşık 1.60 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Lifli RPB’nin eğilme dayanımının ise C30/37 beton eğilme dayanımından yaklaşık 1.62 kat daha yüksek olduğu görülmüştür.

- $W_{8.2}$ değeri 10×10^6 olan rijit üstyapıda, lifsiz RPB kaplama kalınlığı 17.15 cm, lifli RPB kaplama kalınlığı 17.17 cm ve C30/37 rijit kaplama kalınlığı 23.04 cm olarak hesaplanmıştır.

- RPB kaplamalar normal betonlara nazaran daha yüksek basınç ve eğilme dayanıma sahip olduklarından daha düşük kalınlıkta inşa edilebilirler. Bu şekilde malzeme tasarrufu ve ekonomik kazanç sağlanabilir.

- Maliyet olarak $W_{8.2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km yol uzunluğu için, lifli RPB kaplamalı üstyapı maliyeti, C30/37 beton kaplamalı rijit üstyapı maliyetinden %71.74 daha yüksektir. Lifli RPB kaplama maliyetinin C30/37 beton kaplama maliyetinden daha yüksek çıkmasının sebebi, lifli RPB karışımında kullanılan çelik liflerdir. Fabrikasyon ürünü çelik lifler yerine sanayi atığı çelik liflerin kullanılmasıyla, lifli RPB üretim maliyetinin düşürülmesi mümkündür.

- Maliyet olarak $W_{8.2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km yol uzunluğu için, lifsiz RPB kaplamalı üstyapı maliyeti, C30/37 beton kaplamalı rijit üstyapı maliyetinden %19.48 daha ekonomiktir. Çalışma sonucunda $W_{8.2}=10 \times 10^6$ değerine göre 1 km yol uzunluğu için, en ekonomik rijit üstyapı tipinin lifsiz RPB kaplamalı rijit üstyapı tipi olduğu görülmüştür.

- RPB kaplamaların basınç ve eğilme dayanımları yüksek olduğundan, havaalanı pistlerinde, terminallerin yükleme ve boşaltma alanlarında, otopark sahalarında, şehir içi ve şehir dışı tüm karayolu ulaşımında kullanılması mümkündür. RPB kaplama üretiminde bütünüyle yerel malzeme kullanılmaktadır. Üretimde yerel malzeme kullanılması ekonomik olarak tercih sebebidir.

KAYNAKLAR

- AASHTO, 1993. Guide for the Design of Pavement Structures. Washington, USA.
- Bakış A, 2015. Rijit yol üstyapı inşasında reaktif pudra betonun (rpb) kullanılabilirliğinin araştırılması. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 193s.
- Bayrak OÜ, 2007. Rijit üstyapı tasarımına yeni bir yaklaşım. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1s.

- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2014. Birim Fiyatlar. <http://www.csb.gov.tr> (Erişim Tarihi: 26 Ekim, 2014).
- Dallaire E, Aitein PC, Lachemi M, 1998. High-performance powder. Civil Engineering, ABI/INFORM Global, 68: 48-51.
- Edis E, 2007. Asfalt ve beton kaplamalı yolların maliyet yönünden karşılaştırılması. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 32s.
- Güngör AG, Sağlık A, 2008. Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi. Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.

- Işık E, Bakış A, Akıllı EA, Hattatoğlu F, 2015. Usability of ahlat stone as aggregate in reactive powder concrete. *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 4: 507-514.
- İpek M, 2009. Reaktif pudra betonların mekanik davranışına katılma süresince uygulanan sıkıştırma basıncının etkileri. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 24s.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2014. Birim Fiyatlar. <http://www.kgm.gov.tr>. (Erişim Tarihi: 26 Ekim,2014).
- Larrard F, Sedran T, 1994. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 24: 997-1009.
- Na-Hyun Y, Jang-Ho JK, Tong-Seok H, Yun-Gu C, Jang HL, 2012. Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 28: 694-707.
- Richard P, Cheyrezy M, 1995. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25: 1501-1511.
- Roux N, Andrade C, Sanjuan MA, 1996. Experimental study of durability of reactive powder concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8: 899-1561.
- Tam CM, Vivian WY, Tam KM, 2012. Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, 26: 79-89.
- TS EN 12390-3, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2010. Beton – Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Ankara.
- TS500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Ankara.
- Tunç A, 2007. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. 2.Baskı, Ankara, 840s.
- Ünsal A, Şen H, 2008. Beton Kaplama Blokları-Beton Parkeler-Gerekli Şartlar ve Deney Metotları TS 2824 EN 1338. Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuar Deneyleri, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Malzeme Lab. Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Yazıcı H, Yiğiter H, Karabulut AŞ, Baradan B, 2008. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*, 87: 2401-2407.