

Endüstriyel atık filler malzemelerin kullanılabilirliğinin araştırılması

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

¹Balıkesir Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü, Balıkesir.

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

Özet

Bitümlü sıcak karışımlarda, sudan kaynaklanan bozulmalar önemli bir sorun olarak kabul edilmekte ve suyun verdiği zararların en aza indirilmesi amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, suyun koheziona etkisini belirlemek amacıyla yapılan koşullandırılmış Marshall deneyinde % 0 taş tozu - % 7 endüstriyel atık filler kullanılarak stabilite ve akma değerleri açısından en elverişsiz durum incelenmeye çalışılmıştır. Deney sonuçlarına göre, kullanılan endüstriyel atık filler malzemelerin yüksek sıcaklıklarda ve değişen kür şartlarında, asfalt betonu kaplamalarda taş tozu filler yerine kullanılabileceği görülmektedir.

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

Investigation of usage of industrial waste filler materials

Abstract

Deteriorations in Hot Mix Asphalt (HMA) originated with water effects are assumed as an important issue and the different studies has been made to reduce the water deteriorations on HMA. In this study, the usage of stone dust 0 % - industrial waste 7 % filler which was prepared to determine the water cohesion effect in conditional Marshall test, the most unsuitable condition were investigated for stability and yield worths. According to the test results, it has been observed that the use of industrial waste filler materials could be used instead of stone dust filler in asphalt concrete mixtures with the high temperatures and different curing conditions.

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

* Ayşe TURABİ, aturabi@balilesir.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. Yollarda kullanılan yüksek performanslı bitümlü sıcak karışım üretiminde uygulanan yöntemlerden birisi endüstriyel atık maddelerin bir katkı olarak kullanımınıdır. 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 kullanılabileceği 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 gerçekleşmiştir. 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 kullanılabileceği 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 kullanılabileceği 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), kullanılmış 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 kullanılabilabileceği 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].

Bitümlü sıcak karışımlarda, sudan kaynaklanan bozulmalarda önemli bir sorun olarak kabul edilmekte, suyun verdiği zararların en aza indirilmesi amacıyla önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda, su etkisi ile meydana gelen temel hasar, soyulmadır. Soyulma: Genel olarak sudan dolayı, agrega yüzeyi ile asfalt arasındaki adezyon kuvvetinin kaybı olarak tanımlanmaktadır.

Çok iyi tasarlanmış bir yol bile, çevre ve trafik koşulları nedeniyle belirli bir süre sonra bozulmaya başlamaktadır. Bozulma: Üstyapının orijinal şartlarından (hizmete açıldığı esnadaki şartlar), belirli bir sapma olarak kabul edilmektedir. Türkiye koşullarında, tasarım yönteminin ve malzemenin yanlış seçimi, trafiğin hızlı ve kontrolsüz biçimde artması, iklimsel koşulların ağırlığı, yol yapımı sırasındaki projeye ve tekniğe uygunluk oluşturmayan alt yapı inşaatı, bakım ünitesinin daha az etkin çalışması ve öteki

ünitelerle koordinasyon eksiklikleri başlıca bozulma nedenleridir. Bir yolun hizmet ömrünü uzatmanın ya da ekonomik ömrü içerisinde ondan en iyi şekilde yararlanmanın tek yolu, gerekli düzeyde sürekli bakım yapmak, yol üst yapısının mukavemetini gerekirse onarım yöntemleri ile yükseltmektir [11].

Sudan kaynaklanan bozulmaların temel nedeni, suyun yüzey enerjisinin asfalttan çok düşük olmasıdır. Su, bazen soyulmaya neden olmadan, alt tabakaların dayanımını düşürmekte ve böylece tekerlek izi ve sökölme gibi bozulmalara neden olmaktadır [11].

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. Deneysel sonuçlarda optimum bitüm muhtevası % 4.9 olarak belirlenmiştir. Sabit bitüm miktarı ve % 0 taş tozu - % 7 endüstriyel atık filler kullanılarak hazırlanan bitümlü karışımlara suyun sıkıştırılmış bitümlü karışımların kohezyonuna etkisinin belirlenmesi amacıyla kür şartları uygulanarak koşullandırılmış Marshall deneyi yapılmış, 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 agrega tane dağılımını değiştirir ve böylece agrega 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 [12].

2.2 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 kimyasal analizleri Tablo 1 'de, fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri ise Tablo 2 'de verilmiştir [13].

Tablo 1. Mermerlerin kimyasal analizleri [13].

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

Tablo 2. Mermerlerin fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri [13].

Fiziksel, Mekanik ve Teknolojik Özellikler	Birimi	Değer
Sertlik	Mohs	3-4
Birim Hacim Ağırlığı	gr/cm ³	2.68
Özgül Ağırlığı	gr/cm ³	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

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 [14].

Uçucu küllerin sınıflandırmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır[15]

TS EN 197-1’e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (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[15]. Kullanılan uçucu küllere ait kimyasal özellikler Tablo 3’de verilmiştir [16].

Tablo 3. Uçucu külün kimyasal özellikleri [16].

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 [17].

Çalışmada kullanılan fosfoalçı Bandırma Bağfaş Gübre Fabrikasından temin edilmiştir. Bandırma Bağfaş 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 fosfoalçıya ait kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4 'de verilmiştir

Tablo 4. Fosfoalçının kimyasal ve fiziksel özellikleri [6].

Kimyasal Özellikleri		Fiziksel Özellikleri	
Eleman	%		%
CaO	32.04	10 nolu elekte kalan	0.00
SO ₄	53.47	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 [18].

Tablo 5. Cama ait bazı standart parametreler [18].

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, Ts	ASTM C 338-73	715 $^\circ\text{C}$
Tavlama Sıcaklığı, Ta	ASTM C 336-71	536 $^\circ\text{C}$
Gerilme Sıcaklığı, Ts ^t	ASTM C 336-71	500 $^\circ\text{C}$
Kırılma İndisi, n _o		1.5188
Kırılma Modülü, S	ASTM C 158-84	100 MPa
Esneklik Modülü, E		71 GPa

Tablo 6. Camın kimyasal kompozisyon aralık değerleri [18].

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

Bu çalışmada, Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü' nün Balıkesir-Susurluk-Karacabey yolu yapımında kullanılan 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. Çalışmada kullanılan gradasyon değerleri Tablo 7, 'de verilmiştir [19].

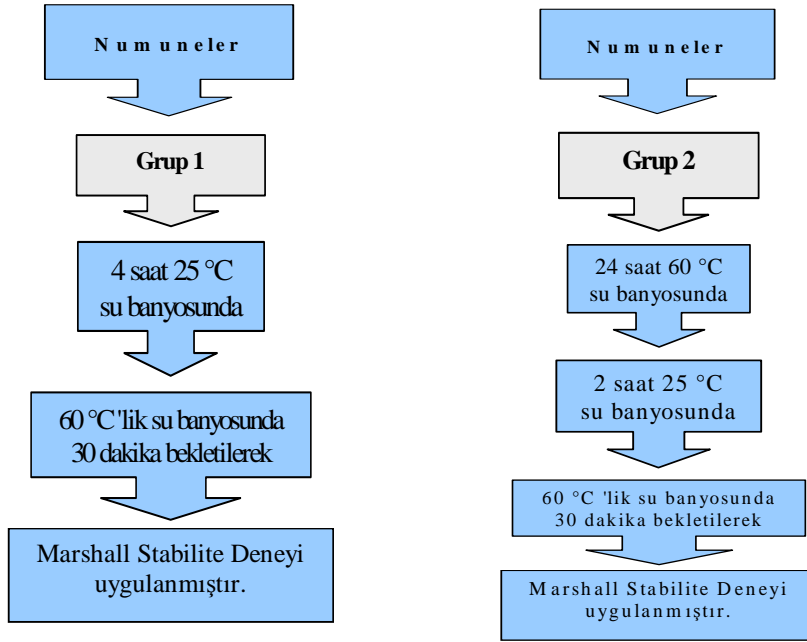
Tablo 7. Agrega Gradasyon Değerleri [19].

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

Bağlayıcı olarak Balıkesir Belediyesi, Asfalt Şantiyesi 'nden temin edilen 50/70 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan filler ve bitüme ait bazı fiziksel özellikler ilgili kaynaklardan alınmıştır[20, 21].

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. 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. 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 8 'de verilmiştir.

Sabit bitüm miktarı ve % 0 taş tozu - % 7 endüstriyel atık filler kullanılarak hazırlanan bitümlü karışımlara suyun sıkıştırılmış bitümlü karışımların kohezyonuna etkisinin belirlenmesi amacıyla kür şartları uygulanarak koşullandırılmış Marshall stabilite deneyi yapılmış, stabilite ve akma değerlerinin değişimi incelenmiştir. Kür şartları ve Marshall stabilite deney şeması Şekil 1 'de verilmiştir. % 0 taş tozu - % 7 endüstriyel atık filler kullanılarak hazırlanan bitümlü karışımlar iki gruba ayrılmıştır. Grup 1 numuneleri oda sıcaklığında su banyosunda 4 saat 25 ± 1 °C 'lik deney sıcaklığına getirilerek kür edilmiştir. Grup 2 numuneleri ise 24 saat 60 ± 1 °C 'lik su banyosunda bekledikten sonra 2 saat 25 ± 1 °C 'lik su banyosunda bekletilmiştir. Gruplandırılan numunelere suyun sıkıştırılmış bitümlü karışımların kohezyonuna etkisinin belirlenmesi amacıyla kür şartları uygulanmıştır.



Şekil 1. Kür şartları ve Marshall stabilite deney şeması

Tablo 8. Marshall stabilite deney sonuçları

BRİKET NO	BİTÜM YÜZDESİ	HAVADAKİ AĞIRLIK	SUDAKİ AĞIRLIK	DOYGUN KURU YÜZEY KURU AĞIRLIK	HACİM	PRATİK ÖZGÜL AĞIRLIK	Maks. TEORİK ÖZGÜL AĞIRLIK	BOŞLUK %	VMA %	ASFALT DOLU BOŞLUK %	BRİKET YÜKSEKLİĞİ			STABİLİTE	DÜZELTME FAKTÖRÜ	DÜZELTİLMİŞ STABİLİTE	AKMA	
											1	2	3					ORT
1	3	Wa	Wb	A	C	B	Dp	Vh	VMA	Vf	64.2	64.8	64.3	64.4	2537	0.978	2481	0.92
2	3	1238.0	717.0	1246.0	529.0	2.340					64.0	64.3	64.0	64.1	2494	0.985	2457	1.46
3	3.5	1236.0	715.0	1243.0	528.0	2.341					64.0	63.8	64.3	64.0	2551	0.988	2520	1.04
4	3	1230.5	711.0	1237.0	526.0	2.339	2.558	8.5	15.7	45.9	63.3	63.5	63.4	63.4	2284	1.003	2291	1.37
5	4	1239.0	719.0	1242.5	523.5	2.367	2.568				64.0	64.0	64.0	64.0	1901	0.988	1878	1.03
6	4.0	1240.0	719.0	1243.0	525.0	2.362	2.540	6.9	15.3	54.6	63.8	63.8	63.8	2210	0.993	2195	1.80	
7	4	1256.0	733.5	1257.0	523.5	2.364	2.540				63.4	63.3	63.5	63.4	1287	1.003	1291	1.40
8	4	1246.5	723.0	1249.5	526.5	2.368	2.522	5.7	15.2	62.2	64.0	64.0	64.0	1545	0.988	1526	1.67	
9	4.5	1245.0	722.0	1247.5	525.5	2.369	2.522				63.3	63.5	63.5	63.4	1581	1.003	1586	1.85
10	5	1257.0	731.5	1258.5	527.0	2.385	2.379				63.5	63.3	63.4	63.4	1370	1.003	1374	2.07
11	5	1264.5	736.5	1265.5	529.0	2.390	2.505	4.7	15.2	69.4	63.9	63.5	63.7	1173	0.995	1167	3.17	
12	5.0	1250.0	728.0	1251.0	523.0	2.389	2.505				63.0	63.5	64.0	63.5	1447	1.000	1447	2.64
13	5	1256.0	731.0	1257.0	526.0	2.388	2.489				63.9	63.6	63.7	63.7	1090	0.995	1085	3.06
14	5	1254.5	730.5	1255.5	525.0	2.390	2.489				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	2.489	4.1	15.7	74.0	63.1	63.3	63.9	63.4	1053	1.003	1056	2.09
16	6	1257.0	727.0	1259.5	532.5	2.361	2.472				63.8	63.8	63.8	63.8	946	0.993	939	4.06
17	6	1263.0	731.5	1265.5	534.0	2.365	2.472				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	2.472				63.7	64.3	64.0	64.0	904	0.988	893	3.61
19	6	1261.5	729.0	1262.5	533.5	2.365	2.456	4.2	16.9	74.0	64.7	64.5	64.4	64.5	791.0	0.975	771	4.93
20	6	1261.0	726.5	1262.5	536.0	2.353	2.456				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	2.456				64.9	65.0	64.5	64.8	779.0	0.968	754	2.21
						2.354	2.456		17.6	76.3							772	3.92

Bitüm Öz. Ağ. (Gb)	Bitüm Penetrasyonu	Agrega Bitüm Abs. (Pb)	Agr. Kar. Ef. Öz. Ağ. (Gef/d)	Agr. Kar. Ef. Öz. Ağ. (Ger/h)	Dizayn Ef. Öz. Ağ.	1.0375	67	0.19	2.696	2.696	
Kaba Agr. Hac. Öz. Ağ. (Gkh)	: 2.681	Kaba Agr. Hac. Öz. Ağ. (Gkz)	: 2.706	Ince Agr. Hac. Öz. Ağ. (Gih)	: 2.682	Ince Agr. Hac. Öz. Ağ. (Giz)	: 2.711	Filler Zah. Öz. Ağ. (Gp)	: 2.707	Biriktirilecek Agreg. Mik. (gr)	: 1200
Karışım Gradasyonu %	100	%	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200			

Bitüm yüzdesi sabit tutularak % 0 taş tozu – % 7 endüstriyel atık filler oranlarında hazırlanmış karışımlara stabilite ve akma deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları Tablo 9'da verilmiştir.

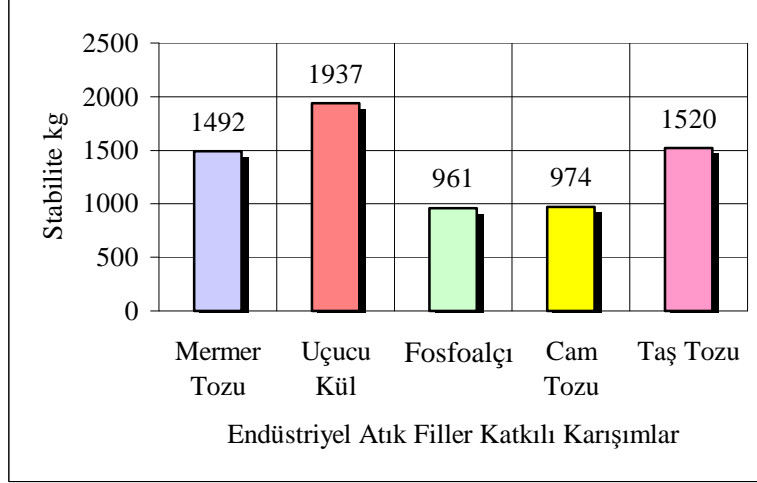
Tablo 9. Koşullandırılmış Marshall stabilite deney sonuçları.

Endüstriyel atıklar		Koşullandırılmış numuneler	
		Grup 1	Grup 2
Taş Tozu	Pr.Öz.Ağ.gr/cm ³	2.376	2.371
	Boşluk %	5.3	5.5
	VMA %	15.6	15.8
	Asf. Dol. Boş. %	66.1	65.2
	Stabilite kg	1520	1393
	Akma mm	2.46	3.03
Mermer Tozu	Pr.Öz.Ağ.gr/cm ³	2.339	2.342
	Boşluk %	6.8	6.6
	VMA %	16.9	16.8
	Asf. Dol. Boş. %	60.0	60.5
	Stabilite kg	1492	1467
	Akma mm	2.14	2.15
Uçucu Kül	Pr.Öz.Ağ.gr/cm ³	2.269	2.315
	Boşluk %	9.6	7.7
	VMA %	19.4	17.8
	Asf. Dol. Boş. %	50.7	56.4
	Stabilite kg	1937	1663
	Akma mm	1.84	2.30
Fosfoalçı	Pr.Öz.Ağ.gr/cm ³	2.328	2.331
	Boşluk %	7.2	7.1
	VMA %	17.3	17.2
	Asf. Dol. Boş. %	58.3	58.8
	Stabilite kg	961	826
	Akma mm	3.64	3.67
Cam Tozu	Pr.Öz.Ağ.gr/cm ³	2.341	2.373
	Boşluk %	6.7	5.4
	VMA %	16.8	15.7
	Asf. Dol. Boş. %	60.3	65.5
	Stabilite kg	974	0
	Akma mm	3.02	0.00

3.1 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

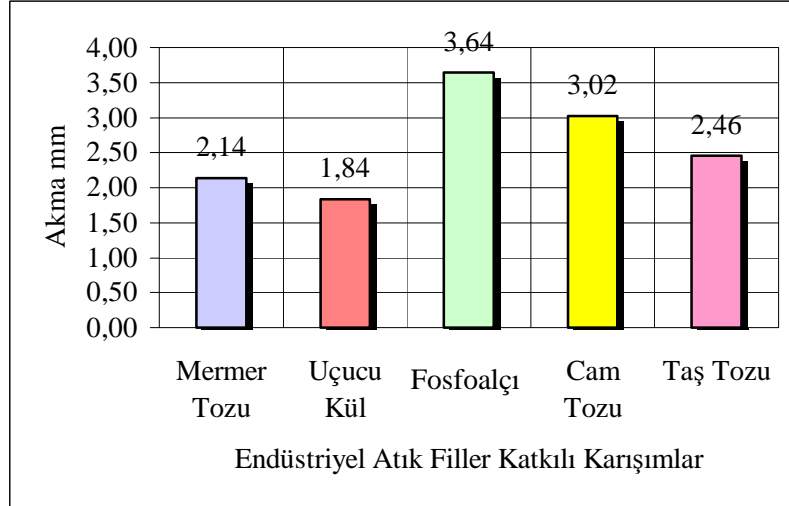
Grup 1 numuneleri koşullandırılmış Marshall stabilite deney sonuçları:

Grup 1 numuneleri; normal şartlarda 3 gün süre ile kür edilen numunelerin oda sıcaklığında su banyosunda 4 saat 25 ± 1 °C 'lik deney sıcaklığına getirilerek kür edilmeleri sonucu oluşturulmuştur. Kür şartlarından sonra numunelere Marshall stabilite deneyi uygulanarak stabilite ve akma değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçları Şekil 2 ve 3 'de verilmiştir.



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

Grup 1 numuneleri koşullandırılmış Marshall stabilite deney sonuçlarında en yüksek stabiliteyi uçucu kül ve mermer tozu filler değerleri vermiştir. Fosfoalçı ve cam tozu filler stabilite değerleri ise şartname limitlerinin üzerinde çıkmasına rağmen taş tozu filler değerinden düşük bir sonuç vermiştir.



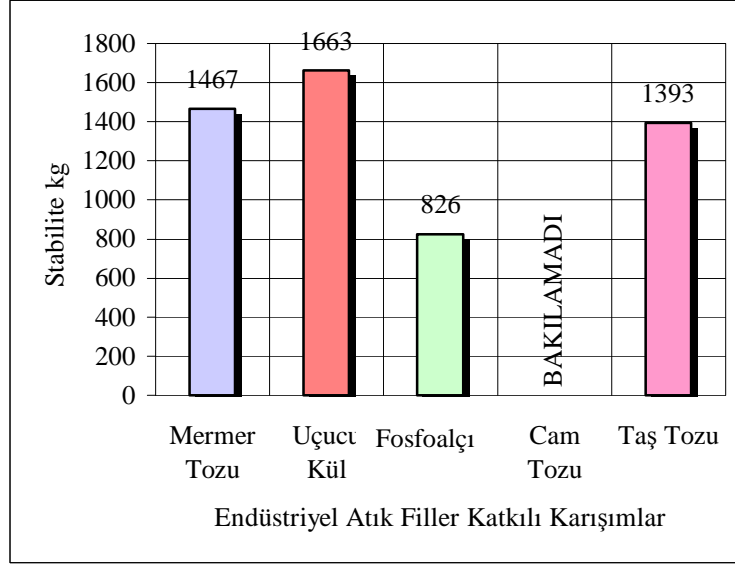
Şekil 3. Endüstriyel atık filler katkıli karışımlarda akma değerleri.

Grup 1 numuneleri koşullandırılmış Marshall stabilite deney sonuçlarında fosfoalçı ve cam tozu filler akma değerleri taş tozundan oldukça yüksek değer vermiştir. En düşük akma değeri sonucunu uçucu kül filler değeri vermiştir. Mermer tozu filler akma değerleri ise şartname limitleri arasındadır.

Grup 2 numuneleri koşullandırılmış Marshall stabilite deney sonuçları:

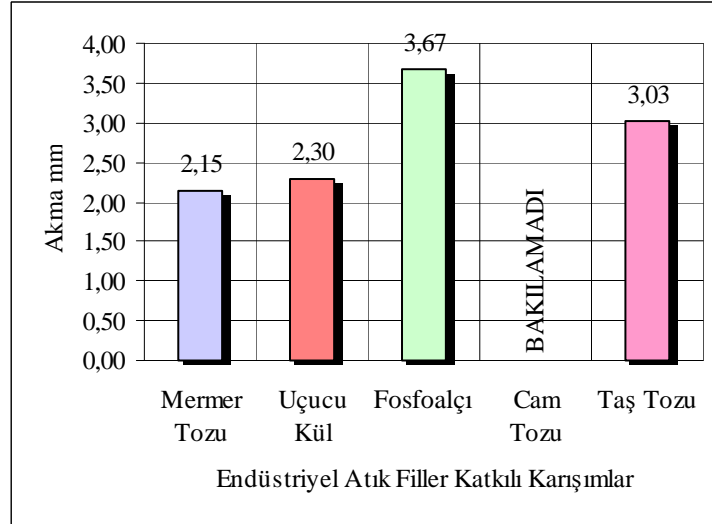
Grup 2 numuneleri; normal şartlarda 3 gün süre ile kür edilen numunelerin 24 saat 60 ± 1 °C 'lik su banyosunda bekledikten sonra 2 saat 25 ± 1 °C 'lik su banyosunda bekletilerek

kür edilmeleri sonucu oluşturulmuştur. Kür şartlarından sonra numunelere Marshall stabilite deneyi uygulanarak stabilite ve akma değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçları Şekil 4 ve 5 'de verilmiştir.



Şekil 4. Endüstriyel atık filler katkıli karışımlarda Marshall stabilite değerleri.

Grup 2 numuneleri koşullandırılmış Marshall stabilite deney sonuçlarında uçucu kül ve mermer tozu filler stabilite değerleri taş tozu filler stabilite değerinden yüksek değer vermiştir. Fosfoalçı filler stabilite değeri ise şartname limiti olan 900 kg Marshall stabilite değerine yakındır. Cam tozu filler stabilite değeri sonuçlarına bakılamamıştır.

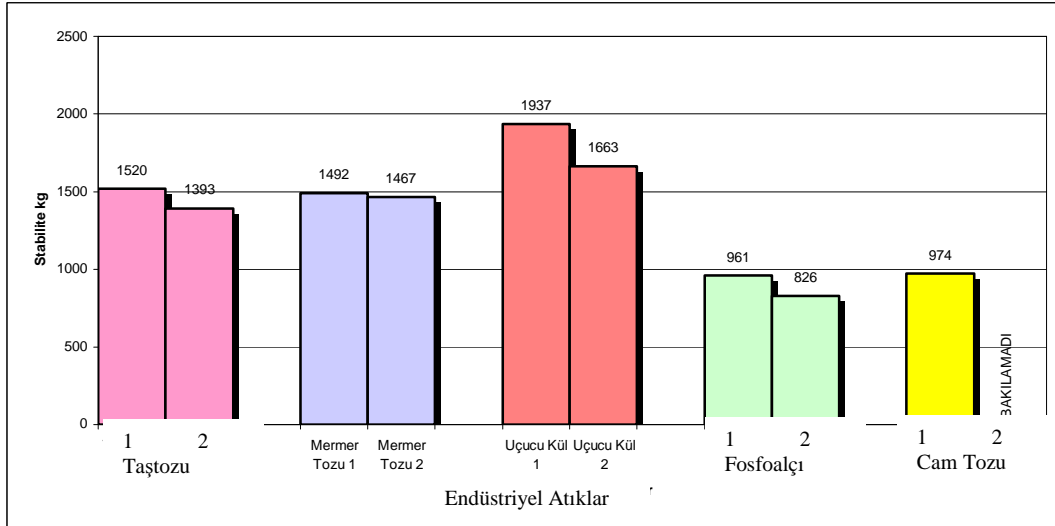


Şekil 5. Endüstriyel atık filler katkıli karışımlarda akma değerleri.

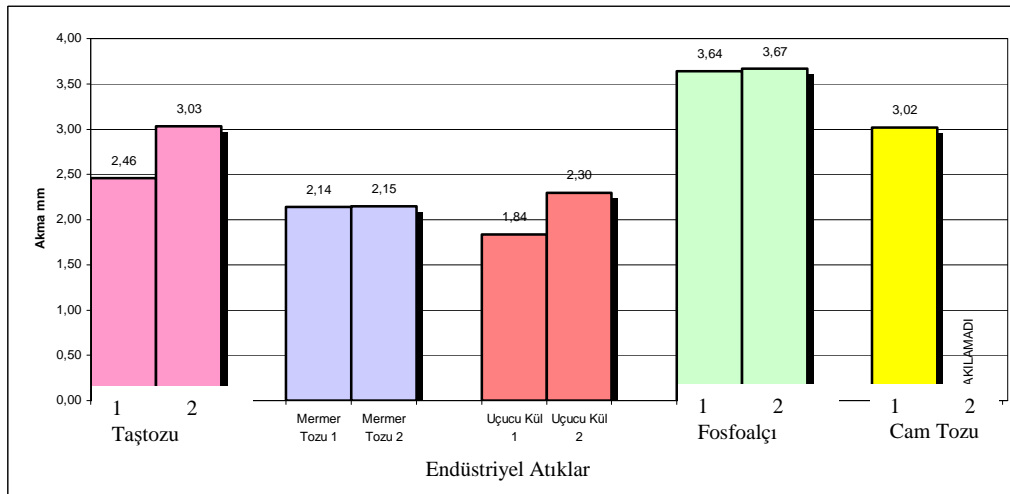
Grup 2 numuneleri koşullandırılmış Marshall stabilite deney sonuçlarında uçucu kül ve mermer tozu filler akma değerleri taş tozu filler akma değerine yakın sonuç vermiştir. Fosfoalçı filler akma değerleri ise taş tozu filler akma değerinden yüksek çıkmıştır. Cam tozu filler akma değeri sonuçlarına bakılamamıştır.

Koşullandırılmış numunelerin Marshall stabilite deney sonuçlarının değerlendirilmesi:

- 4 saatlik ve 24 saatlik kür şartları uygulanarak hazırlanan 1 ve 2 grubu numunelerin Marshall stabilite ve akma deney sonuçları Şekil 6 ve 7 'de verilmiştir.



Şekil 6. Grup 1 ve 2 numunelerinin stabilite değerlerindeki değişim.



Şekil 7. Grup 1 ve 2 numunelerinin akma değerlerindeki değişim.

Cam tozu fillerin 4 saatlik kür şartlarında stabilite ve akma değeri sonuçları şartname limitlerini sağlamıştır. Cam tozu fillerin 24 saatlik kür şartlarında stabilite ve akma değerlerine bakılamamıştır. Mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve taş tozu filler numunelerinin stabilite değerlerinde 4 saatlik kür şartlarına göre 24 saatlik kür şartları değerlerinde azalma, akma değerlerinde ise artma görülmüştür.

4. Sonuçlar

Aynı gradasyon ve optimum bitüm muhtevastındaki, agrega içerisinde doğal filler ile doğal filler yerine endüstriyel atık maddeler kullanılarak hazırlanan numunelere koşullandırılmış Marshall stabilite deneyleri uygulanmıştır. Sonuçların değerlendirilmeleri stabilite ve akma değerleri ile yapılmıştır.

- Mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve taş tozu filler ile hazırlanan numunelerin stabilite değerlerinde 4 saatlik kür şartlarına göre 24 saatlik kür şartları değerlerinde azalma, akma değerlerinde ise artma görülmüştür.
- Cam tozu filler ile hazırlanan numunelerin stabilite ve akma değeri sonuçları 4 saatlik kür şartlarında şartname limitlerini sağlamıştır.
- Yüksek sıcaklıklarda, 24 saatlik kür şartlarında cam tozu filler ile hazırlanan numuneler ayrışmalara uğradığından stabilite ve akma değerlerine bakılamamıştır.

4 Saatlik Kür Şartlarına Göre Hazırlanan Numunelerin Değerlendirilmesi

- 4 saatlik kür şartları uygulanarak hazırlanan numunelerin stabilite değerleri şartname alt limit sınırı olan 900 kg 'ın üzerinde sonuç vermişlerdir. Akma değerleri bakımından uçucu kül filler akma değeri dışında diğer bütün endüstriyel atık filler akma değerleri şartname limitleri olan 2 mm – 4 mm arasında sonuç vermişlerdir. Uçucu kül filler akma değeri ise şartname limitinden düşük ancak şartname limitlerine oldukça yakın sonuç vermiştir.

24 Saatlik Kür Şartlarına Göre Hazırlanan Numunelerin Değerlendirilmesi

- 24 saatlik kür şartları uygulanarak hazırlanan numunelerin stabilite değerleri (cam tozu filler hariç) şartname limitlerinin üzerinde sonuç vermişlerdir. Fosfoalçı filler kullanılarak hazırlanan numunelerin stabilite değeri ise şartname limitine yakın değer vermiştir. Akma değerleri bakımından cam tozu filler sonuçlarına bakılamamıştır. Uçucu kül filler akma değeri şartname değerine yakın, diğer bütün endüstriyel atık fillerlerin akma değerleri ise şartname limitleri arasında sonuç vermişlerdir.

Deneysel çalışmalarda koşullandırılmış numunelerin Marshall stabilitelerinde önemli ölçüde bir artış olduğu ve endüstriyel atık malzeme kullanılarak hazırlanan karışımların akma değerleri bakımından da şartnameye uygun malzeme oldukları görülmektedir. % 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 kullanılabilmesini 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. Bu nedenle bu atık malzemelerin kısa ve uzun süreli dayanım ve durabilite üzerine etkileri daha sonraki bir çalışmanın konusu olarak düşünülebilir.

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 üstü yapısında 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].Balta, İ., Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı, M.Sc. Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2004).
- [12].Önal, A. ve Kahramangil, M., **Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı**, K.G.M Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, (1993).
- [13].Şayakçı Mermer San. Tic. A.Ş., (2005).
- [14].Aruntaş, H., Y., Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Ankara, Cilt 21, No 1, 193-203, (2006).
- [15].Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinobalı, A., Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ankara, (2003).
- [16].SEAŞ Genel Müdürlüğü, Soma B Termik Santrali, (2005).
- [17].Işıldak, Ö., Fosfoalçı içeren portland çimentosunun hidrasyonu üzerine bazı piriz hızlandırıcı kimyasal katkıların etkileri, M.Sc. Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, (1993).
- [18].Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A. Ş. Araştırma Merkezi Cam Teknoloji Grubu Raporu, (2005).

- [19].**Yollar Fenni Şartnamesi**, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı KGM, Yayın No: 170/2, Ankara, (2000).
- [20].Karayolları Genel Müdürlüğü 14. Bölge Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Raporu, (1996).
- [21].<http://www.tupras.com.tr>, (2005).