

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN
KARAYOLLARINDA KULLANIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Gürel Afife ÇAĞLAR**

**Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Programı: ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ**

EYLÜL 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN
KARAYOLLARINDA KULLANIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Gürel Afife ÇAĞLAR
501031409**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Eylül 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Eylül 2007**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Emine AĞAR

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Abdullah Hilmi LAV (İ.T.Ü)

Öğr. Gör. Dr. Mustafa Sinan YARDIM (Y.T.Ü)

EYLÜL 2007

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim sırasında her zaman yanımda olan, tez aşamasında aramızdan ayrılan, hayatın hep olumlu yönlerini gören ve gösteren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Güven ÖZTAŞ'ın anısına...

Tez çalışmalarım sırasında bana destek olan, yapıcı eleştirileri, yorumlarıyla yol gösteren hocam Sayın Prof. Dr. Emine AĞAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında beni anlayış ve sabırla karşılayan aileme çok teşekkür ederim. Akademik bilgiye değer veren Kayalar İnşaat A.Ş. yönetim kurulu başkan yardımcısı Sayın Recep Ali KAYA'ya ve şefim Sayın Nejdet GİRİFTİNOĞLU'na gösterdikleri anlayıştan dolayı içten teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2007

Gürel Afife ÇAĞLAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. ESNEK YOL ÜSTYAPISI TABAKALARI	4
2.1. Giriş	4
2.2. Taban Zemini	7
2.3. Alt temel Tabakası	8
2.4. Temel Tabakası	9
2.4.1. Granüler Temel	10
2.4.2. Plent-Miks Temel	11
2.4.3. Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel	12
2.4.4. Bitümlü Temel	13
2.5. Kaplama Tabakaları	15
2.5.1. Yüzeysel Kaplamalar	15
2.5.2. Bitümlü Sıcak Karışım Kaplama Tabakaları	17
3. KARAYOLLARINDA KULLANILAN ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELER	21
3.1. Giriş	21
3.2. Termik Santral Atıkları	23
3.2.1. Uçucu Küller	25
3.2.1.1. Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri	26
3.2.1.2. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri	27
3.2.1.3. Uçucu Külün Mühendislik Özellikleri	29
3.2.1.4. Uçucu Küllerin Karayollarında Kullanılması	31
3.2.2. Kömür Taban Külü & Kazan Cürufu	34
3.2.2.1. Taban Külü ve Kazan Cürufunun Fiziksel Özellikleri	34
3.2.2.2. Taban Külü ve Kazan Cürufunun Kimyasal Özellikleri	36
3.2.2.3. Taban Külü ve Kazan Cürufunun Mühendislik Özellikleri	37
3.2.2.4. Taban Külü ve Kazan Cürufunun Karayollarında Kullanılması	38
3.2.3. Desülfojips Atıkları	38
3.3. Katı Atık Yakma Tesisi Uçucu Külleri	40
3.3.1. Katı Atık Yakma Tesisi Uçucu Küllerinin Fiziksel Özellikleri	41
3.3.2. Katı Atık Yakma Tesisi Uçucu Küllerinin Kimyasal Özellikleri	42

3.3.3. Katı Atık Yakma Tesisi Uçucu Küllerinin Karayollarında Kullanılması	43
3.4. Yüksek Fırın ve Çelikhane Cürufu	43
3.4.1. Cürufların Fiziksel Özellikleri	45
3.4.2. Cürufların Kimyasal Özellikleri	47
3.4.3. Cürufların Mühendislik Özellikleri	47
3.4.4. Cürufların Karayollarında Kullanılması	49
3.5. Hurda Lastikler	51
3.5.1. Hurda Lastiklerin Fiziksel Özellikleri	53
3.5.2. Hurda Lastiklerin Kimyasal Özellikleri	55
3.5.3. Hurda Lastiklerin Mühendislik Özellikleri	56
3.5.4. Hurda Lastiklerin Karayollarında Kullanılması	57
3.6. Cam Atıkları	59
3.6.1. Cam Atıklarının Fiziksel Özellikleri	59
3.6.2. Cam Atıklarının Kimyasal Özellikleri	60
3.6.3. Cam Atıklarının Mühendislik Özellikleri	61
3.6.4. Cam Atıklarının Karayollarında Kullanılması	62
3.7. Mermer Atıkları	63
3.7.1. Atık Mermer Tozunun Fiziksel, Mekanik, Kimyasal Özellikleri	65
3.7.2. Mermer Atıklarının Karayollarında Kullanılması	65
4. ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN KARAYOLLARINDA KULLANILMASI ÜZERİNE DÜNYADA GERÇEKLEŞTİRİLMİŞ ARAŞTIRMALAR VE UYGULAMALAR	67
4.1. Uçucu Küller	67
4.1.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Mineral Filler Olarak Kullanılması	67
4.1.2. Stabilize Temel ve Alt Temel Tabakalarında Kullanılması	68
4.1.3. Taban Zemini Stabilizasyonunda Kullanılması	71
4.1.4. Taban Zemininde Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması	73
4.2. Cüruflar	73
4.2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Agrega Olarak Kullanılması	74
4.2.2. Alt temel ve Temel Tabakalarında Kullanılması	74
4.2.3. Taban Zemininde Kullanılması	75
4.3. Hurda Lastikler	76
4.3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılması	78
4.3.2. Taban Zemininde Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması	78
4.4. Cam Kırıkları	82
5. ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN KARAYOLLARINDA KULLANIMI ÜZERİNE TÜRKİYE'DE GERÇEKLEŞTİRİLMİŞ ARAŞTIRMALAR	84
5.1. Uçucu Küller	84
5.1.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Mineral Filler Olarak Kullanılması	85
5.1.2. Stabilize Temel, Alt Temel ve Taban Zemininde Kullanılması	87
5.2. Cüruflar	88
5.2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Agrega Olarak Kullanılması	89
5.2.2. Granüler Alt temel ve Temel Tabakalarında Kullanılması	94
5.3. Hurda Lastikler	95
5.4. Cam Kırıkları	98
5.4.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Agrega Olarak Kullanılması	98
5.4.2. Yol Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi	99

5.5. Mermer Atıkları	101
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	103
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	115

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Alt Temel Malzemesi Gradasyon Limitleri.....	8
Tablo 2.2 Alt Temel Malzemesinin Fiziksel Özellikleri.....	9
Tablo 2.3 Alt Temel Sıkıştırma Kriterleri.....	9
Tablo 2.4 Kaba Agreganın Fiziksel Özellikleri.....	10
Tablo 2.5 İnce Agreganın Fiziksel Özellikleri.....	10
Tablo 2.6 Granüler Temel Tabakası Gradasyon Limitleri.....	11
Tablo 2.7 Granüler Temel Tabakası Sıkıştırma Kriterleri.....	11
Tablo 2.8 Plent-Miks Temel Tabakası Gradasyon Limitleri.....	12
Tablo 2.9 Plent-Miks Temel Tabakası Sıkıştırma Kriterleri.....	12
Tablo 2.10 Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel Tabakası Gradasyon Limitleri.....	13
Tablo 2.11 Bitümlü Temel Tabakası Gradasyon Limitleri.....	13
Tablo 2.12 Bitümlü Temel Tabakasında Kullanılan Kaba Agreganın Özellikleri.....	14
Tablo 2.13 Bitümlü Temel Tabakasında Kullanılan İnce Agreganın Özellikleri.....	14
Tablo 2.14 Bitümlü Temel Tasarım Ölçütleri.....	15
Tablo 2.15 Agregaların Özellikleri.....	16
Tablo 2.16 Binder Tabakası için Gradasyon Limitleri.....	17
Tablo 2.17 Aşınma Tabakası için Gradasyon Limitleri.....	17
Tablo 2.18 İnce Agreganın Özellikleri.....	18
Tablo 2.19 Kaba Agreganın Özellikleri.....	19
Tablo 2.20 Mineral Fillerin Gradasyon Limitleri ve Gereken Diğer Şartlar.....	19
Tablo 2.21 Asfalt Betonu Tasarım Ölçütleri.....	20
Tablo 3.1 Türkiye’de ki Uçucu Küllerin Yoğunlukları.....	27
Tablo 3.2 ASTM C 618 Standartları.....	27
Tablo 3.3 Puzolanların Sınıflandırılması.....	28
Tablo 3.4 Değişik Kömür Çeşitlerinden Üretilen Uçucu Küllerin Kimyasal Yapısı.....	29
Tablo 3.5 Taban Külü ve Kazan Cürufunun Tane Boyutu Dağılımları.....	35
Tablo 3.6 Taban Külü ve Kazan Cürufunun Tipik Fiziksel Özellikleri.....	35
Tablo 3.7 Taban Külü ve Kazan Cürufu Numunelerinin Kimyasal Bileşimleri.....	36
Tablo 3.8 Taban Külü ve Kazan Cürufunun Tipik Mekanik Özellikleri.....	37
Tablo 3.9 Değişik Endüstri Kollarında Elde Edilen Alçılar.....	39
Tablo 3.10 Katı Atık Yakma Tesisi Külünün Fiziksel Özellikleri.....	41
Tablo 3.11 Katı Atık Yakma Tesisi Külünün Kimyasal Bileşimi.....	43
Tablo 3.12 Cürufların Fiziksel Özellikleri.....	46
Tablo 3.13 Erdemir Cüruflarının Fiziksel Özellikleri.....	46

Tablo 3.14	Cürufların Kimyasal Bileşimleri.....	47
Tablo 3.15	Cürufların Mekanik Özellikleri.....	48
Tablo 3.16	Erdemir Cürufunun Mekanik Özellikleri.....	48
Tablo 3.17	Kauçuk Bileşimi.....	55
Tablo 3.18	Hurda Lastiklerin Mekanik Özellikleri.....	57
Tablo 3.19	Cam Kırıntılarının Fiziksel Özellikleri.....	60
Tablo 3.20	Cam Kırıntılarının Gradasyon Değerleri.....	60
Tablo 3.21	Cam Atıklarının Kimyasal Bileşimleri.....	61
Tablo 3.22	Cam Atıklarının Mekanik Özellikleri.....	62
Tablo 3.23	Mermer Tozunun Termal İletkenlik Değerleri.....	62
Tablo 3.24	Mermer Tozunun Kimyasal Bileşimi.....	65
Tablo 4.1	Zemin Numunelerinin Mekanik Özellikleri.....	72
Tablo 4.2	Değişik Oranlarda Uçucu Kül-Su Karışımlarının CBR Değerleri...	72
Tablo 4.3	Üstyapı Modellerinde Kullanılan Malzemeler ve Tabaka Kalınlıkları.....	75
Tablo 4.4	North-Yarmouth Arazi Deneyindeki Tabakaların Kalınlıkları.....	79
Tablo 5.1	Türkiye’de Kömürle Çalışan Termik Santraller.....	84
Tablo 5.2	Taş tozu, Çimento ve Uçucu Kül Fillerli Aşınma Tabakasının Marshall Deney Sonuçları.....	86
Tablo 5.3	Geleneksel Mineral Fillerli ve Uçucu Küllü Karışımlar ait Stabilite ve Optimum Bitüm Yüzde Değerleri.....	87
Tablo 5.4	Serbest Basınç Mukavemet Değerleri.....	87
Tablo 5.5	Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Agregaların Granülometreleri.....	89
Tablo 5.6	Bitümlü Karışımlarla Hazırlanan Marshall Briketlerindeki Agregaların Yüzdeleri ve Özgül Ağırlık Değerleri.....	90
Tablo 5.7	Bir ve İki Numaralı Marshall Numunelerinin Deney Sonuçları.....	90
Tablo 5.8	Çelikhane Cürufunun Yoğunluk, Gözenek ve Su Emme Değerleri.....	91
Tablo 5.9	Çelikhane Cürufunun Mekanik Özellikleri.....	91
Tablo 5.10	Marshall Deneyi Sonuçları.....	92
Tablo 5.11	Marshall Değerleri.....	93
Tablo 5.12	Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Agregaların Akma ve Stabilite Değerleri.....	94
Tablo 5.13	Bitümlü Karışımların Rijitlik ve Sünme Sertliği Modülünün Değerleri.....	94
Tablo 5.14	Optimizasyon Değerleri.....	96
Tablo 5.15	Katkısız Numunelere ait Marshall Tasarım Sonuçları.....	97
Tablo 5.16	Cam Katkılı Numunelerin Marshall Stabilite Değerleri.....	99
Tablo 5.17	Cam Kırıntılarının Parlaklık ve Yansıma Deneylerinin Sonuçları....	100

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Esnek Üstyapı Enkesiti..... 6
Şekil 3.1	Yol Üstyapılarında Kullanılan Endüstriyel Atık Malzemelerin Sınıflandırılması..... 22
Şekil 3.2	Taban Zeminde Kullanılan Endüstriyel Katı Atık Malzemeler..... 23
Şekil 3.3	Uçucu Külün Elektro Filtreli Kuru Tabanlı Kazanda Üretilmesi..... 24
Şekil 3.4	Uçucu Külün Siklon ile Toplanması..... 25
Şekil 3.5	Katı Atık Fırını..... 40
Şekil 3.6	Gradasyon Eğrisi..... 42
Şekil 3.7	Yüksek Fırın ve Çelikhane Cüruflarının Oluşum Diyagramı..... 44
Şekil 3.8	Hurda Lastikler Geri Dönüşüm Diyagramı..... 52
Şekil 3.9	Lastiklerin Kimyasal Bileşimleri..... 55
Şekil 4.1	Avrupa Ülkelerinde Hurda Lastiklerin Kullanım Oranı..... 76
Şekil 4.2	ABD’de Hurda Lastiklerin Kullanım Oranı..... 77
Şekil 4.3	Hurda Lastiklerin Kullanım Alanlarına Göre Dağılımı..... 78
Şekil 4.4	North-Yarmouth Yolunun Enkesiti..... 79

ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN KARAYOLLARINDA KULLANIMI

ÖZET

Atık olarak elde edilen çeşitli ürünlerin depolanması veya doğaya terk edilmesi çok büyük güçlükler yaratmakta, çevre kirliliği dahil topluma büyük sorunlar getirmektedir. Günümüzde, çeşitli ürünlerin üretimi sırasında elde edilen yan ürün veya atıkların değerlendirilmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Atıklar, yeni ürünlerin elde edilmesinde veya mevcut ürünlerde katkı maddesi olarak kullanılabilir. Atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, hem çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesini önlemekte, hem de malzemelerin atılmak üzere depolanması durumunda çevrede oluşacak problemleri en aza indirmektedir. Bu nedenle; endüstriyel atıkların çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilerek ülke ekonomisine kazandırılması gerekmektedir.

Son yıllarda, endüstriyel atıkların karayolu tabakalarında değerlendirilerek ortadan kaldırılmaları için yapılan çalışmalar yaygınlaşmıştır. Termik santrallerde elektrik üretimi sırasında oluşan uçucu küller, demir çelik fabrikalarında üretim sırasında oluşan cürufur, hurda otomobil lastikleri, cam kırıkları ve mermer tozları karayollarında bitümlü sıcak karışım kaplamalarından taban zeminine kadar her tabakada, geleneksel malzemelerin özelliklerini sağladıkları müddetçe kullanılabilirler.

Bu tez çalışmasının amacı, endüstriyel katı atık malzemelerin performansları bakımından teknik avantajlarını tanıtmak ve yalnızca bir atık maddesi olarak bilinen bu malzemelerin aslında yol malzemeleri olarak değerlendirildiğinde elde edilecek çevresel, ekonomik ve teknik faydaları belirtmektir.

Tezin ilk bölümünde çalışmanın önemi, amacı ve kapsamı açıklanmıştır. İkinci bölümde, esnek yol üstyapı tabakaları hakkında genel bilgi verilmiş ve bu

tabakalarda kullanılan malzemelerin sağlaması gereken şartname limitleri belirtilmiştir.

Karayollarında kullanılan endüstriyel atıkların tanımları ile fiziksel, kimyasal ve teknik özellikleri üçüncü bölümde anlatılmıştır. Malzemelerin kullanıldığı tabakalar, kullanım miktarları, kullanımı sırasında dikkat edilmesi gerekenler belirtilmiştir.

Dördüncü ve beşinci bölümlerde, yurtdışındaki karayollarında kullanımı yaygın olan, Türkiye’de de kullanım potansiyeli bulunan endüstriyel atıklar seçilip, karayollarında kullanımı üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalar açıklanmıştır.

Sonuç bölümünde, karayollarında kullanılan endüstriyel atıkların genel değerlendirilmesi yapılmış ve öneriler sunulmuştur. Karayollarında bu atık malzemelerin kullanılmasıyla, hem yolların performanslarının iyileştirildiği ve maliyetlerinin azaltıldığı hem de çevresel sorunların çözümlenebileceği vurgulanmıştır.

UTILIZATION OF INDUSTRIAL WASTE MATERIALS IN HIGHWAY CONSTRUCTION

SUMMARY

Storage or throwing over to the nature of various products gained in the form of waste creates great difficulties and lead to great problems including environmental pollution in the civilization. Today, various studies are conducted to recycle wastes and by-products gained during the manufactory of various products. Wastes can be used to obtain new products or as an additional substance in the present products. Recycle of wastes and by-products both prevents damage to the nature and reduces the occurrence of environmental problems to a minimum level by reducing the usage of very scarcely found natural substances. Thus, it is important that industrial wastes be gained to state economy through being recycled for various uses.

In recent years, studies on removing wastes through recycling on highway layers are extended. Fly ashes occurred during the production of electricity in coal-fired power stations, slags occurred during the production in iron-steel factories, scrap tyres, waste glasses and marble dusts can be used in any layer from bitumen hot-mix pavements to subgrade as long as they provide characteristics of traditional materials.

The purpose of this thesis is to introduce technical advantages of the industrial solid waste materials in terms of their performances and environmental, economic and technical advantages of these materials-only known as a simple waste material- when they are used as road materials.

In the first chapter of the thesis, the importance, purpose and scope of the study are explained.

In the second chapter of the thesis, a general information related to flexible pavement is given and specification limits required for the materials used in these layers are explained.

In the third chapter definitions of industrial wastes used in highway construction and physical, chemical and technical characteristics of these wastes are described. The layers on which materials are used, their quantities and considerations during the usage are specified.

In the fourth and fifth chapters, industrial wastes commonly used in highway construction abroad and having the potential of use in Turkey are selected and the studies conducted on their use in highway construction are explained.

In the conclusion chapter, a general evaluation of industrial wastes used in highway construction is given and suggestions are made upon. It is emphasized that the use of these waste materials in highway construction enhances the performance of the roads, reduces the costs and solves environmental problems. .

1. GİRİŞ

Dünyadaki doğal kaynaklar; yıllar geçtikçe nüfus artışına ve hızlı sanayileşmeye bağlı olarak azalırken, gereklilikleri her geçen gün artmaktadır. Buna karşılık, enerji ve doğal kaynakların tüketilmesiyle atık malzeme oluşumu da çoğalmaktadır. Doğal malzemeleri kullanmak yerine, bu malzemelerin üretimi ve işlenmesi sırasında oluşan yan ürünleri ve atık malzemeleri yeniden değerlendirilerek kullanmak gerekmektedir. Böylelikle doğal kaynakların verimli kullanımıyla enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Ayrıca atık malzemelerin atılmak üzere depolanması durumunda çevreye vermiş olduğu zarar da en aza indirgenmiş olmaktadır. Böylece ülke ekonomisine de uzun vadede büyük faydalar sağlanması mümkün olacaktır.

Dünyada endüstriyel atıkların, karayolu inşaatlarında kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Endüstriyel atıklar, karayolu tabakalarında değerlendirilerek ortadan kaldırılabilmektedir. Karayollarında, aşınma ve binder tabakalarında, temel ve alt temel tabakalarında ve taban zemininde (dolgu malzemesi olarak) kullanılabilirler. Bunun yanı sıra rijit üst yapılarda da çimento betonunda agrega veya tamamlayıcı çimento malzemesi olarak da kullanılabilirler.

1973 yılındaki petrol krizi sonrasında, tek bir ham petrol kaynağına bağlı olan birçok rafineri birden fazla kaynaktan gelecek hammaddeyi işlemek zorunda kalmıştır. Böylelikle üst yapı karışımlarında kullanılan bağlayıcıda olması gereken özellikleri sağlamakta güçlükler yaşanmaya başlanmıştır. Diğer taraftan bazı endüstriyel atıkların ortadan kaldırılabilmesi ya da başka bir yere taşınması konusunda çevreci ve ekonomik baskılar oluşmuştur. Sonuç olarak, endüstriyel atıkların bitümlü bağlayıcı olarak değerlendirilmesine, bağlayıcı malzemedeki beklenen özelliklere ulaşması için modifikasyon işlemi uygulanmasına karar verilmiştir. Çevreye zarar veren atık plastiklerin ve kauçukların değerlendirilmesi ve polimer modifikasyonunda kullanılması dünyada gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, içerisinde (%65 oranında) yapay elastomer sınıfından sentetik-butodien kopolimer

(SBR) yapay kauçuğunu bulunduran hurda lastikler hakkında yapılan çalışmalar açıklanacaktır.

Bitümlü sıcak karışımlarda, demir-çelik endüstrisinin yan ürünü olarak oluşan yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufları, kömür ile çalışan termik santrallerde oluşan kazan cürufu ve kömür taban külü, katı atık yakma tesisinde oluşan küller, cam endüstrisinin atığı olan cam kırıkları ince agregaya yerine kullanılabilir. Böylelikle hem karışımın performansı arttırılmakta hem de doğal agregaların tüketimi azaltılıp, endüstriyel atık malzemelerin ikincil hammadde olarak kullanımı sağlanmaktadır. Aynı zamanda bu endüstriyel atık malzemeler, granüler temel ve alt temelde de kullanıldıklarında geleneksel agregadan beklenen özellikleri sağlamaktadırlar.

Son yıllarda çevreyi korumanın önemini anlaşıması ile bazı taş ocakları kapatılmıştır. Bunun sonucunda; asfalt betonunda mineral filler olarak kullanılan taş tozunun bulunması zorlaşmıştır, bu geleneksel malzeme yerine uçucu küller, çimento ve kireç fırını tozları, mermer atıkları mineral filler olarak kullanılabilir.

Taşıma gücü zayıf zeminlerin fiziksel özelliklerini iyileştirmek ve taşıma gücünü arttırmak için başta uçucu kül olmak üzere çeşitli endüstriyel atıklar kullanılmaktadır. Uçucu küller, hurda lastikler sıkıştırıldıkları zaman düşük birim hacim ağırlıklara sahip olmaktadır. Bu nedenle, belirtilen atıkların yollarda hafif dolgu malzemesi olarak kullanımıyla oturma ve taşıma gücü problemleri çözümlenebilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, endüstriyel katı atık malzemelerin performansları bakımından teknik avantajlarını tanıtmak ve atık madde olarak bilinen bu malzemelerin aslında yol malzemeleri olarak değerlendirildiğinde elde edilecek çevresel, ekonomik, teknik avantajları belirtmektir.

Endüstriyel atık malzemelerin karayollarında kullanılmasıyla, hem yolların performansları iyileştirilmekte hem de maliyetleri azaltılmaktadır. Aynı zamanda bu atık malzemelerin yollarda değerlendirilmesiyle, bunların büyük miktarlarda depolanması önlenip, çevresel sorunlar çözümlenebilmektedir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalara bakıldığında, endüstriyel atıklarla oluşturulan yol karışımlarında elde edilen mekanik özellikler, çoğunlukla bu atıkların karayolu

yapısının her tabakasında yeterli güvenlikle kullanılabileceğini göstermektedir. Bu atıkların potansiyel kullanımı, üreticiden tüketiciye kadar herkesi ilgilendirmektedir. Araştırmacılar, mühendisler ve sanayiciler, yapılan çalışmalarda elde ettikleri bilgi ve deneyimleriyle malzemelerin özelliklerini, kullanılacağı tabakalara göre kullanım miktarlarını belirlemelidirler. Bu malzemelerin kullanımına bağlı olarak hangi kısıtlamaların olacağına da dikkat edilmelidir. Türkiye’de de oldukça büyük miktarlarda, istenilen özelliklerde adı geçen atıklar oluşmaktadır; ancak kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

2. ESNEK YOL ÜSTYAPISI TABAKALARI

2.1 Giriş

Yolun trafik yüklerini taşıyan ve gerilmeleri dağıtmak üzere, yolun taban yüzeyi üzerine yerleştiren tabakalı sisteme üstyapı adı verilir. Yol üstyapısını esnek ve rijit üstyapılar olarak iki ana gruba ayırmak mümkündür.

Ülkemizde çok büyük ölçüde esnek üstyapılar kullanılmaktadır. Esnek üstyapılar, aşınma tabakası, binder tabakası, temel tabakası ve alt temel tabakalarından oluşmaktadır.

Taban zemini üzerine oturan esnek yol üstyapısının başarısı, tabakaların ve taban zeminin şartnamelere uygun şekilde projelendirilip, inşa edilmesine bağlıdır.

Aşınma ve binder tabakaları bitümlü karışımlardan oluşmaktadır. Ancak, yoldaki ağır taşıt trafiğine ve trafik hacmine bağlı olarak temel tabakası da bitümlü karışımlardan oluşabilir. Ülkemizde granüler malzeme kaynağı oldukça fazla olduğu için, temel ve alt temel tabakalarında granüler malzeme yaygın olarak kullanılmaktadır. Dingil yüküne yakın olan üst tabakalar daha büyük gerilmelere maruz kaldığı için daha kaliteli malzemelerin kullanılması gerekir. Bu nedenle, üst tabakalar elastiklik modülü yüksek bitümlü karışımlardan oluşturulmaktadır. Kaplama tabakasının kalınlığı arttıkça yolun trafik yüklerine karşı direnci de artar. Temel tabakasına iletilen basınç ve kayma gerilmeleri azalır. Yollarda temel tabakası üzerine konan bitümlü kaplama tabakaları, genellikle yapım ve çalışma ilkeleri birbirlerinden oldukça farklı iki tipe ayrılırlar: Yüzeysel (sathi) kaplamalar ve bitümlü karışımlarla oluşturulan kaplamalardır. Bitümlü karışımlar, agrega, bitüm ve hava boşluğundan oluşur.

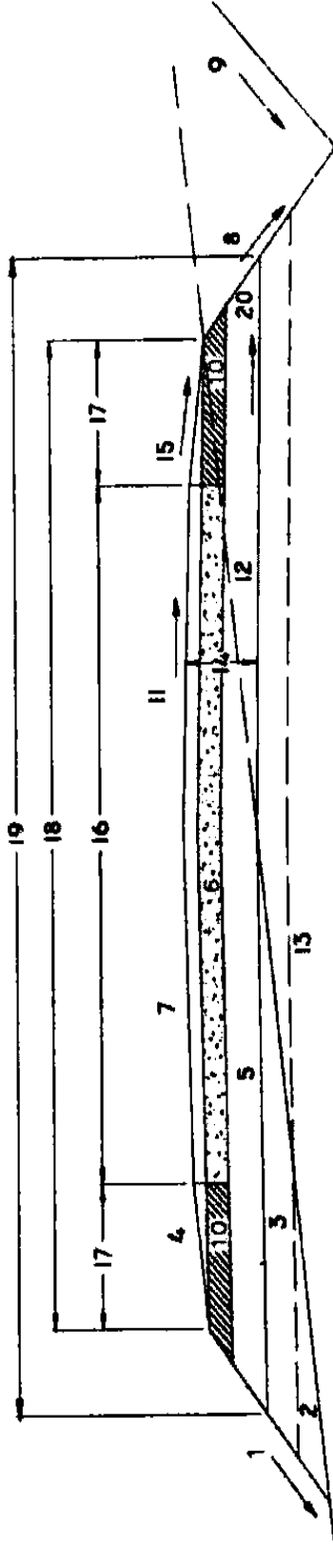
Kaplama tabakasının altında temel tabakası bulunur. Temel tabakası bir veya birden fazla tabakadan oluşabilir. Temel tabakasının esas görevi taşıtların geçişlerinden

dolayı oluşan gerilmeleri alt temele taşıma g¼c¼ sınırları içerisinde yaymaktır. Temel tabakası duruma g¼re çimentolu veya bit¼m bağlayıcı karışım, stabilize edilmiş zemin veya dikkatle seçilmiş gran¼ler malzeme olabilir. Trafik hacminin y¼ksek olduğu kesimlerde bit¼ml¼ karışımlar daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Temel tabakasının altında alt temel tabakası bulunur. Alt temelin esas g¼revi, bit¼ml¼ tabakaların inşası için çalışma platformu oluşturmaktır. Bu tabakada kullanılan malzemeler genel olarak temel tabakasına g¼re daha d¼ř¼k kalitelidir ve gran¼ler malzemedir. M¼mk¼n mertebe yerel malzemeler ve yol inşaatında kullanılmaya elverişli atık malzemeler (molozlar, c¼ruflar, inşaat artıkları gibi) kullanılmaya çalışılır.

Taban zemini, sıkıştırılmış doğal zemin ya da dolgu malzemesinden oluşur. Bu tabaka, ¼styapıya temel g¼revi yapar. Yapısal olarak en ¼nemli tabakadır. Trafik y¼k¼ son olarak bu tabakaya iletilir. Bu tabakanın g¼revini iyi yapabilmesi için iyi bir drenaja ihtiyaı vardır.

Tipik bir esnek ¼styapı kesiti Şekil 2.1' de g¼r¼lmektedir.



- 11—Yolun Enine Eğimi
- 12—Taban Yüzeyi (Tesviye Yüzeyi)
- 13—Yol Gövdesi (Taban Zeminini)
- 14—Üst Yapı Proje Kalınlığı
- 15—Banket Eğimi
- 16—Trafik Şerhleri Genişliği
- 17—Banket Genişliği
- 18—Yol Genişliği (Platform Genişliği)
- 19—Üst Yapı Taban Genişliği
- 20—Taban Yüzeyinin Enine Eğimi

- 1—Dolgu Şevi
- 2—Doğal Zemin
- 3—Seçme Malzeme Tabakası (Gerekli Olduğu Durumda)
- 4—Banket Kaplama
- 5—Alt Temel
- 6—Temel Tabakası
- 7—Kaplama Tabakası
- 8—Hendek Şevi
- 9—Yarma Şevi
- 10—Banket Temeli

Şekil 2.1: Esnek Üstyapı Enkesiti

2.2 Taban Zemini

Bir esnek üstyapının davranışı, taban zemininin taşıma gücüyle doğrudan ilgilidir. Taban zeminlerinde yeraltı su seviyesi, tesviye yüzeyinin en az 100 cm. altında tutulmalıdır, bunu sağlayacak uygun yeraltı drenajı yapılmalıdır. Su, taban zeminlerinin taşıma gücünü azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, suyun etkili ve kalıcı bir drenaj sistemiyle inşaat sırasında ve yolun ömrü boyunca tabandan ve üstyapı tabakalarından uzaklaştırılması sağlanmalıdır. Yol üstyapıları aşırı don kabarması ve tabanın donma çözülme mevsiminde taşıma gücünün azalmasıyla zarar görebilir. Don olayının, yol üstyapısına olan etkisinin azaltılması için üstyapı taban zemininin dona karşı duyarlılığı, üstyapının toplam kalınlığı, donma indeksi, yeraltı su seviyesinin üstyapı düzeyinden ölçülen derinliği gibi faktörlerin incelenmesi gereklidir (Umar, Ağar,1991).

Taban zeminlerinin sıkıştırıldıktan sonraki kuru birim ağırlıkları en az $1,45 \text{ kg/m}^3$ değerinde olmalıdır. Karayolu Teknik Şartnamesinde kısım 206'da dolgu malzemesinin özellikleri, yapım aşamaları açıklanmıştır.

Taşıma gücü düşük taban zeminlerinin dirençlerini arttırmak, belirli koşullarda sahip olduğu direnci her türlü etki altında korumasını sağlamak amacıyla çeşitli katkı malzemeleriyle stabilizasyon yapılır. Kireçle, portland çimentosuyla ve bitümlü yapılan stabilizasyonlar yaygındır. Orta ve ince daneli zeminler, kireçle stabilize edilerek plastisiteleri düşürülür, şişmesi azaltılır, direnci yükseltilir. Karayolları Teknik Şartnamesinde Kısım 218'de kireç ile zemin stabilizasyonu hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Zemin stabilizasyonu, trafik değerine göre üstyapı projelendirilmesinde temel veya alt temel olarak da değerlendirilebilir. Hafif trafikli yollarda geçici olarak kaplama vazifesi de görebilirler. Çimento ile stabilizasyon hafif trafikli yollarda kaplama olarak, orta ve yoğun trafikli yollarda temel tabakası olarak kullanılabilir. Bitümlü malzemelerle zemin stabilizasyonunda ise zeminler bitümlü bağlayıcı, katran, katbek asfaltları ve asfalt emülsiyonları ile stabilize edilmektedir.

2.3 Alt Temel Tabakası

Alt temel tabakası, Tablo 2.1’de belirtilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin su ile karıştırılarak, ince tesviyesi tamamlanmış dolgu ve yarmadan oluşan üstyapı tabanı üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulur.

Tablo 2.1: Alt Temel Malzemesi Gradasyon Limitleri

Elek Açıklığı		TİP-A	TİP-B
mm	inç	% Geçen	% Geçen
75	3	100	-
50	2	-	100
37,5	1 1/2	85 – 100	80 – 100
25	1	-	60 – 90
19	3/4	70 – 100	-
9,5	3/8	45 – 80	30 – 70
4,75	No.4	30 – 75	25 – 60
2	No.10	-	15 – 40
0,425	No.40	10 – 25	10 – 20
0,075	No.200	0 – 12	0 – 12

Modifiye Proctor Deneyi ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığın %97’sine kadar sıkıştırılan numunelerin yaş CBR değerleri Tip A için minimum %30, Tip B için ise minimum %50 olacaktır. Alttemel yapımında kullanılacak malzemelerin diğer fiziksel özellikleri de Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Sıkıştırma, statik çizgisel yükü 30 kg/cm²’den büyük olan kendi yürür düz bandajlı vibrasyonlu silindirler veya lastik başına düşen yükü 3500 kg’dan az olmayan lastik tekerlekli sıkıştırıcılarla yapılmaktadır. Alt temel malzemesi, Tablo 2.3’de verilen değerler esas alınarak sıkıştırılacaktır.

Tablo 2.2: Alt Temel Malzemesinin Fiziksel Özellikleri

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp maksimum %	20	TS – 3655 AASHTO T – 104
Aşınma kaybı (Los Angeles) maksimum %	50	TS – 3694 AASHTO T – 96
Likit limit maksimum %	25	TS – 1900 AASHTO T – 89
Plastisite indeksi maksimum %	6	TS – 1900 AASHTO T - 90
Kil topağı ve dağılabilen tane oranı maksimum %	2 (iri malzemede) 2 (ince malzemede)	ASTM C – 142
Organik madde %	1	AASHTO T-194

Tablo 2.3: Alt Temel Sıkıştırma Kriterleri

TİP-A	Sıkışma Minimum %	95	Modifiye Proctor TS 1900 AASHTO T - 180
	Optimum Su İçeriği %	$W_{opt} \pm 2$	
TİP-B	Sıkışma Minimum %	97	Modifiye Proctor TS 1900 AASHTO T - 180
	Optimum Su İçeriği %	$(W_{opt} - 2) - W_{opt}$	

2.4 Temel Tabakası

Bir veya birden fazla tabakalar halinde yapılan temel tabakaları; granüler temel, plentmiks temel, çimento bağlayıcılı stabilize temel ve trafik yoğunluğu yüksek yollarda bitümlü temel olmak üzere dört farklı tipte inşa edilmektedir.

Sıcak bitümlü temel dışındaki diğer üç tip temel tabakasında kullanılacak agrega çakıl, kırılmış çakıl, kırma taş, kum, cüruf veya benzeri malzemelerden hazırlanacaktır. Kullanılan ince ve kaba agregaların fiziksel özellikleri Tablo 2.4 ve Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.4: Kaba Agreganın Fiziksel Özellikleri

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp maksimum %	15	TS 3655 AASHTO T-104
Aşınma kaybı (Los Angeles) maksimum %	40	TS 3694 AASHTO T – 96
Kil topağı ve dağılabilen tane oranı maksimum %	1.0 (4,75 mm elek üstü)	ASTM C – 142
Organik madde %	Bulunmayacak	AASHTO T – 194
Diğer zararlı maddeler maksimum %	1.0	

Tablo 2.5: İnce Agreganın Fiziksel Özellikleri

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Likit limit maksimum %	25	TS 1900 AASHTO T-89
Plastisite indeksi maksimum %	6	TS 1900 AASHTO T – 90
Kil topağı ve dağılabilen tane oranı maksimum %	1.0 (4,75 mm elek altı)	ASTM C – 142
Organik madde maksimum %	0,5 0–1	AASHTO T – 194 TS 3673
Diğer zararlı maddeler maksimum %	1.0	

2.4.1 Granüler Temel

Granüler temel malzemesinin 4.75 mm elek üzerinde kalan kısmının ağırlıkça en az %50'sinin iki veya daha fazla yüzü kırılmış olacaktır. Malzemenin 0.075 mm eleği geçen kısmı, 0.425 mm eleği geçen kısmının 2/3'ünden fazla olmayacaktır. Granüler temel tabakasına ait gradasyon limitleri Tablo 2.6'da verilmiştir. Asfalt betonu ile kaplanacak yollarda kullanılacak granüler temel malzemesi gradasyonu A, B tiplerinden birine uygun olacaktır. Sathi kaplama yapılacak yollarda, projede belirtilen temel tabakası kalınlığı 20 cm den az ise tabakanın tümü C tipi granüler temel malzemesi ile yapılacaktır. Eğer projede belirtilen temel tabakası kalınlığı 20

cm veya daha fazla ise tabaka, A, B veya C tipi granüler temel malzemelerinden biri ile oluşturulacaktır.

Tablo 2.6: Granüler Temel Tabakası Gradasyon Limitleri (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2006)

Elek Açıklığı		% Geçen Miktar		
mm	inç	A	B	C
50	2	100		
37.50	1 ½	80 – 100	100	
25	1	60 – 90	70–100	100
19	¾	-	60 – 92	75 – 100
9.5	¾	30 – 70	40 – 75	50 – 85
4.75	No.4	25 – 55	30 – 60	35 – 65
2.00	No.10	15 – 40	20 – 45	25 – 50
0.425	No.40	8 – 20	10 – 25	12 – 30
0.075	No.200	2 – 8	0 – 12	0 – 12

BS 812 metodu ile bulunan yassılık indeksi, en fazla % 40 olacaktır. Modifiye Proctor ile bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlığın %98'ine kadar sıkıştırılan numunelerin yaş CBR değerleri, % 100'den az olmayacaktır. Granüler Temel malzemesi Tablo 2.7'de verilen değerler esas alınarak sıkıştırılacaktır.

Tablo 2.7: Granüler Temel Tabakası Sıkıştırma Kriterleri

Sıkışma minimum %	98	Modifiye Proctor TS 1900 ASHTO T - 180
	95	Titreşimli Tokmak TS 1900 BS 1377
Optimum su içeriği %	W(opt-2) – Wopt Wopt ± 1	Modifiye Proctor Titreşimli Tokmak

2.4.2 Plentmiks Temel

Plentmiks temel tabakası kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak Tablo 2.8'de verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun

oranda suyla bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

Tablo 2.8: Plent-Miks Temel Tabakası Gradasyon Limitleri

Elek Açıklığı		% Geçen Miktar	
mm	inç	Tip - I	Tip- II
37.50	1 ½	80 – 100	100
25	1	60 – 90	70–100
19	¾	-	60 – 92
9.5	¾	30 – 70	40 – 75
4.75	No.4	25 – 55	30 – 60
2.00	No.10	15 – 40	20 – 45
0.425	No.40	8 – 20	10 – 25
0.075	No.200	2 - 8	0 – 12

Yeterli sıkıştırma ile erişilmesi istenen minimum sıkışma yüzdeleri Tablo 2.9’da görülmektedir.

Tablo 2.9: Plent-Miks Temel Tabakası Sıkıştırma Kriterleri

Sıkışma minimum %	100	Modifiye Proctor TS 1900 ASHTO T - 180
	97	Titreşimli Tokmak TS 1900 BS 1377
Optimum su içeriği %	W(opt-1) – Wopt Wopt ± 0.5	Modifiye Proctor Titreşimli Tokmak

2.4.3 Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel

Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırma taş ve ince malzeme kullanılarak Tablo 2.10’da verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanır. Malzemenin uygun oranlarda çimento ve su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan karışımın bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

Kullanılacak çimentolar, TS EN 197-1’de belirtilen şartlara uygun olacaktır. Çimentonun teknik kontrolleri, TS EN 196-1 standartında belirtilen esaslara göre yapılacaktır (KGM, 2006)

Tablo 2.10: Çimento Bağlayıcı Granüler Temel Tabakası Gradasyon Limitleri

Elek Açıklığı		% Geçen Miktar
mm	inç	
37.5	1 ½	100
25	1	72 – 100
19	¾	60 – 92
9.5	¾	40 – 75
4.75	No.4	30 – 60
2.00	No.10	20 – 45
0.425	No.40	8 – 25
0.075	No.200	0 – 10

2.4.4 Bitümlü Temel

Kırılmış ve elenmiş kaba agrega, ince agrega ve mineral fillerin belirli gradasyon limitleri arasında, işyeri karışım formülü esaslarına uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak bir veya birden fazla tabakalar halinde sıcak olarak serilip, sıkıştırılmasıyla oluşturulan temel tabakasıdır. Gradasyon limitleri Tablo 2.11’de verilmiştir.

Tablo 2.11: Bitümlü Temel Tabakası Gradasyon Limitleri

Elek Açıklığı		% Geçen Miktar	
mm	inç	Tip - A	Tip- B
37.50	1 ½	100	100
25	1	72 – 100	80 – 100
19	¾	60 – 90	70 – 90
12.5	½	50 – 78	61 – 81
9.5	¾	43 – 70	55 – 75
4.75	No.4	30 – 55	42 – 62
2.00	No.10	18 – 42	30 – 47
0.425	No.40	6 – 21	15 – 26
0.180	No.80	2 – 13	7 – 17
0.075	No.200	0 – 7	1 – 8

Kaba agrega BS 812'ye göre test edildiğinde, yassılık indeksi %35 den fazla olmayacak, taneler kübik ve köşeli olacaktır. Soyulmaya karşı mukavemeti en az %50 olacaktır. Su emme yüzdesi de 2.5'den fazla olmayacaktır. Kaba agreganın diğer özellikleri de Tablo 2.12'de verilmiştir.

Tablo 2.12: Bitümlü Temel Tabakasında Kullanılan Kaba Agreganın Özellikleri

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp maksimum %	12	TS 3655 AASHTO T-104
Aşınma kaybı (Los Angeles) maksimum %	35	TS 3694 AASHTO T – 96
Kırılmışlık (en az iki yüzü) ağırlıkça minimum %	100	-
Kil topağı ve dağılabilen tane oranı maksimum %	1.0	ASTM C – 142
İndirek çekme mukavemeti oranı minimum %	80	AASHTO T – 283

Karışımında kullanılacak doğal kum, ince agrega özelliklerine sahip olacak ve miktarı karışımdan istenilen stabilite, akma ve boşluk değerlerinin sağlanması şartıyla tespit edilecektir. İnce agreganın özellikleri Tablo 2.13'de verilmiştir.

Tablo 2.13: Bitümlü Temel Tabakasında Kullanılan İnce Agreganın Özellikleri

Özellikler	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Plastisite indeksi maksimum %	2	TS 1900
Kil toprakları ve ufalanabilir taneler maksimum %	1.0	ASTM C-142
Organik madde miktarı maksimum %	0.5	TS 3673 AASHTO T-194

Bitümlü temel tabakasında bitümlü bağlayıcı olarak TS 1081 EN 12591 (Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar - Kaplama Sınıfı Bitümler – Özellikler) standardına uygun

40/60, 50/70 veya 70/100 penetrasyonlu bitüm kullanılacaktır. İklim koşullarına bağlı olarak kullanılacak bölgeye göre bitümün cinsi idarece belirlenecektir.

Bitümlü temelin karışım tasarımı TS 3720 (Bitümlü Kaplama Karışımlarının Hesap Esasları) standardına göre Marshall metodu kullanılarak yapılacaktır. Bitümlü Temel Tabakası için tasarım ölçütleri Tablo 2.14’de belirtilmiştir.

Tablo 2.14: Bitümlü Temel Tasarım Ölçütleri

Özellikler	Min.	Maks.
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	75	
Marshall stabilitesi kN (kg)	6,00 (600)	-
Boşluk (%)	4	7
Bitümle dolu boşluk (%)	55	70
Agregalar arası boşluk (%)	12	-
Akma (mm)	2	5
Bitüm (ağırlıkça %)	3.0	5.5

2.5 Kaplama Tabakaları

Kaplama tabakası, üst yapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle kaplama tabakası, üst yapının diğer tabakalarına göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olmalıdır. Kaplama tabakaları yüzeysel (sathi) kaplamalar, bitümlü sıcak karışımlar ve taş mastik asfalt kaplamaları olarak sınıflandırılmaktadır.

2.5.1 Yüzeysel Kaplamalar

Yüzeysel kaplamalar, yol yüzeyine ince bir film halinde asfalt veya katran veya her ikisinin karışımını serip bunun üzerine de tabaka halinde agrega örterek yapılan kaplama şeklidir. Yüzeysel kaplamaların yapımı kolay ve ucuzdur. Kaplamanın uzun ömürlü olabilmesi için gereken kontroller iyi yapılmalıdır. Yüzeysel (Sathi) kaplamalar üç gruba ayrılır:

- Tek Tabakalı Bitümlü Yüzeysel Kaplama: Granüler, plent-miks, çimento bağlayıcılı granüler temel veya benzer temeller ile asfalt kaplamalar üzerine

ince bir tabaka halinde bitümlü bağlayıcı uygulaması yapıp, hemen sonra bunun üzerine agreganın serilip silindirilmesi ile yapılan kaplamadır.

- Çift Tabakalı Bitümlü Yüzeysel Kaplama: Temel tabakası üzerine birbiri ardından iki kat yüzeysel kaplama yapılmasıyla elde edilen tabakadır. Tek ve çift tabakalı bitümlü yüzey kaplamalarının yapımında kullanılan malzemelerin özellikleri, gradasyonları, yapımı Karayolları Teknik Şartnamesinde 403 ve 404 nolu bölümlerde açıklanmıştır.
- Bitümlü Koruyucu Yüzeysel Kaplama (Seal Coat): Mevcut herhangi bir tipte bir kaplama veya bitümlü bir temel tabakası üzerine bitümlü bağlayıcı ve agregadan oluşan koruyucu yüzeysel tabakasının serilmesiyle oluşan kaplamadır. Bitümlü bağlayıcı ve agrega ayrı ayrı ve birbirinin peşi sıra uygulanmakta ve agregalar silindirle sıkıştırılmaktadır. Bu kaplama tabakasının kalınlığı 12,5 mm den fazla olmayacaktır. Agregada gradasyonu karayolları teknik şartnamesinde kısım 405’de verilen Tip-A, Tip-B veya Tip-C’den birine uyucak şekilde hazırlanacaktır. Agregaların özellikleri de Tablo 2.15’de verilmiştir.

Tablo 2.15: Agregaların Özellikleri

Deney Adı	Şartname	Deney Standardı
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp maksimum %	12	AASHTO T-104
Aşınma kaybı (Los Angeles) maksimum %	30	TS 3694 AASHTO T – 96
Yassılık indeksi maksimum %	25	BS 812
Cilalanma değeri minimum %	50	TS EN 1097 – 8
Soyulma mukavemeti minimum %	50	

2.5.2 Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamaları (Asfalt Betonu)

Asfalt betonu aşınma tabakasını, binder tabakasını veya bunların her ikisini birden kapsar. Karışımın agrega gradasyonu binder tabakası için Tablo 2.16'da, aşınma tabakası için de Tablo 2.17'de verilmiştir.

Kaba agrega; kırma taş, kırma çakıl veya bunların karışımından oluşacaktır. Kaba agrega taneleri kübik ve keskin köşeli olacaktır. Soyulmaya karşı mukavemeti en az %50 olacaktır. İnce agrega temiz, sağlam ve dayanıklı olacak, plastisite indeksi % 2'den fazla olmayacaktır.

Tablo 2.16: Binder Tabakası için Gradasyon Limitleri

Elek Açıklığı		% Geçen Miktar
mm	inç	
25	1	100
19	3/4	80 – 100
12.50	1/2"	58 – 80
9.5	3/8	48 – 70
4.75	No.4	30 – 52
2.00	No.10	20 – 40
0.425	No.40	8 – 22
0.180	No.80	5 – 14
0.075	No.200	2 – 7

Tablo 2.17: Aşınma Tabakası için Gradasyon Limitleri

Elek Açıklığı		% Geçen Miktar	
mm	inç	Tip - I	Tip- II
19	3/4	100	-
12.50	½	83 – 100	100
9.5	3/8	70 – 90	80 -100
4.75	No.4	40 – 55	55 -72
2.00	No.10	25 – 38	36 -53
0.425	No.40	10 – 20	16 – 28
0.180	No.80	6 -15	8 -16
0.075	No.200	4 -10	4 -10

Mineral filler, tamamı 0.425 mm elekten geçip, ağırlıkça en az % 70'i 0.075 mm elekten geçen malzeme olarak tanımlanmaktadır. Mineral fillerin elek analizi AASHTO T – 37 ye göre yapılacaktır.

Bu üç grup malzemenin her biri bitümlü karışımın ayrı ayrı özelliklerini kontrol eder. Bitümlü karışımdaki iri agrega yüzdesi %40-50'ye çıkarılırsa, iki agrega karışımın mekanik direncini artıran bir iskelet oluşturur; böylece karışımın direncinde önemli bir artış hissedilir. İnce agrega ise iri agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar. Bu arada ince agreganın yüzey dokusu da önemlidir. Örneğin; pürüzsüz bir çakıl kumu daha düşük bir deformasyon direnci sağlamaktadır. Mineral filler, toplam agreganın çok düşük yüzdesini oluşturmasına karşın, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde rol oynar. Mineral filler düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalıdır. Tanelerin şeklide önemlidir, yassı, düz ve uzun tanelerin yüzdesinin artması fillerin özelliğini düşürür. Filler bitümlü malzemeye reaksiyona girmemelidir. Mineral filler taş tozu, mermer tozu, portland çimentosu sönmüş kireç ya da benzeri maddelerde oluşacak kil, toprak, organik ve zararlı madde kapsamayacaktır (İlcalı ve diğ., 2001). İnce ve kaba agregada aranan fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 2.18 ve Tablo 2.19'da verilmiştir. Mineral fillerin şartname limitleri de Tablo 2.20'de görülmektedir.

Tablo 2.18: İnce Agreganın Özellikleri

Özellikler	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Plastisite indeksi maksimum %	2	2	TS 1900
Kil toprakları ve ufalanabilir taneler maksimum %	0.5	0.5	ASTM C-142
Organik madde miktarı maksimum %	0.5	-	TS 3673 AASHTO T-194

Tablo 2.19: Kaba Agreganın Özellikleri

Deney Adı	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp maksimum %	12	10	TS 3655 AASHTO T-104
Aşınma kaybı (Los Angeles) maksimum %	35	30	TS 3694 AASHTO T – 96
Kırılmışlık (en az iki yüzü) ağırlıkça minimum %	100	100	-
Yassılık indeksi maksimum %	35	30	BS 812
Cilalanma değeri minimum %	-	50	TS EN 1097 – 8
Su emme değeri maksimum %	2.5	2.0	TS 3526 ASTMC - 127
Soyulma mukavemeti minimum %	50	50	
Kil topağı ve dağılabilen tane oranı maksimum %	0.5	0.5	ASTM C – 142
İndirek çekme mukavemeti oranı minimum %	80	80	AASHTO T – 283

Tablo 2.20: Mineral Fillerin Gradasyon Limitleri ve Sağlaması Gereken Diğer Şartlar (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2006)

Gradasyon Limitleri		Organik Kirlilik	Plastisite İndeksi
Elek Boyu	Ağırlıkça % Geçen		
0,425 mm (No.40)	100	Mineral fillerden kil, toprak, organik ve zararlı maddeler uzaklaştırılmış olmalıdır.	Mineral fillerin plastisite indeksi %4 'ten büyük olmayacak, kolayca akabilecek kadar kuru olacak ve içerisinde topraklar bulunmayacaktır.
0,075 mm (No.200)	70–100		

Asfalt betonunun karışım tasarımı TS – 3720 ‘ye göre Marshall metodu kullanılarak yapılacaktır. Tasarım değerleri Tablo 2.19’da verilmiştir.

Tablo 2.21: Asfalt Betonu Tasarım Ölçütleri

Özellikler	BİNDER		AŞINMA	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	75			
Marshall stabilitesi kN (kg)	7,50 (750)	-	9,00 (900)	-
Boşluk (%)	4	6	3	5
Bitümlü dolu boşluk (%)	60	75	65	75
Agregalar arası boşluk (%)	13	-	14	-
Akma (mm)	2	4	2	4
Bitüm (ağırlıkça %)	3.5	6.5	4.0	7.0

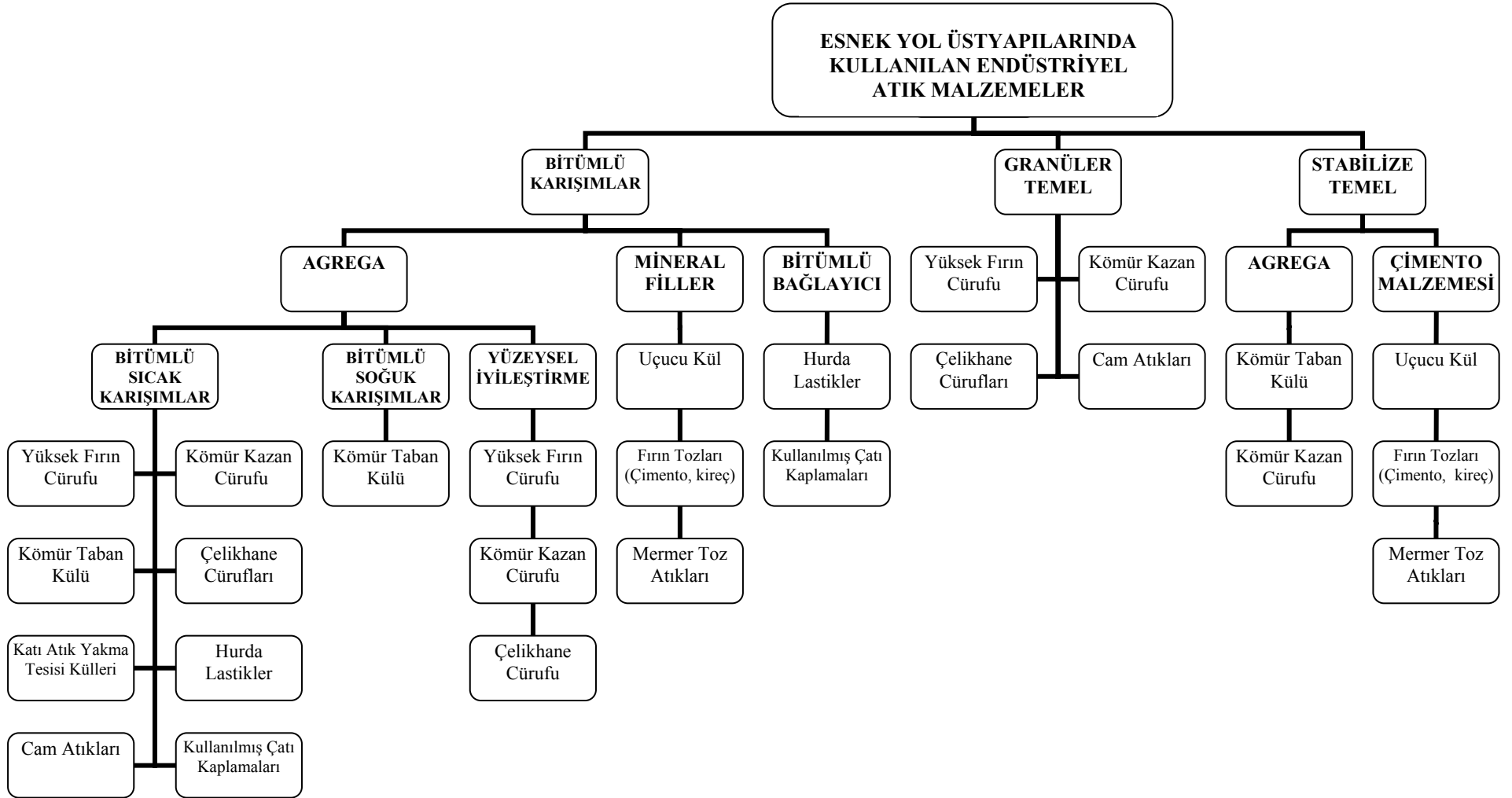
3. KARAYOLLARINDA KULLANILAN ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELER

3.1 Giriş

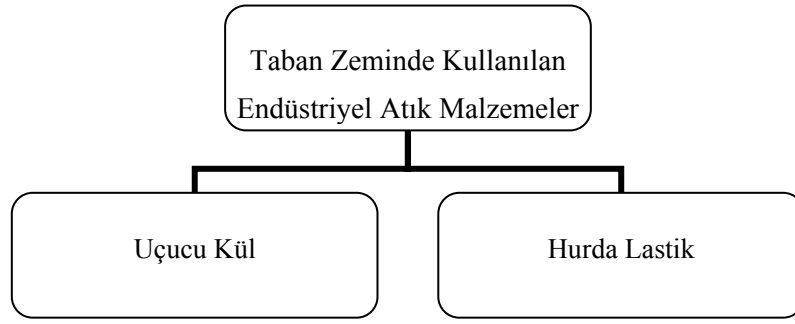
Endüstriyel atıklar, endüstriyel işlemler sonucunda oluşan malzemelerdir. Termik santrallerde oluşan küller, demir çelik endüstrisinde oluşan yüksek fırın ve çelikhane cürüfları, çimento endüstrisinin yan ürünü olan fırın tozları, mermer endüstrisinde oluşan mermer toz atıkları, hurda otomobil lastikleri, cam endüstrisinden elde edilen cam kırıkları endüstriyel katı atık sınıfına girmektedir. Dünyada, bu endüstriyel atıkların çoğu karayollarında taban zemininden kaplama tabakasına kadar her tabakada kullanılma olanağına sahiptir. Karayollarında kullanılan geleneksel malzemeler yerine atık malzemeler kullanılarak daha düşük maliyetlerle, daha yüksek performansta, çevre dostu yollar yapılabilir.

Bu bölümde, karayollarında kullanılan endüstriyel atıkların tanımları yapılacak, fiziksel, kimyasal ve teknik özellikleri üzerinde durulacaktır. Karayollarında kullanıldığı tabakalardan, kullanıldığı tabakaya göre kullanım miktarlarından ve kullanımını sırasında dikkat edilmesi gerekenler anlatılacaktır.

Yol üst yapılarında kullanılan endüstriyel atık malzemelerin sınıflandırılması Şekil 3.1'de, taban zemininde dolgu malzemesi olarak kullanılan endüstriyel atıklar ise Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.1: Yol Üstyapılarında Kullanılan Endüstriyel Atık Malzemelerin Sınıflandırılması



Şekil 3.2: Taban Zeminde Kullanılan Endüstriyel Katı Atık Malzemeler

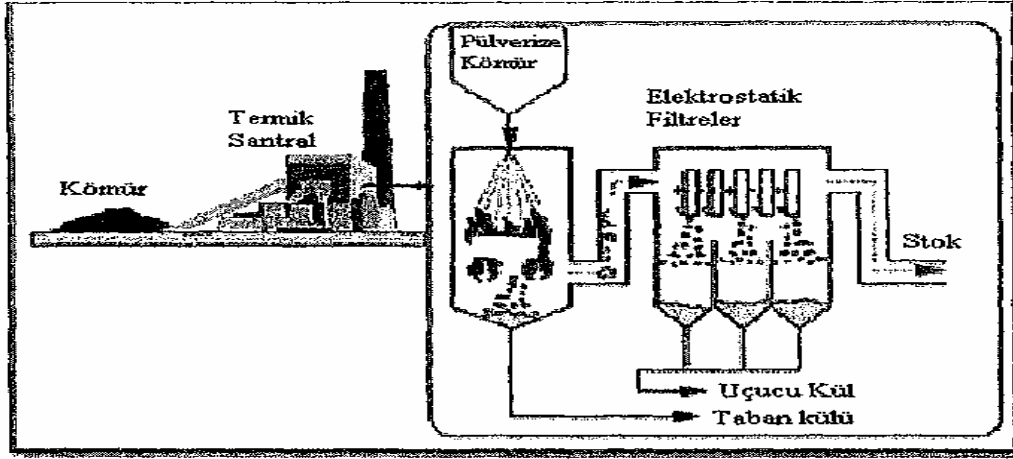
3.2 Termik Santral Atıkları

Elektrik enerjisi termik, hidroelektrik ve nükleer santrallerden sağlanmaktadır. Yeterli kömür ve linyit potansiyeline sahip olan ülkemizde de elektrik üretiminin büyük bir kısmı için katı fosil yakıtların yakıldığı termik santraller kullanılmaktadır. Termik santrallerde elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve genellikle elektro filtreler yardımıyla tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutundaki kül taneciklerine uçucu kül denilmektedir.

Oluşan yan ürünün (uçucu kül, taban külü veya kazan cürufu) çeşidi, kömürü yakmak için kullanılan kazanın cinsine göre değişmektedir.

Termik santrallerde kömürü yakmak için üç tip kazan kullanılmaktadır. Bunlar kuru taban kazanları, ıslak taban kazanları ve siklon fırınlarıdır.

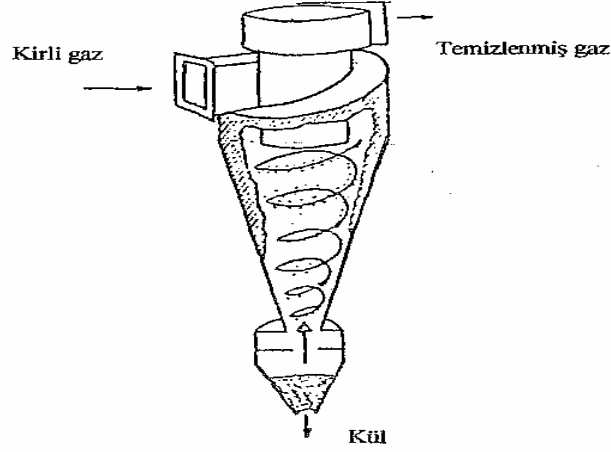
En sık kullanılan, kuru taban kazanlarıdır. Şekil 3.3’de uçucu külün elektro filtreli kuru taban kazanında üretimi görülmektedir. Toz haline getirilmiş kömür, kuru taban kazanında yandığı zaman, yanmayan malzemenin (külün) %80’i uçucu gaz haline gelir ve uçucu kül olarak tutulur. Külün geriye kalan % 20’lik kısmı; koyu gri renkte, granül (taneli), gözenekli, baskın olarak kum boyutunda olan kuru taban külüdür. Bu malzeme, fırının tabanında yer alan su dolu silolarda toplanır. Siloya yeterli miktarda taban külü girdiğinde, yüksek basınçlı su jetleri kullanılarak uzaklaştırılır ve savak yatakları yardımıyla atık göletine veya kullanılmak üzere depo edileceği havuzlara taşınır (Hecht ve Duvall, 1975).



Şekil 3.3: Uçucu Külün Elektro Filtreli Kuru Tabanlı Kazanda Üretilmesi

İki çeşit ıslak taban kazanı vardır: Cüruf akıtan kazan ve siklon kazanı. Cüruf akıtan kazan, pulverize (toz haline getirilmiş) kömürü, siklon kazanı ise ezilmiş kömürü yakar. Her ikisinde de, taban külü erimiş halde saklanır ve sıvı gibi akıtılır. İki kazan cinsinde de delikli bir katı taban bulunur. Bu delik sayesinde, tabanda toplanan erimiş kül, alt taraftaki kül silosuna aktarılabilir. Islak taban fırınlarındaki kül silosu, erimiş halde bulunan külü soğutmak için gerekli miktarda su içermektedir. Erimiş cüruf, suyla birleştiğinde aniden çatlar, kristalleşir ve küçük topraklar oluşur. Sonuçta oluşan kazan cürufu "kara güzellik" olarak isimlendirilir. Bu malzeme; kaba taneli, sert, köşeli, siyah renkli ve donuktur.

Siklon fırınlarında ise yakıt olarak ezilmiş kömür kullanılır, oluşan külün %70-80'i kazan külü olarak kalırken, %20-30'u baca gazıyla uçucu kül olarak dışarı çıkar. Uçucu küller tane boyutunun büyük olduğu durumlarda mekanik tutucular yani siklon ayırıcıları yardımıyla filtre torbalarına toplanırlar. Siklon ile uçucu küllerin toplanması da Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4: Uçucu Külün Siklon ile Toplanması

Termik santrallerde linyit kömürünün yanması sonucu SO_2 ve Sülfür bileşimli gazlar, atmosfere dağılarak çevre kirliliğine ve asit yağmurlarına sebep olmaktadır. Bu gazların tutulması için, kireçtaşı püskürtme yöntemi kullanılan desülfürizasyon (kükürt arıtma) tesisleri kurulmuştur. Bu tesiste yapılan işlemlerin sonucunda kimyasal jips (alçı) olarak da adlandırılan desülfojips atıkları oluşmaktadır.

3.2.1 Uçucu Küller

TS 639'a göre uçucu kül, toz halinde veya öğütülmüş taşkömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan ve baca gazları ile sürüklenen, silis ve alümino-silisli, toz halinde bir yanma kalıntısı olarak tanımlanmaktadır (TS 639,1998).

Uçucu küller seramik ve cam üretiminde, kimya, metalürji sanayisinde, çevre ve biyoteknoloji sektöründe, petrol kuyuları sondajlarında, maden ocaklarında mineral filler olarak, buzlanmanın önlenmesinde, tarım sektöründe ve en çokta inşaat sektöründe kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe çimento sanayisinde hammadde olarak, beton ve harç içerisinde agrega olarak, beton üretiminde, tuğla, gaz beton üretiminde, kerpiç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak, yalıtım malzemesi olarak, duvar, harç, cam, beton borular gibi yapı malzemelerinin üretiminde, dolgu yapımında, zemin stabilizasyonunda, atık depo sahalarında sızdırmazlık sağlamak amacıyla, istinat duvarlarında duvar arka dolgusu olarak, yol yapımında kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006). Karayolunda dolgu yapımında, stabilize alt temel

ve temel tabakalarında kireç veya çimentoyla veya her ikisiyle beraber, asfalt kaplamalarda mineral filler olarak, rijit kaplamalarda beton kalitesini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır.

3.2.1.1 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küller, kömürün cinsine, ezilme ve toz haline getirilme işlemlerine, kazan çeşidine ve yanma metoduna, toplama ve stoklama işlemlerine bağlı olarak değişik özellikler göstermektedir. Uçucu küller küre şeklinde ince taneli, katı veya boşluklu, doğada çoğunlukla camsı (amorfe) yapıda olan parçacıklardan oluşurlar. Uçucu kül senosfer adı verilen mikro baloncuklar içerir. Senosfer, büyük oranda silis ve alümina içeren, hava veya gazlarla dolu olan, hafif, etkisiz, içi boş bir küredir ve sentetik içi boş kürelerle aynı özelliklere sahiptir. Senosfer, sıkıştırılmadaki yüksek gücü, kontrollü boyut dağılımı, üstün termal ve yalıtım özelliklerinden dolayı birçok uygulamada kullanılabilir (Özdemir, 2001). Uçucu külün içerisindeki yanmamış karbon malzeme köşeli tanecikler içermektedir. Uçucu külün tane boyutu genelde silte benzer, 0.075 mm'den daha küçüktür (0.076–0.002 mm). Az bitümlü kömür uçucu küllerinin taneleri, bitümlü kömüre göre biraz daha iridir.

Uçucu külün özgül ağırlığı 21–30 kN/m³ değerleri arasında değişmektedir. Bulk yoğunluğu ise 8,5 -15 kN/m³ arasında değerler almaktadır. Düşük Bulk yoğunluğu, uçucu küllerin hafif dolgu malzemesi olarak kullanılmasına imkân vermektedir. Türkiye'deki uçucu küllerin yoğunlukları Tablo 3.1'de görülmektedir (Özdemir, 2001). Uçucu külün özgül yüzeyi çimento inceliğine sahip olduğundan öğütme yapılmadan kullanılabilir, yüzeysel alanı ise 170–1000 m²/kg arasındaki değerlere sahiptir.

Bitümlü kömürlerin uçucu küllerinin genellikle renkleri gridir. Külün gri renginin açılması, kalitesinin arttığını gösterir. Uçucu külün içerisindeki yanmamış karbon miktarına bağlı olarak rengi açık kahverengi, gri veya siyah arasında çeşitlilik göstermektedir.

Tablo 3.1: Türkiye'deki Uçucu Küllerin Yoğunlukları

Uçucu Kül	Bulk Yoğunluğu (kN/m ³)	Özgül Ağırlık (kN/m ³)
Yatağan	10,7	19,9
Soma	9,5	21,2
Seyitömer	8,8	15,8
Yeniköy	14,4	29,9
Çatalağzı	10,7	19,5
Afşin-Elbistan	10,5	27,0
Tunçbilek	11,1	18,3

3.2.1.2 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

ASTM C 618'e göre uçucu küller iki sınıfa ayrılmaktadır. F sınıfı küller, bitümlü kömürlerin (taşkömürü) yanmasıyla oluşur ve daha az miktarda (%10'dan daha az) kireç (CaO) içerir. C sınıfı küller ise linyit kömürünün yanmasıyla elde edilir ve daha çok kireç (%10–40 arasında) içerir. C sınıfı uçucu küllerin, puzolonik özelliğine ek olarak bağlayıcı yani kendi kendine sertleşme özelliği de mevcuttur. Sertleşme özelliği içerisinde bulunan kirecin varlığındandır. Aynı zamanda C sınıfı uçucu küller, herhangi bir reaksiyona ihtiyaç duymazlar, bu nedenle uygulamada daha kolay kullanılırlar. Böylece zemin iyileştirme uygulamaları kolay ve ekonomik olmaktadır (Hausmann, 1990). Tablo 3.2'de ASTM C 618 standardına göre iki sınıf uçucu külün limit değerleri verilmiştir. Bütün uçucu küller silika, alümina ve demir oksit miktarı bakımından zengindirler.

Tablo 3.2: ASTM C 618 Standartları

Oksit miktarı (%)	F Sınıfı	C sınıfı
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	>70	>50
MgO	<5	<5
SO ₃	<5	<5
Kızdırma kaybı	<12	<6
Suda çözülebilen alkaliler	<1.5	<1.5

Türkiye’de oluşan uçucu küllerin tanımı, sınıflandırılması, özellikleri ASTM C 618 standardının benzeri olan TS 639’a göre yapılmaktadır. Uçucu küller, TS EN 197-1’e göre de silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere 2 sınıfa ayrılmaktadır (Türker ve diğerleri, 2004).

Puzolanlar, silisli ve alüminli malzemelerdir ve kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri yoktur veya çok azdır. Çok ince taneli olduklarından söndürülmüş kireç ve suyla karıştırıldıklarında hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren volkanik küllerdir. Uçucu küllerdeki silis, alüminyum oksit, nemlilik ve kireç içeriği, ince tane yüzey alanı uçucu külü yapay puzolanlar sınıfına sokmaktadır (Ün, 2007). Puzolanların sınıflandırılması Tablo 3.3’de yapılmıştır. Yapay puzolan sınıfında yer alan yüksek fırın cürufundan da sonraki bölümlerde bahsedilecektir.

Tablo 3.3: Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar	
Doğal puzolanlar	Yapay puzolanlar
Volkanik cüruflar	Uçucu küller
Volkanik tüfler	Yüksek fırın cürufu
Opalin silka	Silika dumanı
Pomza taşları	Pirinç kapçığı külü
Pişmiş (Kalsine) kil veya şeyl	Demirli olmayan cüruflar
	Öğütülmüş pişmiş kil

Tablo 3.4’de değişik kömür çeşitlerinden üretilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri verilmiştir. Linyit ve az bitümlü kömürlerden elde edilen uçucu küller yüksek kalsiyum oksit içeriğine ve daha yüksek sülfat içeriğine sahiptirler (ASTM C204,1994).

Tablo 3.4: Değişik Kömür Çeşitlerinden Üretilen Uçucu Küllerin Kimyasal Yapısı

Bileşimler	Bitümlü Kömür	Az Bitümlü Kömür	Linyit Kömürü
SiO ₂	20–60	40–60	15–45
Al ₂ O ₃	5–35	20–30	10–25
Fe ₂ O ₃	10–40	4–10	4–15
CaO	1–12	5–30	15–40
MgO	0–5	1–6	3–10
SO ₃	0–4	0–2	0–10
Na ₂ O	0–4	0–2	0–6
K ₂ O	0–3	0–4	0–4
Tutuşturulma sonrası uçucu külden kalan yanmamış karbon	0–15	0–3	0–5

Türkiye’de halen faaliyet gösteren 11 termik santralinin kimyasal, minerolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında detaylı bilgi, Türker ve diğerlerinin hazırladığı “Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri” adlı kaynakta bulunmaktadır.

Uçucu kül; yüksek karbon içeriği, birim hacimdeki geniş yüzey alanı ve içerdiği Al, Fe, Ca, Mg ve Si gibi elementlerden dolayı birçok organik kirleticiyi uzaklaştırma kabiliyetine sahiptir. Bundan dolayı; çevresel açıdan uygun özellikler göstermektedir (Bayat, 2002).

Uçucu küller, diğer toprak ve taşlara göre önemli derecede radyoaktif elementlere sahip değildir. Yapılan bir çalışmada, su içerisinde uçucu külden çözünen radyum ve uranyum değerlerinin limitler içerisinde olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda uçucu kül depolama sahalarında, yeraltı suyuna geçen radyoaktif elementlerin yoğunlaşmalarının insan sağlığını tehlikeye sokacak limit değerlerin altında olduğu gözlenmiştir (Özdemir, 2001).

3.2.1.3 Uçucu Küllerin Mühendislik Özellikleri

Uçucu küller, yaklaşık silt boyutunda ve içleri boş küresel tane yapısına sahip olduğu için killerin aksine plastik olmayan bir malzemedir. Silte ve siltli kile göre içlerinde daha çok su tutmaktadırlar.

Yapılan çalışmalarda CBR değeri su emdirilmiş numunelerde %6,8–13,5 ve su emdirilmemiş numunelerde ise %10,8–15,4 değerleri arasında değişmektedir.

Uçucu külün geçirimsizliği cinsine göre değişmektedir. Bitümlü kömürlerde 10^{-4} - 10^{-7} , az bitümlü kömürde 10^{-5} - $3*10^{-6}$, linyit kömüründe ise $9*10^{-6}$ - 10^{-7} değerlerini almaktadır. Kilin geçirgenliği, uçucu kül ile karıştırılması sonucu azalmaktadır. Araştırmalara göre en iyi permeabilite değerini %15 kireç veya %10 bentonit ilavesinin verdiği görülmektedir. Çimento ilavesi de geçirgenliği azaltmaktadır (Aksoy, 1992). Uçucu külün kumla karıştırılması sonucu kumun permeabilite değeri 10^{-4} m/sn değerinden 10^{-7} m/sn değerine düşmektedir (Güngör, 1996).

Soğuk bölgelerde dondan etkilenmemesi için yol inşaatlarında kullanılacak uçucu külün çimento ile stabilize edilmesi gerekmektedir. Çünkü uçucu kül silt boyutunda olup, kapiler su yükselmesi 2 metre veya daha yüksek olabilmektedir (Aksoy, 1992).

Uçucu kül aynı tane boyutuna sahip iyi derecelenmiş zemine göre kuru birim hacim ağırlık/su içeriği değerlerinde daha az duyarlı olması, uçucu külün daha fazla hava boşluğuna sahip olmasındandır. Doğal zeminler maksimum kuru birim hacim ağırlığına ulaştıklarında %1–5 arasında, uçucu küller ise % 5–15 arasında değişen hava boşluğuna sahip olurlar. Yüksek hava boşluğu kompaksiyon sırasında boşluk suyu basıncı oluşmasını sınırlar, böylelikle uçucu kül geniş bir su içeriği aralığında sıkışabilir. Uygulanan sıkıştırma enerjisi artınca, uçucu külün kuru birim hacim ağırlığında meydana gelen artış doğal zemin çeşitlerinin sıkıştırılmasıyla oluşan artış kadar fazla olmamaktadır. Kompaksiyon sonucu elde edilen kuru birim hacim ağırlığının düşük olması ve sürtünme açısının yüksek olması düşük zemin itkileri meydana getirecektir. Bu özellikleri, uçucu külün yol inşaatlarında kullanımının uygun olduğunu göstermektedir (Toth ve diğerleri, 1988).

Uçucu kül kuru halde toplanmışsa kohezyonsuz ve elastik bir özellik göstermektedir. Kohezyon eksikliği kendi kendine sertleşme özelliği olmayan F sınıfı uçucu külün aşınmasına sebebiyet verir.

C sınıfı uçucu kül, kireç içerdiğinden suyla temas ettiğinde zamanla sertleşir. C sınıfı uçucu külün çabuk sertleşme özelliğine, yol inşaatı sırasında dikkat edilmelidir. C sınıfı uçucu küllü karışıma su eklendikten sonra sıkıştırma işlemi ya hızlı bir şekilde

tamamlanmalı ya da sertleştirmeyi geciktirici katkı malzemesi kullanılmalıdır (Wasti, 1990).

3.2.1.4 Uçucu Küllerin Karayollarında Kullanılması

Uçucu küller; karayolunda dolgu yapımında, stabilize alt temel ve temel tabakalarında kireç veya çimentoyla veya her ikisiyle beraber, asfalt kaplamalarda mineral filler olarak, rijit kaplamalarda ise beton kalitesini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Uçucu kül, bitümlü karışımlarda uzun yıllardır mineral filler malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bilindiği gibi, bitümlü kaplama karışımlarındaki mineral filler 0,075 mm boyutundaki elekten geçen malzemedir, kaplama karışımındaki boşlukları doldurur, karışımın stabilitesini ve karışımındaki bağlayıcının kohezyonunu artırır. Kaba ve ince agreganın karışım gradasyonu 0,425 mm (No.40) elekten geçen malzeme miktarı yönünden yetersiz ise, agregaya karışımına mineral filler ilave edilmelidir. Agregaya karışımına ilave edilen mineral fillerin 0,075 mm (No.200) elek üzerinde kalan kısmı ince agregaya olarak kabul edilecektir (Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006). Uçucu küllerin büyük bir kısmı mineral filler için verilmiş olan şartnamelerdeki fiziksel ve kimyasal özellikleri ve gradasyon şartlarını sağlar. Yani boyut olarak 0,075 mm'den daha küçük parçacıklar içerir, plastik olmayan özellik gösterir ve kimyasal içeriği mineral fillerin organik içeriğine uyar. Sıcak karışımlara eklenen uçucu kül miktarı genelde agreganın kuru ağırlığının % 5'i kadardır. Kullanımında kuru olmasına ve depolanmasına dikkat edilmelidir. Uçucu kül kuru şekilde termik santralden toplanıp silolarda stoklanır. Başka ek bir işleme gerek yoktur. Pnömatik (hava veya gaz basıncı ile işleyen) taşıyıcı araçlara yüklenip, sıcak bitümlü karışımlara asfalt plentinde eklenirler. Aynı zamanda yüksek oranda kireç (CaO) içeren uçucu küller, asfalt kaplama karışımlarında soyulmayı önlemektedir. Uçucu külün gradasyon, organik kirlilik ve plastisite özellikleri sıcak bitümlü karışımlarda kullanılan mineral fillerin şartname gereksinimlerini kolaylıkla sağlamaktadır.

Uçucu külün sıcak bitümlü karışımlarda kullanımıyla kaplamaların performansı artmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların soyulma dayanımı ve esneklik modülü yükselmektedir.

Uçucu küller stabilize temel ve alt temelerde tek başına kullanılmazlar. Çimento ve kireçle stabilize edilmiş uçucu külün bu tabakalarda kullanımı performansı arttırmaktadır. Bu karışımlar aynı zamanda geleneksel temel malzemelerine göre daha ekonomiktirler. Karşılaşılan tek sorun oluşan çatlaklardır. Bu çatlaklar yorulma çatlaklarından ziyade rötre çatlaklarıdır ve genelde asfalt kaplama yüzeyine yansımaktadırlar.

Uçucu kül puzolanik özelliğe sahip olduğundan stabilize temel tabakasında bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilir. Puzolan uçucu küller kullanılırken puzolanik reaksiyonu başlatabilmek için mutlaka bir kimyasal bağlayıcı kullanılmalıdır. Puzolan stabilize temel karışımlarında sıklıkla kullanılan kimyasal bağlayıcı kireç veya portland çimentosudur. Kireç ve çimento fırınlarının tozları da kullanılabilir. Kireçle portland çimentosunun veya fırın tozlarının bileşimi de temel karışımlarında kullanılmaktadır. Bu tip temel tabakasının performansı, uçucu küle bağlayıcı arasında gerçekleşen puzolonik reaksiyonun kuvvetine bağlıdır. Bu reaksiyon sonucu oluşan bağlayıcı agrega parçalarını bir arada tutar ve birçok özelliğiyle düşük dayanımlı betona benzer.

Yumuşak, taşıma gücü zayıf olan zeminlerde herhangi bir katkı gerektirmeden çimentolaşma özelliğine sahip C tipi uçucu kül kullanılarak başarılı bir şekilde zemin iyileştirilmesi yapılabilir. Uçucu kül çimentoya benzer özelliklere sahip olduğundan son 25 yıldan beri Amerika Birleşik Devletleri'nde zemin iyileştirilmesi çalışmalarında kullanılmaktadır. Böylelikle zemin iyileştirme çalışmaları hem daha kolay gerçekleşmektedir, hem de daha ekonomik olmaktadır (Ferguson, 1993). Yapılan çalışmalar incelendiğinde uçucu küle stabilize edilen zemin numunelerine ait CBR değerleri yumuşak taban zemini numunesinin CBR değerine göre en az 10 kat daha büyük sonuçlar vermektedir (Şenol, Edil, 2004).

Uçucu küle zemin stabilizasyonu yapılırken, zeminin su içeriği inşaat süresince izlenmelidir. Zemin-uçucu kül karışımı hazırlandıktan sonra iki saatlik süre uçucu külün zemin suyu ile reaksiyona girip çimentolaşmanın başlaması için yeterli bir süredir. Bu süre içerisinde kompaksiyon aşamasına da geçilmelidir. Yol stabilizasyonunda kompaksiyon önemli bir işlemdir, kompaksiyon aşaması gecikirse uçucu küle karıştırılan zeminin mukavemeti tahmin edilen değerden daha az çıkabilir.

Donma-çözülme ve ıslanma-kuruma dayanımı konusunda uçucu kül olumlu sonuçlar vermektedir (Wasti, 1990). Uçucu külün geçirgenliği düşük olduğundan, inorganik sıvıların geçirimsizliği konusunda da uçucu kül iyi sonuç vermektedir.

C sınıfı uçucu kül, stabilizasyon için oldukça ekonomik bir malzemedir. Uçucu kül zeminle karıştırırken ve tüm yol inşaatı sırasında oluşacak hidratasyona dikkat edilmelidir (Ferguson, 1993)

Yapılan araştırmalarda uçucu külün zemin-kireç karışımlarının mukavemetlerini artırdığı görülmektedir. Uçucu kül oranı arttıkça basınç mukavemetleri artmakta, %10 oranından sonra ise azalmaktadır. Aynı zamanda, uçucu kül miktarının karışımın % 10'nu aşması halinde maksimum kuru birim hacim ağırlığı veren optimum su içerikleri de düşmekte ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri de azalmaktadır. Bir başka deyişle maksimum kuru birim hacim ağırlığını veren su ihtiyacı azalmaktadır. Çünkü daha fazla bağlayıcı mineral filler olarak görev yapmakta ve karışımın boşluk oranını azaltmaktadır (Alataş, 1996).

Birçok ülkede yıllardır uçucu küller hafif dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu küller çok kuru veya ıslak olmayacak şekilde optimum nem içeriğinde stoklanmalıdır. Optimum nem içeriği sağlandığında maksimum yoğunlukta sıkıştırılabilir ve böylelikle iyi sıkışmış bir zemin elde edilir. Uçucu küller sıkıştırıldıklarında, diğer dolgu malzemelerine göre daha düşük birim hacim ağırlığa sahip olurlar. Sıkıştırılabilme özelliği yüksek uçucu küller, yüksek zeminler üzerinde uygun bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilirler. Böylelikle yerleştirme sırasında oluşan deformasyonlar daha az olacaktır. Yerleşmenin büyük sorunlar oluşturduğu köprü ayaklarında uçucu kül kullanımıyla olumlu sonuçlar alınacaktır (Özdemir, 2001). Kontrollü olarak sıkıştırılmış uçucu kül dolgular, yüksek kayma mukavemetine ve düşük sıkışabilme özelliklerine sahiptir. Yumuşak zeminlerin üzerinde uçucu kül kullanılarak yapılan hafif dolgular, zeminlerin oturma problemini çözmekte ve taşıma gücünü arttırmaktadır.

Uçucu külün sertleşme özelliği bu dolgularda zamanla artan uzun süreli kayma mukavemeti sağlamaktadır. Sıkıştırılmış uçucu kül dolgulardan alınan numunelere yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deneyin sonucunda kayma mukavemeti

ortalama 30° olarak bulunmaktadır, 20°-40° arasında değişen değerler de bulunmuştur (Hausmann, 1990).

Uçucu kül ağırlıklı olarak silt boyutunda bir malzemedir, bu yüzden erozyona neden olabilmektedir. Erozyon kontrol işlemlerine de gereksinim vardır.

Uçucu kül trafik işaret boyalarına katılabilmektedir. Trafik boyalarının dayanımlarını ve performanslarını arttırmaktadır (Stringfellow, 1994).

3.2.2 Kömür Taban Külü ve Kazan Cürufu

Elektrik enerjisi üretmek için gerekli buharı, kömürün yanmasıyla meydana getiren fırınların tabanında toplanan kaba taneli ve yanmayan yan ürünlere kömür taban külü ve kazan cürufu denilmektedir. Kömürün yakılmasıyla oluşan bu yan ürünlerin büyük kısmı termik santrallerden elde edilmektedir. Bir kısımda kömürle çalışan daha küçük endüstriyel veya geleneksel kazanlarda oluşmaktadır.

3.2.2.1 Taban Külü ve Kazan Cürufunun Fiziksel Özellikleri

Taban külleri, yüzeyleri çok gözenekli olan köşeli tanelere sahiptir. Taban külü taneleri, ince çakıl ile ince kum boyutları arasında yer almakla birlikte, düşük oranlarda silt ve kil boyutundaki tanelere de sahiptir. Taban külü, genellikle iyi derecelenmiş bir malzemedir. Bununla birlikte, aynı termik santralden değişik zamanlarda alınmış kül numunelerinin tane boyutlarında farklılıklar görülmektedir. Taban külü genel olarak kum boyutundadır. 4 No'lu elekten (4.75 mm) % 50 ile 90 oranları arasında, 40 No'lu elekten (0.42 mm) % 10 ile 60 oranları arasında ve 200 No'lu elekten (0.075 mm) %0 ile 10 oranları arasında taban külü geçebilmektedir. Tablo 3.5'de çeşitli yerlerdeki taban külü ve kazan cürufunun tane boyutu dağılımları karşılaştırılmıştır (Moulton, 1973).

Tablo 3.5: Taban Külü ve Kazan Cürufunun Tane Boyutu Dağılımları (Ağırlıkça Oran)

Tane Çapı	Taban Külü Numuneleri			Kazan Cürufu Numuneleri		
	Glasgow	New Haven	Moundsville	Willow Island	Rockdale	Moundsville
38 mm	100	99	100	100	100	100
19 mm	100	95	100	100	100	100
9.5 mm	100	87	73	99	100	97
4.75 mm	90	77	52	97	99	90
2.36 mm	80	57	32	85	88	62
1.18 mm	72	42	17	46	42	16
0.60 mm	65	29	10	23	10	4
0.30 mm	56	19	5	12	5	2
0.15 mm	35	15	2	6	2	1
0.075 mm	9	4	1	4	1	0.5

Kazan cürufları genelde uniform tane boyutuna sahiptir ve tane boyutu 5 mm ile 0.5 mm arasında değişmektedir. Kazan cürufları pürüzsüz yüzey dokusuna sahiptir. Eğer erimiş haldeki cüruf fırınından dökülürken içinde gazlar sıkıştırsa, cüruf soğuduğu zaman kabarcıklı veya gözenekli hale gelir. Linyit veya az bitümlü kömürün yanmasıyla oluşan kazan cürufu, bitümlü kömürlerin yanmasıyla oluşan cürufa göre daha gözeneklidir. Kazan cürufu genellikle iri veya orta kum boyutundadır. Kuru taban külünün tane birim hacim ağırlığı kimyasal içeriğine bağlıdır. Yüksek karbon içeriği, tane birim hacim ağırlığını düşürmektedir. Düşük tane birim hacim ağırlığa sahip taban külü, gözenekli veya kabarcıklı dokuya sahiptir. Bu malzeme, yükleme veya kompaksiyona maruz kalırsa bozulur (Lovell ve diğ., 1991). Tablo 3.6’da taban külü ve kazan cürufunun genel fiziksel özellikleri görülmektedir.

Tablo 3.6: Taban Külü ve Kazan Cürufunun Tipik Fiziksel Özellikleri

Özellikleri	Taban Külü	Kazan Cürufu
Tane özgül ağırlığı (kN/m ³)	21–27	23–29
Kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	7.2–16	9.6–14.4
Plastisite	-	-
Su emme (%)	0.8–2.0	0.3- 1.1

3.2.2.2 Taban Külü ve Kazan Cürufunun Kimyasal Özellikleri

Taban külü ve kazan cürufu; silis, alüminyum oksit, demir, düşük oranda kalsiyum, magnezyum, sülfat içermektedir. Taban külü veya kazan cürufu tanelerinin bileşimi kömür cinsine göre değişmektedir. Kazan cinsinin bileşim üzerinde herhangi bir etkisi görülmemektedir. Tablo 3.7’de çeşitli bölgelerde oluşan taban külü ve kazan cürufu numunelerinin kimyasal bileşimi görülmektedir. Sülfat miktarı da genellikle % l'den az oranda karışımda bulunmaktadır (Moulton, 1973).

Tablo 3.7: Taban Külü ve Kazan Cürufu Numunelerinin Kimyasal Bileşimleri

Küller	Taban Külü					Kazan Cürufu		
	Bitümlü		Az Bitümlü	Linyit	Bitümlü	Linyit		
Kömür Cinsi	West Virginia		Ohio	Texas		West Virginia		North Dakota
SiO ₂	53.6	45.9	47.1	45.4	70.0	48.9	53.6	40.5
Al ₂ O ₃	28.3	25.1	28.3	19.3	15.9	21.9	22.7	13.8
Fe ₂ O ₃	5.8	14.3	10.7	9.7	2.0	14.3	10.3	14.2
CaO	0.4	1.4	0.4	15.3	6.0	1.4	1.4	22.4
MgO	4.2	5.2	5.2	3.1	1.9	5.2	5.2	5.6
Na ₂ O	1.0	0.7	0.8	1.0	0.6	0.7	1.2	1.7
K ₂ O	0.3	0.2	0.2	-	0.1	0.1	0.1	1.1

Linyit veya az bitümlü kömürlerin yanmasıyla oluşan taban külü veya kazan cürufu, bitümlü kömürlerin yanmasıyla oluşan taban külü veya kazan cürufuna göre daha yüksek oranda kalsiyum içeriğine sahiptir.

Tuz içeriğine ve bazı durumlarda düşük Ph değerlerine rağmen, taban külü veya kazan cürufu çürütücü özellik gösterebilir. Taban külü veya fırın cürufu, dolgularda ve duvar arkası malzemesi olarak kullanıldığı takdirde, bu malzemeyle temas edecek metal yapıların korozyon potansiyeli göz önüne alınmalı ve incelenmelidir.

Taban külü veya kazan cürufunun çürütücü özelliğini tespit etmek amacıyla pH, elektrik direnci, çözünebilir klorid ve sülfat içeriğine bakılmalıdır. pH değeri 5.5'i geçtiği, elektrik direnci 1500 ohm-santimetreden fazla olduğu, klorid içeriği 200 ppm'den az

olduğu ve çözünebilir sülfat içeriği 1000 ppm'den az olduğu zaman malzemelerin paslandırıcı etkisinin olmadığı söylenebilir.

3.2.2.3 Taban Külü ve Kazan Cürufunun Mekanik Özellikleri

Taban külü ve kazan cürufunun maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği, kayma dayanımı ve taşıma gücü değerleri ve geçirimsizliği Tablo 3.8'de verilmiştir (Lovell, 1991).

Tablo 3.8: Taban Külü ve Kazan Cürufunun Tipik Mekanik Özellikleri

Özellikler	Taban Külü	Kazan Cürufu
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)	12,10–16,20	13,30–16,50
Optimum su içeriği (%)	Genellikle < 20 12–24 arası	8–20
Kayma dayanımı açısı ($^\circ$)	$38^\circ - 42^\circ$ $32^\circ - 45^\circ$ (< 9.5 mm)	$38^\circ - 42^\circ$ $36^\circ - 46^\circ$ (< 9.5 mm)
Kaliforniya taşıma oranı (CBR) (%)	40–70	40–70
Geçirimsizlik katsayısı (cm/sn)	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-3}$

Taban külü ve kazan cürufunun maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri, aynı tane boyutuna sahip geleneksel malzemelere göre % 10-25 oranında daha azdır. Taban külünün ve kazan cürufunun optimum su içeriği değerleri ise aynı tane boyutuna sahip geleneksel malzemelere göre daha fazladır. Taban külünün optimum su içeriği değerinin kazan cürufuna göre daha fazla olduğu gözlenmektedir.

Taban külü ve kazan cürufu için bulunan kayma dayanımı açıları, kum ve diğer standart ince taneli agregalarla aynı değerlerdedir. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değerleri, yüksek kaliteye sahip taban malzemeleriyle yaklaşık değerler almaktadır. Kuru taban külü ve kazan cürufu, aynı tane boyutuna sahip malzemelerle yaklaşık değerlerde geçirimsizlik katsayısına sahiptir. Geçirimsizlik katsayısı, malzemenin 200 No'lu elekten geçen tane oranına bağlı olarak değişim göstermektedir.

3.2.2.4 Kömür Taban Külünün ve Kazan Cürufunun Karayollarında Kullanımı

Her ikisi de sıcak bitümlü karışımlarda ve soğuk asfalt karışımlarında kaplama ve temel tabakalarında ince agrega yerine kullanılmaktadırlar. Bazı taban külleri parçacıkları klinker gibi düşük dayanım gösterirler, bu sebeple taban külleri genelde temel tabakalarında kullanılırlar, kaplama tabakalarında pek tercih edilmezler. Kazan cürufu yüzey iyileştirilmesinde ve bitümlü koruyucu sathi tabaka (seal-coat) yapımında da kullanılır (ASTM E 1861-97).

Bu atık malzemelerin fazla büyük tanelerinin elenmesi ve diğer agregalarla karıştırılması gereklidir. Taban külünün içinde bulunan kükürt magnetik ayırıcılarla külden uzaklaştırılmalıdır, çünkü demir sülfid hacimce genişleyen, stabil olmayan bir maddedir ve ilerleyen zamanlarda suyla karşılaştığında pas oluşmaktadır.

Granüler temel ve alt temelde ince agrega yerine kullanılabilirler. Gerekli olan standartları sağlamaları için diğer doğal agregalarla karıştırılmaları gerekmektedir. 19 mm'den büyük olan parçacıklar ezilmeli, öğütülmelidirler.

Stabilize temelerde agrega olarak kül ve cüruf uygun boyutlara getirerek ve nem kontrolleri yapılarak, içerisinde bulunan istenmeyen maddeler uzaklaştırarak kullanılabilir.

Taban külü karayollarında dolgu malzemesi olarak veya istinat duvar arkası dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.

3.2.3 Desülfojips Atıkları

Termik santrallerde linyit kömürünün yanması sonucu yılda yaklaşık 600 000 ton SO₂ ve Sülfür bileşimli gazlar, atmosfere dağılarak çevre kirliliğine ve asit yağmurlarına sebep olmaktadır. Bu gazların tutulması için, kireçtaşı püskürtme yöntemi kullanılan desülfürizasyon (kükürt arıtma) tesisleri kurulmuştur. Bu tesislerde, kükürtlü bileşiklerin, baca gazlarından uzaklaştırılması amacıyla genelde yaş schrubber, kuru schrubber ve akışkan yatakta yakma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu işlemlerin sonucunda kimyasal jips (alçı) olarak da adlandırılan desülfojips atıkları oluşmaktadır. Bu atıklar suyla karıştırılarak, konveyörlerle depolanacakları yerlere taşınmaktadır. Depolama sorunları yaşanmaktadır.

Depolandıkları yerlerde meydana gelecek sızıntılar, zeminin stabilitesini azaltacak ve çevreyi kirletecektir. Termik santrallerde, sülfür içeriği %1 olan bir kömür yakıldığında, %5'den fazla desülfürizasyon alçısı elde edilmektedir. Desülfojips atıklarının yıllık oluşum miktarları ortalama 2,5 milyon tonun üzerindedir. Bunun çok az kısmı değerlendirilebilmektedir. Doğal alçı yataklarının çok olması, desülfürizasyon alçısının atılmasına ve çevre kirlenmesine sebep olmaktadır (Özkul ve Koral, 1997).

Türkiye'de ilk desülfürizasyon tesisi, 1991 yılında Çayırhan Termik Santral baca gazlarındaki kükürtlü bileşikleri tutmak için kurulmuştur. Bu tesisin kükürt tutma verimi %98'den fazladır. Sarıyar baraj gölü yakınlarındaki bir alanda depolanmaktadır.

Özbayoğlu ve diğ. (1997), çayırhan termik santrali desülfojipslerini değerlendirmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Değişik oranlarda tras, çimento, kireç katkılarıyla hazırlanan desülfojips atık numunelerine yapılan deneyler sonucunda, 25–35 MPa dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu atıkların ve bağlayıcıların kullanımıyla, killi zemin numunelerinin stabilizasyon dayanım değerlerinin %20–30 oranında arttığı gözlenmiştir. Bu atıklar, çimento ve kireç gibi bağlayıcılarla, termik santrale yakın olan bölgelerdeki yolların stabilizasyonunda kullanılabilirler.

Sülfür arıtma tesislerinde oluşan ve atık materyal olarak nitelendirilen desülfojipslerin (diğer adıyla kimyasal alçı) bileşimi, doğal alçı taşı ile aynıdır ve $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ formülü ile tanımlanır. Değişik endüstri kollarında elde edilen kimyasal alçılar Tablo 3.9'da verilmiştir (Özbayoğlu ve diğ., 1997).

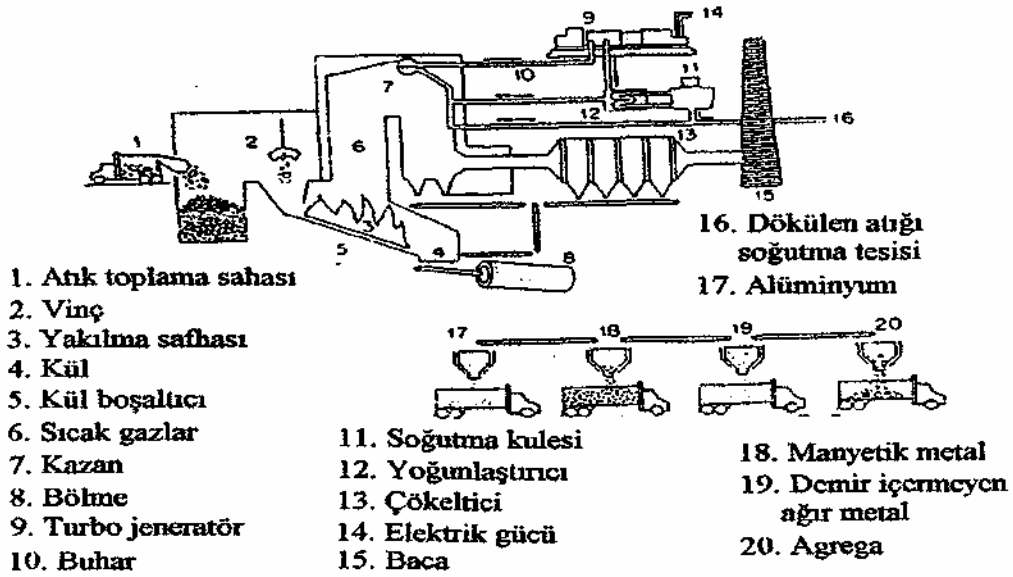
Tablo 3.9: Değişik Endüstri Kollarında Elde Edilen Alçılar

Endüstri Alanı	Kimyasal Alçı
Fosforik asit üretimi	Fosfojips
NaCl üretimi	Saltjips
Hidroflorik asit üretimi	Florojips
Titandioksit üretimi	Titanojips
SO ₂ ve SO ₃ gazlarının desülfürizasyonu	Desülfojips

3.3 Katı Atık Yakma Tesisi Uçucu Külleri

Katı atık fırınları, katı atıkların yüksek sıcaklıklarda kontrol altında yakılması prensibiyle çalışır. Yandıktan sonra katı atıkların bir kısmı fırının alt bölümünde toplanan taban külüne, diğer kısmı da uçan gazla uzaklaşan uçucu küle dönüşür. Katı atık uçucu külünün fiziksel özelliklerinin kömür uçucu külüne benzemesinden dolayı katı atık uçucu külünün mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ve kullanım alanlarının doğru şekilde saptanması gerekir.

Katı atıkların yanma verimliliği, çeşitli yanma parametrelerine bağlıdır. Fırın sıcaklığı, fırına püskürtülen hava miktarı, türbülans derecesi ve zaman önemlidir. Yanma verimliliğini kontrol eden üç parametre; zaman, sıcaklık ve türbülanstır. Katı atıkların, yüksek sıcaklığa ve türbülansa maruz kalması ne kadar fazla olursa, yanma verimliliği de o derece yüksek olmaktadır. Şekil 3.5’de tipik bir katı atık fırını görülmektedir.



Şekil 3.5.: Katı Atık Fırını (Poran ve Ali, 1989)

Amerika’da son 30 yılda katı atık fırınlarının kullanımı oldukça artmış, 1985 yılında 150 milyon tondan fazla katı atık üretilmiş ve bu atıkların %7–10 arasındaki miktarı yakılmıştır. New York şehri Çevre Bölümünün bildirisine göre New York şehrinde yakılan her bir milyonluk katı atık için 37000 ton uçucu kül üretilmektedir. Katı atık uçucu külleri büyük miktarlarda üretildiği için, acilen yeni kullanım sahalarına

ihtiyaç vardır. Katı atık uçucu külünün kullanımıyla katı atığın bir kısmı yok edilmekte hem de yol dolguları, granüler temeller ve bitümlü kaplamalar için pahalı olmayan malzemeler kullanılmış olmaktadır (Poran ve Ali, 1989).

3.3.1 Katı Atık Yakma Tesisi Uçucu Küllerinin Fiziksel Özellikleri

Katı atık uçucu külü taneleri mikroskop altında incelendiğinde, boşluklu yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır (Sherwood, 2001). Katı atık uçucu külü plastik olmayan özellik göstermektedir. Tablo 3.10'da katı atıkların yakılmasıyla elde edilen küllerin fiziksel özellikleri verilmiştir.

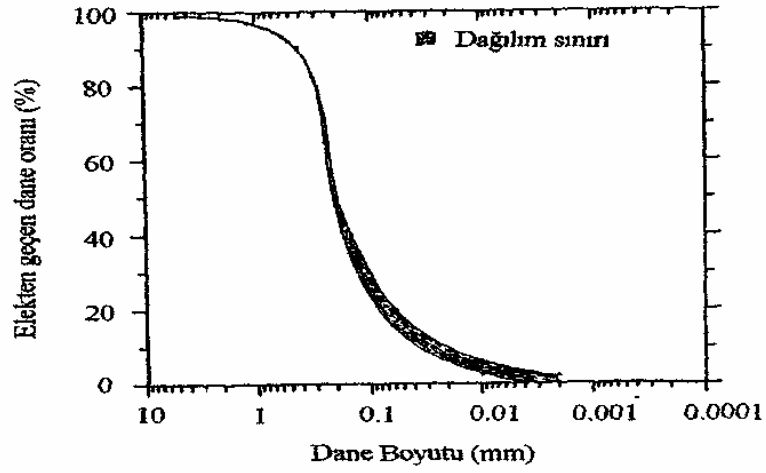
Tablo 3.10: Katı Atık Yakma Tesisi Külünün Fiziksel Özellikleri

Özellik	Taban Külü	Taban Külü + Uçucu Kül
Tane özgül ağırlığı (G_s)	15,0–22,20	18,6–20,3
İnce (<4 No'lu elek)	19,3–24,4	19,6–22,4
Kaba (>4 No'lu elek)		
Su emme (%)	12.0–17.0	4.8–14.8
İnce (<4 No'lu elek)	4.1-4.7	3.6–10.0
Kaba (>4 No'lu elek)		
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	9.6-14	9.9-11.7
Derecelenme (%)		
İnce malzeme yüzdesi <4.75 mm (4 No'lu elek)	42-70	50-70
Kil+silt yüzdesi <0.075 mm (200 No'lu elek)	2-16	15-20
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)	12,60–17,60	12,60–17,30
Sıkıştırılmış numunenin geçirimsizliği (cm/sn)	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-6} - 10^{-9}$

Karışımın %20'si 200 No'lu elekten (0.074 mm) geçmektedir ve %5'i de kilin tane boyutuna yakındır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına göre katık atık yakma tesisi uçucu külü, siltli kum (SM) sınıfına girmektedir.

Katı atık uçucu külü üzerinde elek analizi ve hidrometre testleri düzenlenmiştir. Hidrometre testinde ayrıştırıcı malzeme olarak, % 4'lük sodyum metafosfat ($NaPO_3$) kullanılmıştır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi tane dağılımı eğrisi dar bir alanda

kalmaktadır. Buradan, katı atık yakma tesisi uçucu külü karışımının homojen olduğu sonucuna varılır.



Şekil 3.6: Gradasyon Eğrisi (Poran ve Ali, 1989)

3.3.2 Katı Atık Yakma Tesisi Uçucu Külünün Kimyasal Özellikleri

Katı atık uçucu küllerinin yüksek tuz içeriğine ve metal yoğunlaşmasına sahip olması (kurşun, kadmiyum, çinko vb.), bu malzemenin agrega yerine kullanılmasının çevresel açıdan uygun olup olmayacağı konusunda tartışmaları da beraberinde getirmiştir (Bond, 2000). Katı atık uçucu külünde yüksek yoğunlaşmalarda kalsiyum ve diğer tuzların bulunması; külün, hidratasyon ve bağlayıcı reaksiyonlara, daha sonra meydana gelebilecek şişme olayına hassas hale gelmesini sağlamıştır. Katı atık uçucu külünde bulunan serbest alüminyum, suyla birleştiğinde hidrojen gazı oluşmasına sebep olabilir. Buna ek olarak, katı atık uçucu külünde bulunan yüksek tuz içeriğinden dolayı; kül, metal malzemelere temas ettiğinde paslandırıcı etki gösterebilir. Katı atık uçucu külü, Portland çimentosuyla birlikte kullanıldığı takdirde dayanımın zamanla artmasına yardımcı olacaktır. Tablo 3.11’de, katı atık uçucu külünün kimyasal kompozisyonu gösterilmiştir (Sherwood, 2001).

Tablo 3.11: Katı Atık Uçucu Külünün Kimyasal Bileşimi

Bileşimler	Bulunan Yüzde
SiO ₂	35
Fe ₂ O ₃	26
Al ₂ O ₃	23
CaO	6.3
Na ₂ O	2.5
ZnO	1.2
SO ₃	1.0
MgO	0.7
TiO ₂	0.6
MnO	0.3
Diğer	3.2
Tutuşturma sonrası külde kalan yanmamış karbon	2.6
Çözülmüş sülfat	2.32
Toplam sülfat	0.60
pH değeri	9.4

3.3.3 Katı Atık Uçucu Küllerinin Karayollarında Kullanılması

Bitümlü temel tabakasında, aşınma ve binder tabakalarında da ince agrega yerine kullanılmaktadır. Parçalama ve eleme işlemleri yapılmalı, istenmeyen maddeler uzaklaştırılmalıdır. Kaplama tabakalarında karışımın içerisindeki doğal agreganın %10-25'i yerine, sıcak bitümlü temel tabakalarında ise %50'si yerine bu uçucu küller kullanılabilir.

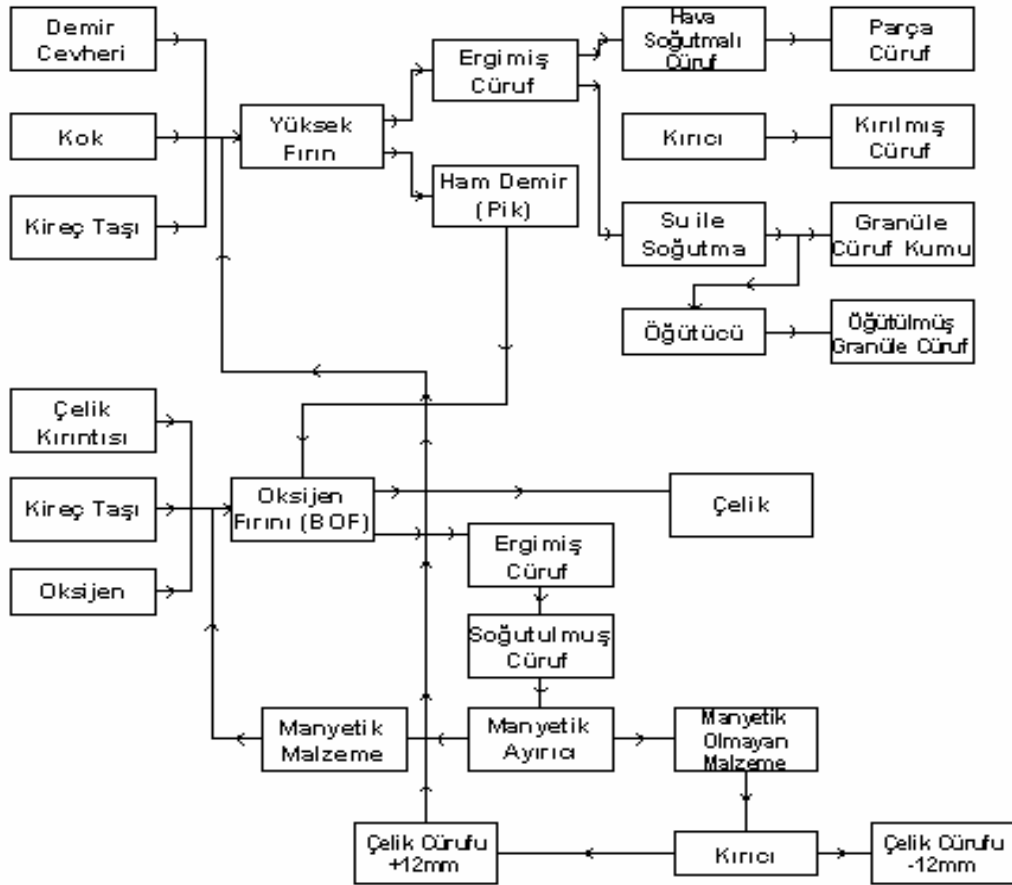
Avrupa'da son yirmi yıldır katı atık tesislerinden çıkan uçucu küller karayollarında granüler temel ve dolgu yapımında değerlendirilmektedir. Bu uygulamalarda tek başına karışıma katılmaktadır. Uçucu kül portland çimentosu veya kireç ile stabilize edilerek stabilize temellerde de kullanılabilir.

3.4 Yüksek Fırın & Çelikhane Cürüfları

Cüruf, metal filizlerinin fırınlarda arıtılması işleminden elde edilen bir endüstriyel atık malzemesidir. Yüksek fırın içerisine yakıt olarak kok konulup, demir cevherine

kireç taşı veya dolomit ilavesiyle ham demir üretilmektedir. Bu üretim sırasında oluşan maden dışı yan ürün yüksek fırın cürufudur.

Bazı oksijen fırınlarına ham demirle beraber kireç taşının, oksijenin ve çelik kırıntısının ilavesiyle de çelik üretilmektedir. Bu üretim sırasında oluşan ergimiş cürufun soğutulmasıyla oluşan atık malzeme de çelik cürufudur. Şekil 3.7’de demir çelik fabrikalarında yan ürün olarak oluşan cürufların diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.7: Yüksek Fırın ve Çelikhane Cüruflarının Oluşum Diyagramı

Bunların dışında elektrik ark fırın cürufu ve ikincil metalürji cürufları da ortaya çıkmaktadır.

Cüruflar, yol kaplamalarında, demiryolu balastlarında, çimento sanayinde, beton agregasında, toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirmekte, yalıtımda cüruf yünü olarak kullanılmaktadırlar.

3.4.1 Cürufların Fiziksel Özellikleri

Yüksek fırın cürufları soğutulma yöntemlerine göre dört gruba ayrılırlar.

- Hava Soğutmalı Yüksek Fırın Cürufu: Yüksek fırından çıkan sıvı cürufun çukurlara dökülüp, uygun koşullar altında soğutulmasıyla elde edilir. Kristal yapıda, sert, büyük kütleler biçiminde sertleşir; daha küçük parçalar elde edebilmek için de kırma ve eleme işlemleri yapılmaktadır. Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun kırılıp, elenmesiyle pürüzlü yüzeyli malzeme elde edilir. Böylece malzeme yüksek adezyon ve sürtünme özelliklerine sahip olmaktadır. Ayrıca su emme yüzdesi ve dona karşı direnci de yüksektir.
- Genleşmiş (Köpüklendirilmiş) Cüruf: Yüksek fırından çıkan dökme cürufun çukura boşaltılıp, kontrollü miktarlarda su, hava ve buhar ilaveleriyle soğutulup, sertleştirilmesiyle elde edilir. Havada soğutulmuş cüruftan daha yüksek poroziteye ve daha düşük birim hacim ağırlığa (8 kN/m^3) sahiptir. Genleşmiş cüruf, hafif agrega malzemesidir.
- Toz Haline Getirilmiş Cüruf: Ergimiş cürufun santrifüj (merkezkaç) kasnağında su ve hava ile bastırılarak soğutulup, parçalanmasıyla oluşur. Büyük bir kısmı camlaşır. Bu cürufun tane boyutları 0–30 mm arasında çeşitlilik gösterir.
- Granüle Cüruf: Dökme cürufa yüksek basınçlı su püskürtülerek, hızlı soğutulularak elde edilir. Cüruf, kristalleşmeden camsı bir malzeme olarak sertleşmektedir. Bu işlem sonucunda kum boyutunda, camsı, klinkere benzeyen bir malzeme oluşmaktadır. Granüle cürufun kimyasal bileşimine ve üretim yöntemine göre boyutları değişmektedir. Parçalanıp, öğütülmesiyle çok ince çimento boyutunda, puzzolanik tanecikler oluşmaktadır. Bu tanecikler kimyasal bakımdan portland çimentosu klinkerine benzemektedir, yalnızca CaO miktarı daha azdır. Yüksek fırın cüruflarının ve çelikhane cüruflarının özgül ağırlıkları, birim hacim ağırlıkları ve su emme yüzdeleri (ASTM C 127-59) çeşitlerine göre Tablo 3.12’de verilmiştir (Ata, 1987).

Tablo 3.12: Cürufların Fiziksel Özellikleri

Özellikler	Hava Soğutmalı	Genleşmiş	Toz Haline Getirilmiş	Çelikhane Cürufu
Özgül Ağırlık (gr/cm ³) (kN/m ³)	2,0–2,5 (20-25)	-	-	3,2–3,6 (32-36)
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	11,20–13,60	8,00–10,40	8,40	16,00–19,20
Su Emme Yüzdesi (%)	1–6	-	-	< 3

Erdemir cüruflarına ait fiziksel özellikler de Tablo 3.13’de görülmektedir (İlcalı, 1988).

Tablo 3.13: Erdemir Cüruflarının Fiziksel Özellikleri

	Granüle Cüruf	Hava Soğutmalı Yüksek Fırın Cürufu (Kaba)	Hava Soğutmalı Yüksek Fırın Cürufu (İnce)	Çelikhane Cürufu (Kaba)	Çelikhane Cürufu (İnce)
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,510	2,791	2,777	3,794	3,882
Su emme (%)	-	4,71	-	0,80	-
Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	9,80	13,00	-	17,95	17,95

Erdemir çelik cüruflarına yapılan element analizleri sonucunda, numuneler fiziksel görünümlerine göre masif ve süngerimsi cüruf olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Süngerimsi cürufun daha fazla kalsiyum ve daha az demir içerdiği anlaşılmıştır. Cürufun çok miktarda su ile kısa zamanda soğutulması sonucu ortaya çıktığı düşünülen süngerimsi cüruf kırılğan ve amorf bir yapı sergilemektedir. Masif cüruf ise yavaş yavaş uzun sürede cürufun soğutulması sonucunda yeniden kristalleşmesiyle oluşmaktadır ve masif yapı iri taneler içermektedir. Süngerimsi cüruf miktarı toplam cürufun %2,31’i olup, cürufun bitümlü sıcak karışımlarda kullanılmasında engel oluşturmamaktadır (Kara ve diğ., 2001).

Cürufların yapısı hakkında kimyasal, mineralojik, diferansiyel termal analizleri, civalı porozimetreye gözenek tayini, Archimed metoduna göre bulk yoğunluk, gözenek tayini yapılarak, optik, elektron mikroskop fotoğrafları incelenerek detaylı bilgiler elde edilebilir.

3.4.2 Cürufların Kimyasal Özellikleri

Cürufun kimyasal yapısı, demir cevherinin yapısına ve yüksek fırın sıcaklıklarındaki farklılıklara bağlı olarak değişmektedir. Cürufu oluşturan kireç, silis ve alüminyum yüzde miktarları çok değişiklik göstermektedir. Cüruf, puzolanik bir yapıya sahiptir. Kimyasal bakımdan portland çimentosu klinkerine benzemektedir, fakat daha az CaO içermektedir. Cürufların kimyasal bileşimi Tablo 3.14’de görülmektedir.

Tablo 3.14: Cürufların Kimyasal Bileşimleri

Kimyasal Bileşikler	Yüksek Fırın Cürufu (%)	Çelikhane Cürufu (%)
CaO	30–50	40–52
SiO ₂	30 – 40	10–19
Al ₂ O ₃	8–18	1–3
MgO	0–15	5–10
FeO (FeO veya Fe ₂ O ₃)	0–1	10–40
MnO	0–2	5–8
S	0–2	< 0.1
P ₂ O ₅	-	0.5–1
Serbest Kireç	-	1–10

3.4.3 Cürufların Mühendislik Özellikleri

Çelikhane cüruflarının birim hacim ağırlıkları yüksektir ve hacimsel olarak genleşme eğilimine sahiptir. Yüksek fırın cüruflarının yoğunluğu ise ortalama 1,280 gr/cm³ değerine sahip olup, genleşme eğilimi göstermemektedir. Yüksek fırın cürufunda Ca ve Mg oksitler silikat ve alümina silikat minerallerini oluştururken, aynı oksitler çelikhane cürufunda tam olarak bileşik yapmazlar. Sönmemiş kirecin hızlı bir şekilde hidrate olmasıyla hacimsel genleşme oluşur. Magnezyum oksit ise daha yavaş hidrate olduğundan hacimsel genleşmenin oluşması uzun yıllar sürebilir. Ca ve Mg oksitler hidrate olduklarında %10’dan fazla hacimce genleşmeye sebep olurlar. Bu yüzden çelikhane cürufu kullanılmadan önce uzun süreli kontroller yapıp hacim değişimleri belirlenmelidir. Çelik cürufları asfalt betonu karışımlarında, temel ve alt temel

tabakalarında, karayolu tabanında, demiryolu balastında agrega olarak kullanılabilir. Genleşme özelliği, bu alanlardaki kullanımında göz ardı edilebilir veya uygun yaşlandırma ile kontrol edilebilmektedir. Çelikhane cüruflarının yol yapımında kullanımında yaşlandırma metodu olarak Avrupa standardı olan buhar testi uygulanmaktadır. Cüruflar silindirik kaplara doldurularak 24-168 saat boyunca buharda tutulmaktadır (Kara ve diğ., 2001).

Cürufların dona karşı gösterdiği direnç oldukça fazladır. Tablo 3.15’de Cüruflara ait mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.15: Cürufların Mekanik Özellikleri (Noureldin ve McDaniel, 1990)

Özellikler	Yüksek Fırın Cürufu	Çelikhane Cürufu
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	35–45	20–25
Sodyum Sülfat Sağlamlığı (donma kaybı) (%)	12	<12
Sertlik	5–6	6–7
Sürtünme Açısı	40°–45°	40°–50°
CBR (%)	>250	>200

Tablo 3.16’da Erdemir cürufuna ait mekanik özellikler görülmektedir. Bulunan değerler, şartname limitlerine uymaktadır (Ilıcalı,1988).

Tablo 3.16: Erdemir Cürufunun Mekanik Özellikleri

	Yüksek Fırın Cürufu	Çelikhane Cürufu	Şartname Limitleri	Standartlar
Soyulma Direnci (%)	30–35	90–95	Min 50	Nicholson yöntemi
Cilalanma Yüzdesi	58	53	Min 50	TS EN 1097-8
Yassılık İndeksi (%)	11.53	-	Maks. 30	BS 812
Aşınma Kaybı (%)	32	13,83	Maks. 35	TS 3694

3.4.4. Karayollarında Cürufların Kullanılması

A.B.D.'de karayollarında kullanılan atık malzemeler üzerine yapılan bir anket çalışması sonucunda, 44 karayolu yapım şirketinden 16 tanesinin cürufu karayollarında yüksek miktarlarda kullandığı saptanmıştır. Kullanan şirketler, geleneksel malzemelere göre cürufların daha ekonomik, çevre yönünden kabul edilebilir düzeyde ve performans bakımından şartname limitlerini sağladığını belirtmişlerdir.

Cüruflar, karayollarında bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak, granüler temel ve alt temel tabakalarında ve taban zemini stabilizasyonunda kullanılmaktadırlar. Beton yollarda da portland çimento betonuna katkı malzemesi olarak granüler yüksek fırın cürufu kullanılabilir. Cürufu kullanılabilir. Cürufu kullanılabilir.

Çelik cüruflarıyla oluşturulan bitümlü karışımlar yüksek stabiliteye sahip olmaktadır. Cüruflar, bitümlü karışımların soyulmaya ve neme karşı direnç özelliklerini, yorulma ömrünü arttırmaktadır. Cüruflarla yüksek kararlı yapıya sahip ve tekerlek izine dirençli yüzeyler elde edilmektedir.

Granüler yüksek fırın cürufları optimum tane dağılımına sahiptirler. Bundan dolayı, kolaylıkla bir işleme gerek kalmadan kullanılabilirler. Toplam agrega miktarının %10'undan fazla granüle cüruf içeren karışımların teknik performans değerleri, şartname limitlerini sağlayamamaktadır.

Çelik cürufunun yüksek birim hacim ağırlık değeri, cürufun taşıma fiyatını arttırmaktadır. Çelik cüruflarında hacimsel genleşme de görülmektedir. Agregaların potansiyel genleşmelerini belirleyebilmek için standart hacimsel genleşme test metodu (ASTM D-4792-88) uygulanmaktadır. Hacimsel genleşme testi, Erdemir'den temin edilen 19-40 mm boyutlar arasından seçilmiş orijinal çelikhane cüruflarına uygulanmış; yedi günlük deney sonucunda, karışım agregalarının genleşme miktarları % 0,472-1,594 arasında bulunmuştur. 25-40 mm arasındaki çelikhane cüruflarının genleşme miktarları ise % 1,404-1,595 arasındadır. Farklı boyutlardaki cüruf numunelerine hızlı yaşlandırma deneyleri yapılmıştır. 5 mm altındaki cüruf numunelerinde (tane boyutu küçük olduğundan) serbest kalsiyumun hidratasyonu daha çabuk başlamıştır. Diğer boyutlardaki numunelerde ise boyutun büyük

olmasından dolayı hidrasyon gerçekleşmediği gözlenmiştir (Kara ve diğ., 2001). Eğer çelikhane cürufları hidrasyonun olabileceği alanlarda kullanılacaksa yaşlandırma işleminin gerçekleştirilmesi için yağmurlama süresinin ve miktarının daha uzun tutulması gerekmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda, bitümlü karışımda kullanılacak çelikhane cürufunun bitümlü temel ve binder tabakalarında yaşlandırma yapılmadan kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Cüruf bu tabakalarda kullanıldığında, atmosferle direkt temas etmeyecek ve hidrasyon reaksiyonu uzun sürecektir. Cürufli karışımlardaki su ve don etkileri üzerine yapılan araştırmalarda, su etkisinin stabiliteyi önemsenmeyecek miktarda azalttığı belirlenmiştir. Su etkisi ile meydana gelebilecek hacimsel genişleme de küçük değerlerde kalmaktadır.

Bir diğer olumsuz özelliği de yüzey yapısıdır. Köşeli olması ve yüksek su emme özellikleri bitümlü karışımlarda bağlayıcı ihtiyacını arttırmaktadır.

Temel ve alt temel yapımında yüksek fırın cürufuna ilave olarak çelikhane cürufu kullanılmaktadır. Granüle yüksek fırın cürufunu aktif hale getirmek için çelik cürufu kireç kaynağı olarak kullanılabilir. Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun, kendine has bir çimentolama özelliği mevcuttur. Bundan dolayı sıkıştırılmış temel veya alt temel tabakası olarak kullanıldığında, zamanla yolun mukavemetini arttırmaktadır. Yapılan araştırmalarda, 17 aylık bir sürede bu mukavemetin 14 MPa'a kadar çıktığı gözlenmiştir.

Granüle cüruf kimyasal bağlayıcı ile taşıma gücü düşük taban zeminlerinin stabilizasyonunda da kullanılmaktadır. Çelikhane cürufu taban zemin malzemesi olarak kullanıldığında zemin yüksek taşıma kapasitesine sahip olmaktadır. Çelikhane cürufları temel, alt temel veya taban zemininde agrega olarak uzun süreli kullanımlarında bile parçalanmadan kalabilmektedir (Ahmed, 1993).

Çelikhane cürufları, kullanımdan önce ya da tabana serildikten sonra stabilize edilirse, hacimsel kararsızlıkları azalmaktadır. Çelikhane cürufları granüle cürufu ile karıştırılırsa taban zemininde daha üstün fiziksel özellikler göstermektedir.

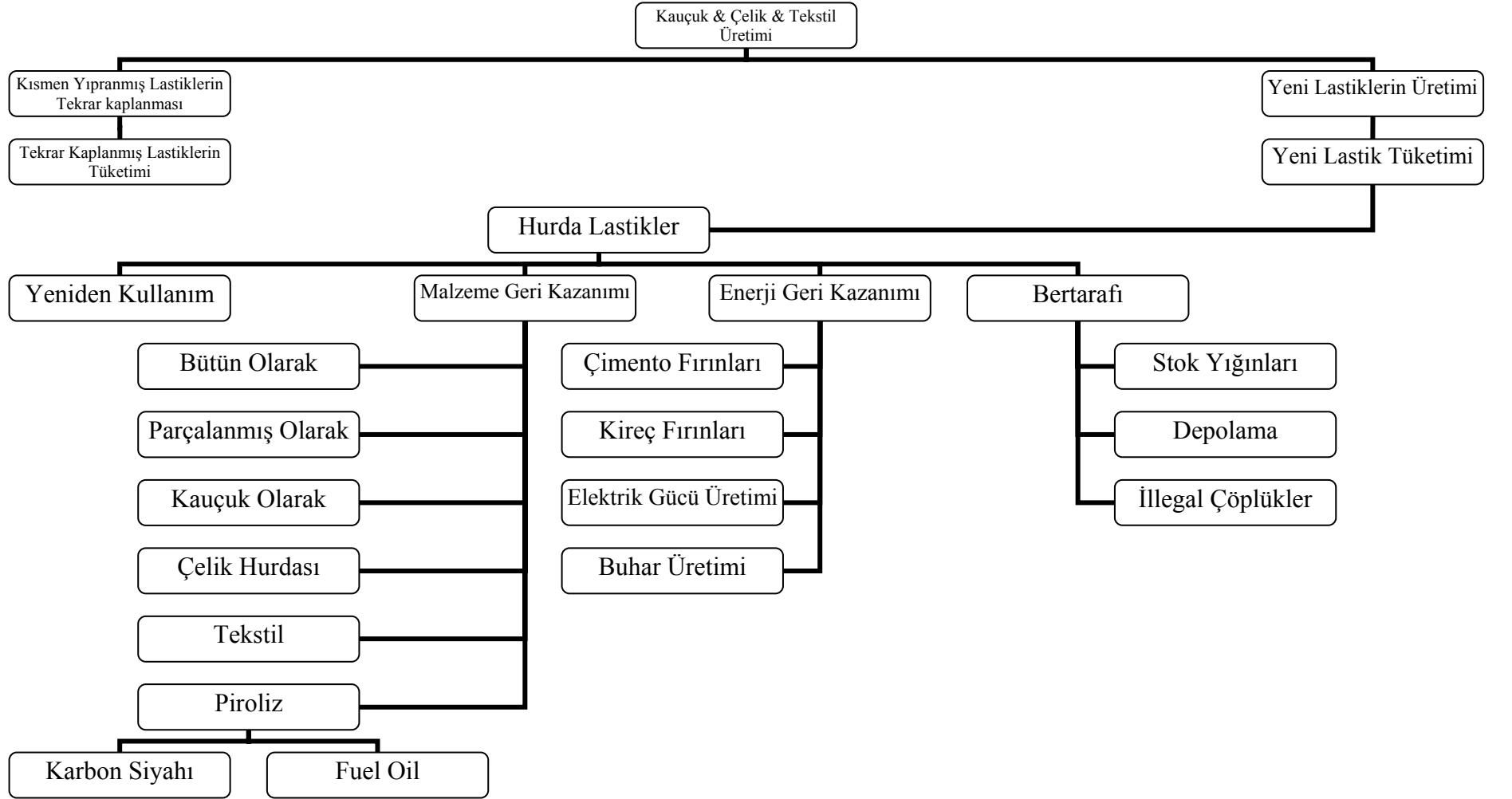
Taban zemininde dolgu malzemesi olarak granüle cüruf, çelik cürufu ve uçucu külün oluşturduğu karışımın kullanılmasıyla üstün performans değerleri gözlenmektedir.

3.5 Hurda Lastikler

Lastik, karbon siyahı, kord bezi, elastomerler, kimyasal maddeler, yağlar ve çeşitli kimyasal maddelerin birleşiminden oluşmaktadır. Yer ile temas ettiği için aracın en önemli parçasıdır. Modern bir lastiğin daha az titreşim ve gürültü üretmesi, düşük yuvarlanma direncine sahip olması ve daha az yakıt tüketmesi istenmektedir. Dayanıklı, yüksek molekül yapılı polimerlerden ibaret doğal ve sentetik kauçuklardan üretilen lastiklerin kullanılıp faydalı ömürlerini tamamlamaları ile çevrede zor ortadan kalkacak hurda lastikler oluşmaktadır. Bu atık malzeme, yüksek karbon içeriğinden dolayı değişken organik bileşimleri emme özelliğine sahiptir. Birçok açıdan değerli bir kaynağı yakmak utanç vericidir. Dünyada, hurda lastiklerin geri kazanılması yöntemleri giderek yaygınlaşmaktadır. Hurda lastikler bütün olarak, kesilmiş, parçalanmış halde lastik kırpıntısı veya lastik yongası olarak; öğütülmüş, granül hale getirilmiş, toz kauçuk ürünü olarak kullanılabilirler (Gönüllü, 2004).

Bütün halde hurda lastikler birbirlerine bağlanarak alçak istinat duvarının yapımında ve erozyona karşı koruyucu olarak kullanılmaktadır.

Hurda lastikler parçalanarak ve yonga haline getirerek yol taban zemininde hafif dolgu malzemesi olarak, boyutları azaltılarak ve öğütülerek asfalt beton kaplamalarında ince agrega veya bitüm modifiyeri olarak kullanılmaktadır. Lastik parçaları ve kırpıntıları endüstriyel işlem filtresi ve kazanlar için yakıt materyali olarak da kullanılabilir. Hurda lastiklerin geri dönüşüm diyagramı Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8: Hurda Lastiklerin Geri Dönüşüm Diyagramı

3.5.1 Hurda Lastiklerin Fiziksel Özellikleri

Tipik yıpranmış otomobil lastiğinin ağırlığı, 9,1 kg'dır. Yaklaşık 5,4 kg'dan 5,9 kg'a kadarı tekrar kazanılabilir kauçuktur, birleşiminin %35'i doğal, %65'i sentetik kauçuktan oluşmaktadır. Kamyon lastiğinin ağırlığı ise 18,2 kg'dır ve bunun %60–70 kadarı tekrar kazanılabilir kauçuktur. Kamyon lastiğinin bileşimi, otomobil lastiğinin tersi şeklinde, %65'i doğal, %35'i sentetik kauçuktan oluşmaktadır. Kamyon lastiğinde de çoğunlukla çelik kuşaklı radyal lastikler üretilmesine rağmen naylon veya polyester kuşak malzemesinden oluşan bias katlı kamyon lastikleri bulunmaktadır. Hurda lastikler bütün olarak kullanıldığı gibi kesilmiş, parçalanmış, yonga haline getirilmiş veya öğütülmüş, toz halinde de kullanım olanaklarına sahiptir.

- Kesilmiş Lastikler: Kesme makineleriyle iki eşit parçaya veya lastik tırtılının (yere temas eden kısmı) yan kenarından ayrılarak elde edilen lastiklerdir.
- Parçalanmış Lastikler: Hurda lastikler çeşitli parçalama makinelerinden geçirilerek gereksinim duyulan boyutlara küçültülmektedir. Parçalama, tüm lastiğin öğütme ve granüle etme işlemleri için ilk adımdır. Taşıma işlemini kolaylaştırır. Lastik parçası, yakma için ikincil bir yakıt olarak kullanılır. Düzenli depolama alanlarında daha az yer kaplaması için de parçalanmış lastik tercih edilmektedir. Parçalanmış lastiklerin büyüklükleri, ilk parçalama işleminden sonra boyu 300–460 mm., genişliği 100-230 mm. arasında çeşitlilik göstermektedir; imalatçısına, modeline ve parçalanma işlemine bağlı olarak boyu 100-150 mm. boyutlarına kadar küçültülebilmektedir. Parçalama işlemi, lastik parçalarının kenarları boyunca çelik kuşak kısımların açığa çıkmasıyla sonuçlanır. Parçalanmış (kırpıntı) halindeki hurda lastikler, genellikle düz ve düzensiz biçimde kısa, kalın parçalardan oluşmaktadır. Çelik kuşağın parçalanmasıyla meydana gelen keskin metal parçacıklarını da içerir. Lastik kırıntılarının ortalama gevşek yoğunluğu, lastik kırıntılarının boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Ortalama gevşek yoğunluğu 3,9–5,35 kN/m³ değerleri arasında, ortalama sıkışmış birim hacim ağırlığı ise 6,5–8,4 kN/m³ değerleri arasında değişmektedir.

- Lastik Yongaları: Lastik parçalarının birinci ve ikinci parçalama işlemlerinden sonra boyutları 76 -13 mm arasında çeşitlilik gösteren lastik yongaları elde edilmektedir. Lastik yongaları, lastik kırıntılarından daha ince olup, yaklaşık çakıl boyutundadır. Lastik yongalarının gevşek yoğunluğu 3,2–4,9 kN/m³ arasında, sıkıştırılmış yoğunluğu da 5,7–7,3 kN/m³ arasında değişmektedir. Su emme değerleri ise % 2–3,8 oranlarında değişiklik göstermektedir (Bosscher ve diğ., 1997).
- Öğütülmüş ve Granüle edilmiş Kauçuk: Öğütücü, ezici makineler, kırıcı, öğütücü değirmenlerle istenen boyutlarda kauçuklar elde edilir. Kauçuk kırıntıları uygulanan işlemlere göre 19 mm den 0,15 mm ye kadar çeşitlilik gösterir. Bu kırıntılar az yüzeysel alanlı kübik, düzgün şekilli parçacıklardır. Çelik kuşak parçaları manyetik ayırıcı tarafından taşınır. İnceltilmiş kauçuk parçalarından cam elyaf kuşaklar veya lifler hava ayırıcısıyla ayrılır. Kırıntı kauçuk parçaları, manyetik ayırmanın iki kez etkisi altında kaldıktan sonra elekten geçirilir ve çeşitli büyüklükteki parçalar olarak tekrar kazanılır. Öğütülmüş kauçuk 4,75 mm'den 0,075 mm'ye kadar çeşitlilik gösteren tanecikler içerir. Asfalt modifiyeri olarak kullanılan öğütülmüş kauçuklarda kullanılan tanecik büyüklükleri 0,6–0,15 mm'dir. Özgül ağırlığı yaklaşık 1,15 değerindedir (Heitzman, 1992).

Hurda lastikleri granüle etmek için iki metot vardır. Biri çevre sıcaklığında öğütme, diğeri ise daha az sıklıkta kullanılan kriyojenik öğütmedir.

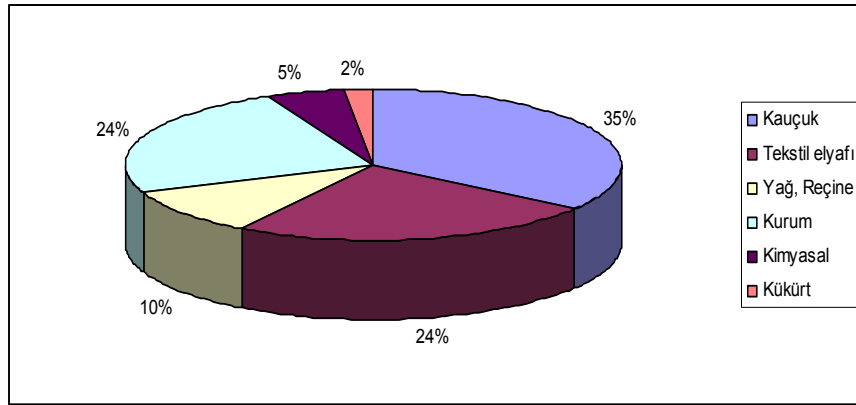
Çevre sıcaklığında öğütmede parçalanmış hurda lastikler öğütme değirmeninin içinde beslenirler. Öğütme işleminden sonra hurda lastik kauçuk granülü, çelik ve tekstil olarak ayrılır, elde edilen granül farklı tane büyüklüklerindeki elekten geçirilir.

Kriyojenik metotta ise kauçuk kırıntısı donma noktasının altında soğutulur. Soğuk lastik parçaları, 100° C'de nitrojenin (azot) ilavesiyle kolay kırılğan hale getirilerek üretilir ve daha sonra çekiçli değirmenle ezilerek lastik içindeki kauçuk, çelik ve tekstil parçalanır. Azot ilavesi pahalıdır ve üretilen her 1 kg. parçalanmış kauçuk için 0,51 kg. azot gerekmektedir. Bu işlemin kullanımı fazla yaygın değildir. Bu işleme

değerli materyallerin yapımında kullanılacak yüzeyi düzgün parça kauçuklar üretilmektedir (Gönüllü, 2004).

3.5.2 Hurda Lastiklerin Kimyasal Özellikleri

Otomobil lastiği, içinde donatı olarak tekstil liflerinin, çelik veya fabrikasyon kuşakların ve çelik kabloların kullanılması sonucunda, kauçuğun sertleştirilmesiyle elde edilmektedir. Sıklıkla kullanılan kauçuk, ağırlıkça %25 styrene içeren Styrene-Butadiene Copolymer (SBR)'dir. Lastik içerisinde sentetik cis poli izopropan ve cis poli bütadien doğal kauçukları da kullanılmaktadır. Lastiklerin kimyasal bileşimi Şekil 3.9'da görülmektedir. Lastik kauçukların bileşimleri ise Tablo 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.9: Lastiklerin Kimyasal Bileşimleri (Limbachiya ve Roberts, 2004a)

Tablo 3.17: Kauçuk Bileşimi

Bileşenler	Ağırlıkça (%)
SBR	62
Karbon Siyahı	31
İnceltici Yağ	1.9
Zink Oksit	1.9
Stearik Asit	1.2
Sülfür	1.1
Hızlandırıcı	0.7

Karbon siyahı, kauçuğun mukavemetini ve aşınma direncini arttırmak için kullanılır. İnceltici yağ aromatik hidrokarbonların bir karışımıdır ve bunlar kauçuğun yumuşatılmasına ve işlenebilirliğinin artırılmasına yardımcı olmaktadır. Sülfür,

kauçuk içindeki polimer zincirlerini çapraz bağlantı yapmak için kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda aşırı sertleşme ve deformasyonu da önlemektedir.

Rejenere kauçuk, boyutu küçültülmüş hurda lastikler, yağ, su ve kimyasallardan oluşan bir karışımın kimyasal işlemi ile üretilir. Son bileşik, son ürün ihtiyaçlarına göre katkı maddelerinin katıldığı ileri bir termo mekanik sürece verilir. Malzemenin kalın parçaları preslenir, kesilir ve taşınmak üzere sarılır. Yeni bileşiklerle karıştırılmış rejenere kauçuk, kalıplanmış levhaların geniş bir aralığında kullanılabilir.

Piroliz, hurda lastiklerin yakıtı çevrimi için kullanılan yöntemlerden biridir. Piroliz işlemi, ısı ile kimyasal bağların kırılmasıdır. Hurda lastiklerin pirolizi ile karbon siyahı, gaz, yağ ve hurda çelik elde edilir. Oluşan yağ yakıt olarak, karbon siyahı ise güçlendirici dolgu malzemesi veya aktif karbon olarak kullanılabilir. Sıcaklık azaldığında yağ geri kazanılan ilk yakıtken, sıcaklık artığında daha fazla gaz üretilir. Pirolizin gerçekleşmesi için lastikler 50–1100 °F arasında ısıtılmalıdırlar (www.bcm.org.tr.).

3.5.3 Hurda Lastiklerin Mekanik Özellikleri

Lastik kırıntılarının boyutlarının çok çeşitli olması, uygun bir kesme deneyinin yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden lastik kırıntılarının kayma dayanımı üzerine çok az veya hiç bilgi yokken, lastik yongalarının kayma dayanımı hakkında sınırlı bilgi mevcuttur. Lastik yongalarının kayma dayanımı özellikleri, yongaların boyut ve şekline bağlı olarak değişirken içsel sürtünme açıları 19°-26° arasında değişir. Kohezyon değerlerinin de 4,3–11,5 kPa arasında olduğu gözlenmiştir. Lastik yongaları yüksek ısı yalıtım özelliklerine sahiptir. Lastiklerin mekanik özellikleri, Tablo 3.18'de görülmektedir. Lastik yongaları, düşük gerilme seviyelerinde çok sıkışmaktadır, ancak gerilme seviyesi arttıkça sıkışabilirlik oldukça azalmaktadır. Lastik yongalarının bir diğer avantajı da serbest drenajı sağlamasıdır. Böylece fazla boşluk suyu basıncı oluşması problemi çözülmektedir. Ayrıca lastik yongaları, kereste yongaları gibi biyolojik bozulmaya da uğramazlar (Humprey ve diğ., 1992).

Hurda lastikler 28000 kJ/kg ile 35000 kJ/kg arasında değişen ısıtma değerlerine sahiptir. Uygun koşullarda hurda lastiğın yanması olasıdır, bu yüzden her uygulamada bu duruma dikkat edilmelidir.

Tablo 3.18: Hurda Lastiklerin Mekanik Özellikleri

ÖZELLİKLER	DEĞERLER
Sürtünme Açısı	19° -26 °
Sıkıştırılabilirlik	20 – 50 % (21 – 147 kN/m ²)
Hidrolik İletkenlik	10 ⁻² - 10 ⁻³ m/sn
Yoğunluk	6,00 – 7,00 kN/m ³
Poisson Oranı	0,20 – 0,35
Elastik Modülü	1 – 2 N/mm ²
Özgöl Ağırlık	11 – 12,7 kN/m ³

3.5.4 Karayollarında Hurda Lastiklerin Kullanılması

Asfalt kaplamalarda öğütölmüş kauçuk ince agreganın yerine kullanılabilir. Bu işlemdede, kauçuk parçaları sıcak karışıma karışımın açık-gradasyonlu sürtünme tabaka çeşidinin içerisine ince agrega olarak eklenir. Bu işlem kuru yöntem olarak adlandırılır ve yaklaşık olarak 6,4 mm (1/4 in) den 0,85 mm (No.20 elek) ‘eye kadar çeşitlilik gösteren öğütölmüş kauçuk parçaları kullanılmaktadır. İnce agreganın parçası olarak asfalt karışımların içine atılan öğütölmüş kauçuk parçaları, kauçukla modifiye edilmiş bitümlü karışımlar olarak adlandırılır.

Öğütölmüş kauçuk, bitümlü bağlayıcıyı modifiye etmek için de kullanılabilir. Bu işlemlle bitümlü bağlayıcının viskozitesi artırılmış olur. Bu proseste %18-25 oranında kauçuk yüksek sıcaklıklarda asfalt çimentosuyla harmanlanıp kauçuk kaplanmış asfalt bağlayıcısı elde edilir. Bu işlem ıslak yöntem olarak adlandırılır ve 0,6 mm-0,15 mm arasındaki büyüklüklerdeki öğütölmüş kauçuk tanecikleri kullanılır (Epps, 1994). Lastikle modifiye bitümlü bağlayıcılar olarak adlandırılır.

Asfalt kauçuk bağlayıcıları, öncelikle sıcak asfalt karışımı kaplamalarda kullanılır. Yüzeysel kaplamalarda (seal coats) basınç yutucu membran (SAM), basınç yutucu membran ara tabakası (SAMI) veya agregasız membran kaplaması olarak da kullanılabilir.

Lastik parçaları ilave edilen kaplamaların, geleneksel asfalt beton kaplamalarına göre daha elastik olduğu gözlenmiştir. İlave edilen lastik parçalarının don kabarması sonucu oluşan çatlama potansiyelini en aza indirdiği, sıcaklığın etkisiyle kaplamanın yumuşamasını ve genleşmeyi minimuma indirip kaplamanın bozulmasını önlediği saptanmıştır. Sonuç olarak normal asfalt kaplamalarından daha az kalınlık ve maliyette yapılabilmektedir (Limbachiye ve diğ.,2004a).

Parçalanmış lastikler yol dolguları için sıkıştırılarak hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Sıkıştırılmış hurda lastik parçaları dayanıklı, düşük değerde yatay basınç ileten ve kolaylıkla drene olabilme özelliklerine sahiptir. Lastik yongaları zayıf ve sıkışabilir, çok yumuşak zeminlerin üzerinde hafif dolgular oluşturmaktadır. Böylece oturmalar azalmakta, stabilite artmaktadır. 1 m³ sıkıştırılmış lastik yongalarından oluşturulmuş dolguda, yaklaşık 100 adet hurda lastik kullanılmaktadır.

Sadece lastik yongalarından oluşan dolguların birim hacim ağırlıkları yonga boyutuna ve kompaksiyona bağlı olarak 3–5,5 kN/m³ değerleri arasında değişmektedir. Özgül ağırlıkları ise içerisindeki metala bağlı olarak 11,3–13,6 kN/m³ değerlerini almaktadır. Kum-lastik yongası karışımından oluşan dolgular, sadece lastik yongalarından oluşan dolgulardan nazaran daha az deformasyona uğramaktadır. Ağırlıkça %30 kum- %70 lastik yongası karışımının elastisite modülü saf kumun elastisite modülüne yakındır. Lastik yongası - kil karışımlarının elastisite modülleri ise daha düşük değerdedir.

Yapılan çalışmalarda sadece lastik yongalarıyla yapılan dolguların üzerine serilen 1m kalınlığındaki zemin örtüsünün yolun tasarım ömrünü 12 yıla kadar arttırdığı gözlenmiştir. Böylelikle sıkışma minimum olmaktadır. Lastik yongalarıyla zemin karışımları yük altında başlangıçta önemli bir plastik sıkışma göstermektedir. Bu sıkışma değeri saf lastik yongalarının başlangıçtaki yerleştirme kalınlığının yaklaşık % 40'ı kadar yüksek olmaktadır. Başlangıçtaki bu plastik sıkışmayı önlemek ve devamında oluşan plastik birim şekil değiştirmeleri sınırlamak için sadece lastik yongalarıyla oluşturulan dolguların üzerine 1 metre kalınlığında zemin serilmelidir. Yeterli kalınlıkta zemin örtüsünün serilmesi lastik yongalarıyla oluşan dolgularda karşılaşılabilecek yanma problemlerini de önlemiş olmaktadır. Lastik yongalarından oluşan tabakanın geotekstil ile sarılması gereklidir. Böylece lastik yongalarından

oluşan tabakanın üstündeki ve altındaki zemin, lastik yongası tabakasına girmeden drenaja izin verecektir (Humphrey ve Nickels, 1997).

Lastik yongalarının gözenekliliği,, uzun dönemde rijitliği etkiler. Lastik yongalarının gözenekliliği, lastik yongalarının boyutlarına, uygulanan basınca göre değişmektedir. Büyük lastik parçaları, daha küçük lastik parçalarına göre daha fazla sıkışmaktadır. Bunun gibi zemin-lastik yonga karışımı da lastik yongalarının arasındaki boşlukları zeminin doldurmasıyla daha düşük boşluk oranına sahip olmakta ve sıkışma daha az olmaktadır. (Bosscher ve Edil, 1997)

Lastik yongalarıyla yapılan dolgu inşaatının bitirilmesinden sonra belli bir süre için farklı oturma değerleri oluşmaktadır. Bu oturma değerleri tespit edildikten sonra yol yüzeyi son haline getirilmelidir.

Taban zemininde lastik yongaları dolgu malzemesi olarak kullanıldığında, aynı özelliklere sahip granüler zemine göre daha az don penetrasyon derinliğine sahiptir. Bunun nedeni yüksek ısı yalıtımına sahip olmasıdır.

Direk olarak karayolu uygulaması olmamasına rağmen, bütün haldeki lastikler istinat duvarı yapımında da kullanılır. Yol kenarındaki banket alanlarının stabilizasyonunda ve yol yatak eğiminin korunmasını (şev stabilizasyonunda) sağlamak için de kullanılır. Her uygulamada bütün haldeki lastikler düşey halde birbirlerinin üzerine gelecek şekilde istiflenmekte ve çelik tellerle birbirlerine bağlanmaktadır.

3.6 Cam Atıkları

Cam, kum ve nötr sodyum karbonattan oluşan erimiş sıvı karışımın donma derecesinin altında kristalleşmeden, malzemenin iç yapısı bozulmadan hızlı bir şekilde soğutulup katı hale getirilmesiyle elde edilen bir malzemedir. Atık camın ezilerek kum boyutuna getirilmesiyle, atık cam doğal agrega malzemesinin özelliklerini göstermektedir.

3.6.1 Cam Atıklarının Fiziksel Özellikleri

Ezilmiş cam kırıntıları genellikle köşelidirler ve yassı, ince uzun parçacıkları içerirler. İçerdiği taneciklerin miktarı işleme süreçlerine göre değişmektedir. Ekstra ezme işlemiyle oluşan küçük parçacıklar, daha az köşelilik gösterirler ve yassı, ince

uzun taneciklerin miktarını azaltırlar. Bunun için uygun parçalama ve eleme metotları seçilmelidir. Cam kırıntılarının başlıca fiziksel özellikleri Tablo 3.19’da görülmektedir.

Tablo 3.19: Cam Kırıntılarının Fiziksel Özellikleri

	İri taneli cam kırıntıları	İnce taneli cam kırıntıları
Tanecik Şekli	Köşeli	Köşeli
Yassılık	%20–30	%1
Yassı/İnce uzun tane	%1–2	%1
Özgül Ağırlık	1,96–2,41	2,49–2,52
Geçirimsizlik (cm/sn)	$2 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$

Ezilmiş cam, kaba taneli kum gibi yüksek permabilite özelliğine sahiptir. Permabilite katsayısı camın gradasyonuna göre değişmektedir. Camın gradasyonu da ezme ve eleme süreçlerinin derecesine bağlıdır. New York’da 1993 yılında malzeme geri kazanımı tesislerinde toplanan atık cam kırıntılarının gradasyon limitleri Tablo 3.20’de gösterilmiştir (Chesner, 1992).

Tablo 3.20: Cam Kırıntılarının Gradasyon Değerleri

Elek Boyutu	%
25,4 mm (1 in)	100
12,7 mm (1/2 in)	98,7
6,35 mm (1/4 in)	86
3,18 mm (1/8 in)	32,6
0,84 mm (No.20)	6,4
0,42 mm (No.40)	3,2
0,21 mm (No.80)	1,5
0,075 mm (No.200)	0,6

3.6.2 Cam Atıklarının Kimyasal Özellikleri

Camın büyük bir kısmı silis ve kumdan oluşmaktadır. İstenilen kalitede ve renkte cam üretebilmek için daha önceden belirlenmiş miktarlarda kireçtaşı, sodyum karbonat içermeleri gereklidir. Cam tesirsiz bir eleman gibi görülmesine rağmen, alkaliyle reaksiyona girince kimyasal direnç gösterememektedir. Camın portland çimento betonunda kullanımında camın içerisindeki silikayla alkalinin reaksiyonu olumsuz etkilere sebep olmaktadır.

3 çeşit cam imalatı vardır. Bunlar karbonat-kireç grubu A.B.D’de cam üretiminin %90’ını oluşturmaktadır, birçok cam şişeler ve pencere camları bu gruba girmektedir. İkinci grup kurşun-alkali silika camları ampullerin, neon işaretlerinin ve kristal, optik cam eşyalarının üretiminde kullanılmaktadır. Üçüncü grup ise yüksek sıcaklıklarda yumuşama noktasına sahip, yemek ve laboratuvar eşyalarının üretiminde kullanılan borosilika camlardır (Sherwood, 2001). Bu grupların kimyasal bileşimleri Tablo 3.21’de görülmektedir.

Tablo 3.21: Cam Atıklarının Kimyasal Bileşimleri

Bileşimleri	Karbonat-Kireç	Kurşun-Alkali-Silika	Borosilika
SiO ₂	70–73	60–70	60–80
Al ₂ O ₃	1,7–2,0	-	1–4
Fe ₂ O ₃	0,06–0,24	-	-
Cr ₂ O ₃	0,1	-	-
CaO	9,1–9,8	1	-
MgO	1,1–1,7	-	-
BaO	0,14–0,18	-	-
Na ₂ O	13,8–14,4	7–10	45
K ₂ O	0,55–0,68	7	-
PbO	-	15–25	-
B ₂ O ₃	-	-	10–25

3.6.3 Cam Atıklarının Mekanik Özellikleri

Yassı ve ince uzun parçacıklar kaplamaların soyulmasına, yüzey kaymalarına, camın aşırı yansıma özelliği de göz kamaşmasına neden olmaktadır. Yansıma özelliği aynı zamanda yüzey görünürlüğünü de artırmaktadır, gece yol görünürlüğünün artırılması için köy yollarında kullanımı uygundur. Cam, asfalt bağlayıcılarını soğurmadığından ve cam hidrofilik (su seven) olduğundan nem başlıca problem olarak tanımlanmıştır. Birçok araştırmacı kireç kullanımının bu problemleri azaltacağını öngörmüştür. %15 oranında cam kırıklarının bitümlü bağlayıcıya yapışabilmesi için sönmüş kireç kullanılmaktadır. Karışıma %15 oranında cam katıldığı zaman CBR değeri %132 gibi yüksek bir değer olmaktadır. Cam atıklarının mekanik özellikleri Tablo 3.22’de verilmiştir.

Tablo 3.22: Cam Atıklarının Mekanik Özellikleri

Los Angeles Aşınma (%)	%30–42
Maksimum Kuru Yoğunluk (kN/m ³)	18,00–19,00
Optimum Yoğunluk	%5,7–7,5
İçsel Sürtünme Açısı	51°–53°
CBR % 15 Cam	132
(%) % 50 Cam	42–125
Sertlik	5,5

Camın ısı iletkenlik değeri düşüktür. Düşük termal iletkenliğe sahip olan agregalar ve agrega karışımları donma penetrasyon derinliğinin azalmasına yardımcı olmaktadır. 1970 yılların başında yapılan çalışmalar sonucunda, doğal agregalarla karşılaştırıldığında cam agrega kaplamalarının, camın düşük termal iletkenliğine bağlı olarak soğutulması uzun sürmektedir. Karışık renkli ezilmiş cam için yakın zamanda yapılan termal iletkenlik test sonuçlarına göre ezilmiş camla hazırlanan karışımların ısı yalıtım değerleri doğal çakıllı kum agrega karışımlarından daha yüksektir. Termal iletkenlik değerleri Tablo 3.23’de görülmektedir (EPA, 1996).

Tablo 3.23: Cam Atıkların Termal İletkenlik Değerleri

°K (Watt/m)	Ezilmiş Cam	Çakıllı Kum
1. Numune	0,315	0,463
2. Numune	0,260	0,638

3.6.4 Cam Atıklarının Karayollarında Kullanılması

Ezilmiş ve elenmiş cam atıkları asfalt kaplama karışımlarında ince agreganın parçası olarak kullanılabilirler. İstenilen performans, sıcak asfalt karışım kaplamalarına %10- 15 oranlarında cam içerdiği sürece sağlanır. Cam Asfalt sözcüğü bu yapıları tanımlamak için kullanılmıştır. İlk cam asfalt projelerinde yüksek oranda cam kullanımı (%25’den daha fazla) öngörülmüştür. 1960 ve 1970 yılında gerçekleştirilen birçok uygulamada yüksek oranda cam kullanımının ve büyük parçacıkların problemleri daha da arttırdığı gözlenmiştir. Bundan dolayı 4.75 mm.’den daha küçük, ince agregalar boyutundaki cam kırıkları bitümlü sıcak karışımlarda kullanılmalıdır. % 15’den fazla cam içeren sıcak asfalt yüzey kaplamaları asfalt

yüzeyin camdan ayrışmasına sebep olarak soyulmaya sebep olmaktadır (Flynn, 1993).

Yuvarlak kum ile karşılaştırıldığında, uygun boyutlardaki köşeli cam kırıntıları asfalt karışımın stabilitesini artırır. Stabilitenin geleneksel karışımlardan daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Diğer yararlı özelliklerden olan düşük soğurma, özgül ağırlık ve düşük termal iletkenliğin sıcaklığı cam karışımın içine hapsettiği de kanıtlanmıştır. Asfalt betonunda kullanılacak cam kırıntılarının içerisinde plastik, kâğıt ve metal gibi malzemeler bulunmamalıdır.

Uygun işlemlerden geçirilerek granüler temelde kullanılan çakıl ve kum özelliklerine getirilerek kullanılabilir. %25 üstü yüksek oranlı karışımlar temel tabakalarında kullanılabilir. Büyük boyutlardaki 9,5–15,3 mm arasındaki cam kırıklarının temel tabakasında kullanımı uygundur.

3.7 Mermer Atıkları

Doğal kaynaklar içinde madenler, yenilenmeyen hammadde oluşları, kıt kaynaklar sınıfında yer almaları, genelde kırsal kesimlerde oldukları için kentlere göçü önleyici ve coğrafik yapıyı düzeltici fonksiyonları bulunmasından dolayı ülke ekonomisinde önemli bir yere sahiptir. Tüm endüstri dallarının ürettiği ürünlerde veya üretim için gerekli araçlarda doğrudan veya dolaylı olarak maden ve maden ürünlerine değişik oranlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Maden sektörü içerisindeki doğal taşlar insanoğlu tarafından bilinen en eski inşaat malzemeleridir. Doğal taşlardan mermer ise eski çağlardan beri medeniyetlerin kurulmasında, kültürlerin gelişmesinde önemli bir rol almıştır. İnşaat sektöründe mermerlerin kullanımı da her geçen gün artmaktadır.

Maden cevherlerinin kazılması ve işlenmesi sırasında büyük miktarlarda atık kayaçlar ve bu kayaçların öğütülmesi, parçalanması sırasında da tortular oluşmaktadır. Kömürün hazırlanması ve yıkanması aşamalarında oluşan kömür tozu atığı da maden işleme endüstrisinin bir atığıdır. Tüm bu atıklar karayollarında sıcak asfalt karışımlarda mineral filler ve ince agrega yerine, granüler temel ve alttemel tabakalarında kullanılabilir (Sherwood, 2001). Bu bölümde ise maden endüstrisinde taş ocağı atıklarından biri olan mermer tozu atığı üzerinde durulacaktır.

Mermer bilimsel anlamda, kireçtaşı (CaCO_3) ve dolomitik kireçtaşlarının ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ısı ve basınç altında metamorfizmaya uğrayarak, yeniden kristalleşmesi sonucunda ilksel kayacından farklı bir yapı kazanmasıyla oluşan bir kayadır ve hakiki mermer olarak da adlandırılmaktadır. Kireçtaşından oluşan mermer, hem kalsiyum karbonat, hem de magnezyum karbonat içerebilmektedir. Bunların içinde az miktarda kuvars, grafit hematit, limonit, pirit, mika, klorit gibi minerallerde bulunabilmektedir. Bu mineraller mermere değişik renkler ve damarlı bir görünüş kazandırmaktadır.

Endüstriyel anlamda ise, ekonomik olarak kesilebilen ve parlatılabilen, bir ticari değeri olan her türlü kayaç mermer ismi altında tanımlanmaktadır. Bu tanımlama içerisinde hakiki mermerin yanında iyi parlatılabilen kalker, traverten, serpantin, oniks mermeri, dolomit, granit, diyabaz, bazalt, arduaz, kumtaşı, tektonik breş ve konglomera da yer almaktadır.

Petrografik olarak da, masif, kabaca geçirdiği metamorfizma şekline göre tekdüze irilikte, kalsit kristallerinin arasında boşluk bırakmaksızın dizildiği bir mozaik olarak tanımlanmaktadır (Kavas ve Kibici, 2002).

Mermer bloklarının ocaktan çıkarılması, fabrikalarda işlenmesi ve atölye aşamalarında ortaya çıkan ve mamul mermer üretiminden geriye kalan tüm mermer parçaları ve partikülleri mermer atığı olarak kabul edilmektedir.

Parça boyutları dikkate alındığında mermer atıkları 2 gruba ayrılır. Birinci grup, iri boyutlu parça mermer atıklarıdır. Bunlar çoğunlukla artık olarak nitelendirilir. Artıklar, sayalama, tarama proses aşamalarında ortaya çıkan ve doğrudan mermer niteliğinde kullanımları olan parça, kırık ve kırıntı özelliğindeki ürünlerden oluşmaktadır. Kesilen mermer, birkaç milimetrede olabilir, blok boyutunda da olabilir. İkinci grup ise koloidal yapıda olup, çoğu 150 m olan ve maksimum parça boyutu 1 mm'ye kadar ulaşabilen kesim sonrası atıklardır. Bunlar genelde mermer çamuru olarak nitelendirilirler. Atıklardan farklı olarak karışımlarında hidrokarbonlar, metal talaşları ve polisajdan kaynaklanan bazı kimyasal ve mermer dışı malzemeleri içerebilirler. Artıklar pasa ya da moloz döküm sahalarında depolanırken; atıklar suyla beraber dekantasyon havuzlarında toplanırlar.

3.7.1 Atık Mermer Tozunun Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri

Özgül ağırlıkları 23,8–27,5 kN/m³ değerleri arasında değişmektedir. Sertlik katsayısı 3–4 değerlerini almaktadır. Su emme değeri %10-%30 arasında değişmektedir. Gözeneklilik değeri 0,20 ve basınç mukavemeti 64,8–70,1 MPa değerini almaktadır.

Kimyasal bileşimi Tablo 3.24’de görülmektedir. % 49,53 değerinde kalsiyum oksit içerdiğinden, yapısı da ince olduğundan kirece benzer özellikler göstermektedir.

Tablo 3.24: Mermer Tozunun Kimyasal Bileşimi

Bileşenler	Ağırlıkça (%)
SiO ₂	0.24
Fe ₂ O ₃	0.02
CaO	49.53
MgO	2,2

3.7.2 Mermer Atıklarının Karayollarında Kullanılması

Zemin iyileştirilmesi için uygulanacak yöntemin seçilmesi, zeminin özellikleriyle ve iyileştirilme yapılmasındaki amaçla ilgilidir. En sık kullanılan stabilize yöntemi zemine çimento, kireç, bitüm gibi katkı maddeleri katarak yapılan iyileştirmedir. Günümüzde atık malzemelerde katkı maddeleri olarak kullanılmaktadır.

Kireçle stabilize edilen ince taneli zeminler, daha düşük plastisiteye ve daha iyi işlenebilirliğe sahip olacak şekilde dönüştürülebilirler. Mermerin kimyasal bileşiminin kireçle benzerlik göstermesi ve mermer tozu taneciklerinin çok küçük boyutlu olması, ince taneli zeminlerin iyileştirilmesi için kireç yerine mermer tozunun kullanılabilmesini göstermektedir (Zorluer ve Usta, 2003). Yapılan çalışmalarda sadece şişme potansiyeline etkisi incelenmiştir. Zeminin taşıma gücü, kayma mukavemeti, geçirimsizlik gibi özelliklerine olan etkisi de incelenmelidir.

Bu tabakalarda kullanılacak malzemeler, üst tabakalardan gelecek yüklerin tabana rahatlıkla iletilmesini, üstüne yapılacak yapıya sağlam bir temel oluşturmasını ve belirli bir rutubet altında sıkışabilmesini sağlamalıdır. Bu tabakalarda sıkışmanın optimum şekilde yapılabilmesi için sonradan şişme özelliğine sahip olan killi malzemenin bulunmaması gerekir. Mineral içeriği olan, çok ince bir yapıya sahip ve

%50'den fazla kireç oranına sahip olan mermer tozu atığı bu tabakaların sıkıştırılmasına büyük katkı sağlayacaktır. Bu tabakalarda mermer atığının kullanılmasıyla üstten gelen yükler taban zeminine daha rahat bir şekilde aktarılacaktır.

Asfalt Betonu binder ve aşınma tabakaları, yüzeyden gelen yüklerin yapıya zarar vermeden alt tabakaya transferini sağlar. Atık mermer tozları asfalt betonunda agrega veya mineral filler olarak kullanılabilir. Atık mermer tozunun kullanımında mineralin sürtünmeye karşı olan direnci tespit edilmelidir. Atık mermer tozu, agrega cilalanma değeri %45'den yüksekse sürtünmeye maruz kalan aşınma tabakasında kullanılabilir. Eğer cilalanma değeri yüksek değilse sürtünmeye maruz kalmayan binder tabakasında kullanımı uygundur. Yapılan çalışmalarda bu değer, 0,44–0,45 olarak bulunmuştur (Akbulut ve Gürer, 2006).

Yapılan çalışmalarda, mineral filler olarak taş tozu yerine mermer tozu kullanımının stabilite ve plastik deformasyon sonuçlarını değiştirmedeği gözlenmiştir. Öyleyse, mermer işleme fabrikalarına yakın olan yerlerde mermer tozunun bitümlü karışımda kullanımı, hem çevre kirliliğini azaltacak hem de doğal kaynakların kullanımını azaltacaktır.

Mermer toz atıklarının doğrudan bitümlü karışımlarda kullanılması daha ekonomiktir. Yapılan araştırmalarda, karışıma direkt olarak mermer tozu ilave edildiğinde sonuçların diğer mermer malzemelerinin sonuçlarına yakın olduğu gözlenmiştir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken hususta fabrikaların mermer tozlarını düzenli bir şekilde stok etmeleri ve mermer tozlarını kurutma tesislerine sahip olmaları gerekmektedir. Havuzlarda biriken nemli mermer tozlarının karışımlarda direkt kullanılmasına imkân olmadığından, kurutma için ek bir maliyet söz konusudur.(Terzi, 1998)

Atık mermer tozunun asfalt kaplamalarda kullanımının bitüm viskozitesini arttırmak ve erimesine engel olmak gibi katkıları da mevcuttur.

4. ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN KARAYOLLARINDA KULLANILMASI ÜZERİNE DÜNYADA GERÇEKLEŞTİRİLMİŞ ARAŞTIRMALAR VE UYGULAMALAR

4.1 Uçucu Küller

Dünyada enerji ihtiyacı yıllar geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla kömür tüketimi artmakta, buna bağlı olarak da uçucu kül oluşumu artmaktadır. A.B.D.'de yılda ortalama 45 milyon ton, Hindistan'da 50 milyon ton uçucu kül oluşmakta ve oluşan külün A.B.D.'de %32'si, Çin'de %40'ı, İngiltere'de %50'si, Almanya, Hollanda ve Belçika'da ise %95'den fazlası kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006).

4.1.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Mineral Filler Olarak Kullanılması

Bu konu hakkındaki ilk çalışma, 1931 yılında Detroit Edison Firması tarafından yapılmıştır. Uçucu külün fiziksel özellikleri, kireçtaşının özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Üstün boşluk doldurma özelliğine sahip olduğu, geçirimsizliğinin az olduğu (kolaylıkla içine su geçirmemesi), asfalt kaplama karışımlarında soyulma olasılığını azalttığı gözlenmiştir (Zimmer, 1970).

1994 yılında da Amerika'da sekiz eyalette (Connecticut, Louisiana, Michigan, Nebraska, New York, Ohio, Oregon ve Pennsylvania) uçucu külün mineral filler olarak kullanımı üzerine bir araştırma yapılmıştır. Araştırmaya katılan eyaletlerden ikisinde (Michigan ve Nebraska) uçucu külün performansının düşük olduğuna karar verilmiştir. Diğer eyaletlerde ise olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Plastik deformasyonların azaldığı, esneklik modülünün ise arttığı gözlenmiştir (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1994).

Ali ve diğ. (1996) uçucu külle hazırlanan asfalt betonunu karışımlarının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Değişik içeriklerde uçucu küllerle oluşturan dört çeşit karışım hazırlanmıştır. Bu numunelere uygulanan deneylerle asfalt betonu karışımlarının esneklik modülü (Mr), kalıcı deformasyonu, yorulma dayanımı ve tekerlek izi oluşumuna karşı direnimsizlik değeri incelenmiştir. Uçucu külün asfalt betonu karışımlarında mineral filler olarak kullanımının, karışımın soyulma dayanımını, esneklik modülünü arttırdığı gözlenmiştir. Uçucu küllü asfalt betonu karışımlarındaki tekerlek izi oluşumları ve hizmet kabiliyeti değeri incelenerek de bu karışımların arazi performanslarında önemli bir azalma olmadığı fakat kaplamalardaki çatlakların arttığı gözlenmiştir. Tüm incelemelerden sonra, uçucu külün asfalt betonu karışımlarında kullanımının asfalt betonu kaplamalarının performansını arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Güney Carolina'da 1999 yılında yapılan çalışmada iki tip uçucu kül asfalt beton kaplamalarındaki agregaların bir kısmı yerine kullanılmıştır. Uçucu külle oluşturulan karışımlarının çekme mukavemetlerinin Güney Carolina Ulaştırma Departmanının belirlediği minimum standart değeri sağladığı gözlenmiştir. Ayrıca uçucu küllü karışımların çevresel etkilerini incelemek için bir arazi çalışması da yürütülmüştür. Yakındaki zeminlerde meydana çıkan ağır metal yoğunlaşması incelenmiştir. Uçucu küllü asfalt betonu karışımı yerleştirildikten üç ay sonra zeminlerdeki metal yoğunlaşmasının değişmediği gözlenmiştir (Churchill ve Amirkhanian, 1999).

Ramme ve diğ. (2005), yaptığı çalışmada asfalt betonunda C tipi uçucu kül kullanmıştır. Esnek kaplamalarda uçucu küllerin kullanımının ekonomik bir metot olduğu savunulmuştur. Yolun yeniden inşasında pahalı yeni granüler temel tabakasına olan ihtiyacı da azaltacağı sonucuna varılmıştır.

4.1.2 Stabilize Temel ve Alt Temel Tabakalarında Kullanılması

Stabilize temel ve alt temellerde uçucu külün kullanımına Amerika'da 1950'li yıllarda başlanılmıştır. Poz-o-Pac adı verilen patentli bir ürün temel tabakalarında kullanım için geliştirilmiştir. Bu ürün kireç, uçucu kül ve agreganın karışımıyla oluşturulmuştur. 1970'lere kadar bu ürün kullanılmıştır. Bu yıldan itibaren Poz-o-Pac ürününden üstün, değişik birçok agrega-kireç-uçucu kül karışımları yol temel

tabakasında kullanılmak üzere oluşturulmuştur. Portland çimentosu içeren stabilize temel karışımları da geliştirilmiştir.

1970'li yıllarda kireç, portland çimentosu, uçucu kül ve kumdan oluşan bir temel tabakası kullanılarak esnek kaplama sistemi tasarlanmıştır. Jumbo jet uçaklarının oluşturduğu gerilimlere dayanabilecek kapasitede, çeşitli karışımlarla üç katmandan oluşan bir temel tabakası oluşturulmuştur. Karışıma kireç ve portland çimentosu toplam karışımın %3-4'ü kadar, uçucu kül miktarı ise %10-12 oranında katılmıştır. Temel tabakasının kalınlığı 610-914 mm arasındadır. Mukavemet değerlerinin 13,78-17,91 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. 30 yıl sonrada bu kaplamaların gösterdiği üstün performanslar devam etmektedir (Yang, 1978).

1975 yılında, A.B.D.'de (West Virginia) otopark temel tabakası için çimentoyla stabilize edilmiş uçucu kül kullanılmıştır. 7 gün sonraki serbest basınç mukavemeti 3,905 MPa olarak, 90 gün sonraki ise 5,996 MPa olarak bulunmuştur. Yolun performansına, mevsimsel değişimlerin etkisinin olmadığı gözlenmiştir (Meyers, 1976).

1985 yılında Georgia Ulaştırma Departmanı 2.6 km'lik yolu uçucu küllü karışımlar kullanarak yeniden inşa etmişlerdir. 2 şeritli yolun 305 m'sinde temel tabakası olarak, çimentoyla stabilize edilmiş havuz külü kullanılmıştır. Yolun 244 m'sinde ise çimentoyla stabilize edilmiş uçucu kül temel tabakası kullanılmıştır. Her iki yolun da yüksekliği 215 mm olacak şekilde inşa edilmiştir. Yolun yapımından bir yıl sonra, havuz külüyle yapılmış bölümün ortalama mukavemeti 14,57 MPa; uçucu küle oluşturulan bölümün ortalama mukavemeti 5,99 MPa olarak bulunmuştur (Larrimore, 1989).

1987 yılında da Michigan'da 460 m uzunluğunda bir banket, uçucu kül kullanılarak inşa edilmiştir. 690 ton çimentoyla stabilize edilmiş, yüksek karbon içerikli F sınıfı uçucu kül kullanılarak temel tabakası yapılmıştır. 915 m banket malzemesi 2,7 m genişliğinde ve 250 mm sıkıştırılmış kalınlıkta yerleştirilmiştir. Yolun hizmete açıldıktan bir yıl sonraki performansına bakıldığında, 6,890 MPa değerine ulaştığı gözlenmiştir. Hizmete açıldıktan bir yıl sonra da, yolun performans değerleri oldukça yüksektir. Ancak yüksek performans göstermesine rağmen, banket kaplamasında bazı bölgelerde her yönde çatlaklar gözlenmiştir (Berry ve diğ., 1989).

Teksas'da 1988 yılında yapılan uygulamada, herhangi bir agrega veya bağlayıcı kullanılmadan temel tabakası karışımında %100 uçucu kül kullanılmıştır. Yerleştirilip, sıkıştırıldıktan sonra 7 ve 28 günlük ortalama serbest basınç mukavemeti ancak 255 kPa değerine ulaşmıştır. Dört ay sonra da kaplamalarda ondülasyonlar görülmüştür. Tek başına uçucu külün temel tabakalarında kullanımının uygun olmadığı anlaşılmıştır (Lav, 1997).

1992 yılında A.B.D.'de ulaştırma şirketlerinin yaptığı araştırmada, 22 eyalette 1955 yılından itibaren çeşitli yollarda, stabilize edilmiş uçucu küle temel ve alt temel uygulamalarının yapıldığı anlaşılmıştır. Bu uygulamalardan genelde olumlu sonuçlar alınmıştır (Collins, 1994).

Avustralya'da yapılan bir çalışmada da, Eraring Termik Santrali'nden elde edilen F sınıfı uçucu kül stabilize edilerek (çimento ve kireçle) mikro yapısı ve kaplama temel tabakasında kullanımını incelenmiştir. Orijinal ve stabilize edilmiş uçucu kül, x-ışınli fluoresans spektrometresi, difraksiyonu ve tarayıcı elektron-mikroskop yardımıyla kimyasal, minerolojik ve mikro yapısal gelişimi incelenmiştir. Numunelerin dayanımındaki gelişmelerde tespit edilmiştir. tarayıcı elektron mikroskop yardımıyla elde edilen sonuçlara göre, kireçle stabilize edilmiş uçucu küle bulunan hidratasyon ürünleri çimento ile yapılan stabilizasyon sonucu oluşan ürünlere benzerlik göstermektedir. Aynı zamanda, tepkimelerin hızı, oranı, oluşan hidratasyon ürünlerinin miktarları aynıdır. Serbest basınç mukavemet deneyi yapılarak uçucu küle ilave edilen kireç ve çimentonun etkisi incelenmiştir. Çimentoyla stabilize edilmiş uçucu kül, kireçle stabilize edilmiş uçucu küle göre ilk 28 günde daha yüksek dayanım göstermiştir. 360 günlük kür sonuna kadar iki malzeme arasındaki dayanım farkı aynı kalmıştır. Uçucu külün puzolanik özelliği, 180. ve 360. günlerde kendini belirgin bir şekilde göstermiştir. Bu zaman diliminde, her iki malzemeyle de hazırlanan numunelerin dayanımlarının arttığı gözlenmiştir. Uçucu külün stabilize edilerek karayollarında temel tabakası olarak kullanımını araştırmak için laboratuarda ve arazide birçok deneyler yapılmış ve uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Lav, 1997).

4.1.3 Taban Zemini Stabilizasyonunda Kullanılması

Ferguson (1993), LaCygne Termik Santralinde oluşan C sınıfı uçucu külü Heartland Yarış Pistinin zemin stabilizasyonunda kullanmıştır. Uçucu kül numunesine uygulanan Standart Proktor deneyi (ASTM D-698) sonuçları incelenmiştir. Stabilizasyon için kullanılan uçucu külün oldukça ekonomik bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

Fishman ve Seung (1993), yaptıkları çalışmada, taban zemininde çeşitli agrega atıkları ve uçucu kül kullanmışlardır. Taban zemininde kullanılan uçucu külün tüm esnek kaplama sistemine nasıl etkilediğini incelemişler ve olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Asfalt Enstitüsü tarafından geliştirilen elastik analiz programı, tekerlek izi ve yüzeysel çatlakları analiz etmek için kullanılmıştır. Taban zemin malzemesinin, lineer elastik malzeme gibi davrandığı gözlenmiştir. Bu karışımda kullanılan atık agregalar ve uçucu küller, permeabiliteyi arttırmakta, plastisiteyi azaltmaktadır. Karışımın maksimum sıkıştırılmış birim hacim ağırlığı azalırken, optimum su içeriği artmaktadır.

Amerika'da oldukça düşük taşıma gücü özelliğine sahip yumuşak ve kısmen organik malzeme içeren zeminlerin, yol inşaatında uçucu kül kullanarak taşıma gücünü arttırmak için stabilizasyonun sağlanmasına ait araştırmalar yapılmıştır. İki çeşit yumuşak zemin numunesine Wisconsin Portage'daki Columbia Enerji Üretme Santralinden getirilen C tipi uçucu külü katılarak zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi incelenmiştir. Bu yumuşak zemin numuneleri 0,6-1,0 m derinden alınmış yüzey numuneleridir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırmasına göre, Tip A düşük plastisiteli kil (CL), Tip B ise düşük plastisiteli silt malzemesidir. Her iki zemin numunesi de çok az miktarda (%1-2) organik zemin içermektedir. Numunelere Standart Proktor Deneyi (ASTM D 698) ve CBR Deneyi (ASTM D 1883-99) yapılmıştır. Deneyle sonuçları, numunelerin indeks değerleri, kompaksiyon özellikleri, zemin sınıfları Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan C tipi uçucu külün yüksek oranda kalsiyum oksit içerdiği, % 23 oranında kireç içerdiği, tane birim hacim ağırlığının $26,8 \text{ kN/m}^3$ olduğu saptanmıştır. Uçucu külün 200 no'lu eleğin altına geçen kısmının % 98 olduğu tespit edilmiştir. Bu da uçucu külün büyük oranda ince taneli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.1: Zemin Numunelerinin Mekanik Özellikleri

Numuneler	W _L (%)	I _p (%)	İnce Tane (%)	Organik İçerik (%)	Zemin Sınıflandırılması		CBR (%)	W _n (%)	γ _{k,maxs} (kN/m ³)	W _{OPT} (%)
					USCS	AASHTO				
Tip A	44	20	96	2	CL	A-7-6	1	27	16,2	20
Tip B	39	15	96	1	ML	A-6	3	25	16,5	19

Laboratuar ortamında, açık havada kurutulan numuneler, 4 no'lu elekten elenerek, mümkün olduğunca ince ve homojen zemin numuneleri oluşturulmuştur. Kuru haldeki zemin numuneleri ile değişik oranlarda uçucu kül homojen bir şekilde karıştırılmıştır. İstenilen su içeriğine gelene kadar su spreylenecek karışıma ilave edilip, CBR numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler, % 100 nem ortamını sağlayan nem odasında 7 gün bekletildikten sonra CBR deneyi uygulanmıştır. Değişik oranlardaki zemin – uçucu kül – su karışımlarının CBR deney sonuçları Tablo 4.2’de görülmektedir. Uçucu kül oranının arttırılmasıyla zeminin mukavemetini belirten CBR değerinin de arttığı gözlenmektedir. Uçucu kül ile stabilize edilen zeminin CBR değerleri % 1–3 oranlarından %38–56 oranlarına çıkarılmıştır (Şenol ve Edil, 2004).

Tablo 4.2: Değişik Oranlarda Uçucu Kül-Su Karışımlarının CBR Değerleri

Uçucu Kül (%)	Tip A				Tip B			
	Laboratuar		Arazi		Laboratuar		Arazi	
	Su (%)	CBR (%)	Su (%)	CBR (%)	Su (%)	CBR (%)	Su (%)	CBR (%)
0	27	1	-	-	25	3	-	-
10	-	-	-	-	21	32	15	30
12	22	34	20	31	-	-	-	-
14	-	-	-	-	22	36	-	-
16	23	51	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	22	38	-	-
20	24	56	-	-	-	-	-	-

Zemin numunelerinin alındığı bölgelerde uçucu kül oranı Tip A zemini için karışımın %12’si, Tip B zemini için karışımın %10’u seçilerek zemin stabilizasyonu yapılmıştır. En son olarak da zemin stabilizasyonu tamamlanan araziden alınan

numunelere laboratuarda CBR deneyleri uygulanmıştır. Arazi deney sonuçları da Tablo 4.2’de verilmiştir.

Şenol ve diğ. (2003), daha önceki çalışmalarında da yumuşak zemini, C sınıfı uçucu külle stabilize ederek alt temel tabakasında kullanmışlardır. Yolun performansında artış gözlenmiştir.

4.1.4 Taban Zemininde Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması

Baltimore’da arazide uzunluğu 5,50 m ile 7,60 m arasında değişen, 0,30 m lik tabakalar halinde ve %95 standart proktor sıkılığında hazırlanan uçucu kül dolgu üzerine standart penetrasyon deneyi yapılmıştır. Deneyin sonucunda, dolgunun ortalama maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,084 kN/m³ ve optimum su içeriği de %32,60 olarak saptanmıştır. Uçucu kül dolgunun yeraltı su seviyesinden kapilerite ile beslenen aşağı kesimlerinde artan su içeriği ile elastite modülü azalmaktadır. Bu yüzden yolun drenajına gereken önem verilmelidir. Arazide yapılan deneylerle sıkıştırılmış uçucu kül dolguların davranışının başarılı olduğu tespit edilmiştir (Aksoy, 1992)

Bacher 1990 yılında, Delaware’de uçucu kül kullanılarak oluşturulan karayolu dolgu inşaatının uygulamasını anlatmıştır. Uçucu külle oluşturulan dolgu, kavşak rampalarında uygulanmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Optimum su içeriğinde, oturma ve performans değerleri geleneksel malzemelerle oluşturulan karışımların değerleriyle aynı sonuçları vermiştir. Dolgunun yapımından 2.5 sene sonra yapılan incelemelerde, yeraltı suyunun kalitesinde zararlı bir etki gözlenmemiştir (Ahmed, 1993).

4.2 Cüruflar

Dünyadaki Demir Çelik Fabrikalarında yılda ortalama 700 milyon tondan daha fazla çelik üretilmektedir. Bu üretim sonucunda da 400 milyon ton yan ürün oluşmaktadır (Kara ve diğ., 2001). A.B.D.’de oluşan cürufların %50’si çimento fırınlarında ve yol yapımında kullanılmaktadır. Güney Kore’de ise yüksek fırın cürufunun %26’sı, çelikhane cürufunun % 5’i yol yapımında kullanılmaktadır.

4.2.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Agregalar Olarak Kullanılması

Amerika'da 1970'li yıllardan önce asfalt beton kaplamalarda kaba agregalar yerine kullanılmaktaydı.

Avrupa ülkelerinde çelik cürufu kayma ve soyulma dayanımının yüksek olması, köşeli bir yapıya sahip olması nedeniyle bitümlü sıcak karışımlarda agregalar olarak kullanılmaktadır (Ahmed, 1993)

1990 yılında yapılan bir çalışmada da altı değişik agregalar karışımı kullanılmıştır. Karışımlardaki toplam agregalar içerisindeki çelik cürufu %40–100, kum ise %0–60 oranlarında değişmektedir. Sonuçta, %73 çelik cürufu, %27 doğal kum içeren karışımda en düşük bitüm oranı elde edilmiştir. Marshall stabilitesi, rijitlik modülü ve dolaylı (indirekt) çekme direncinin, en yüksek değerleri bu karışımda sağlandığı gözlenmiştir (Noureldin ve diğ., 1990).

4.2.2 Alt temel ve Temel Tabakalarında Kullanılması

Birçok ülkede cüruf, alt temel ve temel tabakası olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Avustralya'da 1982 yılında cürufun temel tabakasında kullanımını için yapılan çalışmada dört farklı karışım hazırlanmıştır. Bunlar %100'ü havada soğutulmuş cüruf; %80'i havada soğutulmuş cüruf ve %20'si granüle cüruf; üçüncüsü %50'si havada soğutulmuş, %20'si granüle, %30'u çelik cürufu, son karışım ise %79'u havada soğutulmuş, %20'si granüle cüruf, %1'i de kireç ile oluşturulmuş karışımlardır. Bu karışımlara, serbest basınç deneyi uygulanmıştır. 1 ve 2 no'lu karışımlar için serbest basınç direncinin zamanla değişimi önemsizken, 4 no'lu karışımın mukavemeti zamanla kayda değer bir şekilde artmakta, 4 MPa değerini almaktadır. Uygulanan gerilmelere bağlı olarak değişen rijitlik modüllerine bakıldığında, 1 no'lu karışımda rijitlik modülü logaritmik ölçekli grafikte lineer olarak artmaktadır. 3 ve 4 no'lu karışımlarda ise rijitlik modülü aynı gerilme düzeyi için, 1 no'lu karışımın rijitlik modülünden daha büyük olmakta, gerilmenin düşük değerleri için ise sabit kalmaktadır. Bu hazırlanan karışımlar, Sydney'deki karayollarında uygulanmıştır. Aynı taban zeminine sahip bir yolda (CBR=10), üç ayrı üstyapı modeli oluşturulmuştur. Aşınma tabakası 2,5 cm, binder tabakası 5 cm

olacak şekilde bitümlü bağlayıcı uygulanmıştır. Tablo 4.3’de üç ayrı yol modelinin temel ve alt temel tabakalarında kullanılan malzemeler ve tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 4.3: Üstyapı Modellerinde Kullanılan Malzemeler ve Tabaka Kalınlıkları

	1. Karışım	2. Karışım	3. Karışım
Temel	%100 Hava Soğutmalı Cüruf	% 79 Hava Soğutmalı Cüruf %20 Granüle Cüruf %1 Kireç	%100 Hava Soğutmalı Cüruf (Granüler)
Alt Temel	Granüler	%100 Hava Soğutmalı Cüruf (Granüler)	%79 Hava Soğutmalı Cüruf %20 Granüle Cüruf %1 Kireç
Tabaka Kalınlıkları (cm)	Temel 20 Alt Temel 30	Temel 35 Alt Temel 10	Temel 10 Alt Temel 35

Basınç ve çekme deformasyonları incelendiğinde üç farklı yapının da limit değerleri sağladığı gözlenmiştir. Cüruf karışımlarının temel tabakalarında kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Cüruf kullanımıyla, üstyapı kaplama tabakalarının kalınlıklarının da azaldığı görülmektedir.

Yine Avustralya’da yapılan bir çalışmada, her birine %1 oranında kireç eklenen değişik cüruflarla hazırlanan 4 karışıma serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Bütün karışımların 7 günlük serbest basınç değerleri 3 MPa değerinin üzerinde olup bu değer şartnameye göre stabilize kırmataş temel tabakalarında aranan değerden (Avustralya Şartnamesindeki limit değer 2MPa) fazladır (Heaton ve Bullen, 1982).

4.2.3 Taban Zemininde Kullanılması

Japonya’da yapılan araştırmalarda çelikhane cüruf taneleri arasındaki boşluklar, ince cüruf tozu ve beyaz bağlayıcı bir maddeyle doldurularak tamamen bağlanmış ve yoğun bir yapı oluşturulmuştur. Çelik cüruflarıyla hazırlanan karışımların taban zemininde kullanıldığında, zeminin taşıma gücünü arttırdığı gözlenmiştir. Bu yolun uzun süre kullanımında yolda çatlama oluşumu görülmemiştir (Kara ve diğ., 2001).

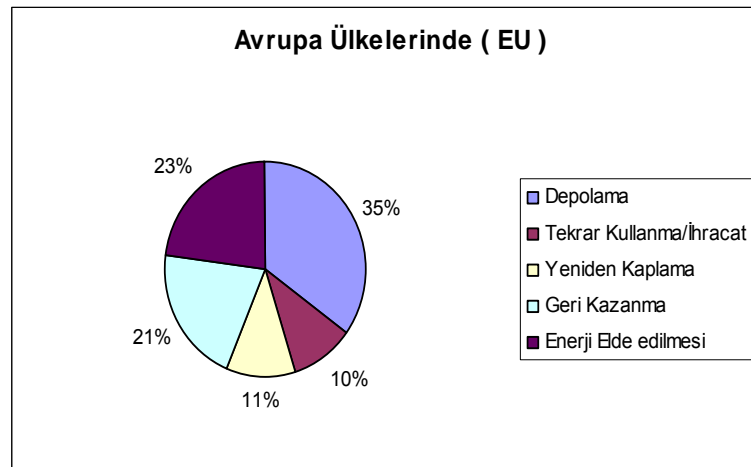
Fransa’da taşıma gücü zayıf olan bir zemini iyileştirmek için bir çalışma yapılmıştır. % 80’i konkasörden geçirilmiş 0-25mm tane boyutunda silisli çakıl, kum ve kalker

içeren malzemeye farklı türlerde %20 granüle cüruf ve %1 kireç ilave edilerek karışımlar hazırlanmış ve bu karışımlara serbest basınç deneyi uygulanmıştır. 7,14 ve 28 günlük serbest basınç dirençlerine bakıldığında, 14 günlük değerler 0,5-1,1 MPa arasında, 28 günlük mukavemetleri ise ortalama 1,50 MPa olarak bulunmuştur. Cüruf ne kadar ince taneli ve beyaz renkli olursa priz hızının da o kadar yüksek olduğu gözlenmiştir (Atanur, 1982).

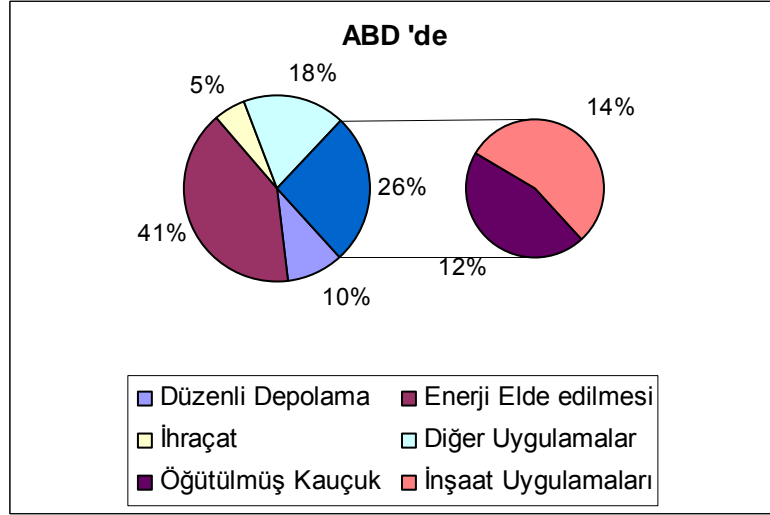
4.3 Hurda Lastikler

A.B.D.'de araba sahipleri her yıl ortalama 300 milyon lastiği elden çıkarmaktadır. Yani yaklaşık A.B.D.'de her insana bir lastik düşmektedir. Bu lastiklerin 50 milyonu yeniden kaplanmakta veya yeniden kullanılmaktadır. Kalan yaklaşık yıllık 250 milyon hurda lastik kullanılmak için beklemektedir. Bu lastiklerin %85'i otomobil lastiği iken, geri kalanı kamyon lastiğidir. Bu hurda lastiklerin sayısı yıllar geçtikçe artmaktadır. 3 milyar yığılmış, biriktirilmiş hurda lastiğin olduğu tahmin edilmektedir. Bu hurda lastikler, geniş açık hava depolarında biriktirilmektedir. Bu depolar çevre sağlığını tehdit etmektedir. Ayrıca bu hurda lastik yığınları yangın tehlikesi de oluşturmaktadırlar. Lastikler hurda haline geldiğinde atılmaları, uygun bir işlemle bertaraf edilmeleri zorunludur.

Avrupa ülkelerindeki ve ABD'de yapılan istatistikler sonucu son yıllarda hurda lastiklerin kullanım alanları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de görülmektedir (Limbachiya ve Roberts, 2004a).

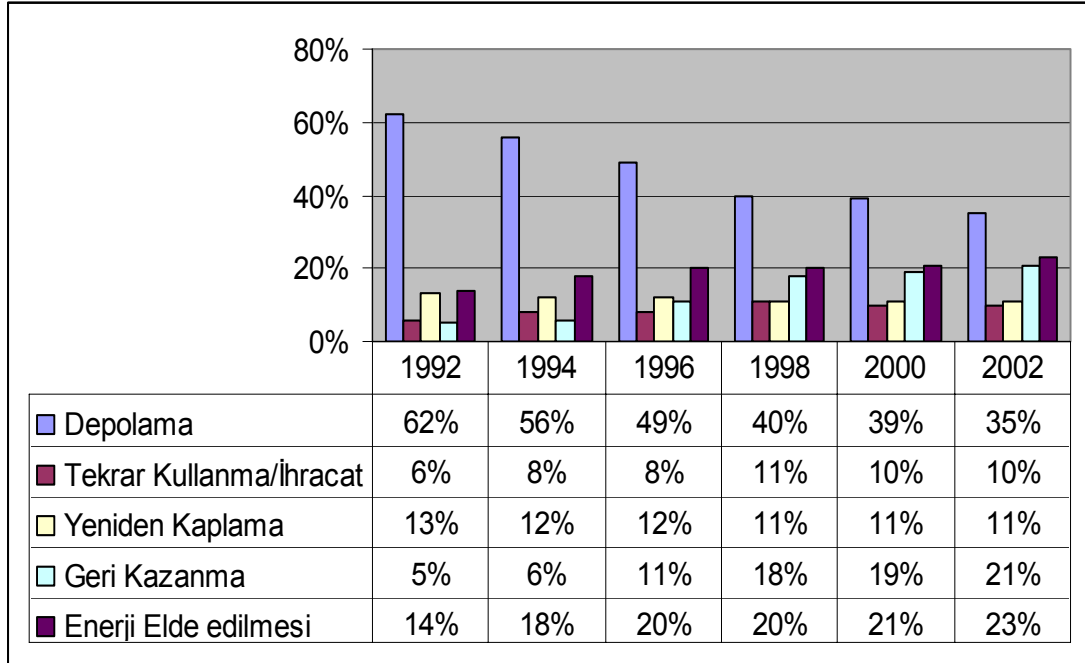


Şekil 4.1: Avrupa Ülkelerinde Hurda Lastiklerin Kullanım Oranı



Şekil 4.2: ABD’de Hurda Lastiklerin Kullanım Oranı

Avrupa ülkelerinde 1992 yılından 2002 yılına kadar hurda lastiklerin kullanım alanlarına göre dağılımları Şekil 4.3’deki grafikte görülmektedir. 10 yıllık bir sürede düzenli depolamaya giden lastiklerin sayısı neredeyse yarı yarıya azaltılmış, malzemenin geri kazanılması 4 kat oranında arttırılmıştır.



Şekil 4.3: Hurda Lastiklerin Kullanım Alanlarına Göre Dağılımı

4.3.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılması

McDonald, 85–100 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcının içerisine bağlayıcı ağırlığının %33'ü kadar revulkanize edilmiş lastik parçalarını katmıştır. Lastik katkılı bağlayıcı 215°C'ye kadar ısıtılıp, jel kıvamına gelinceye kadar karıştırma işlemi sürdürülmüştür.

1984 yılında Esch altı adet kauçuk katkılı kaplama kesitlerini incelemiştir. Bu kesitlerin toplam uzunluğu 3,4 mildir ve 1979-1983 yılları arasında yapılmıştır. Bu projelerde Plusride (kuru) işlemi kullanılarak iri kauçuk parçaları %3-4 oranında sıcak bitümlü karışıma eklenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda, kauçuk katkılı kaplamaların yorulma davranışının normal bitümlü karışımlardan 10 kat daha iyi olduğu gözlenmiştir (Esch, 1982)

İngiltere'de yapılan çalışmada da çok ince parçalanmış Wellington Rubber Şirketi tarafından sağlanan vulkanize otomobil lastiği kullanılmıştır. Lastik parçacıklarının asfalt betonunun yorulma dayanımına etkisini incelemek için ağırlıkça %2 ve 5 oranında lastik 50 ve 100 penetrasyon bitüme ayrı ayrı 160°C'de karıştırılmıştır. Karışım yarım saat içinde tamamlanmıştır. Öğütülmüş otomobil lastiğiyle modifiye edilmiş bitümlere kuru sıkıştırma deneyi, önceden belirlenen agregalar karıştırılarak oluşturulan asfalt betonuna ise yorulma deneyi yapılmıştır. Yorulma süresinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. % 5 oranında küçük bir katkı, 50 penetrasyon bitüm için yorulma süresini 2 kat arttırmıştır. 100 penetrasyon bitümle yapılan modifikasyon sonucunda ise yorulma süresinin 23 kat arttığı gözlenmiştir (Çelik, 2000).

4.3.2 Taban Zemininde Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması

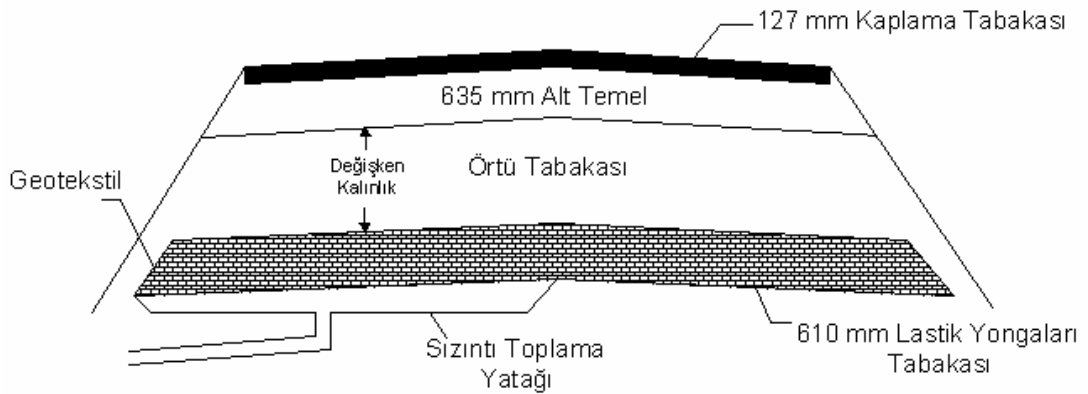
Yol kaplamasının performansına lastik yongalarının etkisini incelemek için North Yarmouth, Maine'de 2.sınıf bir otoyol üzerinde arazi uygulaması yapılmıştır. Esas amaç lastik yongalarından oluşan tabakanın üzerindeki zeminin kalınlığının, yol kaplamasının şekil değiştirmesine olan etkisinin bulmaktır. Deneyin ikinci amacı, lastik yongalarının yeraltı suyunun kalitesine olan etkisini bulmaktır. 3 yıl süren gözlemler böyle bir etkinin ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir (Humphrey ve Nickels, 1997).

North Yarmouth arazi deneyi, Maine Merkez Demiryolu'nun üzerindeki Route 231 Köprüsü için gerekli bir dolgunun teşkilinde kullanılmıştır. 2.sınıf olan bu yol, günlük ortalama 1250 araç kapasitesine sahiptir. Bu kapasitenin sadece %10'u ağır taşıtlardır.

Arazi deneyi, 4 adet 30'ar metre uzunluğunda, 610mm kalınlığında lastik yongası tabakasına sahip yoldan oluşmaktadır. Her lastik yongası tabakasının üstünde değişik kalınlıkta örtü ve temel altı tabakası mevcuttur. Bu tabakaların toplam kalınlığı 765 mm ile 1375mm arasında değişmektedir. Her 30 m'lik kısım 127 mm kalınlığında bitümlü kaplamaya sahiptir. Lastik yongalarında oluşan tabaka örgülü olmayan geotekstil (Amoco 4511) ile sarılmıştır. Böylece lastik yongalarından oluşan tabakanın üstündeki ve altındaki zemin, lastik yongası tabakasına girmeden drenajı gerçekleştirecektir. Deney kısımlarını oluşturan tabakaların içerikleri Tablo 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.4'de ise yolun enkesiti görülmektedir.

Tablo 4.4: North Yarmouth Arazi Deneyindeki Tabakaların Kalınlıkları

Kısım	Lastik Yonga Çeşitleri	Lastik Yongaları Kalınlığı (mm)	Örtü Tabakası (mm)	Alt Temel (mm)	Kaplama (mm)
1	B	610	130	635	127
2	A	610	430	635	127
3	A	610	740	635	127
4	A	610	130	635	127



Şekil 4.4: North Yarmouth Yolunun Enkesiti

Yapılan arazi deneyinde kullanılan lastik yongaları farklı iki boyuttadır. A tipi lastik yongaları uniform olarak derecelenmişlerdir ve 76 mm maksimum boyuta sahiptirler. Derecelenme şartnameleri, lastik yongalarının %100'ünün 76 mm'lik elekten geçmesini, en az %50'sinin 51 mm'lik elekten geçmesini ve maksimum %20'sinin 4 no'lu (4.75 mm) elekten geçmesini öngörmüştür.

B tipi lastik yongaları da uniform boyutlara sahiptir ve maksimum boyutları 305 mm'dir. Derecelenme şartnameleri, lastik yongalarının %100 ünün 305 mm'den küçük boyutlara sahip olmasını en az %75'inin 203 mm'lik elekten geçmesini ve maksimum %20'sinin 51 mm'lik elekten geçmesini öngörmüştür. Yonga haline getirilmiş yaklaşık 100.000 taşıt lastiği, bu proje için kullanılmıştır. Lastik yongalarından oluşan bölümün toplam uzunluğunun 122 m olduğu düşünülürse, en küçük projelerde bile büyük miktarlarda hurda lastiği kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır.

Daha sonra, sıkıştırılan lastik yongalardan oluşan dolguların birim hacim ağırlıkları; dolguya yerleştirilen lastik yongalarının toplam kütesinin arazi ölçüleriyle bulunan dolgu hacmine bölünmesiyle elde edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen birim hacim ağırlıklar; A tipi lastik yongaları için 6.9 kN/m^3 , B tipi lastik yongaları için 6.1 kN/m^3 olarak bulunmuştur. Bu değerler, laboratuvar testleriyle bulunan değerlere yakındır (Humphrey ve Nickels, 1997). Bu çalışmanın sonucu olarak, lastik yongalarının hafif dolgu malzemesi olarak kullanımının uygun olduğu görülmektedir.

Bir başka çalışmada Wisconsin'de yapılan test yol dolgusudur. Madison, Wisconsin'deki bir dolguya girmek için kullanılan yola paralel bir test dolgusu inşa edilmiştir. Bu düzenlemeyle, ağır trafik yoğunluğunun bir kısmının test dolgusu üzerine saptırılabilmesi için olanak doğmuştur. Test dolgusu 2 m yüksekliğe sahip olup şev eğimleri 1:2'dir. Dolgunun en üstteki enine genişliği 4.8 m'dir. Çevre geometrisi ve değişken sayısına bağlı olarak, test dolgusu 8 değişik kısımdan oluşturulmuştur. Her kısım 6 m uzunluğundadır. Test dolgusunun 6 kısım değişik boyutlarda lastik yongalarından zeminle karıştırılmış lastik yongalarından veya tabakalı kesitlerden oluşturulmuştur;

- 1.kısım : Tabakalı kısım (3 tabaka 0.3 kalınlığında lastik yonga dolgusu ve 2 tabaka 0.3 m kalınlığında zemin örtüsü)

- 2.kısım: 0.3 m kalınlığındaki zemin örtüsü altında 1.5 m kalınlığında lastik yonga dolgusu
- 3.kısım: 0.9 m kalınlığındaki zemin örtüsü altında 0.9 m kalınlığındaki lastik yonga dolgusu
- 4.kısım: 0.9 kalınlığındaki zemin örtüsü altında 0.9 m kalınlığında kaba lastik yonga dolgusu
- 5.kısım: 0.3 m kalınlığındaki zemin örtüsü altında 1.5 kalınlığı ince lastik yonga dolgusu
- 6.kısım: 0.3 m kalınlığındaki zemin örtüsü altında 1.5 kalınlığında hacimce yarı yarıya lastik yongası-zemin karışımı

1., 2., 3. ve 6. kısımda 50–75 mm boyutlarında lastik yongalar kullanılmıştır. 4. ve 5. kısımda hem kaba (300 mm dane boyutuna kadar) hem de ince (25 mm dane boyutlu) lastik yongalar kullanılmıştır. Zemin olarak iyi yıkanmış çakıllı kum kullanılmıştır. En üstteki 0,3 m'lik kısım kırma taştan oluşmuştur. Test dolgusu, 1990'da trafiğe açılmış ve 1995'e kadar hizmet vermiştir. 1995'te güzergâh değişimi nedeniyle kaldırılmıştır (Bosscher ve diğ.1997).

2002 yılında parçalanmış lastikleri değerlendirmek için yaklaşık 7 m uzunluğunda 8 kısımda oluşan bir dolgusu inşa edilmiştir. Her kısım farklı boyutlarda lastik parçaları kullanılarak inşa edilmiştir ve sadece zeminden inşa edilen iki kontrol bölümünü de kapsamaktadır. Bölümlerden sadece biri çakıllı kum ile lastik parçaları karışımından oluşmaktadır. Test dolgusunu yüksekliği 2 m, kret genişliği 5,3 m eğimi 1V: 2H'dır. Kum- lastik parçaları karışımı olan bölümde arazi birim hacim ağırlığı 11.8 kN/m^3 , sadece kumla inşa edilen kontrol bölümlerinin ise 16.5 kN/m^3 ile 17.5 kN/m^3 arasında değişmektedir. Dolgunun yüksekliğinin sınırlı olmasından toplam kayma dayanımı davranışı değerlendirilememektedir fakat dolgu tabanından 1.7 m yüksekte farklı kısımlara yerleştirilen oturma platformları ve yüzeye (kret ve şevlere) konulan işaretlerle deformasyon davranışı gözlenmiştir. Yaklaşık 2 yıl her gün 60 ile 100 arası çöp kamyonu, her biri ortalama 21.6 ton ağırlık yaparak dolgunun üzerinden geçmiştir. Yüzey işaretlerinin yanal hareketi, lastik parçalarıyla inşa edilen bölümler de dâhil hiçbir bölümde ve şevlerde çıkıntı olmadığını göstermiştir. Kamyon lastiklerinin bıraktığı ize yerleştirilen yüzey işaretleri, yüzey oturmasının ilk 20 gün kamyon trafiği ile birlikte hızla arttığını ve 60 gün sonra sabit kaldığını göstermiştir. Sadece lastik parçalarıyla inşa edilen (üzerinde 1m.

kalınlığında zemin tabakası bulunan) bölümler iyi davranış göstermiştir. Kum lastik parçaları karışımının (üzerinde 0.3 m kalınlığında zemin tabakası bulunan) bulunduğu bölümde benzer davranış göstermiştir. Yüzeydeki işaretlerin oturması, trafik yüklemesine bağlı gerilme artışının en büyük olduğu yerdeki yüzey malzemeleriyle ilgili plastik deformasyonu tarif etmektedir. Oturma platformları, zamana bağlı olarak yüzeydeki işaretlerin gösterdiğine benzer bir eğilim göstermiştir. Örneğin başlangıçta daha yüksek olan hareketler 60 gün sonra yavaşlamıştır ve 152 gün süren (son okuma) trafikten sonra sabit kalmıştır. Başlangıçta 60 gün plastik birim şekil değiştirmeden sonra oturma platformunun üzerindeki örtü basıncının toplam plastik birim şekil değiştirmeye oranı olan plastik rijitlik indeksi hesaplanmıştır. Kum lastik parçalarından oluşan kısmın rijitlik indeksi 507 kPa, lastik parçalarından oluşan kısmın 364–388 kPa olarak bulunmuştur. Katkısız lastik parçalarının üzerine 1 m kalınlığında zemin konulması, 60 günden 152 güne kadar geçen sürede plastik rijitliği 514–1455 kPa arttırmıştır. Hizmet süresinin tespiti için, yol dolgusunu oluşturan tabakaların geometrisini, trafik yüklerini ve çeşitli tabakaların poisson oranını kapsayan bir analiz yapılmıştır. Analiz, yol dolgusunda çeşitli kısımlar için yapılmıştır. Laboratuvar testlerine bağlı olarak, katkısız lastik parçaları ve kum lastik karışımları için poisson oranı sırasıyla 0.20 ve 0.25 bulunmuştur. Analizde, kum-lastik parçaları karışımı olan kısmın üzerindeki asfalt kaplama için 2 yıl, katkısız lastik parçaları olan kısmın üzerindeki asfalt kaplama için 1 yıldan az tasarım ömrü olduğu belirlenmiştir. Katkısız lastik parçaları üzerine 1 m kalınlığında zemin konulmasının da tasarım ömrünü 12 yıla kadar arttırdığı gözlenmiştir (Edil, 2002).

4.4 Cam Kırıkları

1960'ların sonu 1970'lerin başında Amerika'da camın sıcak asfalt karışımlarında kullanımını incelemek için birçok çalışma yapılmıştır. Bu dönemlerde test uygulamaları 33 bölgede uygulanmıştır.

1970'lerin ortalarından 1980'lerin ortalarına kadar Baltimore caddelerini camla kaplamak için birtakım programlar uygulamaya geçirilmiştir. En az 17 cadde pırlıltı etkisi sağlamak adına camla kaplanmıştır ki bu da güneş ışınlarının veya cadde lambalarının cam yüzeye yansımından oluşmuştur. 1980 ortalarında araştırmalar

Long adasında devam etmiş ve cam uygulama alanları tasarlanıp, uygulamaya geçirilmiştir. Bu çalışmada yaklaşık 14.000 ton cam kullanılmıştır. Yakın zamanda birçok kaplama projesi hayata geçirilmiştir. En iddialı program New York'un Ulaştırma Departmanında başlatılmıştır ve 1990'dan 1995'e kadar yaklaşık 250.000 ton cam kullanılmıştır. Tüm bu çalışmalarda, uygun oranlarda (karışımın ağırlıkça %10–15) kullanıldığında yansımanın göz kamaşmasına neden olmadığı saptanmıştır. Cam katkısının yüzey görünürlüğünü arttırdığı gözlenmiştir.

Norveç Hükümetinin Karayolları Yönetimi hafif dolgu malzemelerinin yol tabanında kullanımı üzerine 1972'den beri çalışmalarını sürdürmektedir. Son senelerde 6 yol projesini tanelenmiş köpüklendirilmiş cam (hücresel cam) kullanarak yapmıştır. Köpüklendirilmiş cam atık cam malzemeler için çevre dostu geri dönüşüm teknolojileri kullanılarak oluşturulmaktadır. Değişik cam kaynaklarından elde edilmiş yongalanmış cam tozları çeşitli kimyasal bağlayıcılarla karıştırılıp cam köpüğüne dönüştürülmektedir. Normal tane boyutu 10–60 mm arasında çeşitlilik göstermektedir. Drenajı yapılmış dolgunun içerisine yerleştirilip sıkıştırıldığında, sıkıştırma makinesine ve sıkıştırma gücüne bağlı olarak birim hacim ağırlığı 3,00–3,50 kN/m³ arasında değişmektedir. Yollarda donmayı önleyici tabaka olarak da üstün yalıtım özelliğinden dolayı kullanılabilir.

Norveç'te ana otoyol E6'nın bir bölümüne 600 m uzunluğunda betonarme bir tünel yapılmasına karar verilmiştir. Bu inşaat sırasında trafiğin akmasının sağlanması amacıyla geçici bir yol yapılmıştır. Beton tünelin üzerine yüksekliği 15 m'den fazla dolguya sahip bir yol inşa edilmiştir. Dolgunun üst 6 metresinde ağırlığı azaltmak, stabiliteyi arttırmak ve oturma problemlerini azaltmak amacıyla hafif dolgu malzemesi olan hafif kil agregası (9000 m³) ve köpük cam (1000 m³) kullanılmıştır. Bu yol 2004 yılından beri hizmet vermektedir. Kullanımı bittiğinde yolun başka bölümlerinde veya köprünün karada olan ayağının arka dolgusu olarak tekrar kullanılabilir. 1–1,5 m kalınlığında tabakalar halinde yerleştirilmekte ve sıkıştırılmaktadır. Her tabaka için alandan 3 kez geçiş yapılmaktadır, tekerlek izi yükü 40 kN/m² veya daha azdır. Hacimde %25 azalma gözlenmiştir. Hacimdeki diğer %5 azalmanın da depolandığı yerden kullanılacağı yere taşınması sırasında gerçekleştiği tahmin edilmektedir. Meydana gelen oturmaların düşük olduğu gözlenmiştir (Limbachiya ve Roberts, 2004b).

5. ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN KARAYOLLARINDA KULLANILMASI ÜZERİNE TÜRKİYE’DE GERÇEKLEŞTİRİLMİŞ ARAŞTIRMALAR

5.1 Uçucu Küller

Türkiye’de halen sadece kömürle çalışan 15 tane termik santral mevcuttur. Bu santrallerin kullandığı yakıtlar, kurulu güçleri Tablo 5.1’de görülmektedir (Aruntaş, 2006). Türkiye’de termik santrallerde yılda 55 milyon ton düşük kalorili linyit kömürü yakılmaktadır.

Tablo 5.1: Türkiye’de Kömürle Çalışan Termik Santraller

No	Santral Adı	Yakıt Cinsi	Kurulu Güç (MW)	Bulunduğu İl
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
6	Çolakoğlu 2	Taşkömürü	190	Kocaeli
7	Kangal	Linyit	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü-İskenderun	İthal Kömür	1210	Adana
13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

Termik santralin 1 kWh'lik enerji üretiminde yaklaşık 110 gram kül atık olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW'lık bir santralden bir yılda ortalama 650.000 ton uçucu kül ve taban külü oluşmaktadır. Türkiye'de açığa çıkan toplam kül miktarı 22 milyon tondur, bunun 18 milyon tonu uçucu küldür. Kullanım miktarı ise ancak 700.000–800.000 ton'dur (Ün, 2007). Kullanımının bu kadar az olmasının sebebi, uçucu küllerin özellikleri ve kullanımı hakkında yeterli bilgiye sahip olunmaması ve aynı santralde üretilen uçucu külün homojenliğinin sağlanamamasıdır.

Türkiye'de ilk kez 1960'lı yıllarda uçucu kül, Gökçekaya ve Porsuk barajlarının inşaatında kullanılmıştır. Türk Standartları Enstitüsü uçucu kül (TS 639) ve uçucu küllü çimento (TS 640) standartlarını o yıllarda hazırlamıştır. Çimento sanayinde katkılı çimentolarda kısıtlı miktarlarda uçucu kül kullanılmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğüne de çeşitli yol ve köprü inşaatlarında deneme amaçlı kullanılmıştır (Türker ve diğ., 2004).

5.1.1 Bitümlü Sıcak Karışım Kaplama Tabakasında Mineral Filler Olarak Kullanılması

Yıldırım ve diğ. (1997) Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külünü asfalt betonu kaplamalarında mineral filler olarak kullanımını araştırmışlardır. Mineral filler olarak taş tozu, portland çimentosu ve uçucu kül kullanılarak aşınma tabakasında kullanılacak numuneler hazırlanmıştır. Bağlayıcı olarak 70/100 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesine uygun olarak hazırlanan numunelere Marshall deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, her üç malzemeyle de hazırlanan karışımlar da Marshall Deneyi sonuçlarının (Stabilite, akma, birim ağırlık değerleri ve boşluk hacim, bitümle dolu boşluk hacim oranları) benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. Stabilite ve akma değerleri Tablo 5.2'de görülmektedir. En yüksek stabilite, uçucu külün kullanıldığı karışımda sağlanmıştır. Aynı zamanda, uçucu küllü karışımın akma değeri de şartnamedeki limit değerler arasında kalmaktadır.

Tablo 5.2: Taş Tozu, Çimento ve Uçucu Kül Fillerli Aşınma Tabakasının Marshall Deney Sonuçları

	Bitüm %	Taş Tozu Filleri	Çimento Filleri	Uçucu Kül Filleri	Şartname Limitleri
Stabilite Değerleri (kg)	4	1330	840	1460	min. 900
	4.5	1400	1180	1580	
	5	1480	1500	1610	
	5.5	1540	1520	1540	
	6	1300	1160	1430	
	6.5	1110	890	1210	
Akma (mm)	4	2.67	2.77	2.79	min. 2 maks. 4
	4.5	2.86	3.32	2.92	
	5	3.43	3.71	3.12	
	5.5	3.94	4.33	3.50	
	6	4.39	5.53	3.88	
	6.5	5.78	6.71	4.57	

Çelik (2005), çalışmasında Soma Termik Santrali uçucu külünü asfalt betonu karışımlarında mineral filler olarak kullanmıştır. Çalışmada, Tüpraş Rafineri'sinden alınan 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Sıcak bitümlü karışımlara, toplam agregaya ağırlığının %5'i, %6'sı, %7'si ve %8'si kadar C sınıfı uçucu kül eklenmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için, geleneksel mineral filler malzemesi de aynı oranlarda karışıma eklenerek 2. grup numuneler oluşturulmuştur. 2 grup numune içinde (mineral fillerli ve uçucu küllü) Marshall deneyleri yapılarak, optimum şartlardaki stabilite, akma, birim ağırlık değerleri ve boşluk yüzdeleri belirlenmiştir. Stabilite ve optimum bitüm yüzde değerleri Tablo 5.3'de görülmektedir. % 5 oranında uçucu küllü karışımda kullanılan bitüm miktarı, aynı orandaki mineral fillerli karışıma göre %6 daha fazladır, buna karşılık stabilite değeri de %16,6 oranında daha fazladır. Karışımlardaki geleneksel mineral fillerin ve uçucu külün yüzde oranlarını arttırdığımızda, uçucu küllü karışımın Marshall stabilite değeri daha büyük olmaktadır. Uçucu küllü karışımlarda, uçucu kül miktarı arttıkça bitüm yüzde değerleri azalmaktadır, bu da ekonomik bakımdan uçucu kül kullanımının avantajlı olduğunu göstermektedir. Akma değerleri her iki karışımda da birbirine yakın değerler çıkmıştır (2,90–3,20 mm arasındadır). Bulk birim hacim ağırlık değerleri 2,375–2,390, maksimum teorik birim hacim ağırlıkları 2,488–2,494 arasında değerler almaktadır. İki grup numunenin boşluk yüzdeleri arasında önemli bir farklılık olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 5.3: Geleneksel Mineral Fillerli ve Uçucu Küllü Karışımlara ait Stabilitate ve Optimum Bitüm Yüzde Değerleri

Katkısız Karışım			Uçucu Küllü Karışım		
Bitüm %	Mineral Filler %	Marshall Stabilitesi (kN)	Bitüm %	Uçucu Kül %	Marshall Stabilitesi (kN)
4,70	5	13,60	5,30	5	16,30
4,75	6	12,10	5,25	6	15,60
4,80	7	12,40	5,15	7	15,00
4,85	8	13,20	5,05	8	14,20

5.1.2 Stabilize Temel, Alt Temel ve Taban Zemininde Kullanılması

Uçucu küllerin yolların temel ve alt temel tabakalarının stabilizasyonunda destekleyici katkı malzemesi olarak değerlendirilmesini araştırmak üzere iki çeşit ocak malzemesinin Soma-B Termik Santrali uçucu külü-çimento ve kireç karışımlarıyla stabilizasyonu konusu incelenmiştir. Her iki ocak malzemesinin (İzmir'deki Çiğli-Ulucak ve Buca ocak malzemeleri) de A.A.S.H.O tarafından tavsiye edilen plastisite indeksi, likit limit ve CBR değerlerine uymadığı tespit edilmiştir. Bunun için bu malzemeler uçucu kül-kireç ve uçucu kül-çimento karışımlarıyla stabilizasyonu yapılmış ve serbest basınç mukavemetleri yardımıyla uçucu kül, çimento ve kireç oranları bulunmuştur. Buca ocak malzemesi, % 15 uçucu kül, %12,5 kireç yüzdesinde, Çiğli ocak malzemesi ise %17,50 uçucu kül, %20 çimento yüzdesinde uygun değerleri sağlamaktadır. Tablo 5.4'de serbest basınç mukavemet değerleri görülmektedir. Alt temel tabakasında beklenen 7 günlük mukavemet değerleri 700–1700 kPa arasında değişmektedir. Yapılan deneyler sonucunda yalnız başına yol üst yapısında kullanılmayan bu malzemelerin uçucu kül ve bağlayıcı katkısıyla yolların alt temel tabakalarında kullanılabileceği gözlenmiştir (Hınıslioğlu ve diğ., 1992).

Tablo 5.4: Serbest Basınç Mukavemet Değerleri

	Uçucu Kül (%)	Kireç (%)	Çimento (%)	Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)
Buca Ocak Malzemesi	15	12,50	-	2000
	15	-	12,50	1800
Çiğli Ocak Malzemesi	17,50	12,50	-	1700
	17,50	-	20	1900

Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külünün yol stabilizasyonunda kireç ile birlikte kullanımı üzerine de bir araştırma yapılmıştır. Değişik oranlardaki taban zemini-kireç ve taban zemini-kireç-uçucu kül karışımları üzerinde 7 ve 28 gün kür süreli olarak diziler halinde deneyler yapılmıştır. Değişik oranlarda (karışımın ağırlıkça %5,10,15'i oranlarında) hazırlanan taban zemini-kireç ve taban zemini-kireç-uçucu kül karışımlarına Standart Procktor ve serbest basınç mukavemet deneyleri uygulanmıştır. Karışımlarda uçucu kül kullanılması halinde daha yüksek basınç mukavemetleri oluşmuştur. %10 uçucu kül oranından sonra ise azalmaktadır. Deneylerin sonucunda, bu uçucu külün bir mineral katkı malzemesi olarak kullanımının uygun olduğu ve zemin-kireç karışımlarının özelliğini iyileştirdiği anlaşılmıştır. Böylece kireç oranının azaltılmasıyla kireçten de tasarruf sağlanacaktır (Alataş, 1996)

Özbayoğlu (1997) değişik miktarlarda çimento-bentonit ve kireç-bentonit karışimli kum numunelerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında (karışım 100 gr ise bunun 5, 10, 15 gramı uçucu kül) uçucu kül ilave ederek kompaksiyon deneyleri uygulamıştır. Yapılan deneylerin sonucunda, uçucu külün köy ve orman yollarının stabilizasyonunda, dolgu ve katkı malzemesi olarak kullanımının uygun olacağı belirtilmiştir.

5.2 Cüruflar

Ülkemizde yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu Karabük, İskenderun ve Ereğli Demir Çelik fabrikalarında oluşmaktadır. Ereğli Demir Çelik fabrikasında (Erdemir) çelik üretimi sonucunda yılda 350 000 ton cüruf açığa çıkmaktadır. Bu cüruflar, kırma eleme tesislerinde işlenmektedir. Metalik kısımlar bazik oksijen fırınlarda hurda olarak kullanılmaktadır. Cürufların 0–10 mm tane boyutundakiler 100–110 kg/ton oranlarında sinter üretiminde kullanılmaktadır. Burada da kullanımı sınırlıdır. Türkiye’de maalesef fazla bir kullanım alanı yoktur. Erdemir’de bugüne kadar birikmiş 6,5 milyon ton çelikhane cürufu bulunmakta ve atık olarak depolanmaktadır. Üretilen 1 ton çeliğin %10’u çelik cürufu olarak ortaya çıkmaktadır. Erdemir cürufları üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda Erdemir’de oluşan yüksek fırın cürufu ve çelikhane cüruflarının yol yapımında kullanımının uygun olduğu kanaatine varılmaktadır. Geleneksel malzemeler yerine cürufların

kullanımı, yapının performansını yükseltmektedir. Ekonomi ve çevre açısından da, cürufların değerlendirilmesi gereklidir.

5.2.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Agrega Olarak Kullanılması

Ereğli Demir Çelik Fabrikası (Erdemir) cürufunun karayolu üstyapısında kullanımının uygunluğunu araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Ilıcalı (1988) yaptığı çalışmada, agrega olarak Erdemir hava soğutmalı kırılmış cürufunu, granüle cürufunu ve çelikhane cürufunu kullanmıştır. Her üç çeşit cüruf için de fiziksel özelliklerini belirlemek için birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, elek analizi, donma ve aşınma kaybı, soyulma direnci, yassılık indeksi deneyleri yapılmıştır. Donma deneyi sonuçlarında tane boyutlarına göre yüksek fırın cürufunda donma kaybı için %0,73–13,1 arasında, çelikhane cüruflarında ise %3,1-8,1 arasında değişen değerler gözlenmiştir.

Bitümlü bağlayıcı olarak İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çağlayan Asfalt şantiyesinden sağlanan 75-100 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Bitümlü cüruf karışımlarında agrega olarak Erdemir granüle yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu, mineral filler olarak portland çimentosu kullanılmıştır. Bitümlü cüruf karışımları için T.C.K. Şartnameleri esas alınarak aşınma tabakası Tip C granülometrisine uygun karışım hazırlanmıştır. Granülometri Tablo 5.5’de gösterilmiştir. Bugünkü karayolu teknik şartnamesine göre Aşınma tabakası Tip 2’ye uymaktadır.

Tablo 5.5: Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Agrega Granülometrisi

Elek Boyutu	Geçen %
3/4"	100
1/2"	91
3/8"	79
No.4	61
No.10	45
No.40	24
No.80	14
No.200	7

Bitümlü karışımların hazırlanmasında ve optimum bitüm yüzdesinin bulunmasında Marshall Stabilite Deneyi uygulanmıştır. Değişik cüruf yüzdeleriyle dört grup

Marshall briketi hazırlanmıştır. Tablo 5.6’da agregası karışımlarının yüzdeleri ve özgül ağırlık değeri verilmiştir. Birinci ve ikinci grup numunelere yapılan Marshall deney sonuçları Tablo 5.7’de görülmektedir.

Tablo 5.6: Bitümlü Karışımlarla Hazırlanan Marshall Briketlerindeki Agregası Yüzdeleri ve Özgül Ağırlık Değeri

Marshall Numuneleri	Çelikhane Cürufu	Granüle Cüruf	Portland Çimentosu	Özgül Ağırlık		
				Kaba	İnce	Filler
1	93	-	7	3,794	3,882	3,055
2	83	10	7	3,560	3,560	3,020
3	78	15	7	3,794	3,560	2,982
4	73	20	7	-	-	-

Tablo 5.7: 1 ve 2 numaralı Marshall Numunelerinin Deney Sonuçları

	1. Numune	2. Numune	Aşınma Tabakası Şartname Limitleri
Optimum Bitüm %’si	5,49	6,19	-
Birim Ağırlık (kN/m ³)	32,18	29,86	-
Boşluk %’si	3,46	5,07	3-5
Bitümle Dolu Boşluk %’si	85,18	76,48	65-75
Stabilite (kN)	9,66	7,70	Min 9,00
Akma (mm)	3,83	2,70	2-4

3. ve 4. numunelerde granüle cüruf miktarının artması ile şartnamelerde belirtilen limit değeri sağlanamadığı görülmüştür. Bundan dolayı toplam agregası miktarının %10’undan fazla granüle cüruf içeren karışımlar kullanılmamalıdır. Bu çalışma sonucunda, %93 çelikhane cürufu ve %7 portland çimentosuyla (mineral filler) oluşturulan karışım ideal bitümlü karışım olarak kabul edilmiştir. Bu karışım aşınma tabakasında kullanım için uygundur. 2.karışım ise stabilite değeri için şartname değeri olan 7,50 kN’nun üzerinde olduğundan binder tabakasında rahatlıkla kullanılabilir.

Tübitak Marmara Araştırma Merkezinin yürüttüğü bir projede, Erdemir çelikhane cürufunun asfalt üretiminde agregası olarak değerlendirilmesi araştırılmıştır. Erdemir’den elde edilen cüruflar 4 değişik boyutta hazırlanmıştır. 5 mm altı 1 numaralı cüruf, 5-19 mm arası 2 numaralı cüruf, 19-25 mm arası 3 numaralı cüruf,

25-40 mm arası 4 numaralı cüruf olarak adlandırılmıştır. Tablo 5.8’de çelikhane cürufunun yoğunluk, gözenek ve su emme değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5.8: Çelikhane Cürufunun Yoğunluk, Gözenek, Su Emme Değerleri

Numunelerin Boyutları	Yoğunluk (kN/m ³)	Gözenek (%)	Su Emme (%)
40-25	36,0	2,72	0,76
25-19	36,7	1,98	0,54

Karayolu üst yapısında yapay agrega olarak kullanılması düşünülen Erdemir çelikhane cürufuna soyulma mukavemeti, yassılık indeksi, donma, aşınma kaybı, elek analizi, özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmıştır. Çelikhane cürufunun fiziksel deney sonuçları ve şartnamelerde belirtilen limit değerleri Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9: Çelikhane Cürufunun Mekanik Özellikleri

Fiziki Özellikler	Çelikhane Cürufu (%)	Şartname Değeri (%)	TS
Soyulma Mukavemeti	75–85	Min. 50	Nicholson Yöntemi
Yassılık İndeksi	20	Max. 35	BS 812
Don Kaybı	8,56	Max. 10	-
Aşınma Kaybı	15,5	Max. 35	TS 3694

Çelikhane cürufunun bitümlü karışımlarda kullanımında gradasyon limitleri bitümlü temel tabakası için %100 cüruf, binder tabakası için %70 cüruf ve %30 kalker, aşınma tabakası için de %50 cüruf ve %50 kalker olarak belirlenmiştir. Bu projede çelikhane cürufuna karıştırılacak bitümün penetrasyon değeri 62’dir. Bitümün özgül ağırlığı da 1.208 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Çelikhane cürufu için optimum bitüm oranı bitümlü temel tabakası için %4±0.5, binder tabakası için %5±0.3 ve aşınma tabakası için de %5.3±0.3 olarak belirlenmiştir. Bulunan değerler, karayolu teknik şartnamesinde belirtilen limitler arasında kalmaktadır. Çelikhane cürufu kırıldıktan sonra kaba, ince agrega ve mineral filler olarak sınıflandırılmış, agrega yüzdesi ve bitüm yüzdesi tespit edilmiştir. Daha sonra da Marshall metodu ile karışım tasarımı yapılmıştır. Üç farklı oranda çelik cürufu kullanılarak oluşturulan karışımlarla üç ayrı tabaka

hazırlanmıştır. Bitümlü temel tabakasında tamamen çelikhane cürufu kullanılmıştır. Binder tabakasında ise çelikhane cürufu yeterli tane dağılımını sağlayamadığından %30 oranında ince taneli olan Yığılca kalker kullanılmıştır. Ayrıca kalker, boşluk sağlama, sıkıştırma ve soyulma mukavemeti açısından da gereklidir. Kullanılan kalker yabancı maddeler içermemeli, saf olmalı ve agregalarda bulunması gereken tane dağılımı, sertlik, kırılma şekli gibi fiziksel özellikleri sağlamalıdır. Aşınma tabakası en üst tabakadır, maksimum tane boyutu $\frac{3}{4}$ inch (19,10 mm) olup, ince taneli karışımdır. Tip 2 gradasyonunda karışım hazırlanırken çelikhane cürufuna %50 oranında kalker katılmıştır. Karışımda kullanılan cüruf ve kalker numuneleri belirlenmiş gradasyon tipine uygun olarak hazırlanmıştır.

TS 3720'ye uygun olarak hazırlanan Marshall briketlerinin stabilite, akma değerleri, boşluk, asfaltla dolu boşluk yüzdeleri bulunmuştur. Bu değerler Tablo 5.10'da gösterilmiştir. Şartname değerlerini sağladığı için yapılan karışım tasarımlarının uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 5.10: Marshall Deneyi Sonuçları

Özellikler	Bitümlü Temel Tabakası Tip-A		Binder Tabakası		Aşınma Tabakası Tip-2	
	Deney Sonuçları	Şartname	Deney Sonuçları	Şartname	Deney Sonuçları	Şartname
Birim Ağırlık (gr/cm ³)	3,106	-	2,911	-	2,741	-
Boşluk %'si	6,67	4-7	4,21	4-6	3,62	3-5
Bitümle Dolu Boşluk %'si	61,84	45-65	74,82	65-75	77,40	75-85
Stabilite (kN)	11,78	min 6,00	13,45	min 7,50	12,91	min 9,00
Akma (mm)	2,92	2-5	3,30	2,5-4,6	4,06	2,5-4,6
Tokmak Sayısı	75	50-75	50	50-75	50	50-75
Tokmaklama Isısı (°C)	150	150-155	150	150-155	150	150-155

En son olarak da bitümlü karışımların performanslarının değerlendirilmesi amacıyla dolaylı çekme, sünme modülü ve tekerlek izi oluşum deneyleri yapılmıştır. Dolaylı çekme deneyi sonuçlarına göre, çelikhane cürufu ile hazırlanan karışımlar normal sıcaklıklarda çok yüksek rijitlik değerine sahip olup, kırılğan yapı göstermektedirler.

Bundan dolayı soğuk bölgelerde kullanımları uygun olmamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise elastik modülü değerleri belirtilen limitler içerisinde kalmaktadır. Bitümlü karışımların çekme gerilmelerinin etkisi, alt tabakalarında üst tabakaya göre daha az olmaktadır, bundan dolayı cürufle oluşturulan karışımların temel tabakasında kullanımı daha uygun olacaktır. Statik sünme ve tekrarlı sünme deney sonuçlarına göre cürufle oluşturulan karışımların performansları geleneksel karışımlara göre daha kötüdür. Bundan ötürü kaplama tabakasında kullanılması gerektiğinde akım hızının düşük olduğu otobüs durakları, kavşak yaklaşımları gibi kesimlerde kullanılmaması gerekmektedir. Cürufli karışımda oluşan tekerlek izi oranı geleneksel karışımlara göre daha uygundur. Tekerlek izi oluşumu deneyinin sonucunda da cürufların yol üst yapısında kullanımı uygun bulunmuştur (Kara ve diğ., 2001).

Ahmedzade ve diğ. (2006) Ereğli Demir Çelik Fabrikasından elde edilen çelikhane cürufunun bitümlü sıcak karışımda agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışmada, bağlayıcı olarak 75–100 penetrasyonlu bitüm, agrega olarak da Adapazarı taşocağından elde edilen kalker ve Ereğli Demir Çelik Fabrikası çelik cürufu kullanılmıştır. Agregaların gradasyonunda Yollar Fenni Şartnamesinde Binder tabakası için verilen Tip 2 gradasyonunun ortalamaları baz alınmıştır. Marshall stabilite, indirekt çekme, rijitlik modülü, statik yükler altındaki dayanımlarını tespit etmek için 40° C deney sıcaklığında statik yüklemeli sünme sertliği deneyleri önce çelik cürufu ile hazırlanmış Marshall briketleri üzerinde yapılmış, sonra da aynı deneyler taş ocağından elde edilen kalkerle yapılmıştır. Marshall metodu kullanılarak her iki agrega grubu için de optimum bitüm içeriği bulunmuştur. Bu optimum bitüm oranlarında hazırlanan numunelerin Marshall değerleri Tablo 5.11 ve 5.12’de görülmektedir. Bulunan değerler, şartname limitlerini sağlamaktadırlar.

Tablo 5.11: Marshall Değerleri

Kullanılan Agregalar	Karışımdaki Bağlayıcı Oranı (Wa)	Bağlayıcı Miktarı (Wb)	Hacim Özgül Ağırlığı (Dp) (kN/m ³)	Teorik Özgül Ağırlığı (Dt) (kN/m ³)	Boşluk Oranı (Vh)	Agregalar Arası Boşluk (VMA)	Bitüm ile dolu Boşluk (Vf)
Kalker	%4,9	%4,67	24,2	25,71	%5,85	%17,485	%66,389
Cüruf	%5,1	%4,83	25,46	26,80	%5,14	%17,877	%70,816

Tablo 5.12: Bitümlü Karışımda Kullanılan Agregaların Akma ve Stabilite Değerleri

Kullanılan Agregalar	Akma Değerleri (mm)	Stabilite Değerleri (kN)
Kalker	3,96	11,73
Cüruf	2,99	14,69

Bu değerler bulunduktan sonra, aynı oranlarda hazırlanan diğer numuneler de indirekt çekme rijitlik modülü deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan deneylerin sonuçları Tablo 5.13’de verilmiştir.

Tablo 5.13: Bitümlü Karışımların Rijitlik ve Sünme Sertliği Modülünün Değerleri

Kullanılan Agregalar	Rijitlik Modülü (Sm)	Sünme Sertliği Modülü (Ec)
Kalker	1180 MPa	40,12 MPa
Cüruf	3558 MPa	49,10 MPa

Bu tabloları incelediğimizde, Marshall deneyi sonuçlarına göre cürufllu numunelerin stabilite değerlerinin daha yüksek, akma değerlerinin ise daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, cürufun yüzeyinin kalkere göre daha gözenekli ve pürüzlü olması ve sıcak karışım içerisindeki agregalar ile bitüm arasındaki adezyonun cürufllu daha yüksek olmasıdır. Diğer deneylerin sonucunda da, en yüksek rijitlik modülü ve sünme sertliği değerlerini cürufllu numuneler vermiştir. Tüm deneylerin sonucuna göre, agrega olarak cüruf kalkerden daha dayanıklıdır, bundan dolayı cürufllu numuneler daha iyi performans göstermiştir denilebilir.

İncelediğimiz tüm çalışmalar, Ereğli Demir Çelik Fabrikasının yüksek fırın cürufunun ve çelik cürufunun yol üst yapısında agrega olarak kullanılabileceğini ve bitümlü sıcak karışım performansını her bakımdan düzelttiğini göstermektedir.

5.2.2 Granüler Temel ve Alt Temel Tabakalarında Agrega Olarak Kullanılması

İlıcılı (1988), Erdemir cürufu üzerine yaptığı çalışmada, bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı karışımlar hazırlamıştır. Bu karışımların hazırlanmasında hava soğutmalı kırılmış yüksek fırın cürufu ve granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Granülometreleri, cüruf yüzdeleri ve optimum su içeriği her iki karışımda da aynı alınmış, sadece hidrolik bağlayıcılı karışımlarda su içeriği bir miktar fazla alınmıştır.

Hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımları %3-5-7-9 oranlarında kireç ve %1-3-5-7 oranlarında Darıca portland çimentosu eklenerek stabilize edilmiştir. Bağlayıcısız cüruf karışımlarının mekanik dirençleri CBR deneyiyle tespit edilmiştir. Her seferinde eklenen su miktarı artırılarak kompaksiyon deneyi de uygulanmıştır. Böylelikle su içeriği ile birim hacim ağırlık ve CBR değeri arasında ilişki kurulmuştur. Maksimum CBR değeri, %8,2 su içeriğinde %149,63 olarak hesaplanmıştır. Maksimum ıslatılmış CBR değeri de %10,16 su içeriğinde % 139,13 olarak bulunmuştur. Hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımlarının mekanik dirençleri serbest basınç deneyleriyle belirlenmiştir. Çimento katkılı ve kireç katkılı cüruf karışımlarının 7 günlük serbest basınç mukavemetleri Karayolları Genel Müdürlüğü'nce ağır trafikli yollarda kullanılan çimento bağlayıcılı granüler temelle (CBR değeri %100) karşılaştırılmıştır. Bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı karışımların mekanik direnci, şartnamelerde belirtilen değerlerin üstünde bulunmuştur. Sonuç olarak temel ve alt temel tabakalarında bu karışımların kullanımının uygun olduğu anlaşılmaktadır.

5.3 Hurda Lastikler

Kullanılmış lastiklerin asfalt yapımında kullanımı, yılda ortalama 80 bin ton lastiği ekonomiye kazandırılacak ve (asfalt yollar daha iyi tutuş sağlayacağı için) trafik kazalarını azaltacaktır. Hurda lastiğin kauçuk ve telleri makineyle birbirinden ayrılmaktadır, kauçuk asfalt yol yapımında ve çim sahalarda, kord bezi ise mobilya sektöründe döşeme ve izolasyon maddesi olarak kullanılmaktadır. Lastiğin içindeki çelik tel de eritilerek değerlendirilmektedir.

1997 yılında Tortum atık araba lastiklerinin asfalt betonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu çalışmada agrega olarak Erzurum Aşkale yöresinde bulunan Makimsan Asfalt şantiyesinden temin edilen agregalar, mineral filler olarak da portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan bitümlü bağlayıcının özgül ağırlığı 1,025 gr/cm³, penetrasyon değeri de 65-70'dir. Erzurum Organize Sanayi Oto lastik kaplamacılarından da atık lastikler temin edilmiştir. 10 no'lu elekten geçen atık lastiklerin özgül ağırlığı 1,168 gr/cm³, 40 no'lu elekten geçen lastiklerin özgül ağırlığı ise 1,198 gr/cm³ değerindedir. Daha önceden tespit edilen değişik asfalt oranları için numuneler, fırında istenilen karıştırma sıcaklığına gelinceye kadar

ısıtılmış ve önceden tartılmış lastik parçacıkları karışıma soğuk olarak ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi istenilen karıştırma süresine kadar devam ettirilmiştir. Lastik parçalarının sıcak asfaltla temasından sonra şiştikleri ve karışım içinde hacmi artan, dağılmış lastik parçalarının asfaltın akışkanlığını azalttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi yüksek sıcaklıklarda lastik parçalarıyla asfaltın etkileşimidir, tamamen tek faz haline gelmemeleridir. Karışımından çıkarılan lastik parçalarının özellikleri değişmiştir, daha esnek olduğu gözlenmiştir. Erime işlemi küçük boyuttaki lastik parçalarının karışımında, büyük parçalara göre daha hızlı olmuştur. Bu numunelere Marshall deneyleri uygulanmıştır. Bu çalışmada Taguchi Optimizasyon Deney Tekniği kullanılarak lastik katkılı asfalt betonuna yapılan deneylerin sonucunda bir optimizasyon yapılmıştır. Bulunan değerler penetrasyon deneyleri ve elektron mikroskopuyla incelenerek doğrulanmıştır. Tablo 5.14’de bu çalışma için tespit edilen uygun değerler görülmektedir.

Tablo 5.14: Optimizasyon Değerleri

Özellikler	Değerler
Lastik Gradasyonu	10 nolu elekten geçen
Karıştırma Sıcaklığı	165 °C
Agrega Gradasyonu	1. Tip
Lastik Oranı	%10
Bağlayıcı	%5,5
Sıkıştırma Sıcaklığı	135 °C
Karıştırma Süresi	30 dakika

Lastik gradasyonu küçüldükçe stabilitenin arttığı, akmanın azaldığı, boşluk oranının düştüğü, pratik birim ağırlığının arttığı belirlenmiştir. Karışıma katılan lastik oranı arttıkça stabilite artmakta, akma ve bağlayıcı ile dolu boşluk, birim ağırlık azalmakta, boşluk artmaktadır. Sıkıştırma sıcaklığı arttıkça akmada artmakta, boşluk oranı azalmaktadır. Atık araba lastiklerinin bitümlü karışımların özelliklerini iyileştirici bir modifiyer olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Tortum, 1997).

Tuncan ve Çetin’in yaptığı çalışmada, atık lastik parçalarının sıcak karışım bitüm kaplaması üzerindeki mekanik etkileri araştırılmıştır. Eskişehir’deki Eştaş A.Ş.’ne ait kırmataş ocağından elde edilen gri-beyaz renkli kalker esaslı agrega kullanılmıştır. Karayollarında asfalt betonunda aşınma tabakası olarak en çok kullanılan Tip 2

gradasyonu seçilmiştir. %5 oranında taş tozu mineral filler olarak kullanılmıştır. 75-100 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı seçilmiştir. 4-20, 20-200, 4-200 nolu elekler arasında kalan üç tip lastik boyutu arasında çalışılmıştır. Bitümlü bağlayıcının toplam ağırlığının %5, %10 ve %20 oranlarında atık lastik ilavesi yapılmıştır. Lastik parçalarının özgül ağırlığı 1.11 olarak bulunmuştur.

Optimum bitüm içeriği %4.5 olarak bulunmuştur. Lastik parçaları bitüm miktarının %5, %10, %20'si olarak bitümlü bağlayıcıyla karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonucunda elde edilen lastikli bitüm bağlayıcılarıyla asfalt betonu numuneleri hazırlanmıştır. Bu Marshall briketlerine stabilite, indirek çekme, serbest basınç ve su hasarı deneyleri yapılmıştır. Tablo 5.15'de lastik ilavesiz numunelere ait Marshall tasarım sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.15: Katkısız Numunelere Ait Marshall Tasarım Sonuçları

Özellikler	Değerler
Optimum Bitüm İçeriği (%)	4.5
Hacim Özgül Ağırlığı	2.470
Boşluk (%)	2.33
Asfaltla dolu Boşluk (%)	79.76
Stabilite (kN)	15,84
Akma (mm)	2.44

İlave edilen lastik miktarı arttıkça Marshall stabilitesi azalmakta, akma ise artmaktadır. Akma değerleri 4-20 boyutundaki lastiğin %20 ilavesinde maksimum, 20-200 boyutundaki lastiğin %5 değerinde minimum değere sahip olmuştur. Lastik miktarı %10'u geçen Marshall numunelerinde stabilite azalmaktadır. Bundan dolayı bitüm miktarının %10'u üzerinde lastik ilavesi tercih edilmemelidir. 4-200 boyutundaki lastiklerin %10 ilavesiyle hazırlanan numunenin indirek çekme dayanımları yüksek çıkmıştır. 20-200 boyutundaki lastiklerde ise dayanım değerleri azalmıştır. Bundan dolayı ince taneli lastik parçaları indirek çekme dayanımını azaltmaktadır. Karışım içerisindeki kaba taneli lastikler çekme dayanımını olumlu yönde etkilemektedir. 4-200 boyutundaki lastiklerin ilave edilmesiyle hazırlanan numunelere serbest basınç deneyi de uygulanmıştır. Numunelerin tokluk ve elastiklik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Yalnız %10 oranında lastik ilavesinden sonra numunelerin basınç değerleri azalmaktadır. %10 lastik ilave edildiğinde numunelerin

basınç değeri %5 oranında artarken, %20 oranında lastik ilavesinde basınç değeri %11 oranında azaldığı görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda lastiğin su hasarını iyileştirmediği gözlenmiştir (Tuncan ve Çetin, 1998).

5.4 Cam Kırıkları

5.4.1 Bitümlü Sıcak Karışım Kaplama Tabakasında Agrega Olarak Kullanılması

İstanbul Asfalt Fabrikaları A.Ş., cam kırığının bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak kullanılması üzerine çeşitli araştırmalar yapmıştır. Cam kırığının, bitümlü sıcak karışımlara ilave edilmesinin, karışımın performansı ve yol güvenliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Cam asfalt karışım çalışmasında, Gebze Kibsaş Taş Ocağı'ndan temin edilen, Karayolu Teknik Şartnamesindeki Aşınma Tabakası Tip 2'ye uygun agrega karışımı kullanılmıştır. Şartname değerleriyle uygunluğu kontrol edilerek Tüpraş Rafinerisinden alınan 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Cam atıkları Şisecam A.Ş.'den temin edilmiştir. Karışıma %2 oranında Karadeniz Madencilik Ltd. Şirketinden temin edilen sönmüş kireç ilave edilmiştir. Böylece cam kırığının permeabilite sorunu çözümlenmiş ve soyulma mukavemeti güçlendirilmiştir. Bitümlü sıcak karışıma boyutları 0–5 mm arasında değişen granül cam malzeme (Cam atıklarının oranları, karışımın %5'i, %10'u ve %15'i olarak alınmıştır) katılarak, 135° C sıcaklıkta ve 75 darbe sıkıştırma enerjisiyle her bir orandan belirli sayıda briket numuneleri hazırlanmıştır.

Hazırlanan numunelere Marshall, Dolaylı çekme, statik sünme (bitümlü karışımın tekerlek izi oluşumuna karşı gösterdiği direnime belirlenir), tekrarlı sünme deneyleri yapılmıştır. Marshall deneyi sonuçlarına göre cam atıklarla oluşturulan karışımların stabilite değerleri geleneksel malzemelerle oluşturulan karışımların stabilite değerlerinden daha düşük çıkmaktadır. Fakat şartnamedeki alt sınır değerlerinin üzerindedir. Bu değerler tablo 5.16'da verilmiştir.

Tablo 5.16: Hazırlanan Numunelerin Marshall Stabilite Değerleri

	Geleneksel Karışım	%5 Cam Katkılı	%10 Cam Katkılı	%15 Cam Katkılı	Şartname Değeri
Marshall Stabilitesi (kN)	16,00	12,31	11,57	11,13	9,00

Cam katkıli karışımların Dolaylı Çekme Mukavemeti (bitümlü karışımların ısı ve yorulmadan dolayı oluşan çekme gerilmeleri) değerleri düşük sıcaklıklarda geleneksel karışımlara göre yüksek bulunmaktadır. Sıcaklığın yükseltilmesiyle cam katkıli karışımların değerleri düşmektedir. Rijitlik modülü değerleri 5° C ve 25° C’de rijit üst sınır düzeyi üzerinde bulunmakta ve numunelere uygulanan yüklere karşı dayanım göstermektedir. Sıcaklık 40° C’a çıkartıldığında %10 ve %15 atık cam katkıli numunelerin yüklemeye dayanamayarak dağıldığı gözlenmiştir. Atık cam katkıli karışımların daha rijit olduğu ve düşük sıcaklıklarda soğuk iklimlerin hâkim olduğu bölgelerde kaplamaların modifiye malzeme ile takviyesine gerek kalmadan kullanılabilmesi tespit edilmiştir. Sıcak bölgelerde ise başta kalıcı deformasyonlar olmak üzere stabilite ve çekme mukavemeti bakımından geleneksel karışımlara göre daha az direnimsiz göstereceği sonucuna varılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucuna göre bitümlü sıcak karışıma katılabilecek en uygun atık cam kırığı oranı %10’dur. Daha yüksek oranların kullanılabilmesi için karışıma modifiye katkı maddesi ilave edilmelidir.

5.4.2 Yol Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi

Bu numunelere parlaklık ve yansımaya deneyleri de uygulanmıştır. Yol yüzeyinin otomobil farlarıyla aydınlatılması sırasında geri yansımaya özelliklerinin ölçülmesi, geri yansıtılmış parlaklık katsayısı (RI), yol yüzeylerinin gündüz ve gece far ve sabit aydınlatma altında ne oranlarda ışık içerdiği ve aydınlık altında ortalama yansımaya katsayısı (Qd) belirlenmiştir. Bu değerler tabloda verilmiştir. Atık cam katkı malzemesinin yolun kayma direncini ve görünebilirlik özelliklerini arttırdığı gözlenmiştir. Tablo 5.17’de deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.17: Parlaklık ve Yansıma Deneilerinin Sonuçları

	Geleneksel Bitümlü Sıcak Karışım				Atık Cam Katkılı Bitümlü Sıcak Karışım			
	Aşındırılmamış		Aşındırılmış		Aşındırılmamış		Aşındırılmış	
	Kuru Yüzey	Islak Yüzey	Kuru Yüzey	Islak Yüzey	Kuru Yüzey	Islak Yüzey	Kuru Yüzey	Islak Yüzey
Sürtünme Katsayısı (SK)	95	75	79	58	103	87	86	62
Parlaklık Katsayısı (RI)	5	7	8	3	11	23	11	4
Yansıma Katsayısı (Qd)	45	41	53	62	58	65	61	108

- Far altında aydınlanma (RI): Deneyde far altında aydınlanma ölçümü için LTL2000 deney ekipmanı kullanılmıştır ve RI değeri far ışığının aydınlatması altında yol işaretlerinin parlaklığını göstermektedir. LTL2000 bir kule ve yatay gözlem kutusundan oluşmaktadır. Kulenin tabanında optik sistem, aynalar ve toz koruma camı yer almaktadır. Kule bir giriş aracılığı ile ikiye bölünmüştür. Girişin tek tarafında kule dibinde yer alan aynalara ışık gönderen halojen ampul yer almaktadır. Kule dibinde yer alan aynalar ışığı trafik işareti üzerine göndermekte ve ışık geri yansıyarak kulenin ikinci bölümünde yer alan optik okuyucular tarafından ölçülür ve sistem içerisinde yer alan mikro işlemci aracılığıyla RI değeri hesaplanır.

RI değeri; yol yüzeyi ile 1.29° lik açı yapacak şekilde ışık gönderilmekte ve geriye $2,29^\circ$ lik açı ile yansıyan ışığın parlaklık değeri ölçülmek suretiyle belirlenmektedir. Bu işlem, yol yüzeyinden 1,2 m yükseklikte bulunan bir taşıt sürücüsünün 30m uzağındaki yatay trafik işaretini veya yol yüzeyini görme özelliğini ifade etmektedir.

- Gündüz ve sabit far ışığı altında Parlaklık (Qd): Far veya sabit ışık altında aydınlanma değerinin bulunmasında QD30 deney ekipmanı

kullanılmaktadır ve Qd değeri far veya sabit ışık altında yol işaretinin veya yol yüzeyinin ışığı dağıtarak görülmesi özelliğini ifade etmektedir.

QD30 50cm çapında bir küre ve kürenin içiyle ince bir kanalla bağlantısı bulunan bir kanaldan oluşmaktadır. Küre içerisinde merkeze yerleştirilmiş 20 watt gücündeki halojen lambadan üretilen ışık aynalar aracılığıyla kule içerisinde yer alan, gözlemciyi temsil eden detektöre iletilmekte ve mikro işlemci aracılığıyla Qd değeri hesaplanmaktadır (İstanbul Asfalt Fabrikaları Şirketi, 2005).

5.5 Mermer Atıkları

Türkiye’de sadece Afyon bölgesindeki mermer fabrikalarında mermer blokların ve plakaların kesilip, işlenmesi sırasında yılda en az 125.000–150.000 ton civarında mermer tozu oluşmaktadır (Zorluer ve Usta, 2003).

Terzi, mermer tozu atıklarının asfalt betonunda mineral filler olarak kullanımını araştırmıştır. Isparta civarındaki Gümüşgün taşocağından alınan kırmataş mineral agrega olarak, Modülmer ve İşmer Mermer fabrikalarının mermer toz atıkları mineral filler olarak ve 90/100 penetrasyonlu asfalt bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Elde edilen karışım binder tabakası olarak kullanılacaktır. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla mineral filler olarak taştuzu (kireçtaşı tozu) ve 7 ayrı cins mermer kullanılmıştır. Mermer malzemelerini öğütülerek 200 no’lu elek altında kalan malzeme ve atık doğrudan bitümlü karışım içerisinde kullanılmıştır. Karışıma Marshall ve plastik deformasyon deneyleri uygulanmıştır. Mermer toz atıklarının bitümlü karışımlarda doğrudan kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Akbulut ve Gürer (2006) yaptıkları çalışmada, mermer atığının asfalt kaplamalarda (binder tabakasında) agrega olarak değerlendirilmesini araştırmışlardır. Afyon-İscehisar bölgesindeki homojen bir mermer ocağı atıklarından agrega üretilmiş ve bu numuneyi karşılaştırmak için de Afyon şehir içi asfalt kaplamalarında kullanılan kireçtaşı kökenli agrega kontrol numunesi olarak hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucu her iki agregasında Los Angeles Aşınma Kaybı, donma-çözülme kaybı ve yassılık indeksi değerleri teknik şartname limitleri içerisinde bulunmuştur. Agregada

darbelenme kaybı değeri, şartname değerinin altında bulunmuştur. Donma çözünme sonrası aşınma kaybı mermer atığıyla oluşturulan numunede fazla çıkmıştır. Fakat bu malzeme karayollarında binder tabakasında kullanılacağı için, donma çözülme çevriminden aşınma tabakası kadar etkilenmeyecektir. Cilalanma değeri de her iki numune de 0,45 bulunmuştur. Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda da atık kullanılarak hazırlanan karışımın stabilite değeri diğer numuneden yüksek çıkmıştır ve bu değer şartname limitlerinin üstündedir. Buna karşılık plastik deformasyon deneyinin sonucunda ise yorulma ömrü diğer numuneye göre %45 daha düşük bulunmuştur. Bu çalışmanın sonucunda, mermer atıklarının hafif ve orta trafik yüklü yollarda binder tabakasında agrega olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Zorluer ve Usta (2003), şişme olduğu zaman üzerindeki su kanalı, yol kaplaması gibi hafif yapılara zarar veren kil zeminlerin, şişme potansiyelinin kontrol edilmesi ve zeminin iyileştirilmesi için atık mermer tozu kullanmışlardır. . Mermer tozu, Afyon'daki büyük ölçekli bir mermer tesisinin çökeltme havuzundan alınmıştır. Tane boyutunun büyük bir kısmı 0,2 mm.nin altındadır. Meşelik kil zeminden alınan numuneler ince taneli ve düşük plastisiteli kil (CL) sınıfındadır. Numunelerin kompaksiyon özellikleri, laboratuarda yapılan standart proctor kompaksiyon deneyiyle belirlenmiştir. En büyük kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri numuneler hazırlanırken kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere şişme deneyleri yapılmıştır. Mermer tozu katkısının artmasıyla şişme yüzdesi değerlerinde azalma olmuştur. En düşük şişme yüzdesi, %5 atık kullanımında görülmüştür. %5 değeri arttırıldığında şişme yüzdesinde tekrar artış görülmüştür. Bu artışın sebebi, artan mermer tozu katkısının numunede daha sıkı bir yapı oluşturmasıdır. Sonuç olarak, mermer tozu katkısı zeminin şişme potansiyelini etkilemektedir ve en düşük şişme yüzdesine %5 oranında kullanımla ulaşılmaktadır.

Zorluer, başka bir çalışmada da mermer tozlarının kil zeminlerin şişme potansiyeline etkisini incelemiştir. Yapılan deneyler sonucu Na-Bentonit kilinin şişme potansiyeline etki eden atık oranının %7 olduğunu gözlenmiştir

6. SONUÇ ve TARTIŞMA

Termik santrallerde oluşan küller, demir çelik endüstrisinde oluşan yüksek fırın ve çelikhane cürufları, çimento endüstrisinin yan ürünü olan fırın tozları, mermer endüstrisinde oluşan mermer toz atıkları, hurda otomobil lastikleri, cam kırıkları gibi endüstriyel katı atık malzemelerinin oluşum miktarları gün geçtikçe artmakta, çevreyi tehdit eden boyutlara ulaşmaktadır. Bu atıkların neden olduğu çevre problemleri arasında, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgârla etrafa yayılma, tozlanma, toprakta süzülme dolayısıyla zehirli madde taşınması ve radyasyon sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle, suyun ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu bakımından olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Tüm bu sorunların çözülmesi için atıkların çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilip, bertaraf edilmeleri gereklidir.

Dünyada, bu endüstriyel atıkların çoğu karayollarında taban zemininden kaplama tabakasına kadar her tabakada kullanılma olanağına sahiptir. Karayollarında kullanılan geleneksel malzemeler yerine atık malzemeler kullanılarak, daha düşük maliyetlerle üretim yapılmakta, çevre kirliliğine neden olan atık malzemeler ortadan kaldırılmakta ve doğal malzemelerin de korunması sağlanmaktadır. Endüstriyel atık malzemeler üzerine yeterince araştırma yapılmalı, malzemeler iyi tanınmalı ve özelliklerine göre en avantajlı malzeme seçilip, uygun olan yol tabakasında (şartname değerlerini sağlamak koşuluyla) kullanılmalıdır.

Bitümlü sıcak karışımlarda, endüstriyel atık malzemeler, agrega, mineral filler veya bitümlü bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Uçucu küller, mermer atıkları ve fırın tozları bitümlü sıcak karışımlarda mineral filler yerine kullanılabilirler. Demir çelik fabrikalarının atığı olan cüruflar, termik santrallerin atığı olan kömür kazan cürufları ve kömür taban külleri, katı atık yanma tesisi külleri, cam kırıkları ve hurda lastik parçaları bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak, aynı zamanda cüruflar yüzeysel iyileştirmede, hurda lastikler bitümlü bağlayıcı olarak da kullanılabilirler.

Agrega olarak granüler temel ve alt temel tabakalarında cürufların ve cam kırıklarının kullanımları yaygındır. Stabilize temel ve alt temelde de agrega olarak kömür taban külü ve kömür kazan cürufu, çimento malzemesi (bağlayıcı) olarak uçucu kül, mermer tozları ve desülfojips atıkları kullanılmaktadır. Taban zemininde ise hafif dolgu malzemesi olarak uçucu küller ve hurda lastikler büyük miktarlarda kullanılabilirlerdir.

Bitümlü sıcak karışımlarda ince agreganın bir kısmı yerine granül cam atıkları katılarak, karışımın kayma sürtünme katsayısı ve yüzey görünürlüğü artırılmaktadır. Böylelikle, yol güvenliği artırılmış olmaktadır. Karışımın stabilite değeri, katkısız karışımdan düşük olmasına karşın şartname limit değerinin oldukça üstünde çıkmaktadır. Soyulmayı önlemek amacıyla, cam karışımlara kireç eklenmektedir. Sıcak bitümlü kaplamalarda, karışım ağırlığının %15'i kadar cam kırıkları ve %2'si kadar sönmüş kireç ekleyerek kullanılması uygundur. Ayrıca cam kırıkları, kesinlikle otomobil lastiklerine zarar vermemektedir. Daha iri taneli cam kırıkları ise granüler alt temel ve temelde geleneksel agregadan beklenen özellikleri karşıladığı müddetçe kullanımı uygundur. Cam kırıklarıyla oluşturulan homojen bitümlü sıcak karışımlar, gece yol görünürliğini arttırdığından, ışıklandırılmamış yollarda, özellikle köy yollarında kullanılması yararlıdır.

Demir-Çelik Endüstrisinin yan ürünü olan çelikhane cüruflarının bitümlü sıcak karışımlarda ince agrega olarak kullanımlarıyla, karışımların yorulma ömürleri, soyulmaya ve neme karşı dirençleri artmaktadır. Çelikhane cürufunun yüksek birim hacim ağırlık değeri, nakliye fiyatını arttırmaktadır. Neme temas ettiğinde, %10'a varan potansiyel genleşme göstermektedir. Hacimsel kararsızlıkları, stabilize edilerek azaltılabilmektedir. Erdemir cürufuna yapılan deneylerle malzemenin özelliğinin, yollarda kullanılan geleneksel agregalardan üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Mineral filler olarak portland çimentosunun, agrega olarak çelikhane cürufunun kullanılarak bitümlü bağlayıcıyla hazırlanan karışımın performans özellikleri oldukça üstün çıkmıştır. Diğer demir çelik fabrikalarında oluşan cüruflar incelenerek, bu fabrikaların bulunduğu bölgelerdeki yollarda kullanılmalıdır.

Bitümlü sıcak karışımlardaki mineral filler malzemesinden beklenen özellikleri uçucu küller, mermer tozları ve fırın tozları rahatlıkla karşılamaktadır. Bu malzemelerin mineral filler yerine kullanılmasıyla, stabilite değerleri artmakta, akma

değerleri şartname sınırları içerisinde kalmaktadır. Karışımların soyulma dayanımı ve esneklik modülü artmaktadır. Mermer işleme fabrikalarında oluşan mermer toz atıkları büyük çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu atıklar, bitümlü sıcak kaplamalarda kullanılan geleneksel mineral fillerin özelliklerine sahiptir. Bu yüzden, mermer toz atıkları oluşur oluşmaz, depolanmadan çevredeki yol şantiyelerine gönderilmelidir. Şantiye fabrika arasında bu atıkların nakliyesi sürekli olarak sağlanmalıdır. Düzenli bir stoklama sistemi geliştirilmelidir. Bu arada mermer tozunun kuru olmasına da dikkat edilmelidir.

Uçucu küller puzolan özelliğine sahip olduğundan, kireç veya çimento ile birleşerek stabilize temel ve alt temellerde, taban zemini stabilizasyonunda kullanılabilirler.

Uçucu kül veya hurda lastik parçalarıyla oluşturulmuş hafif dolgularda yüksek taşıma gücü elde edilmekte, hafif ve orta şiddetteki yükler altında sıkışma düşük olmaktadır. Sıkıştırılmış dolguların birim hacim ağırlıkları diğer dolgu malzemelerine göre daha az olduğundan, düşük kohezyonlu zeminler üzerine yapılacak yol dolgularında avantaj sağlanacaktır. Ayrıca, dolgu malzemesi olarak büyük miktarlarda uçucu kül veya lastik yongaları kullanılarak, atıklar ortadan kaldırılmış olacaktır. Uçucu küller ve hurda lastiklerin Türkiye’de oluşum miktarları çok yüksek değerlerdedir. Yol dolgularında kullanımının sağladığı avantajlardan dolayı, dünyada birçok ülkede yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bizde de en kısa zamanda uygulamaya geçirilmesinde yarar vardır.

Hurda lastikler, bitümlü sıcak karışımlarda (bitümlü bağlayıcıya katılarak) bağlayıcı malzeme olarak veya (bitümlü sıcak karışıma katılarak) agrega olarak da kullanılmaktadırlar. Yapılan çalışmaların sonucunda, karışıma katılan katkı lastik miktarının artmasıyla, lastikle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının penetrasyon ve düktilite (sünme) değerlerinin azaldığı, yumuşama noktasının arttığı gözlenmiştir. Penetrasyon değerinin düşmesi ve yumuşama noktasının yükselmesi, lastik ilavesinin bitümü sertleştirdiğini gösterir. Düktilite değeri azalırken, elastik geri kazanım artmaktadır. Geleneksel malzemelerle yapılmış karışımlara göre; lastikle modifiye edilmiş bağlayıcılarla yapılan karışımın elastik geri kazanımı daha fazladır. Hurda otomobil lastiğinin bitümlü karışımlarda kullanılmasıyla, bitümlü bağlayıcının yorulma ömrü ve elastiklik özelliği artmaktadır. Böylece, kaplamalardaki kalıcı

deformasyon azaltılmış olacaktır. Kaba taneli lastik ilave edilerek oluşturulan karışımların homojenliği bozulmaktadır ve karışımın performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Lastiğin tane boyutu küçüldükçe, bitümlü sıcak karışımların stabilitesi artmaktadır, akma değerleri azalmaktadır ve boşluk oranı düşmektedir. Lastik boyutunun 0,6-0,15 mm arasında olması ve bitümlü bağlayıcının ağırlıkça %5, %10'u kadar lastiğin karışıma katılması uygundur. Genelde kullanılan ve güvenli sonuçlar veren ıslak yöntemle lastik ilavesinin, karışımın performansını arttırdığı; bununla birlikte bitümlü bağlayıcı maliyetini de arttırdığı göz ardı edilmemelidir.

Bu çalışmada, endüstriyel atık malzemelerin karayolu performansını nasıl etkilediği üzerinde durulmuştur. Ayrıca ekonomik yönden ayrıntılı bir inceleme, şartlara göre yapılmalıdır.

Türkiye'de bu çalışmada adı geçen endüstriyel atıklar, oldukça büyük miktarlarda, istenilen özelliklerde oluşmaktadır. Birçoğu üzerinde de deneysel çalışmalar yapılmış, olumlu sonuçlar alınmıştır. Endüstriyel atıkların karayolu tabakalarında değerlendirilerek ortadan kaldırılması için en kısa zamanda bu deneysel veriler uygulamaya geçirilmelidir. Trafiğe açık yollarda uygulanarak, performans, çevre ve ekonomi bakımından değerlendirmeler yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Ahmed, I.**, 1993. Use of Waste Materials in Highway Construction, Purdue University, Noyes Data Corporation.
- Ahmedzade, P., Alataş, T. ve Somunkıran, E.T.**, 2006. Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agrega Olarak Kullanılması, *Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, **18**, 225-234.
- Akbulut, H., Gürer, C.**, 2006. Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agrega Olarak Değerlendirilmesi, *İMO Teknik Dergi*, Yazı 261.
- Aksoy, İ.H.**, 1992. Uçucu Külün Geoteknik Alanında Kullanımı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, İTÜ, İstanbul, 21-23 Ekim, s. 248-259.
- Alataş, T.**, 1996. “Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma”, F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İnş. Müh. Böl., *Doktora Tezi*, Elazığ.
- Ali, N., Chan, J.S.S., Potyondy, A.J., Bushman, R. and Bergan, A.T.**, 1996. Mechanistic evaluation of fly ash asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **8**,19.
- American Association of State Highway and Transportation Officials**, 1994. Use of Waste Materials in Highway Construction, Washington.
- Aruntaş, H.Y.**, 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Dergisi*, Cilt 21 No.1, 193-203.
- ASTM C204**, 1994. Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus, American Society for Testing and Materials, *Annual Book of ASTM Standarts*, Volume 04.02, Pennsylvania.

- ASTM C618**, 1998. Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, No.4.
- ASTM E1861-97**, Standard Guide for use of Coal Combustion By-Products in Structural Fills, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Ata, M.M.**, 1987. Esnek Üstyapıların Projelendirme ve İnşaat Yöntemlerinin Araştırılması ve Cürüflu Asfalt Betonu, *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ.
- Atanur, A.**, 1982. Yol Yapımında Yüksek Fırın Cürufu, KGM, Yayın No: 249.
- Bayat, B.**, 2002. Comparative Study of Adsorption Properties of Turkish Fly Ashes I. The case of nickel (II), copper (II) and zinc (II), *Journal of Hazardous Materials*, **B95**, 251-273.
- Berry, W. H., Gray, D. H. Ve Tons, E.**, 1989. Use of Coal Ash in Highway Construction: Michigan Demonstration Project, *Electric Power Research Institute*, Report No. GS-6155, Palo Alto, California.
- Bond, R.**, 2000. EA Probes Newcastle's Use of Toxic Ash in Footpaths, Surveyor, May.
- Bosscher, P.J., Edil, T.B. and Kuraoka, S.**, 1997. Design of Highway Embankments Using Tire Chips, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, April 1997, Volume:123, No.4, p.295-304.
- Chesner, W.H.**, 1992. Waste Glass and Sludge for Use in Asphalt Pavement, Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction, American Society of Civil Engineers.
- Churchill, E.V. and Amirkhanian, S.N.**, 1999. Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **11(4)**, 295-301.

- Collins, R.J.**, 1994. Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction, *National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice No.199*, Transportation Research Board, Washington.
- Çelik, O.N.**, 2001. Öğütülmüş Atık Otomobil Lastiğiyle Modifiye edilmiş Bitümler ile Yapılan Asfalt Betonunun Yorulma Davranışı, *Tübitak Dergisi*, **25**, 487-495.
- Çelik, Ö.**, 2005. Influence of Fly Ash on the Properties of Asphalt, *Journal of Petroleum*.
- Edil, T.B., Benson, C.H.**, 2002. Field Evaluation of Construction Alternatives for Roadway over Soft Subgrade, *Journal of Transportation Research Record*, 1786, National REsearch Council, Washington, USA.
- EPA**, 1996. Characterization of Municipal Solid Waste in the United States, March.
- Epps, Jon A.**, 1994. Uses of Recycled Rubber Tires in Highways, University of Nevada, Transportation Research Board, Washington.
- Esch, D.C.**, 1982. Construction and Benefits of Rubber-Modified Asphalt Pavements, *Transportation Research Record 860*, 5-23.
- Ferguson, G.**, 1993. Use of Self-Cementing Fly Ashes as a Soil Stabilization Agent, *American Society for Civil Engineers*, New York.
- Flynn, L.**, 1993. Glasphalt Utilization Dependent on Availability, Roads and Bridges, February.
- Gönüllü, M.Talha**, 2004. Atık Lastiklerin Yönetimi, Mayıs.
- Güngör, M.M.**, 1996. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Esnek Yol Kaplamalarında Filler Olarak Kullanılması Üzerine Bir Araştırma, F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İnş. Müh. Böl., *Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ.
- Hausmann, M.R.**, 1990. Engineering Principles of Ground Modification, McGrawHill Publishing Company, Singapore.

- Heaton, B.E., Bullen, F.,** 1982. Properties of Stabilized Blast Furnace Slag Road Base, University of Newcastle.
- Hecht, N.L. and Duvall, D.S.,** 1975. Characterization and Utilization of Municipal and Utility Sludges and Ashes: Volume 3, Utility Coal Ash, National Environmental Research Center, U.S. Environmental Protection Agency.
- Heitzman, M.,** 1992. Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier, *Transportation Research Record No.1339*, Transportation Research Board, Washington, DC, 1991, p. 1-8.
- Hınısloğlu, S., Akın, D. ve Varlıorpak, Ç.,** 1992. Uçucu Küllerin Yol Üstyapısında Stabilizasyon Etkisi, D.E.Ü. İnşaat Müh. Böl., *Bitirme Projesi*, İzmir.
- Humphrey, D.N. and Manion, W.P.,** 1992. Properties of Tire Chips for Lightweight Fill, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, ASCE, Geotechnical Special Publication No. 30, New Orleans, Louisiana, Vol.2, p. 1344-1355.
- Humphrey, D.N. and Nickels, W.L.,** 1997. Effect of Tire Chips as Lightweight Fill on Pavement Performance, *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Vol.3, p.1617-1620.
- İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K.,** 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İsfalt Yayınları, İBB.
- İlcalı, M.,** 1988. Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanabilirliğinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, YTÜ, Temmuz.
- İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Tic. A.Ş.,** 2005. Asfalt Betonu Kaplamalarında Cam Kırığının Yol Güvenliği ve Karışım Performansı Üzerine Etkileri, Kalite Yönetim ve Ar-Ge Müdürlüğü, İstanbul, Haziran.
- Karayolları Teknik Şartnamesi,** 2006. KGM Yayını, Ankara.

- Kara, M., Günay, E., Kavaklı, B., Bodur, H.,** 2001. Çelikhane Cüruflarının Farklı Uygulama Alanlarında Değerlendirilmesi Projesi, Tübitak-Marmara Araştırma Merkezi, Gebze, Kocaeli, Temmuz.
- Kibici, Y. ve Kavas, T.,** 2002. Afyon Bölgesi Mermer Atıklarının Portland Kompoze Çimentosu Üretiminde Katkı Maddesi olarak Kullanım Olanakları, Türkiye 3. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s. 327-335, Afyon, Mayıs.
- Larrimore, L. and Pike., C. W.,** 1989. Use of Coal Ash in Highway Construction: Georgia Highway Demonstration Project, *Electric Power Research Institute*, Report No. GS-6175, Palo Alto, California, Şubat.
- Lav, A.H.,** 1997. Characterisation of Stabilized Eraring Power Station Fly Ash as a Pavement Base Material, *Thesis for the degree of Doctor of Philosophy*, Faculty of Engineering The University of Technology, Sydney, March.
- Limbachiya, Mukesh C. and Roberts, John J.,** 2004a. Used/Post-Consumer Tyres, Thomas Telford Publish, Kingston University-London, September.
- Limbachiya, Mukesh C. and Roberts, John J.,** 2004b. Glass Waste / Sustainable Waste Mangement and Recycling, Thomas Telford Publish, Kingston University-London.
- Lovell, C. W., T.-C. Ke, W.-H. Huang, and J. E. Lovell,** 1991. Bottom Ash as Highway Material, *Presented at the 70th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, January.
- Meyers, F., Pichuman, R. and Kapples, B.S,** 1976. Fly Ash as a Construction Material for Highways, Federal Highway Administration, Washington.
- Moulton, Lyle K.,** 1973. Bottom Ash and Boiler Slag, *Proceedings of the Third International Ash Utilization Symposium*, U.S. Bureau of Mines, Information Circular No. 8640, Washington, DC.

- Noureldin, A.S. and McDaniel, R.S.,** 1990. Evaluation of Surfaces Mixtures of Steel Slag and Asphalt, *Transportation Research Record 1296*.
- Özbayoğlu, F., Gürel, A., Aydın, E.,** 1997. Termik Santral Desülfojipslerinin Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 3 Bildiriler Kitabı, sayfa: 145-157, Eskişehir, Ekim.
- Özdemir, O.,** 2001. Tunçbilek Termik Santrali Uçucu Küllerinin Karakterizasyonu ve Yan Ürünlerin Eldesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ.
- Özkul, H., Koral, S.,** 1997. Endüstriyel Atıklardan Desülfojips ve Uçucu Külün Bağlayıcı Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 3 Bildiriler Kitabı, sayfa: 197-208, Eskişehir, Ekim.
- Poran, C.J. and Ali, F.A.,** 1989. Properties of Solid Waste Incinerator Fly Ash, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 115,8, p. 1118-1133.
- Ramme, B.W, Wen, H., Naik, T.R and Kraus, R.,** 2005. The use of fly ash for in-situ recycling of AC pavements into base courses, *Geotechnical Applications for Transportation Infrastructure Featuring the Marquette Interchange Project in Milwaukee*, Wisconsin 181, 10.
- Seung, W.L and Fishman, K.L.,** 1993. Waste products as highway materials in flexible pavement system, *Journal of Transportation Engineering*, **119(3)**, 433-449.
- Sherwood, P. T.,** 2001. Alternative Materials in Road Construction, Thomas Telford.
- Stringfellow, M., Mainieri, J., Kolbet, L. And Finch, D.,** 1994. Fly ash as mineral filler in traffic marking paint: a feasibility study, *Transportation Research Record* , **1442**, 65-73.

- Şenol, A., Edil, T.B., Benson,** 2003. Use of Class C Fly Ash for the Stabilization of Soft Soil As Subbase, *ARI the Bulletin of the İstanbul Technical University*, **53**, 89-95.
- Şenol, A., Edil, T.B.,** 2004. Uçucu Kül ile Stabilize Edilen Yumuşak Zeminlerin CBR Sonuçlarının Değerlendirilmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, İTÜ, Eylül.
- Terzi, S.,** 1998. Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Tortum, A.,** 1997. Atık Araba Lastiklerinin Asfalt Betonunda Kullanabilirliğinin Taguchi Optimizasyon Metodu ile Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Toth, P.S., Chan, H.T., Cragg, C.B.,** 1998. Coal Ash as a Structural Fill, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, p. 1118-1133.
- TS 639,** 1998. Uçucu Küller, *Türk Standartları Enstitüsü*, Nisan.
- TS EN 197-1,** 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Mart.
- Tuncan, M., Tuncan, A. ve Çetin, A.,** 1998. Lastik Atıkların Asfalt Betonu Kaplamaların Mekanik Özelliklerine Etkileri, 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı, ASMÜD.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A.,** 2004. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ankara, Ağustos.
- Umar,F., Ağar, E.,** 1991. Yol Üstyapısı, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.
- Ün, H.,** 2007. Yapı Malzemesi Ders Notları 3- Puzolanlar, Pamukkale Üniversitesi.
- Wasti, Y.,** 1990. Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri ve Kullanım Olanakları, *İMO Teknik Dergi, Cilt:1, Sayı:4*, Ankara, s.177-188.

Yang, N. C., Schmerl, H. ve Waller, M., 1978. Newark Airport Expansion Pilots Cost-Saving Runway Paving Concept, *Civil Engineering*, June.

Yıldırım, B., Kuloğlu, N. ve GÜngör, M.M., 1997. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Asfalt Betonu Kaplamalarda Kullanılması, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 3 Bildiriler Kitabı, sayfa: 187-196, Eskişehir, Ekim.

Zimmer, F., 1970. Fly Ash as a Bituminious Filler, *Proceedings of the 2th Ash Utilization Symposium*, Penssylvania.

Zorluer, İ. ve Usta, M., 2003. Zeminlerin Atık Mermer Tozu ile İyileştirilmesi, *Türkiye 4. Mermer Sempozyumu*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, 18-19 Aralık, Afyon.

www.bcm.org.tr, Bursa Çevre Merkezi, Erişim Tarihi: Nisan 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Gürel Afife Çağlar, 4 Temmuz 1979'da İstanbul'da doğdu. İlkokul öğrenimini İlhami Ahmet Örnekal İlkokulu'nda, ortaokul öğrenimini İstek Özel Acıbadem Lisesi'nde, lise öğrenimini Kadıköy Kız Lisesi'nde tamamladı. 1998 yılında İTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girdi ve 2003 yılında Lisans eğitimini tamamlayarak aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Derslerini başarıyla tamamladıktan sonra KAYALAR İnşaat A.Ş.'de çalışmaya başladı. Halen KAYALAR İnşaat A.Ş.'de Sütlüce Kültür ve Kongre Merkezi şantiyesinde görev yapmaktadır.