

Endüstriyel atıkların karayolu üstyapısında değerlendirilmesi

Fatma Nur ÜSTÜNKOL¹, Ayşe TURABI^{2,*}

¹Balıkesir Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü, Balıkesir.

²Balıkesir Üniversitesi, Müh.- Mim. Fak., İnşaat Müh. Böl.,Balıkesir.

Özet

Günümüzde, çeşitli ürünlerin üretimi sırasında elde edilen atıkların değerlendirilmesi üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmada mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve cam tozu gibi endüstriyel atıkların asfalt beton kaplama karışımlarında % 7 - % 0 arasında değişen değerlerde filler malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Optimum bağlayıcı oranının belirlenmesi için % 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 oranlarında asfalt çimentosu kullanılarak Marshall stabilite numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere Marshall stabilite deneyi uygulanarak optimum bitüm yüzdesi belirlenmiştir. % 4.9 olarak bulunan optimum bitüm yüzdesi için % taş tozu - % endüstriyel atık filler değişen oranlarda kullanılarak hazırlanan numunelere Marshall stabilite deneyi uygulanmıştır. Endüstriyel atık filler kullanılan bitümlü karışımlarda Marshall stabilite ve akma değerlerinin değişimi araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Filler, mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı, cam tozu, marshall stabilite deneyi

Evaluation of industrial wastes in flexible pavements

Abstract

In recent years, it has been studied on the utilization of wastes that are obtained in production of some materials. In this study, the utilization of the industrial waste materials such as marble dust, fly ash, phoshogypsum and glass dust with different ratio of 7 % - 0 %, were investigated as filler material. Marshall stability samples were prepared to determine the ratio of optimum bitumen, for using the asphalt cement with ratio of 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 and 6.5 %. Marshall stability test is applied on prepared materials to determine the optimum percentage of bitumen. Marshall stability test was applied on prepared samples which are used with different ratio of stone dust % - industrial waste % filler. Marshall stability and flow values of changing were investigated in bitumen mixture which were used industrial waste.

Key Words : Filler, marble dust, fly ash, phoshogypsum, glass dust, marshall stability test

* Ayşe TURABI, aturabi@balikesir.edu.tr, Tel (266) 612 11 94

1. Giriş

Atık olarak elde edilen çeşitli ürünlerin depolanması veya doğaya terk edilmesi çok büyük güçlükler yaratmakta, çevre kirliliği dahil topluma çok büyük sorunlar getirmektedir. Günümüzde, çeşitli ürünlerin üretimi sırasında elde edilen yan ürün veya atıkların değerlendirilmesi üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır. Yüksek performanslı karışımların elde edilmesinde farklı uygulamalar görülmektedir. Çeşitli katkıların kullanımı, üst performans değerinde malzeme seçimi, yüksek kalite kontrolü, farklı tasarım yöntemleri, güncel test teknikleri bu uygulamalar arasında yer almaktadır. Yollarda kullanılan yüksek performanslı bitümlü sıcak karışım üretiminde uygulanan yöntemlerden birisi endüstriyel atık maddelerin bir katkı olarak kullanımudur. Atık malzemelerinin değerlendirilmesi ile hem atıkların oluşturacağı çevre kirliliği önlenmekte, hem de bu atıklar kullanılarak yolların bazı özellikleri iyileştirilmektedir. Ayrıca, atıkların değerlendirilmesiyle ülke ekonomisine de katkıda bulunmaktadır.

B. Şengöz ve A. Topal (2002), shingle atığının esnek yol üst kaplamalarında filler malzemesi olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Sabit bitüm içeriği ile hazırlanan karışımlara belirli oranlarda (% 1, % 2, % 3, % 4 ve % 5) shingle ekleyerek Marshall stabilite deneyi uygulamışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda, shingle atıklarının sıcak karışımlarda katkı olarak kullanılabilmesi ve karışımın stabilite değerlerini artırdıkları belirlenmiştir [1].

Tuncan ve arkadaşları (1998), endüstriyel atıkların ve otomobil lastik atıklarının sıcak karışım asfalt kaplaması üzerindeki fiziksel ve mekanik etkilerini araştırmıştır. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci bölümde, otomobil lastik atıkları ve polietilen esaslı plastik atıklar, bitüm miktarının % 5, % 10 ve % 20 'si oranında ilave edilerek kullanılmış, ikinci bölümde ise, endüstriyel atıklar olan uçucu kül, petrolü sondaj atığı, lastik tozları, mermer tozu, çimento ve kireç filler olarak kullanılmıştır. Hazırlanmış olan karışımlar üzerinde Marshall stabilite, indirek çekme dayanımı, serbest basınç dayanımı ve su hasarı deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, kullanılan atık malzemelerin asfalt betonunda katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır [2].

Nan Su ve J. S. Chen (2002), cam atığını belirli oranlarda (% 0, % 5, % 10 ve % 15) kullanarak Marshall stabilite deneyleri uygulayarak, ASTM ve AASHTO standartlarına uygun olarak kuru/ yaş nem hasarı, kayma direnci, ışığı yansıtma, su geçirgenliği ve sıkıştırma sonuçlarına bakılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda, cam atığının asfalt betonunda katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır [3].

A. Yılmaz (2002), cüruf ve baca tozlarının esnek yol kaplamalarında taş tozu gibi doğal filler malzemeler yerine alternatif kullanım imkanının olup olmadığını araştırmıştır. Marshall stabilite tasarımı yöntemine göre hazırlanan numuneler üzerinde stabilite ve akma deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda da cüruf ve baca tozlarının yol üst yapısında yapay agrega olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır [4].

Deniz ve arkadaşları (2005), kullanılan otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Lastik parçalarını farklı oranlarda (% 1, % 2, % 5 ve % 7) bitümlü sıcak karışıma katarak, farklı sıcaklıklarda dolaylı çekme, statik sünme, tekrarlı sünme ve Marshall stabilite deneylerine tabi tutmuşlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda otomobil lastiklerinin belirli oranlarda

bitümlü karışımlara katılması halinde, soğuk iklimlerin hakim olduğu bölgelerde kalıcı deformasyonlara karşı olumlu etki yapacağı görülmüştür [5].

Turabi ve arkadaşları (2002), fosforik asit gübre fabrikası atığı fosfoalçının, yol ve stabilizasyonunda kullanımını araştırmışlardır. İki farklı zemin örneğinde, % 0, 5, 10, 15 fosfoalçı katkı oranlarında, proctor değerlerinin ve plastisite indislerinin değişimini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, fosfoalçı katkısıyla zemin örneklerinin kuru birim ağırlıklarında artış, optimum su içeriklerinde ve plastisite indislerinde azalma görülmüştür [6].

Puzinauskas (1983), filler-asfalt karışımının özellikleri, yol karışımlarının davranışı ve özellikleri üzerine mineral fillerlerin etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla dört farklı mineral filler (kireçtaşı tozu, kaolin kili, fuller toprağı ve kısa-lif asbest) kullanmıştır. Bitüm malzemesini sabit tutmuş, üç ayrı agrega (kum, volkanik kaya ve kireçtaşı), kullanmıştır. Dört farklı mineral fillerin etkilerinin değerinin ölçülmesi için yaygın olarak kullanılan Marshall karışım tasarımı, asfalt yol karışımının fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır [7].

Ali ve arkadaşları (1996), kül ilave edilen asfalt karışımların mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada, % 5 'lik bağlayıcı yüzdesinde 4 farklı kül içeriğine sahip karışımlar değerlendirilmiştir. Bu karışımlar üzerinde yapılan elastisite modülü, sünme, kalıcı deformasyon ve yorulma gibi mekanik özellikler 0, 20 ve 40 °C 'de olmak üzere üç sıcaklıkta belirlenmiştir. Soyulma potansiyelinin belirlenmesi için yorulma etkileri test edilmiştir. Yapılan bu çalışma filler olarak kullanılan külün mukavemet ve soyulma direncini iyileştirdiğini göstermiştir [8].

Güngör (1996), Afşin Elbistan uçucu külünün esnek yol üst kaplamalarında filler malzemesi olarak kullanılmasını araştırmıştır. Taş tozu, portland çimentosu ve uçucu kül fillerli karışımlara Marshall deneyi yapılmış, optimum bitüm yüzdesi, bağlayıcı ile dolu boşluk yüzdesi, boşluk yüzdesi, akma ve stabilite değerleri elde edilmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda uçucu külün esnek üst yapılarda filler malzemesi olarak kullanılabilceği kanısına varılmıştır [9].

Acar ve Tapkın (1998), esnek kaplamalarda aşınma tabakası olarak kullanılan standard karışım özelliklerini taşıyan laboratuvar Marshall numuneleri ile, karışımdaki filler yerine çeşitli oranlarda Portland çimentosu kullanılarak hazırlanmış numuneleri stabilite ve akma özellikleri açısından değerlendirmişlerdir. Bir grup numune üzerinde UMATTA test cihazı kullanılarak indirekt yorulma testi yapılarak, test sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, deneyde kullanılan Portland çimentolu karışım hem stabilite açısından hem de yorulma ömrü yönünden olumlu sonuçlar vermiştir [10].

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip endüstriyel atıkların (mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve cam tozu) asfalt betonu aşınma tabakasındaki fiziksel ve mekanik etkileri araştırılmıştır. Değişen bitüm oranları kullanılarak hazırlanan numunelere Marshall metodu uygulanmıştır. Deneyler sonucunda optimum bitüm muhtevası % 4.9 olarak belirlenmiştir. Sabit bitüm miktarı ve farklı taş tozu ve endüstriyel atık filler (mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve cam tozu) oranları ile hazırlanan bitümlü karışımlara Marshall stabilite deneyi yapılmış, boşluk, stabilite ve akma değerlerinin değişimi incelenmiştir.

2. Malzeme özellikleri

2.1 Filler malzemenin önemi

Mineral filler, ASTM D 242 'ye göre, tamamı 0.600 mm (No. 30) elekten geçip, ağırlıkça en az %70 'i, 0.075 mm (No. 200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır. Filler, toplam agreganın çok küçük bir yüzdesini oluşturmasına karşın, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde önemli rol oynar. Filler genellikle bitümlü karışım içerisinde %3 ile %9 oranları arasında kullanılır. Belirli bir orana kadar filler boşlukları doldurduğu için, ince agregada gradasyonunu değiştirir ve böylece agregada tanecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlayarak daha yoğun karışımların elde edilmesinde rol oynar. Bu durum özellikle yuvarlanma tabakasında önemlidir. Çünkü, kompasite artışı çok iyi bir geçirimsizlik sağlar. Bunun yanı sıra, bitüm ile birlikte ince agregaya karşı kayganlaştırma ve bağlayıcı etkisi göstererek harç elde etmeyi sağlar. Bahsedilen bu ikili fonksiyon, mineral fillere özgüdür ve onu diğer agregalardan ayırır [11].

2.2 Mineral agregada

Bu çalışmada, Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü' nün Balıkesir-Susurluk-Karacabey yolu yapımında kullanılmak üzere Söve taşocağı agregaları kullanılmıştır. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yollar Fenni Şartnamesi (YFŞ) 'nin asfalt betonu aşınma tabakası için belirlediği Tip-2 gradasyonu seçilmiştir [12]. Çalışmada kullanılan gradasyon değerleri Tablo 1, filler ve bitüme ait bazı fiziksel özellikler ise Tablo 2 'de verilmiştir [13].

Tablo 1. Agregada gradasyon değerleri [12].

Elek Boyu	YFŞ Aşınma Tabakası Tip-2 Limitleri (% geçen)	Çalışmada kullanılan gradasyon (% geçen)
19mm (3/4")	100	100
12.5mm (1/2")	77-100	89
9.5mm (3/8")	66-84	75
4.75mm(No.4)	46-66	56
2.00mm(No.10)	30-50	40
0.425mm(No.40)	12-28	20
0.180mm(No.80)	7-18	13
0.075mm(No.200)	4-10	7

Tablo 2. Agregada, filler malzeme ve bitümün fiziksel özellikleri [13].

Özellik	Değer
Kaba agregada hacim özgül ağırlığı	2.681 gr/cm ³
Kaba agregada zahiri özgül ağırlığı	2.706 gr/cm ³
İnce agregada hacim özgül ağırlığı	2.682 gr/cm ³
İnce agregada zahiri özgül ağırlığı	2.711 gr/cm ³
Agregada karışım efektif özgül ağırlığı	2.696 gr/cm ³
Agregada karışım hacim özgül ağırlığı	2.683 gr/cm ³
Filler zahiri özgül ağırlığı	2.707 gr/cm ³
Bitüm özgül ağırlığı, (G _b)- penetrasyon	1.0375 gr/cm ³ -67

2.3 Asfalt çimentosu (bağlayıcı, bitüm)

Bu çalışmada, bağlayıcı olarak Balıkesir Belediyesi, Asfalt Şantiyesi 'nden temin edilen 50/70 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılmıştır. Bu malzemenin belirlenen bazı özellikleri Tablo 3 'de verilmiştir [14].

Tablo 3. 50/70 penetrasyon asfalt çimentosunun bazı fiziksel özellikleri [14].

Özellik	İlgili Standart	Birimi	Sonuç
Penetrasyon, 25 °C, 100 gr, 5 sn	EN 1426/ ASTM D 5	1/10 mm	67
Yumuşama Noktası	EN 1427/ ASTM D 36	°C	46-54
Sertleşme Direnci	EN 12607-1, 12607-2		
Kütle Değişimi (Sıcaklık Kaybı)	ASTM D 6	%	Max. 0,5
Kalan Penetrasyon (Isınmadan önceki Penetrasyonu Paylaşırken RTFOT dan Sonra Penetrasyonda Kalan Tortu)	EN 1426/ ASTM D 5	%	Min. 50
Sertleşme Sonrası Yumuşama	EN 1427/ ASTM D 36	°C	Min. 48
Parlama Noktası	EN 22592 (ISO 2592)	°C	Min. 230
Çözünürlük	EN 12592	%wt	Min. 99
Yumuşama Noktasındaki Artış	EN 1427/ ASTM D 36	°C	Max. 9

(a) RTFOT (Silindirli İnce Film Halinde Isıtma) metodundaki testler referans alınacaktır.

2.4 Çalışmada filler malzemesi olarak kullanılan endüstriyel atıklar

Mermer tozu: Çalışmada, Balıkesir yöresinde faaliyet gösteren Şayakçı Mermer Fabrikasından alınan mermer toz atıkları mineral filler olarak kullanılmıştır. Kullanılan mermerlere ait fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri ise Tablo 4 'de, kimyasal analizleri ise Tablo 5 'de verilmiştir [15].

Tablo 4. Mermerlerin fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri [15].

Fiziksel, Mekanik ve Teknolojik Özellikler	Birimi	Değer
Sertlik	Mohs	3-4
Birim Hacim Ağırlığı- Özgül Ağırlığı	gr/cm ³	2.68- 2.74
Atmosfer Basıncında Su Emme	%	Ağırlıkça: 0.18
	%	Hacimce: 0.49
Kaynar Suda Emme	%	Ağırlıkça: 0.17
	%	Hacimce: 0.44
Porozite	%	0.49
Basınç Direnci	kg/cm ²	1238
Don Sonrası Basınç Direnci	kg/cm ²	970
Darbe Direnci	kg/cm ²	4
Eğilme Direnci	kg/cm ²	338
Elastisite Modülü	kg/cm ³	293x10 ⁴
Doluluk Oranı	%	99
Gözeneklilik Derecesi	%	0.70
Ortalama Aşınma Derecesi	cm ³ /50 cm ²	7.72
Ortalama Çekme Derecesi	kg/cm ³	42

Tablo 5. Mermerlerin kimyasal analizleri [15].

Kimyasal Analizler	Değer %
SiO ₂	1.26
Fe ₂ O ₃	88.16
CaO	6.23
MgO	4.35

Uçucu kül: Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz halindeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve çok ince taneli olmaları nedeniyle uçucu nitelikli olduklarından bu küllere ‘uçucu kül’ adı verilmektedir [16].

Uçucu küllerin sınıflandırmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır[17]

TS EN 197-1’e göre sınıflandırmada uçucu küller silisi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar:

1. V sınıfı uçucu küller; çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO₂) ve alüminyum oksitden (Al₂O₃) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10’dan az, reaktif silis miktarının %25’den fazla olması gerekmektedir.
2. W sınıfı uçucu küller; hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO₂ ve Al₂O₃’den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10’ dan fazla, reaktif silis miktarının da %25’ den fazla olması gerekmektedir.

Çalışmada kullanılan Ash Plus elektro filtre çıkışı C sınıfı uçucu kül Soma B Termik Santral 'inden temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 2.24 gr/cm³ 'dür. Soma uçucu külü, reaktif kireç miktarının %10’un üzerinde olması (%17.71) nedeniyle TS EN 197-1’ e göre W sınıfı (kalkersi uçucu kül) kapsamına girmektedir[17]. Kullanılan uçucu küllere ait kimyasal özellikler Tablo 6 'da verilmiştir [18].

Tablo 6. Uçucu külün kimyasal özellikleri [18].

Bileşen	Değer %
SiO ₂	43.19
Al ₂ O ₃	20.22
Fe ₂ O ₃	4.81
CaO	22.31
MgO	1.67
SO ₃	3.91
K ₂ O	1.19
Na ₂ O	0.61
Kızdırma	0.90

Fosfoalçı: Yaş yöntemle fosforik asit üretimi, fosfat kayasının sülfürik asitle reaksiyona sokulması esasına dayanır. Reaksiyonda oluşan fosforik asit ve yan ürün fosfoalçı süzülerek birbirinden ayrılır. Ele geçen bu yan ürün fosfoalçı olarak bilinir. Yaş yöntemle fosforik asit üretiminde oluşan fosfoalçının kimyasal formuna göre dihidrat, hemihidrat-dihidrat, hemihidrat ve anhidrit yöntemi olmak üzere dört ayrı üretim yöntemi vardır [19].

Çalışmada kullanılan fosfoalçı Bandırma Bagfaş Gübre Fabrikasından temin edilmiştir. Bandırma Bagfaş Gübre Fabrikası hemihidrat-dihidrat metoduna göre üretim yapmaktadır. Bu üretim tarzında daha az safsızlıklar bulunmakta ve fosforik asit üretimi daha fazla olmaktadır [6]. Çalışmalarda kullanılan fosfoalçie ait kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 7 'de verilmiştir

Tablo 7. Fosfoalçının kimyasal ve fiziksel özellikleri [6].

Kimyasal Özellikleri		Fiziksel Özellikleri	
Eleman	%		%
CaOSO ₄	85.51	40 nolu elekte kalan	9.00
P ₂ O ₅ (Toplam)	0.50	60 nolu elekte kalan	16.00
P ₂ O ₅ (Çözünen)	0.11	200 nolu elekte kalan	49.04
F (Toplam)	1.30	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.39

Cam tozu: Cam, silikat ve diğer daha küçük oksitleri içine alan seçilmiş ham materyalleri katılaştırmakla yapılan, ametal inorganik bir materyaldir. Cam, parlak olmasının yanında küçük bir etkiyle kolayca kırılabilir. Bu fiziki özellik, filler malzeme haline getirmek amacıyla camın öğütülmesinde kullanılmaktadır.

Deneylerde kullanmış olduğumuz cam Balıkesir Özcam San. Ve Tic. A.Ş. 'den temin edilmiştir. Cama ait bazı standart parametreler Tablo 8 'de, kimyasal kompozit parametre değerleri de Tablo 9 'da verilmiştir. Sonuçlar Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., Cam Araştırma Merkezi raporlarından alınmıştır [20].

Tablo 8. Cama ait bazı standart parametreler [11].

Özellik	İlgili Standart	Değer
Doğrusal Isıl Genleşme	ASTM E 228-71	$90 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}$
Yoğunluk	ASTM C 693-84	2.499 g/cm^3
Yumuşama Sıcaklığı, T _s	ASTM C 338-73	715 °C
Tavlama Sıcaklığı, T _a	ASTM C 336-71	536 °C
Gerilme Sıcaklığı, T _s ^t	ASTM C 336-71	500 °C
Kırılma İndisi, n _o		1.5188
Kırılma Modülü, S	ASTM C 158-84	100 MPa
Esneklik Modülü, E		71 GPa

Tablo 9. Camın kimyasal kompozisyon aralık değerleri [20].

Bileşen	Ağırlık (%)
SiO ₂	71.4 - 72.2
Al ₂ O ₃	1.0 – 1.4
Fe ₂ O ₃	0.08 – 0.12
TiO ₂	0.05 – 0.13
CaO	8.0 – 8.5
MgO	4.0 – 4.3
Na ₂ O	13.6 – 14.1
K ₂ O	0.05 – 0.5
SO ₃	0.1 – 0.3

3. Deneysel çalışmalar

Çalışmada öncelikle optimum bitüm yüzdesinin tespit edilmesi için Marshall tasarım yöntemine göre 1200 gr 'lık numuneler hazırlanmış, agrega gradasyonu sabit tutularak % 3.5 - 4.0 - 4.5 - 5.0 - 5.5 - 6.0 ve 6.5 oranlarında bitüm oranı kullanılarak her bir bitüm yüzdesi için 3 'er adet Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelere Marshall stabilite deneyi ASTM D 1559-89 'da belirtilen standartlar uygulanarak optimum bitüm % 4.9 olarak elde edilmiştir. Deney sonuçları Tablo 10 'da verilmiştir.

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip endüstriyel atıkların (mermer tozu, uçucu kül, fosfojips ve cam tozu) asfalt betonu aşınma tabakasındaki fiziksel ve mekanik etkileri araştırılmıştır. Sabit bitüm miktarı ve farklı taş tozu ve endüstriyel atık filler (mermer tozu, uçucu kül, fosfojips ve cam tozu) oranları ile hazırlanan bitümlü karışımlara Marshall stabilite deneyi yapılmış, boşluk, stabilite ve akma değerlerinin değişimi incelenmiştir.

Çalışmalarda kullanılan mermer tozu, uçucu kül ve fosfoalçı sadece eleme işlemine tabi tutularak No 200 elekten geçen malzeme filler olarak kullanılmıştır. Cam atıkları kırılmış ve ince olan kısmı No 200 elekten elenerek filler olarak kullanılmıştır. Mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve cam tozu atıkların taş tozu filler yerine kullanılabilmesi için taş tozu – endüstriyel atık yüzdeleri kullanılmıştır. Bitüm yüzdesi sabit tutularak farklı taş tozu – endüstriyel atık filler oranlarında hazırlanmış karışımlara stabilite ve akma deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları Tablo 11 'de verilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, genel olarak farklı taş tozu ve endüstriyel atık filler yüzdeleri ile hazırlanan bitümlü karışımlardan Marshall stabilite değerleri şartname limitlerine yakın değerler almıştır. Sonuçların değerlendirilmeleri boşluk, stabilite ve akma değerleri ile yapılmıştır.

Deney sonuçlarında, % 7 taş tozu yerine kullanılan endüstriyel atık fillerlerden şartnameye en uygun en yakın değerler % 4 taş tozu - % 3 endüstriyel atık filler ve % 3 taş tozu - % 4 endüstriyel atık filler yüzdelerinde karşımıza çıkmaktadır.

% 0 taş tozu - % 7 endüstriyel atık filler kullanılarak yapılan Marshall stabilite deney sonuçları Şekil 1, 2, 3 'de verilmiştir.

Tablo 10. Marshall stabilite deney sonuçları.

BRIKET NO	BITÜM YUZDESİ	HAVADAKİ İSUDAKI AĞIRLIK			DOYGUN YÜZEY KURU AĞIRLIK	HACİM	PRATİK ÖZGÜL AĞIRLIK	Max teorik ÖZGÜL AĞIRLIK	BOŞLUK %	VMA %	ASFALT DOLU BOŞLUK %	BRIKET YÜKSEKLİĞİ			STABİLİTE FAKTÖRÜ	DÜZELTİLMİŞ STABİLİTE	AKMA		
		A	C	B								1	2	3				ORT	
1	3.5	1238.0	717.0	1246.0	529.0	2.340	2.367	2.341	8.5	15.7	45.9	64.2	64.8	64.3	64.4	2537	0.978	2481	0.92
2	3.5	1236.0	715.0	1243.0	528.0	2.339	2.362	2.341				64.0	64.3	64.0	64.1	2494	0.985	2457	1.46
3	3.5	1230.5	711.0	1237.0	526.0	2.340	2.362	2.341				64.0	63.8	64.3	64.0	2551	0.988	2520	1.04
4	4.0	1239.0	719.0	1242.5	523.5	2.364	2.362	2.341	6.9	15.3	54.6	63.3	63.5	63.4	63.4	2284	1.003	2291	1.37
5	4.0	1240.0	718.0	1243.0	525.0	2.368	2.362	2.341				64.0	64.0	64.0	64.0	1901	0.988	1878	1.03
6	4.0	1240.0	719.0	1244.0	525.0	2.364	2.362	2.341	5.7	15.2	62.2	63.8	63.8	63.8	63.8	2210	0.993	2195	1.80
7	4.5	1256.0	733.5	1257.0	523.5	2.389	2.385	2.341	4.7	15.2	69.4	63.4	63.3	63.5	63.4	1287	1.003	1291	2.68
8	4.5	1246.5	723.0	1249.5	526.5	2.368	2.385	2.341				64.0	64.0	64.0	64.0	1545	0.988	1526	1.67
9	4.5	1245.0	722.0	1247.5	525.5	2.368	2.385	2.341				63.3	63.5	63.5	63.4	1581	1.003	1566	1.85
10	5.0	1257.0	731.5	1258.5	527.0	2.379	2.385	2.341	4.1	15.7	74.0	63.5	63.3	63.4	63.4	1370	1.003	1374	2.46
11	5.0	1264.5	736.5	1265.5	529.0	2.390	2.385	2.341				63.9	63.5	63.8	63.7	1173	0.995	1167	3.17
12	5.0	1250.0	728.0	1251.0	523.0	2.389	2.385	2.341				63.0	63.5	64.0	63.5	1447	1.000	1447	2.64
13	5.5	1256.0	731.0	1257.0	526.0	2.388	2.385	2.341				63.9	63.6	63.7	63.7	1090	0.995	1085	3.06
14	5.5	1254.5	730.5	1255.5	525.0	2.390	2.385	2.341				63.4	63.4	63.5	63.4	1145	1.003	1148	1.74
15	5.5	1252.0	728.5	1253.5	525.0	2.385	2.385	2.341				63.1	63.3	63.9	63.4	1053	1.003	1056	2.09
16	6.0	1257.0	727.0	1259.5	532.5	2.361	2.385	2.341	4.4	16.9	74.0	63.8	63.8	63.8	946	0.993	939	4.06	
17	6.0	1263.0	731.5	1265.5	534.0	2.365	2.385	2.341				63.9	64.2	64.4	64.2	925	0.983	909	3.73
18	6.0	1259.5	729.5	1262.0	532.5	2.365	2.385	2.341				63.7	64.3	64.0	64.0	904	0.988	893	3.61
19	6.5	1261.5	729.0	1262.5	533.5	2.364	2.385	2.341	4.2	17.6	76.3	64.7	64.5	64.4	64.5	791.0	0.975	771	4.93
20	6.5	1261.0	726.5	1262.5	536.0	2.365	2.385	2.341				64.8	64.6	64.0	64.5	812.0	0.975	792	4.63
21	6.5	1265.0	727.0	1266.5	539.5	2.345	2.385	2.341				64.9	65.0	64.5	64.8	779.0	0.968	754	2.21
						2.354	2.456	2.456										772	3.92

Bitüm Öz. Ağ. (Gb) : 1.0375
 Bitüm Penetrasyonu : 67
 Agregga Bitüm. Abs. (Pb) : 0.19
 Agr. Kar. Ef. Öz. Ağ. (Gef) : -
 Agr. Kar. Ef. Öz. Ağ. (Gef)h : 2.696
 Dizayn Ef. Öz. Ağ. : 2.696

Dt= (100+Wa)/(100/Gef+Wa/Gb)

Vh= (Dt-Dp)/Dt, 100

VMA= 100-(Dp/Gsb).(100/(100+Wa)).100

Vf= ((VMA-Vh)/VMA).100

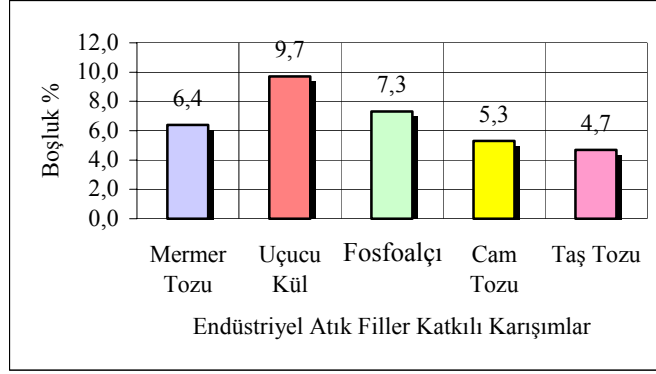
Kaba Agregga % si (%K) : 44
 İnce Agregga % si (%I) : 49
 Filler % si : 7
 Karş. Hac. Öz. Ağ. (Gsb) : 2.683
 Karş. Zah. Öz. Ağ. (Gsa) : 2.708

Kaba Agr. Hac. Öz. Ağ. (Gkh) : 2.681
 İnce Agr. Hac. Öz. Ağ. (Gkz) : 2.706
 İnce Agr. Hac. Öz. Ağ. (Gih) : 2.682
 Filler Zah. Öz. Ağ. (Giz) : 2.711
 Filler Zah. Öz. Ağ. (Gip) : 2.707
 Biriketteki Agregga Mik. (gr) : 1200

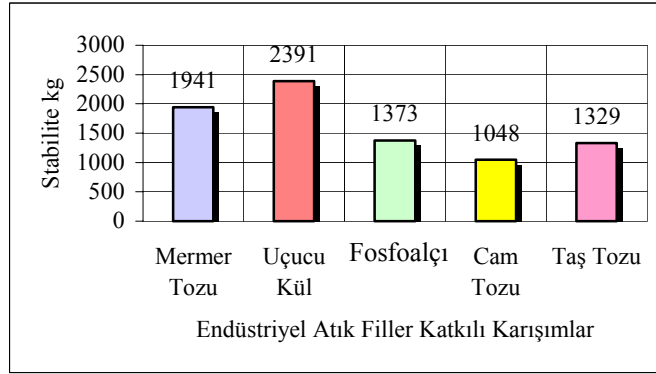
Karışım Gradasyonu %
 100 : 2.681
 75 : 2.706
 56 : 2.682
 40 : 2.711
 20 : 2.707
 13 : 1200
 7 : No. 200

Tablo 11. Değişen filler yüzdelere göre endüstriyel atık maddelerin Marshall stabilite sonuç değerleri.

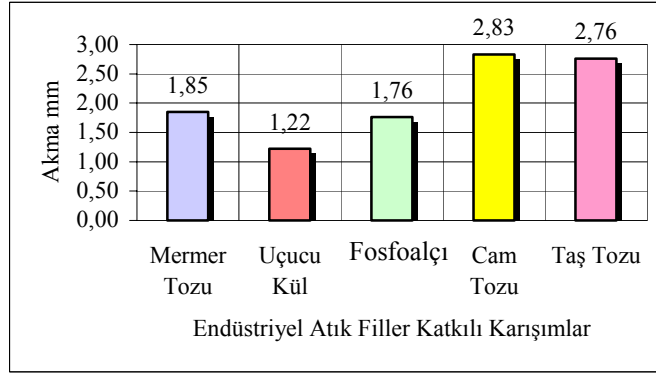
Endüstriyel Atıklar		Filler Yüzdesi (% taş tozu - % endüstriyel atık)					
		%7-%0	%5-%2	%4-%3	%3-%4	%2-%5	%0-%7
Mermer Tozu	Pr.Öz.Ağ.gr/cm ³	2.386	2.386	2.381	2.317	2.367	2.347
	Boşluk %	4.9	4.9	5.1	7.6	5.7	6.4
	VMA %	15.2	15.2	15.4	17.7	15.9	16.6
	Asf. Dol. Boş. %	67.8	67.9	66.9	56.7	64.4	61.2
	Stabilite kg	1351	1394	1483	1144	1320	1941
	Akma mm	2.46	2.44	2.00	1.74	2.13	1.85
Uçucu Kül	Pr.Öz.Ağ.gr/cm ³	2.376	2.346	2.342	2.305	2.314	2.265
	Boşluk %	5.3	6.5	6.7	8.1	7.8	9.7
	VMA %	15.6	16.6	16.8	18.1	17.8	19.5
	Asf. Dol. Boş. %	66.1	61.1	60.4	55.1	56.3	50.2
	Stabilite kg	1451	2081	2221	2344	2330	2391
	Akma mm	2.23	1.68	1.75	1.80	1.85	1.22
Fosfoalçı	Pr.Öz.Ağ.gr/cm ³	2.366	2.348	2.344	2.306	2.326	2.326
	Boşluk %	5.7	6.4	6.6	8.1	7.3	7.3
	VMA %	15.9	16.6	16.7	18.1	17.4	17.3
	Asf. Dol. Boş. %	64.3	61.4	60.7	55.2	58.0	58.1
	Stabilite kg	1259	1259	1282	1151	1313	1373
	Akma mm	2.83	2.68	2.55	2.29	2.16	1.76
Cam Tozu	Pr.Öz.Ağ.gr/cm ³	2.386	2.392	2.393	2.390	2.378	2.375
	Boşluk %	4.9	4.7	4.6	4.7	5.2	5.3
	VMA %	15.2	15.0	15.0	15.1	15.5	15.6
	Asf. Dol. Boş. %	67.9	69.0	69.2	68.6	66.4	65.9
	Stabilite kg	1464	1533	1383	1504	1204	1048
	Akma mm	2.47	2.52	2.37	2.66	2.51	2.83



Şekil 1. Endüstriyel atık filler katkıli karışımlarda boşluk değerleri.



Şekil 2. Endüstriyel atık filler katkıli karışımlarda Marshall stabilite değerleri.



Şekil 3. Endüstriyel atık filler katkıli karışımlarda akma değerleri.

4. Sonuçlar

Aynı tane dağılımı ve optimum bitüm muhtevsındaki, agregada içerisinde doğal filler ile doğal filler yerine endüstriyel atık maddeler kullanılarak hazırlanan numunelere Marshall stabilite deneyleri uygulanmıştır. Sonuçların değerlendirilmeleri boşluk, stabilite ve akma değerleri ile yapılmıştır.

Mermer tozu ve cam tozu filler katkısıyla hazırlanmış karışımların boşluk yüzde değerleri şartname limitleri olan % 3 - % 5 arasında, uçucu kül ve fosfoalçı boşluk değerleri ise şartname limitlerinin oldukça üzerinde kalmaktadır. Bunun nedeni

geçirimsizlik istenen özel durumlarda kullanılamayacağı sonucuna varılmıştır. Mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve cam tozu filler katkıli karışımların stabilite değerleri şartname alt sınır değeri olan 900 kg 'ın üzerinde değer almışlardır. Mermer tozu, fosfoalçı ve cam tozu filler katkıli karışımların akma değerleri şartname limitleri olan 2 mm – 4 mm arasında kalmaktadır. Uçucu kül filler akma değerleri şartname limitlerinin altında kalmaktadır. Bu değerler uçucu külün artan filler oranlarında gevrek bir malzeme gibi davrandığını göstermektedir.

Genel olarak atık filler oranı arttıkça cam tozu atığı dışında bütün endüstriyel atıklarda boşluk oranı ve stabilite değerleri artmakta, akma değerleri ise azalmaktadır.

Deneysel çalışmalarda Marshall stabilite deney sonuçları açısından en uygun endüstriyel atık filler oranının % 4 taş tozu - % 3 endüstriyel atık filler olduğu belirlenmiştir. % 0 taş tozu - % 7 endüstriyel atık filler oranında dahi şartname limitleri sağlanmaktadır.

Deney sonuçları endüstriyel atık filler malzemelerin bitümlü sıcak karışımlarda taş tozu filler yerine % 7 oranında kullanılabileceğini göstermektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve cam tozu endüstriyel atık fillerler kullanılarak üretilen kaplama tabakalarının iyi bir dayanıma sahip olacağı düşünülmektedir.

Endüstriyel işletmeler genellikle atıklardan herhangi bir maddi gelir beklememektedir. Gereksiz yere saha işgal eden bu atıklardan kurtulmak istemektedirler. Dolayısıyla, yol üstü yapı işlerinde, taşıma maliyeti de dikkate alınarak, filler olarak endüstriyel atıkların kullanılmasıyla, hem ekonomik kazanç sağlanabilecek, hem de çevre kirliliği yaratan bu malzemeler bu sayede değerlendirilebilecektir.

Kaynaklar

- [1].Şengöz, B., Topal, A., Bitümlü çatı örtüsü (shingle) atıklarının bitümlü sıcak karışımlarda değerlendirilmesi, **4. Mühendislik Mimarlık Sempozyumu**, Balıkesir, 169, (2002).
- [2].Tuncan, A., Çetin, A., Tuncan, M., Lastik atıkların asfalt betonu kaplamaların mekanik özelliklerine etkileri, **2. Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı**, Ankara, 139, (1998).
- [3].Su, Nan, Chen, J. S., Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass, Department of Construction Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, Taiwan, 259, (2002).
- [4].Yılmaz, A., Bir elektrometalurji tesisinin atıklarının yol üstyapısında kullanılabilirliğinin araştırılması, **4. Mühendislik Mimarlık Sempozyumu**, Balıkesir, 201, (2002).
- [5].Deniz, M.T., Sönmez, İ., Yıldırım, S. A., Eren, B. K., Kullanılmış otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışım performansına etkisi, **6. Ulaştırma Kongresi**, İstanbul, 349, (2005).
- [6].Turabi, A., Okucu, A., Değirmenci, N., Fosforik asit üretim atığı fosfojipsin stabilizasyon malzemesi olarak kullanım olanaklarının araştırılması, **4. Mühendislik Mimarlık Sempozyumu**, Balıkesir, 93, (2002).
- [7].Puzinauskas, V.P., Filler in asphalt mixtures, The Asphalt Institute, Research Report, Maryland, USA, (1983).
- [8].Ali, N., Chan, J.S., Simms, S., Bushman, R., Bergan, A.T., Mechanistic evaluation of fly ash asphalt concrete mixtures, **Journal of Materials in Civil Engineering**, ASCE, (1996).
- [9].Güngör, M.M., Afşin Elbistan uçucu külünün esnek yol kaplamalarında filler olarak kullanımı üzerine bir araştırma, M.Sc. Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (1996).
- [10].Acar, S.O., Tapkın, S., Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan Marshall numunelerinin özelliklerinin incelenmesi, **2. Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı**, Ankara, 95, (1998).
- [11].Önal, A. ve Kahramangil, M., **Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı**, K.G.M Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, (1993).
- [12].**Yollar Fenni Şartnamesi**, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı KGM, Yayın No: 170/2, Ankara, (2000).
- [13].Karayolları Genel Müdürlüğü 14. Bölge Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Raporu, (1996).
- [14].<http://www.tupras.com.tr>, (2005).
- [15].Şayakçı Mermer San. Tic. A.Ş., (2005).
- [16].Aruntaş, H., Y., Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Ankara, Cilt 21, No 1, 193-203, (2006).
- [17].Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ankara, (2003).
- [18].SEAS Genel Müdürlüğü, Soma B Termik Santrali, (2005).
- [19].İşıldak, Ö., Fosfoalçı içeren portland çimentosunun hidrasyonu üzerine bazı piriz hızlandırıcı kimyasal katkıların etkileri, M.Sc. Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, (1993).
- [20].Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A. Ş. Araştırma Merkezi Cam Teknoloji Grubu Raporu, (2005).