



Kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemelerinin filler oranının CBR performansına etkisi ve maliyet analizi

Effect of filler percentage of recycled asphalt pavement (RAP) materials on CBR performance and cost analysis

Ayşegül Güneş SEFEROĞLU^{1*}, Mehmet Tevfik SEFEROĞLU², Muhammet Vefa AKPINAR³, Muhammet ÇELİK⁴

^{1,2}İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye.
gnskaya61@gmail.com, mtseferoglu@gmail.com

³İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
mvakpinar70@yahoo.com

⁴Trabzon Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Trabzon, Türkiye.
m.celik53@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 18.03.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 20.10.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 16.09.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.48154
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemeleri çevre kirliliğini azaltması, enerji ve maliyet tasarrufu sağlaması nedeniyle doğal agregaya (DA) alternatif sayılabilecek bir malzemedir. Pek çok ülkede, yol üstü yapı tabakalarında belirli oranlarda RAP malzemesi kullanımına müsaade edilmektedir. Fakat RAP malzemelerinin mekanik özellikleri malzemenin üst yapının hangi tabakasından elde edildiğine, kazındığı yolun hizmet ömrü ve yapım özelliklerine, yolda kullanılan malzemelerin (bitüm ve agregaya) özelliklerine ve kazı makinesinin özelliklerine bağlıdır. Bu çalışmada, iki farklı karayolunun bozulmuş aşınma tabakalarından özel kazıma makinesiyle elde edilen RAP malzemeleri (RAP₁ ve RAP₂), DA ile farklı oranlarda (%0, %15, %30, %45, %60, %100) karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlar üzerinde bitüm oranı, elek analizi, modifiye proktor ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) gibi laboratuvar testleri yapılarak karışımların bazı karakteristik özellikleri, %100 DA karışım değerleri referans alınarak incelenmiştir. Sonuçlara göre DA malzemesine alternatif olarak plantmiks temel (PMT) tip-1 tabakasında kullanılabilir maksimum RAP₁ ve RAP₂ oranları ülkemiz Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) kriterleri doğrultusunda belirlenmiştir. Ayrıca RAP malzemelerinin kullanılması durumunda DA malzemesine olan ihtiyacın azalmasının sağlayacağı malzeme maliyetlerindeki kar oranları da kapsamlı bir maliyet analizi yapılarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: RAP, DA, Temel tabakası, Maliyet analizi.

Abstract

Recycled asphalt pavement (RAP) materials are an alternative to natural aggregate (NA) because they reduce environmental pollution and provide energy and cost savings. In many countries abroad, the usage of RAP materials in road pavement layers are permissible at certain rates. However, the mechanical properties of RAP materials are dependent on; the materials are derived from the in which pavement layer, the service life and construction characteristics of the road it is milled, the properties of the materials used (bitumen and aggregate) in the layer and the characteristics of the milling machine. In this study, two types of RAP materials (RAP₁ and RAP₂) obtained from the degraded wearing layers of two different roadway using milling machine were mixed with NA in different rates (0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 100%). Some of the characteristics of the mixtures were examined with reference to 100% NA mixture values by performing laboratory tests such as bitumen ratio, sieve analysis, modified proctor and California bearing ratio (CBR) on the mixtures obtained. According to the results, maximum rates of RAP₁ and RAP₂ which can be used in plant-mix base type-1 layer as an alternative material to NA is determined according to Turkey Highway Technical Specification. In addition, in the case of using RAP materials, the profit rates of material costs to be reduced by the reduction of the need for NA material are also determined by cost analysis.

Keywords: RAP, DA, Base layer, Cost analysis.

1 Giriş

Kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemeleri; yenileme, bakım ve onarım çalışmaları sırasında bozulmuş haldeki asfalt yol kaplamasının yerinden kazınmasıyla elde edilen agregaya ve bu agreganın etrafını saran yaşlanmış bitümden oluşmaktadır. Kazınan yol tabakasının yapısı, hizmet süresi, kaplamanın ilk yapımı sırasında kullanılan bitüm ve agreganın özellikleri, kazı makinesinin özellikleri, depolama özellikleri, gibi pek çok faktör RAP malzemelerinin özelliklerini etkilemektedir [1]. Bu sebeple farklı bölgelerden elde edilen RAP malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri de farklı olabilmektedir. Dolayısıyla yol üstü yapı tabakalarında RAP malzemelerinin kullanım oranları ile ilgili net kullanım oranları ifade etmek sakıncalı sonuçlar doğurabilmektedir.

RAP malzemesi başlıca iki bileşenden oluşmaktadır: agregaya ve bitüm. RAP malzemelerinin pek çok özelliği üzerinde önemli etkiye sahip olan etmenlerin başında RAP agregası yüzeyini saran yaşlanmış haldeki bitüm gelmektedir. Bazı araştırmacılar RAP malzemesi üzerindeki bitüm oranının tespiti için gerçekleştirdikleri bitüm oranı tayini testleri neticesinde RAP malzemelerinin bitüm oranının kütlece %4-6 arasında değiştiğini belirtmektedir [1]-[4].

Gradasyon karakteristiği de yol tabakalarının performansında önemli bir etkiye sahiptir. Gray [5], mineral filler (No.200 elek altı) malzeme içeriğinin çok düşük olması durumunda (<%4) kırma taş malzeme yüksek yoğunluğun elde edilemediği, fakat aşırı fillerin de (>%9) maksimum taşıma kapasitesini düşürdüğünü, ayrıca yol temel tabakalarının donmaya karşı hassasiyetini arttırdığını bildirmiştir. Pek çok araştırmacı RAP

*Yazışılan yazar/Corresponding author

malzemesinin No.200 elekten geçen filler malzeme içeriğini maksimum %5-10 ile sınırlandırmaktadır [3],[6]-[8]. Ülkemiz Karayolu Teknik Şartnamesi [9] ise granüler temel (GT) ve plent-miks temel (PMT) tabakaları için filler malzeme oranının sırasıyla en fazla %10 ve %12 olabileceğini belirtmektedir. Gupta ve diğ. [10] çalışmasında %100, %75, %50, %25 ve %0 RAP oranlarındaki RAP-DA karışımları üzerinde yapmış olduğu elek analizi test sonuçlarına göre; karışımda RAP malzemesi kullanım oranı arttıkça granüler malzeme miktarının da arttığını ve karışımın filler içeriğinin azaldığını belirtmiştir.

Genel olarak RAP malzemelerinin maksimum kuru yoğunluğu (δ_{maks}) 1.6-2 t/m³, optimum su muhtevası (OSM) %5-8 ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) da %20-25 arasında değişmektedir [11]-[13]. Malzemelerin filler içeriğindeki artış, agregalar arasını dolduran malzemedeki artış anlamına gelmektedir. Bu durumda sıkıştırma etkisi altındaki malzemenin kırılma veya sıkışmalar neticesinde yoğunluğunun artması beklenmektedir. Fakat araştırmacılar, proktor enerjisi ile sıkıştırılan RAP-DA karışımlarında, RAP oranının artmasıyla yoğunluğun azaldığını bildirmiştir [14]-[16]. RAP agregası yüzeyini saran bitüm, sıkışmayı engellenmekte ve RAP-DA karışımının δ_{maks} değeri, RAP malzemesi oranı arttıkça azalma eğilimi göstermektedir [6],[14],[17]. Ayrıca bitüm, ince malzemeleri birleştirerek ve agregalar arasını doldurarak sıkışmayı sağlayacak olan filler malzeme miktarını azaltmakta ve böylece agregalar arası kenetlenmeyi engellemektedir. RAP-DA karışımlarındaki RAP oranının artmasıyla karışımların optimum su muhtevasının azaldığı görüşü çoğunlukta iken [12],[15],[16], zıt görüşler de mevcuttur [14],[18].

RAP malzemesinin gradasyonu, parça şekli ve diğer tüm fiziksel ve mekanik özellikleri hatta yapılan CBR testi türü (yaş/kuru) bile CBR sonuçlarını etkiler niteliktedir. Yapılan CBR testleri sonucunda karışımın RAP oranındaki artışın, karışımların taşıma kapasitesinde azalmaya sebep olduğu pek çok araştırmacı tarafından ortaya konulmuş bir gerçektir [12],[14],[17]-[20]. Bennert ve Maher [15], temel tabakalarında RAP-DA karışımlarında RAP oranındaki artışın CBR değerlerini belirgin oranda düşürmesi sebebiyle temel tabakasında maksimum kullanılabilir RAP oranının en çok %50 ile sınırlandırılması gerektiğini belirtmiştir. Bleakley ve Cosentino [4] ile Cosentino ve diğ. [21] ise temel tabakasında RAP malzemesi kullanımını maksimum %25 ile sınırlandırmıştır. Ülkemiz KTŞ'nde [9] yalnızca bitümlü temel tabakalarında RAP malzemesi kullanılabilirliği ve kullanım oranının da %25 ile sınırlandırılması gerektiği belirtilmektedir. Ooi [22], minimum %80 CBR değerini sağlayan RAP malzemelerinin temel tabakası karışımlarında %50 oranında kullanılabilirliğini belirtmiştir.

Bu çalışmada ülkemizdeki farklı iki ildeki karayolu kaplamasının aşınma tabakalarından özel kazıma makineleri ile RAP malzemeleri elde edilmiştir. 0-25 mm tane boyutu aralığındaki bu RAP malzemeleri (RAP₁ ve RAP₂) belirli oranlarda DA malzemeleriyle karıştırılarak PMT tabakası için kullanılabilir RAP malzemesi oranları RAP₁ kriterleri doğrultusunda ayrı ayrı belirlenmiştir. RAP₁ ve RAP₂ malzemesi içeren karışımlar üzerinde bitüm içeriği tayini, elek analizi testi, modifiye proktor testi ve yaş CBR testleri yapılmıştır. Farklı RAP malzemelerinin karışım oranlarına göre değişen özellikleri bu testlerle incelenmiş olup, PMT tabakası için KTŞ'nde belirtilen gradasyon ve yaş CBR kriterlerini sağlayan kullanılabilir RAP₁ ve RAP₂ karışım oranları belirlenmiştir. FDOT [23]'a göre, temel tabakası için sağlanması gereken CBR değerinin en az %80 olması gerektiğini belirtirken, ülkemiz KTŞ granüler temel (GT) ve PMT tabakaları

için sırasıyla minimum %80 ve %120 yaş CBR kriterini belirlemektedir [9]. Çalışmada ayrıca karışımlar için malzeme maliyet analizleri yapılmış ve RAP malzemesinde bulunan bitüm ve agregaların kullanımından doğal agregaların kullanımından tasarruf sağlanmasıyla elde edilen kar oranları da farklı RAP oranlarındaki karışımlar için ayrı ayrı tespit edilmiştir.

2 Gereç ve yöntem

2.1 Malzemeler

2.1.1 RAP malzemeleri

RAP₁ malzemesi, Artvin-Borçka karayolunun, RAP₂ malzemesi ise Trabzon ili Fatih Mahallesi'nde bir şehir içi yolun bozulmuş haldeki aşınma tabakalarından özel kazıma makineleri ile kazınarak temin edilmiş ve kamyonlara yüklenerek üstü kapalı şekilde depolanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Depo alanındaki RAP malzemeleri.

Figure 1. RAP material in the storage area.

2.1.2 DA malzemesi

DA malzemesi, Trabzon bazalt taş ocağında üretilen agregalardan alınmıştır. Doğal agregaların malzemesinin maksimum tane çapı 19 mm'dir. Hava tesirlerine karşı dayanıklılığı (Na₂SO₄ ile) %4.60, Los Angeles aşınma direnci %11.7 (Tip-B), su absorpsiyonu %1.5 ve yassılık indeksi ise %12 olarak belirlenmiştir.

2.2 Karışımların hazırlanması

RAP malzemeleri kuru ağırlıkça doğal agregaların malzemesi ile %5, %15, %30, %45, %60 ve %100 oranlarında karıştırılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlara uygulanacak test sonuçlarına referans olması açısından %100 DA (%0 RAP) karışımı da kontrol numunesi olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada geri dönüşüm stratejisi olarak soğuk geri dönüşüm yöntemi kullanılması sebebiyle RAP malzemeleri veya karışımlar herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmamıştır.

2.3 Yürütülen testler

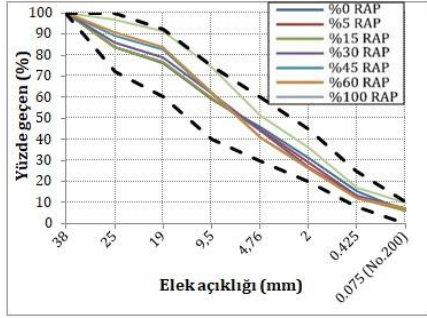
2.3.1 Bitüm içeriği tayini

RAP malzemeleri, bazalt agregası ve bu agregaların yüzeyini saran yaşlanmış bitüm tabakasından oluşmaktadır. Agregaların yüzeyini saran bitüm oranlarının belirlenmesi için RAP malzemeleri üzerinde ekstraksiyon testleri AASHTO T 164'e göre gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda RAP₁ ve RAP₂ malzemelerinin bitüm oranları kuru ağırlıkça sırasıyla %3.72 ve %4.20 olarak tespit edilmiştir.

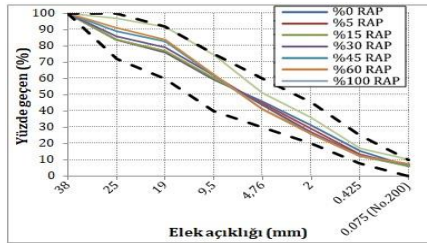
2.3.2 Elek analizi testi

RAP malzemeleri özel kazıma makinesi ile kazınarak kamyonlara yüklenmiş ve depo alanına taşınmıştır. Karışımların hazırlanması aşamasında ilave bir konkasörden geçirme işlemi uygulanmamış olup, yalnızca elekten geçirilerek

25 mm'den büyük agregalar uzaklaştırılmıştır. Böylece karışımların maksimum tane çapı 25 mm olarak ayarlanmıştır. Kullanılan doğal agregaların maksimum tane çapı ise 19 mm'dir. RAP₁ ve RAP₂ malzemelerinden hazırlanan karışımlara uygulanan elek analizi testleri sonucunda elde edilen gradasyon eğrileri ve PMT Tip-1 tabakası için KTS'nde belirtilen alt ve üst limitler sırasıyla Şekil 2(a) ve Şekil 2(b)'de gösterilmektedir. Şartname limitleri grafiklerde kesikli çizgilerle gösterilmektedir.



(a)

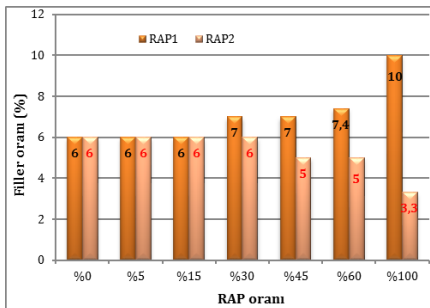


(b)

Şekil 2. (a): RAP₁ ve (b): RAP₂ malzemeleri ile hazırlanan karışımların gradasyon eğrileri.

Figure 2. Gradation curves of mixtures prepared with RAP₁ and RAP₂ materials.

Şekil 2'de görüldüğü gibi, her iki RAP malzemesi de KTS'nde PMT Tip-1 tabakası için belirtilen alt ve üst gradasyon limitleri arasında kalmıştır. Şartnamede belirtilen bir diğer kısıt ise No.200 elek altı (minerale filler) malzeme oranının en fazla %10 olması gerektiğidir. Bu şart her iki RAP malzemesi için de sağlanırken, RAP₁ malzemesinin daha fazla filler oranına sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3).



Şekil 3. Karışımların filler oranları.

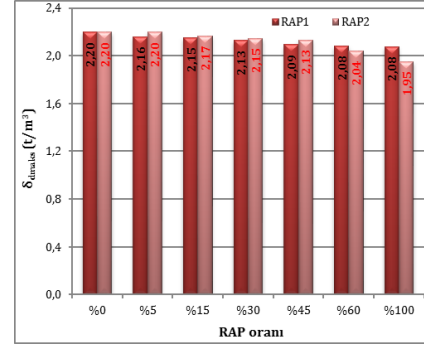
Figure 3. Filler ratios of the mixtures.

RAP malzemesiyle hazırlanan karışımlarda RAP₁ oranının %15'in üzerine çıkması durumunda karışımdaki filler oranı artarken, RAP₂ malzemesi kullanılması durumunda bu oran azalmıştır. RAP malzemesi içeriğindeki filler malzeme miktarı Sullivan [24]'a göre %10'dan, Rathje ve diğ. [25] ile McGarrah

[6]'a göre %5'ten daha az olmalıdır. Şekil 3'te görüldüğü gibi bu çalışmada RAP₁ malzemesinin filler içeriği %10, RAP₂ malzemesinininki ise %3.3 olarak belirlenmiştir.

2.3.3 Modifiye proktor testi

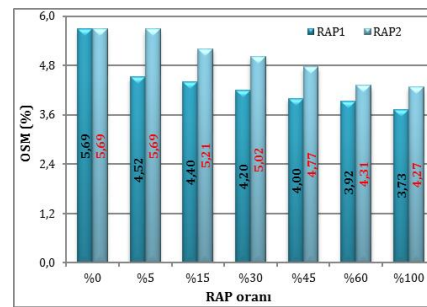
Karışımların yoğunluk-su muhtevası ilişkileri AASHTO T 180'e göre gerçekleştirilen modifiye proktor testleri ile belirlenmiştir. Test sonuçlarından elde edilen maksimum kuru yoğunluk (δ_{dmaks})-RAP oranı ilişkisi Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Karışımların yoğunluk-RAP oranı ilişkileri.

Figure 4. MDD-RAP ratio relationships of the mixtures.

RAP₁ ve RAP₂ malzemelerinden oluşan tüm karışımlarda, RAP oranının artışı maksimum kuru yoğunluğu azaltmıştır. RAP₂ malzemesi %45 RAP oranına kadar RAP₁ malzemesinden daha yoğunken, %45'ten sonra yoğunlukta ani bir düşüş yaşanmış ve RAP₁ malzemesinininkinden daha az yoğun bir karışım oluşmuştur. Bunun sebebi olarak Şekil 3'teki filler oranlarına göre RAP₁ malzemesinin karışımda %30'un üzerinde kullanılması durumunda filler oranının artması, RAP₂ malzemesinin ise filler oranının azalması sebebiyle yoğunluklarda bu değişikliğin meydana gelmiş olduğu sonucuna varılmıştır. RAP₁ karışımında artan filler oranı, agregalar arasını doldurarak daha yoğun bir tabaka oluşturmuştur. RAP karışımlarının optimum su muhtevası (OSM)-RAP oranı ilişkileri Şekil 5'teki grafikte gösterilmektedir.



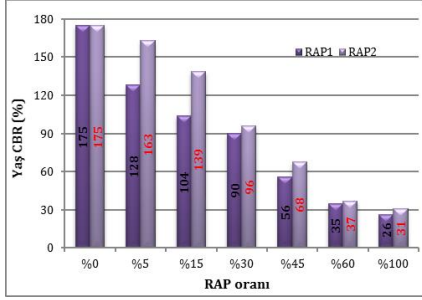
Şekil 5. Karışımların OSM-RAP oranı ilişkileri.

Figure 5. OMC-RAP ratio relationships of the mixtures.

Karışımların OSM değerleri, RAP oranının artmasıyla azalmaktadır. Yani karışıma RAP malzemesi eklendikçe daha az su ile maksimum sıkışma elde edilmiştir. Bu sonuç literatürü destekler niteliktedir. Wu [16], Mokwa ve Peebles [26], Guthrie ve diğ. [12] ve Hoppe ve diğ. [27]'de karışımlardaki RAP oranı arttıkça OSM değerinin azaldığını belirtmiştir. RAP₁ malzemesinden yapılan karışımın OSM değerlerindeki değişim belirgin olmamıştır. RAP₂ malzemesinden oluşan karışımlarda tüm RAP oranlarındaki OSM değerleri RAP₁ karışımlarından daha yüksek olarak elde edilmiştir.

2.3.4 Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testi

Yaş CBR testleri, AASHTO T 193'e göre gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım numunesi maksimum kuru yoğunlukta ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Numuneler 4 gün su havuzunda bekletilmiştir. Tüm numuneler için test sonucunda elde edilen 5 mm penetrasyondaki yaş CBR değerleri Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Karışımların yaş CBR değerleri.

Figure 6. Soaked CBR values of the mixtures.

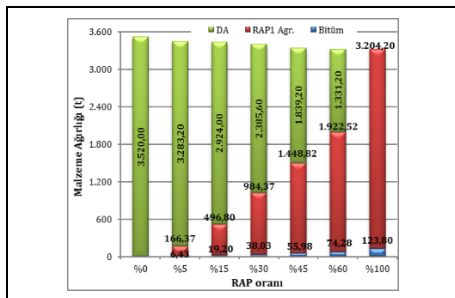
Karışımlarda kullanılan RAP₁ ve RAP₂ malzemelerinin her ikisinde de RAP kullanım oranındaki artışın CBR değerlerinde lineere yakın bir azalma doğurduğu görülmüştür. %100 RAP malzemesinden hazırlanan numunelerin yaş CBR değerleri en düşük iken (%26 ve %31), %100 DA numunesinde en yüksek (%175) değer elde edilmiştir. KTŞ tarafından PMT Tip-1 tabakası için belirtilen minimum %120 yaş CBR kriteri; karışımlarda RAP₁ malzemesi için en fazla %5 ve RAP₂ malzemesi için en fazla %15-20 kullanılması durumunda sağlanabileceği görülmüştür. Daha fazla RAP malzemesinin PMT Tip-1 tabakasında kullanımı, CBR açısından uygun olmamıştır. RAP malzemelerinden daha fazla oranlarda yararlanmak maksadıyla çeşitli katkı malzemeleri (portland çimento, uçucu kül, puzolanik çimento,...) karışımlara dâhil edilerek taşıma kapasitesinin artırılması mümkündür. Ayrıca, daha düşük yaş CBR değeri kriteri olan örneğin granüler temel tabakalarında %100'e varan oranlarda RAP malzemesi kullanımı mümkün olabilmektedir. Literatürdeki çalışmacılar RAP malzemesinin CBR üzerinde olumsuz etkisi olduğunu ve karışımdaki RAP malzemesi oranı arttırdıkça CBR değerinin yani taşıma kapasitesinin azaldığını belirtmiştir [5],[17],[21],[28]. Chesner [28] çalışmasında %100 RAP

malzemesinin %20-25 CBR değerine sahip olduğunu ve RAP-DA karışımlarında RAP malzemesi oranının %40'a düşürülmesi durumunda CBR değerinin %150'nin üzerine çıkarak yaklaşık 7.5 kat arttığını bildirmiştir. Karışım gradasyonunun CBR değeri üzerinde büyük etkisi vardır. Kaba taneli malzemelerin CBR değeri, ince taneli malzemelerden daha yüksektir [15]. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre de nispeten daha yüksek filler oranına sahip RAP₁ malzemesi (%10), daha düşük filler oranına sahip (%3.3) RAP₂ malzemesine kıyasla daha yüksek CBR değerine sahiptir.

3 Malzeme maliyet analizi

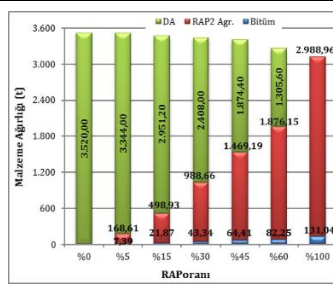
Malzeme maliyet analizi için 8 m genişliğinde (G), 0.20 m kalınlığında (h) ve 1 km uzunluğunda (L) çift şeritli bir karayolu temel tabakası tasarlanmıştır. Bu temel tabakasının farklı oranlarda RAP₁ ve RAP₂ malzemeleri kullanılarak hazırlanması durumunda karışımlarda bulunan malzemeler ve ağırlıkları Tablo 1'de gösterilmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'de temel tabakalarında RAP malzemelerinden hazırlanan karışımların kullanılma durumunda karışımlardaki RAP malzemesinden gelen bitüm ve agrega (RAP agregası) ile DA ağırlıkları RAP₁ ve RAP₂ karışımları için sırasıyla gösterilmektedir.

Tablo 2'de karışımlarda RAP malzemesi kullanılmasıyla DA yerine ikame edilecek RAP agregasının ekonomik değerleri gösterilmektedir. Ayrıca belirtilen boyutlardaki temel tabakasında farklı oranlarda RAP malzemesi kullanımının, tamamı DA malzemesiyle yapılacak bir tabakaya göre sağlayacağı kâr oranları da gösterilmektedir. Yapılan maliyet hesaplarında piyasadaki doğal agreganın 2019 yılı KDV dâhil fiyatının ortalama 21 TL/ton olduğu hesaba katılmıştır. Bu çalışmada, RAP malzemesinin kazınma maliyeti; RAP malzemesinin geri dönüşümde kullanılmaması durumunda da atık sahasına götürülmek üzere yol kaplama yüzeyinden kazınacak olması sebebiyle hesaplara dâhil edilmemiştir. Tamamı taş ocağından temin edilecek olan DA ağırlığının bir kısmının RAP agregası ve etrafını saran mevcut bitüm ağırlığı ile sağlanması sonucu elde edilen kâr oranları Tablo 2'de gösterilmekte olup, tablodaki verilere göre hazırlanan grafik Şekil 9'da gösterilmektedir. RAP malzemesi kullanımının DA kullanımından tasarruf sağladığı açıktır. Karışımlardaki RAP malzemesi oranı arttıkça DA malzemesine duyulan ihtiyaç ve dolayısıyla malzeme maliyetleri azalmaktadır.



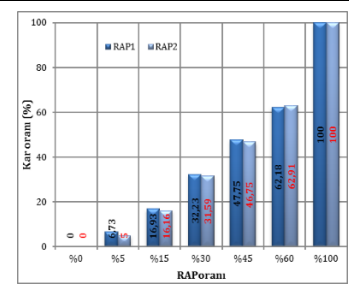
Şekil 7. RAP₁ malzemesi kullanılarak yapılan temel tabakasındaki malzeme ağırlıkları.

Figure 7. Material weights in the base layer made of RAP₁ material.



Şekil 8. RAP₂ malzemesi kullanılarak yapılan temel tabakasındaki malzeme ağırlıkları.

Figure 8. Material weights in the base layer made of RAP₂ material.



Şekil 9. RAP malzemeleri kullanımıyla malzeme maliyetlerinden sağlanan kâr oranlarının karşılaştırılması.

Figure 9. Comparison of profit rates from material costs thanks to the use of RAP materials.

Tablo 1. Temel tabakasında kullanılan malzeme ağırlıkları.

Table 1. Material weights used in the base layer.

RAP oranı	RAP ₁ Temel Tabakası			RAP ₂ Temel Tabakası		
	RAP ₁ agregası mali değeri (TL) (a ₁ ×c)	DA maliyeti (TL) (b ₁ ×c)	RAP ₁ ikamesi ile sağlanan kâr (%)	RAP ₂ agregası mali değeri (TL) (a ₂ ×c)	DA maliyeti (TL) (b ₂ ×c)	RAP ₂ ikamesi ile sağlanan kâr (%)
%0	0	73,920	0	0	73,920	0
%5	3,493.81	68,947.2	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 68,947.2) = 6.73$	3,540.77	70,224	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 70,224) = 5$
%15	10,432.9	61,404	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 61,404) = 16.93$	10,477.45	61,975.2	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 61,975.2) = 16.16$
%30	20,671.7	50,097.6	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 50,097.6) = 32.23$	20,761.78	50,568	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 50,568) = 31.59$
%45	30,425.25	38,623.2	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 38,623.2) = 47.75$	30,852.96	39,362.4	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 39,362.4) = 46.75$
%60	40,372.9	27,955.2	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 27,955.2) = 62.18$	39,399.09	27,417.6	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 27,417.6) = 62.91$
%100	67,288.17	0	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 0) = 100$	62,768.16	0	$\frac{100}{73,920} \times (73,920 - 0) = 100$

*(c): Doğal agreganın 2019 yılı KDV dâhil fiyatının ortalama 21 TL/ton.

Tablo 2. RAP malzemesi ikamesiyle karışımlardaki malzeme maliyetlerinden sağlanan kâr oranları.

Table 2. Profit rates from material costs in mixtures by RAP material substitution.

RAP oranı	RAP ₁ δ (t/m ³)	RAP ₂	RAP ₁ RAP ₂		RAP ₁ temel tabakası			RAP ₂ temel tabakası		
			Temel tabakası ağırlığı (t) (=G×L×h×δ)	Temel tabakası ağırlığı (t)	Bitüm ağır. (t) (%AC=3.72)	RAP agregası ağır. (t)(a ₁)	DA ağır. (t) (b ₁)	Bitüm ağır. (t) (%AC=4.20)	RAP agregası ağır. (t)(a ₂)	DA ağır. (t) (b ₂)
%0	2.2	2.2	3,520	3,520	0	0	3,520	0	0	3,520
%5	2.16	2.2	3,456	3,520	6.43	166.37	3,283.2	7.39	168.61	3,344
%15	2.15	2.17	3,440	3,472	19.19	496.81	2,924	21.87	498.93	2,951.2
%30	2.13	2.15	3,408	3,440	38.03	984.37	2,385.6	43.34	988.66	2,408
%45	2.09	2.13	3,344	3,408	55.98	1,448.82	1,839.2	64.41	1,469.19	1,874.4
%60	2.08	2.04	3,328	3,264	74.28	1,922.52	1,331.2	82.25	1,876.15	1,305.6
%100	2.08	1.95	3,328	3,120	123.8	3,204.2	0	131.04	2,988.96	0

RAP₁ ve RAP₂ malzemeleriyle hazırlanan karışımların tamamında karışımdaki RAP oranı arttıkça doğal agregaya olan ihtiyaç RAP malzemelerinden karşılandığı için azalacaktır. Şekil 9'da görüldüğü gibi RAP₁ ve RAP₂ malzemelerinin kullanımından sağlanan kâr oranları tüm karışım oranları için birbirine yakın olarak elde edilmiştir. %100 RAP malzemesinin şartname kriterlerini sağlaması durumunda tamamı doğal agregadan yapılacak bir temel tabakasına kıyasla malzeme maliyetleri açısından oldukça büyük tasarruf sağlayabileceği görülmektedir.

4 Sonuçlar

Farklı kaynaklardan elde edilen RAP malzemeleri, kazıma işlemi, agrega kaynağı, RAP içeriğindeki bitümün türü gibi farklılıkları nedeniyle farklı mühendislik özelliklerine sahip olabilmektedir. RAP malzemelerinin farklı kaynaklardan alınmış olmasının, hazırlanan karışımların da fiziksel ve mekanik özelliklerinde farklılıklar meydana getirmesi muhtemeldir.

RAP₁ ve RAP₂ malzemelerinin bitüm oranları birbirinden farklıdır. Filler içeriklerinin; karışımdaki RAP₁ oranı arttıkça arttığı, RAP₂ oranı arttıkça ise azaldığı tespit edilmiştir. RAP₁ malzemesinin filler oranı %10 iken, RAP₂ malzemesinin %3.3 olarak belirlenmiştir.

Karışımlardaki RAP₁ ve RAP₂ oranının artması, maksimum kuru yoğunluğun azalmasına sebep olmuştur. RAP₁ malzemesinin karışımda %30'un üzerinde kullanılması durumunda filler oranının artması sebebiyle, artan filler malzeme agregalar arasını doldurarak daha yoğun bir tabaka oluşturmuştur. Ayrıca karışımların OSM değerleri, RAP oranının artmasıyla

azalmaktadır. RAP₂ malzemesinden oluşan karışımlarda tüm RAP oranlarındaki OSM değerleri RAP₁ karışımlarından daha yüksek olarak elde edilmiştir.

%100 RAP malzemelerinden hazırlanan numunelerin yaş CBR değerleri en düşük iken (RAP₁ ve RAP₂ için sırasıyla %26 ve %31), %100 DA numunesinde en yüksek (%175) olarak elde edilmiştir. KTŞ tarafından PMT Tip-1 tabakası için belirtilen minimum %120 yaş CBR kriteri; karışımlarda RAP₁ malzemesi için en fazla %5 ve RAP₂ malzemesi için en fazla %15-20 oranında kullanılması durumunda sağlanabileceği görülmüştür. Taşıma kapasitesi açısından RAP malzemesi kullanım oranları diğer şartname kriterleri de dikkate alınarak çeşitli katkı maddeleri (puzolanik çimento, uçucu kül,...) kullanılarak artırılabilir. Bu durumda malzeme maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Karışımlarda kullanılan RAP malzemesi oranı arttıkça DA malzemesine olan ihtiyaç azalmakta, böylelikle yeni malzeme için taş ocağından kazıma, kırma eleme maliyetleri bertaraf edilirken doğal kaynakların korunumu da sağlanmış olacaktır. Yapılan maliyet hesabına göre yaklaşık olarak karışımda kullanılan RAP oranı kadar, malzeme maliyetlerinde azalma olduğu belirlenmiştir.

5 Conclusions

RAP materials obtained from different sources may have different engineering properties due to differences such as scraping process, aggregate source and the type of bitumen in RAP content. The fact that RAP materials are purchased from different sources is likely to cause differences in the physical and mechanical properties of the prepared mixtures.

The bitumen ratios of RAP₁ and RAP₂ materials are different from each other. Filler contents were found to increase with increasing RAP₁ ratio in the mixture, and decrease with increasing RAP₂ ratio. The filler ratio of RAP₁ material was 10%, while that of RAP₂ material was 3.3%.

The increase in RAP₁ and RAP₂ ratio in the mixtures caused a decrease in the maximum dry density (MDD). If the RAP₁ material is used over 30% in the mixture, the filler ratio increases, so the filler material has formed a denser layer by filling the material between the aggregates. In addition, the optimum moisture content (OMC) values of the mixtures decrease with increasing RAP ratio. In mixtures consisting of RAP₂ material, OMC values in all RAP ratios were obtained higher than RAP₁ mixtures.

While the soaked CBR values of the mixtures prepared from 100% RAP materials were the lowest (26% and 31% for RAP₁ and RAP₂, respectively), it was obtained as the highest (175%) in the 100% NA mixture. It has been observed that the minimum 120% wet CBR criteria specified by Turkey Directorate of Highway Specification for the PBC Type-1 layer can be met when used at a maximum rate of 5% for RAP₁ material and 15-20% for RAP₂ material in mixtures. In terms of carrying capacity, RAP material usage percentages can be increased by using various additives (pozzolanic cement, fly ash,...) considering other specification criteria. In this case, material costs should also be considered.

As the percentage of RAP material used in mixtures increases, the need for NA material decreases, thus, the costs of scraping from the quarry, crushing and screening will be eliminated for the new material, while the conservation of natural resources will be ensured. According to the cost analysis, it was determined that there is a decrease in material costs approximately as much as the RAP percentage used in the mixture.

6 Kaynaklar

- [1] Güngör AG, Orhan F, Kaşak S, Çalışkol A, Yönter G. "Kazılmış asfalt kaplamaların yeniden kullanılması". *Karayolu 1. Ulusal Kongresi*, Ankara, Türkiye, 1-3 Nisan 2008.
- [2] Potturi A, Puppala AJ, Hoyos LR. "Resilient Characteristics of Cement Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates". *Transportation Research Board Annual Meeting, National Research Council*, National Academy of Science, Washington, DC, USA, 2007.
- [3] Locander R. "Analysis of using reclaimed asphalt pavement (RAP) as a base course material". Colorado Department of Transportation Final Report No: CDOT-2009-5, Denver, USA, 2009.
- [4] Bleakley AM, Cosentino PJ. "Improving properties of reclaimed asphalt pavement for 484 Roadway base applications through blending and chemical stabilization". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 486(2335), 20-28, 2013.
- [5] Gray JE. "Characteristics of graded base course aggregates determined by triaxial tests". *National Crushed Stone Association Engineering Bulletin No. 12*. National Crushed Stone Association, Washington, DC, 1962.
- [6] McGarrah EJ. "Evaluation of Current Practices of Reclaimed Asphalt Pavement/Virgin Aggregate as Base Course Material". Washington State Department of Transportation Final Report No: WA-RD 713.1, 2007.
- [7] Yuan D, Nazarian S, Hoyos LR, Puppala AJ. "Cement Treated RAP Mixes for Roadway Bases". Federal Highway Administration Final Report No: FHWA/TX-10/0-6084-1. Washington, D.C., 2010.
- [8] Edil TB. "Specifications and Recommendations for Recycled Materials Used as Unbound Base Course". Recycled Materials Source Center Final Report No: 68. University of Wisconsin-Madison, 2011.
- [9] Karayolları Genel Müdürlüğü. "Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ)". Ankara, Türkiye, 2013.
- [10] Gupta SC, Kang DH, Ranaivosoon A. "Hydraulic and mechanical properties of recycled materials". Minnesota Department of Transportation Research Services Section Final Report No: 2009-32, St. Paul, 2009.
- [11] Mulheron M, O'Mahony MM. "Properties and performance of recycled aggregates". *Highways and Transportation*, 37(2), 35-37, 1990.
- [12] Guthrie WS, Cooley D, Eggett DL. "Effects of reclaimed asphalt pavement on mechanical properties of base materials". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2005(1), 44-52, 2007.
- [13] Wen H, Warner J, Edil T, Wang G. "Laboratory comparison of crushed aggregate and recycled pavement material with and without high carbon fly ash". *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), 405-411, 2010.
- [14] Taha R, Ali G, Basma A, Al-Turk O. "Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1652(1), 264-269, 1999.
- [15] Bennert T, Maher A. "The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material". Federal Highway Administration Final Report No: FHWA-NJ-2005-003, Washington, DC, 2005.
- [16] Wu MQ. "Evaluation of High Percentage Recycled Asphalt Pavement as Base Course Materials". MSc Thesis, Washington State University, Washington, DC, USA, 2011.
- [17] Senior SA, Szoke SI, Rogers CA. "Ontario's experience with reclaimed materials for use in aggregates". *International Road Federation/Transportation Association of Canada Conference Proceedings*. Calgary, Alberta, 6, 31-55, 1994.
- [18] Garg N, Thompson MR. "Lincoln Avenue reclaimed asphalt pavement base project". *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1547, 89-95, 1996.
- [19] Taha R. "Evaluation of cement kiln dust-stabilized reclaimed asphalt pavement aggregate systems in road bases". *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1819, 11-17, 2003.
- [20] Ayan V. "Assessment of Recycled Aggregates for Use in Unbound Subbase of Highway Pavement". PhD Thesis, Kingston University, Civil Engineering Department, London, England, 2011.
- [21] Cosentino PJ, Kalajian EH, Bleakley AM, Diouf BS, Misilo TJ, Petersen AJ, Sajjadi AM. "Improving the Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications". Florida Department of Transportation Final Report No: FL/DOT/BDK81 97702, 2012.
- [22] Ooi PSK. "Application of Recycled Materials in Highway Projects". Hawaii Department of Transportation Highways Division University of Hawaii Final Report No: HWY-L-2005-04, Manoa, 2010.
- [23] Florida Department of Transportation (FDOT). "Standard Specifications for Road and Bridge Construction". Florida, USA, 2013.

- [24] Sullivan J. "Pavement Recycling Executive Summary and Report". Federal Highway Administration Final Report No: FHWA-SA-95-060, Washington, DC, 1996.
- [25] Rathje EM, Rauch AF, Folliard KJ, Trejo D, Little D, Viyanant C, Ogalla M, Esfeller M. "Recycled Asphalt Pavement and Crushed Concrete Backfill: Results From Initial Durability and Geotechnical Tests". Federal Highway Administration Final Report No: FHWA/TX-02/4177-2, Washington, DC. 2012.
- [26] Mokwa RL, Peebles, CS. "Evaluation of the engineering characteristics of RAP/Aggregate blends". Federal Highway Administration Final Report No: FHWA/MT-05-008/8117-24, Washington, DC, 2005.
- [27] Hoppe EJ, Lane DS, Fitch GM, Shetty S. "Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) use as Road Base and Subbase Material". Virginia Center for Transportation Innovation and Research Final Report No: VCTIR 15-R6, 2015.
- [28] Chesner W, Collins R, MacKay M, Emery J. "User guidelines for waste and Byproduct Materials in Pavement Construction". Federal Highway Administration Final Report No: FHWA-RD-97-148, McLean, Virginia, 1998.