

Kara, Üst. Erd. Gör. Kul. Ara.

Mustafa İncek

1988

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARAYOLU ÜSTYAPISINDA  
ERDEMİR CÜRUFUNUN  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**İnşaat Yük.Müh. Mustafa İLICALI**

**F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında  
hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi : 20 Temmuz 1988  
Tez Danışmanı : Doç.Dr. Aydın EREL (Y.T.Ü.)  
Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Nadir YAYLA (İ.T.Ü.)  
Doç.Dr. Emine AĞAR (İ.T.Ü.)**

**İSTANBUL, Temmuz 1988**

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON  
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot : R 150  
247

Alındığı Yer : Y.T.Ü

Tarih : 28.8.1995

Fatura : -

Fiyatı : 10.000 TL.

Ayniyat No : 1-16

Kayıt No : 51547

UDC : .....

Ek : .....

Y. T. Ü.

KÜTÜPHANE DOK. DAİ. BAŞKANLIĞI

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ

D.B. No 50601

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARAYOLU ÜSTYAPISINDA  
ERDEMİR CÜRUFUNUN  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Y. T. Ü.

KÜTÜPHANE DOK. DALI BAŞKANLIĞI

İnşaat Yük.Müh. Mustafa İLICALI

F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında  
hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 20 Temmuz 1988  
Tez Danışmanı : Doç.Dr. Aydın EREL (Y.T.Ü.)  
Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Nadir YAYLA (İ.T.Ü.)  
Doç.Dr. Emine AĞAR (İ.T.Ü.)

İSTANBUL, Temmuz 1988

KULLANILAN İNŞAATIN ARAŞTIRILMASI  
ERDEMİR ÇÜRÜTÜNÜN  
KARAYOLU İSTASYONUNDA

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim  
Kurulunun, 01.03.1994 tarih ve 322 sayılı kararı ile,  
Y.T.Ü. Matbaasında Mart-1994 tarihinde basılmıştır.

## Ö N S Ö Z

Karayolu üstyapısında Erdemir cürufunun kullanılabilirliğini araştırmak amacı ile yapılan bu çalışma sırasında yakın ilgi ve yardımlarını esirgmeden sürekli destek olan tez danışmanı Doç.Dr.Aydın EREL'e, değerli bilgilerinden yararlandığım Doç.Dr. Emine AĞAR'a, Prof.Dr.Rüştü YÜCE'ye, Doç.Dr.Ergun GEDİZLİOĞLU'na, Y.Doç.Dr.Bülent DURMUŞOĞLU'na,gereken cürufu ve bilgileri anında sağlayan Ereğli Demir Çelik Fabrikaları T.A.Ş. yetkililerine, deneylerin yapılmasına katkıda bulunan T.C.K. 17.Bölge Müdürlüğü Araştırma Baş Mühendisliğinin tüm çalışanlarına, İ.T.Ü.İnşaat Fakültesi Yapı Laboratuvarı yetkililerine, Yıldız Üniversitesi Zemin Mekanik ve Malzeme Laboratuvarı ilgililerine, şekil ve tabloların hazırlanmasında emeği geçen Tanju ÖZKAN'a, Saim ATALAY'a ve Murat CANDAN'a teşekkürü borç bilirim.

Çalışma sonuçlarının yararlı olmasını ümit ederim.

Mustafa İLİCALI

İstanbul,Nisan 1988

Y. T. Ü.  
KÜTÜPHANE DÜK. DAİ. BAŞKANLIĞI

# İ Ç İ N D E K İ L E R

Sayfa No

ÖZET

SUMMARY

## 1. BÖLÜM- KARAYOLU YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

1.1. Giriş . . . . .	1
1.2. Karayolu Yapısının Tanımı ve Mevcut Üstyapı Tipleri . . . .	4
1.2.1. Karayolu Altyapısı . . . . .	5
1.2.2. Karayolu Üstyapısı . . . . .	6
1.3. Üstyapıya gelen etkiler . . . . .	8
1.3.1. Trafik etkileri . . . . .	8
1.3.2. İklim etkileri . . . . .	9
1.4. Üstyapının Zorlanması . . . . .	10
1.4.1. Statik yük etkileri . . . . .	10
1.4.2. Yük tekrarlarının etkileri . . . . .	12
1.5. Karayolu Üstyapısında Kullanılan Malzemeler ve Uygulanan Deneyler . . . . .	16
1.5.1. Yol Yapımında Kullanılan Agregalar . . . . .	16
1.5.1.1. Doğal Agregalar . . . . .	16
1.5.1.2. Yapay Agregalar . . . . .	22
1.5.1.3. Bitümlü Kaplamalar Yönünden Agregalar . . . . .	23
1.5.1.4. Agregalara Uygulanan Deneyler . . . . .	24
1.5.1.4.1. Elek Analizi . . . . .	25
1.5.1.4.2. Aşınma Deneyi . . . . .	25
1.5.1.4.3. Agregaların Hava Etkilerine Karşı Dayanıklılığı . . . . .	27
1.5.1.4.4. Cıvalanma Deneyi . . . . .	28
1.5.1.4.5. Su Etkilerine karşı Dayanıklılık Deneyi . . . . .	30
1.5.1.4.6. Yassılık indeksi tayini . . . . .	31

1.5.1.4.7. Özgül ağırlık ve su emme (Absorbsiyon) deneyi . . . . .	32
1.5.1.4.8. Birim hacim ağırlık deneyi . . . . .	35
1.5.2. Bağlayıcı maddeler . . . . .	35
1.5.2.1. Anorganik bağlayıcı maddeler . . . . .	36
1.5.2.2. Organik bağlayıcılar (bitümlü bağlayıcılar)	42
1.5.2.2.1. Asfalt . . . . .	42
- Penetrasyon Deneyi . . . . .	42
- Yumuşama Noktası Deneyi . . . . .	43
- Cleveland Açık Kabı ile Parla- ma Noktası Deneyi . . . . .	43
- Özgül Ağırlık Deneyi . . . . .	44
1.5.2.2.2. Katran . . . . .	44
1.6. Üstyapı Tabakaları ve Bu Tabakalarda Aranılan Şartname Değerleri . . . . .	45
1.6.1. Alttemel Tabakası . . . . .	45
1.6.2. Temel Tabakası . . . . .	46
1.6.2.1. Temel tabakasında kullanılacak agregalar ve tanımlar . . . . .	47
1.6.3. Kaplama Tabakası . . . . .	49
1.6.3.1. Asfalt Betonu (Beton asfalt Kaplamalar) . . . . .	50
2. BÖLÜM- YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE DEĞERLENDİRİLMESİ	
2.1. Giriş . . . . .	55
2.2. Cürufun tanımı ve çeşitleri . . . . .	55
2.2.1. Havada soğutulmuş cüruf . . . . .	57
2.2.2. Köpüklendirilmiş cüruf . . . . .	57
2.2.3. Granüle cüruf . . . . .	57
2.2.4. Pelletize cüruf . . . . .	58

2.3. Cürufun Kimyasal Özellikleri . . . . .	58
2.4. Cürufun Fiziksel Özellikleri . . . . .	61
2.5. Cürufun Kullanıldığı Yerler . . . . .	61
2.5.1. Cürufun çimento üretiminde kullanılması . . . . .	62
2.5.2. Cüruf yünü üretiminde kullanılması . . . . .	64
2.5.3. Cürufun zirai amaçla kullanılması . . . . .	64
2.5.4. Cürufun yapı malzemesi olarak kullanılması . . . . .	64
2.6. Ülkemizdeki Cüruf Üretimi ve Değerlendirilmesi . . . . .	65
2.6.1. İskenderun Demir-Çelik Fabrikası . . . . .	66
2.6.2. Karabük Demir-Çelik Fabrikası . . . . .	67
2.6.3. Ereğli Demir-Çelik Fabrikası(Erdemir) . . . . .	69
2.6.3.1. Erdemir cürufu üretimi ve değeren-	69
dirilmesi . . . . .	69
2.6.3.2. Erdemir cürufunun özellikleri . . . . .	71
2.7. Dış Ülkelerde Cüruf Üretimi ve Karayolunda	
Değerlendirilmesi . . . . .	73
2.7.1. Taşıma gücü düşük taban zeminlerinin cürufu-	
iyileştirilmesi . . . . .	75
2.7.2. Cüruf ilavesiyle oluşturulan alttemel ve temel	
tabakaları . . . . .	76
2.7.3. Cürufu oluşturulan kaplama tabakaları . . . . .	78
2.7.4. Cürufu temelle oluşan karayolu üstyapı profilleri	79
3. BÖLÜM- ERDEMİR CÜRUFUNUN KARAYOLU ÜSTYAPI MALZEMESİ OLARAK	
KULLANILABİLİRLİĞİ	82
3.1. Çalışmada İzlenen Yol . . . . .	82
3.2. Erdemir cüruf türlerinin fiziksel özelliklerinin	
araştırılması . . . . .	85
3.3. Asfalt Çimentosunun Özelliklerinin Araştırılması . . . . .	86

3.4. Farklı cüruf karışımlarının denenmesi . . . . .	86
3.4.1. Bağlayıcısız cüruf karışımları . . . . .	86
3.4.1.1. Granülometri tayini . . . . .	87
3.4.1.2. Ağırlıkça Optimum granüle cüruf yüzdesi- nin tespiti . . . . .	88
3.4.1.3. Optimum su muhtevasının tespiti . . . . .	89
3.4.1.4. Mekanik direncin incelenmesi (CBR deneyi ile) . . . . .	89
3.4.2. Hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımları . . . . .	91
3.4.2.1. Çimento katkılı cüruf karışımları . . . . .	91
3.4.2.2. Kireç katkılı cüruf karışımları . . . . .	92
3.4.3. Bitümlü cüruf karışımları . . . . .	93
3.4.3.1. Bitümlü cüruf karışımlarının su tesirle- rine karşı dayanıklılık araştırılması . . . . .	95
3.4.3.2. Bitümlü cüruf karışımlarının don etkisine karşı dayanıklılığının araştırılması . . . . .	96
4. BÖLÜM- ÇALIŞMADA YAPILAN DENEYLERİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	
4.1. Erdemir Cüruf Türlerinin Fiziksel Özellikleri ile ilgili Deneylerin Değerlendirilmesi . . . . .	97
4.2. Erdemir Cüruf Türleri ile Hazırlanan Karışımların Mekanik Özellikleri ile ilgili Deneylerin Değerlendirilmesi . . . . .	101
4.3. Ekonomik Etüd . . . . .	136
4.3.1. Matematik Model . . . . .	137
4.3.2. Sayısal Uygulama . . . . .	140
4.3.3. Sayısal Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi . . . . .	143
SONUÇLAR : . . . . .	147

## KAYNAKLAR

EKLER EK-I, EK-II, ve EK-III

ÖZGEÇMİŞ

## TABLO VE ŞEKİL LİSTESİ

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Ülkemizdeki Yol Ağı	3
Tablo 1.2. Bazı Ülkelerde izin verilen Azami Dingil Yükleri	9
Tablo 1.3. Yol Agregaları Grupları	21
Tablo 1.4. Aşınma Deneyi Numune Sınıfları	26
Tablo 1.5. Donma Deneyi Dane Boyutları	27
Tablo 1.6. Yassılık İndeksi Tayini için alınacak Minimum Numune Miktarı	31
Tablo 1.7. Teorik Saf Kireç Özellikleri	38
Tablo 1.8. Ticari Kireç Özellikleri	39
Tablo 1.9. En Önemli Çimentoların Kimyasal Bileşimleri	40
Tablo 1.10. Alttemel Tabakası Granülometri Limitleri	45
Tablo 1.11. Alttemel Malzemesinin Fiziksel Özellikleri	46
Tablo 1.12. Kaba Agreganın Fiziksel Özellikleri	48
Tablo 1.13. İnce Agreganın Fiziksel Özellikleri	49
Tablo 1.14. Aşınma Tabakası için Granülometri Limitleri	51
Tablo 1.15. Asfalt Betonu Kaba Agrega Özellikleri	51
Tablo 1.16. Asfalt Betonu İnce Agrega Özellikleri	52
Tablo 1.17. Mineral Fillerin Granülometri Limitleri	52
Tablo 1.18. Asfalt Betonu Karışım Dizayn Kriterleri	53
Tablo 1.19. Asfalt Betonu Otoyol Dizayn Kriterleri	54
Tablo 2.1. Yüksek Fırın ve Çelik Cürufu Kimyasal Bil.ve Limitleri	59
Tablo 2.2. İskenderun Demir-Çelik Fab.Cüruf Üretimi ve Değerlendir.	66
Tablo 2.3. Karabük Demir-Çelik Fab.Cüruf Üretimi ve Değerlendirilmesi	67
Tablo 2.4. Karabük Demir-Çelik Fabrikası Cürufu Kimyasal Analizi	68
Tablo 2.5. Erdemir Yüksek Fırın Cürufu Kimyasal Analizi	70
Tablo 2.6. Erdemir Çelikhane Cürufu 1984 yılı Kimyasal Analizi	71
Tablo 2.7. Bazı Ülkelerdeki Cüruf Üretimi	73
Tablo 2.8. Bazı Ülkelerdeki Cüruf Kullanımı	74
Tablo 2.9. Cürufle Stabilize Edilmiş Zeminin Serbest Basınç Direnci	75
Tablo 2.10. Üstyapı Hesabına Esas olan Malzeme Özellikleri	80
Tablo 2.11. Alternatif Üstyapı Profillerinin Analizi	81
Tablo 3.1. Erdemir Cüruf Türlerinin Saptanan Fiziksel Özellikleri	85

Tablo 4.1. Erdemir Granüle Cürufuna Ait Granülometri	98
Tablo 4.2. Özgül ve Birim Hacim Ağırlık,Su Absorbsiyonu Deney Sonuç.	98
Tablo 4.3. Los Angeles Aşınma Deneyi Sonuçları	99
Tablo 4.4. Donma Deneyi Sonuçları	99
Tablo 4.5. Soyulma Direnci,Cilalanma Katsayısı,Yassılık İndeksi Deney Sonuçları	101
Tablo 4.6. Asfalt Çimentosu Özellikleri	109
Tablo 4.7. Granülometri-Birim Hacim Ağırlık İlişkisi	109
Tablo 4.8. Serbest Basınç Deneyi ile Optimum Granüle Cüruf Tayini	111
Tablo 4.9. Optimum Su Muhtevası Tayini	111
Tablo 4.10. CBR Sonuçları (% 6 su muhtevası için)	112
Tablo 4.11. CBR Sonuçları (% 8 su muhtevası için)	112
Tablo 4.12. CBR Sonuçları (% 9 su muhtevası için).	114
Tablo 4.13. CBR Sonuçları (% 10 su muhtevası için)	114
Tablo 4.14. CBR Sonuçları (% 11 su muhtevası için)	116
Tablo 4.15. CBR Sonuçları (% 12 su muhtevası için)	116
Tablo 4.17. Islatılmış CBR Sonuçları (% 9 su muhtevası için)	118
Tablo 4.18. Islatılmış CBR Sonuçları (% 10 su muhtevası için)	118
Tablo 4.19. Islatılmış CBR Sonuçları (% 11 su muhtevası için)	120
Tablo 4.20. Islatılmış CBR Sonuçları (% 12 su muhtevası için)	120
Tablo 4.21. 7 Günlük Serbest Basınç Dirençleri (Çimentolu cüruf Karışımı)	123
Tablo 4.22. 7 Günlük Serbest Basınç Dirençleri (Kireçli cüruf karışımı)	123
Tablo 4.23. Kireç Katkılı Cüruf Karışımlarının CBR Sonuçları	123
Tablo 4.24. Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Agregas Granülometrisi	126
Tablo 4.25. Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Agregas Miktarı	126
Tablo 4.25a. Bitümlü Karışımlarda Marshall Deneyi Grupları	131
Tablo 4.26. Bitümlü Karışımlarda Kullanılan (AC) Miktarları	131
Tablo 4.27. 1 Nolu Marshall Deneyi Sonuçları (% 93 BOS;% 7 PÇ)	127
Tablo 4.28. 2 Nolu Marshall Deneyi Sonuçları (% 83 BOS; % 10 GS; % 7 PÇ)	129
Tablo 4.29. Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Farklı Cins ve Orandaki Karışımların Özgül Ağırlıkları	131

Tablo 4.30.	Bitümlü Karışımlarının Farklı Kür Şekillerindeki Marshall Deneyi Sonuçları (% 93 BOS, % 7 PÇ)	132
Tablo 4.31.	Bitümlü Karışımlarının Farklı Kür Şekillerindeki Marshall Deneyi Sonuçları (% 88 BOS, % 5 GS, % 7 PÇ)	133
Tablo 4.32.	Deney Sonuçlarının Regresyon Analizi ile Değerlendirilmesi	102
Tablo 4.33.	Ekonomik Etüd Sayısal Uygulamada Kullanılan Sabitler	141
Tablo 4.34.	Aynı Kaplama Maliyetini Veren Eşdeğer Şantiye Taşocağı/Fabrika Mesafeleri	145

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1.	Karayolu Enkesiti	5
Şekil 1.2.	Üstyapıda Oluşan Gerilmeler	11
Şekil 1.3.	Üstyapıda Oluşan Deformasyonlar	13
Şekil 1.4.	Dane Kalınlığını Ölçme Aleti	33
Şekil 2.1.	Demir-Çelik Fabrikalarında Oluşan Cürufa Ait Akış Diyagramı	56
Şekil 2.2.	Cürufllu Karışımın Serbest Basıncı Direncinin Değişimi	77
Şekil 2.3.	Kireç Katkılı Cüruf Karışımının Serbest Basıncı Direncinin Değişimi	77
Şekil 2.4.	Cürufllu Karışımın Gerilme-Rijitlik Modülü İlişkisi	77
Şekil 2.5.	Cürufsuz Üstyapı Profili	79
Şekil 2.6.	Stabilize Cüruf Temelden Oluşan Üstyapı Profili	79
Şekil 2.7.	Stabilize Cüruf Alttemelden Oluşan Üstyapı Profili	79
Şekil 3.1.	Yapılan Çalışmanın Akış Diyagramı	83
Şekil 4.1.	Granüle Cüruf Granülometrisi	100
Şekil 4.2.	Granülometri-Birim Hacim Ağırlık İlişkisi	110
Şekil 4.3.	Su Muhtevası-Kuru Birim Hacim Ağırlık İlişkisi	110
Şekil 4.4.	CBR Deneyi Değerlendirmesi (% 6 su muhtevası)	113
Şekil 4.5.	CBR Deneyi Değerlendirmesi (% 8 su muhtevası)	113

Şekil 4.6. CBR Deneyi Değerlendirmesi (% 9 su muhtevası)	115
Şekil 4.7. CBR Deneyi Değerlendirmesi (% 10 su muhtevası)	115
Şekil 4.8. CBR Deneyi Değerlendirmesi (% 11 su muhtevası)	117
Şekil 4.9. CBR Deneyi Değerlendirmesi (% 12 su muhtevası)	117
Şekil 4.10. Islatılmış CBR Deneyi Değerlendirmesi (% 9 su muhtevası)	119
Şekil 4.11. Islatılmış CBR Deneyi Değerlendirmesi (%10 su muhtevası)	119
Şekil 4.12. Islatılmış CBR Deneyi Değerlendirmesi (%11 su muhtevası)	121
Şekil 4.13. Islatılmış CBR Deneyi Değerlendirmesi (%12 su muhtevası)	121
Şekil 4.14. Su Muhtevası CBR ve Kuru Birim Hacim Ağırlık İlişkisi	122
Şekil 4.15. Çimento Yüzdesine Göre 7 Günlük Serbest Basınç Direnci Değişimi	124
Şekil 4.16. Kireç Yüzdesine Göre 7 Günlük Serbest Basınç Direnci Değişimi	124
Şekil 4.17. Farklı Kireç Katkılarında Su Muhtevası-CBR İlişkisi	125
Şekil 4.18. 1 Nolu Marshall Deneyinin Değerlendirilmesi (% 53 BOS, % 7 PÇ)	128
Şekil 4.19. 2 Nolu Marshall Deneyinin Değerlendirilmesi (% 73 BOS, % 10 GS, % 7 PÇ)	130
Şekil 4.20. Bitümlü Cüruf Karışımının Stabilitesinin Su Etkisi İle Değişimi	134
Şekil 4.21. Granüle Cüruf İçeren Bitümlü Cüruf Karışımının Stabilitesinin Su Etkisi ile Değişimi	134
Şekil 4.22. Bitümlü Cüruf Karışımlarının Stabilitesinin Tahmin Edilen Uzun Süreli Su Etkisinde Değişimi	135
Şekil 4.23. Bitümlü Karışımlarda Uygulanan Granülometri	100
Şekil 4.24. Aynı Kaplama Kalitesini Veren Eşdeğer Şantiye-Taşocağı/Fabrika Mesafeleri	144

Y. T. Ü.  
KÜTÜPHANE DÖR. DAL. BAŞKANLIĞI

ÖZET

Günümüzde hızlı nüfus artışı, ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarının yükselmesi ile birlikte ülkelerdeki ulaşım talebi de hızla artmakta, bu artış bir yandan mevcut ulaştırma yapılarının bakım ve onarım giderlerini diğer yandan yeni ulaştırma yapılarına olan gereksinimi hızla artırmaktadır. Dolayısıyla kara ulaştırma yapılarında büyük miktarlarda kullanılan doğal agrega gereksinimi ve tüketimi de hızla artmaktadır. İstenen özelliklerdeki doğal kaynakların da kısıtlı olması ve doğal agrega maliyetlerinin yükselmesi atık malzemelerin ulaştırma yapılarında da değerlendirilip değerlendirilemeyeceği konusunu gündeme getirmektedir. Ulaştırma yapılarında kullanılabilen atık malzemelerden biri olan ve demir-çelik fabrikalarında, demirin yanı sıra yüksek fırınlarından elde edilen cüruf, diğer bazı endüstri atıkları gibi çeşitli alanlarda yeniden değerlendirilebilme özelliğine sahip bir malzemedir. Bir çok ülkede yüksek fırın cürufunun karayolu üstyapısı malzemesi olarak kullanılabilirliği konusunda araştırmalar ve denemeler yapılmaktadır. Ülkemizde 1970'den sonra gözlenen hızlı trafik artışı yanında, kırsal yollarda ağır taşıt yüzdesinin büyümesi ve bu arada ağırlık kontrolü yapılamaması yol üstyapısının hızla bozulmasına sebep olmaktadır. Bunun yanısıra 18.6.1985 tarihinden itibaren karayollarında tek dingil için 13 ton, tandem dingil için 19 tonluk dingil yüklerine izin verilmesi belirtilen sorunu daha da ağırlaştırarak, daha küçük dingil yüklerine göre projelendirilmiş olan yol ağının bakım ve onarımında büyük harcamalar gerektirecektir.

1984 yılı itibariyle ülkemizdeki yıllık yüksek fırın cürufu üretimi yaklaşık 1.500.000 ton dolayındadır. Bu üretimin yakın gelecekte 4. Demir-Çelik Endüstrisinin de üretime başlaması ve mevcut fabrikalardaki üretim artışları ile daha yüksek değerlere ulaşacağı ve büyük bir kısmı değerlendirilmeyen cüruf birikiminin büyük yekün teşkil edeceği açıktır.

Bu çalışmada, karayolu üstyapısında Erdemir cürufunun kullanılabilirliği teknik ve ekonomik yönden araştırılmıştır. Dört bölümden oluşan çalışmanın Birinci Bölümünde, karayolu yapısının tanımı, özellikleri ve üstyapıda kullanılacak malzemelerde aranan şartlarla ilgili bilgiler verilmektedir.

İkinci Bölümde, yüksek fırın cürufu ve değerlendirilmesi başlığı altında, cürufun tanımı, fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanıldığı yerler ve dış ülkelerde karayolu üstyapısında değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalara yer verilmektedir.

Üçüncü bölümde, Erdemir'den temin edilen cüruf türlerinin karayolu üstyapısı malzemesi olarak teknik kullanılabilirliğinin araştırılması için, Yıldız Üniversitesi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, T.C.K. 17.Bölge Müdürlüğü, T.C.K. Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında yapılan deneysel çalışmalar yer almaktadır.

Dördüncü bölümde ise, yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar toplu halde verildikten sonra, bunların değerlendirilmesi yapılmakta, daha sonra ekonomik etüd ile sayısal uygulaması ve sonuçlarına yer verilmektedir.

Alınan sonuçların değerlendirilmesinden, Erdemir cürufunun gerek sahip olduğu kimyasal ve fiziksel özellikler gerek cüruf türleri ile hazırlanan karışımlardan elde edilen mekanik özellikler, bu malzemenin üst yapının her tabakasından yeterli güvenlikle kullanılabileceğini göstermektedir. Yapılan Ekonomik Etüd'le de, en gayri müsait durumda bile cürufun ekonomik olarak kullanılabilmesi bir mesafenin mevcut olduğu sonucu elde edilmiştir.

## SUMMARY

In today's world, demand for transportation grows fast by increase in population, economical progress and rise in life standard and this growth increases speedy maintenance expences of transportation structures and need for new transportation investment. Therefore the consumption of natural aggregate using in large amount in transportation systems is growing fast too. The high cost of aggregate and the insufficiency of natural sources having required conditions make the experts consider whether waste materials can be used in transportation structures. Slag which is one kind of the waste materials can be used in transportation structures. It is obtained from blast furnaces with iron in Iron-Steel Works and can be evaluated as the other waste materials from industry. The research and related tests are carried out in some countries about the use of blast furnace slag as a pavement material in roads. In our country the increase in traffic after 1970 and growing the percentage of heavy vehicles in traffic composition and also lacking of heaviness control in roads lead quickly failures in pavements.

Besides this, 13 tonnes for single axle and 19 tonnes for tandem axle have been allowed in roads since 16.6.1985. Because the road network has been designed according to the lower axle loads, the problem mentioned above would be more serious and the maintenance costs would be much more

In 1984 the production of blast furnace slag in our country is approximately 1.500.000 tonnes. It is obvious that the production of slag will reach very high amount by production increase in present works and by a new steel work, 4 th Iron and Steel

Works, and most at it would not be evaluated. In this study, use at the Erdemir slag in road pavement has been researched. The study has four sections in the first section, the definition and characteristics of road system and the conditions required for the pavement materials are given.

In the second section, under the title of "Blast Furnace Slag and Its Use", the definition, physical and chemical characteristics, the areas where it is used and the use in other countries of slag are discussed. In the third section, the tests carried out at the laboratories of Yıldız University, Technical University of Istanbul, the 17 th. Regional Directorate of Turkish State Highways and Head Office of Turkish State Highways in order to research whether types of slag obtained from Erdemir Iron and Steel works can be used as a pavement material are described.

In the fourth section all the results obtained from these tests are given and then discussed. In addition, the economical study and numerical example and its results are shown. By the evaluation of the results, the chemical and physical characteristic of the Erdemir Slag and the mechanical properties obtained from the mixtures prepared using types of slag shows that this material can be used in every part of the pavement with adequate confidence (safety).

It is proved by the economical study that there is a distance along which slag can be used economically in any situation.

Y. T. Ü.  
KÜTÜPHANE GENEL BAŞKANLIĞI

## 1. BÖLÜM

### KARAYOLU YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

#### 1.1. GİRİŞ

İyi bir karayolu ağının sağladığı ulaşım kolaylığının, o ülkenin kalkınmasındaki payı oldukça önemlidir.

Tarihten önceki çağlarda yapılmış olan yollarla ilgili pek az bilgi vardır. İlk yol izlerine Mısır'da rastlanılmıştır. Tarihçi Herodot ve Pline'in belirttiklerine göre, pramitlere ve diğer anıtlara gerekli yapı malzemesinin taşınması işinin kolaylıkla yapılabilmesi için, malzeme taşımaya yarayan yollar yapılmıştır. Mısır'ın dışında Yunanistan'da ve Pompei şehrinde, (Milattan 1900 yıl önce), Keldaniler devrinde Anadolu ve Fransa'nın Gol eyaletinde yapılmış olan yolların kalıntılarına rastlanılmıştır. Romalıların yaptıkları yollar, ülkeleri kolaylıkla ele geçirebilmelerinde çok yararlı olmuştur. Bu çağlarda yapılan yollarda, malzeme olarak kırma ve yonu taşı ile harç kullanılmıştır. Romalılar tarafından yapılan yollardaki teknik, günümüzdeki yollarinkine yakındır. Orta çağda büyük şehirlerarası yolların şehir içi geçişlerde taş kaplama yapılması, yol yapım tekniği bakımından kayda değer bir gelişmedir (1).

Yol konusundaki gelişmeler, 18. nci asırda Fransız mühendis TRESAGUET'nin taş ve kırma taş yolların yapımı ile bakımı konularında getirdiği yeniliklerle başlamıştır. 1775 yılında yazdığı MEMOİRE adlı eseri ile, yol mühendisliğinde ilk ciddi etüdüleri yapmıştır. Bu eser, temel kalınlıklarının seçiminde araba ağırlıklarının gözönüne alınması açısından önemlidir. Ayrıca yol yüzeyindeki taşların, aşınması az olan sert taşlardan seçilmesi hususunda titizlik gösterilmesi de belirtilmiştir. Yüzeye yakın tabakalarda kullanılan taşların, yolun dayanıklılığına ve uzun ömürlülüğüne etkisi fazla olduğundan, ortaya atı-

lan bu fikir yol yapım tekniğinde önemli bir aşama sağlamıştır.

1820 yılında İngiliz mühendis MAC ADAM ve TELFORD, 1830 yılında Fransız mühendis POLONCEAU, yol tekniğinde yeni adımların atılmasını sağlamışlardır. İlk modern asfalt yol ise 1852 yılında Paris ile Perpignan arasında yapılmıştır. 1836 yılında İngiltere'de yaya kaldırımlarda (Londra), 1838'de A.B.D. Filadelfiya şehrinde yol yapımında asfalt kullanılmıştır. Bu yolların kaplamasında silindirme yapılmamış olup, 1854 yılında ilk defa asfalt kaplama yolların silindirlenmesine başlanmıştır.

Birinci Dünya Savaşından ve otomobil endüstrisinin doğuşundan sonra, özellikle 1920 yıllarına doğru, yol yüzeyinin düzgünlüğünün öneminin arttığı görülür. Yol yüzeylerinde tozun önüne geçme çareleri aranmış, çözümlerin bulunması bitümlü kaplama tekniğinin gelişmesine ışık tutmuştur. Tozla mücadele ve aşırı yol ondülasyonlarından kaçınma düşüncesi ile beraber, günün ve geleceğin trafik şartları gözönüne alınarak yol temellerinin dingil yüklerine göre hesaplanmasına ve böylelikle daha nitelikli yolların yapımı yönünde araştırmalara başlanmıştır.

Ülkemizde ise karayolu yapımına Cumhuriyetin ilk yıllarından önem verilmeye başlanmıştır. Bu nedenle 1929 yılında Nafia Vekaletine bağlı "Şose ve Köprüler Reisliği" kurulmuş ve yol kanunu çıkarılarak yol çalışmalarına hız verilmiştir (2). Ancak uzun bir savaş döneminin yarattığı kaynak yetersizliği daha sonra gelen II.Dünya Savaşı, çalışmaların istenen düzeye çıkmasını engellemiştir. İkinci Dünya Savaşının bitiminden hemen sonra motorlu taşıt sayılarında önemli artışlar olmuştur. İşte motorlu taşıt sayılarındaki ani artışlar ülkemizde karayolu çalışmalarının yeni bir biçimde ele alınmasını gerekli kılmış ve 1.3.1950'de Karayolları Genel Müdürlüğü kurularak karayolları ile ilgili tüm çalışmalar bu kuruluşa devredilmiştir. Bu dönemde Marshall yardımıyla gerekli makina parkı sağlanmış ve yeni teknolojik uygulamalara imkan verecek yol çalışmaları hızla başlatılmıştır. Ancak Karayolları Genel Müdürlüğü ülkemizdeki ilk yol çalışmalarına, yol standartlarından ziya-

de, "tekerlek dönsün" sloganı ile başlamış ve daha sonra açılan bu yollarda standart yükseltme ve iyileştirme çalışmalarına geçilmiştir.

Ülkemizdeki otoyollar ile Devlet ve il yolları ağı 1986 yılı sonu itibariyle Tablo 1.1'deki değerlere ulaşmıştır (3).

Tablo 1.1. Ülkemizdeki Yol Ağı

	Devlet Yolları	İl Yolları	Toplam	
	(km)	(km)	km	%
Asfalt	27657	15909	43566	73
Stabilize	2773	9414	12187	21
Toprak, geçit vermeyen	556	2830	3386	6
Otoyol			95	
Toplam	30986	28153	59234	

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün kuruluşundan itibaren geçen sürede Tablo 1.1'de verilen değerlere ulaşan yol ağı oldukça önem taşımaya rağmen yol talebinin karşılanabilmesi için daha çok mesafe katetmek gerekmektedir. Nitekim diğer ülkelerle karşılaştığımızda bu durum daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Uluslararası Yol Federasyonunun yayınladığı 1984 yılı istatistiklerine göre kilometrekare başına düşen yol miktarı İngiltere'de 1490 m, Almanya'da 1960 m, Japonya'da 2980 m, Yugoslavya'da 450 m, ve Yunanistan'da 830 m. dir. Ülkemizde ise yol kalitesi dikkate alınmadan köy ve orman yolları ile birlikte bu rakam 390 m. olmaktadır.

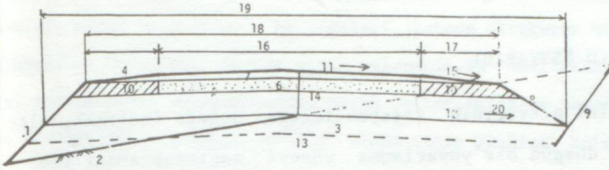
1983-93 Ulaştırma Ana Planının Karayolları ile ilgili bölümünde, plan dönemi sonunda Devlet Yolları uzunluğunun, 13870 km'si bitümlü sıcak karışım, 17630 km'si ise sathî kaplama olmak üzere toplam 31.500 km olacağı belirtilmektedir (4). Ancak Ulaştırma Ana Planının her üç yılda bir revize edilmesi öngörüldüğünden, ilk üç yıllık uygulamasından sonra, yoğun trafığe maruz Devlet Yollarında 13870 km'lik

bitümlü sıcak karışım kaplamalı hale dönüştürülme hedefinin, 17500 km'ye çıkartılması önerilmiştir. Planın otoyollarla ilgili bölümü de yeniden gözden geçirilerek, 3000 km'lik kısmın 2000 yılına kadar işletmeye açılması hedeflenmiştir.

Kalkınmakta olan ülkemizde sınırlı olan ekonomik olanakları en iyi şekilde kullanarak, gelişen yol tekniğine uygun şekilde ekonomik ve uzun ömürlü yolların yapılmasına çalışılmalıdır. Bunun içindir ki, yeni yol yapımı veya mevcut bir yolun iyileştirilmesi (islah) ile ilgili planlama ve projelendirme safhasında, mevcut ve geleceğe yönelik trafik ihtiyaçlarının en ekonomik şekilde karşılanması yanında, söz konusu yatırımın o bölge ve tüm ülke için sosyo-ekonomik kalkınmayı teşvik edici, kullanılmayan atıl potansiyeli harekete geçirici ve malzeme, işçilik yönünden mümkün olduğu kadar ulusal kaynaklara dayalı olması gerekmektedir.

## 1.2. KARAYOLU YAPISININ TANIMI VE MEVCUT ÜSTYAPI TİPLERİ

Karayolu yapısı, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak saptanmış olan bir güzergah boyunca, doğal zeminin istenilen yükseltilere getirilebilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tanımlanabilir. Karayolu yapısı, görevi, yapım sırası ve özellikleri açısından alt ve üst yapı olarak iki ayrı bölümde incelenebilir. Karayolu yapısına ait bir enkesit Şekil 1.1'de verilmiştir (5).



- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| 1. Dolgu Őevi                                      | 11. Yolun enine eğimi             |
| 2. Tabii zemin                                     | 12. Taban yüzeyi (tesviye yüzeyi) |
| 3. Seçme malzeme tabakası (gerekli olduğu durumda) | 13. Yol gövdesi (taban zemini)    |
| 4. Banket kaplaması                                | 14. Üstyapı proje kalınlığı       |
| 5. Alttemel  | 15. Banket eğimi                  |
| 6. Temel tabakası                                  | 16. Trafik Őeritleri genişliği    |
| 7. Kaplama tabakası                                | 17. Banket genişliği              |
| 8. Hendek Őevi                                     | 18. Yol genişliği                 |
| 9. Yarma Őevi                                      | 19. Üstyapı taban genişliği       |
| 10. Banket temeli                                  | 20. Taban yüzeyinin enine eğimi   |

Şekil 1.1 Karayolu Enkesiti

### 1.2.1. KARAYOLU ALTYAPISI

Yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal in çizgisi arasındaki bölgeye altyapı adı verilir. Altyapı, yolun ğu kesimlerinde, dışarıdan getirilen toprak ile oluşturulmuş bir yarak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zemindir. Ancak, kazı işlemlerden sonra istenilen düzlüğü ve eşit yük dağılımlını sağlamak amacıyla döşenen ve sıkıştırılan toprak da, yarma kesimindeki altyapıya ildir. Ayrıca, köprü viyadük, tünel ve menfez istinat duvarı gibi hat yapıları da altyapı olarak kabul edilebilir.(6).

Altyapının görevleri; istenilen kotta düzgün bir yüzey sağlamak, yapı tarafından iletilen yükleri daha geniş bir alana yaymak az da olsa, yolu dış etkilerden korumaktır. Bu görevleri yerine getirebilmesi için, trafik yükleri, don ve su etkilerine karşı dayanıklı

olması gerekir. Altyapının oluşturulmasında; bitkisel toprak, çürük zemin ve sıkıştırmaya elverişli olmayan zeminlerin kullanılmamasına özen gösterilmelidir. Bu nedenle altyapıyı oluşturan zemin özelliklerinin çok iyi etüd edilmeleri gerekmektedir.

### 1.2.2. KARAYOLU ÜSTYAPISI

Trafik yüklerini altyapının taşıyabileceği değere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacı ile altyapı üzerine yerleştirilen alttemel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısıdır. Kaplama, taşıtlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak ve yapıya sızan yüzeysel su miktarını ve temel tabakasına iletilen kayma gerilmelerini azaltmak amacıyla temel tabakası üzerine inşa edilen bir tabakadır. Kaplama altındaki temel tabakası, bağlayıcısız ya da bir bağlayıcı madde ile işlem görmüş olan, belirli gronülometrideki malzemedен oluşur. Ana görevi, üstyapının yük taşıma kabiliyetini artırmaktır. Ayrıca, trafik hareketlerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilecek, drenaja yardımcı olabilecek ve don olaylarına karşı da koruma sağlayabilecek nitelikte olmalıdır. Alttemel ise, trafik yüklerinin taban üzerine yayılmasını sağlamak, ince daneli altyapıların temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek, ayrıca su ve don tesirlerine karşı tampon bölge görevi yapmak üzere tesviye yüzeyi üzerine serilen tabakadır.

Üstyapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, niteliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek olmak üzere ana kategoriye ayrılmaktadırlar. Taban zeminine, trafiğe, çevre şartlarına ve ekonomik faktörlere bağlı olarak en uygun üstyapı tipi seçilir (5), (7).

Çimento betonu ile yapılan kaplamalarla oluşturulan üstyapıya "Rijit üstyapı" ya da "Beton Yollar" denir. Yol kaplaması olarak betonu görevi, trafik yüklerini tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme

olmamasını sağlamaktır. Bir beton kaplamanın davranışı, dökülen beton tabakaların özelliklerinin yanı sıra, kaplama altına serilen temel ve alttemel tabakaları ile mevcut taban zemininin özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu nedenle projelendirme sırasında, taban zemini, temel ve alttemel malzemeleri, betonu oluşturan kum, çakıl, çimento ve betonarme demiri gibi malzemelerin özelliklerinin çok iyi incelenmesi gerekmektedir. Beton yolların enine ve boyuna derzlerle birbirinden ayrılmış 20-25 m<sup>2</sup> alana sahip plaklar halindedir. Beton plağın rijitliğinin yüksek olması nedeniyle taban zemininde oluşan gerilmeler geniş bir alana yayılır.

Bitümlü kaplama tabakaları ile oluşturulan üstyapılara ise "Esnek Üstyapı" denir. Esnek Üstyapı, tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alttemel tabakaları vasıtasıyla taban zeminine dağıtan bir Üstyapı şekli olup, stabilitesi, adezyon, dane sürtürmesi ve kohezyon gibi kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır.

Yukarıda tanımlanan rijit ve esnek Üstyapıların birbirlerine göre çeşitli teknik üstünlükleri ve sakıncaları vardır. Ekonomik yönden de karşılaştırıldıklarında farklı sonuçlar çıkmaktadır.\*

T.C. Karayollarında esnek Üstyapı tipi uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek fırın cürufunun karayolu yapısında kullanılabilirliği, esnek Üstyapı tipleri için araştırılmış olduğundan, esnek Üst yapılar Bölüm 1,6'da yeniden ele alınacaktır.

---

\* Rijit Üstyapılar hakkında daha geniş bilgi ile Esnek ve Rijit Üstyapıların Türkiye koşullarında teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılmalarını içeren bir çalışma (19) nolu kaynakta bulunabilir.

### 1.3. ÜSTYAPIYA GELEN ETKİLER

Üstyapıya gelen etkiler trafik ve iklim etkileri şeklinde iki ayrı başlıkta incelenebilir.

#### 1.3.1. Trafik Etkileri

Karayolu üzerinde seyreden taşıtların ağırlıkları, dingil sayılarına göre değişen büyüklüklerde, tekerlek bandajları aracılığı ile kaplı ma yüzeyine iletilmektedir. Taşıtların hızlanma ve frenleme evrelerinde bandaj ile kaplama arasındaki sürtünmeye bağlı olarak oluşan yatay yükler de üstyapıya etkimektedir. Dingil yükleri, üstyapının kalınlığının tespitinde gözönüne alınan en önemli faktörlerden biridir. Dingil yükleri arttıkça, üstyapının kalınlığını artırmak ve daha kaliteli malzeme kullanmak gerekmektedir. Yasal dingil yükleri ülkeden ülkeye değişmektedir. Ülkemizde yasal dingil yükleri Karayolları Trafik Yasa, Tüzük ve Yönetmelikleri ile belirlenmektedir. En son olarak 18.6.1985 tarihinde yürürlüğe giren Karayolları Trafik Yönetmeliği ile yasal dingil yükleri tek dingilde 13 tona, çift dingilde ise 19 tona çıkarılmıştır (8).

1974 yılı itibariyle bazı ülkelerde yürürlükte bulunan yasal dingil yükleri ile Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tekerlek bandajından üstyapıya etki eden yatay ve düşey yükler, üstyapı tabakalarında basınç, çekme, eğilme ve kayma gerilmeleri doğurmaktadır. Gerilmelerin şiddeti dingil yükü, lastik iç basıncı (veya temas basıncı) taşıtın hızı ve bandajın üzerindeki yiv ve setlerin biçimlerine bağlı olarak değişir. Bir lastik tekerlekli bandaj, kendisine gelen tekil yükün şiddetine bağlı olarak, asfalt kaplama üzerinde bir değme alanı oluşturur. Bandaja etkiyen tekil yükün değeri ne olursa olsun, bandaj değme alanının bir daire ve bu daire üzerindeki gerilme dağılışının da üniform olduğu kabul edilir.

Tablo 1.2. Bazı ülkelerde izin verilen azami dingil yükleri (t)

<u>Ülkeler</u>	<u>Tek dingil</u>	<u>Çift (tandem)dingil</u>
Avusturya	10	16
Belçika	13	20
Bulgaristan	8	15,5
Kanada	8-2	12,7-14,5
Çekoslavakya	10	16
Danimarka	8	14,5
Federal Almanya	10	16
Finlandiya	8	13
Fransa	13	21
Yunanistan	8	14,5
Macaristan	8	14,5
İtalya	10	14,5
Japonya	10	
Hollanda	10	16
Norveç	6	9
Romanya	10	16
İspanya	13	14,7-21
İsveç	8	12
İsviçre	10	14
Yugoslavya	10	16
İngiltere	9	16
Amerika	9	15,5

## 1.3.2. İklim Etkileri

Sıcaklığın düşmesi halinde bitümlü kaplama tabakası büzülmek istemeye başlar. Temel tabakası, kaplama ile arasındaki sürtünmeye bağlı olarak hareketi önlemek ister ve bunun sonucunda kaplama tabakasında çekme gerilmeleri oluşur. Esnek üstyapıda asfaltın hacimsel genişleme kat-

sayısının mineral agregasınınkinden büyük olması da, sıcaklık düşmesi ile, agrega daneleri arasındaki asfalt filminde çekme gerilmelerinin doğmasına sebep olur (5). Sıcaklık düşüşü, zemini ve zemin suyunu etkilediğinde, zemin boşluklarındaki suyun donuncaya kadar soğuması ile önce buz kristalleri daha sonra buz mercikleri ve sonuçta ise don kabarması olayını meydana getirebilir. Dona hassas taban zemini ve temel tabakalarında oluşan buz mercikleriyle, kaplamanın yukarı doğru yükselmesi sonucu meydana gelen don kabarması olayı da, bitümlü kaplama tabakasından çekme gerilmelerinin doğmasına yol açmaktadır. Bazı hallerde, don kabarması nedeniyle bitümlü kaplama tabakasında oluşan çekme gerilmeleri, kaplamanın mukavemetini aşarak çatlakların ortaya çıkmasına neden olabilirler. Bundan dolayı; üstyapının oturduğu taban zemininin, dona karşı hassasiyeti, yolun inşa edileceği bölgenin; donma indeksi  $(DI = \sum_{i=1}^{i=n} k_i \cdot t_i)^*$ , don penetrasyon derinliği ve hidrolojik şartlar gibi faktörler değerlendirilerek üstyapıda dona karşı önlemin gerekli olup olmadığı araştırılmalıdır (7).

#### 1.4. ÜSTYAPININ ZORLANMASI

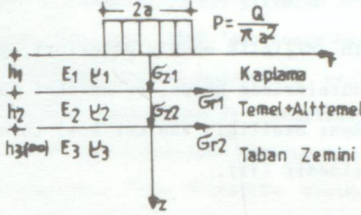
Üstyapının zorlanması, statik ve dinamik (yük tekrarı) yük etkisinde olmak üzere iki ayrı şekilde ele alınmıştır.

##### 1.4.1. Statik Yük Etkileri

Esnek üstyapılarda trafik etkisinde yük ekseninde oluşan gerilmeler Şekil 1.2'de verilmiştir (10).

Bir üstyapının bozulması, ya kaplama tabakası ile temel tabakasının arakesitindeki aşırı çekme  $(\sigma_{r1})$  ya da temel tabakasındaki aşırı basınç  $(\sigma_{z2})$  gerilmelerinin etkisiyle meydana gelir. Üstyapı tabakalarının boyutlandırılmasında  $(\sigma_z)$  ve  $(\sigma_r)$  gerilme değerlerinin kritik

\*  $t_i = i$  günündeki ortalama günlük hava sıcaklığı ( $^{\circ}C, t_i < 0^{\circ}C$ ),  
 $k_i = t_i$  ortalama günlük hava sıcaklığının bir yıldaki toplam sayısı  
 $n = 0^{\circ}C$ 'nin altındaki ortalama hava sıcaklıklarının sayısı.



$Q$  = Tekerlek yükü

$2a$  = Tekerleğin iz genişliği

$\sigma_z$  = Düşey gerilme

$\sigma_r$  = Yatay gerilme

Şekil 1.2

gerilme değerlerinin altında olmasına dikkat edilmelidir. Şayet ( $\sigma_{r1}$ ) çekme gerilmeleri aşırı ise kaplama ile temel tabakaları arakesitinde çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar yol üst yüzeyine doğru yayılır, ( $\sigma_{z2}$ ) gerilmelerinin çok yüksek olması durumunda ise temel tabakasındaki farklı oturmalar sonucu kaplama tabakasında büyük çekme gerilmeleri oluşur. Esnek üstyapı tabakalarında oluşan bu gerilmelerin hesabında, ideal koşullara dayanan çok tabakalı lineer elastik teoriden yararlanılır (10). Bir karayolu üstyapı tabakası hiçbir zaman teorinin kabul ettiği elastik, homojen, izotrop gibi özelliklere sahip değilse de, teorik yöntemle dingil yüklerinin ve dingil düzenlerinin üstyapı kalınlığına ne şekilde etkideğini anlamak mümkündür. Üstyapının tabakalarında oluşan radyal, düşey ve kayma gerilmeler ve deformasyonlar, her bir tabakanın kalınlığı elastisite modülü ve poisson oranına bağlı olarak, lineer elastik teoriye dayanan tabakalı sistem yöntemlerinin herhangi biriyle hesaplanabilir\*. Bitümlü kaplama tabakasının rijitlik modülünün visko elastik davranışından dolayı sıcaklık-

\* Ahlvin, Palmer-Barber, Odemark, Peattie, Burmister vb. tarafından geliştirilen yöntemlerle gerilme yayılımı kolayca hesaplanabilir.

ğa ve yükleme hızına bağlı olarak değişimi, bu hesap yöntemlerinde gö-  
rönünde tutulması gereken önemli bir husustur.

Asfalt karışımların rijitlik modülü değerleri, yüksek sıcaklıklar-  
larda ve uzun yükleme sürelerinde küçük, bunun aksi hallerde büyük de-  
gerlere ulaşmaktadır. Aynı özelliğin Van der Poel tarafından geliştiril-  
len ifadesi ise şu şekildedir (11).

$$S(t, T) = \frac{G}{\epsilon}$$

$$S = \text{rijitlik, kg/cm}^2 \text{ veya lb/inç}^2$$

$$G = \text{Eksenel gerilme, kg/cm}^2 \text{ veya lb/inç}^2$$

$$\epsilon = \text{Eksenel birim deformasyon, cm/cm veya inç/inç}$$

$$t = \text{Yükleme süresi (hızı), saniye, dakika, saat vb.}$$

$$T = \text{Sıcaklık, } ^\circ\text{C veya } ^\circ\text{F}$$

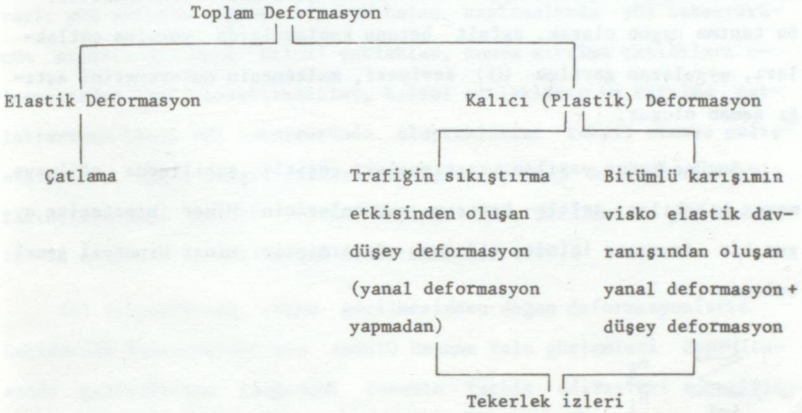
Asfalt karışımlar kısa süreli yüklemelerde ve düşük sıcaklıklarda  
elastik davranış göstermektedirler. Karayolu üstyapısında kaplama  
ve bazen temel tabakasında kullanılan asfalt karışımlarının ri-  
jitlik modülleri, yükleme süreleri ve sıcaklığa bağlı olarak  
70 kg/cm<sup>2</sup> ile 280 000 kg/cm<sup>2</sup> arasında değişebilmektedir.

Karayolu üstyapısında seyreden taşıtların hızlanma ve frenleme  
safhalarında, bandaj ile kaplama arasındaki sürtünme nedeniyle oluş-  
an yatay gerilmeler ise, düşey gerilmelerin aksine, sıcak havalarda  
kaplama tarafından büyük ölçüde sönmümlenirken, soğuk havalarda  
rijit davranan kaplama tarafından alt tabakalara iletilirler. Düşey  
ve yatay gerilme değerleri arasındaki fark ise kayma gerilmelerini  
etkilemektedir.

#### 1.4.2. Yük Tekrarlarının Etkileri

Üstyapıya etki eden yüklerin tekrarlanması sonucu oluşan defo-

masyonlar, sınırsız olarak artmaktadır. Yük tekrarlarının asfalt kaplama tabakaları üzerindeki etkileri 1950 yılından itibaren çeşitli ülkelerde incelenmeye başlanmıştır. 1960 'dan sonra başlayan yoğun çalışmalar da ise konuya malzemenin yorulma mukavemeti ve hizmet ömrü açısından yaklaşılmaya başlanmış, laboratuvar da hazırlanan asfalt karışım numuneler yol koşullarına benzer şekilde gerilme ve deformasyonlara maruz bırakılarak incelenmiştir (21). Üstyapıda oluşan deformasyonlar Şekil 1.3'de bir şema ile verilmiştir (9).



Şekil 1.3. Üstyapıda Oluşan Deformasyonlar.

Günümüzde esnek üstyapıların kalınlık hesaplarında kullanılan iki genel yaklaşım şu şekilde özetlenebilir (13).

- Hizmet ömrü boyunca oluşacak kalıcı deformasyonları asgari seviyede tutmak,
- Tekrarlı dingil yüklerine bağlı olarak oluşan elastik deformasyonların etkisi ile asfalt betonu kaplama içinde oluşabilecek etkileri önlemek.

Kalıcı deformasyonlar üstyapı tabakalarında yeterli sıkıştırma yapmak suretiyle, asgari seviyede tutulabilmektedir. Ancak yapılan araştırmalar, asfalt betonu karışımların tekrarlı trafik yüklerine maruz kalarak yorulmasının, kaplamanın ömrü ve bozulması açısından daha etkili olduğunu göstermiştir. Malzemedeki yorulma, tekrarlı ve değişen yükler altında malzeme içinde yer yer yapı değişikliklerinin ve çatlakların oluşması, bu etkilerin giderek malzeme mukavemetini de aşarak kırılmaya neden olması şeklinde tanımlanabilir. Bu tanıma uygun olarak, asfalt betonu kaplamalarda yorulma çatlakları, uygulanan gerilme ( $\sigma$ ) seviyesi, malzemenin mukavemetini aştığı zaman oluşur.

Bugüne kadar yapılan araştırmalar, çeşitli şekillerde eğilmeye maruz bırakılan asfalt karışım numunelerinin Miner hipotezine uygun bir davranış içinde olduğunu göstermiştir. Miner Hipotezi genel anlamda ;

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{n_i}{N_i} = 1$$

olup, burada

$n_i$  : Belli gerilme seviyesinde ve deformasyon altında tatbik edilen yük tekerrür sayısı,

$N_i$  : Kırılmanın meydana geldiği yük tekerrür sayısıdır.

Bugüne kadar yapılan araştırmalarda hizmet süresi, gerilme ve şekil değiştirme özelliği arasında şöyle genel ilişkiler verilmiştir :

$$N = K_1 \left( \frac{1}{\sigma} \right)^{n_1}$$

$$N = K_2 \left( \frac{1}{\sigma} \right)^{n_2}$$

$N$  : Hizmet süresi, (tatbik edilen yükün tekerrür sayısı cinsinden)

$K_1, K_2$  : karışım özelliğine bağlı sabit sayı,

$n_1, n_2$  : karışım özelliğine bağlı sabit sayı

$\xi$  : Numuneye tatbik edilen deformasyon

$\sigma$  : Numuneye tatbik edilen gerilme

Asfalt betonu döşemelerde hizmet süresi sonu, kaplamanın kalınlığı boyunca bir çatlamanın görüldüğü an olarak tanımlanmaktadır. Tekrarlı yük altında eğilmeye maruz kalan kaplamalarda yük tekerrürünün artması ile önce kılcal çatlaklar, sonra kırılma çatlakları oluşmaktadır (13). Araştırmacılar, kılcal çatlakların ve kırılma çatlaklarının hangi yük tekerrüründe oluştuklarını tespit etmeye çalışmışlardır. Aşırı dingil yükleri ve aşırı bandaj basınçları farklı kalınlıklardaki asfalt betonu kaplamalarda bozulmalara yol açmakta ve ekonomik hizmet ömrünü kısaltmaktadır (14).

Yol üstyapısında çekme gerilmesinden doğan deformasyonların California Üniversitesi'nce AASHTO Deneme Yolu gözlemleri doğrultusunda geliştirilen aşağıdaki formüle tatbik edilmeleri suretiyle, her üstyapı için geçerli ekonomik hizmet ömrü hesap edilmiştir.

İnce asfalt kaplamalı ( $h \leq 10$  cm) üstyapılar için :

$$\log N_f = 15,988 - 3,291 \log \left( \frac{\xi_t}{10^{-6}} \right) - 0,854 \log \left( \frac{S_{kar}}{10^3} \right)$$

Kalın asfalt kaplamalı ( $h \geq 10$  cm) üstyapılar için :

$$\log N_f = 16,086 - 3,291 \log \left( \frac{\xi_t}{10^{-6}} \right) - 0,854 \log \left( \frac{S_{kar}}{10^3} \right)$$

$N_f$  = Ekonomik hizmet ömrü

$\xi_t$  = Çekme deformasyonları, mikron

$S$  = Asfalt betonun rijitlik modülü,  $p_{si}$

Üstyapının tabanından oluşan basınç gerilmelerinden doğan basınç deformasyonları ile ekonomik hizmet ömrü arasındaki ilişki ise, Sheel Yönteminde aşağıdaki şekilde saptanmıştır. (14).

$$\xi_v = 2,8 \times 10^{-2} (N)^{-0,25}$$

$\xi_v$  = Basınç deformasyonları

N = Ekonomik hizmet ömrü (80 kN dingil yükü tekerrürü olarak)

#### 1.5. KARAYOLU ÜSTYAPISINDA KULLANILAN MALZEMELER VE UYGULANAN DENEYLER

Ensek üstyapılarda kullanılan malzemeleri, agregalar ve bağlayıcılar olmak üzere iki grupta incelemek mümkündür.

##### 1.5.1. Yol Yapımında Kullanılan Agregalar

Agrega yol yapımında kullanılan ana malzemedir. Üstyapının gerek ağırlıkça, gerek hacimce önemli bir kısmını oluşturan agregaya, yola etkiyen yüklerin meydana getirdiği gerilmelerin taşınmasında önemli rol oynamaktadır. Bu bakımdan agregaların özellikleri, yol mühendisleri için çok önemli olup, değişik agregaya tiplerinin karakteristiklerinin bilinmesi, yolların projelendirilmesinde gereklidir.

The British Standart Glossary of Highway agregayı "Asfalt, asfalt-makadam ve beton gibi karışımların ana yapısını teşkil eden ve aktif olmayan mineral parçaları" olarak tanımlamakta ve kaba, ince agregalar arasında ayrımı yapmamaktadır (15).

Yol agregaları orijinlerine göre doğal ve yapay agregalar olmak üzere iki grupta incelenecektir.

##### 1.5.1.1. Doğal Agregalar

Doğal olarak oluşmuş kayalardan fiziksel yolla doğrudan doğruya

elde edilirler. Doğal agreganın ham maddesi olan kayaların birçok değişik tipleri vardır, fakat hepsi de değişik yapılarda bir araya gelmiş olan mineral dane ve kristallerden oluşmuşlardır. Bilindiği gibi mineraller, doğal yollarla oluşan, kimyasal formülle gösterilebilen inorganik maddelerdir. Mineraller başlıca, oksijen, silisyum, alüminyum, demir, magnezyum, kalsiyum, sodyum, potasyum ve daha az olarak diğer elementlerden oluşmaktadır. Bir kayanın tanınabilmesi için içindeki minerallerin ve bu minerallerin diziliş şeklinin (doku) bilinmesi gerekir. Doku tipleri, minerallerin dane büyüklüğüne veya çaplarına göre değişmektedir. Kayanın özellikleri, mineraller, mineraller arasındaki bağın cinsi, doku gibi kayanın orjinine dayanan faktörlere bağlıdır.

Doğal kayalar orijinlerine göre magmatik, tortul (sedimenter) ve metamorfik olmak üzere üçe ayrılırlar. Bu gruplardan herhangi birine ait kaya, kitle veya parçalanmış (çakıl) halde bulunabilir.

### Magmatik Kayalar

Bu grup kayalar, yeryüzünün derinliklerinden yüzeye fıskırmış olan magmanın soğuyup kristalleşmesi sonucu meydana gelir. Magma, yer kabuğunun derinliklerinde bulunan çok sıcak, viskoz ve kompleks bileşimli doğal eriyiklerdir. Bünyelerinde, silikatlar, oksitler, sülfürler, uçucu elemanlar vb. vardır. Magmanın çeşitli derinliklerde soğuma hızının farklı olması sonucunda, kristalleşmeye başlayan minerallerle, henüz sıvı halde olan magma arasında ve yeni teşekkül etmiş bir mineralle, önceden oluşmuş mineraller arasında reaksiyonlar meydana gelir (16). Bütün bu karışık olayların sonucunda pek çok magmatik taş cinsi ortaya çıkar.

Bu grup kayalar, dünyanın kabuğunu oluşturan bütün kaya kitlesinin kaynağı olarak kabul edilebilir. Magmatik kayaların bileşimi, dane çapı ve dokusu, erimiş kayanın soğuması esnasındaki mevcut şartlara göre büyük ölçüde değişir. Magmatik kayalar, yalnız bileşim ve dane büyüklüğü bakımından değil, doku açısından da değişiklikler gösterirler. Kaya-ya oluşturan kristaller, mozaik şeklinde veya içiçe girmiş olarak, veya bir mineralin büyük kristallerinin diğer bir mineralin küçük kristal topluluklarının içinde bulunduğu hallerde görülebilir.

Yol agregalarının kaba dokulu olması istenmez, çünkü bu cins dokuya sahip kayalar gevrek olduklarından, silindirik altında kolayca kırılmaktadırlar. Çok ince dokulu kaya da aynı şekilde arzu edilmez, zira bunlar agrega yapımı için kırıldığında, kaba ve keskin köşeli parçalar oluşur. Orta büyüklükte dokuya sahip birçok magmatik kaya, kristallerin içiçe karışması nedeniyle en iyi yol agregası olabilir özelliklerine sahiptirler. Bütün magmatik kayalar atmosfer etkisiyle ve yapısındaki minerallerin, kimyasal değişimi ile ayrışmaya başlarlar. Tamamen ayrışmış kayada bozulma olasılığı yoktur. Halbuki yarı ayrışmış kaya agrega olarak kullanıldığında zamanla özelliklerini kaybedebilir. Çok ayrışmış bir kayayı, üzerindeki yama şeklinde lekelerden ve yumuşak halinden tanımak mümkündür, bazen de görünüşte sağlam olan bir kayanın, petrolojik analize tabi tutulduğu zaman kısmen ayrışmış olduğu görülür.

#### Tortul Kayalar :

Değişik kayaların parçalanması, aşınması ve dağılan parçaların katı ya da eriyik halde rüzgar, su gibi etkilerle sürüklenmesi deniz veya göl dibi gibi sedimentasyon havzalarında tortulaşması ve daha sonra bunların katılaşması ile meydana gelen taşlara denir. Tortul kayaların başlıca özelliği tabakalı olmaları ve içlerinde fosil ve canlıların izlerinin bulunabilmesidir (16). Oluşum tarzlarına göre üçe ayrılırlar ;

a) Klasik tortul kayalar : Yer kabuğunda mevcut taşların çeşitli nedenlerle ufalanıp parçalanması ve sonra bu parçaların su ve rüzgar gibi etkenlerle çukur yerlerdeki sular içinde birikmesi ve parçaların çimentolaşması (diyajenetik) ile oluşur. (Örneğin, kumtaşı, konglomera kalker, marn). Ayrıca parçalar birbirleri ile birleşmemiş halde bulunarak doğrudan doğruya agrega ocakları teşkil edebilir. (Kum, çakıl ocakları gibi).

b) Kimyasal tortul kayalar: Çözülebilen minerallerin, çözeltideki suyunun uçması, çöktürücü bir maddenin karışması ile çözeltiden ayrılıp çökmeleri sonucunda oluşurlar. Bu grupta bulunan kayalar daha ziyade kayanın kimyasal bileşimine dayanarak karbonatlı (kalkerli), silisli, demirli, fosfatlı ve tuzlu olmak üzere gruplara ayrılırlar.

c) Organik tortul kayalar: Bunların oluşumunda esas rolü canlılar oynar. Organik tortul kayalar karbonatlı (organik kalkerler), silisli (diatomit, radiolarit) veya karbonik (kömürler) olabilir.

#### Metamorfik Kayalar

Magmatik veya tortul kayaların yüksek ısı, yüksek basınç, su buharı ve türüs bileşimindeki gazların etkisi veya mekanik olarak şekil değiştirme ile değişik bir yapı-doku ve mineralojik bileşim kazanması sonucunda oluşur. Metamorfizma sonucunda ya taşın mineralleri kristal şeklini değiştirir, ya da eski minerallerin yerine yeni mineraller oluşur. Bütün bu hallerde taşın kimyasal bileşimi aynı kalabilir veya madde ilavesi, madde eksilmesi olabilir. Örnek olarak mermer verilebilir. Ünemli bir basınç etkisi olmaksızın, yalnızca ısı ile dönüştürülen kayalara "Termik metamorfik kayalar" denir. Termik metamorfizma, hemen daima kayanın ilk halinden daha katabil ve daha sağlam hale gelmesine neden olur. Basit yapıya sahip kayalar üze yeniden kristalleşirler.

Kum taşları kuvarsite, kalkerler ise mermere dönüşür. Daha kompleks yapıya sahip magmatik veya karışık bünyeli tortul kayalar, metamorfizma sonucu öyle önemli mineralojik değişimlere uğrarlar ki orjinal kayanın karakteristikleri kaybolur ve meydana gelen yeni kayaya Hornfels denir. Bu cins kayalar, minerallerin içiçe geçmiş bulunmalarından yol inşaatı için elverişlidirler. Yol inşaatında kullanılma bakımından kayalar, hemen her zaman termik metamorfizma sonucu daha iyi özelliklere sahip olmaktadırlar. Bazı hornfels cinsleri bu bakımdan, en iyi yol yapım agregaları arasında yer almaktadır (15). Yalnızca basınç etkisiyle başkalaşmış olan kayalar (dinamik metamorfizma) oldukça azdır. Zira büyük bir çoğunlukla basınç ısı ile beraber etkir ve böylece tabakalı yapıya sahip bölgesel (Rejyonel) metamorfik kayalar meydana gelir. Gnays ve granülit'te bu tabakalar düzensiz, büyük aralıklı, Arduvez ve Şistte ise tabakalaşma daha yakındır. Ancak gerek silindir altında ezilmeye müsait olduklarından, gerek kolayca parçalanabildiklerinden agrega olarak kullanılmaları uygun değildir.

Yol yapımında kullanılan doğal agreganın ham maddesi olan doğal kaya ile ilgili olarak yukarıda verilen bilgilerde de görülebileceği gibi petrografik yapılara bağlı olarak farklı bir çok kaya ismi geçmektedir. Yol mühendisi için bu adların bilinmesi zorunluğu yoktur. Zira birçoğu agrega olarak bir diğerinden ayrı özellik göstermemektedir. Petrologlarca bulunan ve değişik isimler verilen yüzlerce kaya türü; Yol yapımında, benzer özelliklerine göre (bileşim, dane büyüklükleri, doku) 10 gruba ayrılmaktadır. (B.S.812). Bu sınıflandırmadaki 10 gruptan her birine ait başlıca özellikler Tablo 1.3'de verilmiştir. (15).

Doğal agregalar karayolu üstyapısında yukarıda açıklanan kaya türlerinin ya doğal etkilerle parçalanması ve sürüklenmesi sonucu oluşacak ve kum ya da dere, teras ve taş ocaklarından çıkartılarak konkassörlerde istenilen boyutlara (kullanılacağı üstyapı tabakasında ilgili şartnamelerin aradığı boyutlarda) küçültülebilen kırmataş şeklinde

Tablo 1.3. Yol Agregaları Grupları

BAZALT GRUBU		KUMTAŞI GRUBU	
Andezit	Mag. Nöt.F.	Aglomera	To.
Bazalt	Mag.Baz.F.	Arkoz	To.Si.
Bazik Porfir	Mag.Nöt.M.	Breş	To.
Diyabaz	Mag.Baz.M.	Konglomera	To.
Dolerit	Mag.Baz.M.	Grovak	To.Si.
Epidiyorit	To.B.	İnce Çakıl	To.Si.
Hornblend-gist	To.B.	Kumtaşı	To.Si.
Lamprofir	Mag.Baz	Tüf	To.
Kuvarzt-dolerit	Mag.Baz.M.	HORNFELS GRUBU	
Silipit	Mag.Baz.F.	Mermer hariç bütün basınç sonucunda değişmiş kayalar Met.Ter.	
Teşenit	Mag.Baz	KİREÇTAŞI GRUBU	
Teralit	Mag.Baz	Dolomit	To.Kal.
ÇAKMAKTAŞI GRUBU		Kireçtaşı	To.Kal.
Silistaşı (çert)	To.Si	Mermer	Met.Ter.
Çakmaktaşı	To.Si	PORFİR GRUBU	
GABRO GRUBU		Aplit	-
Diyorit	Mag.Or.C.	Dasit	Mag.As.F.
Gnayn	Met.B.	Felsit	Mag.As.M.
Gabro	Mag.Baz.C.	Granofir	Mag.As.M.
Hornblend	Mag.Ü.	Keratofir	Mag.Or.F.
Norit	Mag.Baz.C.	Mikrogranit	Mag.As.M.
Peridotit	Mag.Ü.	Porfir	Mag.Or.M.
Pikrit	Mag.Ü.	Kuvarzt-porfir	Mag.Or.M.
Serpantin	-	Riyolit	Mag.As.F.
GRANİT GRUBU		Trakit	Mag.Or.F.
Gnays	Met.B.	KUVARSİT GRUBU	
Granit	Mag.As.C.	Gamister	-
Granodiyorit	Mag.As.C.	Kuvarsitik kumtaşı	To.Si.
Granülit	Met.B.	Yeni den kristalleşmiş kuvarsit	Met.Ter.
Pegmatit	-	ŞİST GRUBU	
Kuvarzt-diyorit	Mag.Or.C.	Fillit	Met.B.
Siyenit	Mag.Or.C.	Şist	Met.B.
		Kayrak ardıvaz	Met.BU

Mag. = Magnetik

As. = Asit

C. = İri (daneli) dokulu

To. = Tortul

Or. = Orta

M. = Orta (daneli) dokulu

Met. = Metamorfik

Baz. = Bazik

F. = İnce (daneli) dokulu

U. = Ultrabazik

Ca. = Kalkerli

Ter. = Termik

Si. = Silisli

B. = Bülgesel

kullanılır.

**Çakıl :** Tabii kayaların parçalanmasından sonra akarsular tarafından taşınarak depo edilen kaba malzemedir. (1/4- 2inç). Taşınma esnasındaki sürtümlerden dolayı daneler aşınarak az çok yuvarlak hale gelirler ve yüzeyleri de pürüzlerini kaybeder, Çakıl, çakmaktaşı veya kuvarsit gibi, yalnızca bir tür sert kayadan veya birçok cins ve sertlikte kayalardan oluşur. Tamamen yumuşak kayadan oluşmuş çakıl kullanımı sık olmamakla beraber yumuşakça bazı kireçtaşı türleri, yakınlarda daha uygun çakıl ocaklarının bulunmadığı inşaat bölgelerinde yol yapım malzemesi olarak geniş ölçüde kullanılmıştır. Çakılın önemli özelliği, kayatürü gözönüne alınmadan, düzgün yüzeyli ve yuvarlakça irili ufaklı parçalardan meydana gelmiş olmasıdır.

**Kum :** Kayanın parçalanıp ayrışmasından sonra aşınma-birikme işlemine birçok defalar tabi olmuş kalıntılardır. Kumlarda en çok rastlanılan mineral, aşınma olayına en dayanıklı olmasının dolayısı, kuvarzdır. Çakılla beraber bulunduğu hallerde, iri kum daneleri ekseriya çakılların parçalanıp ufalanmış şekilleridir. Kumun dane boyutu 2 mm'den itibaren toz inceliğine kadar gitmektedir. Kum tabakalarının birçoğu, çok ince daneli silt ve kil de içerirler. Böyle bir malzemenin yol inşaatında kullanılabilmesi için önce yıkanması gerekir.

#### 1.5.1.2.Yapay Agregalar

Endüstriyel işlemler sonucu elde edilen bu gruba cüruf, klinker ve çimento girmektedir.

a) Cüruf: Demir-çelik endüstrisinde atık madde olarak yüksek fırınlardan elde edilen cüruf, bu çalışmada ana malzeme olduğundan, diğer sonraki bölümlerde geniş olarak ele alınacaktır.

b) Klinker: Fırınlardan bir artığı olup, küllerin eriyerek topaklaşarak haline gelmesinden oluşur. Klinker çok değişebilen bir malzemedir. Bu

nedenle de yalnız bu iş için ve şartnamelere uygun olarak hazırlanmış klinkerler asfalt yapımında kullanılabilirler.

c) Çimento: flave edildiği bitümlü karışımlarda sadece filler olarak iş görür. Çimentoların filler olarak kullanılmalarının nedeni, çimentonun bağlayıcı özelliğinden yararlanmak değildir. Çimento standart granülometrik bileşimi, saf olması ve bitümlü bağlayıcılarla herhangi bir reaksiyona girmemesi gibi özellikler nedeniyle filler olarak kullanılmaya elverişlidir.

#### 1.5.1.3. Bitümlü Kaplamalar Yönünden Agregalar

Bitümlü kaplamalarda kullanılacak agreganın, kökeni (magmatik, tortul, metamorfik) ne olursa olsun, her kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri sağlaması gerekir. Ancak aranan bütün koşulları sağlayan bir agregalar karayolu üstü yapısında kullanılabilir. Agregalar boyutlarına göre üç grupta incelenir (16).

- a) Kaba agregalar  $4^{\#}$  (4,76 mm) elek üzerinde kalan
- b) İnce agregalar  $4^{\#}$  (4,76 mm) -  $200^{\#}$  (0,074 mm) arası
- c) Mineral filler  $200^{\#}$  (0,074 mm) den geçen

Bu üç grup malzemenin her biri bitümlü karışımın ayrı ayrı özelliklerini kontrol eder. Bitümlü karışımındaki iri agregalar yüzdesi % 40-50 'ye çıkarılırsa, iri agregalar karışımının mekanik direncini artıran bir iskelet oluşturur, böylece karışımın direncinde önemli bir artış hissedilir (5). İnce agregalar ise iri agregaların oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar. Bu arada ince agregaların yüzey dokusu da önemlidir. Örneğin; pürüzsüz bir çakıl kumu daha düşük bir deformasyon direnci sağlar, mineral filler toplam agreganın çok küçük yüzdesini oluşturmasına karşın, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde rol oynar. Mineral filler, 0,074mm'lik elekten geçen agregalar malzemesidir. Ancak 0,074mm den daha ince olan bitü-

tün malzemeler filler ödevini görmezler. Mineral filler düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalı ve aynı zamanda 0,001 mm den ince daneleri de içermelidir. Danelerin şekli de önemlidir, yassı düz ve uzun danelerin yüzdesinin artması fillerin özelliğini düşürür. Filler bitümlü malzeme ile reaksiyona girmemelidir. Mineral filler taş tozu, mermer tozu, portland çimentosu sönmüş kireç veya benzeri maddelerde oluşacak kil, toprak, organik ve zararlı madde kapsamıyacaktır. Mineral fillerin plastisite indeksi 4'den büyük olmamalıdır (17).

#### 1.5.1.4. Agregalara Uygulanan Deneyler

Yol inşaatında kullanılacak agregaların özelliklerinin belirlenmesinde hazırlanacak ince kaya kesitlerinin mikroskopik etüdü neticesinde, ana minerallerin tanınması, dokusunun ve minerallerinin ne dereceye kadar ayrışmaya uğramış olduğunun bilinmesi gibi petrografik özelliklerin tesbitine gerek yoktur. Ayrıca edinilen tecrübeler, agrega özelliklerinin elde edildikleri kaya kitlesinin özelliklerinden farklı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle deneyler doğrudan doğruya yolda kullanılan halleri ile agregalara tatbik edilecek şekle sokulmuştur. Agregaların karayolu üstyapısında kullanılabilmesi için, bunların aşınmaya ve donmaya karşı dirençlerinin, özgül ağırlık, su absorpsiyonu, soyulma değerlerinin, elek analizleri ve däne şekillerinin, sürtünme etkileri ile meydana gelecek cilalanmaya karşı olan dirençlerinin bilinmesi yeterlidir. Ancak bu özelliklerin tamamının üstyapı tabakalarının tümünde bilinmesine de gerek yoktur. Örneğin; temel tabakasında kullanılacak bir agregaya cilalanma deneyi uygulanmaz. Birçok ülkede kullanılan fiziksel deneyler, yol agregalarının özellikleri hakkında sayısal bilgiler vermektedir. Yukarıda adı geçen bütün deneylerin, agregaların değerlendirilmesinde güvenilir olabilmesi için, denenecek numunelerin çok özenle alınmış temsili numuneler olması gerekir. Aksi halde o numune için yanlış değerler bulunacaktır.

Agregalara uygulanan deneyler, ilgili şartname numaraları da gösterilmek suretiyle aşağıda özetlenmiştir (16), (17), (18).

#### 1.5.1.4.1. Elek Analizi (AASHTO T-11, T-27; ASTM C-136)

Bu deney yöntemi, standartlarda nitelikleri verilmiş olan elekleri kullanarak, agreganın dane büyüklüğü dağılımının saptanmasını amaçlar.

Eleme işlemi elle veya eleme makinası ile yapılır. Deneye başlamadan önce, eleme yöntemi (kuru, yaş veya her ikisinin karışımı) kullanılan eleklerin numaraları ve göz açıklığı belirlenmelidir. Elek serisi içindeki elek sayısı, malzeme hakkında gerekli bilgiyi vermeye yetecek kadar olmalıdır. Örneğin bir bitümlü kaplamada kullanılacak agreganın elek analizi için; genellikle 25 mm (1"), 19 mm (3/4"), 12,7 mm (1/2"), 9.5 mm (3/8"), 4,76 mm (No.4), 2,00 mm (No.10), 0,425 mm (No.40), 0,177 mm (No.80), 0,074 mm (No.200) göz açıklığı olan elekler kullanılır. Eleklerde eleme yüzeyi kare gözlü tel elek kafeslerdir.

Elek analizine tabi tutulacak numune miktarı, kullanılacak en büyük dane boyutuna göre seçilir. Numuneler elekler üzerinde en az 2 dakika sarsıldıktan sonra her bir elek üzerinde kalan ve en ince eleği geçen agrega ağırlıkları yüklemenin % 0,1 i duyarlılıkla tesbit edilir. Bu ağırlıkların toplamı ile yükleme miktarı arasında %2 den fazla fark çıkarsa deney tekrarlanır. Elek analizinde eleğin fazla yüklenmesi önemli hatalara neden olduğundan, elekler üzerindeki numune ağırlıkları ve dane boyutları sınırlandırılmıştır. Deney, kullanılan elek serisi içindeki her bir elekten geçen miktarın, toplam numune ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanıp, grafik olarak gösterilmesi ile tamamlanır.

#### 1.5.1.4.2. Aşınma (Los Angeles) Deneyi (A.S.T.M. C 131-55; AASHTO T-96)

Bu deney, agregaların aşınmaya karşı dayanıklılığını gösterir. Bu

işlem Los Angeles makinası ile gerçekleştirilir. Alet iki ucu kapalı iç çapı 71 cm ve iç uzunluğu 51 cm olan içi boş çelik bir silindirden ibarettir. Aşındırma yükleri 4,68 cm çapında dökme demir veya çelik kürelerdir. Her birinin ağırlığı 390-444 gramdır. Tablo 1.4'de numune sınıfları ve aşındırma yükleri belirtilmiştir.

Tablo 1.4. Aşınma Deneyi Numune Sınıfları ve Aşındırma Yükleri

Elek büyüklüğü (Kare açıklıklı elekler)		Granülometri sınıfları ve aşınma deneyi için gerekli numune miktarları (gram)						
Geçtiği elek (mm)	Üzerinde kaldığı elek (mm)	A	B	C	D	E	F	G
75	63					2500		
63	50					2500		
50	37,5					5000	5000	
37,5	25	1250					5000	500
25	19	1250						500
19	12,5	1250	2500					
12,5	9,5	1250	2500					
9,5	6,3			2500				
6,3	4,75			2500				
4,75	2,36				5000			
Toplam tolerans		5000 - 10	5000 + 10	5000 + 10	5000 + 10	10.000 + 100	10.000 + 75	10.000 + 25
Kullanılan küre sayısı		12	11	8	6	12	12	11
Yükleme ağırlığı (gram)		5000 - 25	4584 + 25	3330 + 20	2500 + 15	5.000 + 25	5.000 + 25	5.000 + 25

Tabloda belirtilen şekilde hazırlanan deney numunesi ve aşındırıcı yükler Los Angeles aşındırma makinasına konur ve ağzı sıkıca kapatılır. Makina dakikada 30-33 devir süratle döndürülerek A,B,C,D sınıfları için 500, E,F,G sınıfları için 1000 devir yaptırılır. Sonra numune

makinadan çıkartılır ve 12 nolu elekten elenir, elek üstünde kalan kısım yıkanır ve 110°C lik etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulur ve tartılır. Numunenin ilk ağırlığı cinsinden bulunan yüzde, malzemenin aşınma kaybı yüzdesini verir.

$$\text{Aşınma kaybı (\%)}: \frac{A-B}{A} \times 100$$

A : İlk ağırlık (kuru)

B : Son ağırlık (kuru)

#### 1.5.1.4.3. Agregaların Hava Etkilerine Karşı Dayanıklılık (Donma) Deneyi (ASTM-C88; AASHTO T-104)

Agregaların hava etkileri ile donarak ufalanmaya karşı olan dirençleri hakkında, laboratuvarında kısa süre içinde karar verebilmek amacıyla uygulanan hızlandırılmış bir deneydir. Bu deneyde önce doygun sodyum sülfat veya magnezyum sülfat çözeltisi kullanılır. Çözeltinin hazırlanması için, saf ve susuz sodyum sülfat tuzu ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) 25-30°C sıcaklıktaki su içinde iyice karıştırılarak yavaş yavaş çözülür. Her litre su için en az 250 gram sodyum sülfat tuzu veya en az 750 gram kristalize sodyum sülfat tuzu katılır. Çözelti ayrıca, saf ve susuz magnezyum sülfat tuzu ( $\text{MgSO}_4$ ) veya kristalize magnezyum sülfat tuzu ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ile de hazırlanabilir. Bu durumda her litre su için 350 gram susuz Magnezyum sülfat tuzu, veya 1400 gram kristalize magnezyum sülfat tuzu eklenir. Deneyde kullanılacak dane boyutları ve ağırlıkları Tablo 1.5'de verilmiştir.

Tablo 1.5. Donma deneyi dane boyutları ve ağırlıkları

	Dane Boyutu (mm)	Ağırlık (gram)
İnce Arega	9,5-4,75	100 ± 0,1
	4,75-2,36	100 ± 0,1
	2,36-1,18	100 ± 0,1
	1,18-600 μm	100 ± 0,1
	600-300 μm	100 ± 0,1

Tablo 1.5 (Devamı)

Kaba Agregası	9,5-4,75	300	-	5
	12,5-9,5	330	-	5
	19 -12,5	630	-	10
	25 -19	500	-	30
	37,5-25	1000	-	50
	50-37,5	2000	-	200
	63-50	3000	-	300

Şartnamede belirtilen sınırlar içinde kalacak şekilde elenmiş ve 100°C lik etüvde kurutulmuş olan agregadan Tablo 1.5 de belirtilen miktarlarda toz ve sepetler ve elekler üstüne konularak, üzeri en az 2 cm kaplanacak şekilde sodyum sülfat veya magnezyum sülfat çözeltisi içine daldırılır, kabın üzeri kapatılır. Sıcaklığı 21°C olan ortamda 16-18 saat bekletilir. Daldırma süresi sonunda agrega numunesi çözeltiden çıkarılarak 5 dakika süzmeye bırakılır ve 110°C lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulur. Etüvden çıkarılınca oda sıcaklığına kadar soğutulur. Numune ikinci kez çözeltiye daldırılarak anlatılan işlemler tekrarlanır. Normal beton ve bitümlü kaplama agregaları için bu daldırma-kurutma işlemleri 5 kez tekrarlanır. 5. devre sonunda etüvden çıkan numune, soğutulup, çözelti tamamen temizleninceye kadar su ile yıkanır. Daha sonra numuneler 110°C lik etüvde sabit ağırlığına kadar kurutulur, tartılır. Deneyden önceki ağırlık farkının ilk ağırlık farkına bölünmesiyle donma kaybı bulunur. Şartnamede belirtilen dane boyutlarına göre bulunan donma kayıpları o agrega için uygulanacak orijinal granülometriye çevrilir.

#### 1.5.1.4.4. Cilalanma Deneyi (BS-812)

Bu deneyin amacı, çeşitli yol agregalarının trafik altında sürtünme ile aşınarak ne dereceye kadar cilalanacaklarını laboratuvarında kısa bir zamanda saptamaktır. Agreganın cilalanma değeri ile kaymaya karşı direnci arasındaki ilişki, trafik koşulları, kaplamanın tipi gibi fak-

törlere bağılı olarak değişir. Bu deney için; yoldaki şartlara benzer, fakat hızlandırılmış bir cilalanma elde etmek için geliştirilen hızlandırılmış bir cilalanma makinası ile kayma direncini ölçme cihazı kullanılır. Hızlandırılmış cilalanma makinesi, çevresinde 14 adet numunenin (briketin) yerleştirebileceği, dakikada 315-325 devir hızla dönen 40,6 cm çapında bir demir tekerlek ile numunelerin üzerinde dönen 20,3 cm çapında, 5 cm genişliğinde, 3,16 kg/cm<sup>2</sup> basınç ile şişirilmiş ve numunelerin yerleştieği demir tekerleğe 40 kg lık yük uygulayan bir lastik tekerlekten oluşur.

Kayma direncini ölçme cihazı ise, bir ucunda ağırlık olan bir pandül, bunun altında numuneye sürtünen ve belirli özellikleri bulunan lastik bir pabuç ile göstergeden ibarettir. Deney için üç ayrı agrega grubunun herbirinden 4 adet alınmak üzere toplam 12 numune hazırlanır. Ayrıca cilalanma değeri bilinen referans agrega ile kontrol için hazırlanan 2 adet numune de deneye dahil edilir. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak agreganın tamamı 9,5 mm lik elekten geçip 8 mm'lik elek üzerinde kalmalı, içinde yassı ve uzun daneler bulunmamalıdır. Agregalar birer birer, aralarında boşluk kalmayacak şekilde yan yana tek sıra dizilir. Bir numunedeki agrega sayısı 35-50 arasında olmalı ve aralarındaki boşluklar çok ince kum ile doldurulmalıdır.

Bu şekilde hazırlanan 14 adet numune, belirli bir küre tabi tutulduktan sonra üzerlerine istenen hızda zımpara tozu ve su akıtılarak hızlandırılmış cilalanma makinasında 6 saat süreyle cilalanmaya uğrattılır. Her numunenin deney sonucunda eriştiği cilalanma değeri, kayma direncini ölçme cihazının ıslatılmış lastik pabucu ile ıslatılmış numune yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı olarak cihazın göstergesinden okunur. Bu işlem bir numune için 5 kez tekrarlanır ve son üç okumanın ortalaması en yakın tam sayıya yuvarlatılarak kaydedilir. Her bir agrega grubu için hazırlanan dört numunenin değerlerinin sıralaması 5 birimden daha fazla ise veya kontrol numunelerin ortalama

değeri bilinen değerler arasında kalmıyorsa deney tekrarlanmalıdır. Eğer dört numuneden alınan değerler arasındaki fark 5 birim veya daha az ise ve kontrol numunelerinin ortalama değerleri de, uygun ise, dört numunenin ortalaması alınarak cilalanma değeri bulunur.

#### 1.5.1.4.5. Su Etkilerine Karşı Dayanıklılık (Soyulma) Deneyi (Nicholson Metodu)

Bir asfalt kaplamanın ömrü, geniş ölçüde, suyun etkisine rağmen agreganın yapışma kabiliyetine bağlıdır. Soyulma, bağlayıcı maddeyi, suyun ve trafiğin bir arada etkimesi ile agrega üzerinden ayrılması demektir. Deneye, kırılmış agrega numunesinin 9,5-4,75 mm veya 4,75-3,35 mm lik elekler arasında kalan kısmından yaklaşık 200 gr alarak, iyice yıkayıp saf su ile birkaç kere çalkaladıktan sonra  $110^{\circ}\text{C}$  lik etüve konarak başlanır. Yıkanmış kurumuş agregadan  $30 \pm 0,5$  gr alınarak 1 saat  $110^{\circ}\text{C}$  lik etüvede bekletilir. Diğer taraftan  $1,5 \pm 0,1$  gram bitümlü malzeme,  $250 \text{ cm}^3$  beher içinde  $110^{\circ}\text{C}$  lik kum banyosuna yerleştirilerek ısıtılır. Bitümlü malzeme eriyince etüvede ısıtılmış agrega derhal behere dökülür ve bir cam bagetle bütün agrega tanelerinin üzeri homojen bir bitüm filmiyle kaplanıncaya kadar kum banyosu üzerinde iyice karıştırılır. Bundan sonra bitümlü agrega beher içinde kür işlemine tabi tutulmak üzere 24 saat  $60^{\circ}\text{C}$  lik etüvede tutulur. Bu sürenin sonunda beher etüveden çıkarılıp, kum banyosunda hafifce ısıtıldıktan sonra 10 cm çapında petri kabına aktarılır. Kaplanmış agregaların üzeri bagetle çok hafif darbelerle düzeltilir. 10 dakika laboratuvar sıcaklığında bekletilir, sonra petri kabı su ile doldurulur ve üzeri bir cam kapakla kapatılarak tekrar 24 saat bekletilmek üzere  $60^{\circ}\text{C}$  lik etüve konur. Bu sürenin sonunda petri kabı dışarıya alınarak suyu değiştirilir. Yandan gelen bir ışık altında bilhassa karışımın üst yüzü gözle incelenir. Deney sonunda soyulmamış yüzeyin bütün yüzeye oranı, soyulmaya karşı dayanıklılık olarak verilir.

#### 1.5.1.4.6. Yassılık İndeksi Tayini (BS 812)

Yassı agrega danelerinin en küçük boyutunun anma boyutuna oranının 0,6 dan küçük olması şeklinde tanımlanır. İki elek arasında kalan dane için bu iki elek boyutunun aritmetik ortalaması anma boyutu olarak kabul edilir. Bir agrega numunesinin yassılık indeksi yassı danelerinin denenen numunelerin ağırlığına oranı olarak ifade edilir. Deney 21/2 inç (63.5 mm) lik elek üzerinde kalan ve 1/4 inç (6,35 mm) lik eleği geçen malzemeye uygulanmaz. Yassılık indeksinin tayini için alınacak numune miktarı Tablo 1.6 da verilmiştir.

Tablo 1.6. Yassılık indeksi tayini için alınacak minimum numune miktarı

Maksimum dane boyutu	Minimum miktar (kg)
2 1/2 inç (63,5 mm)	25
2 inç (50 mm)	20
1 1/2 inç (37,5 mm)	15
1 inç (25 mm)	10
3/4 inç (19 mm)	5
1/2 inç (12,5 mm)	2,5
3/8 inç (9,5 mm)	2

Tabloda verilen elekler kullanılarak numunenin elek analizi yapılır. Her elek üzerinde kalan malzeme tartılır ve elek boyutları üzerine yazılarak ayrı tepsilere konur. Tepsilerdeki toplam malzeme ağırlığına ( $M_1$ ) göre her elek arasında kalan yüzde bulunur. Herhangi bir grup, toplam malzeme ağırlığının % 5'i kadar veya daha az ise o gruba yassılık indeksi uygulanmaz ve hesaba katılmaz. Arta kalan malzeme miktarı ( $M_2$ ) deney numunesi miktarı olarak kabul edilir. Şekil 1.4 e uygun olarak yapılmış dane kalınlığını ölçme aletinde, her

elek arasında kalan malzeme danelerinin, teker teker alet üzerindeki ve ilgili dane çapına ait deliklerden geçip geçmediği kontrol edilir. Bu işlemler sonunda dane kalınlığını ölçme aletinden geçen bütün malzeme tartılır. ( $M_3$ ).

Yassılık indeksi :  $\frac{M_3}{M_2} \times 100$  şeklinde hesaplanır.

#### 1.5.1.4.7. Özgül Ağırlık ve Su Emme (Absorbsiyonu) Deneyi (ASTMC 127-59, TS 3526)

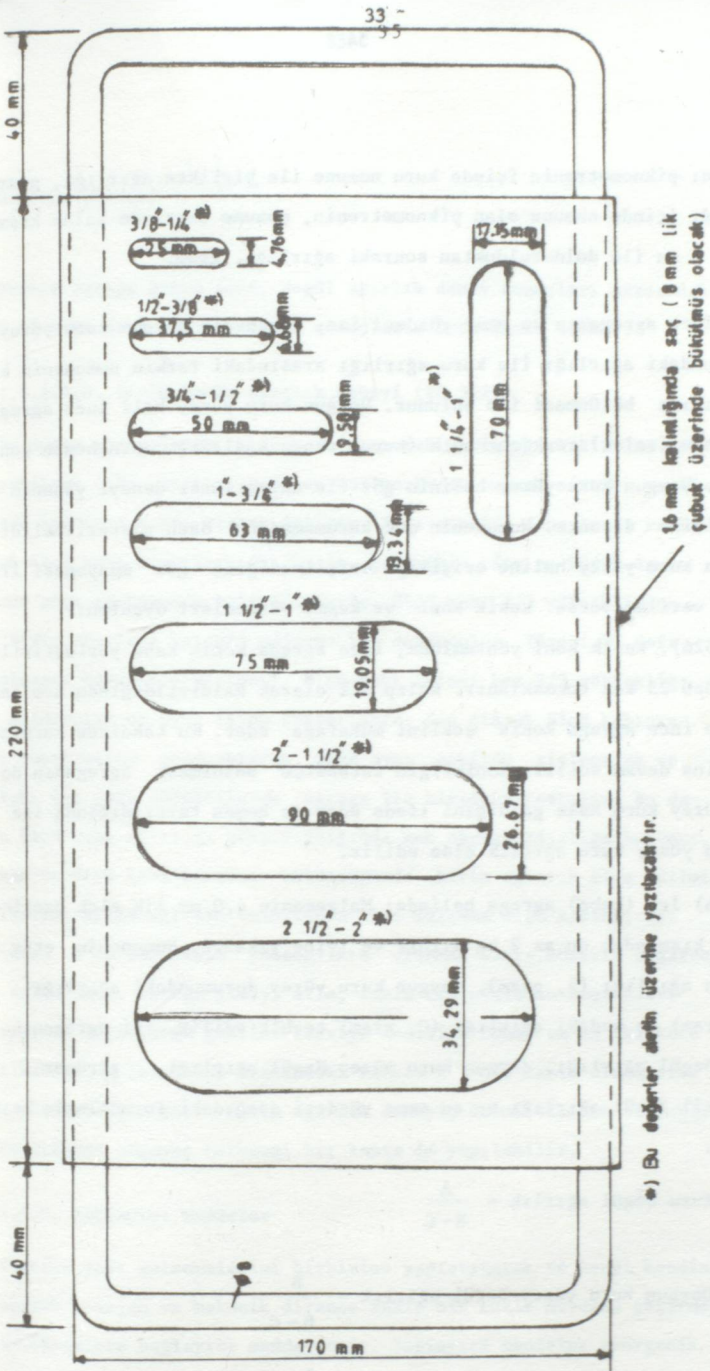
Özgül ağırlık belirli hacimdeki numune ağırlığının aynı hacimdeki + 4 °C deki suyun ağırlığına oranıdır. Bu deneyin amacı bitümlü karışımındaki boşluk yüzdesini hesaplamak, agreganın hacim-ağırlık ilişkilerini saptamaktır. Özgül ağırlık deneyleri ince ve iri agregalar için ayrı ayrı yapılır.

a) İnce agregada halinde: Yıkılmış kurutulmuş ince malzemeden 500 numune alınır, ince agregada özgül ağırlığı piknometresine konur ve piknometre ile birlikte tartılır. Sonra piknometre yarısına kadar damıtık su ile doldurularak 24 saat bekletilir, bu sürenin sonunda piknometre 15-30 dakika vakuma bağlanarak havası emilir, sonra vakumla ilişkisi kesilerek kendi halinde iyice çökmesi beklenir. Üstte tamamen berraklık hasıl olunca, piknometre damıtık su ile taşıncaya kadar doldurulur. Kapak pağı hava kabarcığı kalmayacak şekilde kapatılır, 25 °C lik su banyosunda 1-1,5 saat bekletilir. Piknometre havlu veya süzgeç kağıdı ile iyice kurulularak 0,1 grama duyarlı terazide tartılır. Deney iki numune üzerinde yapılır ve sonuç olarak iki deneyin ortalaması alınır.

Çürünür (zahiri) özgül ağırlık :  $\frac{c-a}{(b-a) - (d-c)}$

a: piknometre boş ağırlığı, gram

b: piknometre su ile dolu ağırlığı, gram



Şekil 1.4. Dane kalınlığını ölçme aleti.

c: piknometrenin içinde kuru numune ile birlikte ağırlığı, gram  
 d: içinde numune olan piknometrenin, numune üzerinde kalan kısmı su ile doldurulduktan sonraki ağırlığı, gram.

İnce agreganın su emme yüzdesi ise, numunenin doygun kuru yüzey durumundaki ağırlığı ile kuru ağırlığı arasındaki farkın numunenin kuru ağırlığına bölünmesi ile bulunur. Doygun kuru yüzey hali ince agreganın koyu (ıslak) renkten açık (kuru) renge başladığı anın hemen sonrasıdır. Doygun kuru yüzey halinin göz ile anlaşılması deneyi yapanın deneyimine dayanır. Numunenin çok kurumamasına özen gösterilmelidir. Doygun kuru yüzey haline erişilip erişilmediğine göz muayenesi ile karar verilemiyorsa kesik koni ve kesme yöntemleri uygulanır (TS 3526). Kesik koni yönteminde, ince agrega konik kaba yerleştirilerek yüzü 25 kez tokmaklanır. Kalıp dik olarak kaldırıldığında nem fazla ise ince agrega konik şeklini muhafaza eder. Bu takdirde kurutma işlemine devam edilir. Konikliğin serbestçe bozulması agreganın doygun yüzey kuru hale geldiğini ifade eder ve hemen tartıldığında ise doygun yüzey kuru ağırlık elde edilir.

b) İri (kaba) agrega halinde: Malzemenin 4,0 mm lik elek üzerinde kalan kısmından en az 2 kg alınır ve iyice yıkanır. Numunenin etüv kuru ağırlığı (A, gram), doygun kuru yüzey durumundaki ağırlığı (B, gram) ve sudaki ağırlığı (C, gram) tesbit edilir. İri agreganın kuru özgül ağırlığı, doygun kuru yüzey özgül ağırlığı, görünür (zahiri) özgül ağırlığı ve su emme yüzdesi aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$\text{Kuru özgül ağırlık} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Doygun kuru yüzey özgül ağırlık} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Görünür (zahiri) özgül ağırlık} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Su emme yüzdesi} = \frac{B - A}{A}$$

Herbir agrega grubu için, özgül ağırlık deney sonuçları arasındaki fark 0,02 veya daha küçük ise, bu sonuçların ortalaması alınır.

#### 1.5.1.4.8. Birim Hacim Ağırlık Deneyi (TS 3529)

Bu deney agregaların sıkışık veya gevşek birim ağırlıklarını belirleyebilmek için yapılır. Deneyde kullanılacak numune miktarı en büyük dane boyutuna bağlı olarak değişir. Aynı şekilde deneylerde kullanılacak ölçü kabı boyutları da (hacim, çap gibi) yine en büyük dane boyutuna göre şartnamede belirtilmiştir. Ölçü kabı 1/3 yüksekliğine kadar birim ağırlığı istenen malzeme ile doldurulur. Yüzeyi 25 defa bert olmamak kaydı ile şişlenir. Ölçü kabı ikinci kez 2/3 yüksekliğe kadar doldurulur ve aynı işlem tekrarlanır. Son olarak ölçü kabının tamamı taşarcasına doldurularak yine aynı şekilde şişlenerek ve ölçü kabı üst yüzü düzeltilerek agrega ile birlikte tartılır. Bu değerden ölçü kabı ağırlığı çıkartıldığında net agrega ağırlığı bulunur, bu rakam da ölçü kabı hacmine bölündüğünde birim ağırlık elde edilmiş olur. Gevşek birim ağırlık tesbitinde ise malzeme ölçü kabına, üst kenarından 5 cm'den fazla yükseklikte olmamak üzere, kürekle taşarcasına doldurulur. Agregaya yüzeyi elle, fazla çıkıntıların boşlukları doldurmasını sağlayacak şekilde tesviye edilir. Deney en az iki kere tekrarlanarak ve iki sonuç arasındaki farkın % 1'den fazla olmamasına dikkat edilmelidir. Birim hacim ağırlık deneyi, hacmi bilinen ve şekli kolayca deforme olmayan herhangi bir kapta da yapılabilir.

#### 1.5.2. Bağlayıcı Maddeler

Çeşitli yapı malzemelerini birbirine yapıştırarak ve kendi kendine katılarak homojen ve mekanik dirence sahip bir kütle meydana getirmeye yarayan cisimlere bağlayıcı madde denir. Bağlayıcı maddeler anorganik

1.5.2.1. Anorganik bağlayıcı maddeler: Kimyasal yapılarına göre kısma ayrılır.

- Hidrolik olmayan bağlayıcı maddeler : Yalnız havada katılaşabilen bağlayıcılardır. Hasıl olan sert kütle suyun etkisine dayanamıyarak belli müddet sonra mekanik direncini kaybedip parçalanır. (adi kireç, alçı gibi).

- Yarı hidrolik bağlayıcı maddeler : (Su kireci, pozzolanlı harç

- Hidrolik bağlayıcılar : Havada ve su içinde katılaşabilen ve sertleşebilen bağlayıcılardır (çimento gibi).

Anorganik bağlayıcılar toz halindedirler, yani boyutları çok küçük danelerden meydana gelir. Su ilave edilince plastik bir hamur haline alır, hamur daha sonra katılaşır ki, bu katılaşma olayına priz denilmektedir. Hamur plastikliğini kaybettiği zaman priz başlar, katılaşma sona erer. Priz bitince sertleşmeye başlar ve böylece malzeme mekanik mukavemetini kazanır. Bağlayıcı maddenin mukavemetini kazanması hidratasyon, katılaşma ve sertleşme olaylarının birbirini izlemesi ile mümkündür. Hidratasyon bağlayıcıyı oluşturan maddelerin su ile yaptıkları reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucu hidrate bileşimler meydana gelir. Hidrate bileşimleri iyice açıklamak için suyun hangi şekillerde cisim içinde bulunduğunu açıklamak gerekir (20).

a) Serbest su: cismin boşluklarında bulunan sudur, ısıtmakla yok edilebilir.

b) Adsorpsiyon suyu: Cisimlerin yüzeyi tarafından tutulan sudur.

c) Hidratasyon veya kristalleşme suyu: Bu halde su cismin bünyesinde oluşturmakla beraber cisim ile su arasında kimyasal bakımdan bir birleşme mevcut değildir. Hidrate bileşimlerde su bu şekilde bulunur.

d) Teşekkül suyu: Bu halde su cisim içinde molekül halinde bulunur. Cisim içinde elektrikle yüklü (OH) halinde yer almaktadır.

Bu suyun ayrılması ile cismin yapısı tamamen değişir. Buna en iyi örnek kaolinitdir.  $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$ .  $500^{\circ}C$  de suyunu kaybeden kaolinit molekülü alümin ve silise ayrılır.

Yukarıda belirtilen anorganik bağlayıcılara örnek olarak, karayolu üstü yapısında kullanılan çimento ve kireç verilecektir.

**KİREÇ** : Su ile karıştırıldığında, başlangıçta plastik sonra gittikçe sertleşen anorganik bir bileşiktir. Kireç, üretiminde ham madde olarak kalker ( $CaCO_3$ ) ve dolomit ( $CaCO_3 + MgCO_3$ ) kullanılır. Kireç özelliklerine etki eden başlıca faktörler şunlardır (21).

- Üretimde kullanılan kalker ve dolomitin saflık derecesi
- Üretimde kullanılan yakıt çeşidi
- Üretimde kullanılan kalker ve dolomitin boyutu
- Üretimde kullanılan fırın çeşidi.

Saf  $CaCO_3$   $900^{\circ}C$  de ve 1 atmosferlik basınç altında ısıtıldığında aşağıdaki reaksiyon oluşur ;



Fakat kalkerin (kireç taşının) ısı iletmesi kötü olduğundan, ısının taş parçalarının içerisine kadar etki etmesi için sıcaklığı  $1000-1100^{\circ}C$  de tutmak gerekir. Memleketimizde kireç üretiminde çağdaş fırınlar kullanılmakta ise de, ilkel üretim biçimi daha yaygındır. Genellikle basit tekneli fırınlar kullanılmaktadır. Sanayide kullanılan fırınlar Tekneli, Hofman ve Döner Fırın olmak üzere üçe ayrılır. Kalsiyum karbonatın pişirilmesi ile elde edilen sönmemiş kirece su ilave edildiği zaman ısı açığa çıkar. Hacim büyümesi çok fazla olur ve ince daneli kalsiyum hidroksit meydana gelir. Daha fazla su ilave edildiğinde beyaz sönmüş kireç meydana gelir. Kalkerin yakılmasından elde edilen kireçlere Kalsitik kireç, kireç taşı ve magnezyum karbonatın ( $CaCO_3 + MgCO_3$ ) yakılmasından elde edilen kirece de Dolomatik kireç denir. Fazla ısı etkisinde yakılan dolomatik kireçler aşırı yanmış kireçler olup, kolay kolay su ile

reaksiyona girmezler. Bağlayıcı olarak fazla değerleri yoktur.

Kireç çeşitleri :

CaO : Sönmemiş kalsitik kireç

$\text{Ca(OH)}_2$  : Sönmüş kalsitik kireç ( $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ )

CaO + MgO : Dolomatik sönmemiş kireç

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$  : Mono hidratlı dolomatik kireç

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$  : Dihidratlı dolomatik kireç.

Kireçleri teorik, saf ve ticari kireçler olmak üzere 2 gruba ayırmak mümkündür. Bu kireçlere ait bazı özellikler Tablo 1.7' ve Tablo 1.8'de verilmiştir (21).

Tablo 1.7. Teorik Saf Kireç Özellikleri

Özellikler	Sönmemiş Kireç		Sönmüş Kireç	
	CaO	MgO	$\text{Ca(OH)}_2$	$\text{Mg(OH)}_2$
Kimyasal bileşim	CaO	MgO	$\text{Ca(OH)}_2$	$\text{Mg(OH)}_2$
Kristal şekli	Kübik	Kübik	Hekzagonal	Hekzagonal
Erime Noktası	2570°C	2800°C	-	-
Ayrışım Noktası	-	-	580°C	345°C
Kaynama Noktası	2850°C	3600°C	-	-
18°C de çözülme ısısı + 13.33 Kcal	-	-	+ 2,79 Kcal	0,0
Molekül Ağırlığı	56.09	40.32	74.10	58.3
Yoğunluğu	3.40	3.65	2.34	2.4

Tablo 1.8 . Ticari Kireç Özellikleri

Kimyasal Bileşimi	Kalsitik Kireç		Dolomatik Kireç	
	(%)		(%)	
CaO	92.25-98.00		55.50-57.20	
MgO	0.30- 2.50		37.60-40.80	
CO <sub>2</sub>	0.40- 1.50		0.40- 1.50	
SiO <sub>2</sub>	0.20- 1.50		0.10- 1.50	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10- 0.40		0.05- 0.40	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10- 0.50		0.05- 0.50	
H <sub>2</sub> O	0.10- 0.90		0.10- 0.90	
Yoğunluğu	3.2 - 3.4		3.2 - 3.4	
	Yüksek	Monohidratlı	Dihidratlı	
	Kalsiyumlu	Dolomatik	Dolomatik	
Kimyasal Bileşim	Ca(OH) <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub> + MgO	Ca(OH) <sub>2</sub> + Mg(OH) <sub>2</sub>	
Yoğunluk	2.3-2.4	2.7-2.9	2.4-2.6	

**ÇİMENTO :**

Kalker ile kil karışımının yüksek ısıda (1300-1500 °C) pişirilmesi elde edilen ve adına klinker denen kitlenin, dövülerek övütülüp ince haline getirilmesi ve içerisine bir miktar alçı atılmasıyla meydana gelen bir bağlayıcı maddedir. Çeşitli çimento tiplerinin kimyasal isimleri Tablo 1.9'da verilmiştir (22).

Tablo 1.9 . En Önemli çimentoların Kimyasal Bileşimleri ve Ağırlık Yüzdeleri.

Kimyasal Bileşenler	Portland Çimentosu	Demirli Portland Çimentosu	Yüksek Fırın Çimentosu	Tras Çimentosu	Alümin Oksit Çime
SiO <sub>2</sub>	19-23	21-26	22-29	21-27	5-1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub>	4-7	5-10	6-13	7-10	38-5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	1-4	1-4	1-3	2-4	1-1
CaO	61-67	54-64	47-60	48-53	35-5
MgO <sub>3</sub>	0,5-3	1-5	1-5	1-3	0,5-
Mn	-	0-2	0-4	-	0-1
SO <sub>3</sub>	1-4	1-3	1-4	1-3	0-1
Özgül ağırlık	3,0-3,1	3,0-3,1	3,0-3,2	2,8-3,0	2,8-1
Birim hacim ağırlık (gevşek) öğütme inceliğine göre 0,9-1,30					
Birim hacim ağırlık (sarsılmış) öğütme inceliğine göre 1,6-1,9					

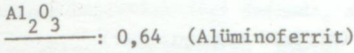
Tablo 1.9 'da belirtilen çimento tiplerinden, yalnız karayolu için yapılarında en çok kullanılan portland çimentosundan bahsedilecektir. Portland çimentosu ilk defa 1824 yılında İngiltere'de kil ile kalker taşı karışımının yakılması ile elde edilmiştir. Elde edilen klinker İngiltere'de Portland şehrinde bulunan çok sağlam doğal taşlara benzediği için, adı Portland olarak kalmıştır. Portland çimentosunun bileşiminde bulunan CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranları şu şekilde olmalıdır:

$$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} : 1,8 - 2,2 \quad (\text{Hidrolitize oranı})$$

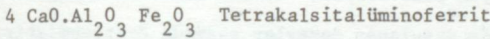
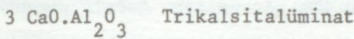
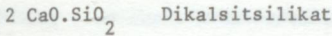
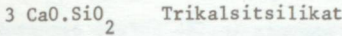
$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} : 1,2 - 4,0 \quad (\text{silis indisi})$$

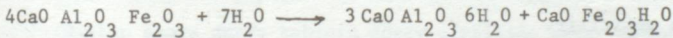
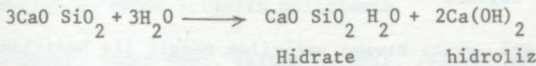
$$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$$



Portland çimentosu, ilkel maddelerin tamamen homojen oluncaya kadar öğütülüp, su ile karıştırıldıktan ve fazla suyu atıldıktan sonra dik veya yatık fırınlarda 1400-1450 °C arasında pişirilmesi ile hazırlanır. Bu esnada CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değişik oranlarda birleşerek çeşitli çimento bileşenlerini oluşturur. Fırından çıkarılan klinker ince toz haline gelinceye kadar az miktarda alçı katılarak öğütülür ve torbalara doldurulur. Eklenen alçı Portland çimentosunun katılma süresini uzatır. Portland çimentosu bileşimindeki maddelerin birbirleri ile birleşmelerinde hasıl olan bileşiklere Portland Çimentosu asal bileşenleri denir (23).



Çimento su ile reaksiyona girdiğinde, bileşenleri hidrate ve hidroliz olarak kitleyi katılaştırıp sertleştirirler. İzah edilen bu hidrate ve hidroliz olma olayı kimyasal olarak aşağıdaki şekilde açıklanabilir.



Tamamen Hidrate

### 1.5.2.2. Organik Bağlayıcılar (Bitümlü Bağlayıcılar)

Bitüm, ya doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı, ya pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı, ya da bunların her ikisinin birleşimi olup çok defa bunların gaz, sıvı, yarı katı veya katı olabilen, metal dışı türevleri ile bir arada bulunan yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır. Bitümlü bağlayıcılar esas olarak ikiye ayrılır (16), (24):

1.5.2.2.1. Asfalt: Koyu kahverengiden siyaha kadar değişen kuvvetli bağlayıcı özelliği olan kıvamlılık bakımından katı, yarı katı veya sıvı olabilen ya doğal halde bulunan ya da ham petrolün arıtılmasından elde edilen bir maddedir. Doğal asfaltlar doğada genellikle mineral maddelerle karışmış halde bulunurlar. Yapay asfaltlar ise ham petrolün arıtılmasından elde edilir. Damıtma sonunda geride asfalt çimentosu kalır. Yol üst yapısında kullanılan asfalt çimentosunun akıcı hale gelebilmesi için ısıtılması gerekir, AC sembolü ile gösterilir. Asfalt çimentosunun kıvamlılığını belirleyen penetrasyonu 10-300 arasında değişir. Asfalt çimentosuna bu çalışmada uygulanan deneyler aşağıda özetlenmiştir.

#### - Penetrasyon Deneyi (TS 118)

Bu deney ile asfalt çimentolarının kıvamlılıkları tayin edilir. Kıvamlılık, asfaltın yol sıcaklığındaki bağlayıcılık gücünü etkilemektedir. Asfalt çimentosunun kıvamı arttıkça karışımdaki agregaları birbirine daha kuvvetle bağlar.

Deney numuneleri, akıcı kıvama getirilen asfalt ile hazırlanarak oda sıcaklığında soğutulduktan sonra, 25<sup>o</sup>C su banyosunda deney sıcaklığına getirilir.

Penetrasyon deneyi penetrasyon cihazı ile yapılır. Standart bir iğnenin belirli bir yük altında ve belirli sürede asfalt numune içerisine dikey olarak batma mesafesi cihazın göstergesinden okunur. Deney

şartlarının belirtilmediği durumda, ağırlık 100 gram, sıcaklık 25°C ve zama 5 saniye alınır. Penetrasyon birimi santimetrenin yüzde biridir.

Deney sonunda bildirilecek penetrasyon, değerleri arasındaki fark belirtilen değerlerden fazla olmayan üç penetrasyon değerinin ortalamasıdır.

- Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120)

Bu deney ile asfalt çimentosunun ısı değişimlerine karşı olan duyarlılığı belirlenir. Değişik ham petrollerden üretilmiş asfalt çimentolarının duyarlılıkları farklıdır.

Eritilmiş deney numunesi önceden amalgamlanmış (veya yağlanmış) bir prinç levha üzerine oturan halka üst düzeyine kadar doldurulur. Bir saat süre ile soğutulduktan sonra, taşan kısımlar düzeltilir.

Yumuşama noktası, bir su banyosu içine yerleştirilmiş üzerinde bir bilya bulunan standart kalıp içindeki bitümlü maddenin belirli bir hızla ısıtılmasıyla, yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometreden okunan sıcaklıktır.

Yumuşama noktasının tayini iki numune üzerinde yapılmalı ve sonuç bu iki değerın ortalaması olarak verilmelidir.

- Cleveland Açık Kabı ile Parlama Noktası Deneyi (TS 123)

Parlama Noktası deneyi ile de ısıtılan malzemenin tutuşma ve yangın tehlikesine karşı, buharının geçici olarak parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık belirlenir.

Bu deney, deney kabı, ısıtma levhası, ısıtıcı ve destekten meydana gelen Cleveland cihazı ile yapılır. Bitümlü malzeme uygun bir akıcılığa kadar ısıtıldıktan sonra deney kabının düzey çizgisine kadar doldurulur. Bellirli bir ısıtma hızında ısıtılan numunenin herhangi bir noktasında parlama görüldüğü anda termometreden okunan sıcaklık, parlama noktası olarak kaydedilir. Aynı kişinin yapacağı iki deney arasındaki fark 0,3°C değerini aşmamalıdır.

- Özgül Ağırlık Deneyi

Bitümlü karışımların özelliklerinin tayini açısından, karışımda kullanılan bitümlü maddenin özgül ağırlığının bilinmesi önemlidir.

Bitümlü maddelerin özgül ağırlığı, bunların 25<sup>o</sup>C da hacmi bilinen bir miktarının ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki suyun ağırlığına bölünmesinden elde olunan orandır.

Çalışmada özgül ağırlık piknometre yöntemi ile saptanmıştır. Bu yöntemde önce piknometre temizlenip kurutulur ve kapağı ile birlikte 1 mg'a duyarlı terazide tartılır (a). Sonra piknometre su ile doldurulup kapağı sıkıca kapatılarak 25<sup>o</sup>C lik su banyosunda en az 40 dakika bekletilir ve iyice kurulandıktan sonra tekrar tartılır (b).

Piknometre, akıcı hale getirilen asfalt numune ile yarısına kadar doldurulur. Oda sıcaklığına kadar tartılır (c). Teraziden alınan piknometrenin geri kalan kısmı saf su ile doldurulur. 25<sup>o</sup>C lik su banyosunda en az 40 dakika bekletilip, kurulandıktan sonra tekrar tartılır (d).

Yukarıda açıklanan ağırlıkların bulunmasından sonra özgül ağırlık aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{c-a}{(b-a)-(d-c)}$$

1.5.2.2.2. Katran: Başlıca, kömürün ve odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir. Bu şekilde elde edilen katrana ham katran denir. Genellikle katran bu şekli ile kullanılmaz. Arıtıldıktan sonra kullanılır. Üst yapıda kullanılacak katranın kömür kökenli olması tercih edilir (16). Katran ya metalurjik amaçlar için kok edilmesi ya da hava gazı üretimi için kömürün kuru olarak damıtılması sırasında bir yan ürün olarak elde edilir. Damıtma için kömür birkaç 1000<sup>o</sup>C de ısıtılır. Katran RT sembolü ile gösterilir.

## 1.6. ÜSTYAPI TABAKALARI VE BU TABAKALARDA ARANAN ŞARTNAME DEĞERLERİ

T.C.Karayolları Genel Müdürlüğü Yollar Fenni ve Bitümlü Kaplamalar Fenni Şartnamelerinin kabul ettiği esaslar dahilinde, karayolu üstyapısını oluşturan; alttemel, temel ve kaplama tabakalarında aranan özellikler aşağıda verilmiştir (17), (25), (26).

### 1.6.1. Alttemel Tabakası

Alttemel, trafik yüklerinin taban zemini üzerine yayılmasını sağlamak, ince daneli altyapıların temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek ve ayrıca su ve don tesirlerine karşı tampon bölge görevi yapmak üzere; belirli bir granülometride hazırlanan agreganın su ile karıştırılarak tesviye yüzeyine serilmesi ile oluşturulan tabakadır.

Alttemel yapımında kullanılacak kum, çakıl, kırmataş ve benzeri malzemede tayin edilecek granülometri (AASHTO T-27 ve T-11 e göre) Tablo 1.10'da verilen limitlere uygun olmalıdır (18).

Tablo 1.10. Alttemel Tabakası Granülometri Limitleri

Elek Açıklığı		% Geçen
mm	inç	
75	3	100
37,5	1 1/2	85-100
9,5	3/8	45-100
4,75	No 4	25-85
0,425	No 40	7-40
0,075	No 200	0-12

Malzemenin 0,075 mm eleği geçen kısmı 0,425 mm eleği geçen kısmının 2/3 ünden fazla olmamalıdır. Alt temel yapımında kullanılacak olan malzemede aranan fiziksel özellikler ise Tablo 1.11'de verilmiştir.

Tablo 1.11.Alttemel Malzemelerinin Fiziksel Özellikleri

Deney Adı	Deney Metodu			Sınırlamalar
	AASHTO	ASTM	TS	
$Na_2SO_4$				
Sağlamlık (%)	T-104	C-88	-	Kayıp $\leq$ %25
Los Angeles Aşınma (%)	T-96		3694	Aşınma $\leq$ %50
Likit Limit	T-89	D-423	1900	LL $\leq$ 25
Plastisite indeksi	T-90	D-424	1900	PI $\leq$ 6
CBR	T-193	D-1883	1900	CBR $\geq$ 30

Alt temel malzemesi, tesviyesi tamamlanmış taban üzerine, sıkışmış kalınlığı 20 cm'i geçmeyecek şekilde tabakalar halinde serilip sıkıştırılır. Ancak, sıkıştırma makinelerinin kapasitelerinin büyük olması halinde tabaka kalınlığı 30 cm'ye kadar arttırılabilir. Alt temel kalınlığının bu değerlerden fazla olması durumunda, birden fazla tabakalar halinde inşa yapma durumu hasıl olur ki, bu durumda tabaka kalınlıkları eşit alınır. Her tabaka üzerine yenisi serilmeden istenen yoğunluğa getirecek şekilde sıkıştırılmalıdır. Alt temel malzemesinin serilmesi ve tesviye edilmesi esnasında, bulunan optimum su muhtevası (AASHTO, T-99 veya T-180 metodu ile)  $\pm$  2 tolerans limitleri dahilinde uygulanır.

Sıkıştırmada, statik çizgisel yükü 30 kg/cm den büyük olan düz bandajlı vibrasyonlu silindirler ve lastik başına düşen yükü 3500 kg dan az olmayan lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kullanılır.

#### 1.6.2. Temel Tabakası

Kaplama tabakasının hemen altına yerleştirilen, daneli veya uygun

bir bağlayıcı ile işlem görmüş malzemeden oluşan bir tabakadır. Temel tabakasının başlıca görevi kaplama tabakasına destek olarak üstyapının yük taşıma kabiliyetini artırmaktır. Trafik yüklerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilmeli ve yüksek nem oranında dengede kalabilmeli, ayrıca drenaja yardımcı olmalı ve don etkisine karşı da ek bir koruma sağlayabilmelidir (5).

#### 1.6.2.1. Temel Tabakasında Kullanılacak Agregalar ve Tanımları

Kaba agrega olarak kullanılacak doğal veya üretilmiş malzemeler:  
(2.00 mm elek üstü)

**Çakıl:** Gelişigüzel şekil ve boylarda su etkisi ile yuvarlanmış veya aşınmış halde bulunan doğal agrega.

**Kırılmış çakıl:** Kırılma sonunda elde edilmesi istenen maksimum dane boyutunun en az 1,5 katı daha büyük boyutlu çakılın kırılmasıyla elde edilen agrega.

**Teras çakılı:** Doğal yataklar halinde bulunan kum, silt ile karışık çakıl. (Kalite itibarıyla alt temel ve çok düşük trafikli yollarda temel olarak kullanılabilir).

**Kırma taş:** Kalker, dolomit bazalt, metamorfik, kuvarsit veya benzeri kayaların kırılmasıyla oluşan agrega.

**Kırılmış cüruf:** Birim -ağırlığı  $1100 \text{ kg/cm}^3$  den az olmayan, havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun kırılmasıyla elde edilen agrega.

Temel yapımında kullanılacak kaba agregada aranan özellikler Tablo 1.12'de verilmiştir.

Tablo 1.12 Kaba Agreganın Fiziksel Özellikleri

Deneyin Adı	Deney Metodu			Sınırlamalar
	AASHTO	ASTM	TS	
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> sağlamlık (%)	T-104	C-88	3655	kayıp ≤15
Los Angeles aşınma (%)	T-96		3694	aşınma ≤40
0,075 mm den geçen maksimum (%)				1
Kil toprakları (%)				bulunmayacak
Kömür veya benzeri (%)				en çok 0,25
Yumuşak ve dayanıksız malzeme (%)				en çok 2,0
Diğer zararlı maddeler (%)				en çok 1,0

İnce agrega olarak kullanılacak doğal ve üretilmiş malzemeler ile tanımları aşağıda verilmiştir (2,00 mm elek altı).

Doğal kum: 2 mm ile 0,075 mm elekler arasında kalan ve taşların doğal yollarla dağılmasından meydana gelen malzeme.

İnce çakıl: İnce boyutlu çakıl daneleri.

Taş tozu: Taş ocaklarından kırım esnasında elde edilen ince malzeme.

Cüruf kumu: Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun elenmesi ve cürufun granülasyonu ile elde edilir.

Temel yapımında kullanılacak ince agregada aranacak fiziksel özellikler Tablo 1.13'de verilmiştir.

Tablo 1.13 İnce Agreganın Fiziksel Özellikleri

Deneyin Adı	Deney Metodları			Sınırlamalar
	AASHTO	ASTM	TS	
Likit limit (LL)	T-89	D-423	1900	LL ≤ 25
Plastisite indeksi (PI)	T-90	D-424		PI ≤ 6
Zararlı maddeler				
Organik madde			3673	bulunmayacak
Kil topakları	T-21			bulunmayacak
Kömür ve benzeri maksimum (%)				1
Diğer zararlı maddeler maks (%)				1

Temel Tabakası, ya yalnız agrega ile ya da bağlayıcı ile işlem görmüş agrega ile oluşturularak Granüler Temel Tabakası, Plent Miks Temel Tabakası, Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel Tabakası, Sıcak Bitümlü Temel Tabakası gibi tiplerde inşa edilebilir.

### 1.6.3. Kaplama Tabakası

Kaplama tabakası, üstyapının trafik yüklerine doğrudan doğruya maruz kalan en üst tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle, diğer tabakalara nazaran daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olmalıdır. Kaplama tabakası, suya karşı geçirimsizlik sağlayarak yolu bozulmalardan koruduğu gibi, yazın toz, kışın çamur gibi konfor bozucu etkilerini de önleyerek ve düzgün yuvarlanma yüzeyi sağlayarak konforun artmasını sağlar.

Bitümlü kaplama tabakaları genellikle yapım ve çalışma ilkeleri oldukça farklı iki tipe ayrılırlar (5).

- Yüzeysel kaplamalar

Bağlayıcı ve agrega yol yüzeyine ayrı ayrı serilip sıkıştırılır. Karıştırma söz konusu değildir.

- Bitümlü karışımlarla oluşturulan kaplamalar

Bitümlü karışımlarla oluşturulan kaplama olarak yalnız asfalt betonu ele alınacaktır.

#### 1.6.3.1. Asfalt Betonu (Beton asfalt kaplamalar)

Günlük ticari trafik sayısı 500'den büyük yollarda kullanılan beton asfalt, çok dikkatli şekilde oranları saptanmış bulunan iri agrega, inç agrega ve filler ile asfalt çimentosunun sabit karıştırma tesislerinde sıcaklık, nem ve bileşim bakımından çok sıkı bir kontrol altında karıştırılmasıyla elde edilir. En gelişmiş kaplama tipi olan beton asfalt kaplamalar trafiği ağır yollarda, oto yollarda, havaalanı pistlerinde her türlü iklim koşullarında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Yüksek dirençlerine karşı maliyetleri de yüksektir. Asfalt betonu genel anlamda aşınma tabakasını, binder tabakasını ya da bunların her ikisini bir arada kapsar. Trafikin aşındırma ve iklimi ayarıştırma etkilerine karşı koyan en üst tabakaya aşınma tabakası denir. Aşınma tabakası ile temel tabakası arasında geçiş olmak üzere bir veya bir kaç tabaka yapılırlar ki bunlara da binder tabakası denilmektedir. Asfalt betonu aşınma tabakasında kullanılacak agregada aranan granülometri limitleri Tablo 1.14 de gösterilmiştir.

Asfalt betonu imalinde kaba agrega; kırılmış, elenmiş taş, çakıl ya da elenmiş çakıl veya bunların karışımının 4.76 mm lik (No.4) elek üzerindeki kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü sağlam ve dayanıklı danelerden oluşmalıdır. Kaba agregada aranan, fiziksel özellikler ve şartname sınırları Tablo 1.15 de verilmiştir.

Tablo 1.14. Aşınma tabakası için Granülometri Limitleri

Elek boyutu		Tip A	Tip B	Tip C	Tip D	Tip E	Tip F
mm	inç						
19	3/4	100	100	100			
12.5	1/2	89-100	84-100	81-100	100	100	100
9.5	3/8	80-95	75-91	71-87	87-100	84-100	80-100
4.75	No.4	64-81	57-75	52-70	66-82	60-77	55-72
2.00	No.10	48-65	42-59	36-53	47-64	41-58	36-53
0.425	No.40	26-40	22-35	17-30	24-36	20-32	16-28
0.180	No.80	15-26	12-22	9-19	13-22	11-19	8-10
0.075	No.200	4-10	4-10	4-10	4-10	4-10	4-10

Tablo 1.15. Asfalt Betonu Kaba agrega özellikleri

Deney adı	Deney metodu			Sınırlamalar	
	AASHTO	ASTM	TS	Binder	Aşınma T.
Los Angeles aşınma (%)	T-96	C-131	3694	≤ 35	≤ 35
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> sağlamlık (%)	T-104	C-88	3655	≤ 12	≤ 10
Yassılık indeksi (%)	B S 812			≤ 35	≤ 35
Soyulma mukavemeti (%)	Nicholson metodu			≥ 50	≥ 50
Cilalanma değeri	B S 812			-	0.50
Su absorpsiyonu (%)	C-127 3526			≤ 2,5	≤ 2,5

- 4.75 mm lik (No.4) elekten geçip 0,075 mm lik elek üzerinde kalan malzeme olarak tanımlanan ince agrega, kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşur. İnce agrega temiz, sağlam ve dayanıklı olmalıdır. Aranacak özellikler Tablo 1.16'da verilmiştir.

Tablo 1.16. Asfalt Betonunu İnce Agrega Özellikleri

Özellikler	Deney Metodu	Sınırlamalar	
		Binder tabakası	Aşınma tabakası
Plastisite indeksi maksimum %	TS 1900	2	2
Organik madde miktarı maksimum %	TS 3673	0,5	Müsaade Edilmeye

Asfalt betonunu oluşturan mineral filler ise, genel anlamı ile tamamı 0.600 mm (No.30) elekten geçip, ağırlıkça en az % 70'i 0,075 mm (No.200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır. Kaba ve ince agreganın karışımının granülometrisi 0.600 mm (No.30) elekten geçen malzeme miktarı yönünden yetersiz ise agreganın karışımına mineral filler eklenir. Taş tozu, mermer tozu Portland çimentosu, sönmüş kireç ve benzeri maddelerden oluşan mineral filler: kil, toprak, organik ve zararlı madde içermemelidir. Plastisite indeksi de 4 den büyük olmamalıdır. Mineral filler granülometri limitleri tablo 1.17'de verilmiştir (AASHTO M17-70).

Tablo 1.17. Mineral Fillerin Granülometri Limitleri

Elek boyutu	% geçen
0.600 mm (No.30)	100
0.300 mm (No.50)	95-100
0.075 mm (No.200)	70-100

Agreganın karışımına eklenen mineral fillerin 0.075 mm (No.200) elek üzerinde kalan kısmı ince agreganın olarak kabul edilir.

Asfalt betonunun aşınma ve binder tabakalarının yapımı için agregaya ilave edilecek bitümlü bağlayıcı olarak asfalt çimentoları kullanılır.

("TS 1081-Yol üstyapılarında kullanılan Asfalt Çimentolarının Özellikleri" standardına uygun). Karışımda kullanılacak asfalt çimentolarına uygulanan deneylerde alınan sonuçlar Tablo 1.12'de verilen değerlerle karşılaştırılmalıdır. Asfalt betonunun karışım dizaynı Marshall Metodu kullanılarak yapılır (TS 3720).

Asfalt betonu karışımların dizaynında Tablo 1.18'de verilen dizayn kriterleri esas alınır. Otoyollarda uygulanacak asfalt betonu karışımların dizaynında ise Tablo 1.19'da verilen kriterler esas alınmalıdır (17).

Tablo 1.18. Asfalt Betonu Karışım Dizayn Kriterleri.

Özellikler	Binder		Aşınma	
	MİN.	MAKS.	MİN.	MAKS.
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	50	-	50	-
Marshall stabilitesi (kg)	600	-	750	-
Boşluk (%)	4	6	3	5
Asfaltla dolu boşluk (%)	65	75	75	85
Akma (mm)	2,5	4,6	2,5	4,6
Asfalt çimentosu(%) (Ağırlıkça)	3,5	6,5	4,0	7,0

Tablo 1.19 Asfalt Betonunun Otayol Dizayn Kriterleri.

Özellikler	Binder		Aşınma	
	Min.	Maks.	Min.	
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	75	-	75	
Marshall stabilitesi (kg)	750	-	900	
Boşluk (%)	4	6	3	
Asfaltla dolu boşluk (%)	65	75	75	
Filler/Bitüm oranı	-	1.4	-	
Akma (mm)	2	4	2	
Suya daldırılmış numunelerin stabilitesinin orijinal stabiliteye oranı (%)	70	-	70	

## 2. BÖLÜM

### YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 2.1. GİRİŞ

Birçok tanıma göre cüruf, yüksek fırınlardan elde edilen atık bir üründür. Ülkemizde de yaygın olan bu tanım geçerliliğini yitirmiştir. Yüksek fırın cürufunun değeri gün geçtikçe artmaktadır. Öyleki, yüksek fırın cürufu atık bir madde olmaktan çıkmış, ekonomik değeri olan bir ara ürün haline gelmiştir. Endüstride elde edilen atık ürünlerin değerlendirilmesi son yıllarda üzerinde oldukça durulan bir konu olmuştur.

Yüksek fırın cürufu da dış ülkelerde, çimento ve çatı kaplama malzemesi yapımına kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır.

1984 yılı itibariyle ülkemizde yıllık yüksek fırın cürufu üretimi yaklaşık 1.500.000 ton dolayındadır. Bu üretim yakın gelecekte, gerek 4.Demir-Çelik Endüstrisinin üretime başlaması gerek mevcut fabrikalardaki üretim artışları ile birlikte daha yüksek değerlere ulaşacaktır. Büyük kısmı kullanılmayan yüksek fırın cürufunun değerlendirilmesi ülkemiz ekonomisine önemli katkılar sağlayabilecektir.

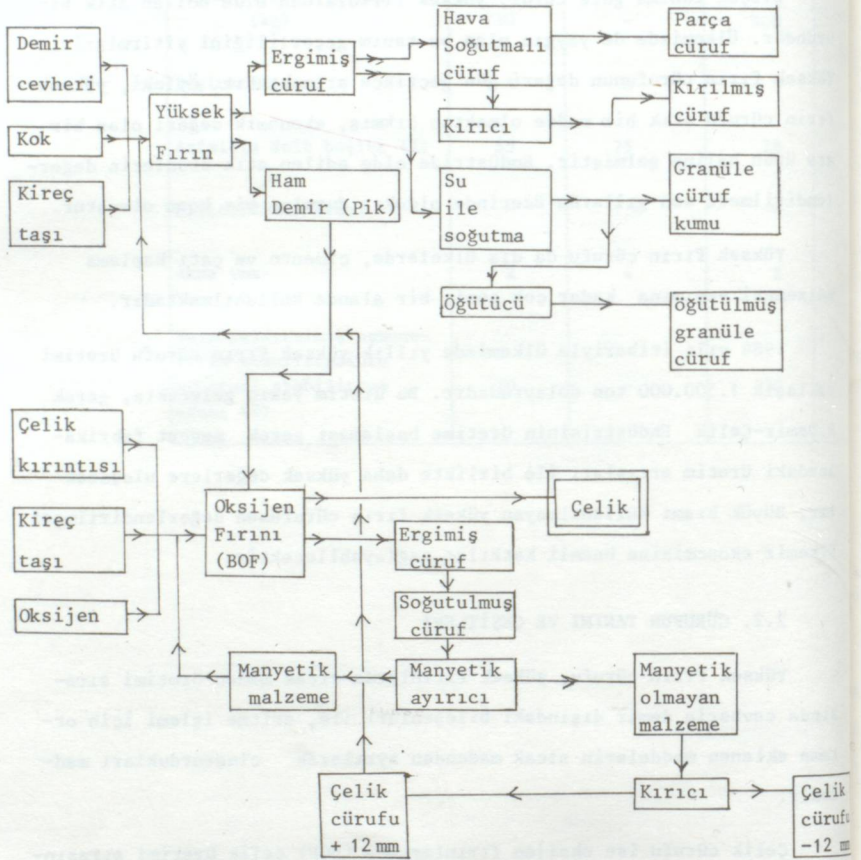
#### 2.2. CÜRUFUN TANIMI VE ÇEŞİTLERİ

Yüksek fırın cürufu, yüksek fırınlarda sıcak maden üretimi sırasında cevherin demir dışındaki bileşenleri ile, eritme işlemi için ortama eklenen maddelerin sıcak madenden ayrılarak oluşturdukları maddedir.

Çelik cürufu ise oksijen fırınlarında (BOF) çelik üretimi sırasında oluşan ergimiş cürufun soğuması ile elde edilir (Şekil 2.1) (27).

Cürufun özellikleri, kullanılan ham madde bileşimine, katkıların cins ve oranlarına, fırın sıcaklığına ve soğutulma şekline göre değişir.

Cüruf, demir cevheri, demir oksit, silisyum ve alüminyum oksitlerin bir karışımıdır. Fırın içinde oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucunda demir oksit demire indirgenir, silisyum ve alüminyum oksitler kireç taşı ve dolomitin kalsiyumu ile birleşerek cürufu meydana getirirler. Kimyasal reaksiyonlar, fırındaki demir cevheri, kireç taşı ve dolomit ile birlikte kokun yanmasıyla yüksek bir sıcaklıkta meydana gelir (28).



Şekil 2.1. Demir-Çelik Fabrikalarında oluşan Cürufa ait Akış Diyagramı.

Yüksek fırın cürufu genellikle aşağıdaki şekillerde üretilmektedir (28), (29).

#### 2.2.1. Havada soğutulmuş cüruf

Yüksek fırından çıkan kor halindeki cüruf, raylar üzerinde hareket eden potalarla taşındığı çukurlarda kendi halinde soğumaya bırakılırlar. Böylece büyük kütleler halinde sertleşen cürufa "hava soğutmalı cüruf" denir. Cüruftan daha uygun parçalar (küçük boyutlarda) elde edebilmek için su serpmek gerekir. Kırma ve eleme işi için ise normal konkasör tesisleri kullanılır.

#### 2.2.2. Köpüklendirilmiş cüruf

Ergimiş cürufu özel bir çukura boşaltırken üzerine kontrollü şartlar altında su püskürtülürse, ani buhar doğuşu sonucunda genleşmiş bir cüruf elde edilir. Köpüklü cüruf adı verilen bu cürufun birim hacim ağırlığı yaklaşık  $0,8 \text{ ton/m}^3$  olduğundan, hafif agrega olarak kabul edilmektedir.

#### 2.2.3. Granüle Cüruf

Ergimiş cürufa yüksek basınçlı su püskürtülerek üretilir. (Su/cüruf oranı 10/1) Hızlı soğumadan dolayı, kristalleşmeye vakit bulamadan camsı bir malzeme halinde katılaştıran bu cürufa granüle yüksek fırın cürufu denir. Önceleri granüle cüruf, merkez granülasyon ünitelerine potalarla taşınan ergimiş cürufun, su içine devrilmesi veya basınçlı su püskürtülmesi ile elde edilmekteydi. Ancak bu durumda cürufun potalara taşınması sırasında ısının düşmesi, kristalizasyonu başlatarak granülasyon esnasında camlaşmış kısmın azalmasına neden olmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte cüruf, yüksek fırınların yanında basınçlı su püskürtme sistemiyle % 100 granüle edilebilmektedir. Bunun için filtrasyon havuzları, eleklerle süzme sistemleri gibi granülasyon teknolojileri geliştirilmiştir (30).

Granüle cüruf, kum taneleri şeklinde cam gibi parlayan, rutubeti % 8-15, yoğunluğu 1,1, dane çapı 0-5 mm arasında olan, rengi gri-beyaz arasında değişen pozzolan bir maddedir. Granüle cürufun pozzolanik aktivitesi (yüksek hidrolik özelliği), sahip olduğu özelliklere bağlı olarak değişebilmektedir.

#### 2.2.4. Pelletize Cüruf

Yüksek fırından alınan ergimiş cürufun granüle cüruf üretimi için gerekli olandan daha az miktarda su kullanılarak (su/cüruf oranı (0,7-1,5)/ 1 ) soğutulması ve parçalanmasına pelletizasyon denilmektedir. Pelletizasyon neticesinde, dane boyutları 0-30 mm arasında değişen (0-4 mm, % 75 ; 4-30 mm, % 25), yoğunluğu  $0,6-1,1 \text{ t/m}^3$ , rutubeti % 2-8 ve camlaşmış kısmı % 80 olan pelletize cüruf elde edilmektedir (30), (31).

#### 2.3. CÜRUFUN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Cürufun kimyasal yapısı, demir cevherinin kimyasal yapısını yansıtmaya karşın, hissedilir değişiklikler de gösterir. Bu değişiklikler sadece demir cevherinin yapısından değil, kottan ekonomi sağlamak için farklı demir cevherleri ile hazırlanan karışımlardan ve yüksek fırın sıcaklıklarındaki farklılıklardan da ileri gelmektedir. Bu bakımdan cürufu oluşturan kireç, silis ve alüminyumun yüzde miktarları çok değişmektedir. Yüksek fırın cürufu ve çelik cürufu kimyasal bakımdan ayrılık gösterirler. Bu 2 cüruf türünün kimyasal yapısı yaklaşık olarak Tablo 2.1 de belirtilen limitler arasında değişmektedir. (30), (32).

Tablo 2.1. Yüksek fırın cürufu ve çelik cürufunun kimyasal bileşenleri ve limitleri.

Kimyasal Bileşikler	Yüksek fırın cürufu (%)	Çelik cürufu (%)
SiO <sub>2</sub>	30-40	9-20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8-18	0,5-4
CaO	30-50	40-60
MgO	0-15	0,5-7
MnO	0-2	3-10
S	0-2	0-0,5
FeO	0-1	10-25
Serbest kireç	-	0,5-3,5

Pozzolanik bir yapıya sahip olan cüruf, kimyasal yapı olarak Portland çimentosu klinkerine benzemekle beraber, daha az CaO kapsar.

Cüruf bazisitesine göre;

Bazik cüruf: CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 1,30-1,50

Asidik cüruf: CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 1,10'dan küçük olarak sınıflandırılabilir (30).

Agrega olarak kullanılacak cürufun kimyasal yapısı çok önemlidir. Agregada olarak kullanılacak cürufda aranan kimyasal özellikler ile ilgili karakteristikler (BS 1047 ye göre) aşağıdaki şekillerde ifade edilir (15).

- Kükürt Dengesizliği: Kimyasal analiz şu sonuçları vermelidir.

Asitte çözülen sülfat, SO<sub>3</sub> cinsinden < % 0.7

Toplam kükürt < % 2.0

- Demir Dengesizliği: Cüruf suda 14 gün bırakıldığında parçalanmalıdır.

- Tozlanma veya Kireç Dengesizliği: Cürufun kimyasal yapısı aşağıdaki şartlardan birine uymalıdır.

$$(\% \text{CaO}) + 0,8 (\% \text{MgO}) < 1,2 (\% \text{SiO}_2) + 0,4 (\% \text{Al}_2\text{O}_3) + 1,75 (\% \text{S})$$

$$(\% \text{CaO}) < 0,9 (\% \text{SiO}_2) + 0,6 (\% \text{Al}_2\text{O}_3) + 1,75 (\% \text{S})$$

- Porozite: Bu özellik, % 10 su emme üst limiti ile,  $(0,28 \text{ m}^3)$  sıkıştırılmış agreganın  $(35,4 \text{ kg})$  su emmesi şeklindeki alt limite kontrol edilir.

Bağlayıcı olarak ele alındığında, cürufun tek başına bağlayıcı özellik göstermediği görülür. Ancak ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, aktivatör (uyarıcı) adı verilen katkıları ile kullanıldığında bağlayıcı özellik kazanabilmektedir (34). Bu katkıları portland çimentosu, kalsiyum sülfat, sodyum ve potasyum hidroksit veya su ile pH derecesi yüksek çözeltiler veren tuzlardır.

Yüksek Fırın cürufu + Portland çimentosu karışımı su ile karıştırıldığında çimentonun hidrotasyonu sırasında çözeltiliye geçen  $\text{Ca(OH)}_2$  cüruf daneciklerindeki  $\text{SiO}_2$ 'nin çözünmesini ve reaksiyona girmesini sağlar. Hidretasyon bir yüzey reaksiyonu olması nedeniyle bağlayıcı özellik ve aktivatör miktarı cürufun silis içeriğine bağlı olduğu kadar inceliğine de bağlıdır. Cürufun hidrolik değeri (F) yani hidrolisitesi aşağıdaki formüllerle saptanmaktadır (28).

$$F = \frac{\text{CaO} + \text{CaS} + 1/2 \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$$

Şayet cürufta kükürt tesbit edilmişse ;

$$F = \frac{\text{CaO} + 1/2 \text{S} + 1/2 \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}} \text{ şeklinde hesaplanmaktadır.}$$

Görüldüğü gibi bu değer, cüruftaki diğer oksitleri de gözönünde

tutarak bazlık derecesinin daha genişletilmiş şeklidir. Hesaplanan F değeri ile cürufun hidrolik değeri aşağıdaki gibi değerlendirilmektedir.

<u>F</u>	<u>Hidrolik Değer</u>
<1,5	orta
1,5-1,9	iyi
>1,9	çok iyi

#### 2.4. CÜRUFUN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Havada soğutulan yüksek fırın cürufu kırılıp elendiği zaman fiziksel özellikleri genel olarak diğer agregalara nazaran özel avantajlar göstermektedir. Bünyesinde kil ve silt bulunmaması, iyi bir sürtünme özelliğine sahip olması ve pürüzlü bir yüzeyi olması nedeniyle iyi bir adezyona sahip olması üstün özellikleridir (28). Diğer taraftan cürufun su absorpsiyonu yüksektir. Buna karşılık dona karşı gösterdiği mukavemeti de oldukça büyüktür.

Ayrıca çelik cürufunun sahip olduğu yüksek soyulma direnci ve yüksek yoğunluğu, düşük su emme yüzdesi gibi avantajları, bu cürufun bitümlü karışımlarda kullanılabilirliği açısından önem taşımaktadır (33). Kendi halinde soğumaya bırakılan cürufun granülometrisi çok düzensizdir. Ancak eleme ve kırma işlemine tabi tutulduğunda istenen granülometriye getirilebilir.

Cürufuların yoğunlukları ve diğer fiziksel özellikleri türlerine göre değişiklikler gösterebilir (29).

#### 2.5. CÜRUFUN KULLANILDIĞI YERLER

Cüruf, demiryolu balastı, beton agregası, çimento sanayi, briket ve tuğla yapımı, cüruf yünü ve prefabrik eleman ve blokların yapımına kadar geniş bir alanda kullanılabilir. Bu kullanım alanlarından bazıları hakkında bilgiler aşağıda özetlenmiştir (28), (35).

### 2.5.1. Cürufun Çimento Üretiminde Kullanılması

Yüksek fırın cürufunun çimento üretiminde adeta klinker gibi kullanılması, çimento üretiminde maliyetin düşmesini sağlar. Ancak her cüruf çimento üretiminde kullanılmaz. Bunun için cürufun kimyasal ve fiziksel açıdan bazı koşulları sağlaması gerekir.

Cürufun çimento üretiminde kullanılabilmesi için bazı ülke standartlarında yer alan kriterler bulunmaktadır. Ülkemizde T.S 20'de yer alan kriter aşağıdadır.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{2}}{\text{SiO}_2} \geq 1$$

Bu konu ile ilgili olarak bazı ülke standartlarında yer alan kriterler ise şu şekildedir :

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{3} \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3} \geq 1 \quad (\text{Almanya})$$

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{3} \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \geq 1 \quad (\text{A.B.D. İngiltere, Hollanda})$$

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{2}}{\text{SiO}_2} \geq 1.4 \quad (\text{Japonya})$$

bet.

Cürufun hidrolik bağlayıcılık özelliğinin değerlendirilmesi ile ilgili olarak kullanılabilen farklı bazı kriterler de aşağıda gösterilmiştir (34).

$$I_K = \frac{\text{CaO} + \text{CaS} + 0,5 \text{MgO} + \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{2}}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}} \quad (\text{Keil indeksi})$$

$I_K \geq 1.5$  ise (kullanılabilir)

$1,5 < I_K < 1,9$  ise (iyi)

$I_L = 20 + CaO + Al_2O_3 + 0,5 MgO - 2SiO_2$  (Langavant indeksi)

$I_L < 12$  (zayıf)

Yukarıdaki formüllerin incelenmesinden, bu konuda kesin bir standardizasyonun olmadığı anlaşılmaktadır. Uygulamada; Bazisitenin 1 - 1,15, Hidrolisitenin 1,5 civarı ve MgO % 5 olması gibi şartlar cürüflü çimento üretimi için yeterli sayılmaktadır (30).

Ayrıca yüksek fırında sıcaklık artışı, dolaylı olarak cüruf oluşum ısısını da artırdığından, cürufun viskozitesini etkilemektedir. Az viskoz cüruf, çok viskoz cürufa göre daha kolay işlenir. Viskozite CaO, MgO, FeO, TiO<sub>2</sub> tarafından düşürülür, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tarafından yükseltir. İnce öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu tek başına bağlayıcı özellik göstermediğinden, aktivatör kullanmak gerekir.

Karıştırılan bağlayıcı maddenin cins ve miktarlarına göre özellikleri birbirinden farklı olan aşağıdaki cüruf çimentoları üretilebilir (35).

a) Kireç esaslı cüruf çimentoları: Bu çimentolar % 70 den fazla cüruf ve % 30 dan az yağlı kireçten imal edilir. Fransa'da üretilmekte olan bu bağlayıcı maddenin 7 ve 28 günlük basınç mukavemetlerinin ortalaması, sırasıyla 100 kg/cm<sup>2</sup> ve 160 kg/cm<sup>2</sup> dir. Bu çimentonun kimyasal etkilere karşı direnci oldukça yüksektir.

b) Demirli Portland çimentosu: Bu çimento da, Portland çimentosuna ağırlıkça maksimum % 30 oranında cüruf karıştırılarak elde edilir. (TS 20)

c) Yüksek fırın çimentosu: Bu çimento ise ağırlıkça %15-69 Portland çimentosu ile % 31-85 limitleri arasında cürufun karıştırılmasıyla elde edilir. En çok üretilen cürüflü çimento cinsidir.

d) Fazla Sülfatlı çimentolar: Bu bağlayıcı madde ise, yine ağırlıkça % 80 cüruf ile % 15 kalsiyum sülfat ve % 5 de Portland çimentosu karışımından ibarettir. İyi bir mekanik mukavemete sahip olan bu çimento, aynı zamanda kimyasal etkilere de oldukça dayanıklıdır. Ancak üretimi bir çok memlekette kaldırılmış olup, sipariş üzerine üretilmektedir.

#### 2.5.2. Cüruf Yünü Üretiminde Kullanılması

Cüruf yünü, doğrudan ergimış haldeki yüksek fırın cürufundan veya tekrar ergitilerek ve bazı maddeler karıştırılarak, buhar veya basınçlı hava üflenmesi ile elde edilir. Yüksek fırın cürufundan, fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı çeşitli cüruf yünleri üretilir. Korozif etkileri yoktur, aşırı ses izolasyon kabiliyeti ve ateşe dayanıklılık özelliklerine sahiptirler. Isı ve ses izolasyonunda başarı ile kullanılmaktadır.

#### 2.5.3. Cürufun Zirai Amaçla Kullanılması

Yüksek Fırın cürufu, toprağın asitlik oranını indirmek, toprağın fiziksel karakteristiklerini düzeltmek ve temel bitki besleyicilerinin kaybını önlemek için zirai amaçla da kullanılabilir. Cüruf, bitki büyümesi için gerekli olan manganez, sülfür ve demir gibi elementleri bol miktarda içerir. Bileşiminde bulunan CaO ve MgO ile toprak asidini nötralize etmektedir.

#### 2.5.4. Cürufun Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması

Yüksek fırın cürufunun agrega olarak beton imalinde kullanılmamasından iyi sonuçlar alınmaktadır. Özellikle son zamanlarda bu uygulama önem kazanmıştır. Beton imalinde istenen granülometriye ayarlanmış havada soğutulmuş kırılmış cüruf kullanılır. Bu şekilde üretilen beton numuneleri üzerine uygulanan basınç ve kesme mukavemet deneylerinden iyi sonuçlar elde edilmiş, çakıl ve kireç taşı ile yapılan betona kı-

yasla daha yüksek mukavemet değerleri bulunmuştur.

Cüruf demiryolu balastı olarak da kullanılabilir. Dayanıklılık, ses yutuculuk ve temizlik avantajları ile bu işlem için uygundur. Ayrıca hava etkilerine mukavemetinin yüksekliği, esnekliği ve iyi bir bağlantı yüzeyine sahip olmasından dolayı doğal taşlara tercih edilmektedir. Yapılan bazı denemeler, raylara, makas sistemlerine ve diğer bazı metal aksamlara karşı cürufun korozif olmadığını göstermiştir. Demiryolu balastı olarak kullanılacak cüruf türü, havada soğutulmuş kırılmış yüksek fırın cürufudur.

Cüruf ayrıca karayolu yapısında da kullanılabilir. Çevre etkilerine karşı dayanıklılığı, drenaj kabiliyeti, hidrolik prizinin yavaş olması gibi sahip olduğu önemli özellikler, cürufun uygun bir yol agregası olabileceğini göstermektedir. Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu, çelik cürufu ve granüle cüruf üstyapının tüm tabakalarında kullanılabilir. Bu çalışmanın konusunu oluşturan bu husus 3.Bölümde geniş olarak ele alınacaktır.

Cüruf çatı malzemesi şeklinde de yapılarda kullanılabilir. Bu tip çatı kaplamaları, sert rüzgarlara, yağmura, dona ve yangına karşı dayanıklıdır.

## 2.6. ÜLKEMİZDEKİ CÜRUF ÜRETİMİ VE DEğERLENDİRİLMESİ

Ülkemizde yüksek fırın cürufu, aşığıda belirtildiği üzere Karabük, İskenderun ve Ereğli Demir-Çelik fabrikalarında elde edilmektedir. 1950-1970 yılları arasında yurdumuzda üretilen yüksek fırın cürufu miktarı 5,3 milyon ton olmasına rağmen bunun ancak 300 000 tonu yani % 5,7 si granüle cüruf yapılarak satılmış, geriye kalan kısmı ise değerlendirilememiştir (28). Bu tarihten sonra geçen zaman içinde de cürufun değerlendirilmesi açısından önemli değişiklikler olmamakla beraber çimento sanayiinde değerlendirilen granüle cüruf miktarı artmıştır. Ülkemizde üretilen

cürufun özellikleri ve değerlendirilmesi üretildikleri fabrikalara göre aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

### 2.6.1. İskenderun Demir-Çelik Fabrikası

Ülkemizin 3. Demir-Çelik fabrikası olan İskenderun Demir-Çelik fabrikasında üretilen ve değerlendirilen cüruf miktarları Tablo 2.2 de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. İskenderun Demir-Çelik Fabrikası Cüruf Üretimi ve Değerlendirilmesi.

Referans Yılı	Yüksek fırının cürufu (ton)	Granüle Cüruf (ton)	Çelik cürufu	Toplam üretim	Kullanılan miktar (ton)	Kullanım % si
1983	168604	202882	67832	439318	172000	39
1984	253108	226540	106272	585920	234432	40
1985	190468	383012	129009	702489	262935	37

Bu fabrikada elde edilen cüruf türlerinden yalnızca granüle cüruf çimento fabrikalarına satılarak değerlendirilmektedir (36).

İskenderun Demir-Çelik Fabrikası cürufuna ait kimyasal analiz aşağıdaki şekildedir :

Kimyasal bileşikler      Yüksek Fırın Cürufu (%)      Çelikhane cürufu (%)

CaO	32-35	55-60
SiO <sub>2</sub>	48-42	20-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-12	-
MgO	8-10	1,2-1,7
MnO	1,2-1,5	6-10
FeO	0,4-0,6	-
S	0,9-1,1	-
K <sub>2</sub> O	1,5-1,7	-

### 2.6.2. Karabük Demir-Çelik Fabrikası

Bu fabrika 1932 yılında kurulmuş olup, üç adet yüksek fırınla üretim yapmaktadır. İşletmede yan ürün olarak çıkan cürufun ancak bir kısmı granüle cüruf haline getirilerek Bartın Çimento Fabrikasına satılmaktadır. Toplam cüruf üretimi ve değerlendirilmesi ile ilgili bilgiler Tablo 2.3'de görülebilir.

Tablo 2.3. Karabük Demir-Çelik Fabrikasındaki cüruf üretimi ve Değerlendirilmesi

Referans Yılı	Yüksek fırının cürufu (ton)	Granüle cüruf (ton)	Çelik cürufu (ton)	Toplam Üretim (ton)	Kullanılan Miktar (ton)	Kullanım % si
1983	201157	80367	152011	433535	80367	18
1984	195938	123138	138744	457820	123148	27
1985	183546	133223	148000	464769	133223	29

1984 yılı sonu itibariyle Karabük Demir-Çelik İşletmesinin granüle cüruf üretme kapasitesi 200000-250000 ton civarındadır. Ancak müteahhitlerin günlük granüle cüruf üretimine yetecek sayıda kamyon getirmemeleri ve stoklama olanaksızlıkları yüzünden üretim miktarı düzensiz bir şekilde değişmektedir (37). Bu işletmede üretilen yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Karabük Demir-Çelik Fabrikası Yükaek Fırın Cürufu

## Kimyasal Analizi

Fırın No	Yıl	% SiO <sub>2</sub>	% CaO	% Mg <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% S	% MgO	% MnO	% FeO	K <sub>2</sub> O	CaO	CaO+SiO <sub>2</sub>
										SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
1	1981	35,86	34,87	18,07	1,09	6,77	0,74	0,71	1,54	0,972	0,71
1	1982	36,17	36,58	16,80	1,37	6,14	0,85	0,59	1,47	1,011	0,81
1	1983	35,94	35,37	16,90	1,33	7,11	0,92	0,68	1,63	0,984	0,81
2	1981	35,90	35,44	17,91	1,08	6,87	0,81	0,76	1,86	0,959	0,71
2	1982	35,97	36,56	16,94	1,36	6,37	0,88	0,62	1,55	1,016	0,81
2	1983	36,09	35,25	16,57	1,28	6,94	1,12	0,78	1,72	0,977	0,81
3	1981	37,32	33,16	17,46	0,90	7,12	1,10	0,72	1,87	0,889	0,81
3	1982	37,91	33,17	16,77	0,94	7,13	1,35	0,65	1,84	0,875	0,81
3	1983	38,04	31,82	17,38	1,01	7,45	1,40	0,68	1,99	0,837	0,81

Çelik üretimi sırasında çelikhanenin Siemens-Martin fırınlarından elde edilen 2 cüruf numunesinin kimyasal analizi ise aşağıdaki gibidir.

1 nolu cüruf numunesi

2 nolu cüruf numunesi

(üretim % 60-70'i)

% SiO<sub>2</sub> 22-26

15-20

% Fe 26-32

7-9

% Mn 5-6

2-4

% CaO 17-21

44-48

% MgO 4-7

10-14

Granüle cüruf, (MgO) ve (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) miktarları itibariyle iyi özelliklere sahiptir. Sahip olduğu rutubet miktarı da öğütülme yeteneği

bakımından uygundur. Çelikhane cürufu ise 1972 yılına kadar, içindeki demir ve manganez yönünden yüksek fırınlarda şarj malzemesi olarak kullanılmıştır. Ancak daha sonraki yıllarda gerek manganezli demir cevherinin temin edilmesi gerek işçi maliyetlerinin yükselmesi gibi nedenlerle çelik cürufunun değerlendirilmesinden vazgeçilmiştir.

### 2.6.3. Ereğli Demir Çelik Fabrikası (Erdemir)

Yüksek fırın cürufu, 1 nolu yüksek fırın (Ayşe) ve 2 nolu yüksek fırın (Zübeyde) den elde edilmektedir. Erdemir yüksek fırınlarından alınan cürufun, tatlı su yetersizliği yüzünden ancak bir kısmı granüle cüruf haline getirilebilmekte, diğer kısmı ise herhangi bir işleme tabi tutulmadan potalar vasıtasıyla dışarı atılmaktadır. Bu atılan cüruf yavaş soğuma sonucunda iri parçalar halinde kırılagmaktadır.

#### 2.6.3.1. Erdemir Cürufu Üretimi ve Değerlendirilmesi

Erdemir işletmelerinde 1984 yılı ortalamalarına göre üretilen yıllık yüksek fırın cürufu 450 000 ton, çelik cürufu ise 250 000 tondur. Cürufun soğutulması genellikle su-hava ile yapılmaktadır. Ergimis cürufu basınçlı su püskürtülerek elde edilen granüle yüksek fırın cürufunun üretimi piyasa taleplerine bağlıdır. 1984 yılında çimento sanayine 20 000 ton granüle cüruf teslimatı yapılmıştır. Böylece değerlendirilen miktar toplam cüruf miktarının ancak % 3-4 civarında kalmaktadır (38).

Erdemir cürufunun değerlendirilmesiyle ilgili olarak ilk defa 1966 yılında Krupp (Almanya) ve İndüstriyel Export (Romanya) firmaları uzmanları tarafından araştırma yapılmış ve sonuçta Erdemir cürufunun çimento sanayinde kullanılmasına elverişli olmadığına karar verilmiştir. Daha sonra 1974 yılında Desiyab tarafından "Yüksek Fırınlık Cüruf Granülasyon Tesisi" ile "Yapılabilirlik Etüdü" ile Cüruf lu Çimento Üretim ve Paketleme Tesisi "Yapılabilirlik Etüdü" yapılmıştır. Etüdü sonunda,

Tablo 2.5. Erdemir Yüksek Fırın Cürufu Kimyasal Analizi

Kısmi Ortalama Değerler	Y I L L A R																	
	1981			1982			1983			1984 (Z)			1985 (Z)					
	Ortalama Değerler	Ortalama Değerler	Ortalama Değerler	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Hazir.	Temm.	Ağust.	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ocak	Şubat	Mart
10	1.09	1.35	1.21	1.07	1.28	1.10	1.07	1.29	1.05	1.02	1.08	1.50	1.43	1.32	1.28	1.19	1.00	0.89
10 <sub>2</sub>	37.40	36.87	34.49	37.06	37.39	36.26	36.62	36.61	37.58	37.32	36.88	35.77	36.68	33.23	36.43	36.49	35.56	35.40
10 <sub>3</sub>	1.04	0.98	1.09	1.04	1.06	1.14	1.11	1.09	1.10	1.15	1.16	0.90	1.00	1.16	1.15	1.02	1.08	1.34
10 <sub>4</sub>	33.77	30.52	35.00	34.51	35.48	34.75	33.64	34.67	34.86	35.12	36.07	33.65	35.22	36.39	35.63	34.55	35.55	35.02
10 <sub>5</sub>	7.93	14.14	12.44	13.89	12.40	13.10	13.63	13.03	13.15	12.77	11.39	12.36	12.53	10.99	10.65	10.89	11.00	11.66
10 <sub>6</sub>	18.06	15.50	13.08	11.70	11.66	12.92	13.22	12.29	11.58	11.90	14.29	14.78	14.09	14.28	14.21	15.28	15.14	15.06
10 <sub>7</sub>	0.44	0.42	0.44	0.43	0.48	0.44	0.44	0.44	0.43	0.43	0.43	0.42	0.43	0.43	0.43	0.40	0.40	0.40
10 <sub>8</sub>			1.03													1.10	1.31	-

Erdemir cürufunun yüksek fırın yanında kurulacak havuzlu sistemle değerlendirilmesi önerilmiş ve öncelikle Bolu, Hereke ve daha sonra Bartın, Ünye ve Çanakkale çimento fabrikalarında çimento klinkerine katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir (30). 1982 yılında ise Erdemir olanakları ile ve basit bir ekipmanla deneme mahiyetinde granüle cüruf üretimine geçilerek pazar olanakları araştırılmıştır. Ancak çevre kirlenmesine neden olduğundan üretim durdurulmuştur.

Sonuç olarak, çevre kirlenme sorununu ortadan kaldıran veya en aza indiren ve devamlı üretim yapabilecek bir tesis için yatırımın yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Ekonomik olarak bu tür üretim olanağı sağlandığında dahi, üretim miktarı çimento fabrikalarının talebine bağlı olacaktır.

#### 2.6.3.2. Erdemir Cürufunun Özellikleri

Erdemir yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi Tablo 2.5'de çelikhane cürufuna ait kimyasal analiz ise Tablo 2.6'da gösterilmiştir (38).

Tablo 2.6. Erdemir Çelikhane Cürufu 1984 yılı Kimyasal Analiz Değerleri.

Kimyasal Bileşikler	Ortalama değer (%)	Min Değer %	Maks Değer %
MnO	5.77	4.50	7.00
SiO <sub>2</sub>	14.16	10.00	18.00
CaO	52.37	45.00	60.00
MgO	1.70	1.00	2.50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.23	1.00	1.50
S	0.09	0.16	0.128
Toplam Fe	16.90	12.00	23.00

Erdemir yüksek fırın cürufunun kimyasal özelliklerini çimento sanayi standartlarını gözönüne alarak irdeleyecek olursak :

$$I) \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \geq 1 \text{ şartının 1982 yılı ortalamalarına}$$

göre 1,63, 1983 Eylül ayı değerlerine göre 1.yüksek fırın için 1,78, 2.yüksek fırın için 1,85 olarak sağlandığı görülür.

II) Bazisite

$$\text{CaO/SiO}_2,$$

1982 yılı ortalamalarına göre 0,83, 1984 yılı ortalamalarına göre 1,01 şeklinde hesaplanabilir.

III) Hidrolisite

$$F = \frac{\text{CaO} + 1/2 \text{ S} + 1/2 \text{ MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$$

1982 yılı ortalamalarına göre 1,40 ( $< 1,50$ ), 1984 yılı ortalamalarına göre ise 1,54 ( $> 1,50$ ) olarak hesaplanmıştır.

Erdemir cürufunun 1984 yılı ortalamalarına göre kimyasal yapısı, agrega olarak kullanılabilirliği açısından da incelenirse (BS 1047) Kükürt dengesizliği, Demir dengesizliği, Tozlanma ve Kireç dengesizliği şartlarını yerine getirdiği görülebilir (15).

Erdemir granüle yüksek fırın cürufunun hem yüzdesi % 10-20, yığın ağırlığı ise 0,9-1,1 t/m<sup>3</sup> dür. Erdemir granüle cürufunun bu çalışmada tesbit edilen granülometrisi de aşağıda gösterilmiştir.

<u>Elek boyutu</u>	<u>% Geçen</u>
3/8 inç	100
No.4	99
No.10	90
No.40	21
No.80	6
No.200	2

## 2.7. DIŞ ÜLKELERDE CÜRUF ÜRETİMİ VE KARAYOLUNDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Çeşitli ülkelerde değişik türlerdeki cüruf türlerinden farklı miktarlarda üretilmekte ve değişik alanlarda yararlanılmaktadır. Bazı ülkelerdeki cüruf üretim miktarları ve kullanım alanları Tablo 2.7 ve Tablo 2.8'de gösterilmiştir (32).

Tablo 2.7. Bazı Ülkelerdeki cüruf üretimi (Milyon ton/yıl)

Ülkeler	Referans yılı	Y.F.C. Üretimi				Toplam Y.F.C.	Yığılmış Y.F.C.	Çelik cüruf	Yığıl-Ç.cürufu
		Hava soğut. cüruf	Köpüklü cüruf	Granüle cüruf	Pellet cüruf				
Hindistan	1976-77	—	—	1.69	—	5,5	30	0,8	—
Avustralya	—	—	—	—	—	2,76	—	1,5	—
Japonya	1975	25	—	1.9	—	26,9	4,8	12,4	0,7
A.B.D.	1973	26.8	8.45	0.23	Başladı	27,5	—	9,7	—
Kanada	1975-76	2.2	—	—	0.2	2,4	—	1,3	—
Lüksemburg	—	3.4	—	1.3	—	4,5	—	—	—
Belçika	—	0.6	—	4.3	—	—	—	—	—
İtalya	—	0.5	—	3.2	—	—	—	2,8	—
İngiltere	1975	5.5	—	0.16	—	1978'de başladı	5,6	Az	3,9

Tablo 2.8. Bazı ülkelerde yüksek fırın cürufunun kullanımı (Milyon ton/yıl)

ÜLKELER	Hava soğutmalı cüruf (düzgün gradasyonlu)		Balast	Hafif agregata	Çimento	Diğer	Kullanılan toplam	Kullanım yüzdesi
	Yol	Beton						
Hindistan	Az oranda	-	Oldukça az	Oldukça az	0.64	Cüruf yünü	-	-
Avustralya	0.36		Oldukça az	0.018	Az	Cüruf yünü, biriket dolgu, cam, filtre mal.	0.6	32
Japonya	12.4	2.44	0.25	-	1.52	Gübre, dolgu	11.6 satılan 24.5 toplam	43 91
A.B.D.	20,673		4.436	0.450	0.232	-	26.091	95
Güney Afrika			0.32	-	0.8	-	-	53
Kanada			2	-	Çok az, pelletize cüruf	Cüruf yünü, dolgu	-2	100
Almanya	7.2	-	-	0.3	2.8	Gübre, biriket	-7.8	100
Fransa	5.8		-	-	8.3	Gübre -	-	89,9
Lüksemburg	Oldukça çok	-	-	-	0.35	İhraç edilen (0.8-0.9)	4.5	100
Belçika	Kullanıldı	-	-	-	Kullanıl.	-	-	-
İtalya	Kullanıldı	-	-	-	Kullanıl.	-	-	-
			0.45		0.16	Filtre malzemesi	7	100

Dış ülkelerde cürufun karayolunda değerlendirilmesi konusunda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

#### 2.7.1. Taşıma Gücü Düşük Taban Zeminlerinin Cüruf İyileştirilmesi

Zeminlere, fiziksel özelliklerinin düzeltilmesi ve taşıma güçlerinin yükseltilmesi amacıyla çeşitli kimyasal stabilizasyon metodları uygulanabilir. Zeminler, granüle cüruf kullanılarak da stabilize edilebilirler. Kullanılan granüle cürufun etkili olmasında, bazisite indeksi ve soğutulma tekniği önemli rol oynar.

Bu konu ile ilgili Fransa'da yapılan bir çalışmada % 80'i konkasörden geçirilmiş 0-25 mm dane boyutundaki malzemeye, farklı türlerde % 20 granüle cüruf ve % 1 kireç ilave edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlardan hazırlanan numunelere, muayyen kür müddetinden sonra serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Karışımda kullanılan malzeme silisli çakıl, kum ve kalker içermektedir. Deneylerde elde edilen sonuçlar Tablo 2.9'da verilmiştir (28).

Tablo 2.9. Cüruf İyileştirilmiş Zeminin Serbest Basınç Direnci

Cüruf türü	Renk	Bazisite indeksi	Serbest basınç direnci (kg/cm <sup>2</sup> )		
			7 gün	14 gün	28 gün
Pont-a-Mousson	krem beyaz	1,41	5,9	9,9	24,4
Pompey	sarı	1,31	3,7	11,0	13,2
Thionville	kirlisarı	1,39	3,0	4,7	10,5
Neuves-Maisons	siyah	1,22	0,8	1,1	1,0

Yukarıdaki tablodan da görüleceği gibi, mukavemet üzerinde bazisite indeksi etkili olmaktadır. Diğer taraftan cüruf ne kadar ince daneli ve rengi beyaz ise, priz hızı ve yeteneği o kadar yüksektir. Eğer 7 günlük

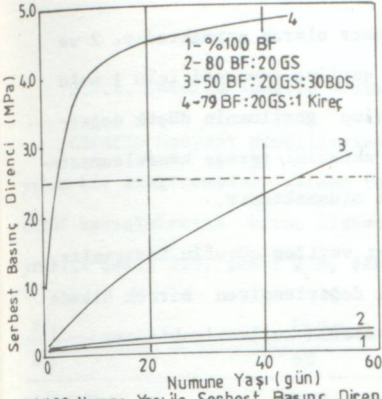
dirençler yeterli olmuyorsa, kireç yüzdesi artırılabilir. Ayrıca stabilizasyon üzerinde ısının etkisi de priz üzerindeki etkisi açısından çok önemlidir. Diğer taraftan, cüruf ve kirecin ilave edildiği malzemenin de mukavemet üzerindeki etkisi büyüktür. Örneğin, % 20 oranında Pont-a-Mousson cürufu, % 1 kireç ve 0-25 mm Marmagne granit malzemesi ile hazırlanan karışımın 7 günlük serbest basınç direnci  $10,5 \text{ kg/cm}^2$  bulunmuştur.

### 2.7.2. Cüruf ilavesiyle Oluşturulan Alttemel ve Temel Tabakaları

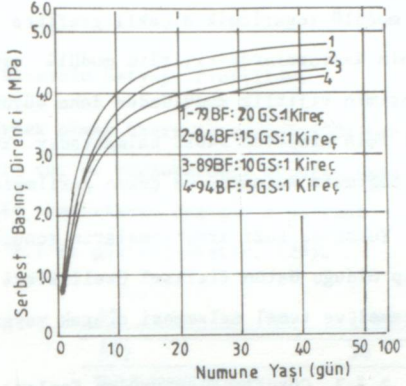
Granülometri, plastisite indeksi ve taşıma değeri bakımından alttemel ve temel tabakalarında kullanılmalrı uygun olmayan malzemeler, kireç veya çimento ile birlikte eklenen granüle cürufu ile kullanılabilir hale getirilebilir. Ayrıca konkasörden elde edilen ve ince kısmı yeterli olmayan doğal agregaya da granüle cüruf eklenebilir. Böylece ikinci konkasör işlemine gerek kalmamaktadır.

Dış ülkelerde alttemel ve temel tabakalarında granüle cürufu ile birlikte havada soğutulmuş cüruf ve çelik cürufu da doğal agregaya gibi kullanılmaktadır.

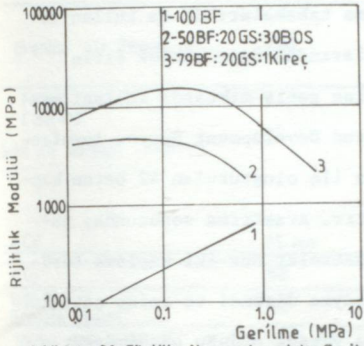
Avusturalya'da, cürufun temel tabakasında kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla dört değişik karışım hazırlanmıştır. Karışımlardan birincisi % 100 havada soğutulmuş cüruf (BF); ikincisi % 80 havada soğutulmuş cüruf (BF) ve % 20 granüle cüruf (GS); üçüncüsü % 50 havada soğutulmuş cüruf (BF), % 20 Granüle cüruf ve % 30 çelik cürufu (BOS); dördüncüsü ise % 79 havada soğutulmuş cüruf, % 20 granüle cüruf ve % 1 kireç ile oluşturulmuşlardır. Hazırlanan bu karışımlara belirli bir kür müddetinden sonra serbest basınç deneyi uygulanmıştır (27). Elde edilen sonuçlar Şekil 2.2 de görülebilir. Şekil 2.2 'nin incelenmesinden görüleceği gibi 1 ve 2 nolu karışımlar için serbest basınç direncinin zamanla değişimi önemsizdir. Bununla beraber % 1 kireç içeren 4 nolu karışımın mukavemeti zamanla birlikte önemli ölçüde artmaktadır. Başka bir araştırmada ise farklı cüruf türleri ile hazırlanan ve her birine % 1 kireç



Şekil 2.2 Numune Yaşı ile Serbest Basınç Direncinin Değişimi



Şekil 2.3 Kireç Kaçıklı Cüruf Karışımlarında Numune Yaşı Serbest Basınç Direncinin Değişimi



Şekil 2.4 30 Günlük Numuneler için Gerilme Rijitlik Modülü İlişkisi

BF: Hava Soğutmalı Kırılmış Cüruf  
GS: Granüle Cüruf  
BOS: Çelik Cürufu

eklenen karışımların serbest basınç dirençleri incelenmiştir. Şekil 2.3'de verilen deney sonuçlarının incelenmesinden, bütün karışımların 7 günlük serbest basınç dirençlerinin 3 (Mpa)'nın üzerinde olduğu görülebilir. Bu değer ise ilgili şartnamenin stabilize kırmataş temel tabakalarında aradığı (2 Mpa) değerinden büyüktür. (Avusturalya M.R.Form No.744) (27).

Cüruf lu karışımlarda, uygulanan gerilme ile rijitlik modülleri arasındaki ilişkiyi gösteren araştırmanın sonuçları da Şekil 2.4'de verilmiştir. Bağlayıcısız olarak kullanılan 1 nolu karışımda rijit-

lik modülü logaritmik ölçekli grafikte lineer olarak artmaktadır. 2 ve 3 nolu karışımlarda rijitlik modülü aynı gerilme seviyesi için 1 nolu karışımın rijitlik modülünden daha büyük olup gerilmenin düşük değerleri için nispeten sabit kalmaktadır. Yük aktarımı agrega kenetlenmesinden bağımsız kalmakta ve çekme gerilmeleri oluşmaktadır.

Yukarıda bazı araştırmaların sonuçları verilen cürüflü karışımlar, sahip olduğu üstün fiziksel özellikleri de değerlendiren birçok ülkede alttemel ve temel malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 2.7.3. Cürüflü Oluşturulan Kaplama Tabakaları

Cüruf türleri beton ve asfalt kaplama tabakalarında da kullanılabilir. Amerika'da bilhassa 1970 yıllarından önce yüksek fırın cürufu beton kaplamalarda kaba agrega yerine geniş miktarda kullanılmıştır. 1972 yılında Engineering Research and Development Bureau tarafından New York'da cürüflü veya doğal agrega ile oluşturulan 42 beton kaplama üzerinde bir araştırma başlatılmıştır. Araştırma sonucunda; pürüzlülük ve seyir konforu ile ilgili parametreler her iki kaplama türü için de yaklaşık aynı bulunmuştur. Ancak kayma direnci ve enine çatlak sıklığının cürüflü beton kaplamalarda daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna karşılık bu kaplamaların hizmet ömürlerinin karşılaştırılması yapılamamıştır (39).

Cüruf türlerinden çelik cürufu ile oluşturulan asfalt kaplamaların teknik etüdünden iyi neticeler alınmaktadır. Amerika, İngiltere, İtalya, Kanada gibi ülkeler çelik cürufunun yoğunluk, kayma ve soyulma direncinin yüksekliği, köşeliliği gibi sahip olduğu üstün fiziksel özelliklerini değerlendirerek, bu cürufu bitümlü karışımlarda agrega olarak kullanılmaktadırlar (33). Yapılan araştırmalarda; çelik cürüflü asfalt karışımlarda stabilite olarak 1700 kg (Marshall Stabilitesi) ve akma değeri olarak 5 mm gibi mükemmel değerler elde edilmiştir.

#### 2.7.4. Cürüflü Temelle Oluşan Karayolu Üstyapı Profilleri

Cürüflü üstyapı profillerine örnek olmak üzere Avusturalya'da yapılan bir araştırmadan alınan farklı tür ve yüzdelerdeki cürüfta veya cürüf karışımlarına kireç ilavesiyle hazırlanan değişik 3 üstyapı profili Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7'de gösterilmiştir. (27).

AC <sub>1</sub>	25 mm
AC <sub>2</sub>	50
100 BF Granüle Temel	200
Granüle Alt Temel	300

Taban Zemini  
CBR=10

Şekil 2.5 Üstyapı Profili

AC <sub>1</sub>	25 mm
AC <sub>2</sub>	50
100BF Granüle Temel	100
79BF 20GS 1Kireç Stabilize Alt Temel	350

Taban Zemini  
CBR:10

Şekil 2.7 Stabilize Cüruf Alttemelden Oluşan  
Alternatif Üstyapı Profili

AC <sub>1</sub>	25 mm
AC <sub>2</sub>	50
79BF:200GS:1Kireç Stabilize Temel	350
100 BF Granüle Alt Temel	100

Taban Zemini  
CBR=10

Şekil 2.6 Stabilize Cüruf Temelden  
Oluşan Alternatif Üstyapı  
Profili

BF:Hava Soğutmalı Kırılmış Cüruf  
GS:Granüle Cüruf

Yukarıdaki şekillerde belirtilen üstyapı profili Sydney-Wollongong arasındaki otoyolda kullanılmıştır. Üstyapı tabakalarında oluşan gerilme ve deformasyonların hesabında Chou tarafından 1976'da hazırlanan Chevit bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu program gerilme ve deformasyonları, elastik tabakalı sisteme göre analiz etmektedir. Granüler temel malzemesinin rijitlik modülü için aşağıdaki formül kullanılır.

$$M_R = k_1 \theta^{k_2}$$

$M_R$  = Rijitlik modülü

$\theta$  = Gerilme (Mpa)

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$  (üç eksenli gerilme)

$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$  (laboratuvarında)

$k_1, k_2$  = Malzeme özellikleri ile ilgili sabitler

Üstyapı profillerinin tabakalı elastik analizinde 4,1 ton tek tekerlek yükü alınmış olup bu profillerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.10'da verilmiştir (27).

Tablo 2.10. Malzeme Özellikleri

Sembol	Malzeme	Rijitlik Modülü (Mpa)	Poisson oranı	Sabitler	
				$k_1$	$k_2$
AC <sub>1</sub>	AC-10 mm Açık gradasyonlu	700	0,35	-	-
AC <sub>2</sub>	AC-20 mm Yoğun gradasyonlu	2000	0,35	-	-
100 BF	Havada soğutulmuş cüruf	değişir*	0,35	500	-
79BF:20GS: 1 kireç	Stabilize cüruf	5000	0,25	-	-
SS	Seçme kumtaşı	değişir**	0,35	400	-
Sg	Altyapı	100	0,45	-	-

\* ortalama  $\theta = 0,2$  Mpa için  $M_R = 180$  Mpa

\*\* ortalama  $\theta = 0,1$  Mpa için  $M_R = 85$  Mpa

Bu değerlere bağlı olarak yapılan tabakalı elastik analiz sonuçları Tablo 2.11'de gösterilmiştir.

Tablo 2.11. Alternatif profillerin analizi.

Üstyapı Profili	Asfalt tabanındaki çekme deformasyonu ( $10^{-6}$ ) Hesap. (Limit)	Stabilize tabaka çekme deformasyonu ( $10^{-6}$ ) Hesap. (Limit)	Altyapı üzerindeki ( $10^{-6}$ ) basınç deformas. Hesap. (Limit)	Yüzey sehimi	
				(mm) Hesap.	(limit)
Şekil 2.5	600 ( 300)	- -	410 ( 600)	1,0	( 0,60)
Şekil 2.6	-20 ( 300)	45 ( 40)	80 ( 600)	0,20	( 0,42)
Şekil 2.7	300 ( 300)	40 ( 40)	100 ( 600)	0,40	( 0,60)

Tablo 2.11'de verilen değerlerden, altyapıdaki basınç deformasyonları ve asfalt tabanındaki çekme deformasyonları için limit değerler Shell metodundan, stabilize tabakanın tabanındaki çekme deformasyonları için limit değerler ise Otte ve Monismith'den alınmıştır. Limit kriterlerde standart dingil yükünün (8,2 ton)  $10^7$  tekrarı gözönüne alınmıştır. Yüzey sehimleri için limit değerler NAASRA'dan (National Association of State Road Authorities) alınmıştır. Ayrıca bu üç farklı profil için de taban zemininin taşıma gücü aynı kabul edilmiştir (CBR 10) Tablo 2.11 incelendiğinde Şekil 2.7'de verilen profilin (granüler temel, stabilize alttemel) limit kriterlere olan uygunluğu görülebilir. Bu araştırmadan, cüruf karışımlarının üstyapının temel tabakalarında kullanılabilir olduğu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca bu şekilde oluşturulan bir üstyapıda kaplama tabakası kalınlığından da tasarruf sağlanabilecektir.

Dış ülkelerde cürufun karayolu yapısında değerlendirilmesi ile ilgili olarak yukarıda verilen araştırmalara benzer diğer çalışmalar (40)-(55) nolu kaynaklardan sağlanabilir.

## 3. BÖLÜM

## ERDEMİR CÜRUFUNUN KARAYOLU ÜSTYAPI MALZEMESİ OLARAK

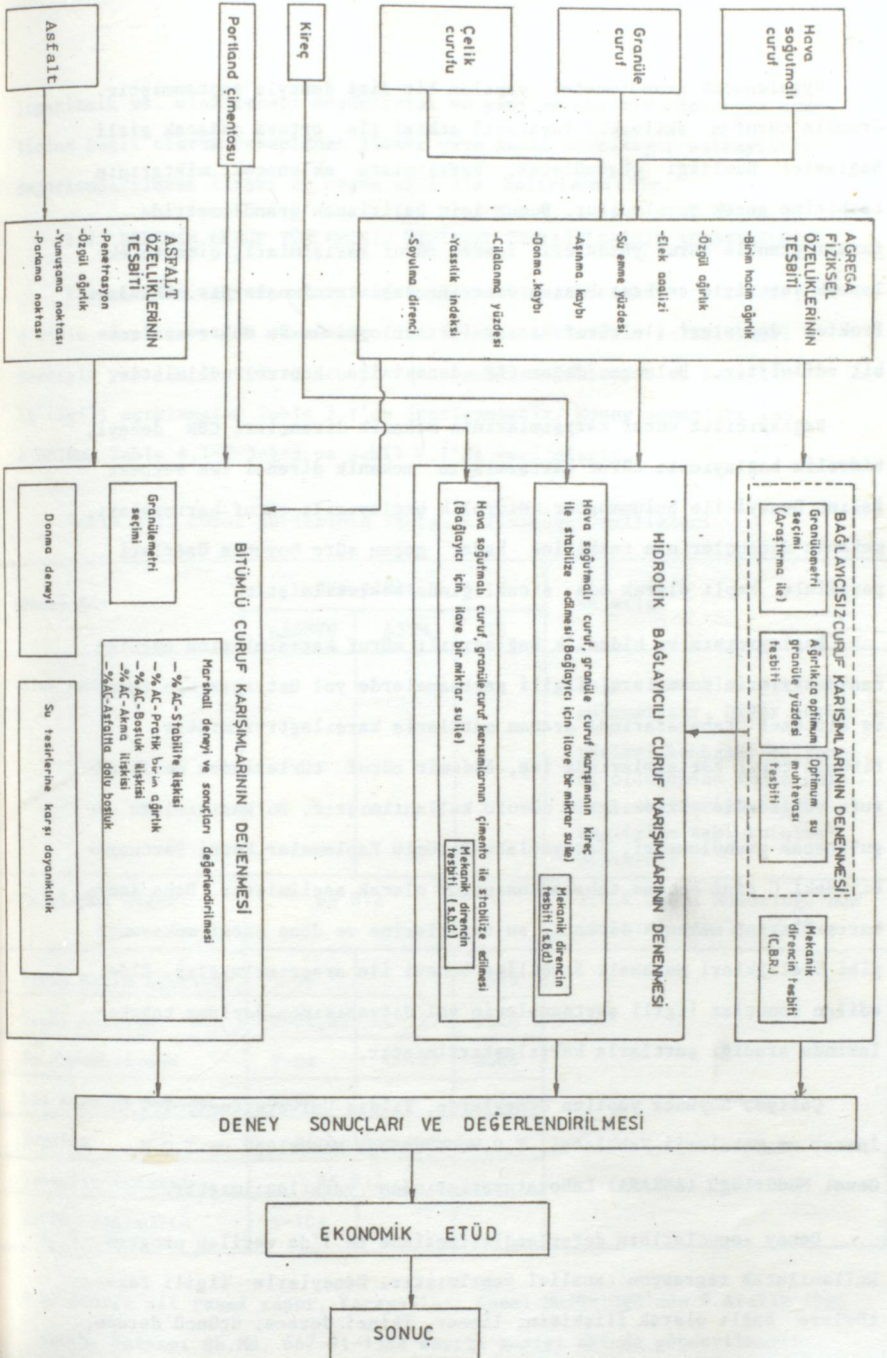
## KULLANILABİLİRLİĞİ

## 3.1. ÇALIŞMADA İZLENEN YOL

Çalışmada, Ereğli Demir-Çelik fabrikaları T.A.Ş.'den (ERDEMİR) sağlanan cüruf türlerinin karayolu üstyapı tabakalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Erdemir cüruf türlerinin ilgili fabrikadan temin edilen kimyasal özelliklerine ait bilgiler 2.Bölümde verilmiştir.

Şekil 3.1'de verilen akış şemasında görüleceği gibi ilk önce agrega olarak kullanılan hava soğutmalı kırılmış cüruf, granüle cüruf ve çelik cürufunun fiziksel özellikleri ile asfalt çimentosunun özellikleri tesbit edilmiştir. Cüruf türlerinin fiziksel özelliklerini belirlemek için yapılan deneylerden alınan sonuçlar, yol üstyapısında kullanılacak agregalarla ilgili şartname değerleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra cüruf türleri ile hazırlanan karışımların incelenmesine geçilmiştir. Bu karışımlar; bağlayıcısız cüruf karışımları, hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımları ve bitümlü cüruf karışımlarıdır. Hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımları, akış şemasında çimento ve kireç katkılı cüruf karışımlarını kapsamaktadır. Ancak kirecin hava bağlayıcı olduğu unutulmamalıdır. Bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımlarının hazırlanmasında, hava soğutmalı kırılmış cüruf ile granüle cüruf türleri kullanılmış olup, granülometri, granüle cüruf yüzdesi ve su muhtevası her iki karışımda da aynı alınmıştır. Yalnız hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımlarında bağlayıcıdan dolayı su muhtevası bir miktar artırılmıştır.



Uygulanacak granülometri yapılan bir dizi deneyle saptanmıştır. Granüle cürufun aktivatör (uyarıcı) etkisi ile ortaya çıkacak gizli bağlayıcı özelliği düşünülerek, karışımlara eklenecek miktarının tesbitine gerek duyulmuştur. Bunun için belirlenen granülometride farklı granüle cüruf yüzdeleri içeren cüruf karışımları, çimento eklenmek suretiyle serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Standart Proktor deneyleri ile cüruf karışımlarının optimum su muhtevası tesbit edilmiştir. Bulunan değer CBR deneyi ile kontrol edilmiştir.

Bağlayıcısız cüruf karışımlarının mekanik dirençleri CBR deneyi, hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımların mekanik direnci ise serbest Basınç Deneyi ile bulunmuştur. Hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımları, mekanik dirençlerinin tesbitine kadar geçen süre boyunca üzerleri parafinle kaplı olarak oda sıcaklığında bekletilmiştir.

Bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımlarına uygulanan deneylerin sonuçları, ilgili şartnamelerde yol üstyapısının temel ve alttemel tabakalarında aranan şartlarla karşılaştırılmıştır. Bitümlü cüruf karışımlarında ise, Erdemir cüruf türlerinden çelik cürufu ve granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bu karışımlara uygulanacak granülometri, Karayolları Bitümlü Kaplamalar Fenni Şartnamesi'ndeki C tipi aşınma tabakasına uygun olarak seçilmiştir. Daha sonra karışımların; mekanik direnci, su tesirlerine ve dona karşı mukavemet gibi özellikleri Marshall Stabilite Deneyi ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ilgili şartnamelerin yol üstyapısının kaplama tabakalarında aradığı şartlarla karşılaştırılmıştır.

Çalışma boyunca yapılan deneylerde, Yıldız Üniversitesi, İ.T.Ü. İnşaat ve Metalurji Fakültesi, T.C.K. 17.Bölge Müdürlüğü ve T.C.K. Genel Müdürlüğü (ANKARA) Laboratuvarlarından yararlanılmıştır.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde Ek 1'de verilen program kullanılarak regrasyon analizi yapılmıştır. Deneylerle ilgili faktörlere bağlı olarak ilişkinin, lineer, ikinci derece, üçüncü derece,

logaritmik vs. olabileceği düşünülerek ve yapılan her bir regresyon analizine bağlı olarak hesaplanan lineer veya katlı korelasyon katsayıları değerlendirilerek ilişki en uygun eğri ile belirlenmiştir.

### 3.2. ERDEMİR CÜRUF TÜRLERİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Erdemir'den sağlanan hava soğutmalı kırılmış yüksek fırın cürufu, granüle cüruf ve çelik cürufunun fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler, deneylerde uygulanan yöntemler ve deneylerle ilgili açıklamalar Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Deney sonuçları ise 4.Bölüm, Tablo 4.1-2-3-4-5 ve Şekil 4.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Cüruf Türlerinin Saptanan Fiziksel Özellikleri

Deney Adı	Deney Metodu			Ek Bilgi
	AASHTO	ASTM	TS	
Elek Analizi				Yalnız granüle cürufa uygulanmıştır. Diğer cüruf türleri konkasör malzemesi olduğundan temin edilen şekilleriyle elek analizine tabi tutulmuşlardır.
Cilalanma değeri	BS 812			T.C.K.Genel Müdürlüğü'nce (Ankara) yapılmıştır*.
Birim Hacim Ağırlık	T-19		3529	
Özgül Ağırlık	T-84,85	C-127	3526	
Su Absorbsiyonu	T-84	C-127	3526	
Los Angeles Aşırma	T-96			
Soyulma	Nicholson Metodu			
Yassılık İndeksi	BS 812			
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Sağlamlık	T-104			

\* Bu deneye ait resmi rapor, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 9 Aralık 1986 tarih, Üstyapı Şb.Md. 667-91-1584 sayılı yazısı ekinde gönderilmiştir.

### 3.3. ASFALT ÇİMENTOSUNUN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çağlayan Asfalt şantiyesinden temin edilen asfalt çimentosuna (AC 75-100) birinci bölümde verilen penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi, Cleveland açık kabı ile parlama noktası deneyi ve özgül ağırlık deneyi uygulanmıştır.

Deneylerden alınan sonuçlar Dördüncü Bölüm Tablo 4.6'da verilmiştir.

### 3.4. FARKLI CÜRUF KARIŞIMLARININ DENENMESİ

Cürufun, üstyapının alttemel, temel ve kaplama tabakalarında agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla oluşturulan farklı karışımları ayrı ayrı denenmiştir. Bu karışımlar, bağlayıcısız, hidrolik bağlayıcılı ve bitümlü cüruf karışımlarıdır.

Bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımlarında Erdemir cüruf türlerinden hava soğutmalı kırılmış cüruf ve granüle cüruf kullanılarak her iki karışımda da granülometri, optimum granüle cüruf yüzdesi ve su muhtevası aynı alınmıştır.

Bitümlü cüruf karışımlarında ise Erdemir Çelik cürufu ve granüle cüruf kullanılmıştır. Hava soğutmalı kırılmış cürufun soyulma direnci yeterli görülmediğinden bu karışımlara dahil edilmemiştir.

#### 3.4.1. Bağlayıcısız Cüruf Karışımları

Erdemir hava soğutmalı kırılmış cüruf ve granüle cüruf ile hazırlanan bu tür karışımların, karayolu üst yapısının alttemel ve temel te-

bekalarında kullanılıp kullanılmayacakları, ilgili tabakalar için aranan şartlar esas alınarak araştırılmıştır.

Bu inceleme aşağıda verilen sırada yürütülmüştür.

#### 3.4.1.1. Granülometri Tayini

Granülometrinin saptanmasında granülometri bileşimi ile karışımın kompasitesi arasındaki ilişki esas alınmıştır.

Bir karışımda birim hacmi dolduran agrega danelerinin işgal ettikleri hacimlerin toplamı olan kompasite üzerinde granülometri tipinin etkisi büyüktür. Bu konuda en önemli bilgiler Feret tarafından kumlar üzerinde yapılan deneylerden çıkarılmıştır (20). Feret'in yapmış olduğu çalışmalardan şu önemli sonuçlar çıkarılabilir.

- Agreganın kompasitesini, karışımın granülometri bileşiminin bir fonksiyonu olarak almak mümkündür.

- Karışımda aynı çapta olan danelerin fazlaşması kompasitenin azalmasına sebep olmaktadır.

- Orta kum miktarının artması kompasiteyi önemli ölçüde azaltmaktadır.

Birim hacim ağırlıkla, kompasite arasındaki ilişki gözönüne alınır; kompasitenin artması, boşluk hacmindeki azalmadan dolayı, karışımın birim hacim ağırlığını da artıracaktır. Bu durumda kompasite-granülometri ilişkisi yerine, birim hacim-ağırlık-granülometri ilişkisi alınabilir. O halde deneysel çalışmalardan amaç, birim hacim ağırlığı maksimum yapan granülometri bileşimini bulmaktır. Birim hacim ağırlık arttıkça karışımın mekanik direnci de artacaktır. Dolayısıyla mekanik direnci maksimum yapan granülometri bulunmuş olacaktır.

Çalışmada granülometri için Talbot tarafından geliştirilen aşağıdaki matematiksel ifade kullanılmıştır (41).

$$p = (d/D)^n \times 100$$

D : Maksimum dane boyutu (38 mm alınmıştır)

d : Elek boyutu

p : % geçen miktar

n : üs

Birim hacim ağırlığı maksimum yapan (n) değerinin tespiti için bir dizi deney yapılmıştır. Deneylerde 3 lt'lik kalıplar kullanılmış olup, normal proktor enerjisine eşdeğer 2,5 x 30,5 x 75 kg.cm/lt lik sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. Karışımlarda kullanılan cüruf havada kurutulmuş olarak tabii su muhtevasında alınmıştır. Kullanılan elekler ise A.S.T.M. elek serisinden 1,5", 1", 3/4", 1/2", 3/8", No.4, No.10, No.40, No.200 elekleridir. Bu deney dizisine ait sonuçlar Bölüm 4, Tablo 4.7 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. n= (0,5) değerinde en iyi sonucu veren granülometri K.G.M'nin kabul ettiği granülometri sınırlarına da uymaktadır.

#### 3.4.1.2. Ağırlıkça Optimum Granüle Cüruf Yüzdesinin Tespiti

Optimum granüle cüruf yüzdesinin tespiti bilhassa hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımları için çok önemlidir. Zira bağlayıcı etkisi ile granüle cürufun hidrolik aktivitesi uyarılmaktadır. Bu oran bağlayıcısız cüruf karışımları için de aynı alınmıştır.

Seçilen granülometri ve su muhtevasına uygun olarak farklı granüle cüruf yüzdelerinde ve sabit bir çimento yüzdesinde hazırlanan karışımlar serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Granüle cüruf yüzdesi ile 7 günlük serbest basınç direncinin değişimi 4.Bölüm Tablo 4.8'de görülebilir. Uygulanan granülometri, karışımdaki granüle cüruf miktarının % 17 den büyük değerleri için bozulmaktadır. Bu yüzden optimum granüle cüruf yüzdesi (% 17) olarak alınmıştır.

### 3.4.1.3. Optimum Su Muhtevasının Tespiti

Yukarıda,  $p = (d/38)^{0,5} \times 100$  şeklinde tayin edilen granülometri'de hazırlanan cüruf karışımlarına kompaksiyon deneyi uygulanmıştır. Karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasını tayini için yapılan bu deney standart şartlarda yapılmıştır (56). Ancak çalışmada kullanılan malzemenin iri agrega ihtiva etmesi nedeniyle daha hassas bir netice elde edebilmek için 3 lt'lik bir kalıp kullanılmıştır. Standart kalıp için uygulanan sıkıştırma enerjisine eşdeğer olarak hesaplanan  $2,5 \times 30,5 \times 75$  kgcm/lt lik enerji hazırlanan karışımlara 3 tabaka halinde uygulanmıştır. Deney sonuçları 4.Bölüm Tablo 4.9 ve Şekil 4.3'de verilmiştir.

### 3.4.1.4. Mekanik Direncin İncelenmesi (CBR Deneyi ile)

Bağlayıcısız karışımların karayolu üstyapısında stabilite yönünden kullanılabilirliğine kriter olarak, "Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi" esas alınmıştır. Deney, AASHTO T-193 Metoduna (ASTM D-1883 TS-1900) göre uygulanmıştır (56).

Kaliforniya Taşıma Oranı deneyi, Kaliforniya Eyaleti Karayolları Dairesi tarafından, temel ve alttemel malzemelerinin kalitelerini ölçmek amacı ile 1929 yılında başlatılıp 1938 yılında sonuçlanan bir araştırmanın sonucu olarak ortaya çıkmıştır. II.Dünya Savaşı sırasında (1940) Amerikan ordu istihkam grubunca (U.S.CORPS OF ENGINEERS) deney geliştirilip, yol ve bilhassa hava alanları esnek üstyapıların kalınlığının tayininde kullanılmaya başlanmıştır. Metod diğer memleketlerde de benimsenmiş ve halen gerilme-birim deformasyon açısından incelenen teorik hesap metodlarına nazaran daha iyi sonuçlar verdiği için, bazı sakinçalarına rağmen büyük ölçüde kullanılmaktadır (63).

CBR, bir malzemenin sabit bir hızla ilerleyen standart çaptaki bir pistonun penetrasyonuna karşı gösterdiği direncin, standart malzemenin aynı penetrasyon için gösterdiği dirence oranıdır ve yüzde olarak ifade edilir.

CBR deneyi, laboratuvarında iç çapı 6 inç olan silindir metal kalıp içinde 5 inçlik yükseklikte hazırlanan numuneler üzerinde yapıldığı gibi, üstyapının oturacağı taban toprağının mukavemetini veya serilmiş temel ve alttemel tabakalarının mukavemetini yerinde ölçmek için arazide de yapılmaktadır.

Daha önce de değinildiği gibi, bir zeminin CBR değeri, standart kalıp içinde bulunan zeminin 1,95 inç çapındaki (3 in<sup>2</sup>) pistonun saniyede 0,05 inç'lik penetrasyonuna karşı gösterdiği direncin aynı pistonun aynı hızla standart kırmataş malzeme içindeki aynı miktar penetrasyonu için tespit edilmiş olan dirence oranıdır ve yüzde olarak ifade edilir. Mukayeseye esas alınan penetrasyon miktarı genel olarak 0,1 inçdir. Şayet 0,2 inç penetrasyondaki direnç 0,1 inçlik penetrasyondaki dirençten daha büyük olursa, deney aynı şartlarda tekrarlanır ve yine 0,2 inç'lik penetrasyon direnci daha büyük çıkarsa bu değer o malzemenin CBR değeri olarak kabul edilir. Aksi takdirde 0,1 inç'lik penetrasyondaki değer esas alınır.

Laboratuvarında CBR değeri bulunacak malzemeye, genellikle önce modifiye proktor şartlarında kompaksiyon deneyi yapılır. Böylece optimum su muhtevası ile maksimum kuru birim hacim ağırlık saptanmış olur. Bilahare bulunan optimum su muhtevasında hazırlanan 6 kg'lık malzeme, CBR kalıbında 5 tabaka halinde ve her tabakaya 18 inçten düşen 10 lt'lik bir tokmakla 55 darbe vurulmak suretiyle sıkıştırılır. Daha sonra sıkıştırılan bu numunelerin CBR değerleri tespit edilir.

Islatılmış (soaked) CBR ise aynı şartlarda hazırlanan numunelerin 4 gün suda bekletildikten sonra bulunan CBR' değerleridir.

Yukarıda izah edilen hususlar çerçevesinde ve önceden saptanan granülometride % 17 granüle ve % 83 hava soğutmalı kırılmış cüruf ile oluşturulan 7 kg'lık malzemeye, her seferinde eklenen su miktarı ar-

tırılmak suretiyle kompaksiyon deneyi uygulanmıştır (modifiye proktor şartlarında). Her su muhtevası için ayrıca CBR deneyi de yapılmış böylece su muhtevası ile birim hacim ağırlık ve CBR ilişkileri elde edilmiştir. Bu şekilde kaçınılması zor deneysel hata taşıyabilecek tek bir su muhtevasındaki CBR yerine bir kaç su muhtevasında elde edilen CBR değerleri sayesinde su muhtevası ile CBR arasında bir ilişki kurulmuş ve bundan yararlanılarak da maksimum CBR bulunmuştur. Çalışma sırasında elde edilen deney sonuçları 4.Bölüm, Tablo 4.10-15 ve Şekil 4.4.9 da verilmiştir. Ayrıca ıslatılmış CBR değerlerini elde etmek için kalıptaki numuneler 4 gün su içinde bırakılarak da deneyler tekrarlanmış ve alınan sonuçlar yine 4.Bölüm, Tablo 4.17-20 ve Şekil 4.10-13 de gösterilmiştir. Su muhtevası ile CBR ıslatılmış CBR ve birim hacim ağırlık değişimleri ise 4.Bölüm Şekil 4.14'de görülebilir.

#### 3.4.2. Hidrolik Bağlayıcılı Cüruf Karışımları

Bu başlık altında çimento ve kireç katkılı cüruf karışımları incelenmiştir.

##### 3.4.2.1. Çimento Katkılı Cüruf Karışımları

Erdemir hava soğutmalı kırılmış cürufu ile granüle cüruf karışımlarına Darıca Portland çimentosundan % 1-3-5-7 oranlarında eklenmek suretiyle her bir çimento yüzdesi için 3 adet briket hazırlanmıştır.

Uygulanan granülometri optimum granüle cüruf ve su muhtevaları için, bağlayıcısız karışımlar kısmında yukarıda anlatılan esaslara bağlı kalınmıştır. Yalnız su muhtevası, eklenen çimento ağırlığına göre bir miktar artırılmıştır. Hazırlanan numuneler 7 gün süreyle parafinle kaplanarak oda sıcaklığında küre tabi tutulduktan sonra kırılmış ve serbest basınç dirençleri bulunmuştur. Deneylerde elde edilen sonuçlar 4.Bölüm Tablo 4.21 ve Şekil 4.15 de verilmiştir.

Bulunan değerler Karayolları Genel M¼d¼rl¼ę¼'nce çok y¼ksek trafik-  
li yollarda kullanılan imento bağlayıcılı gran¼ler temel için aranan  
7 g¼nl¼k serbest basınç mukavemeti (y¼kseklik/çap oranı 2/1 olan silin-  
dir için  $28 \text{ kg/cm}^2$ ) ile karşılaştırılmıştır.

#### 3.4.2.2. Kireç Katkılı C¼ruf Karışımları

Bu karışımlar, bağlayıcısız ve imento bağlayıcılı c¼ruf karı-  
şımlarında anlatılan esaslar dahilinde hazırlanan c¼ruf karışımlarına  
% 3-5-7-9 oranında kireç eklenerek elde edilmişlerdir. Hazırlanan numu-  
nelere uygulanan serbest basınç deneyi ile tespit edilen 7 g¼nl¼k ser-  
best basınç dirençleri 4.B¼l¼m Tablo 4.22 ve Şekil 4.16'da g¼r¼lebilir.  
Kireç katkılı c¼ruf karışımlarına ayrıca CBR deneyi de uygulanmıştır.

Her bir kireç y¼zdesi için farklı su muhtevalarında CBR deneyi  
yapılarak, CBR maksimum yapan su muhtevası saptanmıştır. Elde edilen  
değerler 4.B¼l¼m, Tablo 4.23 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.

Kireç katkılı c¼ruf karışımları için elde edilen 7 g¼nl¼k basınç  
mukavemetleri, Karayolları Genel M¼d¼rl¼ę¼'nce çok y¼ksek trafikli  
yollarda kullanılan, imento bağlayıcılı gran¼ler temel için aranan  
7 g¼nl¼k basınç direnci ile karşılaştırılmıştır.

Çimento ve kireç katkılı c¼ruf karışımları için yapılan serbest  
basınç direnci deneyinde;  $200 \text{ cm}^2$  kesit alanlı ve 6 lt hacmindeki si-  
lindirik kalıplar (6 in, 12 inç) kullanılmıştır.

Numune çapının tayininde, numune çapının maksimum dane boyutuna  
oranı olan 4:1 değeri esas alınmıştır (41).

Hazırlanan karışımların, ¼ ayrı tabaka halinde deney kalıpların-  
da sıkıştırılmasında, her bir tabakaya uygulanan sıkıştırma enerjisi,  
normal proktor enerjisine eşdeğer olacak Şekilde hesaplanmıştır.

### 3.4.3. Bitümlü Cüruf Karışımları

Bitümlü cüruf karışımları; Erdemir çelik cürufu, granüle cüruf ve portland çimentosundan (filler) oluşan agregaya karışımlarına asfalt çimentosunun (AC 75-100) eklenmesiyle elde edilmişlerdir. Bu karışımların, karayolu üstyapısının kaplama tabakasında asfalt betonu olarak kullanılabilirliği, ilgili şartnamelere göre araştırılmıştır.

Temel ve alttemel tabakalarındaki agregaya gereksiniminin kaplama tabakasına nazaran çok fazla olması ve hava soğutmalı kırılmış cüruf üretiminin, çelik cürufu üretiminden daha büyük olması ve ayrıca hava soğutmalı kırılmış cürufun soyulma direncinin yetersizliği gibi faktörlerin değerlendirilmesi neticesinde Erdemir cüruf türlerinden hava soğutmalı kırılmış cüruf bu karışımda kullanılmamıştır.

Bitümlü cüruf karışımları için granülometri seçiminde T.C.K. Şartnameleri esas alınarak aşınma tabakası Tip C granülometri ortalamaları göz önüne alınmıştır. Uygulanan granülometri, Bölüm 4, Tablo 4.24 de ve Şekil 4.23'de verilmiştir.

Karışımların hazırlanmasında ve optimum asfalt çimento yüzdesinin bulunmasında, aşağıda özetlenen "Marshall Stabilite Deneyi" uygulanmıştır. Karışımlarda agregaya olarak kullanılan çelik cürufu ve granüle cüruf yüzdeleri değiştirilerek ayrı Marshall deney grupları teşkil edilmiş ve bu gruplar Tablo 4.25a da gösterilmiştir.

Bitümlü karışımlara uygulanan Marshall Deneyi, karışımdaki granüle cüruf miktarının artması ile şartnamelerde aranan değerlerden uzaklaşıldığını göstermiştir. Bu nedenle toplam agregaya miktarının % 10'undan fazla granüle cüruf kapsayan karışımlar için yapılan deney sonuçları çalışmaya dahil edilmemiştir.

#### MARSHALL STABİLİTE DENEYİ (ASTM D-1559) (18), (57)

Bu deney, içinde asfalt çimentosu ile dane büyüklüğü 25 mm'ye kadar agregaya içeren karışımlara uygulanır. Marshall cihazı yardımıyla bitümlü karışımın plastik akma direnci tayin edildikten sonra hesaplara geçilerek asfalt çimento yüzdesi ile pratik birim ağırlık, stabilite,

akma, asfaltla dolu boşluk yüzdesi ve boşluk hacmi ilişkileri çıkarılır. Elde edilen söz konusu değerlerin şartnamelerde aranan şartlara uygunluğu kontrol edildikten sonra optimum asfalt çimento yüzdesi tayin edilir.

Deney numuneleri, her bir deney grubu için ayrı olmak üzere aynı asfalt çimento (AC) yüzdesi için üç adet olarak hazırlanmıştır. Karışımlarda kullanılan (AC) yüzdeleri % 4-6,5 arasında değiştirilmiştir.

Bir deney numunesi için gerekli olan agrega ve AC miktarları Tablo 4.25-26'da verilmiştir.

Karıştırma sıcaklığı  $180^{\circ}\text{C}$ , sıkıştırma sıcaklığı ise  $150^{\circ}\text{C}$  olarak alınmıştır. Karıştırma işlemi, önce ısıtılan agreganın kuru olarak karıştırılması, daha sonra ortasına açılan çukura belirlenen sıcaklıkta AC konularak, agrega bitümlü malzeme ile iyice sarılıncaya kadar mikserde karıştırılması ile tamamlanmıştır.

Hazırlanan sıcak karışım kalıp içine aktarıldıktan sonra 15 defa kenarı, 10 defa da ortası şişlenmiş numune üzerine filtre kağıdı konulduktan sonra sıkıştırma tokmağı  $457\text{ mm}$ 'den serbest olarak düşürülerek 50 darbelik sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. Aynı işlem, numune ters çevrilerek de tekrarlanmıştır.

Braketler, numune çıkartma cihazıyla kalıptan alınarak laboratuvar sıcaklığında 1 gün bekletildikten sonra havada ve suda ( $25^{\circ}\text{C}$ ) tartımları alınmış ve yükseklikleri 3 ayrı yerden kumpasla ölçülmüştür.

Sıcaklığı  $60^{\circ}\text{C}$  olan su banyosunda 40 dakika bekletilen numuneler daha sonra Marshall cihazından  $51\text{ mm/dak}$ 'lık sabit bir deformasyon hızıyla yüklenmişlerdir. En büyük yük ve akma değeri saptandıktan sonra, stabilite değeri olarak okunan değerler, numune yüksekliğine bağlı olarak kullanılan düzeltme faktörleriyle çarpılarak değerlendirilmeye esas alınacak stabilite değerleri teabit edilmiştir.

Deneyde alınan sonuçlar; 1.nolu Marshall Deneyi grubu için 4.Bölüm Tablo 4.27 ve Şekil 4.18 den 2 nolu Marshall deney grubu için de Tablo 4.28 ve Şekil 4.19'da verilmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan agrega karışımlarının özgül ağırlıkları ise Tablo 4.29'da görülebilir.

#### 3.4.3.1. Bitümlü Cüruf Karışımlarının Su Tesirlerine Karşı Dayanırlılığının Araştırılması

Asfalt betonu olarak kullanılabilirliği araştırılan bitümlü cüruf karışımları, uygulamada önemli ölçüde su etkilerine maruz kalabileceğinden, karışımın özelliklerinin su tesirlerine bağlı olarak değişiminin bilinmesi çok önemlidir.

Bu araştırma ile, bitümlü cüruf karışımlarının, Marshall Deneyi ile elde edilen uygun özelliklerinin; su etkileri ile ne şekilde değişeceği saptanmıştır.

Araştırmada yukarıda anlatılan Marshall Deneyi şartlarına uygun olarak % 5.5 AC yüzdesinde bir seri numune hazırlanmıştır. Bu numuneler aşağıda gösterildiği gibi iki ayrı agrega karışımından oluşmaktadır :

Agrega karışım yüzdeleri

Çelik cürufu (BOS)	Granüle cüruf (GS)	Portland çimentosu (PÇ)
93	-	7
88	5	7

Hazırlanan numuneler, ölçülen pratik özgül ağırlıklarına göre 3'erli olarak gruplandırılmışlardır. Bu grupların teşkilinde, 4.Bölüm Tablo 4.30 ve Tablo 4.31 den de görülebileceği gibi pratik birim ağırlıkların  $\pm 0,02$  toleransla yakınlığı esas alınmıştır. Belirtilen toleransa uymayan numuneler ise atılarak araştırmada kullanılmamıştır.

Açıklanan esaslar dahilinde hazırlanan numunelerin, değişik sürelerdeki (1,7,30 gün) su etkisinden sonra marshall stabiliteleri ve hacimsel genişleme katsayıları belirlenmiştir. Hacimsel genişleme katsayısı silindirik numunenin ortalama yükseklğine bağlı olarak geometrik olarak hesaplanmıştır.

Bu araştırmanın sonuçları 4.Bölüm Tablo 4.30-31 ve Şekil 4.20-21 de verilmiştir.

#### 3.4.3.2. Bitümlü Cüruf Karışımlarının Don Etkisine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması

Asfalt betonu teşkilinde kullanılacak bitümlü cüruf karışım, kullanıldığı bölgenin iklim özelliklerine göre farklı don etkilerine maruz kalabilir. Bu durumda normal Marshall Deneyi şartlarında elde edilen özelliklerin, don etkisine bağlı olarak da tahkik edilmesi gereklidir.

Don etkisiyle karışımın sahip olduğu uygun özellikler beklenen süreden önce bozulabilir.

Bu araştırmada kullanılan üç numune, kısım 3.4.3.1'de anlatılan esaslar dahilinde hazırlanan numune serisinden seçilmiştir (Tablo 4.30).

Numuneler önce 24 saat ( $-20^{\circ}\text{C}$ )'de donmaya, daha sonra da oda sıcaklığında (yaklaşık  $20^{\circ}\text{C}$ ) çözölmeye bırakılmışlardır.

Söz konusu işlemin 35 kere tekrarlanması sonunda, numunelerin stabiliteleri, Marshall Stabilitite Deneyi ile tespit edilmiştir. Ayrıca numunelerin don etkisinden dolayı ağırlıklarında meydana gelen kayıplar da hesaplanmıştır. Deneyde kullanılan silindirik numunelerin üst yüzeylerinin haricindeki tüm yüzeyleri parafinden oluşturulan bir zarla kaplanmıştır.

Donma deneyi sonuçları; 4.Bölüm Tablo 4.30 da görölebilir.

#### 4. BÖLÜM

##### ÇALIŞMADA YAPILAN DENEYLERİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

3.Bölümde belirtilen esaslara göre yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar bu bölümdeki tablo ve şekillerde verilmiştir.

Aşağıda, şartnamelerce üstyapı tabakalarında veya bu tabakalarda kullanılacak malzemelerde aranan ve 1.Bölümde belirtilmiş olan özellikler esas alınarak, önce Erdemir cüruf türlerinin fiziksel özellikleriyle daha sonra bu cüruf türleri ile hazırlanan karışımların mekanik özellikleri ile ilgili deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır.

Cürufun üstyapının kaplama tabakasında kullanılabilirliğinin ekonomik yönden incelendiği Ekonomik Etüd, teknik değerlendirmenin sonunda verilmiştir.

##### 4.1. Erdemir Cüruf Türlerinin Fiziksel Özellikleri ile ilgili Deneylerin Değerlendirilmesi

Erdemir cüruf türlerinin fiziksel özelliklerinin tayini için yapılan deneylerde alınan sonuçlar Tablo 4.1-2-3-4-5 'de görülebilir.

Sonuçların incelenmesinden, cüruf türlerinden yalnız hava soğutmalı kırılmış cürufun (BF) soyulma direncinin, aranan limit değer ( % 50) altında olduğu görülmektedir. Soyulma direncinin yetersizliği, bitümlü karışımda kullanılacak agrega için önemlidir. Bu nedenle (BF), bitümlü karışımlarda kullanılmamıştır.

Erdemir cüruf türlerinin fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesi ile ilgili diğer hususlar aşağıda özetlenmiştir.

Çelik cürufunun (BOS) diğer cüruf türlerine nazaran daha üstün özelliklere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bilhassa soyulma direnci çok yüksek değerdedir. Cürufun literatürde geçen dona karşı dayanıklılığı ile ilgili üstün özelliği, Erdemir cürufu türlerinde de bulunmuş-

tur. Cürufun diğer bir üstün özelliği olan kayma direncinin ise, T.C.K. Genel Müdürlüğü'nde yaptırılan cilalama deneyinde yüksek değerler alınmamasına karşın, (0,50) limit değerini aştığı tespit edilmiştir.

Tablo 4.1. Erdemir Granüle cürufuna ait Granülometri

Elek boyutu	Geçen (%)
3/8"	100
No.4	99
No.10	90
No.40	21
No.80	6
No.200	2

Tablo 4.2. Özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, su absorpsiyonu deneyleri ile ilgili sonuçlar

DENEY ADI	ERDEMİR CÜRUF TÜRÜ				
	BF* (Kaba)	BF (ince)	G.S**	BOS (Kaba)***	BOS (ince)
Özgül Ağırlık	2,791	2,777	2,516	3,794	3,882
Su Absorpsiyonu (%)	4.71			0.8	
Birim Hacim Ağırlık	1.300		0.980		1.795

\* BF; Hava soğutmalı kırılmış cüruf

\*\* GS; Granüle cüruf

\*\*\* BOS; Çelik cürufu

Tablo 4.3. Los Angeles Aşınma Deneyi Sonuçları

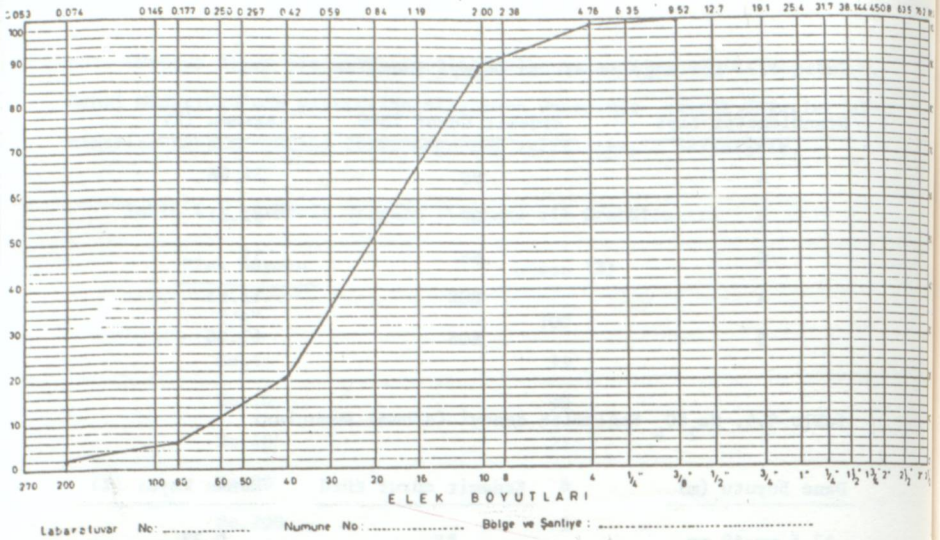
Granülometri tipi	Erdemir Cüruf Türü	Aşınma (%)
A	BF	32.98
B	BF	32.21
C	BF	31
A	BOS	13.83
B	BOS	13.55

Tablo 4.4. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Sağlamlık deneyi (donma) sonuçları

Dane Boyutu (m)	Erdemir cüruf türü	Donma kaybı (%)
37,5 mm-19 mm	BF	0.73
19 mm -4,75 mm	BF	0.97
9,5 mm-4,75 mm	BF	12.1
4,75 mm-2,36 mm	BF	10.2
2,36 mm-1,18 mm	BF	7.3
1,18 mm-600 m	BF	9.6
600 m - 300 m	BF	13.1
4,75 mm-2,36 mm	BOS	3.1
2,36 mm-1,18 mm	BOS	5.1
1,18 mm- 600 m	BOS	4.2
600 m - 300 m	BOS	7.6
300 m- 150 m	BOS	8.1

KARAYOLLAR GENEL MÜDÜRLÜĞÜ  
İ.Z.B.C.L.G.E.....Müdürlüğü

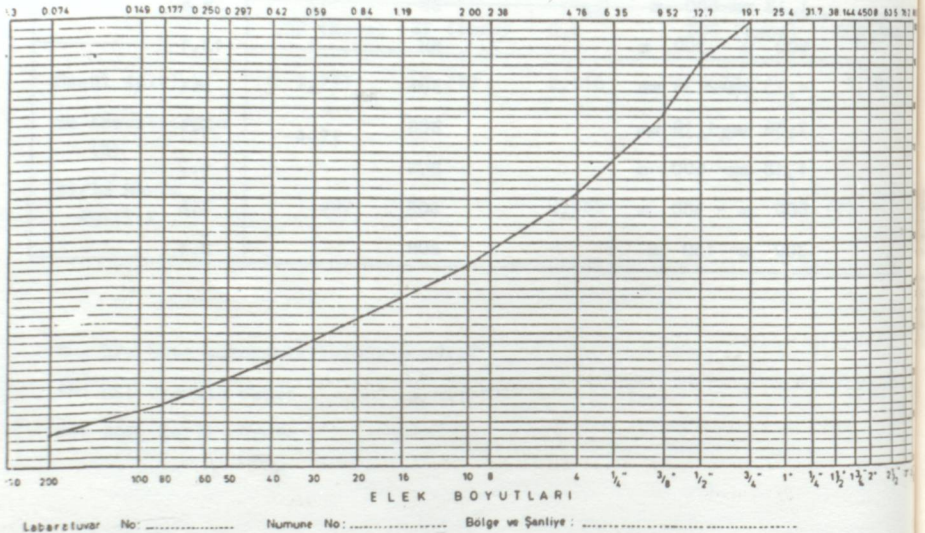
7580133 - ELEK ANALİZİ GRAFİĞİ  
ELEK AÇIKLIĞI (mm.)



Şekil 4.1. Granüle Cüruf Granülometri Eğrisi

KARAYOLLAR GENEL MÜDÜRLÜĞÜ  
İ.Z.B.C.L.G.E.....Müdürlüğü

7580133 - ELEK ANALİZİ GRAFİĞİ  
ELEK AÇIKLIĞI (mm.)



Şekil 4.23. Bitümlü karışımlara uygulanan granülometri eğrisi (Tip C ort)

Tablo 4.5. Soyulma Direnci, cilalanma katsayısı, yassılık indeksi  
Deney Sonuçları

Deney Adı	Erdemir Cüruf türü	Deney Sonucu
Soyulma Direnci (%)	BF	30-35
"	BOS	90-95
Cilalanma katsayısı (%)	BF	58
"	BOS	53
Yassılık İndeksi (%)	BF	11.53

#### 4.2. Erdemir Cüruf Türleri ile Hazırlanan Karışımların Mekanik Özellikleri ile ilgili deneylerin Değerlendirilmesi

Mekanik özelliklerle ilgili deneylerin değerlendirilmesinde, Ek 1'de verilen regresyon analizi programından yararlanılmıştır. Regresyon analizi ile her bir deney için, bağımlı ve bağımsız iki değişken arasında doğrusal, ikinci derece, üçüncü derece vb. matematiksel bir ilişkiler aranmıştır. Bulunan ilişkinin derecesi de, hesaplanan doğrusal korelasyon veya katlı korelasyon katsayıları ile belirlenmiştir (58), (59).

Her bir deney için yapılan regresyon analizi yardımıyla en uygun korelasyonu veren denklemler, Tablo 4.32'de gösterilmiştir. Tabloda görülen denklemlerin elde edilmesinde, en yüksek korelasyon yerine, o ilişkinin bilinen değişimine uygun olanlar arasındaki en yüksek korelasyonu veren seçilmiştir. Kurulan ilişki deneydeki (bağımsız değişkenler) için değerlendirilerek eğriler çizilmiştir. Bağımsız değişkenlerin dışındaki değerler için, ilişkinin alacağı şekil önemli olmamaktadır. Zira ilgili şartnamelerde bağımsız değişken olarak alınan değerler genellikle belirli sınırlar arasındadır. Örneğin asfalt beton karışımlarda kullanılacak asfalt çimentosu miktarı % 4-% 7 arasındadır (Şekil 4.18)

Tablo 4.32. Deney Sonuçlarının Regresyon Analizi ile Değerlendirilmesi

İlişki Tipi (Şekil No)	Regresyon Katsayıları	Korelasyon Katsayısı
Granülometri-Birim Hacim Ağırlık (Şekil 4.2)	$y = 1,24 x^3 - 2,178 x^2 + 1,915 x + 1,552$	0,82
Su Muhtevası-Kuru Birim Hacim Ağırlık (Şekil 4.3)	$y = -843,223x^3 + 199,9x^2 - 13,02x + 2,188$	0,98
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.4-Deney 1)	$y = -6707,08 x^2 + 8895,4 x - 25,11$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.4-Deney 2)	$y = -22673,17 x^3 + 19388,41 x^2 + 4568,7 x - 90,55$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.5-Deney 3)	$y = -125908 x^3 + 75393,541 x^2 - 1902,7 x + 54,43$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.5-Deney 4)	$y = -48429,61 x^3 + 14531,55 x^2 + 15262,684 x - 118,575$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.6-Deney 5)	$y = 29409,03 x^3 + 10925,62 x^2 + 13246,8 x - 462,311$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.6-Deney 6)	$y = -17181,355 x^3 + 22510,139 x^2 + 2855,03 x - 46,61$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.7-Deney 7)	$y = -15559,8 x^3 + 23452,1 x^2 - 2538,5 x + 83,312$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.7 Deney 8)	$y = -56708,9x^3 + 10707,8x^2 + 14572,2x - 254,9$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.8-Deney 9)	$y = -966,7 x^3 + 4210,226 x^2 + 1025,3 x - 15,393$	0,99

Tablo 4.32'nin devamı

Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.8-Deney 10)	$y = -96175,2 x^3 + 43103,7 x^2 + 8025,9 x - 32,956$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.9-Deney 11)	$y = -7935,87 x^3 + 11215,04 x^2 + 691,45 x - 4,784$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.10-Deney 13)	$y = -821,93 x^3 + 6094,723 x^2 + 4815,28 x - 148,658$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.10-Deney 14)	$y = -3487,471 x^3 - 10200,14 x^2 + 14003,09 x - 308,5$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.11-Deney 15)	$y = -65373,8 x^3 + 46355,6 x^2 + 1503,8 x - 8,504$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.11-Deney 16)	$y = -41155,6 x^3 + 20370,8 x^2 + 7717,235 x - 144,3$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.12-Deney 17)	$y = 39953,1 x^3 - 16758,9 x^2 + 8995,5 x - 200,82$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.12-Deney 18)	$y = -97723,4 x^3 + 41310,3 x^2 + 9183,8 x - 140,6$	0,99
Penetrasyon-Basınc (Şekil 4.13-Deney 19)	$y = -29389,8 x^3 + 19851,7 x^2 + 791,6 x + 80,66$	0,99
Su Muhtevası-CBR (Şekil 4.14)	$y = -70240,789 x^2 + 11537,607 x - 324,148$	0,92
Su Muhtevası-İslatılmış CBR (Şekil 4.14)	$y = -226181,12 x^2 + 45962,971 x - 2195,931$	0,986
Su muhtevası- Kuru Birim Hacim Ağırlık (Modifiye Proktor) (Şekil 4.14)	$y = -2178,452 x^3 + 525,03 x^2 - 35,73 x + 2,622$	0,98

Tablo 4.32'nin devamı

Çimento yüzdesi-7 gün serbest basınç direnci (s.b.d) (Şekil 4.15)	$y = -82444,069 x^3 + 10756,3 x^2 - 169,06 x + 25,95$	1
Kireç yüzdesi-S.b.d (Şekil 4.16)	$y = -4231,2 x^2 + 387,59 x + 16,285$	0,99
Su muhtevası-CBR % 3 Kireç katkılı (Şekil 4.17)	$y = -57880,37 x^2 + 12108,57 x - 518$	0,99
Su muhtevası-CBR % 5 kireç katkılı (Şekil 4.17)	$y = -13393,3 x^2 + 3203,88 x - 83,413$	0,75
Su muhtevası-CBR % 7 Kireç katkılı (Şekil 4.17)	$y = -308938,59 x^2 + 62615,02 x - 3080,748$	1
% AC-pratik özgül ağırlık (Şekil 4.18)	$y = -254,92 x^2 + 30,224 x + 2,308$	0,91
% AC-Stabilite (Şekil 4.18)	$y = 1598644,5 x^2 + 171614,56 x - 3638,673$	0,957
% AC-Akma (Şekil 4.18)	$y = 284,5 x^2 + 82,488 x - 1,501$	0,996
% AC-Asfaltla dolu boşluk (Şekil 4.18)	$y = -670793,78 x^3 - 120993,9 x^2 - 5934,941 x - 152,905$	0,987
% AC-Boşluk (Şekil 4.18)	$y = 1,097 x^3 - 17,349 x^2 + 87,63 x - 136,243$	0,992
% AC-Pratik özgül ağırlık (Şekil 4.19)	$y = -150,67 x^2 + 18,67 x + 2,404$	0,99

Tablo 4.32'nin devamı

% AC-Stabilite (Şekil 4.19)	$y = -862192,5 x^2 + 94664,489 x - 1786,68$	0,92
% AC-Akma (Şekil 4.19)	$y = 112820,27 x^3 - 16307,163 x^2 + 775,786 x - 9,206$	0,59
% AC-Asfaltla dolu boşluk (Şekil 4.19)	$y = -15234,212 x^2 + 2842,99 x - 41,172$	0,99
% AC-Boşluk (Şekil 4.19)	$y = 4635,26 x^2 - 757,87 x + 34,387$	0,998
Su etkisi-Stabilite (Şekil 4.20)	$y = 167948,17 / (x + 154,866)$	0,89
Su etkisi-Stabilite (Şekil 4.21)	$y = 218446,93 / (x + 201,618)$	0,98

Tablo 4.32 incelendiğinde, yapılan deneylere ait korelasyon katsayıları genellikle 1'e yakın olduğu, başka bir deyişle, deney parametreleri arasında kurulan matematiksel ilişkilerin derecesinin çok iyi olduğu görülmektedir (söylenebilir)

Mekanik özelliklerle ilgili deney sonuçlarının, gerek kurulan bu ilişkilere, gerek şartnamelerde aranan değerlere göre değerlendirilmesi aşağıda özetlenmiştir.

Bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı cüruf karışımlarının hazırlanmasına esas olan granülometri, yapılan araştırma ile  $p = (d/38)^{0,5}$  x 100 şeklinde tayin edilmiş (Tablo 4.7) ve granülometri ile birim hacim ağırlık arasında kurulan ilişkiden Şekil 4.2'de görülen eğri çizilmiştir. 0,82 gibi yüksek sayılabilecek korelasyonla elde edilen granülometri, aynı zamanda T.C.K.Genel Müdürlüğü'nün temel ve alttemel

tabakaları için esas aldığı granülometri limitlerine de uymaktadır.

Su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlık değişimini incelemek için yapılan kompaksiyon deneyinde; maksimum kuru birim hacim ağırlık 0,10 su muhtevasında,  $2,060 \text{ t/m}^3$  olarak bulunmuştur (Tablo 4.9). Bu deneye ait Tablo 4.32'de kurulan ilişki dikkate alınarak Şekil 4.3'de çizilen üçüncü derece eğri, bu deneyin genel şekline uymamakla beraber, ilişkinin derecesi 0,98 gibi oldukça büyük değer almaktadır.

Bağlayıcısız cüruf karışımlarının stabilitesi (CBR) ile ilgili olarak yapılan ve sonuçları Tablo 4.10-15'de gösterilen deneylere ait matematiksel ilişkiler Tablo 4.32'de verilmiştir. Bu ilişkiler dikkate alınarak çizilen eğriler ise Şekil 4.4-9'da görülebilir. (0,99) gibi çok yüksek korelasyonla elde edilen bu sonuçlar, regrasyon analizi ile değerlendirilerek en uygun korelasyona (0,92) göre elde edilen su muhtevası -CBR ilişkisi Tablo 4.32'de „su muhtevası -CBR değişimi ise Şekil 4.14'de görülebilir. Bu ilişkiden maksimum CBR, (% 8.2) su muhtevasında (% 149,63) bulunmuştur.

Benzer şekilde, Tablo 4.17-20'de gösterilen ıslatılmış CBR deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile çizilen eğriler Şekil 4.10-13 'de görülebilir. ıslatılmış CBR deneyi sonuçları, regresyon analizi ile değerlendirilerek, en uygun korelasyona (0,986) göre elde edilen su muhtevası ıslatılmış CBR ilişkisine ait bağıntı ve Şekil; Tablo 4.32 ve Şekil 4.14'de verilmiştir. Maksimum ıslatılmış CBR, (% 10,16) su muhtevasında (% 139,13) olarak hesaplanmaktadır.

Görüldüğü gibi, ıslatılmış CBR değerleri de T.C.K.Genel Müdürlü'nün esas aldığı alttemel ve temel tabakaları için geçerli olan CBR değerlerinin (% 100) oldukça üzerindedir.

Çimento ve kireç katkılı cüruf karışımlarına uygulanan serbest basınç deneyleri için Tablo 4.21-22 de verilen sonuçlar, Tablo 4.34'de verilen ilişkilere göre değerlendirilerek, Şekil 4.15-16'daki eğriler çizilmiştir.

Hemen hemen (1,00) olarak elde edilen korelasyon katsayısı bu deneylerde seçilen ilişkinin çok uygun olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi, çok yüksek trafikli yollarda temel tabakasında aranan 7 günlük serbest basınç direnci ( $28 \text{ kg/cm}^2$ ) değerine, % 3 çimento katkısında ulaşılmakta, % 5 kireç katkısında ise bu değere yaklaşılmaktadır.

Kireç katkılı cüruf karışımlarının hazırlanmasında, uygulanan su muhtevasının kontrolüne gerek duyulmuş ve değişik yüzdelerde cüruf içeren karışımlar CBR deneyine tabi tutulmuşlardır. Tablo 4.23'de yerilen deney sonuçlarının, yukarıda anlatılan esaslara göre değerlendirilmesi ise Şekil 4.17'de yapılmıştır. Bu sonuçlar, uygulanan su muhtevasında kayda değer bir değişiklik gerektirmeyeceğini göstermiştir. Kireç katkılı karışımlarda 7 günlük serbest basınç direncinin belirli kireç yüzdesinden sonraki olumsuz değişimi, priz hızı ve optimum granülometride oluşan bozulmaya bağlanmıştır. Kriter olarak uzun bir süre alındığında, mukavemet kireç yüzdesindeki artışla yükselmektedir. Kireç katkılı karışımlarda, yüksek kireç yüzdeleri için priz hızı yavaşlamaktadır.

Ağırlıkça % 93 çelik cürufu ve % 7 portland çimentosundan meydana gelen agrega ile oluşturulan bitümlü karışıma uygulanan Marshall deneyi sonuçları Tablo 4.27'de verilmiştir. Bu değerlerin regresyon analizi ile değerlendirilmesi sonucu elde edilen % AC ile pratik birim ağırlık, stabilite, akma, asfaltla dolu boşluk ve boşluk yüzdeleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.18'de eğrilerle gösterilmiştir. Bu ilişkilerin derecesini ifade eden korelasyon katsayıları ise Tablo 4.32'de de görülebileceği gibi (0,91-0,996) arasında değişmektedir. Şekil 4.18'deki eğriler aynı zamanda deneyin genel yapısına da uymaktadır. Deney sonuçları da şartnamelerin aradığı değerlerle tam bir uyum sağlamakta ve % 5.5 gibi ideal bir optimum asfalt çimento yüzdesi hesaplanmaktadır. (Şekil 4.18).

Toplam agrega ağırlığının % 10 u kadar granüle cüruf ilave edilerek hazırlanan yeni bitümlü karışımın Marshall deneyi sonuçları ve benzer değerlendirmeye göre çizilen deney eğrileri Tablo 4.28 ve Şekil 4.19-da verilmiştir. Şekil 4.19'un incelenmesinden, deney sonuçlarının, şartnamelerin aradığı değerlere kısmen uyduğu görülür. Boşluk yüzdesi aranan değer üstüne çıkmakta, % AC ile boşluk yüzdesi değişimi için 0,59 lık düşük bir korelasyon katsayısı elde edilmektedir. Optimum asfalt çimento yüzdesi de % 6.19'a çıkmaktadır. Karışımlardaki granüle cüruf miktarının artması bu olumsuzluğu daha da artırdığından, bu tür karışımlara ait deney sonuçlarına çalışmada yer verilmemiştir.

Bu nedenle, % 93 çelik cürufu ve % 7 Portland çimentosundan oluşan karışım ideal bitümlü cüruf karışımı olarak kabul edilmiştir. Ancak su ve don tesirlerinin araştırılmasında % 5 granüle cüruf içeren bitümlü karışımlar değerlendirilmiştir.

Marshall deneyi sonuçlarına göre yukarıda ideal olarak kabul edilen karışımın 1,7 ve 30 günlük su ve don etkisindeki stabiliteyi Tablo 4.30'da verilmiştir. Su etkisi-stabilite ilişkisi ise 0,89 korelasyonu veren matematiksel bağıntı ile belirlenmiştir (Tablo 4.32, Şekil 4.20). Tablo 4.30'daki deney sonuçlarından görülebileceği gibi numunenin stabilitesi, 30 gün su tesirinden sonra % 8,3 gibi  $\left[ \frac{(1000-917)}{1000} \right]$  ihmal edilebilecek bir azalma göstermektedir. Elde edilen matematiksel bağıntı yardımı ile, su etkisi altında stabilitenin uzun bir zaman periyodundaki değişimi Şekil 4.22'de verilmiştir. Bu eğriden, minimum stabilite değerlerine (600 kg) 120 gün gibi çok uzun süreli su etkisinde düşülebileceği görülmektedir. Donma deneyi sonundaki stabilite ise normal stabilitenin ancak % 93 üne (963/1000) düşmektedir. (Tablo 4.30). Bu sonuçlar, ideal olarak kabul edilen bitümlü cüruf karışımının su ve don etkilerine karşı da çok dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Geometrik olarak hesaplanan genleşme katsayıları maksimum % 2, donma kaybı ise maksimum % 0.1 mertebesindedir.

Z 5 granüle cüruf içeren bitümlü cüruf karışımlarının 7 ve 30 günlük su tesirlerine karşı davranışı Tablo 4.31 ve Şekil 4.21 de verilmiştir. Tablodan, 30 günlük su etkisi sonunda elde edilen stabilitenin normal stabilitenin Z 88'i olduğu hesaplanabilir.

İterasyon yapıldığında, stabilitenin su etkisi ile ancak 160 gün gibi uzun bir sürede minimum değerlere düşeceği tahmin edilebilir.

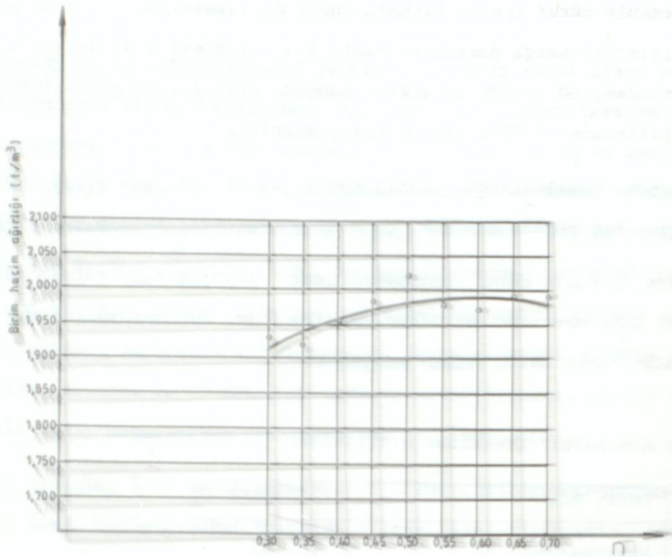
Bu süre, granüle cüruf içermeyen ideal karışım için tahmin edilen süreden daha uzun ise de, ideal karışım diğer özelliklerin tümü için bu karışımdan daha üstün kabul edilebilir.

Tablo 4.6 Asfalt Çimentosu Özellikleri

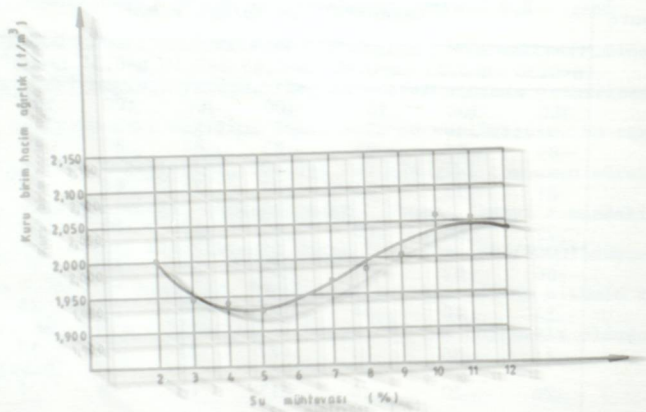
Deney Adı	Değeri
Penetrasyon	83
Yumuşama noktası (Z °C)	45.5
Cleveland açık kabı ile parlama noktası tayini (°C)	238.5
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1.036

Tablo 4.7 Erdemir yüksek fırın cürufu ile hazırlanan karışımların granülometri-birim hacim ağırlık ilişkisi

Elek boyutu	Geçen (%) $p = (d/38)^n \times 100$								
	n=0.30	n=0.35	n=0.40	n=0.45	n=0.50	n=0.55	n=0.60	n=0.65	n=0.70
1,5"	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1"	89	87	85	83	82	80	79	77	75
3/4"	81	78	76	73	71	68	66	64	62
1/2"	72	68	65	61	58	55	52	49	46
3/8"	66	62	57	54	50	47	44	41	38
No.4	54	48	44	39	36	32	29	26	23
No.10	41	36	31	27	23	20	17	15	13
No.40	26	20	16	13	10	8	7	5	4
No.200	15	11	8	6	4	3	2	2	1
Birim hacim	1.928	1.921	1.955	1.989	2.022	2.055	2.088	2.121	2.154



Şekil 4.2. Granülometri birim hacim ağırlık ilişkisi.



Şekil 4.3. Su muhtevası kuru birim hacim ağırlık ilişkisi.

Tablo 4.8. Erdemir yüksek fırın cürufu ile oluşturulan karışımlarda serbest basınç deneyi ile optimum granülöz cüruf tayini

B.f. (%)	GS (%)	Çimento (%)	Su muhtevası (%)	7 günlük s.b.d. (kg/cm <sup>2</sup> ortalama)
80	15	5	10	27,58
78	17	5	10	34,08
76	19	5	10	34,75

Tablo 4.9. Erdemir yüksek fırın cürufu ile hazırlanan karışımların belirlenen granülometrideki optimum su muhtevası tayini

**KOMPAKSIYON DENEYİ**

Nümunenin geldiği yer : Erdemir  
 Nümunenin alındığı kuyu No. : Fırın no:12  
 Nümuneyi iletme eden kap-torba No. :  
 Kabın hacmi : 311  
 Tabaka sayısı : 3  
 Tabakaların yüksekliği : 25  
 Düşük yüksekliği : 30,5  
 Vuruş sayısı : 25

Deney No.	1	2	3	4	5
Islak Nüm. + Kalıp	7236	7135	7122	7199	7439
Kalıp	3115	3115	3115	3115	3115
Islak Nüm.	4121	4020	4007	4084	4324
Birim hacim ağırlığı	2047	2008	2019	2028	2108
Kap No.					
Islak Nüm. + Dava					
Kuru Nüm. + Dava					
Su miktarı					
Dava					
Kuru Nümunesi					
Su muhtevası					
Ortalama su muhtevası	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Kuru Birim Hacim ağırlığı	2000	1949	1941	1931	1970
Deney No.	6	7	8	9	10
Islak Nüm. + Kalıp	7550	7670	7515	7970	7970
Kalıp	3115	3115	3115	3115	3115
Islak Nüm.	4435	4555	4400	4855	4855
Birim hacim ağırlığı	2145	2185	2267	2285	2285
Kap No.					
Islak Nüm. + Dava					
Kuru Nüm. + Dava					
Su miktarı					
Dava					
Kuru Nümunesi					
Su muhtevası					
Ortalama su muhtevası	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12
Kuru Birim Hacim ağırlığı	1986	2004	2060	2058	2040

Tablo 4-10 Bağlayıcısız çuruf karışımlarının CBR sonuçları (% 6 su muhtevası için)

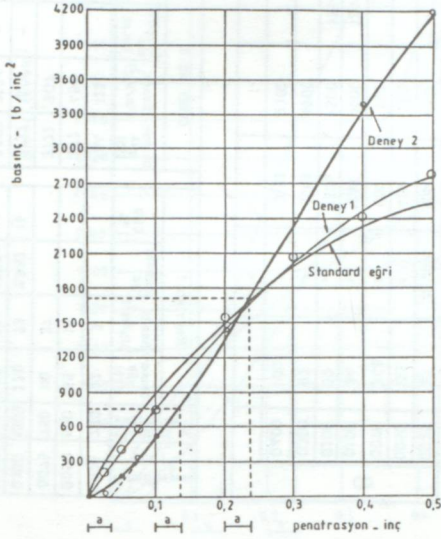
Pencelasyon	Ring okumaları	Ring sabitli	Birim yük	Statik birim yük	CBR
0.025	6.1	36.583	223	250	
0.050	11.1	"	406	500	
0.075	15.8	"	578	750	
0.100	20.5	"	750	1000	75
0.200	42.1	"	1540	1500	103
0.300	56.1	"	2052	1900	
0.400	66.1	"	2418	2300	
0.500	75.5	"	2762	2600	
0.025	1.1	36.583	4.0	2.50	
0.050	5.0	"	183	500	
0.075	9.7	"	355	750	
0.100	14.1	"	527	1000	77
0.200	39.7	"	1452	1500	113
0.300	65.0	"	2378	1900	
0.400	93.1	"	3406	2300	
0.500	114.9	"	4203	2600	

Tablo 4-11 Bağlayıcısız çuruf karışımlarının CBR sonuçları (% 8 su muhtevası için)

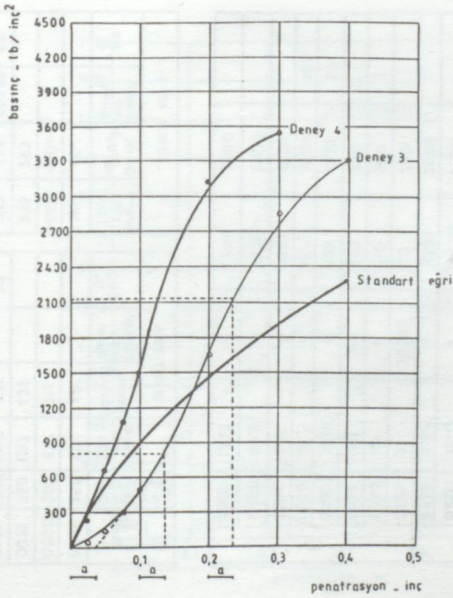
Pencelasyon	Ring okumaları	Ring sabitli	Birim yük	Statik birim yük	CBR
0.025	11	36.583	4.0	250	
0.050	35	"	128	500	
0.075	8.5	"	311	750	
0.100	13.5	"	494	1000	87
0.200	42.20	"	165.4	1500	14.2
0.300	78.0	"	28.90	1800	
0.400	90.0	"	3292	2300	
0.500	-	"	-	2600	
0.025	7.5	36.583	27.4	250	
0.050	18.2	"	666	500	
0.075	30.0	"	1097	750	
0.100	41.0	"	1500	1000	150
0.200	85.5	"	31.28	1500	208

Pencelasyon (inc)	DENEY NO: 11			DENEY NO: 21		
	Okunmuş Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzeltilmiş Basınç (%)	CBR	Okunmuş Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzeltilmiş Basınç (%)	CBR
0.025	250	669	2.23	121	40	
0.050	500	1216	4.06	54.9	183	
0.075	750	1734	5.78	1065	355	
0.100	1000	2350	7.50	1547	516	766.43
0.200	1500	4620	15.40	4357	1452	16.9668
0.300	1900	6157	20.52	7135	2378	
0.400	2300	7254	24.18	10218	3406	
0.500	2600	8286	27.62	12610	4203	

Pencelasyon (inc)	DENEY NO: 3			DENEY NO: 4		
	Okunmuş Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzeltilmiş Basınç (%)	CBR	Okunmuş Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzeltilmiş Basınç (%)	CBR
0.025	250	121	4.0	823	274	
0.050	500	384	12.8	1997	666	
0.075	750	933	31.1	3293	1098	
0.100	1000	1482	49.4	4500	1500	150
0.200	1500	4960	165.3	9364	3128	208
0.300	1900	8670	2890			
0.400	2300	9878	3293			



Sekil 4.4. 0,06 su muhtevasında CBR deneyi değerlendirilmesi



Tablo 423 Bağlıcaçız çuflu karışımının CBR sonuçları (% 9 su muhtevası için)

Penet- rasyon (inç)	Ring okunma	Ring sabiti	Birim yük	Statik birim yük	C B R
0,025	11	36 583	4,0	250	
0,050	5,8	φ	212	500	
0,075	12,0	φ	439	750	
0,100	21,2	φ	776	1000	77
0,200	68,8	φ	2517	1500	168
0,300	107,0	φ	3914	1900	
0,400	121,0	φ	4427	2300	
0,500	145,0	φ	5305	2600	
0,025	11	36 583	4,0	250	
0,050	4,1	φ	150	500	
0,075	8,0	φ	293	750	
0,100	12,0	φ	439	1000	67
0,200	34,9	φ	1277	1500	105
0,300	62,8	φ	2297	1900	
0,400	97,8	φ	3578	2300	
0,500	133,0	φ	4866	2600	

Tablo 422 Bağlıcaçız çuflu karışımının CBR sonuçları (% 9 su muhtevası için)

Penet- rasyon (inç)	Ring okunma	Ring sabiti	Birim yük	Statik birim yük	C B R
0,025	11	36 583	4,0	250	
0,050	5,8	φ	212	500	
0,075	12,0	φ	439	750	
0,100	21,2	φ	776	1000	77
0,200	68,8	φ	2517	1500	168
0,300	107,0	φ	3914	1900	
0,400	121,0	φ	4427	2300	
0,500	145,0	φ	5305	2600	
0,025	11	36 583	4,0	250	
0,050	4,1	φ	150	500	
0,075	8,0	φ	293	750	
0,100	12,0	φ	439	1000	67
0,200	34,9	φ	1277	1500	105
0,300	62,8	φ	2297	1900	
0,400	97,8	φ	3578	2300	
0,500	133,0	φ	4866	2600	

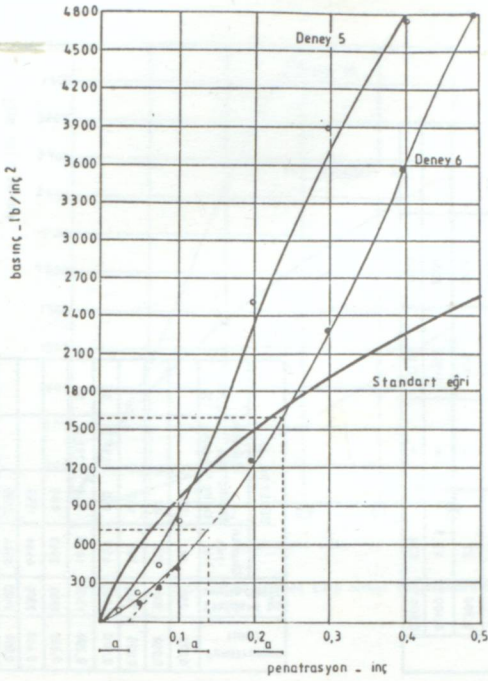
Tablo 423 Bağlıcaçız çuflu karışımının CBR sonuçları (% 9 su muhtevası için)

Penet- rasyon (inç)	Ring okunma	Ring sabiti	Birim yük	Statik birim yük	C B R
0,025	02	36 583	7	250	
0,050	05	φ	18	500	
0,075	10	φ	37	750	
0,100	20	φ	73	1000	16
0,200	105,0	φ	384	1500	41
0,300	261,0	φ	955	1900	
0,400	515,0	φ	1884	2300	
0,500	742	φ	2714	2600	
0,025	35	36 583	128	250	
0,050	12,5	φ	457	500	
0,075	24,8	φ	907	750	
0,100	34	φ	1244	1000	124
0,200	72	φ	2634	1500	175
0,300	97	φ	3549	1900	
0,400	100	φ	3658	2300	

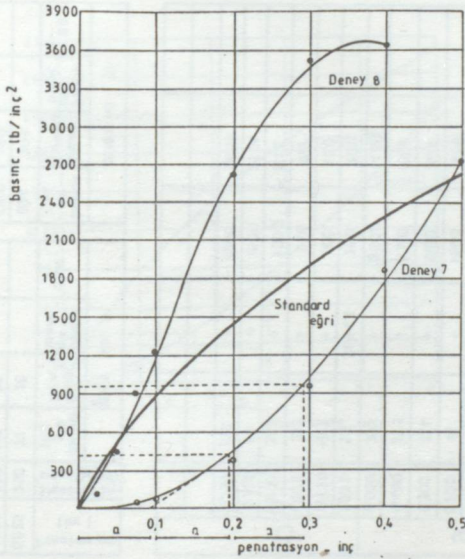
Penetrasyon (inç)	Okunma yük (lb)	Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzetil mis basınç	DENEY NO: 6	
				Okunma yük (lb)	Düzetil mis basınç
0,025	250	40	121	40	
0,050	500	637	450	150	
0,075	750	1317	878	293	
0,100	1000	2327	1317	439	66927
0,200	1500	7551	3630	1277	157748
0,300	1900	11743	6892	2297	
0,400	2300	13280	10734	3578	
0,500	2600	15914	14597	4866	

Penetrasyon (inç)	Okunma yük (lb)	Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzetil mis basınç	DENEY NO: 7	
				Okunma yük (lb)	Düzetil mis basınç
0,025	250	22	7		
0,050	500	55	18		
0,075	750	110	37		
0,100	1000	220	73	15983	16
0,200	1500	1152	384	62064	41
0,300	1900	2864	955		
0,400	2300	5652	1884		
0,500	2600	8143	2714		

Penetrasyon (inç)	Okunma yük (lb)	Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzetil mis basınç	DENEY NO: 8	
				Okunma yük (lb)	Düzetil mis basınç
0,025	250	22	7	128	
0,050	500	55	18	457	
0,075	750	110	37	907	
0,100	1000	220	73	1244	124
0,200	1500	1152	384	2634	175
0,300	1900	2864	955	3549	
0,400	2300	5652	1884	3658	
0,500	2600	8143	2714		



Sekil 4b 0,09 Su muhtevasında CBR deneyi değerlendirilmesi



Tablo 4.14. Bağlayıcılar çuruf korumalarının CBR sonuçları (0,11 su muhtevası için)

Pesat rasyon (İng.)	Ring okumaları	Ring sabiti	Birim yük	Statik birim yük	CBR
0,025	0,7	36583	250	37	
0,050	1,0	ϕ	500	37	
0,075	2,0	ϕ	750	73	
0,100	3,5	ϕ	1000	12,8	
0,200	10	ϕ	1500	366	
0,300	17,4	ϕ	1900	637	
0,400	27,5	ϕ	2300	1006	
0,500	39,1	ϕ	2600	1430	
0,025	5,5	36583	250	201	
0,050	12,3	ϕ	500	450	
0,075	21	ϕ	750	768	
0,100	30,5	ϕ	1000	1116	
0,200	69	ϕ	1500	2524	
0,282	100	ϕ	1900	3658	

10

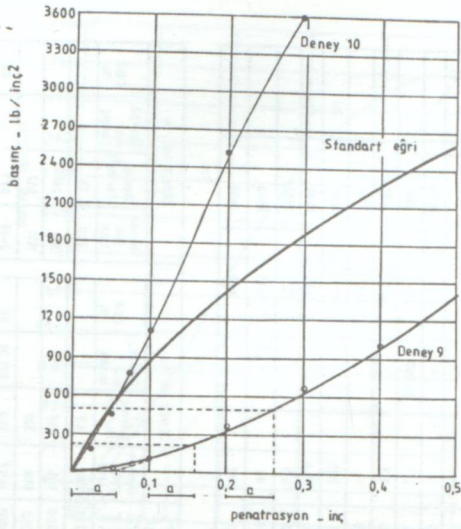
Tablo 4.15. Bağlayıcılar çuruf korumalarının CBR sonuçları (0,12 su muhtevası için)

Pesat rasyon (İng.)	Ring okumaları	Ring sabiti	Birim yük	Statik birim yük	CBR
0,025	0,9	36583	33	250	
0,050	1,4	ϕ	51	500	
0,075	2,8	ϕ	102	750	
0,100	4,1	ϕ	150	1000	36
0,200	14,9	ϕ	543	1500	53
0,300	27	ϕ	988	1900	
0,400	47,5	ϕ	1555	2300	
0,500	57,8	ϕ	2114	2600	

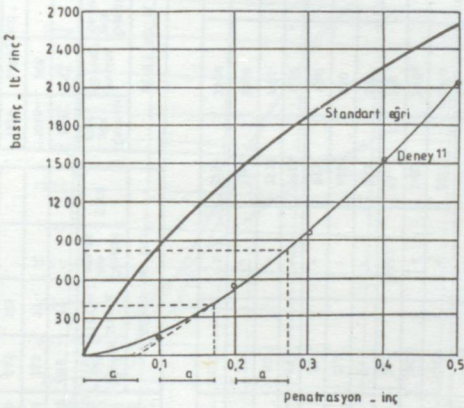
11

Pesat rasyon (İng.)	Statik birim yük (lb)	DENEY NO. 11		Düzeltilmiş CBR (%)
		Ölçülen birim yük (lb)	Başlangıç basıncı (lb/çk <sup>2</sup> )	
0,025	250	99	33	
0,050	500	159	51	
0,075	750	307	102	
0,100	1000	450	150	35,5
0,200	1500	1635	545	793,2
0,300	1900	2963	988	
0,400	2300	4664	1555	
0,500	2600	5344	2155	

Pesat rasyon (İng.)	DENEY NO. 9			DENEY NO. 10		
	Ölçülen birim yük (lb)	Başlangıç basıncı (lb/çk <sup>2</sup> )	CBR	Ölçülen birim yük (lb)	Başlangıç basıncı (lb/çk <sup>2</sup> )	CBR
0,025	250	77	26	60,4	201	
0,050	500	110	37	1350	450	
0,075	750	220	73	2305	768	
0,100	1000	384	128	3047	1116	111
0,200	1500	1098	366	7573	2524	168
0,300	1900	1910	637	10975	3658	
0,400	2300	3018	1006			
0,500	2600	4293	1430			



Sekil 4.8 0,11 Su muhfevasında CBR deneyi değeriendirilmesi



Sekil 4.9 0,12 Su muhfevasında CBR deneyi değeriendirilmesi

Tablo 4.16 Bağlayıcızı cıruv karsımların abılmsı CBR sonucları(0,10 su muhtvası için)

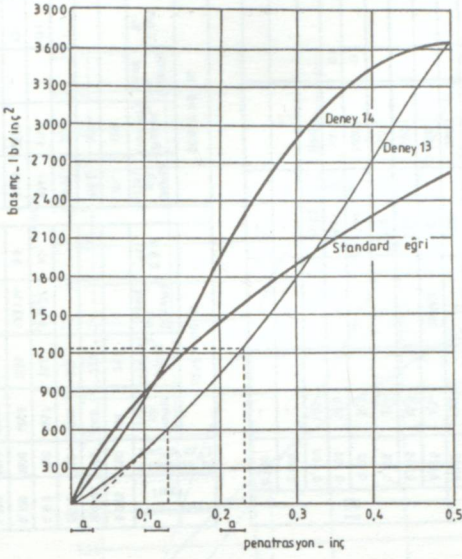
Pendasyon (m)	Standart yük (kg/cm <sup>2</sup> )	Dümen yük (t)	Başınç (lb/in <sup>2</sup> )	Dünetil mis basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Ring abıfı	Birim yük	Statik birim yük	CBR
15	0,025	250	500	1000	36583	82	250	
	0,050	500	1000	2000	6	168	500	
	0,075	750	1500	3000	6	329	750	
	0,100	1000	2000	4000	6	552	1000	88
	0,200	2000	4000	8000	6	1821	15000	137
	0,300	3000	6000	12000	6	2850	19000	
	0,400	4000	8000	16000	6	-	2300	
	0,500	5000	10000	20000	6	-	2600	
	0,095	2	36583	73	250	500		
	0,050	7,3	267	512	750			
0,075	14	512	1000	82				
0,100	225	823	1688	1500	125			
0,200	51,6	2872	1900					
0,300	78,5	3585	2300					
0,400	98	3658	2600					
0,500	100	3658	2600					

Pendasyon (m)	Standart yük (kg/cm <sup>2</sup> )	Dümen yük (t)	Başınç (lb/in <sup>2</sup> )	Dünetil mis basınç (lb/in <sup>2</sup> )	DENEY NO : 15		DENEY NO : 16	
					Dümen yük (t)	Başınç (lb/in <sup>2</sup> )	Dümen yük (t)	Başınç (lb/in <sup>2</sup> )
0,025	250	187	62	220	73	220	73	
0,050	500	505	168	801	267	801	267	
0,075	750	988	329	1537	512	1537	512	
0,100	1000	1657	552	2469	823	2469	823	
0,200	1500	4862	1621	5663	1888	5663	1888	
0,300	1900	8550	2850	8615	2872	8615	2872	
0,400	2300	-	-	10756	3585	10756	3585	
0,500	2600	-	-	11075	3658	11075	3658	

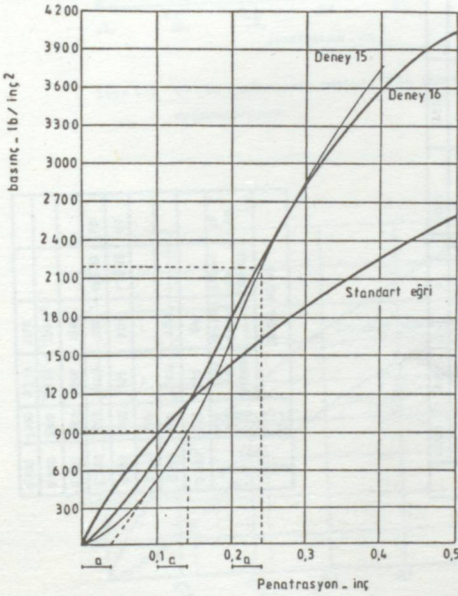
Tablo 4.17 Bağlayıcızı cıruv karsımların abılmsı CBR sonucları(0,05 su muhtvası için)

Pendasyon (m)	Ring ökuma	Ring abıfı	Birim yük	Statik birim yük	CBR
0,025	0,8	36583	29	250	
0,050	2,1	6	77	500	
0,075	5,0	6	183	750	
0,100	11,1	6	406	1000	52
0,200	29,8	6	1090	15000	81
0,300	50,0	6	1829	19000	
0,400	73,0	6	2671	2300	
0,500	103,9	6	3691	2600	
0,025	2,6	36583	95	250	
0,050	9,5	6	34,8	500	
0,075	17,2	6	629	750	
0,100	26	6	951	1000	95
0,200	57,5	6	2104	1500	140
0,300	80	6	2927	1900	
0,400	92	6	3386	2300	
0,500	102	6	3731	2600	

Pendasyon (m)	Standart yük (kg/cm <sup>2</sup> )	Dümen yük (t)	Başınç (lb/in <sup>2</sup> )	Dünetil mis basınç (lb/in <sup>2</sup> )	DENEY NO : 13		DENEY NO : 14	
					Dümen yük (t)	Başınç (lb/in <sup>2</sup> )	Dümen yük (t)	Başınç (lb/in <sup>2</sup> )
0,025	250	88	29	285	95	285	95	
0,050	500	230	77	1043	348	1043	348	
0,075	750	549	183	1888	629	1888	629	
0,100	1000	1218	406	2854	951	2854	951	
0,200	1500	3271	1090	4311	2104	4311	2104	
0,300	1900	5488	1829	8780	2927	8780	2927	
0,400	2300	8012	2671	10592	3386	10592	3386	
0,500	2600	10771	3691	11195	3731	11195	3731	



Şekil 4.10 0,09 Su muhtevasında ıslatılmış CBR deneyi değerlendirilmesi



Şekil 4.11 0,10 Su muhtevasında ıslatılmış CBR deneyi değerlendirilmesi

Table 4.20 Bağlısız çuruf karışımının aletimsiz CBR sonuçları (0,12 su muhtevacı cm)

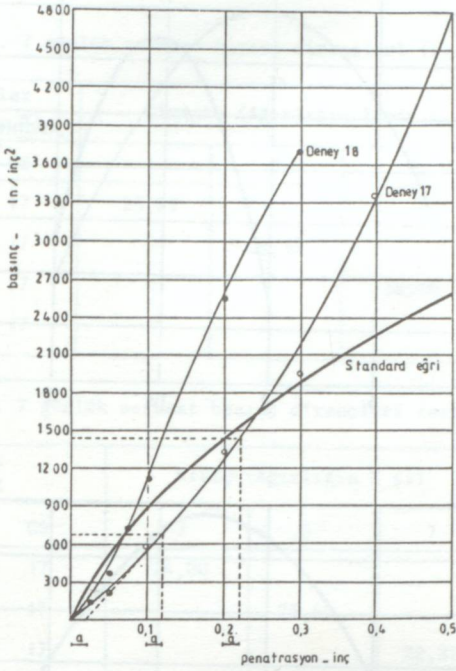
Penetrasiyon (mm)	Ring oluğu	Ring sabiti	Birim yük	Statik birim yük	CBR
0,025	2,2	36583	80	750	
0,050	5,0	∅	183	500	
0,075	-	∅	-	750	
0,100	10,5	∅	384	1000	41
0,200	20	∅	732	1500	60
0,300	36,5	∅	1335	1900	
0,400	46,5	∅	1701	2300	
0,500	48,1	∅	1760	2600	

Table 4.19 Bağlısız çuruf karışımının aletimsiz CBR sonuçları (0,11 su muhtevacı km)

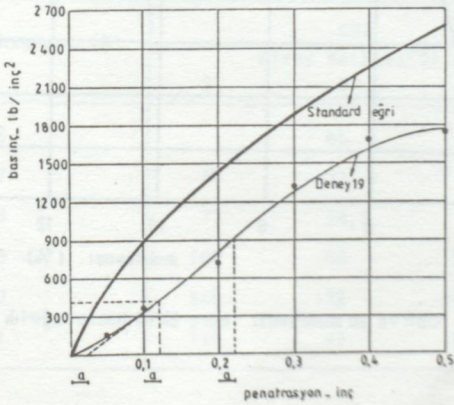
Penetrasiyon (mm)	Ring oluğu	Ring sabiti	Birim yük	Statik birim yük	CBR
0,025	0,8	36583	29	250	
0,050	5,9	∅	216	500	
0,075	10	∅	366	750	
0,100	15,1	∅	552	1000	65
0,200	36,5	∅	1335	1500	88
0,300	53,8	∅	1968	1900	
0,400	91	∅	3329	2300	
0,500	139,1	∅	5089	2600	
0,025	3,5	36583	128	250	
0,050	10,5	∅	384	500	
0,075	20	∅	732	750	
0,100	30,5	∅	1116	1000	111
0,200	70,0	∅	2561	1500	171
0,300	101	∅	3695	1900	
0,400	-	∅	-	-	
0,500	-	∅	-	-	

Penetrasyon (mm)	Standard basınç (lb/in <sup>2</sup> )	DENEY NO: 19		
		Ortun yük (lb)	Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzeltmiş basınç (lb/in <sup>2</sup> )
0,015	250	241	80	
0,050	500	549	183	
0,075	750	-	-	
0,100	1000	1152	384	410,35
0,200	1500	2195	732	902,53
0,300	1900	4006	1335	60
0,400	2300	5103	1701	
0,500	2600	5279	1760	

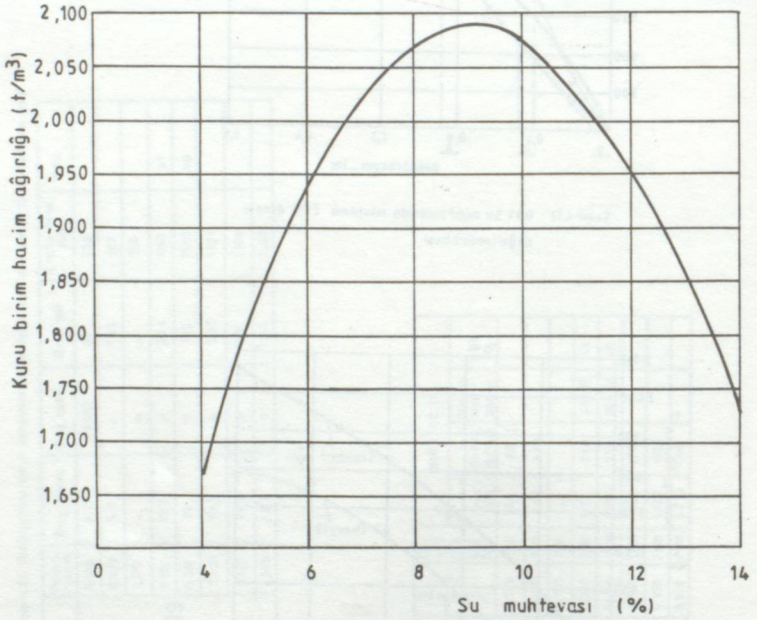
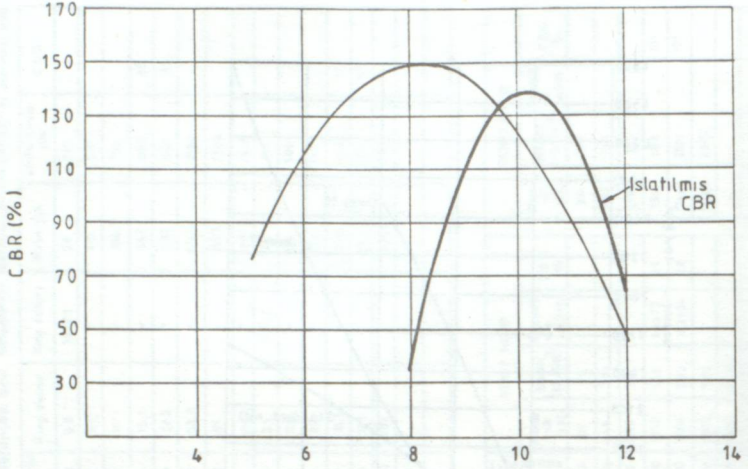
Penetrasyon (mm)	Standard basınç (lb/in <sup>2</sup> )	DENEY NO: 17			DENEY NO: 18		
		Ortun yük (lb)	Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzeltmiş basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Ortun yük (lb)	Basınç (lb/in <sup>2</sup> )	Düzeltmiş basınç (lb/in <sup>2</sup> )
0,025	250	88	29		384	128	
0,050	500	648	216		1152	384	
0,075	750	1098	366		2195	732	
0,100	1000	1657	552	640,72	3347	1116	111
0,200	1500	4006	1335	1321,54	7683	2561	171
0,300	1950	5905	1945		10185	3695	
0,400	2300	9987	3329		-	-	
0,500	2600	15266	5089		-	-	



Şekil 4.12 0,11 Su muhtevasında istatistik CBR deneyi değertendirilmesi



Şekil 4.13 0,12 Su muhtevasında istatistik CBR deneyi değertendirilmesi



Sekil 4.14 CBR ve su muhtevası kuru birim hacim ağırlık ilişkisi

Tablo 4.21. 7 günlük serbest basınç dirençleri ( $\text{kg/cm}^2$ ) (ortalama, silindir)

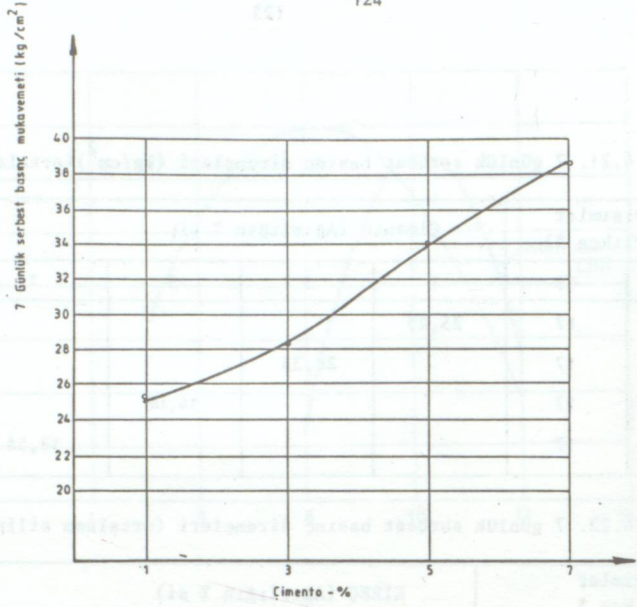
Karışımlar (Ağırlıkça %)		Çimento (Ağırlığın % si)			
BF	GS	1	3	5	7
82	17	25,25			
80	17		28,33		
78	17			34,08	
76	17				38,54

Tablo 4.22. 7 günlük serbest basınç dirençleri (ortalama silindir  $\text{kg/cm}^2$ )

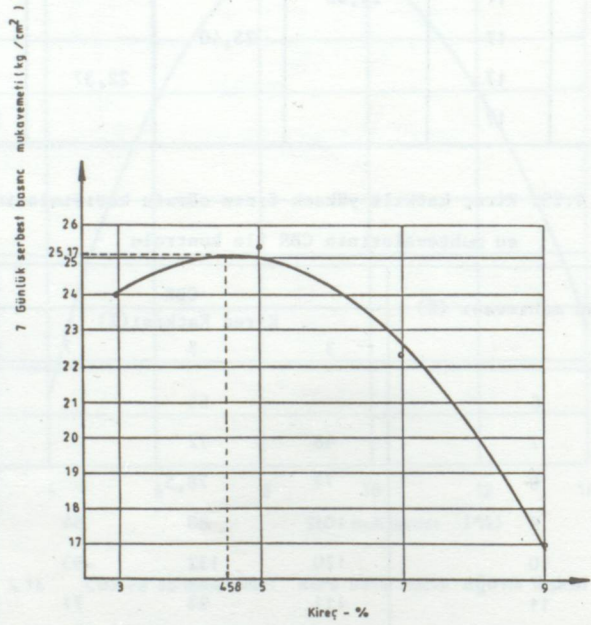
Karışımlar Ağırlıkça %		KİREÇ (Ağırlığın % si)			
BF	GS	3	5	7	9
80	17	24,00			
78	17		25,40		
76	17			22,37	
74	17				17,00

Tablo 4.23. Kireç katkılı yüksek fırın cürufu karışımlarının optimum su muhtevalarının CBR ile kontrolü

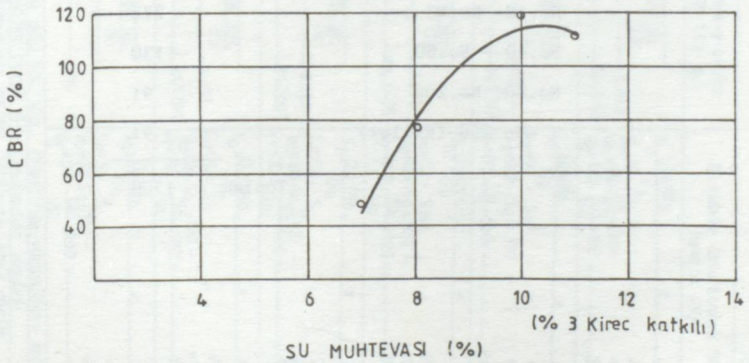
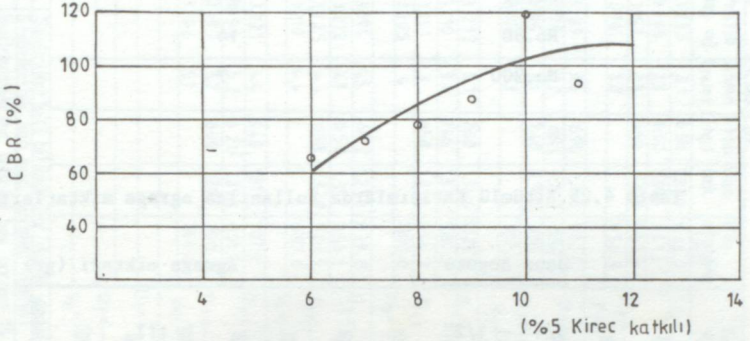
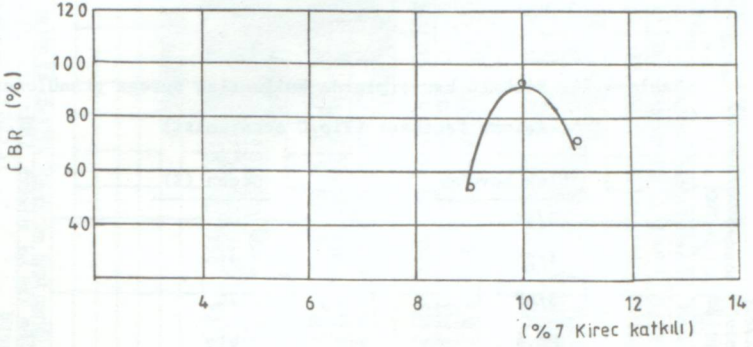
Su muhtevası (%)	CBR		
	Kireç Katkısı(%)		
	3	5	7
6		66	
7	48	72	
8	77	78,5	
9	101	88	54
10	120	132	93
11	111	93	71



Şekil 4.15 Çimento yüzdesine göre 7günlük serbest basınç direnci değişimi



Şekil 4.16 Kireç yüzdesine göre serbest basınç direnci değişimi



Şekil 4.17 Su muhtevası farklı kireç katkılarında CBR ilişkisi

Tablo 4.24. Bitümlü karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi  
Aşınma tabakası (Tip C ortalaması)

<u>Elek boyutu</u>	<u>Geçen (%)</u>
3/4"	100
1/2"	91
3/8"	79
No.4	61
No.10	45
No.40	24
No.80	14
No.200	7

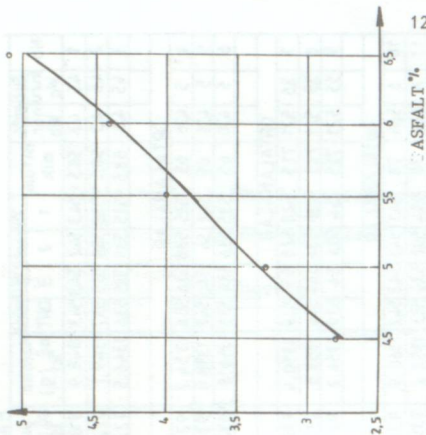
Tablo 4.25 Bitümlü Karışımlarda Kullanılan agrega miktarları.

<u>Dane Boyutu</u>	<u>Agrega miktarı (gr)</u>
3/4" - 1/2"	117
1/2" - 3/8"	156
3/8" - No.4	234
No.4 - No.10	208
No.10- No.40	273
No.40 - No.80	130
No.80- No.200	91
No 200 (Filler)	91

Toplam : 1300



AKMA  
mm



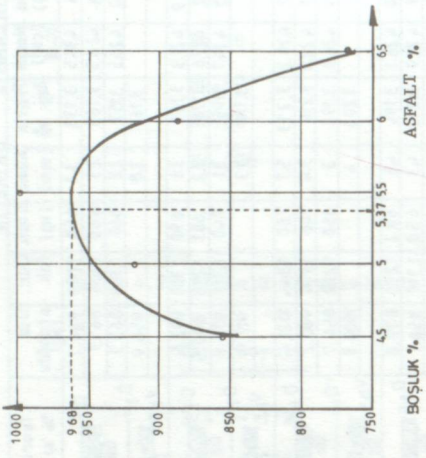
ASFALT BETONU KAPLANA İÇİN SARTNAME DEĞERLERİ =

BİNGER T.	min	500	ASINMA T.
STABİLİTE (kg)	min	600	
BÖŞLÜK % sl	4 - 6		
AKMA (mm)	2,54 - 4,57		
ASFALT DOLU			
BÖŞLÜK % sl	65 - 75		

DE NEY SONUÇLARI =

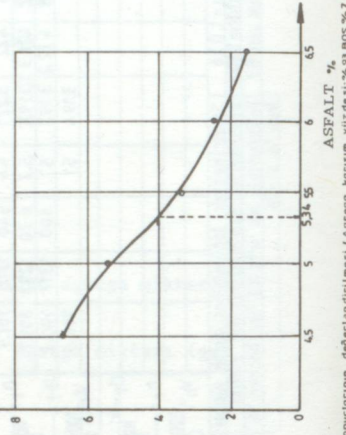
OPTİMUM ASFALT % sl.	= % 5,40
STABİLİTE (OPT. BİTÜMDE)	= 946 kg
PRAKİK BİR. AĞ. ( * v )	= 3 218 g/cm <sup>3</sup>
BÖŞLÜK % sl ( ~ v )	= % 3,46
AKMA ( * v )	= 3,83 mm
ASFALT DOLU BOŞ. ( ~ v )	= % 95,18

STABİLİTE  
KG

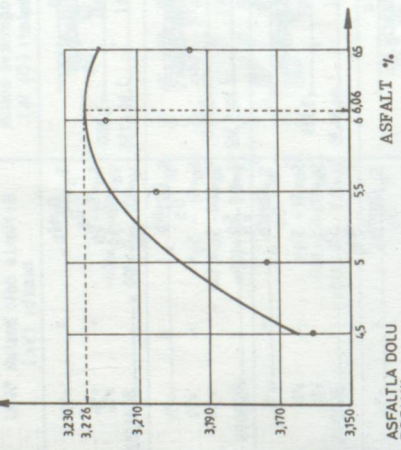


BÖŞLÜK %

ASPALT %

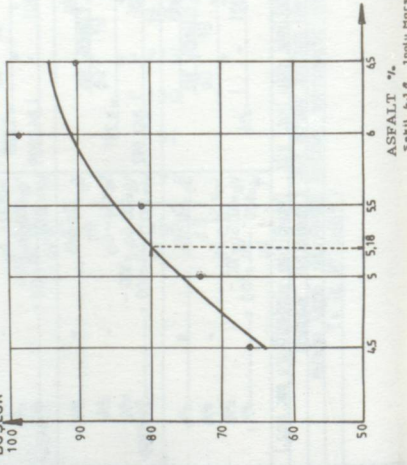


PRAKİK  
ÖZGÜL  
AĞIRLIK  
g/cm<sup>3</sup>



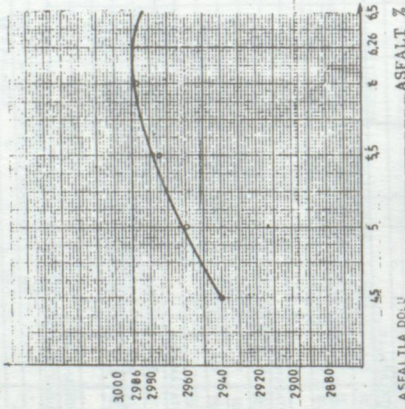
ASFALT DOLU  
BÖŞLÜK

ASPALT %

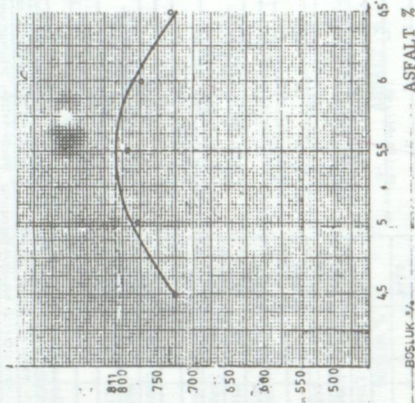




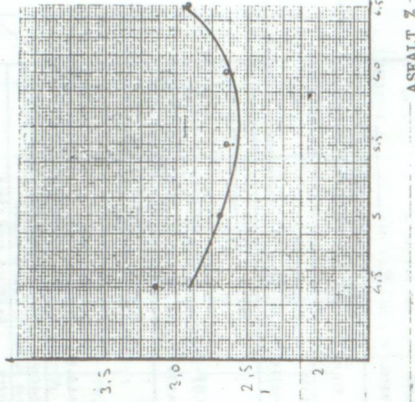
PRATİK  
ÖZGÜ  
AKIPLIK  
g/cm<sup>3</sup>



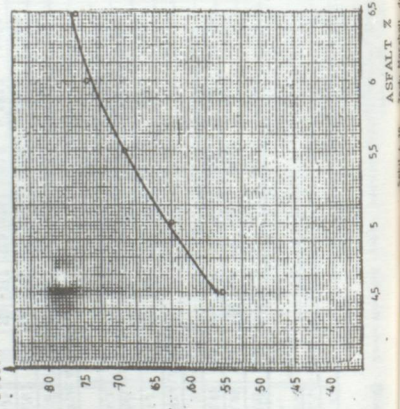
STABİLİTE  
KG



AKMA  
mm



ASFALTA DOLU  
BOSLUK %



ASFALT BETONU KAPLAMA İÇİN SARTIYARMA DEĞERLERİ =

BİNGER T.		AŞIKMA T.	
STABİLİTE (kg)	min 500	min 600	
BOSLUK 1/2 si	2 - 6	3 - 5	
AKMA (mm)	2.54 - 4.57	2.54 - 4.57	
ASFALT DOLU BOSLUK 1/2 si	65 - 75	75 - 85	

DENEY SONUÇLARI =

OPTİMUM ASFALT 1/2 si	= 5.5	6.19	
STABİLİTE (OPT BİTÜMDE)	= 770	kg	
PRATİK BİR. 46	( )	= 2.966	g/cm <sup>3</sup>
BOSLUK 1/2 si	( )	= 75	%
BOSLUK 1/2 si	( )	= 5.07	mm
Z KFA	( )	=	mm
ASFALTA DOLU BOSLUK	( )	=	%

ASFALTA DOLU BOSLUK (%) = 75

Tablo 4.25 a Bitümlü karışımlardan agrega olarak kullanılan cüruf tür ve yüzdelerine göre Marshall Deneyi grupları.

Marshall Deneyi (Grup No)	Agrega Karışımları (Ağırlıkça %)		
	BOS	GS	PÇ
1	93	-	7 (Filler)
2	88	10	7 (Filler)
3	78	15	7 (Filler)
4	73	20	7 (Filler)

Tablo 4.26 Bitümlü Karışımlarda kullanılan bitüm (AC) yüzde ve miktarları, numune sayıları.

Numune Adedi	(Agrega Ağırlığına göre)	Asfalt Miktarı (gr)
	Asfalt % si	
3	4,0	52
3	4,5	58,5
3	5,0	65
3	5,5	71,5
3	6,0	78
3	6,5	84,5

Tablo 4.29 Bitümlü Karışımların Hesaplarına esas Farklı cins ve orandaki cüruf türlerinin özgül ağırlıkları

Karışımlar (Ağırlıkça %)			Özgül Ağırlık		
BOS	GS	PÇ	Kaba	İnce	Filler
78	15	7	3.794	3.560	2.982
83	10	7	3.560	3.560	3.020
93	-	7	3.794	3.882	3.055

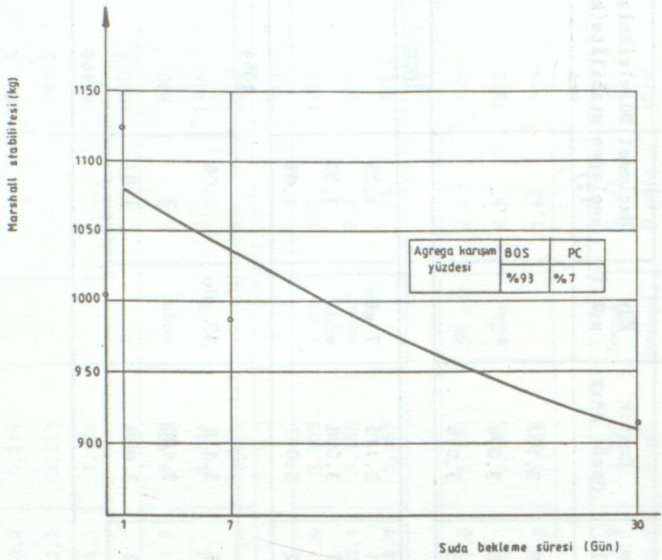
Tablo 4.30 93 BOS: 7 P.Ç (Filler) agrega ile hazırlanan bitümlü karışımların farklı kür şekillerindeki Marshall Deneyi Sonuçları

Numune No	% AC	Yükseklik (cm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Pratik özgül ağırlık	Kür şekli	Hacimsel çenleşme(%)	Düzeltilmiş stabilite(kg)
1	5.5	5.29	1350.4	930.2	420.2	3.214			1021.4
2	"	5.34	1355.5	933.3	422.2	3.211	-	-	980.2
3	"	5.39	1354.2	929.9	424.3	3.192			854.7
1000.8									
4	5.5	5.36	1348.2	926.6	421.6	3.198	1 gün	1.9	943
5	"	5.34	1353.4	928.4	425	3.184	suda	2.2	1156
6	"	5.42	1352.1	924.7	427.4	3.164		1.5	1094
1125									
7	5.5	5.32	1351.3	929.4	421.9	3.203	7 gün	1.8	1169
8	"	5.35	1345	922.9	422.1	3.186	suda	2.3	998
9	"	5.40	1358.4	929.5	428.9	3.167		1.55	976
987									
10	5.5	5.26	1330	914.2	415.8	3.199	30 gün	2.0	919
11	"	5.35	1344	922	422	3.185	suda	1.8	1072
12	"	5.34	1344.7	919.8	424.9	3.165		1.62	916
917									
13	5.5	5.32	1346.4	925.2	421.2	3.197	Dorma	0.146*	817
14	"	5.44	1370	939.5	430.5	3.182	Deneyi	0.0361	1019
15	"	5.46	1365	933.4	431.6	3.163		0.217	919
963									

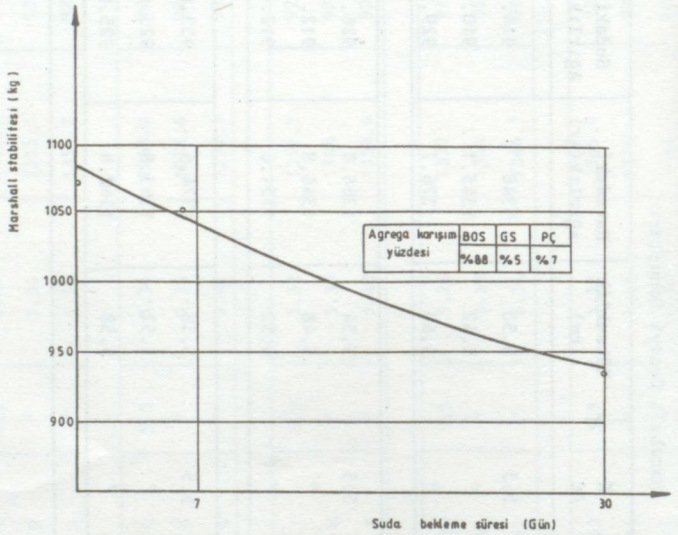
\* Dorma kaybı (ağırlıkca)

Tablo 4.31. 88 BOS : 5 GS : 7 PÇ (Filler) agrega ile hazırlanan bitümlü karışımların farklı kür şekillerindeki Marshall Deneyi Sonuçları

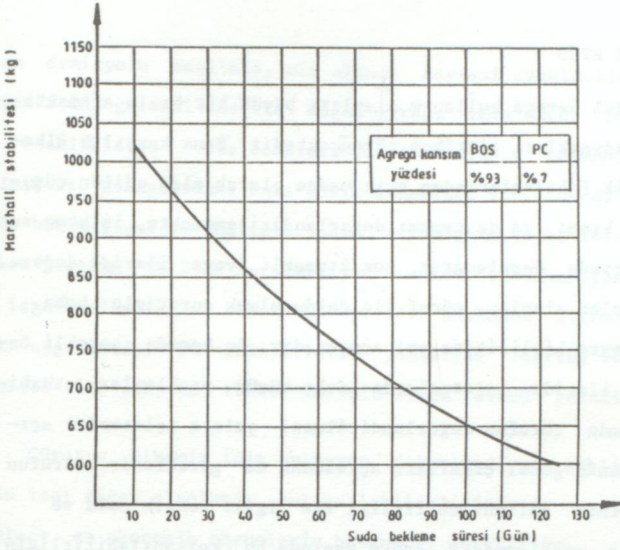
Numune No	% AC	Yükseklik (cm)	Havadaki ağırlık(gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Pratik özgül ağır.	Kür şekli	Hacimsel Düzeltilmiş genişleme stabilite(kg)
1	5.5	5.50	1348	914.2	433.8	3.107		
2	"	5.42	1345.1	910.3	434.8	3.094	-	-
3	"	5.60	1376.7	929.2	447.5	3.076		
1070								
4	5.5	5.54	1364.8	926.7	438.1	3.115	7 gün	1.25
5	"	5.48	1346.8	912.1	434.7	3.098	suda	1.30
6	"	5.52	1351.6	912.4	439.2	3.077		1.01
1064								
7	5.5	5.58	1374.6	933.8	440.8	3.118	30 gün	2.06
8	"	5.52	1363.8	923.8	440	3.100	suda	2
9	"	5.58	1367.8	925.6	442.2	3.089		1.87
340								



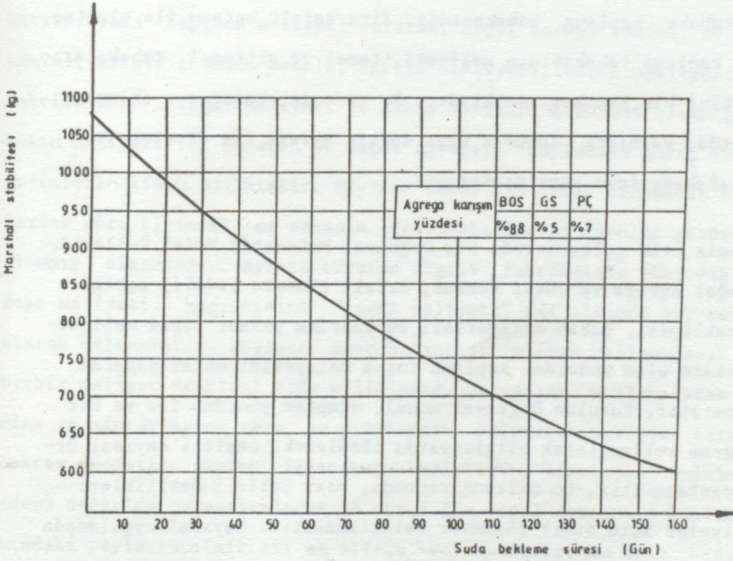
Şekil 4.20 Bitümlü cüruf karışımının stabilitesinin su etkisi ile değişimi



Şekil 4.21 Bitümlü cüruf karışımının stabilitesinin su etkisi ile değişimi



Şekil 4.22a Bitümlü cüruf kısmının stabilitesinin su etkisiyle değişimi



Şekil 4.22b Bitümlü cüruf kısmının stabilitesinin su etkisiyle değişimi  
(30 Gün süreli deney sonuçlarından tahmin edilmiştir)

#### 4.3. EKONOMİK ETÜD

Günümüzde doğal agrega kullanım alanları büyük bir hızla artmakta olmasına karşın, kaynakları gittikçe tükenmektedir. Buna karşılık ülkemizdeki Demir-Çelik fabrikalarından atık madde olarak elde edilen cürufun çok büyük bir kısmı, ya da tamamı değerlendirilememekte, işletme sahasında ve yakınlarında depolanarak, çok kıymetli veya ileride değerlendirilebilecek olan alanlar, cüruf ile doldurulmak suretiyle heba edilmekte ve çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu konuda gerekli önlemler alınmazsa, ileride işletmelerde daha büyük problemler çıkabilecektir. Bu durumda cürufun değerlendirilmesi yalnız işletmeler açısından değil, ülkenin genel çıkarları açısından da gereklidir. Cürufun karayolu üstyapısında kullanılabilirliği ile ilgili teknik etüd ve sonuçları yukarıda açıklanmıştır. Bunun yanında bu kullanılabilirliğin ekonomik yönden de incelenmesi zorunludur.

Farklı tabakalardan oluşan karayolu üstyapısında maliyet üzerinde etkili tabaka kaplama tabakasıdır. Zira asfalt betonu ile oluşturulan bir kaplama tabakasının maliyeti, temel ve alttemel tabakalarının maliyetini bir kaç kat aşmaktadır. Bu nedenle, çalışmaya eklenen ekonomik etüd, yalnızca cürufu veya doğal agrega ile oluşturulan kaplama tabakası için yapılmıştır.

Ekonomik etüd çalışmasında bir Doğrusal Matematik Model kullanılmıştır. Doğal agrega ve cüruf temini, asfalt çimento bedeli, agrega ve cüruf nakliyesi, bakım maliyetleri ve fabrika sahası işgal maliyetlerini dikkate alan modelde, kaplama inşaa maliyetini en az yapacak çözüm aranmıştır. Kurulan Doğrusal model, simplex yöntemi ile ve bir paket program kullanılarak bilgisayarda çözümlenerek, çeşitli sayısal örneklere uygulanmıştır. Bu çalışma sonunda, bazı belirli özellikleri olan şantiyeler için sınır çözümler belirlenmiştir. Sayısal uygulamada ise cüruf nakliyesinde kara, deniz, demiryolu taşımasından en uygun

olan demiryolu seçilmiş, ele alınan sayısal uygulamada her bir şantiye için, gerekli vasıfta doğal agrega veya cüruf temin eden farklı uzaklıklarda taş ocakları ve fabrikaların bulunduğu kabulü yapılmıştır. Hesaplardaki bazı sabit değerler, T.C.K.Genel Müdürlüğü'nün 1986 birim fiyat ve analizlerinden alınmıştır (60), (61). Kullanılan paket program Ek 2'de verilmiştir. Örnekte cürufun fabrika sahalarını işgal maliyeti ve bakım maliyetleri gözönüne alınmamıştır. Gerçek uygulamada, bu maliyetlerin yanısıra, fabrika ve ocak üretimleri ile şantiye tüketimlerinin iyice etüdü gerekir.

Cürufun ülkemiz için en uygun değerlendirme şeklini saptamak için ise; diğer alanlarda kullanılabilirliğinin de araştırılması ve böylece en ekonomik çözümlerin bulunması gereklidir.

#### 4.3.1. MATEMATİK MODEL

Yukarıda belirtildiği gibi, model çalışması sırasında karayolu üst yapısında kaplama maliyeti olarak; doğal agrega temini, cüruf temini, asfalt çimento bedeli, agrega nakliyesi, cüruf nakliyesi, fabrika sahası işgal maliyeti ve bakım maliyeti gözönüne alınmıştır. Bakım maliyetleri, cüruf ve doğal agregalı kaplamaya göre, ayrı terimlerle ifade edilmiştir. Böylece cüruf ile doğal agreganın birbirlerine göre fiziksel ve mekanik özelliklerindeki farklar gözönüne alınmış olmaktadır. Ayrıca cürufun ilgili fabrikalara yüklediği ek depo maliyeti bağıntısına "işgal maliyeti" adı altında bir terim olarak eklenmiştir. Böylece, amaç bağıntısı olarak kullanılacak genel birbir maliyet denklemi elde edilmiştir. Üst yapıda kullanılacak agrega cins ve miktarlarına göre bu denklemden bulunacak maliyet farklı olacaktır. Modelin çözümü için amaç bağıntısını enazlayan (minimize eden) değerler araştırılacak ve cüruf ile doğal agreganın kaplama yapımındaki paylarının(miktar) ne olduğu bulunacaktır. Bu amaç bağıntısında kullanılan parametreler ;

Z = En azlanacak genel maliyet (amaç)

i = 1,2,3... m

Eğer  $i \leq 3$  ise fabrika numarası

Eğer  $i \geq 4$  ise taş ocağı nımarası

J = Şantiye numarası

$U_i$  = fabrika/ocak üretim kapasitesi

$S_j$  = Şantiye tüketimi (J= 1.2.3.....n)

$X_{ij}$  = J. şantiyedeki talebin i.ocaktan karşılanan kısmı

$B_o$  = Cürüflü asfalt betonundaki optimum asfalt çimento yüzdesi

$B_1$  = Doğal agregaya ile hazırlanmış asfalt betonundaki optimum asfalt çimento yüzdesi

B.F = Bitüm Fiyatı (TL/TON)

a = Bir ton aşınma tabakasında kullanılan cüruf miktarı

b = Bir ton aşınma tabakasında kullanılan doğal agregaya

c = Cürüflü yapılan yolda birim boydaki bakım maliyeti

d = doğal agregaya ile yapılan yolda birim boydaki bakım maliyeti

DF = Cürüflü fabrika sahasını işgal maliyeti (depo maliyeti)

$A_i$  = Bir ton aşınma tabakası için gerekli cürüflü satın alma bedeli

$E_i$  = Bir ton aşınma tabakası için gerekli cürüflü istenilen granülometriye getirilmesi bedeli

$K_{ij}$  = i.fabrikadan J.şantiyeye getirilen cüruf nakliye bedeli

$C_{ij}$  = Bir ton kaplama tabakası için J.şantiyedeki talebin i.fabrikadan temin etme maliyeti ( $A_i + E_i + K_{ij}$ )

$D_i$  = Bir ton aşınma tabakası için doğal agregaya temini

$L_{ij}$  = i.ocaktan alınan doğal agreganın j.şantiyeye taşıma bedeli

$T_{ij}$  = Bir ton kaplama tabakası için j.şantiyedeki talebin i.ocaktan temin etme maliyeti ( $D_i + L_{ij}$ )

$d_1$  = Marshall stabilitesi 1650 lb olan asfalt betonu kalınlığı

$d_2$  = Aynı yük tekerrürü için Marshall stabilitesi 2000 lb olan asfalt betonu kalınlığı ( $\frac{0,40}{0,45} d_1$ )

$v_1$  =  $i \text{ m}^2$  kaplamayı oluşturan doğal agregalı asfalt betonu hacmi ( $l \times l \times d_1$ ) (m<sup>3</sup>)

$v_2 = 1 \text{ m}^2$  kaplamayı oluşturan cürüflü asfalt betonu hacmi  $(1 \times 1 \times d_2)(\text{m}^3)$

$p_1 = 1 \text{ m}^2$  kaplamayı oluşturan doğal agregalı asfalt betonu ağırlığı  $(v_1 \times 2,4)(\text{ton})$

$p_2 = 1 \text{ m}^2$  kaplamayı oluşturan cürüflü asfalt betonu ağırlığı  $(v_2 \times 3,22)(\text{ton})$

olduğuna göre; Fabrika/Ocak Üretim Kapasitelerini ifade eden kısıt bağıntıları;

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq U_1$$

$$\sum_{j=1}^n X_{2j} \leq U_2$$

⋮

$$\sum_{j=1}^n X_{mj} \leq U_m$$

ve şantiye tüketimlerini ifade eden kısıt bağıntıları;

$$\sum_{i=1}^m X_{i1} = S_1$$

$$\sum_{j=1}^m X_{i2} = S_2$$

⋮

$$\sum_{i=1}^m X_{in} = S_n$$

dikkate alınarak, enazlanacak (minimize edilecek) amaç bağıntısı

$$Z = C_{ij} \cdot x_{p_2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij} \cdot T_{ij} \cdot x_{p_1} \sum_{i=4}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij} \cdot B_o \cdot BF \cdot p_2$$

$$+ \sum_{i=4}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \cdot B_1 \cdot x_{p_1} \cdot BF + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij} \cdot a.c + \sum_{i=4}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \cdot bd +$$

$$+ \left( \sum_{i=1}^3 U_i - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij} \right) DF$$

olmaktadır.

Burada;

$$C_{ij} = A_i + E_i + K_{ij}$$

$$T_{ij} = D_i + L_{ij}$$

olduğu unutulmamalıdır.

Bu doğrusal model en kolay simplex yöntemi ile çözülebilir. Bu modelin çözümü, şantiye ve ocak sayısı çok az bile olsa oldukça zor ve karışıktır. Bu nedenle bilgisayardan yararlanılmadan çözülebilmesi çok zaman aldığından çözümlerde Ek 2'de verilen paket program kullanılmıştır.

#### 4.3.2. Sayısal Uygulama

Ekonomik etüd için kurulan model ile, aşağıda tanımlanan problem için, sayısal bir uygulama yapılmıştır.

**Problem :** Bir karayolu inşaatında kaplama tabakasında kullanılmak üzere gerekli olan agreganın, demir-çelik fabrikalarından ya da taş ocaklarından temin edilebilmesi mümkündür. Ocak ve fabrika üretim kapasitelerinin gözönüne alınarak gerekli agreganın en düşük maliyetle sağlandığı şantiye-fabrika/ocak mesafeleri istenmektedir.

**Çözüm :** Problemin çözümü için amaç bağıntısının kurulmasında gerekli olan bazı değerler hesaplanmış bazıları için de kabuller yapılmıştır. Bunlar Tablo 4.33 de özetlenmiştir. (61), (62). Tablo 4.33 de verilen cüruf nakliye bedellerinin hesaplanmasında T.C.D.D.1986 nakliye cetvelleri esas alınarak bu değerlere 10 km'lik karayolu nakliye bedeli eklenmiştir. Diğer değerlerin hesaplanmasında ise T.C.K. Genel Müdürlüğü'nün 1986 birim fiyat ve analizlerinden yararlanılmıştır (\*).

Tablo 4.33 Ekonomik etüd sayısal uygulamada kullanılan sabitler

Bir ton aşınma tabakası için gerekli cürufun fabrikadan satın alma bedeli ( $A_i$ )	0
Bir ton aşınma tabakası için gerekli olan cürufun kırma-eleme bedeli ( $E_i$ )	1059,61 *
Bir ton aşınma tabakası için gerekli olan cürufun fabrikaya x km uzaklıktaki j.şantiyeye hakliye bedeli ( $K_{ij}$ ) ( $x \geq 100$ )	$(1025 + (x-100)10.25) 0,948 + 739.0,948 = 700,57 + 9,717 x$
Bir ton aşınma tabakası için gerekli olan doğal agreganın temin bedeli ( $D_i$ )	2362,94*
Bir ton aşınma tabakası için gerekli olan doğal agreganın p.ocaktan y km uzaklıktaki j.şantiyeye getirilmesi nakliye bedeli ( $L_i$ ) ( $y < 10000$ met.)	$1,25 \times 1,20 \times 0,00017 \times 29\ 000 y^{1/2}$ $0,948 = 7,01 y^{1/2}$
Bir ton aşınma tabakası için gerekli olan doğal agreganın i.ocaktan y km uzaklıktaki j.şantiyeye getirilmesi nakliye bedeli ( $L_{ij}$ ) ( $y \geq 10$ km)	$(1,25 \times 1,20 \times 29\ 000 (0,0007y + 0,01))$ $0,948 = 28,87 y + 41238$
j.şantiyedeki talebin i.ocaktan karşılanan kısmı	$X_{ij}$
Bir ton bitüm fiyatı (BF)	143750
$p_1$ ( $1\ m^2$ kaplamayı oluşturan doğal agregalı asfalt beton ağırlığı) (ton)	$1 \times 1 \times d_1 \times 2,4 = 2,4 d_1$
$p_2$ ( $1\ m^2$ kaplamayı oluşturan cürufllu asfalt betonu ağırlığı)	$1 \times 1 \times d_2 \times 3,22 = \frac{0,40}{0,45} d_1 \times 3,22$ $= 2,862 d_1$

\* Ek 3'den alınmıştır.

Daha önce verilmiş olan minimize edilecek amaç bağıntısı, depo, bitüm ve bakım maliyetleri ile ilgili terimler çıkarılarak ve Tablo 4.33 da verilen değerler alınarak, şantiye-fabrika/ocak mesafeleri (x/y) cinsinden sayısal olarak ifade edilirse;

$$a) \quad x \geq 100 \text{ km} \quad 0 \leq y \leq 10\,000 \text{ metre için}$$

$$Z = 1059,61x p_2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij} + p_2 x (700,57 + 9,717x) \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij} +$$

$$p_1 x 2362,94 \sum_{i=4}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} + p_1 x 7,01 y^{1/2} \sum_{i=4}^m \sum_{j=1}^n X_{ij}$$

$$Z = (5037,63 + 27,81x) d_1 x \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij} + (5671,06 + 16,821y)^{1/2} d_1 \sum_{i=4}^m \sum_{j=1}^n X_{ij},$$

$$b) \quad x \geq 100 \text{ km} \quad y \geq 10 \text{ km için}$$

$$Z = 1059,61x p_2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij} + p_2 (700,57 + 9,717x) \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij}$$

$$+ p_1 x 2362,94 \sum_{i=4}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} + p_1 (28,87y + 412,38) \sum_{i=4}^m \sum_{j=1}^n X_{ij}$$

$$Z = (5037,63 + 27,81x) d_1 x \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n X_{ij} + (6660,77 + 69,29y) d_1 \sum_{i=4}^m \sum_{j=1}^n X_{ij}$$

hallerini alır.

Fabrika ve ocak üretim kapasiteleri ve şantiye tüketimlerini ifade eden kısıt bağıntıları için; her bir üretim kaynağının şantiye gereksinmelerini karşıladığı kabulü yapılarak amaç bağıntısı, istenen sayıda şantiye için Ek 2'de verilen paket program vasıtasıyla bilgisayarından çözülmüştür.

### 4.3.3. Sayısal Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi

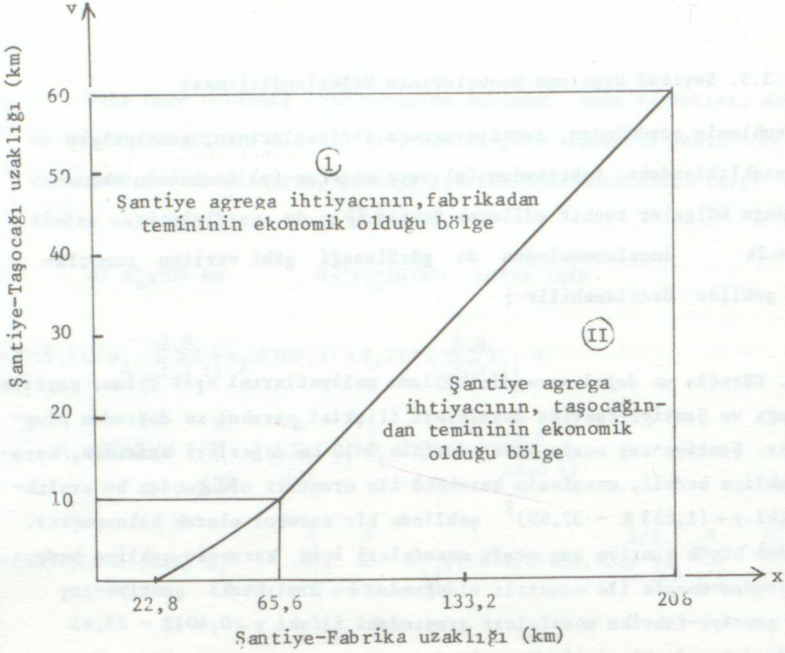
Problemin çözümünden, şantiye agrega ihtiyaçlarının, şantiyelere hangi uzaklıklardaki fabrikadan (x) veya ocaktan (y) temininin ekonomik olduğu bölgeler tesbit edilerek Şekil 4.24 de verilmiştir.

Şekil 4.24 incelenmesinden de görüleceği gibi verilen sonuçları şu şekilde özetlenebilir ;

1. Cüruf lu ve doğal agregalı kaplama maliyetlerini eşit kılan, şantiye-taş ocağı ve Şantiye-fabrika mesafeleri ilişkisi parabol ve doğrudan oluşmaktadır. Şantiye-taş ocağı mesafelerinin 0-10 km değerleri arasında, karayolu nakliye bedeli, mesafenin karaköku ile orantılı olduğundan bu aralıkta ilişki  $y = (1,653 X - 37,65)^2$  şeklinde bir parabol olarak bulunmuştur. 10 km den büyük şantiye taş ocağı mesafeleri için, karayolu nakliye bedeli, doğrudan mesafe ile orantılı olduğundan bu aralıktaki şantiye-taş ocağı, şantiye-fabrika mesafeleri arasındaki ilişki  $y = 0,401X - 23,43$  şeklinde doğru denklemi ile hesaplanmıştır.

2. Herhangi bir şantiyenin ihtiyacı olan agreganın sağlanacağı yeterli kapasitede taş ocağı 0 km mesafede ise ve bu şantiyeye uzaklığı en fazla 22,8km mesafede yeterli kapasitede bir cüruf üretim tesisi varsa, ihtiyacın tamamen bu fabrikadan karşılanması daha ekonomik olacaktır.

3. Herhangi bir şantiyenin ihtiyacı olan agreganın sağlanacağı yeterli kapasitede taş ocağı en yakın 0 km mesafede ise ve bu şantiyeye uzaklığı en fazla 22,8 km'de ihtiyacın tamamını karşılayamayacak kapasite'de bir cüruf üretim tesisi varsa, ihtiyacın; kapasitesi kadar fabrikadan, kalanının ise taş ocağından sağlanması daha ekonomik olacaktır.



Şekil 4.24. Aynı Kaplama Maliyetini Veren Eşdeğer Şantiye-Taşocağı/Fabrika Mesafeleri.

Şekil 4.24'de grafik olarak verilen çözüm, yukarıda açıklanan sonuçlara benzer şekilde farklı birçok şantiye-taş ocağı/fabrika mesafesi ve farklı ocak/fabrika kapasitesi için de maddeler halinde değerlendirilebilir.

Şekil 4.24'den elde edilebilecek bilgilere bir örnek olmak üzere Tablo 4.34 'de taş ocağı mesafelerine eşdeğer olan bazı fabrika mesafeleri verilmiştir.

Görüldüğü gibi hemen şantiye içinde bir taş ocağı dahi olsa yine cürufun ekonomik olarak kullanılabilmesi için bir mesafe mevcuttur. Şantiye civarında yeterli kapasitede taş ocağı bulunmaması cürufun ekonomik olarak kullanım mesafesini artırmaktadır.

Tablo 4.34. Aynı Kaplama Maliyetini veren eşdeğer Şantiye-  
Taş ocağı/Fabrika Mesafeleri

Şantiye-Taş Ocağı mesafesi (km) (min)	Şantiye-fabrika mesafesi (km) (maks)
0	22,8
5	65,6
10	83,4
20	108,3
30	133,2
40	158,2
50	183,1
60	208
70	233

Cürufun fabrika sahalarını işgal maliyeti ile bakım ve bitüm maliyetleri modelde yer almasına karşın, sayısal uygulamada gözönünde bulundurulmamıştır. Bu değerlerin de gerçek değerleriyle gözönüne alınarak hesaba eklenmesi halinde, cürufun ekonomik kullanım mesafesi daha da artacaktır.

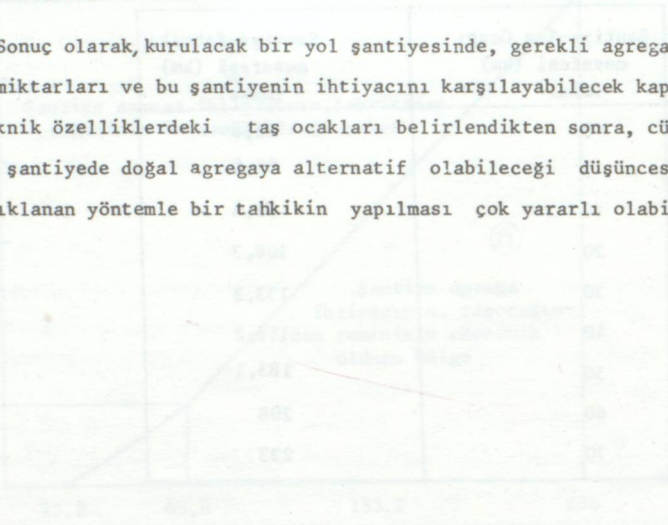
Şekil 4.24'de verilen ilişki, yani şantiye gereksiniminin fabrika veya ocaktan ekonomik olarak karşılandığı bölgeleri ayıran sınır, birim fiyatların değişmesiyle değişecek ancak, fiyat artış yüzdesi yapılan hesaplara esas tüm değerlere eşit olarak yansıtıldığından söz konusu sınırdaki önemli bir değişiklik olmayacaktır.

Buna karşılık sayısal uygulamada yer verilmeyen maliyet terimlerine yer verildiğinde ve yapılan kabullerde değişiklik yapıldığında, ekonomik şantiye-fabrika/ocak mesafeleri önemli ölçüde değişecektir.

Uygulamada, şantiye sayıları ve tüketimleri, ocak kapasite ve mesafeleri, fabrika kapasite ve mesafeleri, nakliye fiyatları ve ilgili diğer terimler gerçek değerleri ile ele alınarak aynı yöntem uygu-

landığında, cürufun ekonomik kullanılma mesafesi kesin olarak hesaplanabilecektir.

Sonuç olarak, kurulacak bir yol şantiyesinde, gerekli agrega tüketim miktarları ve bu şantiyenin ihtiyacını karşılayabilecek kapasite ve teknik özelliklerdeki taş ocakları belirlendikten sonra, cürufun da bu şantiyede doğal agregaya alternatif olabileceği düşüncesiyle ve açıklanan yöntemle bir tahkinin yapılması çok yararlı olabilecektir.



## SONUÇLAR

Erdemir cüruf türlerinin karayolu üstyapısında kullanılabilirliğinin araştırılmasını amaçlayan bu çalışmanın sonuçları, aşağıda özetlenmiştir.

1- Erdemir cürufunun sahip olduğu kimyasal özellikler bu malzemenin agregada olarak kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır.

2- Erdemir cüruf türlerinin fiziksel özellikleri, üstyapı tabakalarında kullanılacak agregalarda aranan şartlara uymaktadır. Ancak hava soğutmalı yüksek fırın cürufunun soyulma direnci, bitümlü karışımlarda kullanılacak agregada aranan değerden küçük bulunmuş, çelik cürufunun ise aranan değerden çok üstünde bir soyulma direnci gösterdiği tespit edilmiştir.

3- Kırılmış ve elenmiş hava soğutmalı cürufa, belirli bir oranda granüle cüruf katılarak elde edilen bağlayıcısız karışımın mekanik direnci, karayolu alttemel ve temel tabakalarında aranan değerlerin üstünde bulunmuştur.

4- Hava soğutmalı kırılmış cürufa, saptanan granülometriyi bozmayacak optimum oranda granüle cüruf ve çok az miktarda bağlayıcı (çimento, kireç) katılarak elde edilen karışımın mekanik direnci, yüksek trafikli yolların temel tabakasında aranan mekanik şartları sağlamaktadır.

5- Çelik cürufuna, filler olarak portland çimentosu, bağlayıcı olarak da asfalt çimentosu katılmasıyla oluşturulan bitümlü karışımın, çok yüksek trafikli yolların aşınma tabakasında dahi kullanılabilceği anlaşılmıştır.

6- Cürufulla oluşturulan bitümlü karışımlarda kullanılan optimum asfalt çimentosu yüzdesi, asfalt betonu birim fiyat analizinde belirtilen

len degerden daha azdır.

7- Cürüfla oluşturulan bitümlü karışımlarda, su etkisinin stabiliteyi önemsenmeyecek miktarda azaltmasının yanında, bu karışımda su etkisi ile meydana gelebilecek hacimsel genişleme de küçük değerlerde kalmaktadır. Cürüflü bitümlü karışımların su tesirlerine ve dona karşı gösterdikleri yüksek direnç sayesinde bu tip yollarda harcanacak bakım ve onarım masrafları azalabilecektir.

8- Hazırlanan bitümlü karışımlarda, çelik cürufuna granüle cüruf eklenmesi, bu karışımlarda aranan özellikleri olumsuz yönde etkilememektedir. Ancak, çok uzun süreli su tesirlerinin söz konusu olabileceği durumlarda, bitümlü cüruf karışımına çok az miktarda granüle cüruf katılmasının yararlı olabileceği tahmin edilmektedir.

9- Yapılan Ekonomik Etüd'de görülebileceği gibi; fabrikalara belirli mesafelerdeki şantiyelerde, karayolu üstyapısında Erdemir cürufunun kullanılabilirliği ekonomik yönden de elverişli olmaktadır. Taş ocaklarının kapasiteleri ve şantiyelere olan uzaklığına göre, cürufun ekonomik olarak kullanılma mesafesi önemli ölçüde değişmektedir. Yol şantiyelerinin, Demir-Çelik fabrikalarına olan uzaklıklarının Ekonomik Etüd'de belirlenen değerlerden daha küçük olması durumunda, cürüfla oluşturulan üstyapı maliyetleri de azalabilecektir.

10- Erdemir cürufu için bulunan bu olumlu sonuçların, ülkemizdeki diğer Demir-Çelik Fabrikalarının cürufları için de elde edilebileceği tahmin edilmektedir. İleride bu konuda yapılacak çalışmalar gerek ülke ekonomisine katkısı gerek ilgili fabrikaların yeni boş alanlara kavuşması ve çevre kirliliğinin azalması yönünde olumlu sonuçların ortaya çıkmasını sağlayabilecektir.

## K A Y N A K L A R

1. İLTER A., Yol Yapımında Agregat ve Bitümlü Malzemeler, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayın No.153, Ankara 1967.
2. YSE., Yol Bilgisi, Yol Su Elektrik Genel Müdürlüğü, Yayın No.55 Ankara 1984.
3. KGM., Karayolları Bülteni, Karayolları Genel Müdürlüğü, Sayı: 437, Ankara, 1987
4. DPT., 1983-93 Ulaştırma Ana Planı, Ankara, 1982.
5. UMAR F., AĞAR E., Yol Üstyapısı, 3.Baskı, İ.T.Ü. Kütüphanesi, Sayı:1299, İstanbul 1985.
6. ERFEL A., Düşey Dinamik Dingil Yükleri Altındaki Demiryolu Yapısında, Taban Zeminlerinin Taşıma Güçlerine Bağlı Olarak, Minimum Balast Kalınlığının Hesaplanması, Doktora Tezi, İstanbul, 1978.
7. KGM., Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1984.
8. RG., Karayolları Trafik Yönetmeliği, Resmi Gazete, Ankara, 16 Haziran 1875.
9. OECD., Resistance of Flexible Pavements to Plastic Deformation, OECD Road Research Group, Paris, 1975.
10. YODER E.J., WİTCZAK N.W., Principles of Pavement Design, John Wiley and Sons, Second Edition,U.S.A.1975.
11. YÜCE R., Asfalt Karışımların Rijitlik Modülünün ve Kür Süresinin Fiziksel Özelliklerine Olan Etkisinin İncelenmesi, Doçentlik Tezi, ODTÜ, Ankara 1977.

12. YÜCE R., The Influence of Some Dimensional Factors and of Elastic Foundation Support on Fatigue of Asphalt Concrete, Doktora Tezi, ODTÜ, Ankara 1972.
13. YÜCE R., Asfalt Karışımların Yorulma Özellikleri, TUBİTAK IV. Bilim Kongresi, Ankara, 1973.
14. YÜCE R., Üstyapıyı Korumada Yaklaşımlar ve Projelendirme Yöntemleri, Türkiye'de Ulaştırma Planlaması Sorunları ve UAP Sempozyumu, İstanbul, 1984.
15. KUMBASAR V., KUMBASAR F., ÜNAL A., Soil Mechanics For Road Engineers, Çeviri, İ.T.Ü., İstanbul, 1970.
16. KEÇECİLER F., CÜMRÜKÇÜOĞLU A., AKKOL G., GÖKÇE F., Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No: 239, Ankara 1979.
17. KGM., Yollar Fenni Şartnamesi ve Bitümlü Kaplamalar Fenni Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü Ek-1986. Ankara 1986.
18. AASHTO, Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Part I, Part II, Washington, D.C. 2004, 1974.
19. LAÇİN A., Rijit Yol Üstyapılarında Projelendirme ve İnşaat Metodlarının İncelenmesi ve Rijit Üstyapıların Türkiye Koşullarında Esnek Üstyapılar ile Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılarak Değerlendirilmesi, Doçentlik Tezi, İDMMA, İstanbul 1979.
20. POSTACIOĞLU B., Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1975.
21. ATANUR A., Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikatı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara 1973.
22. ÖZİŞİK G., Beton, Teknik Yayınevi, Çeviri, İstanbul
23. KREBS R., WALKER R., Highway Materials, McGraw-Hill, USA, 1971.

24. YAĞIZ F., İŞIKSALAN C., KEÇECİLER F., AKKOL G., Bitümlü Malzemeler, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No:149, Ankara 1967.
25. KGM., Yollar Fenni Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No:170/1, Ankara, 1973.
26. KGM., Bitümlü Kaplamalar Fenni Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No: 171, Ankara, 1983.
27. HEATON B.E., BULLEN F., Properties of Stabilized Blast Furnace Slag Road Base, University of Newcastle, 1982.
28. ATANUR A., Yol Yapımında Yüksek Fırın Cürufu, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No:249, Ankara 1982.
29. HOSKING J.R., Road Stone Tests on Present Day Blast Furnace Slag, RRL Report LR96, Crowthorne, 1967.
30. ERDEMİR., Ereğli Demir Çelik Fabrikaları Mühendislik ve Yatırımlar Genel Müdür Yardımcılığı, Cüruf Granülasyon Tesisi Fizibilite Raporu, Proje-4, Ereğli, 1983.
31. EMERY J.J., KIM C.S., COTSWORTH R.P., Base Stabilization Using Pelletized Blast Furnace Slag, McMaster University, Canada, 1976.
32. GUTT W., NIXON P.J., Use Waste Materials in the Construction Industry, Analysis of Rilem Symposium, Rue Brancion 12, Paris, 1979.
33. OECD., Use of Waste Materials and by-products in Road Construction OECD Road Research Group, Paris 1977.
34. GÜNER A., Öğütülmüş Karabük Yüksek Fırın Cürufunun Portland Çimentoları ile Birlikte Kullanılma Olanakları, TÜPİTAK, VII. Bilim Kongresi, Kuşadası, 1980.
35. BELLİ Y., Yüksek Fırın Cüruflarının Değerlendirilmesi, Maden Fakültesi, Bitirme Tezi, İ.T.Ü. İstanbul 1975.

36. İSDEMİR., İskenderun Demir-Çelik Fabrikaları Müessesese Müdürlüğü'nün  
12/12/1984 tarih,3317/03490-30814 sayılı yazı eki.
37. Karabük Demir-Çelik Fabrikaları Müessesese Müdürlüğü'nün 7.12.1984 tarih,  
1400/1871 sayılı yazı eki.
38. ERDEMİR., Ereğli Demir-Çelik Fabrikaları,Proses ve Laboratuvarlar  
Müdürlüğü,Yüksek fırın ve Çelik Cürufu konularında Bilgi,  
Ereğli,Mayıs 1985.
39. AMSLER D., CHAMBERLIN P., JAQUEWAY J., An Investigation of Cracking  
of Slag-Aggregate Concrete Pacements, Engineering Research  
and Development Bureau, Special Report:34, New York,1975.
40. ANDERSSON O., Properties of Road Bases Stabilized With Blast Furnace  
Slag, Department of Highway Engineering Royal Institute  
of Technology, Sweden,1979.
41. BULLEW F., Strengths and Resilient Modulus for Crvsher RUN Blast  
Furnace Slag and Additives,Utilisation of Steel Plant  
Slags Symposion,Australia, 1979.
42. MINTY E.J., Evaluation of Blast Furnace Slag as Base Material in  
Road Povements, Utilisation of Steel Plant Slags  
Symposium,Australia,1979.
43. CLARKE P.J., WEST G.N., Blast Furnace Slag and Low Durability Rock  
Blends as Pavement Materials in Road Trial  
Performance Testing,First National Local  
Goverment Engineering Conference,Adelaide,1981.
44. MINTY E.J., Evaluation of Blast Furnace Slag as Base Material in Road  
Pavements,Utilisation of Steel Plant Slags Symposium,  
Australia,1979.
45. RYELL J., CORKILL J., MUSGROVE G., Skid Resistance of Bituminous-  
Pavement Test Sections:Toronto by-pass Project,ontario  
Ministry of Transportation,Canada.

46. HEATON B., BULLEN F., Properties of Air-cooled Slag Road Base for Rational Pavement Design, Australian Road Research Board Conference, Sydney, 1980,
47. SARGEANT H., Surface Dressings on Motorway, Road Research Laboratory IRRD 223857
48. HOSKIN J.R., The Effect of Aggregate on the Skidding Resistance of Bituminous Surfacing, TRRL Report:LR 553, Crowthorne, 1973.
49. BATE I.C., Slag as a Road Base and Stabilizer in Rhodesia, Rhodesian Institution of Engineers, Rhodesia, 1972.
50. JAMES J.G., HOSKING J.R., Improvements in or Relating to Artificial Road Stone, British Patent Specification No 1241797, London, 1971.
51. EMERY J.J., Steel Slag Applications in Highway Construction, Mc master University, Canada, 1977.
52. SCHOLER C.F., Thin, Applied Surfacing for Improving Skid Resistance of Concrete Pavements, Purdue University, Civil Engineering Building, USA, 1980.
53. BULLEN F., The Use of Blast Furnace Slag in Road Pavement Base and Sub-base Construction, University of Newcastle, Australia, 1979.
54. JONES D.E., Application of Steel Plant by-Products to Road Works, Australian Road Research Board, Victoria, Australia, 1982.
55. HAGA N., KONNO M., Utilization of Blast Furnace and Steel Slags in Road Construction, Nippon Steel Corporation, New York, 1981.
56. TS., İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, No:1900, Ankara 1975.
57. TS., Bitümlü Kaplama Karışımlarının Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, No:3720, Ankara

- 58.SOYSÜREN H., İstatistikte Korelasyon, Yeterlik Tezi, İDMMA, İstanbul  
1974.
- 59.GÜRTAN K., İstatistik ve Araştırma Metodları, Alaş Basım ve İmalat  
Sanayi,İstanbul,1982.
- 60.KGM., Yol ve Köprü İnşaatı Fiyat Analizi, Karayolları Genel Müdürlüğü,  
Ankara,1980.
- 61.KGM., 1986 yılı Bitümlü Kaplama İşleri, Birim Fiyat Listesi, Karayolları  
Genel Müdürlüğü, Ankara,1986.
- 62.DDY., 1986 yılı Yurt içi Yük Taşıma Tarife Tablosu, Devlet Demiryolları  
Genel Müdürlüğü,Ankara,1986.
- 63.YAYLA N., Granüler Yol Temel Malzemelerinin Sıkışma ve Penetrasyon  
Direncine Etkiyen Faktörler, Doktora Tezi, İ.T.Ü.İstanbul  
1972.

EK-I

DENEY SONUÇLARININ REGRESYON ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ  
İÇİN HAZIRLANARAK, KULLANILAN BİLGİSAYAN PROGRAMI

5 CLS

10 INPUT "Nokta Sayisi=";N

12 CLS

15 B=0:C=0:XY=0:Q=0:Z=0:QQ=0:WW=0:EE=0:RR=0

20 DIM X(N):DIM Y(N):DIM F(N):DIM G(N)

25 FOR A=1 TO N

30 INPUT "x=";X(A)

35 INPUT "y=";Y(A)

37 CLS

40 NEXT A

45 FOR A=1 TO N

50 QQ=QQ+X(A)

55 WW=WW+Y(A)

60 EE=EE+(X(A)\*Y(A))

65 RR=RR+X(A)^2

70 NEXT A

75 T=((N\*EE)-(QQ\*WW))/((N\*RR)-(QQ^2))

80 U=((RR\*WW)-(QQ\*EE))/((N\*RR)-(QQ^2))

100 PRINT "y="; INT(T\*1000+.5)/1000;"x="; INT(U\*1000+.5)/1000

102 FOR A=1 TO N

105 B=B+X(A)

107 C=C+Y(A)

110 NEXT A

115 D=B/N:E=C/N

120 FOR A=1 TO N

125 F(A)=(X(A)-D)

127 G(A)=(Y(A)-E)

130 NEXT A

135 FOR A=1 TO N

140 XY=XY+(F(A)\*G(A))

145 Q=Q+ABS(F(A))^2

147 Z=Z+ABS(G(A))^2

150 NEXT A

155 R=XY/(SQR(Q\*Z))

160 PRINT "KORELASYON KATSAYISI=";R

200 REM IKINCI DERECE

205 DIM A(N):DIM W(N):DIM V(N):DIM S(N):DIM K(N):DIM O(N):Q2=0:W2=0:E2=0:R2=0:U2=0:I2=0

210 FOR A=1 TO N

215 Q2=Q2+X(A)

220 W2=W2+Y(A)

225 E2=E2+X(A)^2

230 R2=R2+X(A)^3

235 T2=T2+X(A)^2

240 U2=U2+(X(A)-2+Y(A))

245 I2=I2+(X(A)\*Y(A))

250 NEXT A

255 DEL1=(E2\*T2-N\*R2\*Q2+T2+T2\*R2\*Q2)-(T2\*Q2+Q2\*E2+R2\*Q2)

260 DEL2=(U2\*T2+N\*R2\*Q2+W2+T2+T2\*U2)-(U2+T2\*Q2+Q2\*U2+R2\*Q2)

265 DEL3=(E2+I2\*N+Q2\*Q2+T2+T2\*R2\*Q2)-(E2+I2\*Q2+Q2\*E2+R2\*Q2)

270 DEL4=(E2\*T2+R2\*Q2+T2+T2\*U2+Q2\*Q2)-(E2\*Q2+U2+Q2+T2+E2\*Q2+R2\*Q2)

275 X3=DEL1/DEL

280 Y2=DEL2/DEL

285 Y=DEL3/DEL

290 PRINT "y=";INT(Y\*1000+.5)/1000;"x2=";INT(X3\*1000+.5)/1000;"x=";INT(X\*1000+.5)/1000

295 REM IKINCI DERECE KATLI KORELASYON KATSAYISI

```

300 XX=0;YY=0;X4=0;J=0;T=0;I=0;L=0
305 FOR A=1 TO N
310 A(A)=X(A)^2
315 XX=XX+X(A)
320 YY=YY+Y(A)
325 X4=X4+A(A)
330 NEXT A
335 >XX=XX/N;YYY=YY/N;X5=X4/N
340 FOR A=1 TO N
345 V(A)=Y(A)-YYY
350 S(A)=A(A)-X5
355 W(A)=X(A)-YXX
360 NEXT A
365 FOR A=1 TO N
370 J=J+ABS(V(A))^2
375 NEXT A
380 FOR A=1 TO N
385 K(A)=(V(A)+W(A))
390 O(A)=(V(A)*S(A))
395 NEXT A
400 FOR A=1 TO N
405 I=I+K(A)
410 T=T+O(A)
415 NEXT A
420 JJ=J/N;II=I/N;TT=T/N
425 III=(X2*II)+(X3*TT)
430 KK=SQR(III/IJ)
435 PRINT "KORELASYON KATSAYISI=";KK
500 REM UCUNCU DERECE
505 J=0;V=0;B=0;C=0;D=0;E=0;F=0;G=0;H=0;I=0;K=0;L=0
510 FOR A=1 TO N
515 V=V+X(A)^6
520 B=B+X(A)^5
525 C=C+X(A)^4
530 D=D+X(A)^3
535 E=E+X(A)^2
540 F=F+X(A)
545 H=H+(X(A)^3*Y(A))
550 I=I+(X(A)^2*Y(A))
555 J=J+(X(A)*Y(A))
560 G=G+Y(A)
565 NEXT A
570 REM BIRINCI SATIRII MINORLERINDEN YARARLANIRAK
572 REM 4x4 KARE MATRISIN ACTILINTI
575 DEL1=((V*B-D^2)*(E*N-F^2))-((V*D-B*C)*(D*N-F*E))+((V*E-B*D)*(D*F-E^2))+((B*D-C^2)*(C*N-D*F))-((B*E-C*D)*(C*F-D*E))+((C*E-D^2)*(C*K-E^2))
580 DEL2=((H*C-B*I)*(E*N-F^2))-((H*D-C*J)*(D*N-F*E))+((H*E-I*J)*(D*F-E^2))+((B*D-C^2)*(J*N-F*G))-((B*E-C*D)*(I*F-G*E))+((C*E-D^2)*(J*K-E*G))
585 DEL3=((V*I-B*H)*(E*N-F^2))-((V*D-B*C)*(J*N-G*F))+((V*E-B*D)*(J*F-G*E))+((H*D-I*K)*(C*H-D*F))-((H*E-I*J)*(C*F-C*E))+((C*E-D^2)*(C*G-D*J))
590 DEL4=((V*C-B^2)*(J*N-F*G))-((V*I-B*H)*(D*N-E*F))+((V*E-B*D)*(D*G-E*J))+((B*I-C*H)*(C*N-D*F))-((B*E-C*D)*(C*G-D*J))+((H*E-I*J)*(C*E-D^2))
595 DEL5=((V*C-B^2)*(E*G-J*F))-((V*D-B*C)*(D*G-J*E))+((V*J-B*H)*(D*F-E^2))+((B*D-C^2)*(C*G-D*J))-((B*I-C*H)*(C*F-E*D))+((C*I-D*H)*(C*E-D^2))
600 Y3=DEL1/DEL;Y5=DEL2/DEL;Z3=DEL3/DEL;T3=DEL4/DEL
605 PRINT "y=";INT(X3*1000+.5)/1000;"x^3";INT(Y3*1000+.5)/1000;"x^2";INT(Z3*1000+.5)/1000;"x";INT(T3*1000+.5)/1000
610 REM UCUNCU DERECE KATLI REGRESSIYON
615 DIM B(N);DIM P(N);DIM Q(N)
620 FOR A=1 TO N
625 Q(A)=Y(A)^3
630 NEXT A
635 X30=0
640 FOR A=1 TO N
645 X30=X30+Q(A)
650 NEXT A
655 HD=X30/H
660 FOR A=1 TO N
665 P(A)=Q(A)-HD
670 B(A)=P(A)+V(A)
675 NEXT A
680 YH=0
685 FOR A=1 TO N
690 YH=YH+D(A)
695 NEXT A
700 TY=YH/N
705 III=(Z3*II)+(Y3*TT)+(X3*TY)
710 KK=SQR(ABS(III/IJ))

```

EK-II

EKONOMİK ETÜD'DE KULLANILAN BİLGİSAYAR PAKET PROGRAMI

```

CHANGUTER 00 BBASIC, CBASIC, DBASIC, SOLVE, SBASIC, AI, AJ, ROW(70) MLP0001
*) , CLL(150), TITLE(12), COLJ, ROWI, IDENK*80 MLP0002
DIMENSION A(72,72), B(72), IBASIS(70) MLP0003
DATA ABASIC, BBASIC, CBASIC, DBASIC, SOLVE/'BASIC', ' ' , 'BLNDNG', MLP0004
'SLACK', 'SOLVE' / MLP0005
**** ESITILIK VE DENKLEM SAYILARININ OKUTULMASI ***** MLP0006
ISTOP=0 MLP0007
ITER=0 MLP0008
73 READ(5,1301) (TITLE(I), I=1,12) MLP0009
IF (TITLE(1).EQ.'-----') GO TO 10000 MLP0010
READ(5,*) III MLP0011
WRITE(6,1101) (TITLE(I), I=1,12) MLP0012
READ(5,1302) M,N MLP0013
WRITE(6,1002) M,N MLP0014
*** DENKLEMLERIN OKUTULMASI VE YAZDIRILMASI ***** MLP0015
WRITE(6,3333) MLP0016
3333 FORMAT(IX,79(1X,1) / MLP0017
I1,M=*,111 MLP0018
DO 13 I=1,M MLP0019
READ(5,1033) IDENK MLP0020
13 WRITE(6,1133) IDENK MLP0021
3333 FORMAT(1X,30) MLP0022
1133 FORMAT(1X,A30) MLP0023
WRITE(6,3333) MLP0024
NM=*,1 MLP0025
MPLUS2=N+2 MLP0026
DO 5 J=1,MPLUS2 MLP0027
B(I)=0. MLP0028
IBASIS(I)=0 MLP0029
DO 5 J=1,NM MLP0030
A(I,J)=0 MLP0031
5 CONTINUE MLP0032
MLP0033
**** E ILIK AGLARININ VE KAPASITELERININ OKUTULMASI ***** MLP0034
DO 10 I=1,M MLP0035
READ(5,1031) ROW(I),B(I) MLP0036
WRITE(6,1103) ROW(I),B(I) MLP0037
10 CONTINUE MLP0038
MLP0039
**** DESI-KEN AGLARININ VE AKA FONKSİYONLU KATSAYILARININ OKUTULMASI *** MLP0040
DO 20 J=1,N MLP0041
READ(5,1034) COL(J),A(M+1,J) MLP0042
WRITE(6,1104) COL(J),A(M+1,J) MLP0043
20 CONTINUE MLP0044
MLP0045
**** KATSAYILARIN OKUTULMASI ***** MLP0046
MLP0047
50 IZ=0 MLP0048
JZ=0 MLP0049
READ(5,1005) AI,AJ,VALUE MLP0050
IF(AI.EQ.SOLVE) GO TO 99 MLP0051
WRITE(6,1105) AI,AJ,VALUE MLP0052
DO 50 II=1,M MLP0053
IF(AI.EQ.ROW(II)) GO TO 62 MLP0054
50 CONTINUE MLP0055
GO TO 700 MLP0056
62 IZ=IZ+1 MLP0057
DO 65 J1=1,N MLP0058
IF(AJ.EQ.COL(J1)) GO TO 66 MLP0059
65 CONTINUE MLP0060
MLP0061
MLP0062

```

	GO TO 700	MLP00630
66	JZ=J1	MLP00640
	A(I+2,J)=A(I,J)+B(I,J)	MLP00650
	GO TO 50	MLP00660
99	WRITE(6,1197)	MLP00670
	IF(ISTOP.EQ.1) GO TO 9000	MLP00680
	K=2	MLP00690
	NI=I+1	MLP00700
C		MLP00710
C****	SATIR SEÇİMİNE HAZIRLIK*****	MLP00720
C		MLP00730
	DO 120 J=1,N	MLP00740
	A(I+2,J)=0	MLP00750
	DO 120 I=1,M	MLP00760
	A(I+2,J)=A(I+2,J)+A(I,J)	MLP00770
120	CONTINUE	MLP00780
C		MLP00790
C****	BASLAŞIÇ TEMEL VE YAPAY DEĞİŞKENLER*****	MLP00800
C		MLP00810
	DO 110 I=1,M	MLP00820
	NPLUSI=N+1	MLP00830
	A(I,NPLUSI)=1.	MLP00840
	IBASIS(I)=0	MLP00850
	B(I+2)=B(I+2)+B(I)	MLP00860
110	CONTINUE	MLP00870
C		MLP00880
C****	PIVOT SEÇİMİNİN BULUNMASI*****	MLP00890
C		MLP00900
399	DPS=0	MLP00910
	MPLUSK=N+K	MLP00920
400	DO 410 J=1,N	MLP00930
405	IF(A(MPLUSK,J)-DPS)410,410,+20	MLP00940
420	DPS=A(MPLUSK,J)	MLP00950
	JPIV=J	MLP00960
410	CONTINUE	MLP00970
C		MLP00980
C****	PIVOT SATIRIN BULUNMASI*****	MLP00990
C		MLP01000
	IF(DPS-LE=0) 501,501,450	MLP01010
450	RATMIN=.10E+06	MLP01020
	IPIV=I+3	MLP01030
	DO 470 J=1,N	MLP01040
	IF(A(I+J,PIV)-LE+.0E+06) GO TO 470	MLP01050
	RATIO=B(I)/A(I,JPIV)	MLP01060
	IF(RATIO<RATMIN) GO TO 470	MLP01070
	RATMIN=RATIO	MLP01080
	IPIV=I	MLP01090
470	CONTINUE	MLP01100
	IF(A(I+2,PIV)-LE+.0E+06) GO TO 470	MLP01110
	DO 475 I=1,M	MLP01120
	IF(ABS(S(I)).LE+.0E+06) GO TO 475	MLP01130
	IF(ABS(A(I,JPIV)).LE+.10E+06) GO TO 475	MLP01140
	IPIV=I	MLP01150
475	CONTINUE	MLP01160
476	PIVOT=A(IPIV,JPIV)	MLP01170
	IBASIS(IPIV)=JPIV	MLP01180
	ITKSI=ITKSI+1	MLP01190
C		MLP01200
C****	PIVOT BULUNMAYSA ÖZGÜM TABLOSU*****	MLP01210
C****	PIVOT BULUNMAYSA GÜZÜM SİARLI DEĞİL*****	MLP01220
C		MLP01230
	IF(IPIV.EQ.N+3) GO TO 495	MLP01240

DU 500 I=1,NPLUSK	MLP01250
IF(A.EQ.IPIV) GO TO 500	MLP01260
DU 490 J=1,M	MLP01270
IF(J.EQ.JPIV) GO TO 460	MLP01280
A(I,J)=A(I,J)+A(I,JPIV)*A(IPIV,J)/PIVOT	MLP01290
480 CONTINUE	MLP01300
B(I)=B(I)-A(I,JPIV)*B(IPIV)/PIVOT	MLP01310
A(I,JPIV)=0.	MLP01320
500 CONTINUE	MLP01330
DU 490 J=1,M	MLP01340
A(IPIV,J)=A(IPIV,J)/PIVOT	MLP01350
C	MLP01360
495 CONTINUE	MLP01370
B(IPIV)=B(IPIV)/PIVOT	MLP01380
GO TO 397	MLP01390
496 WRITE(6,1005)	MLP01400
GO TO 571	MLP01410
501 IF(N.E.1) GO TO 510	MLP01420
I=I+(N-1)-1.0E-03+504,504,505	MLP01430
C	MLP01440
C**** ELVERİŞİN GÖZÜM YOK*****	MLP01450
C	MLP01460
505 WRITE(6,1007)	MLP01470
GO TO 571	MLP01480
504 K=1	MLP01490
C	MLP01500
C**** DRTIYAN GÖZÜ: SIKTIYI*****	MLP01510
C	MLP01520
GO TO 397	MLP01530
510 WRITE(6,1003) ITERS	MLP01540
ZIMBOX=34*(K-1)	MLP01550
WRITE(6,1010) ZIMBOX	MLP01560
WRITE(6,1011)	MLP01570
DU 590 J=1,N	MLP01580
COLJ=COL(J)	MLP01590
DELTAJ=A(N+1,J)	MLP01600
DU 580 I=1,K	MLP01610
Ii=1	MLP01620
IF(Ii.SIS(Ii).EJ) JJ GO TO 550	MLP01630
520 CONTINUE	MLP01640
X=0.	MLP01650
SbASIC=0BASIC	MLP01660
GO TO 563	MLP01670
550 X=B(Ii)	MLP01680
SbASIC=XBASIC	MLP01690
560 WRITE(6,1009)COLJ,SBASIC,X,DELTAJ	MLP01700
580 CONTINUE	MLP01710
561 WRITE(6,1012)	MLP01720
DU 570 I=1,M	MLP01730
SbASIC=CbASIC	MLP01740
R041=R04(I)	MLP01750
NPLUSI=N+1	MLP01760
X=X+R041/NPLUSI	MLP01770
IF(ABS(X)-1.0E-09) 552,562,600	MLP01780
562 IF(ABS(X)-1)554,563,564	MLP01790
563 SbASIC=BbASIC	MLP01800
FLOWER=0.	MLP01810
FUPPER=0.	MLP01820
GO TO 567	MLP01830
564 SbASIC=DbASIC	MLP01840
606 FLOWER=1.0E+10	MLP01850
FUPPER=1.0E+10	MLP01860





EKONOMİK ETÜD SAYISAL UYGULAMADA KULLANILAN DEĞERLER (YAPILAN ANALİZ-  
LER) (T.C.K.Genel Müdürlüğü) 1986 birim fiyat ve Analizlerine göre

Poz No

6400 ASFALT BETONU AŞINMA TABAKASI YAPILMASI (Bir ton)

(Doğal Agregalı Maliyeti Analizi)

	Miktarı	Birim fiyatı (1986)	Tutarı
Ocak taşından konkasörle kırılmış elenmiş 25 mm (1") ve 19 mm (3/4") lik agregalı hazırlanması (4256 dan) 0.190 ton	0,190	2359.43	448.29
Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 16 mm (5/8") ve 13 mm (1/2") lik agregalı hazırlanması 0.237 ton (4265 den)	0,237	2483,34	588,55
Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 95 mm (3/8") 6,5 mm (1/4") 4,76 mm/No.4) lik agregalı hazırlanması 0.521 ton (4265/1 den)	0,521	2545,29	1326,10
	0,948 ton	Toplam	2362,94 TL/ TON

CÜRUF MALİYETİ İLE İLGİLİ ANALİZLER:

<u>Poz No</u>	<u>Analizin Adı</u>		
03.530	Konkasörün 1 saatlik ücreti/sa		
03.030	Makina	$0,000171 \times 40\ 500\ 000 =$	6925,5
04,109	Mazot	$22,5 \times 216 =$	4860
	Makina yağı	$4,5 \times 216 =$	972
	İşletme		
01.409	Formen	Aylık $0,0202x\ 126960 =$	253,92
01.403	Makinist	Aylık $0,12 \times 88080 =$	1056,96
01.408	Yağcı	Sa $4 \times 268 =$	1072
01.501	Düz işçi	sa $3 \times 240 =$	720
			15860.38 TL/sa

<u>Poz No</u>	<u>Analizin Adı</u>		
03.521	Lastik Tekerlekli Yükleyci (sa)		
<b>MAKİNA</b>			
Amortisman	0,000100 x 24 000 000	=	2400
Yedek Parça	0,000053 x 24 000 000	=	1272
Tamir bakım	0,000013 x 24 000 000	=	312
Sermaye faizi sigorta	0,000024 x 24 000 000	=	576
Nakil,montaj,demontaj	0,000010 x 24 000 000	=	240
04.109 Mazot	12.000 x 216	=	2592
Makina yağı	2.4 x 216	=	518.4
İşletme			
01.404 Operatör	0.006 x 100320	=	601.92
01.408 Yağcı	1 x 268	=	268
	1 saatlik ücret		8780.32 TL/sa

<u>Poz No</u>	<u>Analizin Adı</u>		
03.031	1 saatlik elek ücreti		
03.031	Makinadan	0,000171 x 9300 000	= 1590
	Mazot	10,5 x 216	= 2268
	Yağ	2,1 x 216	= 453.6
	İşletme		
	Formen	0,001 x 126960	= 12696
	Makinist	0,006 x 88080	= 528,48
	Yağcı	0,5 x 268	= 134
	Düz işçi	0,5 x 240	= 120
			5221.34 TL/sa

### 25 mm - 19 mm Cüruf Kıırma Ve Eleme Masrafı:

Konkasöre ve taşıtlara yükleme

Konkasör altının boşaltılması 0,030 x 8780,32 = 263.41

(03.521 den)

Kırma ve Eleme karşılığı

(03.530 dan) 0,045 x 15860,38 = 713.72

Granülometri Ayarlama işleri

Karşılığı (03.031 den) 0,06 x 5221.34 = 31328

Formen 0,25 x 529 = 132,25

Düz işçi 0,05 x 240 = 12

---

1434.66

% 25 Müteahhit karı ve  
genel masraflar

358.66

(cüruf bir.hac.ğ.1,795 t/m<sup>3</sup>)

---

1793.32 TL/m<sup>3</sup>

(999.06 TL/TON)

### 16 mm-13 mm Cüruf Kıırma ve Eleme Masrafı

Konkasöre ve taşıtlara yükleme

Konkasör altının boşaltılması 0,030 x 878032 = 263.41

karşılığı (03.521 den)

Kırma ve Eleme Karşılığı (03.530 dan) 0,055 x 15860.38 = 872.32

Granülometri ayarlama işleri

Karşılığı (03.031 den) 0.06 x 5221.34 = 313.28

Formen 0,25 x 529 = 132.25

Düz işçi 0,05 x 240 = 12

---

1593.26

% 25 Müteahhit karı ve  
Genel masraflar

398.32

---

1991.58 TL/m<sup>3</sup>

(1109.52 TL/TON)

9,5 mm-6,5 mm; 4,76 mm-0,84 mm Cüruf Kıрма ve Eleme Masrafı

Konkasöre ve taşıtlara yükleme ve

konkasör altının boşaltılması 0,030 x 878032 = 263.41

karşılığı (03.521 den)

Kırma ve Eleme Karşılığı (03.530 dan) 0,060 x 15860.38 = 951.62

Granülometri Ayarlanması (03.031 den) 0,06 x 5221.34 = 313.28

Formen 0,25 x 529 = 132.25

Düz işçi 0,05 x 240 = 12

1672.56

% 25 Müteahhit karı ve

genel giderler 418.14

2090.70 TL/m<sup>3</sup>

(1164.74 TL/TON)

Poz No

6400 Bir ton Cürüflu asfalt betonu

Aşırma tabakası yapılması

(cüruf maliyeti analizi)

	Miktarı	Birim fiatı (1986)	Tutarı
Konkasör ile kırılmış,elenmiş cüruf ile 25 mm (1") ve 19 mm (3/4")lik agrega hazırlanması (0,190 ton)	0,190	999.06	189.82
Konkasör ile kırılmış,elenmiş cüruf ile 16 mm (5/8") ve 13 mm (1/2")lik agrega hazırlanması (0,237 ton)	0,237	1109.52	262.96
Konkasör ile kırılmış elenmiş cüruf ile 9,5 mm (3/8") 6,5 mm (1/4"), 4,76 mm (No.4)lik agregası hazırlanması (0,521 ton)	0.521	1164.74	606.83

1059.61 TL/TON

## ÖZGEÇMİŞ

1954 yılında Erzurum'da dünyaya gelen Mustafa ILICALI, İzmit Lisesinden 1971 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl İ.T.Ü. İnşaat Fakültesine girmiş ve 1975 yılında mezun olmuştur. 1975-1979 yılları arasında İzmit Bayındırlık Müdürlüğü'nde İnşaat Mühendisi olarak çalışmıştır. 1978 yılında Yüksek Mühendis olan Mustafa ILICALI, 1979 yılından beri Yıldız Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Evli ve bir çocuk babasıdır.

