



Demiryolu Tünel Püskürtme Betonunda Kireçtaşı-Kuvars ve Mermer Atıklarının Kullanılabilirliği

Gürkan ERDAL¹, Abdulrezzak BAKIŞ²

¹ Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü, AR-GE Baş Mühendisliği, Diyarbakır, Türkiye

² Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Bilim Dalı, Batman, Türkiye

*abdulrezzak.bakis@batman.edu.tr

(Alınış/Received: 01.09.2025, Kabul/Accepted: 10.10.2025, Yayımlama/Published: 20.01.2026)

Öz: Çevreyi kirlüten ve atık sahalarının oluşmasına neden olan katı atıklardan bazıları kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarıdır. Taş ocaklarından çıkarılan bu kayaçlarla üretim yapılırken, önemli miktarda atık oluşmaktadır. Bu çalışmada kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarının demiryolu tünel püskürtme betonu üretiminde kullanılabilirliği araştırıldı. Araştırmada, 12 farklı türde demiryolu tünel püskürtme betonu oluşturuldu. Üretilen tünel püskürtme betonlara 28 gün 20±3°C su kürü ve kombine kürü uygulandı. Çalışmada kür öncesi tüm tip numunelerin slump deneyi yapıldı. Kür sonrası tüm numunelere basınç dayanım deneyi uygulandı. Çalışma sonucunda, referans beton üretimlerinde kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifsiz referans püskürtme betonların su kürü sonrası basınç dayanımları sırasıyla 53,13-52,93-32,37 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifsiz referans püskürtme betonların kombine kür sonrası dayanım değerleri 55,47-54,50-38,29 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifli referans betonların su kürü sonrası dayanımları 58,29-57,63-40,87 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifli referans püskürtme betonların kombine kür sonrası dayanımları 62,23-61,25-45,46 MPa olarak bulundu. Reaktif pudra püskürtme beton üretimlerinde ise; kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifsiz reaktif pudra püskürtme betonların su kürü sonrası basınç dayanımları sırasıyla 51,44-50,98-31,12 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifsiz reaktif pudra püskürtme betonların kombine kür sonrası dayanım değerleri 54,04-52,92-36,81 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifli reaktif pudra püskürtme betonların su kürü sonrası dayanımları 56,47-55,79-38,96 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifli reaktif pudra püskürtme betonların kombine kür sonrası dayanımları ise 61,21-60,50-44,38 MPa bulundu. Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarının demiryolu tünel püskürtme betonu üretiminde kullanılabilirliği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Atık kayaçlar, Demiryolu tünel püskürtme betonu, Reaktif pudra beton, Reaktif pudra püskürtme beton, Basınç dayanımı

Usability of Limestone-Quartz and Marble Wastes in Railway Tunnel Shotcrete Production

Abstract: Some of the solid wastes that pollute the environment and cause the formation of waste sites are limestone, quartz, and marble waste. During production with these rocks extracted from quarries, a significant amount of waste is generated. In this study, the usability of limestone, quartz and marble wastes in railway tunnel shotcrete production was investigated. As part of the research, 12 different types of railway tunnel shotcrete were created. Water curing for 28 days of 20±3°C and combined curing were applied to the produced tunnel shotcrete. In the study, slump tests were performed on all types of samples before curing. Compressive strength tests were applied to all samples after curing. As a result of the study, compressive strengths of the non-fiber reference tunnel shotcrete composed of limestone, quartz and marble wastes in reference tunnel shotcrete production after water curing were found to be 53.13-52.93-32.37 MPa, respectively. Compressive strengths of the non-fiber reference tunnel shotcrete composed of limestone, quartz and marble wastes after combined curing were found to be 55.47-54.50-38.29 MPa. Compressive strengths of the fibrous reference tunnel shotcrete composed of limestone, quartz and marble wastes after water curing were found to be 58.29- 57.63- 40.87 MPa. Compressive strengths of the fibrous reference

Atıf için/Cite as: G. Erdal, A. Bakış, "Demiryolu tünel püskürtme betonu üretiminde kireçtaşı-kuvars ve mermer atıklarının kullanılabilirliği," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 23, no. 1775390, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1775390

tunnel shotcrete composed of limestone, quartz and marble wastes after combined curing were found to be 62.23-61.25-45.46 MPa. In reactive powder tunnel shotcrete production, compressive strengths of the non-fiber reactive powder tunnel shotcrete composed of limestone, quartz and marble wastes after water curing were found to be 51.44-50.98-31.12 MPa. Compressive strengths of the non-fiber reactive powder tunnel shotcrete composed of limestone, quartz and marble wastes after combined curing were found to be 54.04-52.92-36.81 MPa. Compressive strengths of the fibrous reactive powder tunnel shotcrete composed of limestone, quartz and marble wastes after water curing were found to be 56.47-55.79-38.96 MPa. Compressive strengths of the fibrous reactive powder tunnel shotcrete composed of limestone, quartz and marble wastes after combined curing were found to be 61.21-60.50-44.38 MPa. When the findings were evaluated, it was seen that limestone, quartz and marble wastes could be used in the production of railway tunnel shotcrete.

Keywords: Waste rocks, Railway tunnel shotcrete, Reactive powder concrete, Reactive powder shotcrete, Compressive strength

1. Giriş

Ocaklardan çıkarılan çeşitli kayaç türlerinin kullanımı ve üretimi sırasında önemli miktarda agrega toz atığı oluşmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), atık istatistikleri kapsamında imalat sanayi işyerlerinde 1,2 milyon ton mineral atıklar ve maden işletmelerinde 836,6 milyon ton mineral atıklar olmak üzere 2022 yılında toplam 837,8 milyon ton mineral atık oluşmuştur. Toplam atığın %63,2'si atık işleme tesislerinde ve %14,5'i tesis bünyesinde geri kazanıldı. Atıkların %13,5'i düzenli depolama tesislerine gönderildi, %3,3'ü işyeri sahasında depolandı, %3,1'i ise belediye veya OSB yönetimleri tarafından toplanmıştır. Ayrıca atıkların %0,3'ü dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Maden işletmelerinde dekapaj malzemesi dâhil oluşan 837,8 milyon ton mineral atığın %76,1'i pas sahalarda, atık barajlarında veya düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilmiştir. Atıkların %20,9'u ocak içine geri doldurulmuş, %3'ü ise diğer yöntemlerle geri kazanılmıştır. Doğal hammaddelerin sınırlı olması nedeniyle, bu atıkların mümkün olduğunca değerlendirilmesi gerekmektedir.

Çevreyi kirleten ve çöp sahalarının oluşumuna katkıda bulunan bu katı atıklar arasında kireçtaşı, kuvars ve mermer atıkları da bulunmaktadır. Çalışmada, kireçtaşı, kuvars ve mermer tozu atıkları özel beton üretim yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiş ve ekonomiye geri kazandırılmıştır. Bu çalışmada kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarının demiryolu tünel püskürtme betonu üretiminde kullanılabilirliği araştırıldı.

Püskürtme betonu, yüksek hızda hava basıncıyla yüzeye püskürtülen betondur. Püskürtme beton kullanımı yoluyla, kalıp giderlerinde azalma ve inşaat bakım-onarım süresinde kısalma meydana geldiği bilinmektedir. Püskürtme betonlar kuru ve yaş olmak üzere iki yöntemle uygulanmaktadır. Kuru karışimli püskürtme beton üretiminde, beton karma suyu betona püskürtme başlığında eklenerek, karışım basınçlı hava ile yüzeye püskürtülür. Islak karışimli püskürtme beton üretiminde ise, priz hızlandırıcı katkı maddeler hariç, bütün karışım elemanları püskürtme başlığına gelmeden önce birlikte karıştırılarak, karışım basınçlı hava ile yüzeye püskürtülür [1]. Püskürtme betonu birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlardan birisi de tünel yapım ve onarım işleridir.

Tünel inşaatı sırasında, yumuşak kayaçların deformasyonları sonucu, geleneksel tünel destek tipleri etkinliğini yitirerek yüksek ekonomik kayıplara ve personel yaralanmalarına yol açmaktadır [2]. Deprem ve moloz akışı gibi dış etkenlerin neden olduğu hasarlarda genellikle enjeksiyon takviye yöntemleri kullanılmaktadır [3, 4]. Çelik lifli beton gibi yüksek performanslı püskürtme kompoze malzemeler, tünel güçlendirme projelerinde başarıyla kullanılmıştır [5–8]. Son yıllarda lifli tünel püskürtme betonları üzerine birçok çalışma yapılmıştır [9–13]. Yapılan bir çalışmada, tünellerin kemer bölümünde bulunan korozyona uğramış çekme çelik çubuklarının güçlendirilmesinde, çelik lif takviyeli geri dönüştürülmüş iri agrega püskürtme betonu

kullanılmıştır. Çalışma sonucunda bu tip tünel püskürtme betonunun mekanik dayanımları incelenerek, tünel yapı güçlendirmesinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır [14]. Çelik lifli tünel püskürtme betonlar, normal püskürtme betonlara nazaran daha yüksek performans sergilemektedir [15]. Çeşitli bilimsel çalışmalar sonucunda, yüksek dayanım özelliklerine sahip birçok beton türü ortaya çıkmıştır. Betona çeşitli liflerin eklenmesi ve ısıtma işlemiyle kür uygulanması, daha da yüksek dayanımlı beton üretimini mümkün kılmıştır. Bu beton türlerinden biri de reaktif pudra betondur (RPB).

RPB'un yüksek dayanımı, diğer beton türlerine göre daha ince kesitli yapısal tasarıma olanak sağlamaktadır. Bir araştırmada, RPB agrega hacmi %30–50 arasında, maksimum tane boyutu 1–3 mm olarak alınarak yüksek dayanımlar elde edilmiştir [16]. RPB karışımlarında çelik liflerin kullanımı yaygındır. Yapılan çalışmalarda, yüksek dayanımlı betonun genelde kırılğan olduğu, ancak çelik lif eklenmesinin bu kırılğanlığı azalttığı ve daha sünek bir yapı ile sonuçlandığı belirtilmiştir [17–19]. RPB'a sadece çelik lif değil, polipropilen ve cam gibi diğer lif türleri de eklenebilir. Ancak, polipropilen liflerin yüksek sıcaklıklarda eriyerek özelliklerini kaybedebileceği ve bunun beton dayanımında azalmaya yol açabileceği bildirilmiştir [20, 21]. RPB karışımlarda, karışım içerisine silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri eklenebilmektedir [22]. RPB terörist saldırılarına, kazara, darbelere ve patlamalara karşı normal betonlara nazaran daha dayanıklıdır [23]. Yapılan çalışmalarda, farklı kür yöntemlerinin RPB'un mekanik dayanımına etkilerini araştırılmış ve ısıtma işlemli kombine kür yöntemlerinin beton dayanımını artırdığı sonucuna varılmıştır [24, 25]. Mevcut çalışmaların hiçbirisinde reaktif pudra beton karışım oranlarıyla oluşturulmuş bir tünel püskürtme beton uygulamasına rastlanmamıştır.

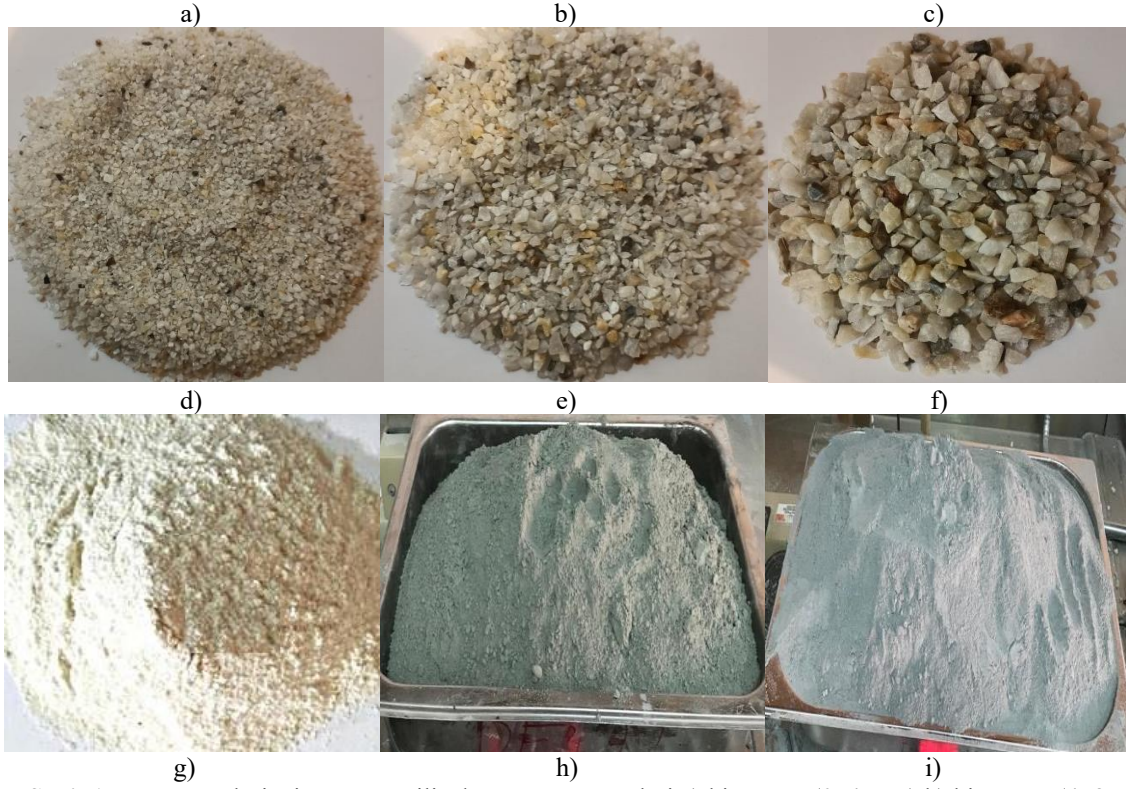
Bu çalışmada 12 farklı tip demiryolu tünel püskürtme betonu üretildi. Bu beton tiplerinden 6'sı iri agregalı referans püskürtme betonu olarak üretildi. Diğer 6'sı ise agrega tozlarıyla ve reaktif pudra beton karışım oranları göz önüne alınarak oluşturuldu. Reaktif pudra beton karışım oranları göz önüne alınarak oluşturulan betonlara "reaktif pudra püskürtme betonu" ismi verildi. Reaktif pudra püskürtme betonlarında agrega olarak 0,1–0,75 mm tane çaplı kireçtaşı, kuvars ve mermer pudra atıklar kullanıldı. Reaktif pudra püskürtme betonları lifli ve lifsiz olarak iki şekilde üretildi. Çelik lifli reaktif pudra püskürtme beton üretiminde 0,70 mm çapında ve 35 mm uzunluğunda çelik lifler kullanıldı. Tüm püskürtme betonlara iki farklı kür tipi uygulandı. Bu kürlerden biri $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 'de 28 günlük su kürü, diğeri ise kombine kürdür. Kombine kür olarak, tüm püskürtme beton numunelerine ilk önce $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 'de suda 5 günlük su kürü ve hemen ardından $150\pm3^{\circ}\text{C}$ 'de 2 günlük etüv kürü uygulandı. Kür işlemlerinin ardından püskürtme beton numunelerine basınç dayanım deneyi uygulandı.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmalarda kullanılan agrega tipleri, çimento ve silis dumanı görünüşleri Şekil 1'de verilmiştir.





Şekil 1. Agrega türleri, çimento ve silis dumanı görünümleri a) kireç taşı (0–4 mm) b) kireç taşı (4–8 mm) c) kireç taşı (8–16 mm) d) kuvars (0–4 mm) e) kuvars (4–8 mm) f) kuvars (8–16 mm) g) mermer (0–4 mm) h) çimento i) silis dumanı

Referans püskürtme betonun elek analizi Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Elek analizi

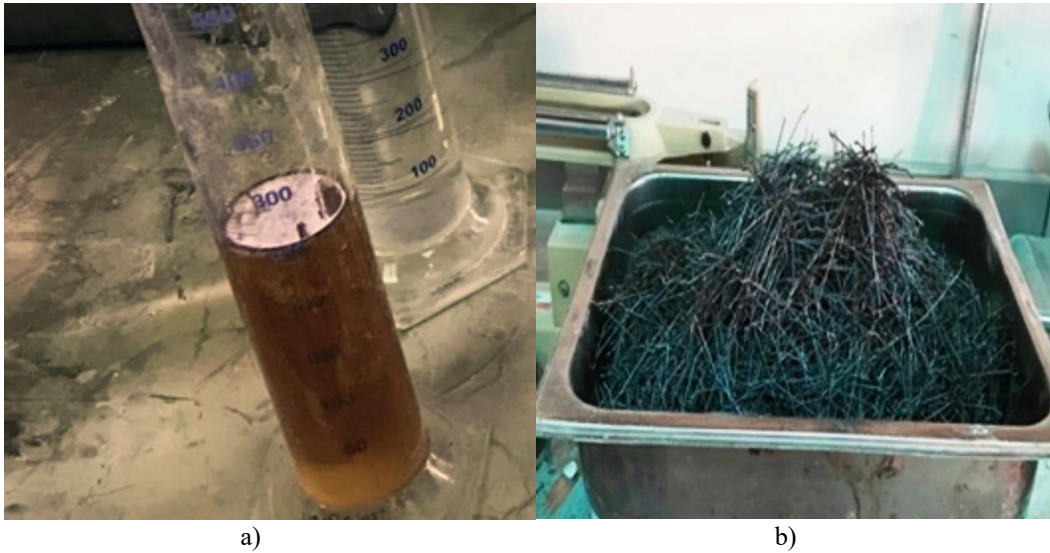
Elek çapı (mm)	Elekte kalan ağırlık (g)	Elekte kalan toplam ağırlık (g)	Elekte kalan toplam ağırlık (%)	Geçen (%)
16	0	0	0	100
8	900	900	30	70
4	750	1650	55	45
2	450	2100	70	30
1	300	2400	80	20
0,5	240	2640	88	12
0,25	210	2850	95	5

Püskürtme beton karışımlarda kullanılan malzemelerin kimyasal bileşenleri Tablo 2’de görülmektedir [26–30].

Tablo 2. Malzemelerin kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler	Kireçtaşı	Kuvars	Mermer	Çimento	SF
SiO ₂ (%)	0,16	99,45	0,14	18,52	91,57
Fe ₂ O ₃ (%)	0,85	0,03	0,11	3,42	0,15
Al ₂ O ₃ (%)	0,12	0,50	<0,01	4,68	0,38
CaO (%)	54,58	-	55,72	64,46	0,32
MgO (%)	1,75	-	1,41	1,57	4,05
K ₂ O (%)	0,09	-	<0,01	0,61	-
Na ₂ O (%)	0,04	-	<0,01	0,32	-
TiO ₂ (%)	0,01	0,02	0,01	-	-
P ₂ O ₅ (%)	-	-	0,01	-	-
SO ₃ (%)	-	-	-	2,74	-
Cl (%)	-	-	-	0,0086	-
C (%)	-	-	-	-	0,217
S (%)	-	-	-	-	0,075
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0,32
Kızdırma kaybı (%)	42,40	-	42,60	3,30	-

Çalışmada tüm tünel püskürtme beton üretimlerinde CEM I 42,5 N tipi çimento kullanıldı. Tüm reaktif pudra püskürtme beton karışımlarında silis dumanı (SF) katkı maddesi kullanıldı. Lifli reaktif pudra püskürtme beton karışımlarında çelik lifler kullanıldı. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcı ve çelik lifler Şekil 2'de görülmektedir.

**Şekil 2.** Süperakışkanlaştırıcı ve çelik lif görünümü a) süperakışkanlaştırıcı b) çelik lif

Lifli karışımlarda kullanılan çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3'de görülmektedir [31].

Tablo 3. Lifli beton üretiminde kullanılan çelik liflerin teknik özellikleri

Lif Tipi	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
Çelik lif	0,70	35	50	1400	7,80

2.2. Metot

Çalışmada 15×15×15 cm küp numuneler kullanıldı. Püskürtme beton agrega özellikleri, elek analizi, çökme deneyi ve basınç deneyi standartlara uygun olarak hazırlandı [32–35]. Üretilen tüm betonlara iki farklı kür tipi uygulanmıştır. Bu kürlerden biri 20±3°C sıcaklıkta 28 gün su kürü, diğeri ise kombine kürdür. Kombine kür için uygulamada bir standart bulunmamaktadır.

Bir çalışmada kombine kür olarak beton numunelere 3 gün $20\pm5^{\circ}\text{C}$ su kürü ve hemen ardından 2 gün $200\pm5^{\circ}\text{C}$ etüv kürü uygulanmıştır [29]. Benzer şekilde bu çalışmada, reaktif pudra püskürtme beton karışımlarına 5 gün $20\pm3^{\circ}\text{C}$ su kürü, hemen ardından 2 gün $150\pm3^{\circ}\text{C}$ etüv kürü uygulandı.

Reaktif pudra beton (RPB) karışım oranları için uygulanan yöntemlerden birisi Mooney'in süspansiyon viskozite modelidir [36, 37]. Mooney'in süspansiyon viskozite modeline dayalı yaygın olarak kullanılan karışım tasarımları Tablo 4'de gösterilmiştir [38].

Tablo 4. RPB karışım oranları

Malzemeler	RPB200				RPB800	
	Lifsiz		Lifli		Silika Agrega	Çelik Agrega
PC (Portland çimentosu)	1	1	1	1	1	1
SF (Silis dumanı)	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Kum (0,15–0,6 mm)	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Kırılmış kuvars ($d_{50} = 0,01$ mm)	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Süperakışkanlaştırıcı (SP)	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Çelik lif (L = 12 mm)	-	-	0,175	0,175	-	-
Çelik lif (L = 3 mm)	-	-	-	-	0,63	0,63
Çelik agregası (< 0,8 mm)	-	-	-	-	-	1,49
Su	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19

Tablo 5, Tablo 4'deki RPB200 sütunundaki lifli ve lifsiz karışım oranları dikkate alınarak oluşturuldu. Bir çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,35 alınmıştır [29]. Düşük su/bağlayıcı oranıyla üretilen betonların mekanik dayanımları her ne kadar yüksek olsa da işlenebilirliği daha zordur. İşlenebilirliği kolaylaştırmak için bu çalışmada, tüm beton tipleri için su/bağlayıcı oranı 0,46 olarak alındı. Diğer bir çalışmada 0,25'lik silis dumanı/çimento oranının maksimum beton dayanımı sağladığı belirtilmiştir [38]. Bu nedenle bu çalışmada, reaktif pudra püskürtme beton karışımlarının silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,25 alınmıştır. Tablo 5'deki su/bağlayıcı oranı hesaplanırken hem Portland çimentosu hem de silis dumanı bağlayıcı olarak dikkate alınmıştır. Bağlayıcı miktarı, beton karışımındaki Portland çimentosu ve silis dumanının toplam miktarıdır.

Tablo 5. Reaktif pudra püskürtme beton karıştırma oranları

Malzemeler	Lifsiz	Lifli
Portland çimentosu (PC)	1,00	1,00
Silis dumanı (SF)	0,25	0,25
Agrega (0,1–0,75 mm)	1,10	1,10
Süperakışkanlaştırıcı (SP)	0,016	0,016
Çelik lif (D = 0,70 mm, L = 35 mm)	-	0,175
Su	0,575	0,575
Toplam	2,941	3,116

Tablo 5'de 1'lik birimler halinde verilen karıştırma oranları dikkate alındığında, lifsiz reaktif pudra püskürtme beton karışımlarda, toplam karışım ağırlığı ile çimento miktarı arasındaki ilişki hesaplama kolaylığı açısından Denklem 1'de gösterilmiştir:

$$1 \text{ m}^3 \text{ beton karışım ağırlığı (kg)} = 2,941 \times 1 \text{ m}^3 \text{ beton çimento miktarı (kg)} \quad (1)$$

1 m³ beton karışımı 2370 kg ağırlığında ise, bu karışımında kullanılacak çimento miktarı, Denklem 1'den $2370 / 2,941$ oranı kullanılarak yaklaşık 806 kg olarak bulunur. 806 kg çimento miktarı bulunduktan sonra karışımında kullanılacak diğer malzemelerin miktarları karışım oranlarına göre belirlenir. Su/bağlayıcı oranı 0,46 olan lifsiz reaktif pudra püskürtme betonların üretiminde, 1 birim silis dumanı çimentonun ağırlıkça %25'i, pudra içeriği çimentonun ağırlıkça %110'u,

süperakışkanlaştırıcı çimentonun ağırlıkça % 1,6'sı ve karıştırma suyu çimentonun ağırlıkça %57,5'i oranında kullanılmıştır.

Tablo 5'de 1'lik birimler halinde verilen karıştırma oranları dikkate alındığında, lifli reaktif pudra püskürtme beton karışımlarda, toplam karışım ağırlığı ile çimento miktarı arasındaki ilişki hesaplama kolaylığı açısından Denklem 2'de gösterilmiştir:

$$1 \text{ m}^3 \text{ beton karışım ağırlığı (kg)} = 3,116 \times 1 \text{ m}^3 \text{ beton çimento miktarı (kg)} \quad (2)$$

1 m³ beton karışım ağırlığı 2370 kg ise, bu karışımda kullanılacak çimento miktarı, Denklem 2 kullanılarak 2370 / 3,116 oranından yaklaşık 761 kg olarak bulunur. Çimento miktarı 761 kg olarak bulunduktan sonra karışımda kullanılacak diğer malzemelerin miktarları karışım oranlarına göre belirlenmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,46 olan lifli reaktif pudra püskürtme beton üretiminde, çimento miktarının ağırlıkça %25'i oranında 1 birim silis dumanı, çimento miktarının ağırlıkça %110'u oranında kum, çimento miktarının ağırlıkça %1,6'sı oranında süperakışkanlaştırıcı, çimento miktarının ağırlıkça %17,5'i oranında çelik lif ve çimento miktarının ağırlıkça %57,5'i oranında karışım suyu hazırlanarak karışımlar hazırlanmıştır. Çalışmada 12 farklı tipte beton üretilmiştir. Bu çalışmada, lifli betonlar L2, lifsiz betonlar L1; kireçtaşı agregalı betonlar LIM, kuvars agregalı betonlar QUA; referans betonlar RC, reaktif pudra püskürtme betonlar ise PC kısaltmaları ile ifade edilmiştir.

- Lifsiz kireçtaşı referans beton (LIM-L1-RC)
- Lifli kireçtaşı referans beton (LIM-L2-RC)
- Lifsiz kireçtaşı reaktif pudra püskürtme beton (LIM-L1-PC)
- Lifli kireçtaşı reaktif pudra püskürtme beton (LIM-L2-PC)
- Lifsiz kuvars referans beton (QUA-L1-RC)
- Lifli kuvars referans beton (QUA-L2-RC)
- Lifsiz kuvars reaktif pudra püskürtme beton (QUA-L1-PC)
- Lifli kuvars reaktif pudra püskürtme beton (QUA-L2-PC)
- Lifsiz mermer referans beton (MAR-L1-RC)
- Lifli mermer referans beton (MAR-L2-RC)
- Lifsiz mermer reaktif pudra püskürtme beton (MAR-L1-PC)
- Lifli mermer reaktif pudra püskürtme beton (MAR-L2-PC)

6 tip referans tünel püskürtme beton karışım miktarı Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Referans püskürtme beton karışım miktarları

Malzemeler	LIM-L1-RC	LIM-L2-RC	QUA-L1-RC	QUA-L2-RC	MAR-L1-RC	MAR-L2-RC
Çimento	435	435	435	435	435	435
0-4 mm (agrega)	781	724	781	724	781	724
4-8 mm (agrega)	434	403	434	403	434	403
8-16 mm (agrega)	520	483	520	483	520	483
Çelik lif	-	125	-	125	-	125
Su	200	200	200	200	200	200
Toplam	2370	2370	2370	2370	2370	2370

6 tip reaktif pudra püskürtme beton karışım miktarı Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Reaktif pudra püskürtme beton karışım miktarları

Malzemeler	LIM-L1- PC	LIM-L2- PC	QUA-L1- PC	QUA-L2- PC	MAR-L1- PC	MAR-L2- PC
Çimento	806	761	806	761	806	761
Silis dumanı	202	190	202	190	202	190
0,1–0,75 mm agrega	886	836	886	836	886	836
Süperakışkanlaştırıcı	13	12	13	12	13	12
Çelik lif	-	133	-	133	-	133
Su	463	438	463	438	463	438
Toplam	2370	2370	2370	2370	2370	2370

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Çökme deney sonuçları

Çökme deney sonuçları Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Çökme deney sonuçları

Beton Tipi	Çökme (cm)
LIM-L1-RC	1
LIM-L2-RC	1
LIM-L1-PC	21
LIM-L2-PC	20
QUA-L1-RC	1
QUA-L2-RC	1
QUA-L1-PC	21
QUA-L2-PC	20
MAR-L1-RC	1
MAR-L2-RC	1
MAR-L1-PC	21
MAR-L2-PC	20

Referans püskürtme betonlar S1 kıvamında (1–4 cm), reaktif pudra püskürtme betonlar ise S4 kıvamında (16–21 cm) slump değerine sahiptir [34]. Tablo 8’de görüldüğü üzere, reaktif pudra püskürtme betonlar daha akışkandır ve işlenebilirliği referans püskürtme betonlara göre daha yüksektir.

3.2. Basınç dayanım sonuçları

C25/30 dayanım sınıfında üretilen tünel püskürtme betonlar için minimum silindir basınç dayanımının ortalama 25,5 MPa olması istenmektedir [39, 40]. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları standardına göre, betonun karakteristik küp basınç dayanımı karakteristik silindir basınç dayanımının 0,8’e bölünmesiyle elde edilebilir [41]. Buna göre, C25/30 dayanım sınıfında üretilen tünel püskürtme betonların minimum küp basınç dayanımı 32 MPa olarak hesaplandı.

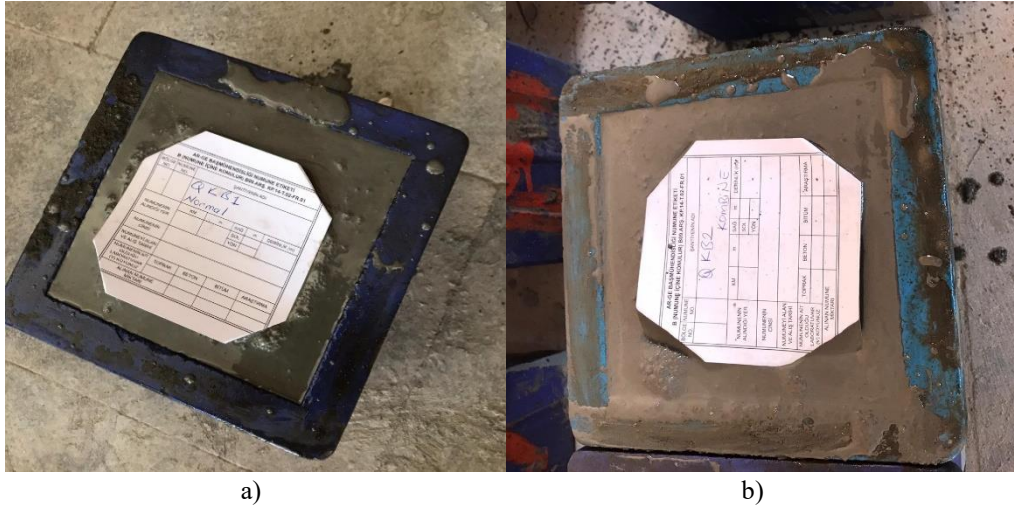


Şekil 3. Kireçtaşı reaktif pudra püskürtme betonun kalıptaki görünümü a) lifsiz kireçtaşı reaktif pudra püskürtme betonu (LIM-L1-PC) b) lifli kireçtaşı reaktif pudra püskürtme betonu (LIM-L2-PC)

Kireçtaşı reaktif pudra püskürtme betonunun kalıptaki görünümü Şekil 3'te verilmiştir. Kireçtaşı içerikli püskürtme betonların basınç dayanımı sonuçları Tablo 9'da gösterilmiştir. Tablo 9'da görüldüğü gibi, farklı kür uygulamaları sonucunda, kombine kür sonrası maksimum basınç dayanımı 62,23 MPa olarak bulunmuştur.

Kürleme Tipi	Basınç Dayanımı (MPa)				Şartname Limiti (Mpa)
	LIM-L1-RC	LIM-L2-RC	LIM-L1-PC	LIM-L2-PC	
Standart su kürü	53,13	58,29	51,44	56,47	32
Kombine kür	55,47	62,23	54,04	61,21	32

Kuvars reaktif pudra püskürtme betonun kalıptaki görünümü Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Kalıptaki kuvars reaktif pudra püskürtme beton görünümü a) lifsiz kuvars reaktif pudra püskürtme beton (QUA-L1-PC) b) lifli kuvars reaktif pudra püskürtme beton (QUA-L2-PC)

Kuvars içerikli püskürtme betonların basınç dayanım sonuçları Tablo 10'da gösterilmiştir. Tablo 10'da görüldüğü üzere, farklı kür uygulamaları sonucunda, kombine kür sonrası maksimum basınç dayanımı 61,25 MPa olarak bulunmuştur.

Tablo 10. Kuvars içeren püskürtme betonların basınç dayanım sonuçları

Kürleme Tipi	Basınç Dayanımı (MPa)				Şartname Limiti (MPa)
	QUA-L1-RC	QUA -L2-RC	QUA -L1-PC	QUA -L2-PC	
Standart su kürü	52,93	57,63	50,98	55,79	32
Kombine kür	54,50	61,25	52,92	60,50	32

Mermer içeren püskürtme betonların basınç dayanım sonuçları Tablo 11de gösterilmiştir. Tablo 11’de görüldüğü üzere, farklı kür uygulamaları sonucunda, kombine kür sonrası maksimum basınç dayanımı 45,46 MPa olarak bulunmuştur.

Tablo 11. Mermer içeren püskürtme betonların basınç dayanım sonuçları

Kürleme Tipi	Basınç Dayanımı (MPa)				Şartname Limiti (MPa)
	MAR-L1-RC	MAR -L2-RC	MAR -L1-PC	MAR -L2-PC	
Standart su kürü	32,37	40,87	31,12	38,96	32
Kombine kür	38,29	45,46	36,81	44,38	32

4. Sonuç

Bu çalışmada, tünel püskürtme beton üretiminde kireçtaşı, kuvars ve mermer tozunun kullanılabilirliği araştırıldı. Sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- Referans beton üretimlerinde kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifsiz referans püskürtme betonların su kürü sonrası basınç dayanımları sırasıyla 53,13-52,93-32,37 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifsiz referans püskürtme betonların kombine kür sonrası dayanım değerleri 55,47-54,50-38,29 MPa bulundu.
- Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifli referans betonların su kürü sonrası dayanımları 58,29-57,63-40,87 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifli referans püskürtme betonların kombine kür sonrası dayanımları 62,23-61,25-45,46 MPa olarak bulundu.
- Reaktif pudra püskürtme beton üretimlerinde ise; kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifsiz reaktif pudra püskürtme betonların su kürü sonrası basınç dayanımları sırasıyla 51,44-50,98-31,12 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifsiz reaktif pudra püskürtme betonların kombine kür sonrası dayanım değerleri 54,04-52,92-36,81 MPa bulundu.
- Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifli reaktif pudra püskürtme betonların su kürü sonrası dayanımları 56,47-55,79-38,96 MPa bulundu. Kireçtaşı, kuvars ve mermer atıklarından oluşan lifli reaktif pudra püskürtme betonların kombine kür sonrası dayanımları ise 61,21-60,50-44,38 MPa bulundu.
- Lifsiz referans betonlarda su küründe 28 günlük basınç dayanımları 32–54 MPa aralığında iken, kombine kür sonrası bu değerler 38–56 MPa’a yükselmiştir.
- Lif ilavesiyle basınç dayanımları tüm serilerde yaklaşık 10–13 MPa artış göstermiştir.
- Reaktif pudra betonlar, referans betonlara kıyasla daha yüksek işlenebilirlik ve akışkanlık sergilemiştir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde verdikleri destekten dolayı Batman Üniversitesi Rektörü ve çalışanları ile Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü’ne şükranlarını sunarlar.

Kaynakça

- [1] *Püskürtme beton-Bölüm 2: Uygulama*, TS EN 14487-2, TSE, Ankara, 2007
- [2] Z. Chu, Z. Wu, B. Liu, and Q. Liu, "Coupled analytical solutions for deep-buried circular lined tunnels considering tunnel face advancement and soft rock rheology effects," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 94, no. 103111, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103111>
- [3] Q. Wang, P. Geng, X. Guo, G. Zeng, C. Chen, and C. He, "Experimental study on the tensile performance of circumferential joint in shield tunnel," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 112, no. 103937, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103937>
- [4] X. Zhang, Z. Lin, K. Zhang, H. Di, C. Chen, C. He, and S. Zhou, "Full-scale experimental test for load-bearing behavior of the carbon fiber shell reinforced stagger-jointed shield tunnel," *Composite Structures*, vol. 311, no. 116773, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116773>
- [5] D. Liu, M. Li, J. Zuo, Y. Gao, F. Zhong, Y. Zhang, and Y. Chang, "Experimental and numerical investigation on cracking mechanism of tunnel lining under bias pressure," *Thin-Walled Structures*, vol. 163, no. 107693, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107693>
- [6] D. Liu, Q. Shang, M. Li, J. Zuo, Y. Gao, and F. Xu, "Cracking behaviour of tunnel lining under bias pressure strengthened using FRP grid-PCM method," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 123, no. 104436, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104436> Get rights and content
- [7] Y. Sui, X. Cheng, Z. Zhao, and W. Ma, "Investigation of cracking mechanism of the first tunnel lining during double-arch tunnel construction," *Underground Space*, vol. 14, pp. 1–17, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.05.011>
- [8] G. K. Lohar, A. Kumar, and N. Roy, "Design and analysis of shotcrete lining in tunnels under squeezing ground conditions: a case study of Atal tunnel," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 42, pp. 6857–6888, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02899-x>
- [9] B. Benmokrane, S. Mousa, K. Mohamed, and M. S. Ahmed, "Physical, mechanical, and durability characteristics of newly developed thermoplastic GFRP bars for reinforcing concrete structures," *Construction and Building Materials*, vol. 276, no. 122200, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122200>
- [10] Y. Pan, and D. Yan, "Study on the durability of GFRP bars and carbon/glass hybrid fiber reinforced polymer (HFRP) bars aged in alkaline solution," *Composite Structures*, vol. 261, no. 113285, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113285>
- [11] S. Solyom, and G. L. Balázs, "Bond of FRP bars with different surface characteristics," *Construction and Building Materials*, vol. 264, no. 119839, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119839>
- [12] B. Ibrahim, S. Mousa, H. M. Mohamed, and B. Benmokrane, "Quasi-static cyclic behavior of precast high-strength concrete tunnel segments reinforced with GFRP bars," *Engineering Structures*, vol. 286, no. 116159, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116159>
- [13] T. A. Mehmandari, M. Shokouhian, M. Imani, and A. Fahimifar, "Experimental and numerical analysis of tunnel primary support using recycled, and hybrid fiber reinforced shotcrete," *Structures*, vol. 63, no. 106282, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106282>
- [14] C. Liu, X. Lai, and Y. Qin, "Steel fiber-reinforced recycled coarse aggregate shotcrete repair for tunnel lining corrosion: experimental tests and calculation analysis," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 157, no. 106236, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106236>
- [15] C. Gong, W. Ding, K. M. Mosalam, S. Günay, and K. Soga, "Comparison of the structural behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete tunnel segmental joints," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 68, pp. 38–57, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.05.010>
- [16] H. Yazici, M. Y. Yardimci, S. Aydin, and A. S. Karabulut, "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 3, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003>
- [17] P. S. Song, and S. Hwang,, "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 18, no. 9, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>
- [18] F. Civici, "Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol. 12, no. 2, pp. 183–188, August 2006.
- [19] W. Zheng, B. Luo, and Y. Wang, "Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibers at elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 844–851, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.066>

- [20] P. S. Song, S. Hwang, and B. C. Sheu, "Strength properties of nylon and polypropylene-fiber-reinforced concretes," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 8, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033>
- [21] S. L. Suhaendi, and T. Horiguchi, "Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 9, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.006>
- [22] U. Gündesli, "A litereture review on the use of fly ash, silica fume and blast - furnace slag in concrete and cement as an additive," Master dissertation, Dept. Civil Eng., Cukurova Univ., Adana, Turkey, 1993
- [23] N. H. Yi., J. H. J. Kim, T. S. Han, Y. G. Cho, and J. H. Lee, "Blast- resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.014>
- [24] H. Yazici, H. Yigiter, A. S. Karabulut, and B. Baradan, "Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete," *Fuel*, vol. 87, no. 12, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.03.005>
- [25] H. Yigiter, "The toughness property of high performance concretes," Master dissertation, Dept. Civil Eng., Dokuz Eylul Univ., Izmir, Turkey, 2002
- [26] Adabag, "Beton Santrali," 2024. [Online]. Available: <http://www.adabag.com.tr> [Accessed December 7, 2024]
- [27] F. Hattatoglu, and A. Bakis, "Usability of ignimbrite powder in reactive powder concrete road pavement," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, no. 6, 2016, <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1213182>
- [28] Limak, "Cimento," 2024. [Online]. Available: <https://www.limakcimento.com/urunler-ve-hizmetler/cimento> [Accessed December 7, 2024]
- [29] A. Bakis, "Increasing the durability and freeze-thaw strength of concrete paving stones produced from Ahlat stone powder and marble powder by special curing method," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, no. 3593710, 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/3593710>
- [30] Ikisa, "Beton Katkileri," 2024. [Online]. Available: <http://www.ikisa.com.tr/urun.html> [Accessed December 7, 2024]
- [31] Atlas Bir Yapi, "Beton Fiber," 2024. [Online]. Available: <https://atlas1.com.tr/fiber-donati> [Accessed December 7, 2024]
- [32] *Aggregates for concrete*, TS 706 EN 12620+A1, TSE, Ankara, 2009
- [33] *Design of concrete mixes*, TS 802, TSE, Ankara, 2016
- [34] *Testing fresh concrete - Part 2: Slump test*, TS EN 12350-2, TSE, Ankara, 2019
- [35] *Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens*, TS EN 12390-3, TSE, Ankara, 2019
- [36] F. C. D. Larrard, and T. Sedran, "Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model," *Cement and Concrete Research*, vol. 24, no. 6, 1994, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- [37] M. Ipek, "Effects of pre-setting pressure applied during setting phase to mechanical behaviors of reactive powder concrete," Ph.D. dissertation, Dept. Civil Eng., Sakarya Univ., Sakarya, Turkey, 2009
- [38] P. Richard, and M. Cheyrezy, "Reactive powder concretes with high ductility and 200–800 MPa compressive strength, concrete technology: past, present and future," in *Proc. Of V. M. Malhotra Symp*, Zilina, USA, 1994, pp. 507–518
- [39] Demiryollar, Limanlar, Havameydanlari İnşaatı Genel Mudurlugu, *Demiryolları malzeme,yapım, kontrol ve bakım onarım teknik esasları*. Ankara, 2007
- [40] Karayolları Genel Mudurlugu, *Karayolları teknik sarnamesi: yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, ustyapi ve cesitli isler*. Ankara, 2013
- [41] *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*, TS 500/T3, TSE, Ankara, 2014

Özgeçmiş**Gürkan ERDAL**

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında mezun oldu. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan 2017 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2021 yılında mezun oldu. Halen Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü'nde (Etüt, Proje ve Çevre Başmühendisliği) Mühendis olarak çalışmaktadır.

E-Posta: grknrdl@gmail.com

**Abdulrezzak BAKIŞ**

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1991 yılında mezun oldu. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan 1995 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Bilim Dalı'nda 2015 yılında doktora eğitimini tamamladı. Halen Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde (Ulaştırma) Doçent olarak çalışmaktadır.

E-Posta: abdulrezzak.bakis@batman.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Gürkan ERDAL: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama İnceleme. Abdulrezzak BAKIŞ: Görselleştirme, Yazma-orijinal taslak hazırlama İnceleme, Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.