

**Atık Kalıp Kumunun Yol Alt Yapısında
Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi**

Deniz GEÇİM
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Mayıs – 2004

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Deniz GEÇİM'in Atık Kalıp Kumunun Yol Alt Yapısında Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi.14.06.2004.tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yrd. Doç. Dr. Yücel GÜNEY	
Üye	: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN	
Üye	: Yrd. Doç .Dr. Alpagut KARA	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
14.07.2004. tarih ve 24/2... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Altuğ İFTAR
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK KALIP KUMUNUN YOL ALT YAPISINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

DENİZ GEÇİM

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yücel GÜNEY
2004, 162 sayfa

Döküm sanayinde kullanılan kalıp kumları birkaç kullanımdan sonra kalitelerini kaybederek atık haline gelir. Her sene binlerce ton kalıp kumu atık yığını haline gelmektedir ve depolama alanlarının büyük bir kısmını doldurmaktadır. Ayrıca kalıp kumunun barındırdığı metallere dolayı, yer altı suyunda metal sızıntısı da meydana gelebilir. Bundan dolayı atık kalıp kumunun stabilize edilmesi ve tekrar kullanımının araştırılması gereklidir.

Bu çalışmada atık kalıp kumunun kireç, çimento ve kırmataş ile belirli oranlardaki karışımları hazırlanarak mekanik ve kimyasal stabilizasyon yapılmıştır. Ayrıca kalıp kumunun yol alt ve üst yapısındaki kullanılabilirliği araştırılmıştır. Numuneler Standard ve Modifiye proctor deneyleri ile belirlenen optimum su muhtevasına göre sıkıştırılmışlardır. Daha sonra 7 günlük kürlere bırakılmışlardır. Taze ve kür edilmiş numuneler üzerinde, serbest basınç, hidrolik iletkenlik, donma çözülme sonrası ağırlık kaybı, CBR ve sızıntı deneyleri yapılmıştır. Serbest Basınç ve CBR değerlerinde kür zamanı ile orantılı olarak artış görülmüştür. 7 günlük kür ve 1,4,8,12'nci donma çözünme çevrimlerinden sonra, CBR, Serbest Basınç, Permeabilite deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin sonucunda Permeabilite, Serbest Basınç ve CBR değerlerinde önemli değişiklikler meydana gelmemiştir.

Sonuç olarak kalıp kumunun, yol yapımı için T.C.K. (Türkiye Cumhuriyeti Karayolları) Standardlarını sağlayan dayanıklı bir malzeme olduğu, üst yapıda ve dolgu malzemesi olarak yeniden kullanılabilceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalıp Kumu, Stabilizasyon, Yol Alt Yapısı, Serbest Basınç
Deneyi, CBR

ABSTRACT

Master of Science Thesis

EVALUATION OF ROAD SUBBASE CONSTRUCTED USING WASTE FOUNDRY SAND

DENİZ GEÇİM

Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Program

Supervisor: Ass. Prof. Dr. Yücel GÜNEY
2004, 162 pages

Foundry sand, used in foundry industry is wasted due to loss of quality after several usage. Each year several thousand tons of foundry sand is wasted occupying substantial parts of the storage areas. Besides, foundry sand contains metals, and causes ground water leachate. For these reasons, new research on stabilization and reuse of foundry sand needs to be done.

In this study, mechanical and chemical stabilization of foundry sand were done by mixing lime, cement and crushed stone with foundry sand in certain proportions. Additionally, possibility of using foundry sand in road construction was investigated. Samples were compacted according to their optimum moisture contents by standard and modified proctor tests, and then cured for 7 days. Unconfined compressive strength, permeability, freeze thaw, weight loss, CBR and leachate tests were performed both on the fresh and cured samples. Unconfined compressive strength and CBR tests increased with increasing curing time. Permeability, unconfined compressive strength and CBR tests were done after 7 day curing and 1st, 4th, 8th and 12th freeze thaw cycles. As a result of tests, important changes didn't occur on permeability, unconfined compressive strength and CBR values.

As a conclusion, it has been determined that foundry sand satisfies T.C.K's (Turkish Republic highways) standards and can be used both in road construction as a sub-way material.

Keywords: Foundry Sand, Stabilization, Sub-base material, Unconfined compressive strength, CBR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman bana yardımcı olan değerli Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Mustafa TUNCAN'a ve bu tezi seçmemde yardımcı olan, salt üniversite ile ilgili konularda değil, tüm yaşantım boyunca karşılaşabileceğim zorluklara karşı beni hazırlayan, her zaman en yakınımda olan, danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Yücel GÜNEY'e, Anadolu Üniversitesindeki eğitimim boyunca yüksek hedefler göstererek bana yardımcı olan Bölüm Öğretim Üyelerinden Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a, Yrd. Doç. Dr. Gülgün YILMAZ'a ve Yrd. Doç. Dr. Hakan KOYUNCU'ya, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Bölümü'nden Yrd. Doç. Dr. Alpagut KARA'ya, bana deneylerimin hazırlanmasında yardımcı olan, tecrübelerini benimle paylaşan, Tekniker Adnan KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün zemin laboratuvarlarını kullanmamı sağlayan, Sayın Gürkan GÜNGÖR'e ve bilgilerini benimle paylaşan Sayın Cihat AVŞAR'a, Sayın Atilla GÜRKAN'a, Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı çalışanlarına, Sayın Salim TÜRKEK'e ve malzeme temininde yardımcı olan Kutludağ Madencilik, Güçlü Beton ve Toprak Demir Döküm'e teşekkür ederim.

Yardıma ihtiyacım olduğunda, sıcacık ellerini her zaman yüreğimde hissettiğim aileme, sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımlanması	1
1.2. Önceki Çalışmalar	3
1.3. Çalışmanın Amacı.....	7
2. KARAYOLU ALT YAPISI	8
2.1. Giriş.....	8
2.2. Dolgular.....	8
2.2.1. Dolgu Zemininin Hazırlanması	9
2.2.2. Dolgu Yapımında Uygulanması Gereken Kurallar	10
2.2.3. Tabakaların Oluşturulması	10
2.2.4. Sıkıştırma	11
2.2.4.1. Kohezyonlu Malzemelerin Sıkıştırılması	11
2.2.4.2. Granüler Malzemelerin Sıkıştırılması	12
2.2.5. Dolgularda Sıkışma Kriterleri	13
2.2.6. Kalite Kontrol Deneyleri.....	14
3. KARAYOLU ÜST YAPISI	16
3.1. Giriş.....	16
3.2. Esnek Yol Üst Yapısını Oluşturan Tabakalar	18
3.2.1. Giriş	18

3.2.2. Alttemel Tabakası	19
3.2.2.1. Tanım	19
3.2.2.2. Yapım Metotları.....	23
3.2.3. Temel Tabakası	26
3.2.3.1. Granüler Temel Tabakası	26
3.2.3.2. Plent-Miks Temel.....	28
3.2.3.3. Çimento Bağlayıcı Granüler Temel	29
3.2.4. Bitümlü Temel Tabakası	32
3.2.5. Kaplama Tabakası	32
3.2.5.1. Sathi (Yüzeysel) Kaplama.....	33
3.2.5.2. Asfalt Betonu (Binder-Aşınma).....	33
4. ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU.....	34
4.1. Giriş.....	34
4.2. Mekanik Stabilizasyon	35
4.3. Kimyasal Stabilizasyon	36
4.3.1. Kireç Stabilizasyonu	36
4.3.2. Çimento Stabilizasyonu	38
4.4. Bitüm Stabilizasyonu	39
4.5. Zemin Enjeksiyonu	39
5. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER	40
5.1. Kalıp Kumu	40
5.1.1. Tanım ve Sınıflandırma	40
5.1.2. Kullanım Özellikleri	47
5.1.3. Dünyada Mevcut Durum.....	48
5.1.3.1. Tüketim	48
5.1.3.2. Üretim.....	48
5.1.4. Türkiye’de Durum	49
5.1.4.1. Ürünün Türkiye’de Bulunuş Şekilleri	49
5.1.4.2. Rezervler	49
5.1.4.3. Tüketim	49

5.1.4.4. Üretim.....	50
5.2. Kireç.....	55
5.3. Çimento	57
5.4. Agrega	58
6. LABORATUAR DENEYLERİ.....	60
6.1. İndeks Deneyleri	60
6.1.1. Su Muhtevası.....	60
6.1.2. Özgül Ağırlık.....	60
6.1.3. Dane Çapı Dağılımı	61
6.1.4. Atterberg Kıvam Limitleri	61
6.2. Mekanik Özellikleri Belirleyen Deneyler.....	62
6.2.1. Kompaksiyon Deneyleri	62
6.2.1.1. Standart Proktor Deneyi	62
6.2.1.2. Modifiye Proktor Deneyi.....	62
6.2.2. Serbest Basınç Deneyi	63
6.2.3. Permeabilite Deneyi.....	64
6.2.4. Kaliforniya Taşıma Oranı	67
6.3. Fiziko-Kimyasal Özellikleri Belirleyen Deneyler	68
6.3.1. pH.....	68
6.3.2. Elektriksel İletkenlik.....	68
6.4. Çevresel Etkiler Altında Geoteknik Özellikler	68
6.4.1. Donma Çözülme Deneyi (Durabilite).....	68
6.4.2. Sızıntı (Leachate) Deneyi	69
6.5. Mikro Yapısal Özellikler	70
6.5.1. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM).....	70
6.5.2. X-Işını Kırınımı Analizi.....	70
7. DENEY SONUÇLARI.....	72
7.1. Hazırlanan Karışımlar	72
7.2. Geoteknik Özellikler	74
7.2.1. Fiziksel (İndeks) Özellikler.....	74

7.2.1.1. Dane Birim Hacim Ağırlık	74
7.2.1.2. Dane Çapı Dağılımı	74
7.2.1.3. Atterberg Kıvam Limitleri.....	76
7.2.2. Mekanik Özellikler	77
7.2.2.1. Kompaksiyon Deneyi Sonuçları	77
7.2.2.2. Serbest Basınç Deneyi.....	79
7.2.2.3. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR metodu).....	82
7.2.2.4. Permeabilite (Hidrolik Geçirgenlik) Katsayısı	88
7.3. Fiziko-Kimyasal Özellikler	90
7.3.1. pH	90
7.3.2. Elektriksel İletkenlik.....	90
7.3.3. X Işını Kırınımı Analizi	90
7.4. Çevresel Şartlara Ait Özellikler	92
7.4.1. Donma – Çözülme Sonrası Ağırlık Kaybı	95
7.4.2. Sızıntı (Leachate) Deneyi	96
7.5. Mikro – Yapısal Özellikler	100
8. PRATİK UYGULAMA	102
8.1. Giriş.....	102
8.2. Esnek Yol Üst Yapısının Projelendirilmesinde Kullanılan Yönt.	102
8.2.1. Zeminin Fiziksel Özelliklerine Dayanan Deneysel Yönt.	103
8.2.2. Zeminin Mukavemet Değerlerine Dayanan Deneysel Yönt.	103
8.2.2.1. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Yöntemi	103
8.2.2.2. Hveem Stabilometre Yöntemi	103
8.2.3. Yarı Teorik Yöntemler.....	104
8.2.3.1. Makaslama kuvveti Yöntemi.....	104
8.2.3.2. Shell Yöntemi	104
8.2.3.3. İngiliz Yöntemi	104
8.2.3.4. Kanada Yöntemi	105
8.2.3.5. AASHTO Yöntemi	105
8.2.3.6. Asfalt Enstitüsü Yöntemi	105
8.3. AASHTO Yöntemi.....	106

8.3.1. AASHTO Dizayn Metodu (1972)	106
8.3.2. AASHTO Dizayn Metodu (1986)	108
8.4. Kalıp Kumu Kullanılarak Esnek Yol Üst Yapısının Dizaynı	112
9. TARTIŞMA.....	121
9.1 Giriş.....	121
9.2 CBR.....	121
9.3 Serbest Basınç.....	124
9.4 Permeabilite	128
9.5 Donma Çözülme Sonrası	130
9.6 Pratik Uygulama	130
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	132
KAYNAKLAR.....	134
ÖZGEÇMİŞ.....	137
EK 1.....	138
EK 2.....	146
EK 3.....	153
EK 4.....	160

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1. Atık kalıp kumu sahası	1
1.2. Atıkların fabrika arazisinde depolanması	2
2.1. Dolgu malzemesinin serilmesi	13
3.1. Kaplama tipleri ve tabakaları	17
3.2. Esnek üst yapıda gerilme dağılımı	19
3.3. Yol enkesiti	20
3.4. Alttemel serilmesi	23
3.5. Alttemel malzemesinin greyderle tesviyesi	24
3.6. Alttemel tabakasının sıkıştırılması	25
5.1. Tozların erime sıcaklığı altında birbiri ile kaynaşması	40
5.2. Sinterleşmenin 4 safhası	40
5.3. Sinterleşmenin ilk safhalarında bir toz	41
5.4. Kum kalıplar içerisinde yapılan metal döküm	41
5.5. Kalıpların hazırlanması	42
5.6. Sinterleşmiş kalıba konan eriyik halindeki metal	42
5.7. Demir çelik endüstrisinde kullanılan kim. bağ. kum ve yeşil kalıp kumu	43
5.8. Kalıp kumunun granülometri analizi	45
5.9. Kalıp kumuna ait temsili SEM fotoğrafı	46
5.10. Kalıp kumuna ait temsili XRD analizi	46
5.11. Kum siloları	52
5.12. Silolara malzeme takviyesi	53
5.13. Deneylerde kullanılan çimentoya ait temsili XRD analizi	58
6.1. İki boyutlu blok diyagram	60
6.2. Serbest basınç deneyi	63
6.3. Kalıp kumu numunesi üzerinde serbest basınç deneyi	64
6.4. Rijit duvarlı permeabilite deney düzeneği	65
6.5. Rijit duvarlı permeabilite deneyinde kullanılan malzemeler	66
6.6. Rijit duvarlı permeabilite deneyi	66
6.7. Sızıntı deneyi	69
6.8. X-ışını kırınımı yönteminde ölçüm	71

7.1. Granülometrik sınırlar (KGM)	75
7.2. Granülometrik sınırlar (AASHTO C)	75
7.3. Granülometrik sınırlar (AASHTO F).....	76
7.4. Kırmataşsız numunelerin optimum su muhtevası-K.B.H. ağırlık grafiği .	78
7.5. Kırmataşlı numunelerin optimum su muhtevası-K.B.H. ağırlık grafiği ...	78
7.6. Kırmataşsız numunelere ait gerilme deformasyon eğrileri	79
7.7. Kırmataşlı numunelere ait gerilme deformasyon eğrileri	80
7.8. Kırmataşsız karışımların serbest basınç dayanımları.....	81
7.9. Kırmataşlı karışımların serbest basınç dayanımları.....	81
7.10. Bir hafta kür edilmiş numunelerin serbest basınç dayanımları	82
7.11. Kırmataşsız numunelerin CBR değerleri	83
7.12. Kırmataşlı numunelerin CBR değerleri.....	84
7.13. Kür zamanı ile değişen CBR değerleri.....	84
7.14. Kırmataşsız numuneler için penetrasyon-penetrasyon gerilmesi	85
7.15. Kırmataşlı numuneler için penetrasyon-penetrasyon gerilmesi	86
7.16. Yaş CBR değerleri	87
7.17. Numunelere ait şişme yüzdeleri.....	87
7.18. Kırmataşsız numunelerin permeabilite katsayıları.....	88
7.19. Kırmataşlı numunelerin permeabilite katsayıları.....	89
7.20. Bir haftalık kür sonrası permeabilite değerleri	89
7.21. Kalıp kumu-kireç X ışınları kırınımı.....	91
7.22. Kalıp kumu-çimento X ışınları kırınımı.....	91
7.23. Kırmataşsız numunelerin donma çözülme sonrası ser. bas. dayanımı.....	92
7.24. Kırmataşlı numunelerin donma çözülme sonrası ser. bas. dayanımı.....	93
7.25. Kırmataşsız numunelerin donma çözülme sonrası CBR değerleri	93
7.26. Kırmataşlı numunelerin donma çözülme sonrası CBR değerleri	94
7.27. Kırmataşsız numunelerin donma çözülme sonrası perm. değerleri	94
7.28. Kırmataşlı numunelerin donma çözülme sonrası perm. değerleri	95
7.29. Numune tipine bağlı olarak ağırlık kaybı.....	96
7.30. Donma çözülme çevrimiyle artan ağırlık kayıpları	96
7.31. 24 saat sonunda sızıntı sularındaki ağır metaller	97
7.32. 48 saat sonunda sızıntı sularındaki ağır metaller	97

7.33. 72 saat sonunda sızıntı sularındaki ağır metaller	98
7.34. Sızıntı sularındaki pH değerleri	99
7.35. Sızıntı sularındaki elektriksel iletkenlik değerleri	99
7.36. Kalıp kumu numunesine ait SEM fotoğrafı	100
7.37. Kalıp kumu-kireç numunesine ait SEM fotoğrafı	101
7.38. Kalıp kumu-çimento numunesine ait SEM fotoğrafı	101
9.1. CBR – su muhtevası karşılaştırması (Std P.)	122
9.2. CBR – su muhtevası Karşılaştırması (Mod P.)	123
9.3. Kalıp Kumu Yüzdesi – CBR değişimi	124
9.4. Su muhtevası serbest basınç karşılaştırması (St. Pr.)	125
9.5. Su muhtevası serbest basınç karşılaştırması (Mod. Pr.)	126
9.6. Kalıp kumu yüzdesi – serbest basınç değişimi	127
9.7. Kırmataşsız numuneler için serbest basınç – CBR karşılaştırması	127
9.8. Kırmataşlı numuneler için serbest basınç – CBR karşılaştırması	128
9.9. Kırmataşsız numuneler için hid. iletkenlik – su muh. karşılaştırması	129
9.10. Kırmataşlı numuneler için hid. iletkenlik – su muh. karşılaştırması	129
9.11. CBR değerlerinin donma çözünme çevrimleriyle değişimi	130
9.12. Ser. bas. değerlerinin donma çözünme çevrimleriyle değişimi	131
9.13. Hidrolik iletkenlik değerlerinin donma çözünme çevrimleriyle değ.	131

TABLolar DİZİNİ

2.1. Dolgu malzemesi özellikleri	8
2.2. Dona hassas olmayan taban malzemesinin özellikleri	9
2.3. Dolgularda sıkışma kriterleri	13
2.4. Arazide kuru birim ağırlık tayin metotları	14
2.5. Kalite kontrol deneyleri	15
3.1. Alttemel ve temel tabakalarının özellikleri	21
3.2. Alttemel ve temel gradasyon limitleri	22
4.1. Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metotları	35
4.2. Değişik zemin tipleri için yaklaşık kireç muhtevası	38
5.1. Tane boyutu sınıflandırması	44
5.2. Kalıp kumunun bazı fiziksel özellikleri	45
5.3. Kalıp kumunun kimyasal bileşimi	45
5.4. Dünyadaki kalıp kumu tüketimi	48
5.5. Döküm yoluyla üretilen mamullerin sınıflandırılması	50
5.6. Sektörde üretim yapan önemli kuruluşlar	51
5.7. Döküm sanayinin sektörel dağılımı	51
5.8. Türkiye kalıp kumu üretim kapasitesi	54
5.9. Döküm sanayinde kurulu kapasite kurumu	54
5.10. Döküm sektörünün yıllara göre kapasite kullanım oranları	55
5.11. Türkiye kalıp kumu üretim miktarları	55
5.12. Teorik olarak saf kireçlerin özellikleri	56
5.13. Kullanılan kirecin kimyasal bileşimi	56
5.14. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi	58
5.15. Agregası tipleri	59
6.1. CBR değerlerine göre sınıflandırma kriterleri	67
7.1. Deneylerde kullanılan malzemeler	73
7.2. Dane birim hacim ağırlık değerleri	74
7.3. Numunelerin sınıflandırılması	74
7.4. Likit limit değerleri	76
7.5. Optimum su muhtevası deneyi sonuçları	77

7.6. pH değerleri	90
7.7. Elektriksel iletkenlik değerleri.....	90
7.8. Sızıntı suyu için metallerin limitleri.....	98
8.1. Bölgesel faktör değerleri (AASHTO).....	108
8.2. Önerilen D_L katsayıları (AASHTO).....	109
8.3. Tavsiye edilen güvenirlilik seviyeleri (AASHTO).....	109
8.4. Tabaka katsayıları	110
8.5. Önerilen m_i değerleri (AASHTO - 1986).....	111
8.6. Z_R değeri (AASHTO).....	111
8.7. Şerit dağılım faktörleri (KGM).....	112
8.8. Taşıt eşdeğerlik faktörleri (KGM).....	112
8.9. Toplam standart tek dingil yükünün bulunması	113
8.10. Minimum kırmataş temel tabakası kalınlıkları	118
8.11. Esnek kaplamalı yollarda uygulanacak üstyapı kompozisyonu	120

Simgeler ve Kısaltmalar Dizini

Mod. Pr.	: Modifiye Proktor
Std. Pr.	: Standart Proktor
CBR	: California Bearing Ratio
XRD	: X Ray Difraction
SEM	: Scanning Electron Microscobe
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	: American Society of Testing Materials
WASHO	: Western Association of State Highway Officials
TS	: Türk Standartları
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
YOGT	: Yıllık Ortalama Günlük Trafik
TEF	: Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımlanması

Kalıp kumu, kimya ve metalürji endüstrilerinde kalıp yapımında kullanılmaktadır. Kalıp kumu, kum, organik katkıları ve bağlayıcı maddelerin harmanlanmasından meydana gelmektedir. Genellikle bağlayıcı malzeme olarak bentonit kullanılmaktadır. Metal kalıplama işleminin özelliğine göre bağlayıcı malzeme miktarı değişebilir. Kalite kontrol testleriyle malzeme kontrol edilmektedir. Birkaç kullanımdan sonra, kalıp kumları kalitelerini kaybederek atık haline gelir. Kalıp kumu kullanan endüstriyel kuruluşlar, atık haline gelmiş kalıp kumlarını kentsel atıkların bulunduğu deponi alanlarına ulaştırmalı, ya da bertaraf etmelidir. Bunların çöp deponi alanlarına ulaştırılması durumunda çok büyük atık yığınları oluşmaktadır. (Şekil 1.1)

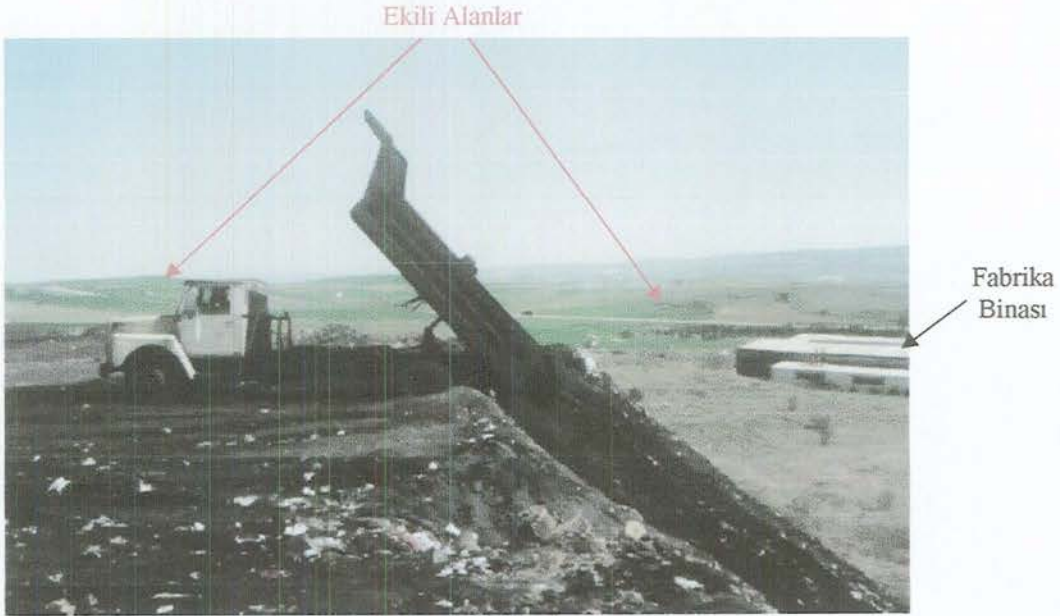


Şekil 1.1. Atık Kalıp Kumu Sahası

Türkiye'deki kalıp kumu kullanımı senelik 300000 tonu bulmaktadır. Atık halindeki kalıp kumunun depolanması fabrikalar açısından büyük sorun yaratmaktadır. Nitekim Eskişehir-Bozüyük karayolu üzerindeki Toprak Grubuna

ait olan demir döküm fabrikasında, bu sorun açıkça gözükmemektedir. Fabrika arkasındaki arazide yaklaşık 10000 ton atık kalıp kumu bulunmaktadır. Atık depolama bölgesindeki atık hacmi her geçen gün daha da artmaktadır. Böylece atık depolama sahası arazide çok yer kaplamakta ve arazinin başka bir kullanım amacına kapalı kalmasına yol açmaktadır. Ülkemizdeki sulanabilen ekili arazilerin azlığını düşünürsek, bu zararın zaman içerisinde ne kadar büyük olacağını görebiliriz. Çünkü metalürji endüstrisinde üretim arttıkça, bu atık kalıp kumu sahalarının da artacağı açıkça görülmektedir.

Ortaya çıkan kirlilik, sadece atık kalıp kumunun depolanmasından kaynaklanan görüntü kirliliği değildir. Bunun dışında atıkların çevreye verdiği zararlı etkiler de araştırılmalıdır. Örneğin, suda çözünebilen metaller, yağmur sularıyla yeraltı sularına karışarak, kaynakları kirletmektedir. Atıkların içerdiği metallerin zehirleyici etkisi yüzünden önlem alınmadan depolanması tehlike arz etmektedir (Şekil 1.2.). Bu sebeplerden dolayı, endüstri kuruluşları sıkıntı duymaktadır. Problemleri ortadan kaldırmak amacıyla, hem bu malzeme hem de diğer atık malzemelerin yeniden kullanımı konusunda çeşitli araştırmacılar tarafından geri kazanım çalışmaları yapılmaktadır.



Şekil 1.2. Atıkların fabrika arazisinde depolanması

1.2. Önceki Çalışmalar

T. Kunes, M. Smith (1983) Kalıp endüstrisinde kullanılan yeşil kalıp kumunun atık haline geldikten sonra tekrar değerlendirilmesi üzerinde çalışmışlar, geri dönüşümün sağlanması halinde elde edilecek ekonomik faydayı araştırmışlardır.

Figen HOTAMAN (1992) Esnek yol üst yapısını projelendirerek, Karadeniz sahil yolunda uygulama yapmıştır. Yapılan bu çalışmada karayolları standartları baz alınarak, gerekli deneyler yapılmıştır.

Javed, Lovell (1994): Purdue Üniversitesindeki araştırma projesi kapsamında atık kalıp kumunun yol dolgu malzemesi olarak tekrar kullanılabilirliğini araştırılmışlardır. Projeye Indiana Department of Transportation (INDOT) sponsor olmuş, Auburn'den alınan kalıp kumu numuneleri üzerinde laboratuvar ve arazi deneyleri yapmışlardır. 1996 yazında Indiana yakınlarında arazi uygulaması yapılmış, arazide hidrolik iletkenlik, sıkışma kontrolü ve dolgu üzerindeki toplam gerilme analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, kalıp kumunun yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir.

Lovejoy M, Ham R, Traeger P, Hippe J, Boyle W (1996) Kalıp kumu atıklarının yol yapımında tekrar kullanılabilirliğini araştırmışlardır. 3 yıl süren çalışmada, Wisconsin'den 18 ay boyunca alınan kalıp kumu numuneleri üzerinde leachet karakteristiklerini belirlemişlerdir. Fiziksel testler Wisconsin Department of Transportation tarafından yapılmıştır. Yapılan laboratuvar çalışmaları sonucunda kalıp kumu atıklarının zehirli madde içermediğini saptamışlardır. Kalıp kumu sızıntı deneyi sonuçlarını, doğal zeminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Kalıp kumundan elde edilen sızıntı suları, genellikle içme suyu standardının altında değerler vermiştir.

Mehmet Mustafa GÜNGÖR (1996) Afşin Elbistan uçucu küllerinin esnek yol kaplamalarında kullanımı üzerine araştırma yapmıştır. Bu çalışmada linyit kömüründen yararlanarak enerji üretimi yapan termik santrallerin atık bir yan

ürünü olan uçucu küllerin tekrar değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda gerekli standartlar sağlanmış ve esnek yol kaplamalarında kullanılabileceği belirtilmiştir.

E. M. Frempong, K.E.N. Tsidzi (1997) Tropik alt temel malzemelerinin harmanlanarak temel tabakasında kullanımını araştırmışlardır. Yol yapımı sırasında, şantiye sahasının yakınında, uygun temel malzemesi olmaması maliyeti arttırmıştır. Kumasi'deki bu çalışmada maliyeti azaltmak amacıyla, kırmataş ve bölgenin tropik zemin karıştırılarak stabilizasyon yapılmıştır.

Kleven et al. (1998) Kalıp kumunun yol alt yapısında kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla Wisconsin-Madison üniversitesinde laboratuvar çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada 12 farklı kalıp kumu numunesi kullanılmış, bu numunelerin plastisite indisi, non-plastik ile 11 arasında değişmiştir. Kleven et al. (1998) kalıp kumunun düşük plastisiteli ve AASHTO sınıflandırma sistemine göre A-2-4 ya da A-3 sınıfına girdiğini belirlemişlerdir. Bunun dışında kalıp kumunun mekanik özelliklerinin de yol alt yapısına uygunluğunu deneylerle belirlemişlerdir. Bu amaçla CBR ve Mr deneylerini yapmışlar, yapılan deneyler sonucunda yüksek su muhtevasında kalıp kumunun düşük dayanım gösterdiği, bu nedenle kalıp kumunun optimum su muhtevasının altında sıkıştırılması gerektiğini belirtmişlerdir.

C.O.Okagbue, T.U.S. Onyeobi (1998) Yol inşasında kıvıllı tropik zeminleri iyileştirmek amacıyla mermer tozu kullanmışlardır. Belirli oranlarda karışımlar yapılmıştır. Elde edilen karışımların dane boyutu analizi, spesifik gravitesi, kıvım limitleri, kompaksiyon karakteristikleri, serbest basınç direnci ve CBR oranları belirlenmiştir. Buna ek olarak 28 gün sonrasında da deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda tropik zemine mermer tozu katkısı ile, plastisite %20-33 oranında azaltılmıştır. Serbest basınç değeri ve CBR değeri %30-46 ve %27-55 oranında artmıştır. En yüksek CBR değeri %8 mermer tozu katkısı ile elde edilmiştir. 28 günlük kür sonucunda malzemenin dayanımı %80 artmıştır. Bu

sonuçlara bağı olarak hafif trafik hacmine sahip olan yollarda kullanılabilceğini belirtmişlerdir.

West Lafayette (1998) dolgu malzemesi olarak kalıp kumunun kullanılabilirliğini araştırmış, Indiana'daki kalıp kumu numuneleri üzerinde Microtox deneylerini yapmış,. Kalıp kumunun zehirli madde içermediğini belirlemiştir. Spektro fotometre sonucuna göre çevresel açıdan zararsız olduğu belirlenmiş, bu sonuçlara bağı olarak, atık kalıp kumunun yol dolgusunda kullanılabilceği belirlenmiştir.

Annette R. Hill, Andrew R. Dawson, Micheal Mundy (1999) Yol inşaatında agrega kullanımını araştırmışlardır. Üç eksenli ve gerilme deneyleri iyileştirilmiş ve katkısız numunelerde uygulamışlardır. Bunun dışında sızıntı karakteristiklerini belirlemişlerdir.

Abichou, T. Benson, Tuncer B. (1999) Kalıp kumu atıklarının yeniden kullanımı üzerine çalışmışlardır. Kalıp kumunun büyük hacimlerde tekrar değerlendirilmesi amacıyla, dolgu malzemesi olarak, karayolu dolgu malzemesi olarak ve alttemel malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bunun dışında, kalıp kumunun portland çimentosunda ve asfalt betonunda kullanımı, çöp depolama alanlarında ayraç malzemesi olarak kullanımı da araştırılmıştır.

Erik Simonsen, Ulf Isacson (1999) Soğuk iklimlerdeki donma çözülme sonucu kaplamaların taşıma kapasitelerindeki azalmayı incelemişlerdir. Donma çözülme sonucunda, zemin tipi, permeabilite, drenaj koşulları ve donma oranına bağı olarak taşıma gücündeki zayıflamanın değiştiğini belirtmişlerdir. Donma çözülme çevrimleri sonrasında Mr deneyi yaparak sonuçları değerlendirmişlerdir.

G. Jegede (1999) Nijerya'nın güney batısında bulunan Ado-Ekiti F-209 otopanında yapılan çalışmada, zemin özelliklerinin kaplama üzerindeki zararlı etkileri araştırılmıştır. F209 otopanından alınan numunelerde doğal su muhtevası %2,5-8,0 aralığında, likit limit %43-60,5 arasında, ve spesifik gravite 2,57-2,67 arasında bulunmuştur. Yapılan X-Ray difraksiyon analizlerinde numunenin bol

miktarda kaolinit ve illit içerdiği saptanmıştır. CBR değerinin 20 olması kaplamada hatalara yol açmıştır. Yapılan deneyler, Nijerya standartlarının altında değerler vermiştir. Bu nedenle zemin iyileştirmesinin gerektiği kanısına varılmıştır.

C. Pagotto, M. Legret, P. Le Cloirec (1999) Kaplama tipine bağlı olarak, otoyoldaki hidrolik iletkenlik ve kenar sularının kalitelerini araştırmışlardır. Mevcut asfalt tabakası ve yerine yapılan geçirimli tabakanın karşılaştırılması amacıyla Fransız otoyolundan veriler alınmıştır. İstatiksel analiz yapılmıştır. Öncelikle hidrolojik karakter belirlenmiş daha sonrada su kalitesine bakılmıştır. Geçirgen kaplama tabakası tarafından parçacık kirliliği oluşmaktadır.

C. Ferreira, A. Ribeiro, L. Ottosen (2001) Uçucu kül atıklarının çeşitli alanlarda değerlendirilmesini araştırmışlardır. Dokuz farklı alanda kullanılabilirliğini belirlemişlerdir. Bunları dört ana gruba ayırmışlardır. Bunlar; yapı malzemesi olarak (çimento, beton, seramik, cam), Geoteknik uygulamalarda (yol kaplaması, yol dolgusu), Tarım ve ziraatte (ıslah) ve diğer uygulamalar. Bütün grupları detaylı olarak analiz etmişlerdir.

Qingbai Wu, Bin Shi, Hsai-Yang Fang (2001) Tibet otoyolunda meydana gelen donma çözülme ve jeolojik karakteristikleri araştırmışlardır. Tibet otoyolundaki donma sonrasında meydana gelen oturma ve kabarmayı incelemişlerdir. Jeolojik karakteristikleri belirlemek amacıyla sekiz gözlem noktası belirlenmiştir.

Lilian Ribeiro de Rezende, Jose Camapum de Carvalho (2002) Atıkların esnek yol kaplamalarındaki kullanımı konusunda çalışmışlardır. 80 metre uzunluğundaki deneme yolunda arazi uygulaması yapmışlardır. Arazi ve laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Arazide CBR, dinamik konik penetrasyon ve plaka yükleme deneyleri yapılarak, 1998 – 2002 yılları arasındaki dönemin performansı değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda, düşük trafik hacmine sahip yollarda kullanılabileceği belirlenmiştir.

T. Edil, C. Benson, H. Acosta (2003) Uçucu külleri belirli oranlarda çimento ile karıştırarak, alt temel zemininin stabilizasyonunu araştırmışlardır. Laboratuvar çalışmalarında 3 farklı uçucu kül kullanılmıştır. Numuneler değişik yüzdelerde uçucu kül kullanarak hazırlanmış, bu karışımlar üzerinde CBR, Mr, ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. İlk başta düşük CBR değerlerine sahip olan zemin, uçucu kül katkısı ile yüksek değerlere ulaşmıştır. Sonuç olarak uçucu kül kullanımının maliyeti düşürdüğü ve dayanımı arttırdığı belirlenmiştir.

1.3. Çalışmanın Amacı

Atık haline gelmiş kalıp kumu, metalürji endüstrisi açısından değerini yitirmesine karşın, halen bazı mühendislik özellikleri, yol yapımı açısından uygundur. Yol uygulamalarında, büyük hacimlerde atık kalıp kumu kullanımı mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada amaçlanan; atık kalıp kumlarının stabilize edilip, zararsız hale getirilerek, yol alt ve üst yapı malzemesi olarak kullanılmasıdır. Bunun için kalıp kumu atıklarının ilave malzemeler kullanılarak, yol alt ve üst yapısında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bundan dolayı kırma taş, çimento, kireç kullanılarak, atık kalıp kumunun mekanik ve kimyasal stabilizasyonu yapılmıştır. Kireç ve çimento kullanılarak yapılan kimyasal stabilizasyonla, atıkların içerdiği zararlı maddelerin kabul edilebilir değerlere indirilmesi amaçlanmıştır. Mekanik stabilizasyon ise, çeşitli oranlarda kırmataş katkısı ile farklı enerji seviyelerinde sıkıştırılarak, daha yüksek kuru birim hacim ağırlık değerlerine ve en iyi sıkışmaya ulaşmak amacıyla yapılmıştır. Standart ve modifiye proktor deneyleri ile optimum su muhtevası belirlenmiştir. Optimum su muhtevasında ve kuru-ıslak tarafında serbest basınç, permeabilite, CBR ve donma çözünme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca donma çözünme sonrasında 1,4,8,12'inci çevrimlerin ardından permeabilite, serbest basınç, CBR deneyleri yapılmıştır. Yapılan çevrimlerle, numunenin en kötü şartlardaki durumu da değerlendirilmiştir. Bunun dışında çimento ve kirecin stabilizasyondaki etkisini belirlemek amacıyla numunelere 7 günlük kür uygulanmıştır. Elde edilen deney verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. KARAYOLU ALT YAPISI

2.1. Giriş

Yolun, toprak işleri sonrasında, daha önceden saptanan kot ve enkesit şekline getirilmiş kısmına alt yapı denmektedir. Menfez, drenaj tesisleri, istinat duvarı ve dolgu inşası altyapıyı oluşturmaktadır. Altyapı yolun esas taşıyıcı kısmıdır [1].

2.2. Dolgular

Taşıt ve yayaların ulaşımları sırasında, karayolunu kolaylıkla kullanabilmeleri için, doğal zeminin belli bir enkesit şekline dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla yol enkesitinde bazı yerlerin kazılması, bazı yerlerin doldurulması istenir. Bunun dışında, doğal zeminin taşıma kapasitesi yetersizse, kaldırılarak yerine standartları sağlayan malzeme doldurulur. Dolgu yapımında kullanılacak malzeme içerisinde, bitkisel toprak, ağaç, çalı, kök ve benzeri organik maddeler, kömür, kömür tozu içeren malzemeler, killi ve marnlı zeminler, suyla kolayca ufalanarak oturmaları neden olacak malzeme, karlı, buzlu ve donmuş toprakları içermemelidir. Dolgu malzemesinin, Tablo 2.1'de verilen şartları sağlaması istenmektedir [1].

Tablo 2.1. Dolgu Malzemesi Özellikleri [1]

DENEY ADI	LİMİT DEĞER	STANDART NO
Likit Limit (LL)	≤ 70	TS 1900 AASHTO T-89
Plastisite İndeksi (PI)	≤ 40	TS 1900 AASHTO T-90
Maksimum Kuru Birim Ağırlık (St. Proktor)	$\geq 1,450 \text{ t/m}^3$ *	TS 1900 AASHTO T-99

* PI ≤ 6 ve CBR > 10 olan doğal cürüfler ve tüflerde bu şart aranmayacaktır.

Don etkisi olan bölgelerde üstyapı tabanı Tablo 2.2’de verilen şartları sağlamalıdır.

Tablo 2.2. Dona Hassas Olmayan Taban Malzemesinin Özellikleri [1]

DENEY ADI	LİMİT DEĞERLER	STANDART NO
0,075 mm elekten geçen %	≤ 12	TS1900 AASHTO T-11
Likit Limit	≤ 25	TS 1900 AASHTO T-89
Plastisite İndeksi (PI)	≤ 6	TS 1900 AASHTO T-94
Kaba Agregada Su Absorpsiyonu %	≤ 3	TS 3526 ASTM C-127

2.2.1. Dolgu zemininin hazırlanması

Dolguların yapılmasına başlanmadan önce zeminin, uygun olarak temizlenmesi ve bitkisel toprağı sıyrılmış kesimi 20 cm derinlikte kabartılıp sıkıştırılması istenmektedir. Kökler nedeniyle oluşan çukurların 20 cm’den daha derin olması halinde, bu çukurlar uygun malzeme ile doldurulmaktadır.

Dolgu yapımının kış aylarına rastladığı zamanlarda, dolgunun oturacağı kesimdeki kar ve buz temizlenerek, zeminde donma söz konusu ise, don etkisi ortadan kalkıncaya kadar dolgu yapımına başlanılmaması istenir. Dolgunun inşa edileceği sahada bataklık kesimler varsa, bu kesimler uygun inşaat metotları tespit edilerek dolgu yapımına başlanılır. Bu gibi zeminlerde, makine parkı ve diğer vasıtalar için gerekli servis yolu, kontrol mühendisince uygun görülen malzeme ile batak zeminin bir ucundan başlanıp, ardarda boşaltmalarla doldurularak inşa edilir.

Bataklık olmamak şartı ile dolgu yapılacak sahada toplanmış su varsa, dolgu yapılmadan önce su drene edilerek uzaklaştırılmalıdır.

Yapılan etütler sonucu, dolgunun oturacağı zeminin dolguyu taşıyamamasının söz konusu olduğu durumlarda alınacak tedbirler kullanılacak dolgu malzemesi ve bu

zeminin taşıyabileceği maksimum dolgu yüksekliği özel etütler sonunda belirlenmelidir.

Dolgunun rijit olmayan, mevcut bir yol üzerine yapılması halinde, dolgu yüksekliği 50 cm'den az ise, yüzey, dolgu kütlesi ile mevcut tabakalar arasındaki kaynaşmayı temin üzere 15 cm derinlikte sürülerek kabartılmalıdır. [1]

2.2.2. Dolgu yapımında uygulanması gereken kurallar

Dolgular, sıkışma, oturma ve reglajdan sonra, projede belirtilen plan, profil ve enkesite uygun olarak, tüm genişliği boyunca yüzey suyunun rahatça drenajının sağlanacağı biçimde inşa edilmelidir.

Dolguların yapılmasında uygulanan çalışma metotları, herhangi bir sanat yapısının oynamasına, arızaya uğramasına, neden olmamalıdır. Sanat yapılarının üzerine gelecek dolgu yapımına, bu yapıların inşasının tamamlanmasından itibaren, sıcaklığı 5 °C üzerinde olan gün sayısı 21'i geçmeden başlanmamalıdır. Menfezlerin, köprülerin ve diğer beton yapıların üst ve yan dolguları, usulüne uygun olarak yapılmalıdır.

Dolgu, son tabakasının üstten 20 cm'lik kısmı içerisinde, 10 cm'den daha büyük çapta tane içeren malzeme ihtiva etmemesi istenir.

Üstüne bir üstyapı tabakası gelmeden, kötü hava şartlarına maruz kalan dolguların yüzeyleri, işe yeniden başlandığında en az 20 cm kabartılarak sıkıştırılmalıdır [1].

2.2.3. Tabakaların oluşturulması

Dolguların son 40-50 cm'lik üst tabakalarında, C.B.R. değeri minimum 10 olan seçme malzeme kullanılmalıdır. Malzeme; dozer, greyder, skreyper veya kontrol mühendisince uygun görülen diğer bir makine ile yayılır. Yayma işlemi dolgunun tüm genişliği boyunca yapılır. Yayılan bir tabakanın sıkıştırılmamış kesimlerine kesinlikle malzeme boşaltılmamalıdır.

Dolgu sahasına depolanan malzeme miktarı, sıkıştırma için öngörülenden fazla olursa, malzeme, yayma veya saha dışına taşıma yolu ile istenilen kalınlığa getirilmesi istenir.

Yamaçlarda ve karışık (miks) kesitlerde, dolgu şevi ile yamaç şevi arasındaki yatay mesafenin 2,5 m veya daha az olduğu alt kısımlarda, dolgu şevinden en az 2,5 m uzaklaşmayı temin edecek şekilde yatay kademeler teşkil edilmelidir. Kademelerin yüksekliği en az 40 cm, en çok 80 cm olmalıdır. Yamaç şevinin 5/1 ve daha yatık olduğu yerlerde, bu kademelerin oluşturulmasına gerek olmamaktadır. Dolgu tabakalarının eğimleri yamaç ve dolgu şevleri arasındaki yatay mesafenin 2,5 m olduğu yerlerde, yatay hale getirilerek azaltılır. Kademenin boyuna eğiminin, yol eğimi ile aynı olması istenir [1].

2.2.4. Sıkıştırma

Bütün dolgular, oturduğu zemin yüzeyinden itibaren, yatay tabakalar halinde serilip sıkıştırılarak yapılmalıdır.

Kullanılan sıkıştırma makinesinin tip ve kapasitesine göre, sıkıştırılacak tabakanın kalınlığı belirlenir. Kullanılacak sıkıştırıcı adedi, yapılan işin özelliğine uygun olarak kontrol mühendisince saptanır.

2.2.4.1. Kohezyonlu malzemelerin sıkıştırılması

- Kil ve Killi Malzemeler

AASHTO sınıflandırma sistemine göre, A-6, A-7 ve 0,075 mm elekten geçen kısmı %20'den fazla olan A-2-6 ve A-2-7 sınıfı killi malzemeler, dolgu sahasına tercihen skreyperlerle taşınıp serilmelidir. Nakliye damperli kamyonlarla yapıldığında, malzemenin yayılmasında greyder, dozer veya kontrol mühendisince uygun görülen bir makine kullanılmalıdır.

Malzeme, 20-25 cm'lik tabakalar halinde küt ayak (padfoot), keçi ayağı, vibrasyonlu keçi ayağı, vibrasyonlu küt ayak ve basıncı ayarlanabilen lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılabilir. Sıkıştırma sırasında malzemenin su içeriği, Standart Proktor metodu ile bulunan optimum su içeriğinin, ± 5 değerleri arasında olacak şekilde ayarlanmalıdır.

Sıkıştırmada keçi ayağı kullanılması halinde, ayakların yüksekliği 15 cm'den az olmamalı, ayak kesiti 25-75 cm² arasında olmalı ve ayaklara düşen

basınç 1 kg/cm^2 'den az olmamalıdır. Çekilir tip silindirler, dolgu malzemesi üzerinde 5 km/saat civarında bir hızla hareket ettirilmelidir. Küt ayak veya vibrasyonlu küt ayak silindirlerin kullanılması halinde, ayak yüksekliği 10 cm 'den, bandaj ağırlığı 6000 kg 'dan az olmamalıdır.

Lastik tekerlekli sıkıştırıcılarda, her bir lastik başına düşen yük 3500 kg 'dan az olmamalı ve bu yük, sıkıştırıcı ağırlığının tekerlek sayısına bölünmesiyle bulunmalıdır [1].

- Silt ve Siltli Malzemeler

AASHTO sınıflandırma sisteminde A-4 ve A-5 sınıfı siltli malzemelerin sıkıştırılmasında Tablo 2.3'teki sıkıştırma kriterleri esas alınır. Sıkıştırma sırasında, siltli toprakların su içeriği, standart proktor metodu ile bulunan optimum su içeriğinin ± 2 değerleri arasında kalmalıdır. Malzeme 20-30 cm 'lik tabakalar halinde, statik çizgisel yükü 30 kg/cm^2 'den az olmayan vibrasyonlu düz bandajlı silindirler kullanılması istenmektedir [1].

2.2.4.2. Granüler malzemelerin sıkıştırılması

Granüler malzemeler, AASHTO sınıflandırma sistemine göre A-1, A-3, A-2-4, A-2-5 ve 0.075 mm elekten geçen kısmı % 20'den az olan A-2-6 v A-2-7 sınıfı malzemelerdir. Bu sınıftaki malzemeler Tablo 2.3'te granüler malzemeler için verilen sıkıştırma kriterlerine, uygun olarak yapılmalıdır.

Sıkıştırma sırasında, malzemenin su içeriği, Standart Proktor metodu ile bulunan optimum su içeriği ± 2 değerleri arasında kalmalıdır. Sıkıştırma işlemi, statik çizgisel yükü 30 kg/cm^2 'den az olmayan vibrasyonlu düz bandajlı silindirler ile 20-30 cm 'lik tabakalar halinde yapılmalıdır. Silindir kapasitesinin artması durumunda tabaka kalınlığı 30-40 cm 'ye kadar yükseltilebilir [1].



Şekil 2.1. Dolgu malzemesinin serilmesi

2.2.5. Dolgularda Sıkışma Kriterleri

Kaya dolgular dışındaki tüm dolgular, su içeriği ve birim ağırlık kontrolü yapılarak inşa edilir. Dolgularda istenen minimum sıkışma kriterleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Dolgularda Sıkışma Kriterleri [1]

Maksimum Standart Proktor Kuru Birim Ağırlığı (t/m^3)	Kohezyonlu Zeminler		Granüler Malzemeler	Deney Metodu
	1,450-1,700	>1,700		
Tesviye yüzeyi altındaki ilk 40 cm (Üstyapı Tabanı) Minimum % Sıkışma	100	97	100	Standart Proktor TS 1900 AASHTO T-99
40 cm 'nin altında kalan tabakalarda minimum % sıkışma	95	95	95	Standart Proktor TS 1900 AASHTO T-99

Dolgunun sıkışma kontrolünde kullanılacak olan arazi birim ağırlığı ölçme metodu, dolgunun kontrol edilen kesiminde kullanılan malzemenin içerdiği maksimum tane boyutuna göre Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Arazide Kuru Birim Ağırlık Tayin Metotları

Deneyin Adı	Malzemenin Maksimum Tane Boyutu		Deney Standart No.
	inç	mm	
Tepsi Metodu	No.4	4,75	TS 1900
Kum Konisi Metodu			
6" çapında	2	50	AASHTO T-191
12" çapında	3	75	AASHTO T-191
Kasnak Metodu			
10" çapında	1 ½	37,5	AASHTO T-181
12" çapında	3	75	AASHTO T-238
Nükleer Metot	1 ½	37,5	AASHTO T-239

Tabakanın her 20 cm 'lik derinliği için sıkışma değerleri saptanmalıdır. 75 mm'den daha büyük taneler içeren malzemelerle yapılan dolgularda sıkışma kontrolü için geçerli bir metot yoktur. 75 mm'den daha küçük tane içerdiği düşünülen kesimlerde ise, kontrol mühendisinin isteğiyle kasnak metodu ile sıkıştırma yapılabilir [1].

2.2.6. Kalite kontrol deneyleri

Yapım sırasında kullanılan malzemeyi ve oluşturulan tabakayı kontrol etmek amacıyla, belirli aralıklarla yapılması gereken deneyler ve sayıları Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Kalite Kontrol Deneyleri [1]

Deneyin Adı	Minimum Deney Sayısı
Likit Limit	
Plastik Limit	
TS 1900, AASHTO T-89,90	Her tabakanın 5000 m ² 'sinde 1 deney
Su içeriği-Kuru Birim Ağırlık İlişkisi	
TS 1900, AASHTO T-99	Her tabakanın 20000 m ² 'sinde 1 deney
Yaş CBR	
TS 1900, AASHTO T-193	Her tabakanın 20000 m ² 'sinde 1 deney
Sıkışma %'si Tayini	
- Tepsi Metodu	
TS 1900	Her tabakanın 100 m 'sinde 1 deney
- Kum Konisi Metodu	
AASHTO T-191	Her tabakanın 100 m 'sinde 1 deney
- Kasnak Metodu	
AASHTO T-181	Her tabakanın 100 m 'sinde 1 deney
- Nükleer Metot *	
AASHTO T-238,239	Her tabakanın 25 m 'sinde 1 deney

* Sıkışma kontrolünün nükleer metotla yapılması halinde, ayrıca her 250 metrede bir, diğer sıkışma kontrol metotlarından uygun olan biri ile de sıkışma kontrolü yapılmalıdır.

3. KARAYOLU ÜST YAPISI

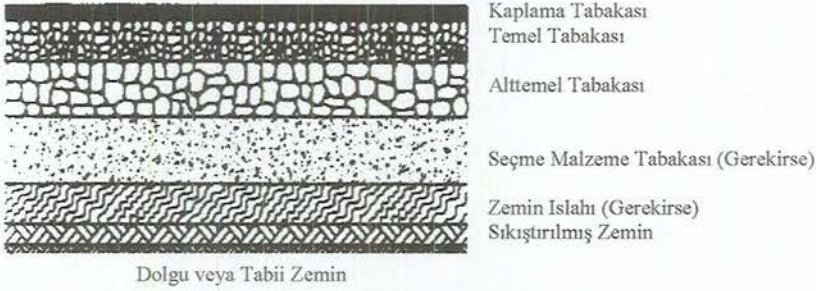
3.1. Giriş

Yol alt yapısı üzerine inşa olunan, trafik yüklerini taşımak ve bu yükü taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak şekilde taban yüzeyine dağıtmak amacıyla yapılan alttemel, temel ve kaplamalardan oluşan kısma üst yapı denmektedir [5]. Kaplama, taşıtlara uygun bir yuvarlama yüzeyi sağlamak, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak ve yol alt yapısına suyun sızmasını önlemek amacıyla temel tabakası üzerine inşa edilen bir tabakadır. Kaplamalar trafik yüklerini zemine ileten yapılardır. Trafik yüklerini zemine iletme kabiliyetleri tabakaların yük dağıtma özelliklerine bağlıdır. Bu yüzden kaplama kalınlıkları zeminin taşıma gücü ve kaplama tipine bağlı olarak değişmektedir. Kaplamanın ana görevi üst yapının taşıma kapasitesini arttırmaktır. Ayrıca trafik hareketlerinden kaynaklanan kayma gerilmelerine karşı dayanıklı ve don olaylarına karşı da dayanıklı olmalıdır. Kaplamalarda oluşan kayma ve basınç gerilmeleri yukarıdan aşağıya doğru azalır [4]. Bu nedenle, kaplamaları oluşturan tabakalar yukarıdan aşağıya doğru daha az kalite ve maliyete sahip olacak şekilde projelendirilmektedir. Üst yapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemeler ve yapım yöntemlerine göre rijit (beton) ve esnek (flesibl) olmak üzere gruplandırılmaktadır. (Şekil 3.1.) Zemin cinsi, trafik hacmi, ve ekonomik faktörlere bağlı olarak en uygun üst yapı seçilir. Rijit kaplamalar, yüksek trafik hacmine sahip yollarda, alttemel tabakası üzerine yapılan beton plaktan oluşur. Esnek kaplamalar ise çok tabakalı yapılardır. Esnek tabakalar ve rijit tabakaların birbirine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Bunları özetlenirse;

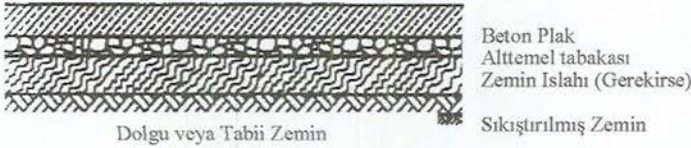
- Rijit kaplamalar yüksek trafik hacmine sahip yollarda ekonomik olurken, esnek kaplamalar ise düşük trafik hacimli yollarda daha ekonomiktir.
- Rijit kaplamalarda ilk yapım masrafları yüksek bakım masrafı düşüktür. Esnek kaplamalarda durum tersinedir.
- Rijit kaplamaların tamir süresi uzun olduğundan, tamir esnasında servis yoluna ihtiyaç duyulur. Buna karşılık esnek kaplamalarda onarım süresi daha kısa ve yol trafiği açık tutulabilmektedir.

- Rijit kaplamaların inşası daha zor ve titiz bir işçilik gerektirirken esnek kaplamaların yapımı nispeten daha kolaydır.
- Esnek kaplamaların inşası sırasında yüzeyin rutubetli olmaması ve hava ısısının 15° C' den yüksek olması gerektiğinden dolayı yapım süresi rijit kaplamalara göre daha kısıtlıdır.
- Rijit kaplamalar açık renkli olduklarından dolayı gece daha kolay görünürken gündüz parlayarak rahatsız eder ancak esnek kaplamalar koyu renkli olduklarından durum tersinedir.

Yapılan karşılaştırmalardan görüleceği gibi birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Kaplama tipinin seçiminde trafik hacmi büyük rol oynamaktadır. Rijit kaplamaların ilk yatırım masrafları fazla olduğundan belirli bir trafik hacminden sonra uygulanmalıdır. Genel olarak 8.2 ton dingil yükü sayısı 60-75 10⁶ 'dan fazla olan yollarda uygulanmaktadır [4].



a) Esnek Kaplamalar



b) Rijit Kaplamalar

Şekil 3.1. Kaplama Tipleri ve Tabakaları [4]

3.2. Esnek Yol Üst Yapısını Oluşturan Tabakalar

3.2.1. Giriş

Esnek kaplama, taşıtlar için gerekli sürüş konforunu emniyetli olarak sağlayabilen ve taşıtların yarattığı gerilmelere karşı yeterli stabiliteye sahip olan farklı tabakalardan meydana gelen esnek bir yapıdır. Esnek üst yapının performansının yüksek ve stabil olması için pürüzsüz ,düzgün yüzeylere sahip, kayma direnci yeterli, kalıcı deformasyona karşı dirençli, durabilite şartlarına dayanıklı ve kaplama yüzeyindeki suları temele intikal ettirmeyecek şekilde geçirimsiz bir yapıdan meydana gelmesi gereklidir [4].

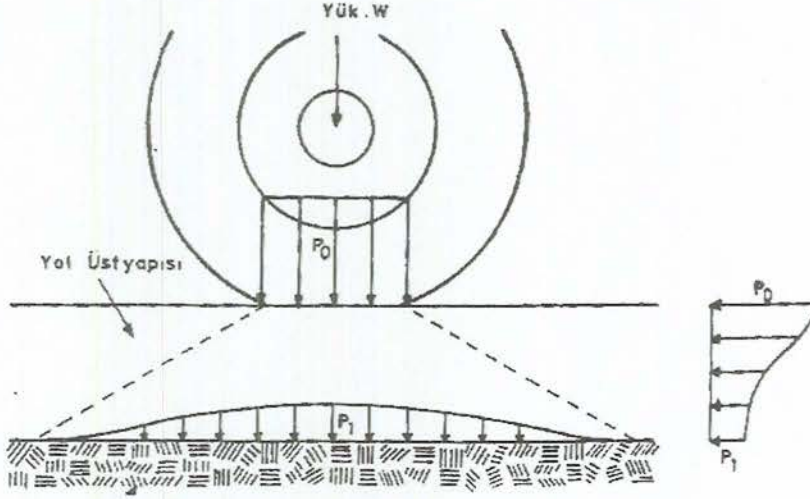
Esnek kaplamalar düşük standartlı ve yüksek standartlı olmak üzere iki ayrı kalitede imal edilirler. Düşük standartlı kaplamalar, trafik hacminin düşük olduğu, genel olarak günlük taşıt trafiğinin 500'den az olduğu yapılardır. Esnek üst yapılar ekonomik, çabuk ve kolay inşa edilmesiyle, bakım ve onarım işlerinin kolay yapılması nedeniyle tercih edilirler [4].

Esnek bir üst yapı noktasal trafik yükünü, fazla deformasyon yapmadan, yükleri taşıyacak şekilde hazırlanmış taban yüzeyine dağıtmak üzere projelendirilmiş tabakalardan oluşan sistemdir. Bu tabakalar, alttemel tabakası, temel tabakası ve kaplama tabakasıdır. Bazen kendi içlerinde de birden fazla tabaka ihtiva edebilirler (Şekil 3.3.). Alttemel genellikle temel tabakası malzemesinden daha düşük evsafli malzemedan oluşur.

Her tabakanın kalınlığı ve fonksiyonu birbirinden farklıdır. Tabakaların kalınlıkları; trafiğin hacmine ve çevresel etkenlere göre değişir. Kaplamayı meydana getiren tabakaların kalınlıkları aşağıdan yukarı doğru azalır. Ancak kalite yönünden üst tabakalar daha iyidir. Alt tabakalar ise yapım tekniği bakımından daha kolay maliyet açısından ise ekonomiktir.

Kaplama tabakası yüzeyde olduğundan, en fazla gerilmeye maruz kalan tabakadır. Dolayısıyla bu tabakada elastisite modülü alt tabakalara göre daha yüksektir. Temel ve alttemel tabakalarına inildikçe gerilmeler azalır. Bu sebeple kaplama tabakası ve temel tabakası, alttemele nazaran daha kaliteli malzemedan imal edilirler [4].

Esnek ve rijit tabakalar arasındaki en önemli farklardan birisi de yük dağılım biçimidir. Rijit kaplamaların elastisite modülü yüksek olduğundan, yükü daha geniş alana yayar. Yükün asıl taşındığı yer kendisidir. Esnek kaplamalarda ise yük taşıma, önemli ölçüde alt tabakalar tarafından sağlanır (Şekil 3.2).



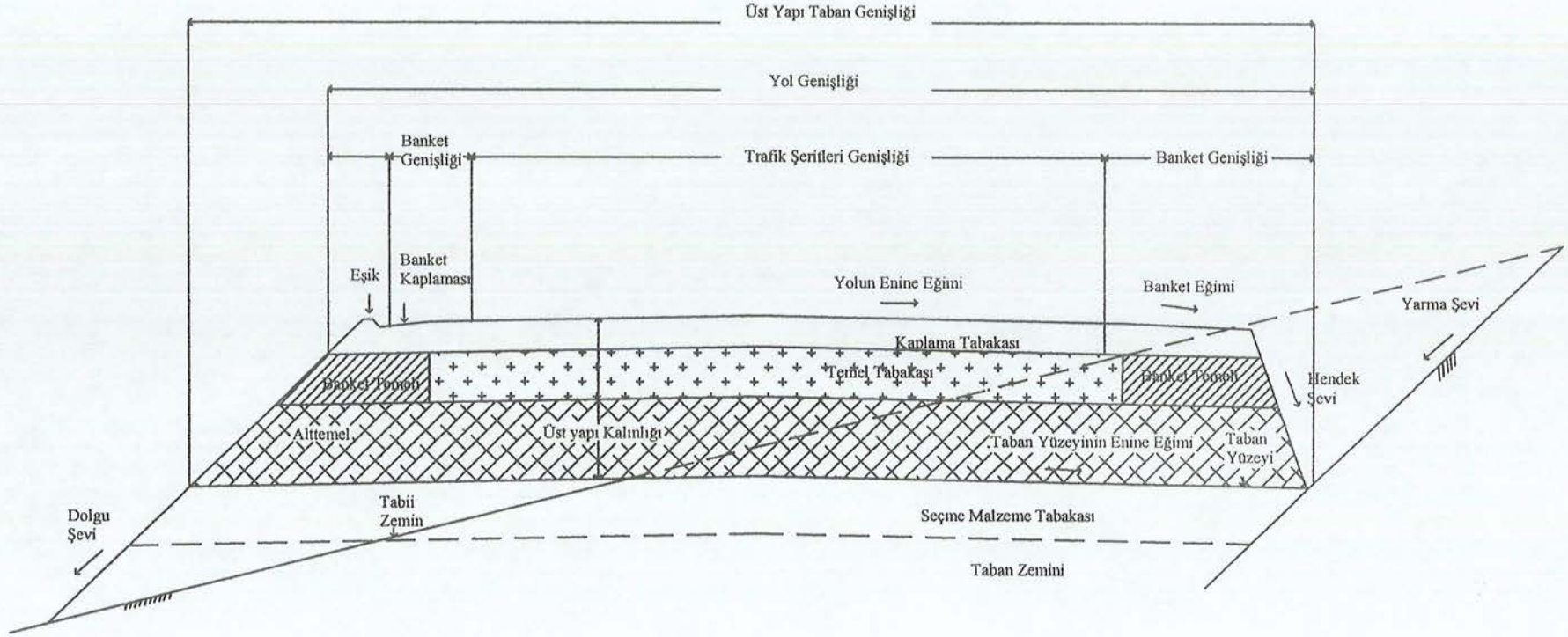
Şekil 3.2. Esnek Üstyapıda Gerilme Dağılımı

3.2.2. Alttemel tabakası

3.2.2.1. Tanım

Alttemel, belirli gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan, malzemenin su ile karıştırılarak, ince tesviyesi tamamlanmış taban üzerine tabakalar halinde serilerek, dren kabiliyetini artırılan ve kaplamaya etki eden yükleri zemine yayan tabakadır. Alttemel tabakası esnek kaplamaların en alt tabakasıdır. Elastikiyeti ve CBR değeri düşük granüler malzemelerden yapılabilir. Alt temel tabakası ile granüler temel tabakası arasındaki en önemli fark alt temel tabakasının maliyetinin düşük olmasıdır. Aynı zamanda bu tabaka en kalın tabakadır [4].

Temel ve alt temel tabakalarının özellikleri ve kullanılacak agregaların gradasyonu, Tablo 3.1, Tablo 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.3. Yol Enkesiti

Tablo 3.1. Alttemel ve Temel Tabakalarının Özellikleri

ÖZELLİKLER		ALT TEMEL	MEKANİK STAB. TEMEL		PLENT-MİKS TEMEL		ÇİMENTO STAB. TEMEL	
AGREGA	Na ₂ SO ₄ ile dayanıklılık	Maks. %25	KABA Mak. % 15	İNCE -	KABA Mak. % 15	İNCE -	KABA Mak. % 15	İNCE -
	Los Angeles Aşınma	Maks.%50	Mak. % 40	-	Mak. % 40	-	Mak. % 40	-
	Yassılık İndeksi	-	Mak. % 40	-	Mak. % 35	-	-	-
	LL-PI	Maks. 25-6	-	Mak.25-6	-	Mak.25-6	-	Mak.25-6
	Kırılmışlık Oranı	-	Min % 50	-	Min % 100	-	-	-
	Filler	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	-	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	-	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	-
	Kil Topakları	Mak. %1	0	Mak % 0,5	0	Mak % 0,5	0	Mak % 0,5
	Organik Maddeler	Mak. %1	0	Mak % 0,5	0	Mak % 0,5	0	Mak % 0,5
	Diğer zararlı maddeler	-	Mak. % 1	Mak % 1	Mak. % 1	Mak % 1	Mak. % 1	Mak % 1
SIKIŞMA	Sıkışmış tabaka kalınlığı	Mak.20 cm	Mak.20 cm		Mak.20 cm		-	
	Sıkışma Kontrolü	- 100 m'de bir kum konisi - 100 m'de bir kasnak - 25 m'de bir Nükleer	- 100 m'de bir kum konisi - 100 m'de bir kasnak - 25 m'de bir Nükleer		- 100 m'de bir kum konisi - 100 m'de bir kasnak - 25 m'de bir Nükleer		7 Günlük Serbest Basınç dayanımı 35-55 kg/cm ²	
	Sıkıştırma makineleri: Vibrasyonlu Silindir Pnömatik Silindir	Statik çizgisel yük>30kg/cm Lastik başına yük>3,5 ton	Statik çizgisel yük>30kg/cm Lastik başına yük>3,5 ton		Statik çizgisel yük>30kg/cm Lastik başına yük>3,5 ton		Statik çizgisel yük>30kg/cm Lastik başına yük>3,5 ton	
	Minimum Sıkışma	%95 Mod. Proktor %100 Std. Proktor	%98 Mod. Proktor %95 Titreşimli Tokmak		%100 Mod.Proktor %97 Titreşimli Tokmak		%98 Mod. Proktor	
	Sıkışmada su içeriği %	W _{opt} -2 (Std Proktor) W _{opt} ± 2 (Mod Proktor)	W _{opt} -2 (Mod Proktor) W _{opt} ± 2 (Titreşimli Tok.)		W _{opt} -2 (Mod Proktor) W _{opt} ± 0,5 (Titreşimli Tok.)		W _{opt} ila W _{opt} +0,5	
	CBR (%)	Min 30 (Yaş)	Min 100 (Yaş)		Min 120 (Yaş)		-	
Yüzey Düzgünlüğü (4 m mastarla)	Mak. 20 mm	Mak. 15 mm		Mak. 15 mm		Mak. 15 mm		

Tablo 3.2. Alttemel ve Temel Gradasyon Limitleri [1]

Elek İnç (mm)	Alttemel Tabakası	Mekanik Stabilizasyon Temel Tabakası				Plent-Miks Temel Tabakası		Çimento Stab. Temel Tabakası
		A	B	C	D	Tip-I	Tip-II	
3" (75)	100	-	-	-	-	-	-	-
2" (50)	-	100	100	-	-	-	-	-
1 ½" (37,5)	85-100	80-100	85-100	-	-	100	-	100
1" (25)	-	60-90	70-95	100	100	72-100	100	72-100
¾" (19)	-	-	-	75-100	80-100	60-92	80-100	60-92
3/8" (9,5)	45-100	30-70	40-75	50-85	60-100	40-75	50-82	40-75
No.4 (4,75)	25-85	25-55	30-60	35-65	50-85	30-60	35-65	30-60
No.10 (2,00)	-	15-40	20-45	25-50	40-70	20-45	23-50	20-45
No.40 (0,425)	7-40	8-20	10-25	12-30	20-45	8-25	12-30	8-25
No.200 (0,075)	0-12	2-8	0-12	0-12	0-12	0-10	2-12	0-10

Alttemel tabakası kaplama tabakalarının altına yapılır, bundan dolayı temel görevi görür. Kaplamaya nazaran daha az gerilme alırlar. Alt temel tabakasının ana işlevleri şunlardır:

- Üst yapının maliyetini düşürür.
- Üst yapıyı hızlandırır.
- Donun zararlı etkilerini önler.
- Zeminin şişme ve büzülme değişikliklerine karşı koyar.
- Deformasyonlara karşı dirençlidir.
- Kaplamadan gelen yükleri zemine yayar.
- Kaplama için düzgün bir alan oluşturur.
- Kaplamanın altında esnek bir yapı oluşturur.

3.2.2.2. Yapım metotları

- Karışımın Serilmesi

Alttemel malzemesi, inşaat ve tesviyesi tamamlanarak hazırlanmış taban üzerine, sıkışmış kalınlığı 20 cm' yi geçmeyecek şekilde, tabakalar halinde serilip sıkıştırılır (Şekil 3.4). Ancak sıkıştırma makinelerinin kapasitelerinin yüksek olması durumunda, tabaka kalınlığı, deneylere bağlı olarak 30 cm' ye kadar arttırılabilir. Kalınlığın fazla olması nedeniyle alttemelin birden fazla tabakalar halinde serilmesi halinde, tabaka kalınlıkları eşit olmalıdır. Taban yüzeyinde gevşek kısımlar varsa onarılmalı ve donmuş taban üzerine inşa edilmemelidir.

Serme işi, homojen ve üniform miktar ve kalınlıklarda serilmesini sağlayacak özellikte vasıtalarla yapılır (Şekil 3.5). Sermeye malzemenin alındığı yere en uzak noktadan başlanır ve malzemenin alındığı yere doğru devam edilir. Serme işi sıkıştırma işinden en çok 200 m ileride olmalı her iş günü sonunda serilen malzeme mutlaka sıkıştırılmalıdır [1].



Şekil 3.4 Alttemel Serilmesi

Yayıcı makine kullanılacağı zaman, malzeme yolun bir tarafına konulur. Ancak yağmurlu mevsimlerde ve kış aylarında platform kenarında bırakılmaz. Sıkıştırılmamış malzeme üzerinden trafik geçirilmemelidir. Malzeme yayıldıktan sonra kesit genişliğince, greyderle tesviyesi yapılır. Bu sırada malzeme gradasyonu bozulmamalıdır.



Şekil 3.5. Alttemel Malzemesinin Greyderle Tesviyesi

- Karışımın Sıkıştırılması

Kullanılan malzeme ve serilen tabaka kalınlığına uygun sıkıştırma tekniği, işin başlangıcında yapılacak bir deneme kesiminde belirlenir. 100 m olarak alınacak deneme kesiminde en az üç silindireme şeridi bulunmalıdır. Sıkıştırma, yolun eksenine paralel olarak yapılır ve kenarlardan başlayarak merkeze doğru kaydırılır (Şekil 3.6). Her geçişte bir önceki geçişte sıkıştırılan kısma, silindir genişliğinin en az %10'u kadar bindirme yapılır [1].



Şekil 3.6. Alttemel Tabakasının Sıkıştırılması

Sıkıştırma sırasında görülen segregasyona uğramış kesimler, bu kesimlerde malzemenin kaldırılarak yerine uygun malzeme getirilmesi ve sıkıştırılması yoluyla düzeltilir. Sıkıştırılmış alttemel kalınlığı projede belirtilen kalınlığın %10'undan farklı olursa, malzeme yüzeyi kabartılarak gerekli ilave ve azaltma yapılarak tekrar sıkıştırılır. Yapılan kontrollerde Tablo 3.1 de verilen sıkışma değerleri elde edilemediği durumlarda, gerekiyorsa ek sulama ile istenen birim ağırlığa ulaşılır.

Sıkıştırma, statik çizgisel yükü 30 kg/cm 'den büyük olan kendi yürür düz bandajlı vibrasyonlu silindirler veya lastik başına düşen yükü 3500 kg' dan az olmayan lastik tekerlekli sıkıştırıcılarla yapılır. Bordür, kalıplar ve duvar yanları gibi silindirin yaşayamayacağı yerlerde sıkıştırma, vibrasyonlu plakalı sıkıştırıcılar, vibrasyonlu tokmaklar veya elle çekilebilen küçük vibrasyonlu silindirlerle yapılır. Arazideki sıkışma kontrolü Tablo 3.1' deki verilen metotlardan birisi ile yapılır [1].

Sıkıştırma işlemleri tamamlandıktan sonra yol yüzeyinin düzgün olup olmadığı kontrol edilir. Bunun için 4 m boyunda esnek olmayan bir maddeden imal edilmiş mastar kullanılır. Yolun boyuna kontrolü için, mastar yol eksenine paralel olarak yüzeye konulur.

- Kalite Kontrol Deneyleri

Yapım esnasında kullanılan malzemeyi ve oluşturulan tabakayı kontrol etmek amacıyla kalite kontrol deneyleri yapılmalıdır. Tablo 3.1 'de gerekli deney ve sayıları belirtilmiştir.

3.2.3. Temel tabakası

Alttemel ile kaplama arasına yerleştirilen çakıl, kırma taş, kum, cüruf veya benzeri malzemelerle az miktarda bağlayıcı malzemeden oluşan tabakaya temel tabakası (base) denmektedir. Granüler temel (Mekanik Stabilizasyon Temel), Plent-miks temel ve çimento bağlayıcılı granüler temel olmak üzere üç tipte inşa edilir. Üst yapının taşıma gücünü arttırmak, kaplamadan gelen trafik yüklerinin sebep olduğu kayma gerilmelerine karşı koymak ve drenajı sağlayarak don etkisine karşı ek koruma sağlamak, temel tabakasının başlıca görevleri arasındadır.

3.2.3.1. Granüler temel tabakası

Granüler temel tabakası çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf veya kırmataş ile ince malzemeler kullanılarak inşa edilmektedir. Sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan temel malzemesi, su ile karıştırılarak, şartnameye uygun olarak hazırlanmış yeterli taban veya alttemel tabakası üzerine, bir veya birden fazla tabakalar halinde, projeye uygun olarak serilir. Granüler temel tabakası yapımında kullanılacak malzeme Tablo 3.2. 'deki gradasyon limitleri içerisinde olmalıdır. Granüler temel gradasyonunun Tablo 3.2 'deki verilen A,B,C,D tiplerinden hangisine uygun olacağı aşağıdaki iki maddeye göre tespit edilir.

- a) Projede belirtilen temel tabakası kalınlığı 20 cm 'den az ise tabakanın tümü C veya D tipi malzeme ile yapılmalıdır.
- b) Projede belirtilen temel tabakası kalınlığı 20 cm veya daha fazla ise tabaka A,B,C tipi malzemelerden biri ile oluşturulacaktır.

Granüler temel malzemesi, yapımı ve düzeltilmesi tamamlanmış, gerekli eğimleri verilmiş alttemel tabakası üzerine, projede gösterilen sıkışmış kalınlık sağlanacak şekilde bir veya birden fazla tabakalar halinde serilir.

Granüler temel malzemesi, iki farklı tane boyutu grubundaki agregaların karıştırılmasıyla hazırlanacak ise karıştırma sabit veya hareketli bir plentte ya da yolda; ikiden fazla tane boyutunun karıştırılmasıyla hazırlanacak ise mutlaka plentte hazırlanmalıdır. Karıştırmanın yolda karışım yapan makinelerle yapılması durumunda, makine agreganın tümünü yerden alıp gerekli oranda su ile karıştırıp serecek kapasitede ve yapıda olmalıdır. Ayrıca greyder kullanılarak karıştırma yapılacaksa malzemeler yolda yan yana figüre edilmelidir. Granüler temel malzemesi, sıkışmış kalınlığı 20 cm 'yi geçmeyecek şekilde serilir. Granüler temelin projede belirtilen kalınlığı fazla ise birbirine eşit olan tabakalar halinde serilir. Her tabaka, üzerine yenisi serilmeden önce istenen birim ağırlığa kadar sıkıştırılır.

Alttemel için uygulanan sıkıştırma tekniği geçerlidir. Tablo 3.1 'de granüler temel için sıkışma kriterleri verilmiştir. Sıkıştırmanın tamamlanmasından sonra yol yüzeyinin düzgün olup olmadığının kontrolü yapılır. Yolun boyuna eğiminin kontrolü için yol eksenine paralel mastar yerleştirilir. Mastarın her iki ucu arasındaki açıklık 15 mm 'den fazla olmamalıdır. Yol yüzeyinin enine eğimi de, mastarın yol eksenine dik olarak konulmasıyla bulunur. 15 mm'den fazla olmamalıdır.

Yapım esnasında kullanılan malzemeyi ve oluşturulan tabakayı kontrol etmek amacıyla kalite kontrol deneyleri yapılmalıdır. Tablo 3.1 'de gerekli deney ve sayıları belirtilmiştir. Sıkışma kontrolünün nükleer metotla yapılması durumunda, her 250 m 'de bir diğer sıkışma metotlarından uygun olanı ile kalite kontrolü yapılır.

3.2.3.2. Plent-Miks temel

Plent-miks tabakası, kaba ve ince olmak üzere en az iki ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin, yeterli alttemel tabakası üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır. Plent-miks tabakası, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzemelerden oluşmaktadır. Plent-miks temel yapımında kullanılacak malzemeler Tablo 3.2. 'deki gradasyon limitleri içerisinde olmalıdır.

Şantiye sahasında, plent-miks temelde kullanılacak agrega grupları ayrı ayrı hazırlanarak segregasyon minimum olacak şekilde dane gruplarına göre değişik yerlerde depolanır. Burada agrega gruplarının ve zararlı maddelerin karışmaması için dikkat edilmelidir.

Araştırma laboratuvarında plent-miks karışım gradasyonu hazırlanır. Bunun için her tane boyutu grubuna ait malzemeyi temsil edecek şekilde, en az on adet elek analizi ortalaması esas alınır. Hazırlanan plent-miks temel malzemesi, belirlenen optimum su muhtevası ile plentte karıştırılır. Karışım damperli kamyonlarla işyerine taşınır. Karışım plentinin aralıksız çalışması için, kamyon adedi, plent kapasitesi ve taşınacak mesafe göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapım süresi, Mart ayı başlangıcı ile Ekim ayı sonuna kadar olan zamandır. Bu süre mevsim şartlarına göre bir miktar kısalabilir ya da uzayabilir. Yağışlı, don ve karlı havalarda serim yapılamaz. Çok sıcak havalarda ise yüzeydeki suyun buharlaşması engellenmeli gerektiğinde nemlendirilmelidir.

Plent-miks temel malzemesi, yapımı ve düzeltilmesi tamamlanmış, gerekli eğimleri verilmiş alttemel tabakası üzerine serilir. Malzeme serilmeden önce alttemel yüzeyindeki gevşek kısımlar, serbest malzeme, çukurlar, kabarmalar veya çatlak kısımlar, uygun şekilde onarılır.

Karışımın serilmesi finişer veya agrega sericisi (jarse) ile yapılır. Bir seferde serilip sıkıştırılan tabakanın sıkışmış kalınlığı 20 cm 'den fazla olmamalıdır. Malzemenin serimi sırasında, segregasyona sebep olmayacak şekilde, yolun plan, profil ve enkesitlerine uygun olarak sıkışma sağlanmalıdır. Serme genişliği, üstyapı projesinde belirtildiği gibi alınır.

Karışım yola serilir serilmez silindiraja başlanır. İstenen sıkışmanın sağlanabilmesi için gerekli olan tabaka kalınlığı, sıkıştırma makinesi ve geçiş sayıları, serilen kesimin ilk 100 m 'lik kısmında denenerek belirlenir. Bu deneme kesimi en az üç silindirleme şeritinden oluşur.

Sıkıştırma yolun eksenine paralel olarak yapılır ve kenarlardan başlayarak merkeze doğru kaydırılır. Her geçişte bir önceki geçişte sıkıştırılan kısma, silindir genişliğinin en az %10'u kadar bindirme yapılır. Şeritlerin tümünde ilk geçiş tamamlanmadan ikinci geçiş yapılmaz.

Sıkıştırma sırasında segregasyona uğramış kesimlerde, malzeme kaldırılır ve yerine uygun malzeme konularak sıkıştırılır. Yapılan kontrollerde gereken sıkışma sağlanamıyorsa, silindiraja devam edilir. Yeterli silindiraja rağmen istenen sıkışma sağlanamıyorsa, bu tabaka kaldırılıp, yerine yeni karışım serilir ve sıkıştırılır. Birden fazla tabakanın serilmesi durumunda bir önceki tabaka yeterli sıkışma değerine ulaştıktan sonra ikinci tabaka serilir.

Arazide sıkışma kontrolünde uygulanacak metotlar ve minimum sıkışma koşulları Tablo 3.1 'de verilmiştir.

Sıkıştırmada statik çizgisel yükü 30 kg/cm 'den daha büyük olan kendi yürür düz bandajlı vibrasyonlu silindirler ve lastik başına düşen yükü en az 3500 kg olan lastik tekerlekli silindirler kullanılarak yapılır. Bordür, kalıplar ve duvarların yanları gibi silindirlerin yaşanamayacağı yerlerde sıkıştırma vibrasyonlu plakalı sıkıştırıcılar, vibrasyonlu tokmaklar veya elle çekilebilen küçük vibrasyonlu silindirlerle yapılır.

Sıkıştırmının tamamlanmasından sonra yol yüzeyinin düzgünlüğünün enine ve boyuna kontrolü master kullanılarak yapılır. Yol yüzeyinde 15 mm 'den fazla seviye farkı olmamalıdır.

3.2.3.3. Çimento bağlayıcılı granüler temel

Çimento bağlayıcılı granüler temel malzemesi, çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzemelerden oluşmaktadır. Bu malzemelerin uygun oranlarda çimento ve su ile bir plente karıştırılmasıyla elde edilen karışım, yeterli bir

alttemel tabakası üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, projede belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilir ve sıkıştırılır.

- Çimento Bağlayıcılı Granüler Temelde Kullanılacak Malzemeler:

Agrega: Agreg a malzemesi sürekli gradasyona sahip olmalı ve Tablo 3.2'de verilen gradasyon limitleri içerisinde kalmalıdır.

Çimento: Çimento malzemesi, TS-19, TS-20, ve TS-26 'da belirtilen şartlara uygun olmalıdır. Çimentonun teknik kontrolleri, TS-24'e göre yapılmalıdır.

Su: Yağ, tuz, asit, alkali gibi endüstri atıkları ve bitkisel atıklar içermemelidir.

Çimento bağlayıcılı granüler temel malzemesi için kullanılacak suyun litresinde 2 gr 'dan fazla SO₃ olmamalıdır.

Kür Malzemesi: Kür malzemesi olarak aşağıdaki malzemelerden birisi kullanılır.

TS-1083'e uygun orta hızda kür olan sıvı petrol asfaltları (MC-30, MC-70, RC-250) TS-1082'ye uygun asfalt emülsiyonları (RS-1, RS-2, SS-1, SS-1h, CRS-1, CRS-2, CSS-1, CSS-1h, MS-1)

Araştırma raporunda verilen işyeri karışım formülü dahilinde dane grubuna göre agregalar, su ve çimento, belirtilen oranlarda harman tipi plente verilerek karıştırılır. Karışımın hazırlanması sırasında agrega, su ve çimento beslemesinde kesiklik ve düzensizlik olmamasına dikkat edilmelidir. Karışımın homojen olması için karıştırma süresi bir dakikadan az olmamalıdır. Karıştırıcıya su ilave edildiğinde çimentonun topaklanmaması için agrega ve çimento daha önce yeteri kadar karıştırılır.

Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakasının serme ve sıkıştırma işlerinin belirli bir zaman süresi içerisinde tamamlanması gerekir. Normal portlant çimentoları için karışımın plentten çıkışından itibaren 2 saat içerisinde yerine nakledilmesi, serilmesi ve sıkıştırılması gerekir. Karışım, plentten temiz ve üzeri branda örtülü kamyonlarla, 30 dakika içerisinde serileceği yere nakledilir. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakasının karıştırılması ve serilmesi; ısının 5 ° C 'nin altına düşeceği durumlarda ve yağmurlu havalarda yapılmaz.. Ayrıca donmuş alttemel üzerine serilmez. Karışımın serileceği alttemel yüzeyi serimden önce homojen şekilde nemlendirilir.

Karışım finişerle serilir. Serim esnasında segregasyon olmamasına dikkat edilmelidir. Birden fazla finişer kullanılması halinde finişerler, karışımın bir şeritten diğerine serilmesi arasındaki geçen sürenin 30 dakikayı geçmemesi gerekir.

Çimento bağlayıcılı granüler temel malzemesinin sıkıştırılması plent-miks temelde belirtilen sıkıştırma makineleri ve sıkıştırma yöntemi ile yapılır. Segregasyona uğramış kesimler karışımın hazırlanmasından sonraki iki saat içinde sökülüp atılarak yeni karışımla onarılır. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası, modifiye proktor metodu ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığın %98'inden az olmamak kaydıyla sıkıştırılır. Sıkıştırılmış temel kalınlığı, projede belirtilen kalınlığın %10'undan fazla olursa, aşağıda belirtilen düzenlemeler yapılır:

1. Söz konusu düzenleme karışımın hazırlanmasından sonraki iki saat içerisinde yapılacaksa, malzeme yüzeyi en az 5 cm kabartılarak gerekli azaltma veya ilave yapılır.
2. Eğer düzenleme iki saati aşan bir süre sonrasında yapılacaksa, mevcut malzeme tüm tabaka kalınlığı boyunca kaldırılıp yerine yeni karışımla hazırlanmış malzeme serilir.
3. Sıkıştırmanın tamamlanmasından sonra masterla yüzey düzgünlüğünün enine ve boyuna kontrolü yapılır. Yüzeyde 15 mm 'den fazla bir seviye farkı olmamalıdır.

Günlük imalat sonunda veya çalışmaya iki saatten fazla ara verildiğinde, serime devam edilebilmesi için meydana gelen ek yerinin düzeltilmesi gerekir. Bunun için ek yeri yol eksenine dik olarak kesilir. Boyuna ek yerleri de yol eksenine paralel olarak, şeridin kenarından 5-10 cm içeriden kesilerek oluşturulur. Kesme işlemi sıkıştırmada kullanılan silindire monte edilmiş kesme aracı ile yapılır.

Serilip sıkıştırılmış şeridin yanına, yeni şeridin serimine başlanmadan önce gerekli temizlik yapılır ve kesilmiş ek yerleri çimento şerbeti veya su ile ıslatılarak çalışmalara devam edilir.

Çimento bağlayıcılı granüler temelin seriminden sonra en az yedi gün kür ettirilmelidir. Sıkıştırma ve reglaj işleminin tamamlanmasından sonra en fazla

sekiz saat içerisinde, güneşli ve sıcak havalarda ise en fazla dört saat içerisinde koruyucu kür tabakası ile kaplanır. Çimento bağlayıcılı temel seriminden sonra en az yedi gün süre ile taşıt trafiğine kapalı tutulur.

Kür işlemi sırasında, bitümlü kür tabakası (MC-30, MC-70 veya RC 250) distribütör yardımı ile laboratuvarın vermiş olduğu oran dahilinde tatbik edilir. Malzemenin rutubet kaybını önlemek amacıyla plastik örtüler kullanılır.

3.2.4. Bitümlü temel tabakası

Bitümlü temel malzemesi, kırılmış ve elenmiş kaba agrega, ince agrega ve mineral fillerin, belli gradasyon limitleri arasında bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanır. Hazırlanan bitümlü temel malzemesi, yeterli temel tabakası üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde sıcak olarak ve projesindeki plan, profil ve en kesitlere uygun olarak serilir [1].

3.2.5. Kaplama tabakası

Projesine ve şartnamesine uygun olarak hazırlanmış temel tabakası üzerinde oluşturulacak kaplama tabakası, şu başlıklar altında incelenebilir: [4]

1. Sathi Kaplama

- Tek tabakalı bitümlü sathi kaplama
- Çift tabakalı bitümlü sathi kaplama
- Penetrasyon makadam satıh tabakası
- Rolled asfalt kaplama
- Bitümlü makadam satıh tabakası

2. Asfalt Betonu

- Binder
- Aşınma

3.2.5.1. Sathi (Yüzeysel) kaplama

Sathi kaplama en basit ve ucuz kaplama şeklidir. Esas görevi yol bünyesini korumak ve kaymaya karşı emniyetli bir satıh temin etmektir. Sathi kaplamanın performansına etki eden en önemli faktör, bağlayıcı film tabakasının kalınlığıdır. Film tabakasının kalınlığı, mıcırkların ebadına ve kaplanacak yüzeyin durumuna bağlı olarak seçilir. Yağışlı havalar yeni serilmiş sathi kaplamalar üzerinde bozucu tesirler gösterirler. Bu tesirler, soyulma mukavemetini arttırıcı maddelerin kullanılması ile önlenbilir [1].

3.2.5.2 Asfalt betonu (Binder-Aşınma)

Asfalt betonu genel anlamı ile aşınma tabakasını, binder tabakasını veya bunların her ikisini birden kapsar. Asfalt betonu, kırılmış ve elenmiş kaba agrega, ince agrega, ve mineral fillerin gradasyon limitleri içerisinde, bitümlü bağlayıcı ile plentte belirli şartlarda karışımından meydana gelen yüksek evsafli sıcak karışımdır.

Asfalt betonu temel ve bitümlü kaplamalar üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, sıcak olarak serilir. Serim projedeki plan, profil ve en kesitlere uygun olmalıdır [1].

4. ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU

4.1. Giriş

Zemin stabilizasyonu, zemini daha stabil hale getirmek için yapılan işlemlerdir. Zemine ait özelliklerin stabilizasyon teknikleri ile iyileştirilmesi mümkündür. Zeminlerin problem yaratan özellikleri tam olarak belirlendikten sonra hangi tip stabilizasyon metodunun uygulanması gerektiği belirlenmelidir (Tablo 4.1.). Eğer taban zemini yol yapımına uygun değilse, ya zemin olduğu gibi kabul edilir, ya da uygun olmayan zemin kaldırılıp yerine uygun zemin koyulur. Üçüncü seçenek ise, uygun olmayan taban zemininin ıslah edilmesidir.

Birinci alternatif, zeminin zayıf özelliklerini dikkate alarak kaplamayı buna göre dizayn etmektir. Ancak aşırı kaplama kalınlığı gerektirdiğinden ekonomik değildir. Bunun dışında zeminin bazı zayıf özelliklerinin kaplamada yaratacağı olumsuz etkiler, kaplama kalınlığının arttırılmasıyla giderilemeyebilir. İkinci alternatif, uygun olmayan zeminin kazılması ve kazılan zeminin uygun bir yere taşınmasıdır. Yerine konacak zemin için malzeme ocağı bulunması, malzeme ocağından malzemenin taşınması ve sıkıştırılması hem külfetli hem de zaman alıcıdır. Sonuncu alternatif ise, stabilizasyon teknikleri ile zeminin ıslah edilmesidir [4].

Zemin stabilizasyon yöntemleri şu şekilde sınıflandırılabilir:

- a) Mekanik Stabilizasyon
- b) Kimyasal Stabilizasyon
- c) Bitüm Stabilizasyonu
- d) Zemin Enjeksiyonu
- e) Diğer Yöntemler (taş kolonlar, patlatma vb.)

Tablo 4.1’de belirtilen zemin bileşiklerinden, kaolin, illit ve montmorillonit gibi killerin ticari değeri yüksektir. Bu nedenle, bu tip killeri içeren zeminlerden yol eksenini geçirmemek gereklidir. Ayrıca bu tip killerin olumsuz özelliklerini gidermek oldukça güçtür.

Zemin stabilizasyonları, zeminin olumsuz özelliklerini iyileştirildiği gibi, kaplama kalınlıklarında önemli azalmalara da neden olur.

Tablo 4.1. Zemin Bileşenlerine Göre Tavsiye Edilen Stabilizasyon Metotları (Rodriquez)

Zemin Bileşği	Tavsiye Edilen Stabilizasyon	Amaç
Organik Madde	Mekanik Stabilizasyon	Diğer metotlar etkisizdir
Kum	Mekanik Stabilizasyon Çimento Asfalt	Plastik olmayan malzeme karıştırılarak stabiliteyi arttırmak Mukavemeti arttırmak Kohezyonu sağlamak
Silt	Mekanik veya Kimyasal Stabilizasyon	Zemin özelliklerini iyileştirmek
Killer; - Alofenler - Kaolin - İllit - Montmorillonit	Kireç veya Kireç- Uçucu Kül Karışımı Kum ile Mekanik Stabilizasyon Çimento, Kireç Çimento, Kireç Kireç	Mukavemeti arttırmak Stabiliteyi arttırmak İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak Kısa süreli mukavemet artışı İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak İşlenebilirliği ve kısa süreli mukavemeti arttırmak

4.2. Mekanik Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon, iki veya daha farklı zeminin belirli oranlarda karıştırılarak, istenen şartları sağlayan bir zeminin elde edilmesidir. Böylece yük altında kalıcı deformasyon yapmayan stabil bir zemin elde edilir. Zeminin karıştırılması, yolda, plentte, veya malzeme ocağında yapılabilir. Karışım yola serilerek klasik yöntemlerle sıkıştırılır. Mekanik sıkıştırımadaki amaç, gradasyonun düzeltilmesi, LL veya PI indeksinin azaltılması, dren kabiliyetinin artırılması, mukavemet ve durabilitenin artırılması, uzun dönemli oturmaların azaltılması ve don duyarlılığının azaltılmasıdır [4].

Zeminin gradasyonu ve plastisitesi, zemin özelliklerinin iyileştirilebilmesinde ve mekanik stabilizasyonun uygulanabilmesinde en önemli

hususlardır. Zemindeki maksimum dane boyutunun çok büyük olması işlenebilirliği azaltır. Kaba kısmının çok olması da segregasyona neden olmaktadır. Zemindeki ince malzemenin (genellikle No.40'dan geçen kısmı) fazla olması halinde, yüksek su muhtevalarında karışım güçleşmekte ve kuru halde topaklanmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle homojen karışımlar elde edilememektedir. Zeminde çok ince malzemenin (No.200'den geçen kısım) fazla olması halinde plastisite ve kohezyon artmaktadır. Problemlili zemine, bir başka zemin veya düşük plastisiteli bir malzeme karıştırılarak uygun zeminler elde edilebilir. Ancak ince kısmı fazla plastisiteli zeminler, özellikle kuru halde iken ufalanmalarının zor olması nedeniyle problem yaratmaktadır. Bu nedenle yolda yapılacak karışımlarda zemin ezilerek ufalanmalıdır. Mekanik karıştırmada, karışım oranları için belli bir yöntem yoktur. Değişik tipte zeminler, değişik oranlarda karıştırılmalı ve özelliklerini incelemek suretiyle karar verilmelidir.

4.3. Kimyasal Stabilizasyon

Zeminin olumsuz etkilerini gidererek, kaplamada oluşabilecek bozulmaları engellemek ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi mümkündür. Bu sayede kaplama kalınlığı azaltılabilir. Zemine çimento, kireç, uçucu kül, tabii puzolan, vb. maddeler katarak yapılan, zemin ıslahına, kimyasal stabilizasyon denmektedir. Kimyasal stabilizasyonda kullanılan başlıca malzemeler, kireç, çimento ve uçucu küldür [4].

4.3.1. Kireç stabilizasyonu

Kireç; orta, ince ve çok ince daneli zeminlerle reaksiyona girerek plastisitenin düşmesine, işlenebilirliğin artmasına, şişmenin azalmasına ve mukavemetin artmasına neden olmaktadır. Zemin sınıfı CH, CL, MH, ML, ML-CL, SC, SM-SC, SM, GC, GM-GC, GM olan ve şilt, kil içeren ince gradasyonlu zeminlerin, kireçle stabilize edilerek ıslah edilmeleri mümkündür. Yani kireç stabilizasyonu, killi zeminlere uygulanan bir metottür [29].

Kireç Stabilizasyonu, olumlu etkilerinden dolayı, özellikle karayolu projelerinde başarıyla kullanılmıştır. Kireç reaksiyonunu açıklayan kimyasal teoriler oldukça karmaşıktır. Ancak bu işlemde, katyon değişimi, kümeleşme-aglomeralaşma, kireç karbonasyonu ve puzolanik reaksiyonlar görülmektedir.

Tüm ince daneli zeminler; kireç kullanımı suretiyle daha düşük plastisiteye ve daha iyi işlenebilirliğe sahip olacak şekilde dönüştürülebilir. Kireçle işleme tabi tutulmuş zeminin dayanım karakteristikleri, esas itibarıyla zemin cinsine, kullanılan kirecin tipine, kireç yüzdesine ve kür koşullarına bağlıdır.

Zeminin pH derecesi, organik madde miktarı, drenaj koşulları ve su muhtevası gibi birçok faktör; zemin-kireç reaksiyonunu etkilemektedir. Bazı zeminlerde ($pH > 7$), kireç ile daha iyi reaksiyon elde edilmektedir. Organik karbon büyük oranda kireç-zemin reaksiyonunu yavaşlatmaktadır. Kötü dereceli zeminler, İyi derecelenmiş zeminlere göre daha yüksek kireç reaksiyonu vermektedir. Kalkerli zeminlerde ise, iyi reaksiyon elde edilmektedir. Sülfatlar ve bazı demir bileşikler, kireç reaksiyonunu engellemektedir. Özellikle zemin içinde jips bulunması ve bu alanlarda amonyum esaslı gübrelerin kullanılması, gereken kireç miktarını arttıracaktır. Bazı zeminlerde de puzolanik reaksiyonlar görülmektedir. Aşırı derecede ayrılmış ve iyi drenajlı zeminler; sıcak bölgelerdeki zayıf drenajlı zeminlerden daha az reaksiyon göstermektedir. Kötü drenajlı zeminler; koloidal durumda demir ihtiva eder ki; bu durumda puzolanik reaksiyon bozulur [27].

Şişen killerin stabilizasyonu için kullanılan değişik kireç tipleri bulunmaktadır. Bu kireçler arasında kalsiyum yönünden zengin sönmüş kireç ($Ca(OH)_2$) ve sönmemiş kireç (CaO) pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Şişen killerin stabilizasyonu için gereken kireç miktarının, ağırlıkça % 2-8 arasında değiştiği ifade edilmektedir [28]. Tablo 4.2.'de değişik zemin tipleri için zemin ağırlığının bir yüzdesi olarak önerilen yaklaşık kireç muhtevası verilmektedir [27].

Tablo 4.2. Değişik Zemin Tipleri İçin Yaklaşık Kireç Muhtevası [27]

Zemin Tipi	Kuru Ağırlığın Yüzdeleri Olarak Yaklaşık Kireç Miktarı (%)	
	Sönmüş Kireç	Sönmemiş Kireç
Killi Çakıl (GC, GM-GC)	2-4	2-3
Siltli Kil (CL)	5-10	3-8
Kil (CH)	3-8	3-6

Kullanılan kireç; kuru veya sulandırılmış şekilde olabilir. Kuru uygulama esnasında, hava kirliliği ve zemin içinde topaklanma gibi problemlerle karşılaşılabilir. Bu tip bir uygulamada, yeterince su verilmemesi gibi bir durumla karşılaşmak mümkündür. Zemin üzerine yayılan kireç; mekanik olarak bir disk karıştırıcı veya küçük bir ripper kullanılarak karıştırılır. Bu yöntemde, 30 cm'den daha derin bir karıştırma işleminin yapılabilme zorluğu vardır. Dünya'nın en büyük kireç stabilizasyonunun yapıldığı Dallas Fort Worth hava alanı projesinde, iki sergi halinde yaklaşık 45 cm kalınlığında stabilize edilmiş bir tabaka oluşturulmuştur [27].

4.3.2. Çimento stabilizasyonu

Çimento; genel olarak PI değeri 30'dan az olan zeminler ile No. 4 elekten (4.76 mm) geçen kısmı, %45 den fazla olan kaba gradasyonlu granüler zeminlerde etkili bir stabilizör olarak kullanılır.

Portland çimentosunun hidrasyonu, değişik bileşik ve jeller oluşturan karmaşık bir puzolanik reaksiyondur. Kil ile çimento karışımının sonuçları kireç-kil karışımı sonuçları ile benzerlik taşımaktadır. Bu uygulama ile likit limit, plastisite indisi ve zeminin hacim değişikliği potansiyeli azaltılır ve rötre limiti ile kayma dayanımı artırılır [28].

Ancak yüksek plastisiteli killer için Portland çimentosu kireç kadar etkili olamayabilir. Kireç ile iyileştirilemeyen zeminlerde, genellikle çimento kullanımı başarılı olmaktadır. Portland çimentosu stabilizasyonunun etkili olduğu killer için karıştırma işlemi, kireç uygulamasında olduğu gibi yapılır. Ancak bu teknikte

çimento ilavesi ile son karıştırma arasında geçen zaman, kireç işleminde dikkate alınan süreden daha kısa olmalıdır. Çünkü Portland çimentosu daha kısa hidrasyon ve priz süresine sahiptir. Çimento kullanımı ile ortaya çıkan dayanım artışından ötürü, döşeme ve kaplama dayanımında da önemli ölçüde artış olmaktadır. %2-6 arasında çimento muhtevası, zeminin yarı rijit bir kaplama gibi davranmasını sağlar. Ancak çimento ile stabilize edilen malzemenin çatlama eğilimi vardır ve kullanımdan önce bu etki dikkate alınmalıdır.

4.4. Bitüm stabilizasyonu

Bitümle stabilizasyonda, ince daneli zeminlerde suya dirençli bir yapı, kohezyonlu ve kumlu zeminlerde ise daneleler arasında, güçlü bağ kuvveti olan, stabil bir yapı elde edilir [4].

Kumlu zeminlerde bitümle stabilizasyon yapıldığında mukavemetli ve dayanıklı zeminler elde edilmektedir. Hatta bu tip stabilizasyona sahip zeminler, kaplamada ideal alttemel tabakası olarak da kullanılabilir. Böylece kaplama kalınlığında da azalma meydana gelmektedir. Bitümle stabilizasyon için her türlü kum kullanılabilir olmakla beraber, iyi derecelenmiş ve kil toprakları ile organik madde içermeyen kumlarda iyi sonuçlar alınmaktadır [4].

4.5. Zemin enjeksiyonu

Enjeksiyon ile stabilizasyon tekniği, zeminin kayma mukavemetini ve yoğunluğunu arttırmak için yapılır. Enjeksiyonla, zeminin geçirimsizliği de azaltılabilir [4]. Enjeksiyon, genellikle pahalı çözüm olduğundan, diğer stabilizasyon metotları ile ekonomik mukayesesi yapılarak karar verilmelidir.

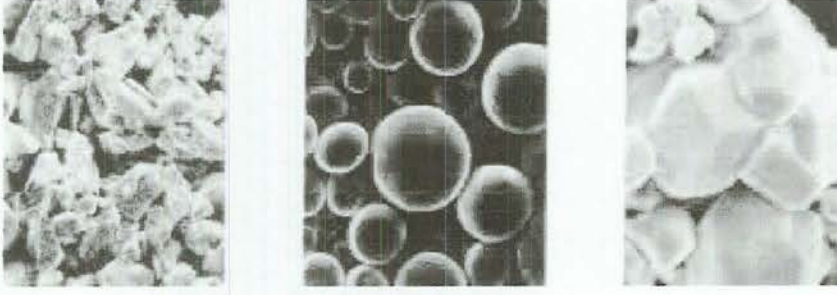
5. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER

5.1. Kalıp Kumu

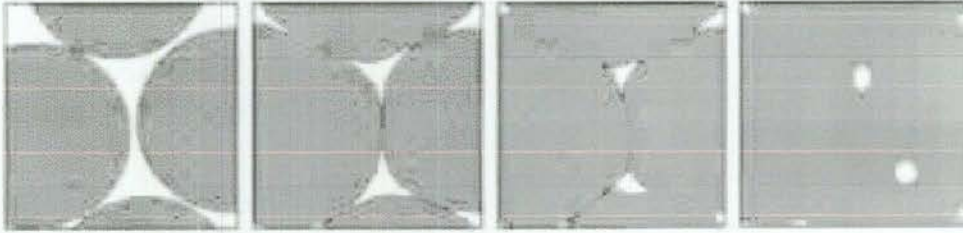
5.1.1. Tanım ve sınıflandırma

İçerisinde % 90'ın üzerinde SiO_2 , % 7-12 Kil (bentonit veya kaolinitik kil) ihtiva eden ve sinterleşme sıcaklığı 1500 °C 'nin üzerinde bulunan kumlar, **Kalıp Kumu** olarak tanımlanır [6].

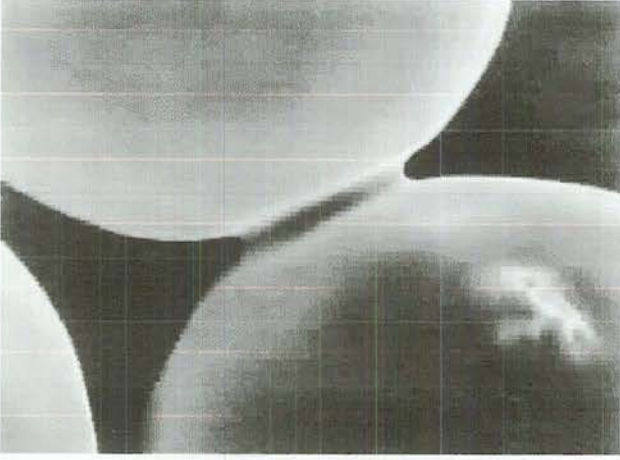
Sinterleşme, toz halindeki malzemenin erime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa, belli bir süre maruz bırakılarak tozların birbirine dokundukları noktalardan başlayarak kaynaşmasına denir (Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3).



Şekil 5.1. Tozların Erime Sıcaklığı Altında Birbiri İle Kaynaşması [35]



Şekil 5.2. Sinterleşmenin 4 Safhası [35]



Şekil 5.3. Sinterleşmenin ilk safhalarında bir toz [35]

Döküm sanayinde uzun süreden beri yapılan sinterleşme işleminde, önce kum, geçici malzeme ile karıştırılır sonra da sinter fırınlarda, yüksek sıcaklıklarda bekletilerek sinterleşme sağlanır. Sinterleşen kum rahatlıkla şekil alabilecek konuma getirilerek metal dökümde kullanılır (Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6)



Şekil 5.4. Kum Kalıplar İçerisinde Yapılan Metal Döküm



Şekil 5.5. Kalıpların Hazırlanması



Şekil 5.6. Sinterleşmiş Kalıba Konan Eriyik Halindeki Metal [13]

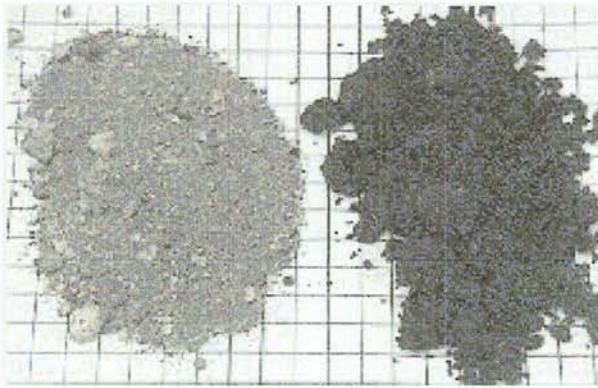
Kalıp kumlarını 2 tipte incelenebilir.

1. Yeşil Kum
2. Kimyasal Bağlayıcı Kum

Yeşil kumlarda bağlayıcı madde olarak kil kullanılır. Genellikle kalıp endüstrisinde kullanılan kum, yeşil kum olduğundan, kalıp kumu olarak adlandırılır. Yeşil kumlar, % 90-95 silika, % 7-12, kil, %2-10 diğer katkıları (kömür tozları) içerir. Doğal halde % 2-5 arası su muhtevasına sahiptir. Kumun kille kaplanmasıyla, kendini tutabilen yapıya sahip olur. Su eklenmesi plastisiteyi arttırmaktadır. Yeşil kumlar MgO, K₂O ve TiO₂ de içermektedir [6].

Kimyasal bağlayıcılı kum, %93-99 silika, %1-3 kimyasal bağlayıcı içerir. Silika-kum doğrudan kimyasallarla karıştırılarak reaksiyon başlatılır. Döküm endüstrisinde kullanılan, çeşitli kimyasal bağlayıcılar mevcuttur. En çok kullanılanlar phenolic-urethanes, epoxy-resins ve sodyum silikatlardır [6].

Kalıp kumları doğada serbest taneler halinde bulunurlar. Gevşek karakterli ve yuvarlak bir yapıya sahiptirler. Birkaç kullanımdan sonra aglomeralaşma oluşur. Bunlar kırıldığı zaman kalıp kumunun şekli daha açık ortaya çıkar. Yeşil kalıp kumları tipik olarak siyah renkli, kimyasal bağlayıcılı kumlar ise kirli beyaz renktedir (Şekil 5.7)



Şekil 5.7. Demir çelik endüstrisinde kullanılan kimyasal bağlayıcılı kum ve yeşil kalıp kumu [13]

Deneylerde, Bozüyük yakınlarındaki Toprak Demirdöküm fabrikasının atık olarak depoladığı kalıp kumu kullanılmıştır. Doğal kum Şile'den temin edilmektedir. Kalıp kumunun fiziksel özellikleri doğal kumun özellikleri ile hemen hemen aynıdır. Kalıp kumunun tane boyutu analizi ve diğer fiziksel özellikleri Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de verilmiştir. Tablo 5.3'de de kalıp kumunun

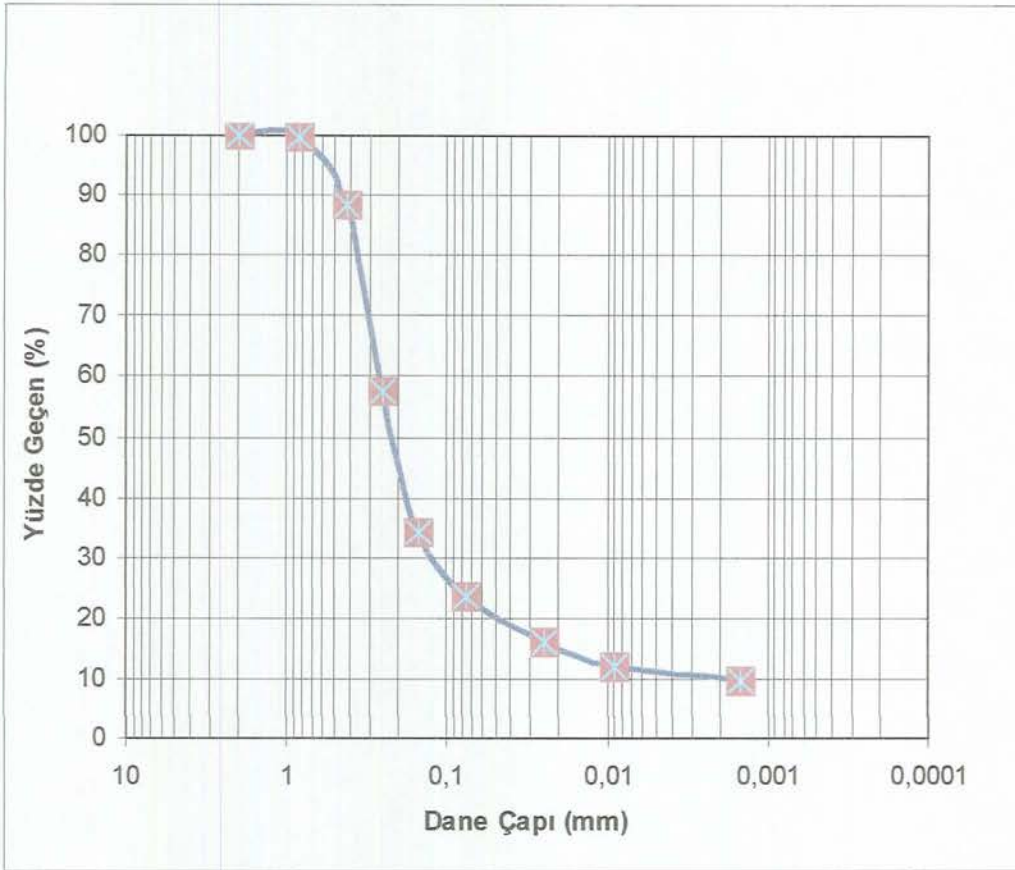
kimyasal bileşimi verilmiştir. Toprak Demir Döküm Fabrikası'ndan alınan atık kalıp kumu numunesinin granülometri eğrisi, Şekil 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Tane Boyutu Sınıflandırması [6]

A.B.D. Standard Elek No	mm	μm	\emptyset		
5	4.00		-2	İNCE ÇAKIL	Ç A K I L
6	3.86				
7	2.83				
8	2.38				
10	2.00		- 1.0	ÇOK İRİ KUM	K U M
12	1.68		- 0.75		
14	1.41		- 0.50		
16	1.19		- 0.25		
18	1.00		+ 0.25	İRİ KUM	
20	0.84		0.25		
25	0.71		0.50		
30	0.59		0.75		
35	0.50	500	1.00	ORTA BOY KUM	
40	0.42	420	1.25		
45	0.35	350	1.50		
50	0.30	300	1.75		
60	0.25	250	2.00	İNCE KUM	
70	0.210	210	2.25		
80	0.177	177	2.50		
100	0.149	149	2.75		
120	0.125	125	3.00	ÇOK İNCE KUM	
140	0.105	105	3.25		
170	0.088	88	3.50		
200	0.074	74	3.75		
230	0.0625	62.5	4.00	İRİ MİL	ÇAMUR
325	0.044	44	4.50		

Tablo 5.2 Kalıp Kumunun Bazı Fiziksel Özellikleri

Malzeme	Dane Özgül Ağırlık (kg/dm ³)	Doğal Su Muhtevası (%)	Elekten Geçen (%)				200 No.'lu Elek Altı (%)
			2 (mm)	0.425 (mm)	0.25 (mm)	0.075 (mm)	
Kalıp Kumu	2.50-2,80	3.25	100	88,52	57,44	23,68	4

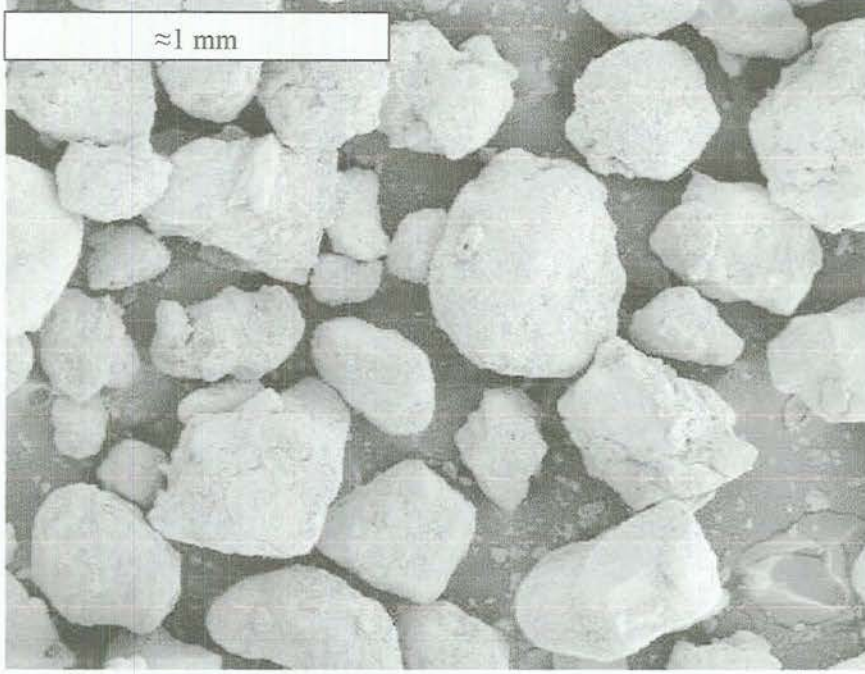


Şekil 5.8. Kalıp Kumunun Granulometri Analizi

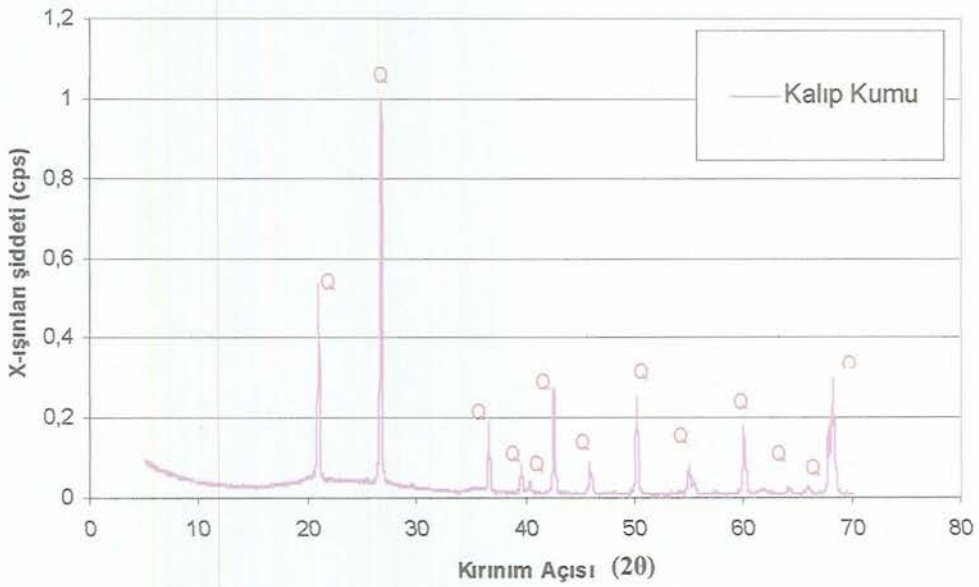
Tablo 5.3. Kalıp Kumunun Kimyasal Bileşimi

Malzeme	Kimyasal Bileşim (%) (XRF)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Atık Kalıp Kumu	98	0,8	0,25	0,035	0,023	0,04	0,03

Kalıp kumu danelerinin şekillerinin belirlenmesi amacıyla laboratuarda SEM fotoğrafı çekilmiştir (Şekil 5.9). Bunun dışında, kalıp kumunun kristalli bölümünün belirlenmesi amacıyla X ışını kırınımı analizi yapılmıştır. XRD sonuçları Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Kalıp Kumuna ait temsili SEM Fotoğrafı



Şekil 5.10. Kalıp Kumuna ait temsili XRD analizi (q:Kuvars)

5.1.2.Kullanım özellikleri

Kalıp kumlarının akıcılık, sıkıştırılabilirlik ve dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi, kalıplama prosesinin otomatikleştirilmesine olanak sağladığı gibi, dökülen parçaların şekil, boyut ve yüzey tamlığının da artmasına imkan verir. Kalıp kumlarında belirtilen özelliklerin yükseltilebilmesi ise, başlıca iki faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden birincisi, kalıp kumu bileşenleri, bileşenlerin oranları ve homojen dağılımı; ikincisi ise, kalıp kumunun sıcaklığıdır. Sıcak kalıp kumu, yapısal özellikler üzerine etkisi yanında, kum hazırlamada, silolamada ve kalıplamada önemli işlem zorluklarına da neden olur. Döküm yöntemi ile şekillendirmede imal edilen parçaların mekanik ve boyutsal açıdan kalitesi birinci derecede dökümün yapıldığı kalıba ve onun hazırlandığı kalıp malzemelerine bağlıdır. Kalıp malzemesi olarak ekonomik ve teknolojik avantajları yönünden kil bağlayıcılı kum kalıp malzemesi, en fazla kullanılan kalıp malzemesidir. Kil bağlayıcılı kalıp malzemelerinin, kısaca kalıp kumlarının, ana bileşenlerini bildiği gibi kum, kil ve su (nem) oluşturur. Bu bileşenlerin kalitesini ve katılım oranları kalıp kumlarının dayanım, akıcılık, sıkıştırılabilirlik gibi temel özellikleri belirler. Makine ile kalıplamada bu özelliklerin belirli bir değerin üzerinde olması gerekir. Dayanım akıcılık, sıkıştırılabilirlik gibi bu temel özellikler üzerine sıcaklığın çok olumsuz etkisi vardır. Kumun sıcaklığı yükseldikçe bu özellikler kötüleşir. Döküm esnasında kalıp ve maça, sıvı metalin termik etkisi altındadır. Kalıbın sıvı metalle temas eden iç yüzleri belirli derinliğe kadar ısınır. Kumun ısı iletimi zayıf olduğundan demir ve çelik dökümünde yüzey tabakalarının sıcaklığı 500°C 'yi aşar. Kalıplar açıldığında açığa çıkan kumun ortalama sıcaklığı oldukça yüksektir. Böyle bir sıcak kum ise yukarıda söz konusu olumsuz etkileri yanında çok yönlü teknolojik sorunlara da neden olur. Bu nedenle yeniden kullanılması güçleşir. Kullanılmayan atık kalıp kumları çöp deponi alanlarında depolanmaktadır. Bu yüzden atık depolama sahası arazide oldukça büyük bir yer kaplamaktadır. Araştırmacılar atık kalıp kumunun, çeşitli sahalarda yeniden değerlendirilmesi açısından çalışmalar yapmaktadır.

5.1.3. Dünyada mevcut durum

5.1.3.1. Tüketim

Başlıca demir-çelik endüstrisi ile alüminyum ve bakır ağırlıklı alaşımların imalinde kullanılır. Dünya genelindeki kalıp kumu tüketimi Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Dünyadaki kalıp kumu tüketimi [6]

Ülke	Tüketim (bin ton/yıl)
Rusya	10.800
A.B.D.	6.032
Çin	53.5
Almanya	2.745
Fransa	1.428
İtalya	1.245
Brezilya	871
Çekoslovakya	860
İngiltere	853
Kore	837
Polonya	755
Romanya	609
Tayvan	561
Meksika	508
İspanya	501
Kanada	300
Türkiye	320
Avusturya	151
Belçika	146

5.1.3.2. Üretim

Kalıp Kumu üretimi yapan başlıca ülkeler Rusya, A.B.D, Çin ve Almanya olarak sıralanabilir. Bu ülkelerde genellikle açık işletme metodu ile üretim yapılmaktadır. Entegre Kalıp Kumu Hazırlama Tesislerinde araştırmaya yönelik ileri teknoloji uygulanmaktadır [6].

5.1.4. Türkiye’de durum

5.1.4.1. Ürünün Türkiye’de bulunuş şekilleri

Çökel kayaların ayrışmasıyla serbest hale gelen kuvars taneleri akarsularla taşınması esnasında bir miktar kil ile birlikte karasal havzalarda çökelmişlerdir. Şile yöresi, kuvars kumu yataklanmaları bakımından çok zengin olup, Türkiye'nin en önemli maden havzalarından birisidir. Bu yöreden üretilen kuvars kumları Türkiye kalıp kumu tüketiminin tamamını karşılamaktadır. Üst Kratese yaşlı volkanik ve volkanik katkılı flişler üzerine gelen OligoMiyosen birimlerinin en üst seviyelerini teşkil eden bu birim havzada yaygın ve hakim durumdadır. Bu birimin (kuvars kumları) altında bulunan kil ve maden kömürü seviyeleri havzanın iç kesimlerinde görülmektedir [6].

5.1.4.2. Rezervler

İstanbul ili, Şile yöresinde büyük bir yayılım gösteren kalıp kumu rezervleri aşağıda verilmiştir :

Görünür Rezerv	: 55.000.000 Ton
Muhtemel Rezerv	: 23.000.000 Ton olmak üzere
Toplam	: 78.000.000 Ton'dur.

Bu döküm kumu rezervleri sırasıyla; Siltaş Silis Kumları San. ve Tic. A.Ş., Cam-İş Madencilik A.Ş., Kumsan A.Ş., Çelikaş A.Ş. ve şahıslara ait sahalarda bulunmaktadır [6].

5.1.4.3. Tüketim

Başlıca Demir-Çelik Döküm Sanayi ve bazı metalürji kollarında büyük miktarlarda kalıp kumu tüketilmektedir. Ayrıca Gemi Sanayi’nde raspa kumu ve sanayi atık sularının filtrasyonunda filtre kumu olarak da kullanılmaktadır. Demir ve Çelik Döküm Sanayi’nde üretimi gerçekleştirilen döküm mamulleri, kalıplama ve döküm proseslerine göre, üretim yöntemleri bazında çeşitli sınıflamalara

sahipse de; kimyasal pozisyon, mikro yapı ve fiziki görünümü bazında yapılan sınıflama daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Buna göre de;

a- Pik Döküm b- Sfero Döküm c- Temper Döküm d- Çelik Döküm olarak dört gruba ayrılmaktadır.

Döküm sektöründe üretilen döküm mamullerinin kullanıcı sektörlerine göre ürün tanımları Tablo 5.5. 'te gösterilmiştir.

Türkiye'nin Kalıp Kumu Tüketimi 320.000 ton/yıl'dır. Bu tüketimin sektörlerle göre dağılımı şöyledir.

a) Demir ve Çelik Döküm Sanayi : 300.000 Ton/Yıl

b) Diğer Sanayi Kuruluşları : 20.000 Ton/Yıl

(Raspa Kumu, Filtre Kumu vb).

Tablo 5.5. Döküm Yoluyla Üretilen Mamullerin Sınıflandırılması [6]

Kullanıcı Sektör	Mal Tanımları
Otomotiv Sanayi	Otomobil, Traktör, Kamyon, Otobüs, Çekici, Minibüs, Treyler üretiminde kullanılan döküm parçalar
İnşaat Sanayi	Fittings, Radyatör, Kazan, Küvet, Soba, Kanalizasyon ızgarası v.s.
Makine İmalat Sanayi	İş Makineleri, Takım Tezgahları, Tarım alet ve makineleri, Çimento, Tuğla ve Refrakter İmalat Sanayi, Kaldırma Makineleri, Pompa, Vana, Kimya Sanayi Parçaları, Dişli ve Makaralar, Kompresörler v.s.
Çelik Sanayi	İngot Kalıbı, Merdane Taban Plakaları v.s.
Basınçlı Döküm Boru	Pik ve Sfero Döküm Boruları
Diğer	Enerji Nakil Sanayi, Dayanıklı Tüketim Malları Sanayi, El Aletleri, Elektrik Motorları, Cam Kalıpları

5.1.4.4. Üretim

Kalıp Kumu üretimi açık işletme metodu ile yapılmaktadır. Üretim yapılacak alanda 20-30 m. eninde ve 50-100 m. boyunda panolar seçilmekte olup, ilk önce 2-4 m kalınlığındaki örtü tabakası paletli kepçe veya hidrolik

ekskavatörlerle, altında kalıp kumu bulunmayan veya önceden kalıp kumu alınmış, pano boşluğuna itilerek dökülmektedir [6].

Doğadan alınan kalıp kumları, damperli kamyonlara yüklenerek Entegre Kalıp Kumu Hazırlama Tesislerine nakledilir. İstanbul yakınlarındaki Şile yöresinde 2 tesis bulunmaktadır. Bunlardan birincisi 1973 yılında kurulmuş olan ve Türkiye kalıp kumu üretiminin %53 'ünü karşılayan Siltaş Silis Kumları San. ve Tic. A.Ş. 'ye ait tesistir. Diğeri ise, yine aynı şirkete ait, 1986'da kurulan Entegre Kalıp Kumu Hazırlama tesisidir. Türkiye Kalıp kumu tüketiminin % 19 'unu karşılayan Kumsan A.Ş.'ye ait işletme tesisi 1988 yılında, % 16'sını karşılayan Çelikleş A.Ş.'ye ait diğeri bir işletme tesisi de 1985 yılında faaliyete geçmiştir. Sektörde üretim yapan kurullardan bazıları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Sektörde Üretim Yapan Önemli Kuruluşlar [6]

Kuruluş	Üretimdeki Payı (%)
Siltaş Silis Kumları A.Ş.	53
Kumsan A.Ş.	19
Çelikleş A.Ş.	16
Diğerleri	12

Tablo 5.7. Döküm Sanayinin Sektörel Dağılımı [6]

ÜRETİM CİNSİ	ÖZEL SEKTÖR	KAMU SEKTÖRÜ	TOPLAM KURULUŞ
Pik Döküm	70	10	80
Çelik Döküm	49	2	51
Sfero Döküm	59	1	60
Temper Döküm	7	--	7
T O P L A M	185	13	198

Siltaş A.Ş.'ye ait İşletme Tesisleri; Alman teknolojisi ile dizayn edilmiş olup, ocaktan üretilerek bu işletme tesislerine verilen kalıp kumları, ilk önce lastik tekerlekli kepçe ile siloya beslenmektedir (Şekil 5.11, Şekil 5.12). Tromel elekte su ile karışımı sağlandıktan sonra pompalar vasıtasıyla siklonlardan geçirilerek

karıştırıcılara verilmekte, daha sonra yıkama, yüzdürme ve tasnif ünitelerine gelmekte ve buradan hava emişli filtre ünitelerinde rutubet % 7 seviyelerine indirilerek, mamul kum silolarına aktarılmakta ve daha sonra da kantar üzerinde beklemekte olan araçlara yüklenmektedir.

İstanbul İli, Şile yöresinde büyük bir yataklanma gösteren döküm kumlarının gerek jeolojik yapıları ve gerekse işletme tesislerinde uygulanan ileri teknoloji nedeniyle Demir ve Çelik Döküm Sanayi Kuruluşlarının taleplerine uygun ürün niteliğinde üretimi sağlanmaktadır [6].



Şekil 5.11. Kum Siloları



Şekil 5.12. Silolara malzeme takviyesi

Coğrafi dağılım itibariyle özel kesime ait fabrikaların büyük kısmı İstanbul, Kocaeli, Bursa, İzmir ve Ankara yörelerinde bulunmaktadır. Küçük aile işletmeleri başta İstanbul, Bursa, Eskişehir ve Ankara olmak üzere tüm illerimize dağılmış bulunmaktadır.

Kamu kesimi kuruluşları ise; Türkiye Demir ve Çelik İşletmeleri, D.D.Y, T.Z.D.K, Türkiye Çimento ve Toprak Sanayi, MKE Kurumu, T.K.İ., Denizcilik Bankası, T. Şeker Şirketi ve Askeri Kuruluşlar bünyesinde yer almakta olup, ülkenin her yanına dağılmış durumdadır [6].

Ülkemizde Kalıp kumu kullanan imalatçılardan bazıları aşağıdadır.

İstanbul	: Döktaş, Emaş, Akmetal, Silvan Sanayi, Yakacık Makine, Sinmak, Hisar Çelik, Ferro Döküm, Auer, Asilçelik, Haymak
Kocaeli	: Gölcük Tersanesi, Anadolu Döküm, Mannesman
Bursa	: Burçelik, T.Demir Döküm.
İzmir	: Ak Döküm, Cevher Döküm, Pınar Döküm, B.M.C.
Eskişehir	: Şeker San.Fab. D.D.Y Makine Fab. Entil
Konya	: İlarıslan, Özdemirler Çelik Döküm
Kayseri	: Taksan Takım Tezgahları
Ankara	: Türk Traktör, Döksan, Ertunç, T.Demir ve Çelik Fab. Yazar Pompa.

İstanbul İli, Şile yöresinde bulunan ve Türkiye Döküm kumu tüketiminin tamamına yakınına karşılamanı dört adet işletme tesisinin döküm kumu üretim kapasiteleri Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8. Türkiye Kalıp Kumu Üretim Kapasitesi [6]

KURULUŞUN ADI	TESİS ADEDİ	YILLIK ÜRETİM	KAPASİTE KULLANIM ORANI
Siltaş A.Ş.	2	170.000 Ton	% 60
Kumsan A.Ş.	1	60.000 Ton	% 70
Çeliktaş A.Ş.	1	50.000 Ton	% 70
Diğerleri	--	40.000 Ton	

Demir ve Çelik Döküm Sanayi’nde kurulu kapasite durumu ise Tablo 5.9’da gösterilmiştir

Tablo 5.9. Döküm Sanayinde Kurulu Kapasite Kurumu [6]

NO	ANA MAL	KAPASİTE BİRİMİ	MİKTAR
1	Pik Döküm	Ton/Yıl (Net Mamul)	702.000
2	Çelik Döküm	Ton/Yıl (Net Mamul)	70.000
3	Sfero Döküm	Ton/Yıl (Net Mamul)	74.000
4	Temper Döküm	Ton/Yıl (Net Mamul)	13.000
			859.000

Tabloda belirtilen net mamul kapasite değerlerini elde edebilmek için üretilmesi gereken sıvı metal kapasite miktarları ;

Pik Döküm için $702.000 : 0,70 = 1.002.860$ Ton/Yıl

Çelik Döküm için $70.000 : 0,52 = 134.165$ Ton/Yıl

Sfero Döküm için $74.000 : 0,60 = 123.333$ Ton/Yıl

Temper Döküm için $13.000 : 0,60 = 21.670$ Ton/Yıl

T O P L A M = 1.282.028 Ton/Yıl'dır.

Sektörün yıllara göre kapasite kullanım oranları ve Türkiyedeki yıllık kalıp kumu üretim miktarları Tablo 5.10 ve Tablo 5.11’da gösterilmiştir.

Tablo 5.10. Döküm sektörünün yıllara göre kapasite kullanım oranları [6]

1988	1989	1990	1991	1992	1993
%81	%79	%79	%81	%81	%81

Tablo 5.11. Türkiye Kalıp Kumu Üretim Miktarları [6]

Üretim Cinsi	Yıllar (Bin ton)				
	1988	1989	1990	1991	1992
Kalıp Kumu	267	280	288	292	300

5.2. Kireç

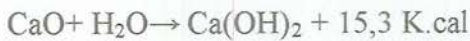
Kireç su ile karıştırıldığında, başlangıçta plastik sonra gittikçe taş halinde sertleşen anorganik bir bileşiktir. Kireç üretiminde hammadde olarak kalker (CaCO_3) ve dolomit ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) kullanılır. 900°C 'de ve bir atmosferlik basınç altında ısıtıldığında saf CaCO_3 bütün karbondioksitini verir.



Fakat kalkerin (kireç taşının) ısı iletmesi kötü olduğundan, ısının taş parçalarının içerisine kadar tesir etmesi için sıcaklığı $1000-1100^\circ\text{C}$ 'de tutmak icap eder. Sıcaklık 1100°C 'nin üstünde tutulduğunda kireç taşlarının sathında erimeler görülür. Magnezyum karbonatta takriben 550°C 'de dağılma olur. Fazla ısıda elde edilen dolomitik kireçlere aşırı yanmış dolomitik kireç denir.

Sınırlandırılmış, bilimsel anlamda 'kireç' kalsiyum oksitten (CaO) ibarettir. Fakat kelime, nadiren bu dar anlamda kullanılır. Geçiş anlamıyla kalsiyum oksit ve aynı zamanda kalsiyum oksit türevlerini de kapsar. Teorik olarak saf kirecin özellikleri Tablo 5.12'de verilmiştir.

Kalkerin (kireç taşının) yakılmasından elde edilen kireçlere kalsitik kireç, kireç taşı ve magnezyum karbonatın ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) yakılmasından elde edilen kirece dolomitik ($\text{CaO} + \text{MgO}$) kireç denir. Fazla ısı etkisi altında yakılan dolomitik kireçler aşırı yanmış kireçler olup, kolay kolay su ile reaksiyona girmezler. Bağlayıcı veya yapı malzemesi olarak fazla değeri yoktur. Sönmüş kireçler su ile reaksiyona girerek kalsiyum hidroksiti Ca(OH)_2 meydana getirirler.



Kireç taşından elde edilen:

CaO: Sönmemiş kalsitik kireç,

Ca(OH)₂: Sönmüş kalsitik kireç,

Genel olarak, kireç ile stabilizasyon sonunda ağır metal gibi zararlı madde miktarında azalma olur. Ortamdaki sıvı miktarını azaltır ve böylece kil tanesi etrafındaki dağınık çift tabakanın kalınlığını azaltır. Karışımın serbest basınç mukavemetini ve donma çözülmeye karşı mukavemetini artırır. Ancak zemin cinsine bağlı olarak değişen belirli bir kireç miktarından sonra mukavemet artışı olmaz. pH değerini yükselterek mikroorganizmaların gelişimini engeller. Permeabiliteyi düşürür. Sızıntı suyu temizdir. Şişme potansiyeline sahip zeminlere ilavesi ile likit limiti ve plastisiteyi düşürdüğünden, şişme miktarını azaltır.

Tablo 5.12. Teorik olarak saf kireçlerin özellikleri [29]

Kimyasal Adı	Sönmemiş Kireç		Sönmüş Kireç	
	CaO	MgO	Ca(OH) ₂	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 K.cal	-	2,79 Cal	0,0 cal
Molekül Ağırlığı	56,09	40,32	74,10	58,34
Yoğunluğu	3,40	3,60	2,34	2,40

Deneylerde, Afyon Kireç Fabrikasından alınan sönmüş kireç kullanılmıştır. Kullanılan kirecin kimyasal bileşimi Tablo 5.13'de verilmiştir.

Tablo 5.13. Kullanılan Kirecin Kimyasal Bileşimi

Malzeme	Kimyasal Bileşim (%) (XRF)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Kireç	2,32	0,37	0,25	63,88	4	0,06	-

5.3. Çimento

Çimento; başlıca silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri ihtiva eden hammaddelerin teknolojik metotlarla sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen yarı mamul madde klinkerin, tek veya daha fazla cins katkı maddesi ile öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

Portland çimentoları, önce uygun miktarlarda kireç (CaO), silis (SiO₂), alümin (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) içeren hammaddelerle belirli oranlarda karıştırılarak fırınlarda 1450 °C–1650 °C'ye kadar pişirilirler. Fırından çıkan gri renkteki pürüzlü ve gözenekli yüzeye sahip 1 - 25 mm. çapındaki malzemeye "klinker" denir. Klinker soğutulur daha sonra öğütülür. Öğütme işlemi sırasında çimentonun priz sürelerini ayarlamak için klinkere % 3 - % 5 oranlarında alçı taşı (CaSO₄ .2H₂O) ilave edilir. Sonuçta ortaya çıkan malzeme bağlayıcılık özelliğini kazanmış olan Portland Çimentosudur. Eğer öğütme işlemi sırasında Portland çimentosu klinkeri ve alçı taşına belli miktardaki katkı maddeleri (puzolanik katkılar) eklenirse farklı tiplerdeki katkı çimentolar elde edilir.

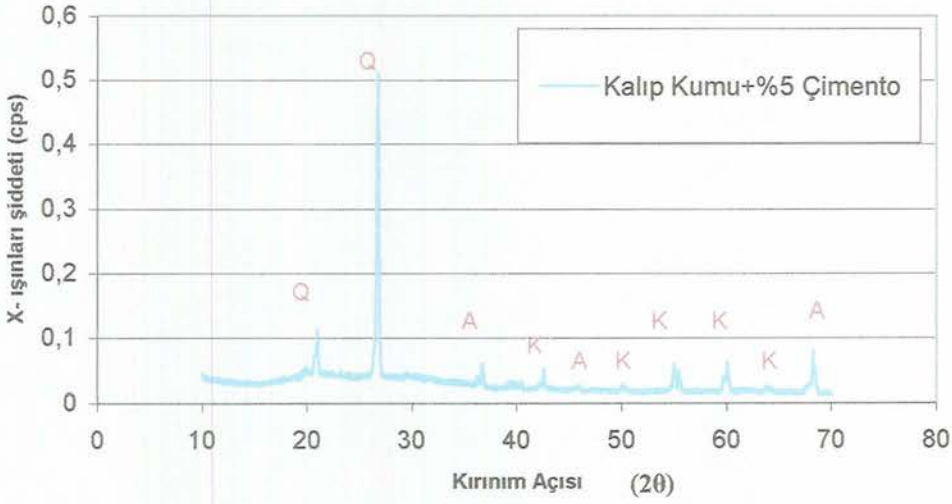
Çimento ve suyun birleşerek kimyasal reaksiyonların oluşmasına hidrasyon denir. Kalsiyum silikatlar (C₂A ve C₃A) ve su (H₂O) reaksiyona girerek (2C₃S+6H→C₂S₂H₃+3CH) ve (2C₂S+4H→C₂S₂H₃+CH) gibi kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) veya kristal yapılı kalsiyum hidroksit (CH) oluşur. Çimentoya sertlik kazandıran esas husus olan, bu C-S-H 'ların moleküler büyüklükte ve çimento taneciklerinden yaklaşık 1000 defa daha küçük olmasıdır. Bu kalsiyum hidrat jeline tobermorit adı verilir. Klinkere alçıtaşı ilave edildiğinde kalsiyum alüminat (C₃A) bileşeni, alçı ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfö alüminatlar (C-S-A) oluşur. Bu kalsiyum sülfö alüminatlar ise kalsiyum alüminatların (C₃A) reaksiyon hızını yavaşlatır.

Deneylerde kullanılan portland çimentosunun kimyasal bileşimi Tablo 5.14'te verilmiştir.

Tablo 5.14. Kullanılan Çimentonun Kimyasal Bileşimi

Çimento Cinsi	Kimyasal Bileşim (%) (XRF)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
PKÇ 32.5	20,35	5,19	3,35	64,56	1,52

Kullanılan çimentonun, kristal yapısının belirlenmesi amacıyla X ışını kırınımı analizi yapılmıştır. Analiz sonucu, Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Deneylerde Kullanılan Çimentoya ait temsili XRD analizi (K: Kalsiyum Silikat A: Alüminyum Oksit Q: Kuvars)

5.4. Agregalar

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerin genel adı agregadır. Beton içinde hacimsel olarak %60-75 civarında yer işgal eden agregalar önemli bir bileşendir. Agregalar tane boyutlarına göre ince (kum, kırma kum.. gibi) ve kaba (çakıl kırmataş... gibi) agregalar olarak ikiye ayrılır.

Agregalarda aranan en önemli özellikler şunlardır:

- Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları,
- Zayıf taneler içermemeleri (deniz kabuğu, odun, kömür... gibi)

- Basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları,
- Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri,
- Yassı ve uzun taneler içermemeleri,
- Çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir.

Agreganın kirli (kil, silt, mil, toz,...) olması, aderansı olumsuz etkilemekte, ayrıca bu küçük taneler su ihtiyacını da arttırmaktadır. Beton agregalarında elek analizi, yassılık, özgül ağırlık ve su emme gibi deneyler uygun aralıklarla yapılarak kalite sürekliliği takip edilmelidir. Kullanılacak agregalar TS 706'ya uygun olmalıdır [1].

Agregaların, tane büyüklüğüne göre sınıflandırılması Tablo 5.15'te yapılmıştır.

Tablo 5.15. Agregatıpleri

Agregatıpleri	Tane Boyutu (mm)
1 No.'lu agregatıpleri (1. No.)	8-10
2 No.'lu agregatıpleri (2 No.)	16-20
3 No.'lu agregatıpleri (3 No.)	25-32

Deneylerde 1, 2 ve 3 No.'lu agregatıpleri kullanılmıştır. Agregatıpleri Kutludağ Madencilik Őirketinin Seyitgazi Yolu üzerindeki Kırmataş Tesislerinden alınmıştır.

6. LABORATUAR DENEYLERİ

6.1. İndeks Deneyleleri

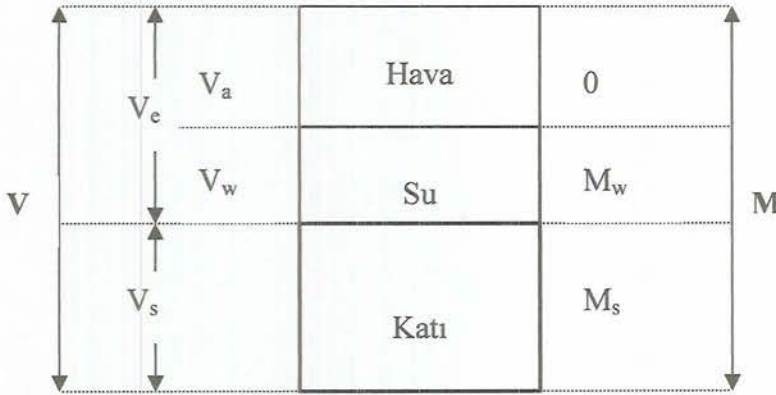
6.1.1. Su muhtevası

Bir zeminin su muhtevası, içerdığı suyun, dane kitlesine oranı olarak tarif edilmektedir. Numunenin doğal durumunda, 105 °C etüvde 24 saat kurutulduktan sonra yapılan ölçümlerden, su miktarının kuru dane ağırlığına oranı olarak, yüzde (%) cinsinden ifade edilir. Laboratuarda su muhtevası deneyi, ASTM D 2216-80 (1985) metoduna göre yapılmıştır.

6.1.2. Özgül ağırlık

Kum ve siltlerin büyük bir bölümü kuvarstan oluşmaktadır. Jips ve mika gibi parçalar oldukça küçük bir bölümünü oluştururlar. Killer ise, kil minerallerinden meydana gelir. Diğer mineraller, bu boyuta küçülmediklerinden, saf killerde kuvars düşük oranda bulunmaktadır.

Şekil 6.1 'de katılar olarak gösterilen bölüm, zemin iskeletini oluşturan danelerin net toplam kütle hacmidir. Mineral içeriği farklı olduğundan, bu değerler değişebilir. Minerallerin 20 °C sıcaklıkta 1 cm³ hacme karşılık gelen net kütlelerine dane birim hacim ağırlığı (γ_s) denmektedir.



Şekil 6.1. İki Boyutlu Blok Diyagram

Özgül ağırlık (G_s), dane birim hacim ağırlığının, suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak tarif edilir ve boyutsuzdur. Özgül ağırlık deneyi ASTM D-854-83 (1985) standardına göre belirlenir.

6.1.3. Dane çapı dağılımı

Bir malzemenin dane boyutu dağılımı, elek analizi ve hidrometre deneyleri ile saptanır. Elek analizi ile, 0,075 mm'den daha büyük danelerin dane boyutu dağılımı bulunur. 0,075 mm 'den daha küçük danelerin dane boyutu dağılımı ise, hidrometre metoduyla saptanır. Laboratuarda yapılan dane boyutu analizi, ASTM D422-63 (1972) standardına uygundur.

Kalıp kumu atıklarının dane çapı dağılımı, atıkların iyileştirme tekniklerinin seçimini etkilemektedir. Bunun dışında iyileştirme sonrası yeniden kullanılabilirlik alternatiflerinin belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır. İyi derecelenmiş granülometri eğrisine sahip zeminler yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaktadır. İnce dane yapısına sahip zeminler ise, genellikle iyi işlenebilme özelliklerine sahiptir. Bu tür zeminlerde, kimyasal stabilizasyon iyi netice verir. Ancak ince dane yapısı nedeniyle, düşük mukavemet gibi bazı problemler oluştururlar [30].

6.1.4. Atterberg kıvam limitleri

Killer ve kil içeren kuru karışımlar, suyla yoğrulduklarında toz görünümünden çamura, su miktarı daha da artırılırsa, sıvıya dönüşürler. Bu özellik değişimine kıvam denmektedir. Bu kıvamların su muhtevası limitlerini belirlemek amacıyla kıvam limiti deneyleri yapılır. Atterberg limitleri malzemenin plastiklik ve likitlik kıvamları arasındaki su muhtevalarını belirleyen deneylerdir. Kıvam limitleri, ince daneli malzeme içeriğinin sınıflandırılmasında, mukavemet ve şişme karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır. Laboratuarda yapılan likit ve plastik limit deneyleri için ASTM D-4318-84 standardı uygulanmıştır.

6.2. Mekanik Özellikleri Belirleyen Deneyler

6.2.1. Kompaksiyon deneyleri

Kompaksiyon deneyi, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının bulunması için yapılan deneydir.

6.2.1.1. Standart Proktor deneyi

Kompaksiyon silindiri, sert bir yüzey (beton döşeme, çelik plaka gibi) üzerine yerleştirilir. Zemin numunesi, birbirine eşit olacak üç tabaka halinde kompaksiyon silindirinin içine serilerek, her bir tabaka 2,5 kg ağırlığındaki tokmağın 30,5 cm yükseklikten serbest düşüşü ile yatayda homojen olarak dağıtılan 25 vuruş (15,24 cm çaplı silindir kullanılması halinde 56 vuruş) ile sıkıştırılır. En üstteki tabaka serilmeden önce silindirik kabın yakası takılır. Son tabaka da sıkıştırıldıktan sonra, yaka çıkarılır. Sıkıştırılmış haldeki son tabakanın, silindirik kaptan yukarıya taşan kısmı, 0,5-1,0 cm arasında olmalıdır. Bu fazlalık kısım bıçak ve spatula kullanılarak kesilip temizlenir. Standart proktor deneyi, ASTM D698-78 (1985) standardına uygun olarak yapılmıştır.

6.2.1.2 Modifiye Proktor deneyi

Kompaksiyon silindiri sert bir yüzey üzerine (beton döşeme, çelik plaka gibi) yerleştirilir. Zemin numunesi birbirine eşit olacak üç tabaka halinde kompaksiyon silindirinin içine serilerek, her bir tabaka 4,5 kg ağırlığındaki tokmağın 45,7 cm yükseklikten serbest düşüşü ile yatayda homojen olarak dağıtılan 25 vuruş (15,24 cm çaplı silindir kullanılması halinde 56 vuruş) ile sıkıştırılır. En üstteki tabaka serilmeden önce silindirik kabın yakası takılır. Son tabaka da sıkıştırıldıktan sonra yaka çıkartılır. Sıkıştırılmış haldeki son tabakanın silindirik kaptan yukarıya taşan kısmı 0,5-1,0 cm arasında olmalıdır. Bu fazlalık kısım bıçak ve spatula kullanılarak kesilip temizlenir.

Tokmağın düşey olarak tutulmasına özen gösterilmelidir. Tokmakla yapılan vuruşlar seri olarak yapılmalı ve 25 vuruş yaklaşık olarak 35 sn 'de tamamlanmalıdır. Tokmak, düşüşleri sırasında kılavuz borusunun üstüne kadar çekilip serbest düşmeye bırakılmalı el ile bir başlangıç hızı verilmemelidir. Ya da el bırakılmayarak hareket hızı engellenmemelidir. Ayrıca düşüşler sırasında tokmak kılavuz borusunun çevresine sürtünmemelidir. Modifiye proktor deneyi, ASTM D1557-78 (1985) standardına uygun olarak yapılmıştır.

6.2.2. Serbest Basınç deneyi

Serbest basınç deneyinde, silindir numune üzerine sadece düşey yönde yük uygulanmaktadır (Şekil 6.2, Şekil 6.3). Numune kırılıncaya kadar basınçla yüklenir. Kırılma esnasında yanal şişme ve kayma meydana gelir. Serbest basınç deneyi, desteksiz olarak kendini tutabilen zeminlerde uygulandığından dolayı killi zeminler için uygundur. Deneyde hızlı yükleme ile drenajsız kayma mukavemeti de bulunabilir. Bu kısıtlayıcı yönüne karşın, serbest basınç deneyi drenajsız kayma mukavemetini belirlemede yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemidir.



Şekil 6.2 Serbest Basınç Deneyi

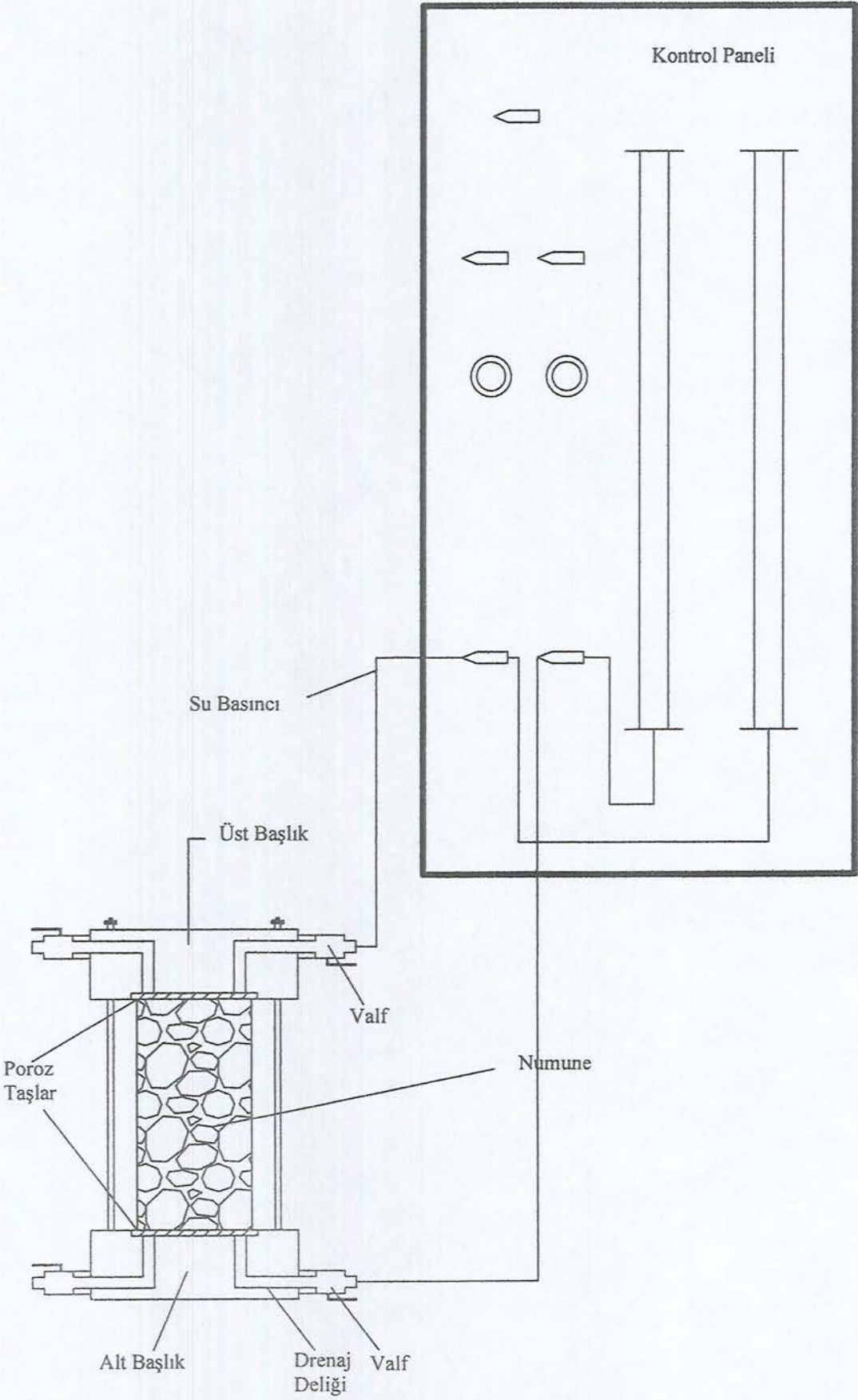
İlave malzemelerle karıştırılarak sıkıştırılmış kalıp kumu numunelerinin serbest basınç direnci; su muhtevası, boşluk suyunun kimyasal bileşenleri ve içsel kuvvetlerin bir fonksiyonudur. Stabilize karışımın dayanımı için serbest basınç direnci önemli bir göstergedir. Kalıp kumu – çimento karışımının kalitesi, serbest basınç mukavemet değeri ile yorumlanabilir. Atık malzemelerin yol alt yapısı olarak kullanılabilmesi için serbest basınç değerleri fikir verici niteliktedir. Kür edilmiş atık kalıp kumu-çimento karışımının mukavemet değerleri stabilize karışımın kalitesini yansıtır. Laboratuarda serbest basınç deneyi ASTM D2166-66 (1979) standardına uygun olarak yapılmıştır [33].



Şekil 6.3. Kalıp Kumu Numunesi Üzerinde Serbest Basınç Deneyi

6.2.3. Permeabilite deneyi

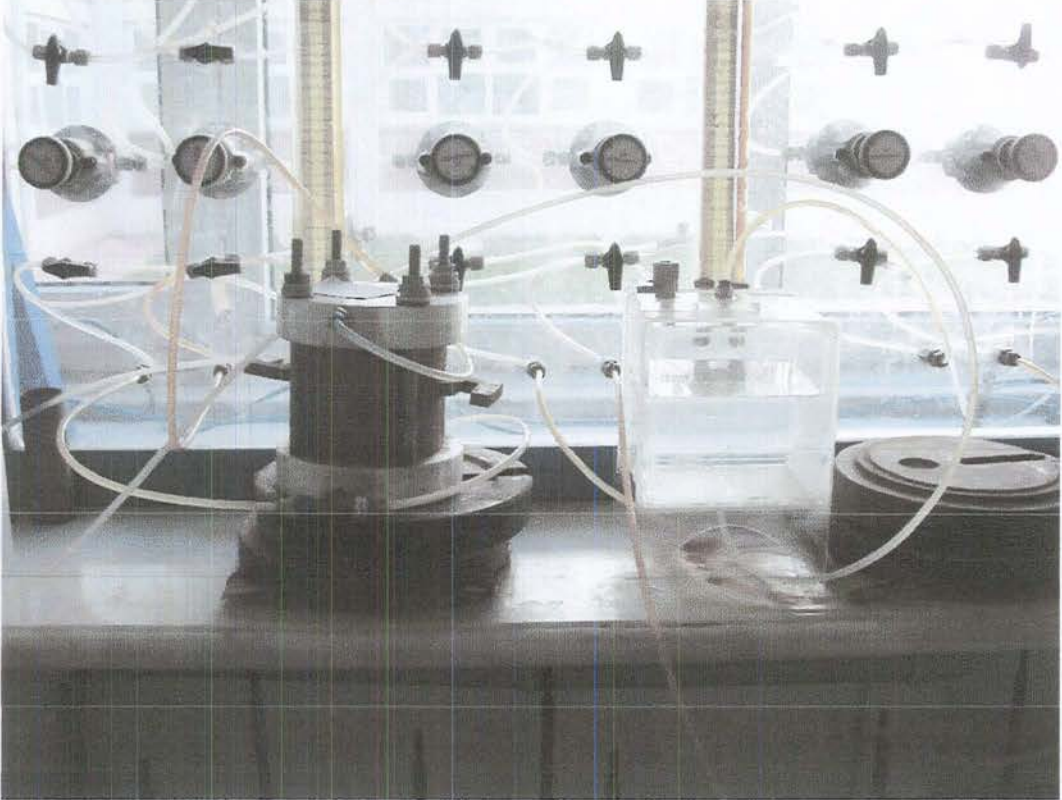
Zemin kütleleri içinde meydana gelen su akımlarının bilinmesi yol inşaatı açısından önem taşımaktadır. Permeabilite deneyi ile suyun zemin kütleleri içerisindeki boşluklarda hareketi belirlenir. Laboratuarda yapılan deneylerde, rijit duvarlı permeabilite metodu kullanılmıştır. Bu metodu gösteren kroki ve fotoğraflar, Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da verilmiştir. Bu deneyin uygulanabilmesi için numuneden, belli süre içerisinde ölçülebilir hacimde su geçmelidir. Düşen seviyeli permeabilite deneyleri, US EPA Method 9100 (1986) standardına uygun olarak laboratuarda yapılmıştır.



Şekil 6.4 Rijit Duvarlı Permeabilite Deney Düzeneği



Şekil 6.5. Rijit Duvarlı Permeabilite Deneyinde Kullanılan Malzemeler



Şekil 6.6. Rijit Duvarlı Permeabilite Deneyi

6.2.4. Kaliforniya Taşıma Oranı

Bu deney ile karayollarında, temel alttemel ve taban zemininin taşıma gücü belirlenmektedir. Bu değer yüzde (%) cinsinden ifade edilir. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), 1930 'da O.J. Porter tarafından geliştirilmiştir. Bu metotta, zeminin direnci laboratuarda CBR aleti ile ölçülmektedir. Laboratuarda ASTM D1883-73 (1978) standardına uygun olacak şekilde CBR deneyi yapılmıştır.

Üstyapının her tabakasının kalınlığı, bir alttaki tabakanın CBR değerine ve tekerlek yüküne bağlı olarak değişmektedir. Alttemel ve temel malzemeleri üzerinde CBR deneyi yapıldıktan sonra; zeminin, temel zemini olup olmayacağı ortaya çıkmaktadır. CBR değeri 5 ile 30 arasında ise taban zemini, 30'dan büyük ise alttemel olarak kullanılabilir. Bu sınıflandırma kriteri Tablo 6.1'de verilmiştir.

CBR metodundan elde edilen değer hala birçok ülkede zemin mukavemet değeri olarak kullanılmaktadır. CBR değeri 3 'ten küçük olan malzemeler yol gövdesinin inşasında kullanılmamalıdır. Eğer CBR değeri istenen seviyede değilse zemin, kireç veya çimento ile iyileştirilebilir. CBR değeri zeminin kesme direncini gösterir [5].

CBR deneyi, Yaş CBR ve Kuru CBR olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Yaş CBR deneyindeki amaç, boşlukların tamamen su ile dolu olduğu zamandaki taşıma gücünün belirlenmesidir. Karayolları standartlarında karşılaştırılan CBR değerleri yaş CBR deneyi sonuçlarıdır.

Tablo 6.1. CBR değerlerine göre sınıflandırma kriterleri [5]

CBR Değeri (%)	Sınıflandırma Kriteri
0-7	Zayıf
7-20	Orta
20-50	İyi
>50	Mükemmel

6.3. Fiziko-Kimyasal Özellikleri Belirleyen Deneyler

6.3.1. pH

40 Nolu elekten elenmiş numune oda sıcaklığında kurutulur ve 1 gün bekletildikten sonra pH metre ile değeri ölçülür. pH değeri ortamda H^+ veya OH^- iyonlarının bulunma derecesini ifade etmektedir. Zemin su karışımında pH değişimi ile bazı özellikler değişmektedir. Düşük pH değeri, toprakta flokülasyonu ve sıkı zemini ifade ederken, yüksek pH ise dispersiyonu ve gevşek zemini belirtmektedir (31). Sızıntı deneylerinde pH 7'den büyük ise metal çözünürlükleri azalır, pH 7'den küçük ise artar. Laboratuarda pH ölçümü, US EPA Method 9045 (1986) standardına göre yapılmıştır.

6.3.2. Elektriksel İletkenlik

Karışımların elektriksel iletkenlik değerleri Wilcox ve Karakouzan et. al. tarafından verilen metoda göre belirlenmiştir. Ortamın elektrik akımını taşıma kapasitesidir. Tuzluluğu ölçmek için yapılır. Numune önce oda sıcaklığında kurutulur. 16 No'lu elekten elenir. Saf su ile karıştırılarak doygun hale getirilir. 1 gün beklenerek kondüktivite aleti ile elektriksel iletkenlik ölçülür [33].

6.4. Çevresel Etkiler Altında Geoteknik Özellikler

6.4.1. Donma Çözülme deneyi (Durabilite)

Donma çözülme deneyinin amacı, iklimsel şartların etkisi ile malzemenin çatlama ve bozulmalara karşı direncinin ne olduğunun belirlenmesidir. Donma çözülme deneyi sonucunda numunedeki kayıp, sahip olduğu su muhtevası ile ilgilidir. Özellikle yol üst tabakasında donma meydana gelirse, zemin içindeki mevcut su donma bölgesine doğru hareket eder ve buz mercikleri oluşturur. Yol malzemesinde don kabarması meydana gelir. Don kabarması ve buna bağlı yol alt malzemesinin mukavemetinin kaybolması yoldaki hasarların en yaygın şeklidir. Stabilize yol karışımları üzerinde standart olarak 12 çevrim donma çözülme

deneyi yapılır. Çok az malzeme 12 çevrime dayanabilir. Laboratuarda yapılan donma çözünme deneylerinde ASTM D560-82 (1985) standardı uygulanmıştır.

6.4.2. Sızıntı (Leachate) deneyi

Atıklar, doğal çevrede yağmur ve kar sularına maruz kaldığı için kimyasal çözünme meydana gelmektedir. Kimyasal olarak kirlenen su, zemin içerisinde sızarak kirlilik taşımaktadır. Atık stabilizasyonunda sızıntı suyunun temizliği önemli bir noktadır. Bu amaçla sızıntı deneyinden, 24 saatlik dilimler içerisinde sızıntı suları toplanmıştır (Şekil 6.7). Toplanan suların içerdiği zararlı-zararsız maddeler atomik absorpsiyon aletinde tespit edilmiştir. Bunun dışında sızıntı suyunun pH ve elektriksel iletkenliği de ölçülmüştür. Zararlı maddeler, standartta belirtilen limitler dışında ise numuneye kireç stabilizasyonu uygulanır. Sızıntı deneyi, US EPA Method 9100 (1981) standardına göre yapılmıştır.



Şekil 6.7. Sızıntı Deneyi

6.5.Mikro Yapısal Özellikler

6.5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), zeminin mikroyapısının gözlenmesine yarayan alettir. Zemin mikroyapısı zemin; atık ve diğer ilave malzemelerin fiziko-kimyasal yapısının fonksiyonudur. Bir mikro yapının gözlenmesi ile gözenek boşlukları belirlenebilir. Atık kalıp kumu ile çimento, kireç gibi bağlayıcı malzemeler arasında oluşan topaklanma, aglomerasyon gibi reaksiyonlar malzemeye bağlı olarak değişebilir. Bunların karakteristikleri ve yapıları SEM'deki analizlerden belirlenebilir.

Kalıba alınan numuneler, ilk olarak farklı zımparalar ile kabaca parlatılır. Yüzeyleri düzeltilen numuneler polimer diskte 30 dakika tutulur. Numuneler daha sonra ince parlatma aşaması için elmas pastalar kullanılarak parlatılmışlardır. Parlatma işlemi sonrasında numuneler saf su ile temizlenerek analize hazır hale getirilir. Hazırlanan numunelerin mikroyapı analizleri Camscan S4 Series SEM cihazı ile yapılmıştır.

6.5.2. X Işını Kırınımı analizi (XRD)

Zemin numunesinin kristalli bölümünün tanınması için X-ışını kırınımı analizi (XRD) yapılır.

Günlük yaşamın birçok alanında yararlanılan X ışınları, elektro-manyetik spektrumdaki dalgalardan, uzunluğu 0,01-100 Å olanlardır. Bakır ışınımından yaratılan dalgaların uzunluğu 1,54 Å olduğundan, bunlar tabakalar arası uzaklığı 1 Å dolayında olan kil mineralleri için uygun ışınlar oluşturmaktadır. Bu dalgalar, normal ışığın yansıyor kırılmasına benzer olarak çarptıkları kristalde emilip yok olmadan kristal yüzeyinden içeriye birkaç atom tabakasını geçerler. Bu sırada atom tabakaları titreşerek ışınları her yöne saçar. Belirli yönlerdeki ışınım uygun fazda olursa bunların çakışmasıyla beliren ışın, fotoğraf filmi üzerine düşürülür. Böylece ışının şiddeti ve yönü belirlenir.

Şekil 6.8'de uzunluğu λ olan x ışınlarının atomik tabaka kalınlığı d olan kristal yüzeyine θ açıda çarpışı gösterilmiştir. C'den yansıyan ışının A'dan

yansıyanla güçlendirilmesi için iki dalga arasındaki farkın dalga uzunluğunun ($n\lambda$) katı olması gerekmektedir. Şekil 6.8'den iki ışının uzunlukları arasındaki fark $BC+CD$ olduğundan;

$$BC + CD = n \lambda \text{ yazılabilir.}$$

Simetriden ve trigonometrik bağıntıdan,

$$BC = CD$$

$CD = d \sin\theta$ olduğundan gerekli koşul buradan

$n\lambda = 2 d \sin\theta$ biçiminde belirir. Bragg kuralı olarak bilinen bu bağıntı, her kristalin d uzaklıkları farklı olduğundan minerallerin tanınması amacıyla kullanılmaktadır.

Numunelerin analizleri Rigaku Rint 2000 Series Japonya XRD cihazında $2^\circ/\text{dak}$ tarama hızında $30^\circ - 50^\circ$ arasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.8 X-ışını Kırınımı Yönteminde Ölçüm

7. DENEY SONUÇLARI

7.1. Hazırlanan Karışımlar

Atık kalıp kumu; kırmataş, kireç ve çimento ile laboratuarda belirli oranlarda karıştırılarak farklı numuneler hazırlanmıştır. Sonuçları karşılaştırmak amacıyla, karayollarından alınan referans malzemelerle de deneyler yapılmıştır.

Alttemel malzemesi olarak kullanılacak kırmataşlı karışımlarda, karayolları granülometri eğrileri baz alınmıştır. Kireç ve çimento stabilizasyonu yapılan numunelerde ise, numuneye toplam ağırlığın %5'i kadar katkı malzemesi eklenmiştir. Yapılan literatür çalışmasında en iyi oranın %5 olduğu görülmüştür. Bu oranın, hem ekonomi açısından, hem de ulaşılabilir dayanım açısından uygun olduğu belirlenmiştir.

Su muhtevasının mühendislik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla, numuneler optimumda, optimumun kuru ve optimumun ıslak tarafında hazırlanmıştır. Böylece iklimsel değişimlere bağlı su muhtevasındaki farklılıklar da değerlendirilmiştir. (AASHTO 1993).

Kırmataşlı numunelerde, granülometri sınırları içerisinde kalacak şekilde 2 grup karışım yapılmıştır.

1. Maksimum Kalıp Kumu Kullanımı: Kalıp kumu, ince daneli, üniform bir malzeme olduğundan sınırlı miktarda kullanılabilir. Bu amaçla karayolları granülometri standardını sağlayan maksimum kalıp kumu kullanımı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, en fazla toplam karışımın ağırlıkça %45'i oranında atık kalıp kumu kullanılabileceği anlaşılmıştır. Hazırlanan karışımlarla ilgili kullanılan kısaltmalar, Tablo 7.1'de verilmiştir. Bu karışımda kullanılan malzemelerin kompozisyonunda, %45 Atık Kalıp Kumu, %20 Kırmataş (3/4' - 3/8) , %25 Kırmataş (3/8' - #4), %10 Kırmataş (#4 - #40) bulunmaktadır.

2. Optimum Kalıp Kumu Kullanımı: Karayollarının alttemeller için verdiği granülometri sınırlarına göre, optimum granülometri eğrisini elde etmek amacıyla karışım hazırlanmıştır. Bu karışımın kompozisyonu %27 Atık Kalıp Kumu, %25 Kırmataş (3/4 - 3/8) , %20 Kırmataş (3/8 - #4), %28 Kırmataş (#4 - #40) içermektedir.

Tablo 7.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Numune	Kalıp Kumu (%)	Kırma Taş (%)	Kireç (%)	Çimento (%)	Kompaksiyon	Kompaksiyon sırasındaki su muhtevası
F-S	100	-	-	-	Standart	OMC
F-S-(+2)	100	-	-	-	Standart	OMC+2
F-S-(-2)	100	-	-	-	Standart	OMC-2
F-M	100	-	-	-	Modifiye	OMC
F-M-(+2)	100	-	-	-	Modifiye	OMC+2
F-M-(-2)	100	-	-	-	Modifiye	OMC-2
F-S-L5	100	-	5	-	Standart	OMC
F-S-L5-(+2)	100	-	5	-	Standart	OMC+2
F-S-L5-(-2)	100	-	5	-	Standart	OMC-2
F-M-L5	100	-	5	-	Modifiye	OMC
F-M-L5-(+2)	100	-	5	-	Modifiye	OMC+2
F-M-L5-(-2)	100	-	5	-	Modifiye	OMC-2
F-S-C5	100	-	-	5	Standart	OMC
F-S-C5-(+2)	100	-	-	5	Standart	OMC+2
F-S-C5-(-2)	100	-	-	5	Standart	OMC-2
F-M-C5	100	-	-	5	Modifiye	OMC
F-M-C5-(+2)	100	-	-	5	Modifiye	OMC+2
F-M-C5-(-2)	100	-	-	5	Modifiye	OMC-2
F-S-R73	27	73	-	-	Standart	OMC
F-S-R73-(+2)	27	73	-	-	Standart	OMC+2
F-S-R73-(-2)	27	73	-	-	Standart	OMC-2
F-M-R73	27	73	-	-	Modifiye	OMC
F-M-R73-(+2)	27	73	-	-	Modifiye	OMC+2
F-M-R73-(-2)	27	73	-	-	Modifiye	OMC-2
F-S-R55	45	55	-	-	Standart	OMC
F-S-R55-(+2)	45	55	-	-	Standart	OMC+2
F-S-R55-(-2)	45	55	-	-	Standart	OMC-2
F-M-R55	45	55	-	-	Modifiye	OMC
F-M-R55-(+2)	45	55	-	-	Modifiye	OMC+2
F-M-R55-(-2)	45	55	-	-	Modifiye	OMC-2
F-S-R73-C5	27	73	-	5	Standart	OMC
F-S-R73-C5-(+2)	27	73	-	5	Standart	OMC+2
F-S-R73-C5-(-2)	27	73	-	5	Standart	OMC-2
F-M-R73-C5	27	73	-	5	Modifiye	OMC
F-M-R73-C5-(+2)	27	73	-	5	Modifiye	OMC+2
F-M-R73-C5-(-2)	27	73	-	5	Modifiye	OMC-2
B-S					Standart	OMC
B-S-(+2)					Standart	OMC+2
B-S-(-2)					Standart	OMC-2
B-M					Modifiye	OMC
B-M-(+2)					Modifiye	OMC+2
B-M-(-2)					Modifiye	OMC-2
D-S					Standart	OMC
D-S-(+2)					Standart	OMC+2
D-S-(-2)					Standart	OMC-2
D-M					Modifiye	OMC
D-M-(+2)					Modifiye	OMC+2
D-M-(-2)					Modifiye	OMC-2

L: Kireç C: Çimento F: Kalıp Kumu M: Modifiye Pr. S: Standart Pr. B: Referans Alttemel
D: Referans Kum OMC:Optimum Su Muhtevası

7.2. Geoteknik Özellikler

7.2.1. Fiziksel (İndeks) özellikler

7.2.1.1. Dane birim hacim ağırlık

Labratuarda yapılan deneylerde elde edilen dane birim hacim ağırlık değerleri Tablo 7.2.'de verilmiştir. Kırmataş oranının artmasıyla, dane birim hacim ağırlığı da artmaktadır.

Tablo 7.2. Dane Birim Hacim Ağırlık Değerleri

Malzeme	Dane Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)
F-S	2,45
F-S-R73	2,61
F-S-R55	2,55

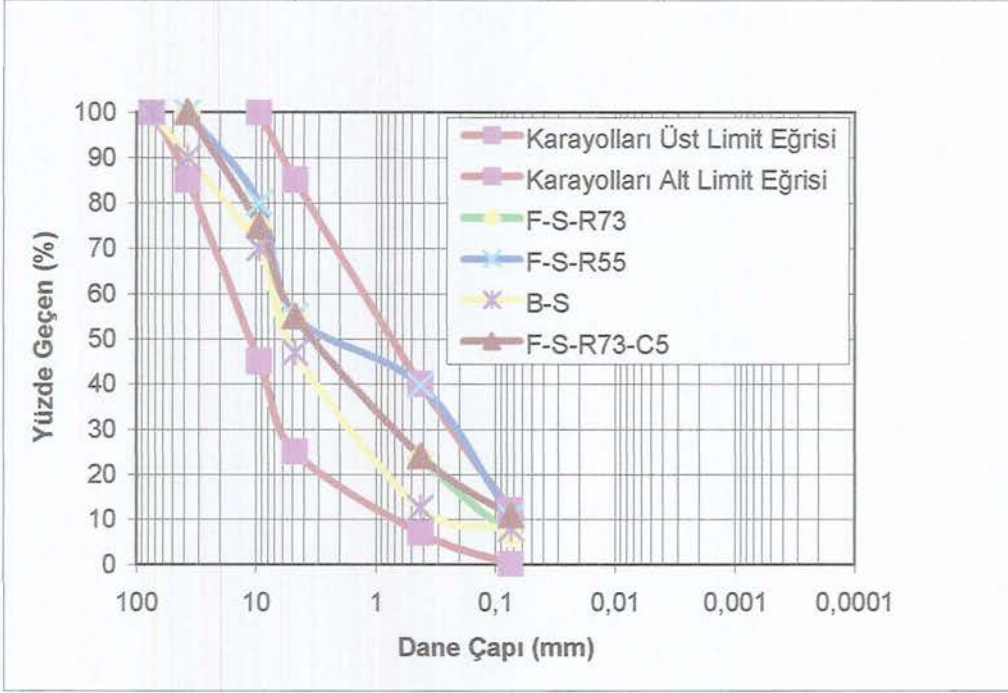
7.2.1.2. Dane çapı dağılımı

Tablo 7.3'te, kalıp kumu ve kalıp kumu karışımları, AASHTO ve Birleştirilmiş Sınıflandırma Sistemi'ne göre sınıflandırılmıştır.

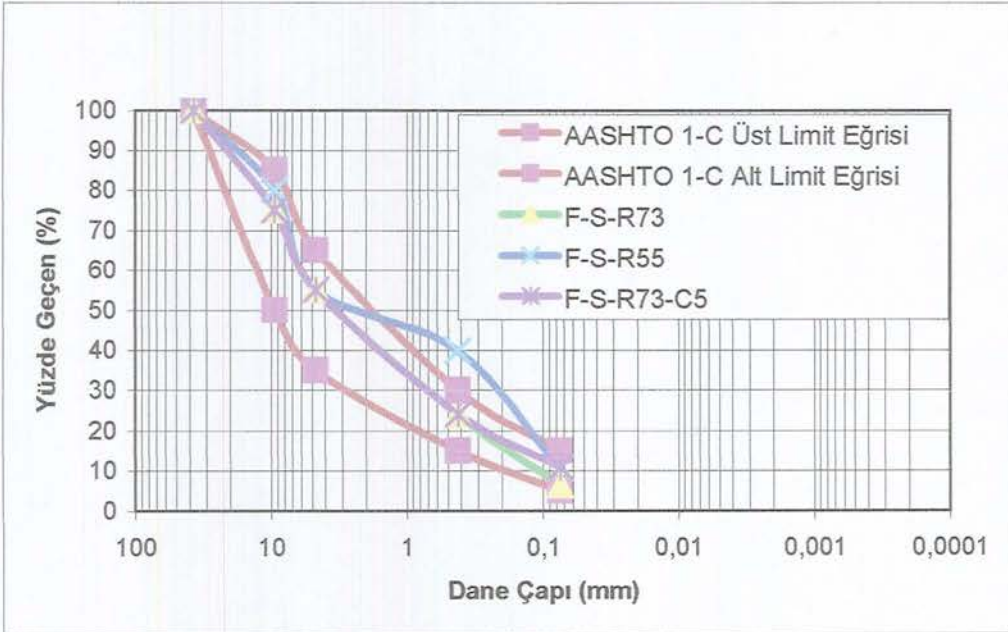
Tablo 7.3 Numunelerin Sınıflandırılması

Malzeme	AASHTO Sınıflandırma Sistemi	Birleştirilmiş Sınıflandırma Sistemi
F-S	A-2-4	SM
F-S-L5	A-2-4	SM-SC
F-S-C5	A-2-4	SM-SC
F-S-R73	A-1-a	SW-SC
F-S-R73-C5	A-1-a	SW-SC
F-S-R55	A-1-a	SW-SC
B-S	A-1-a	GW-GC
D-S	A-2-4	SM

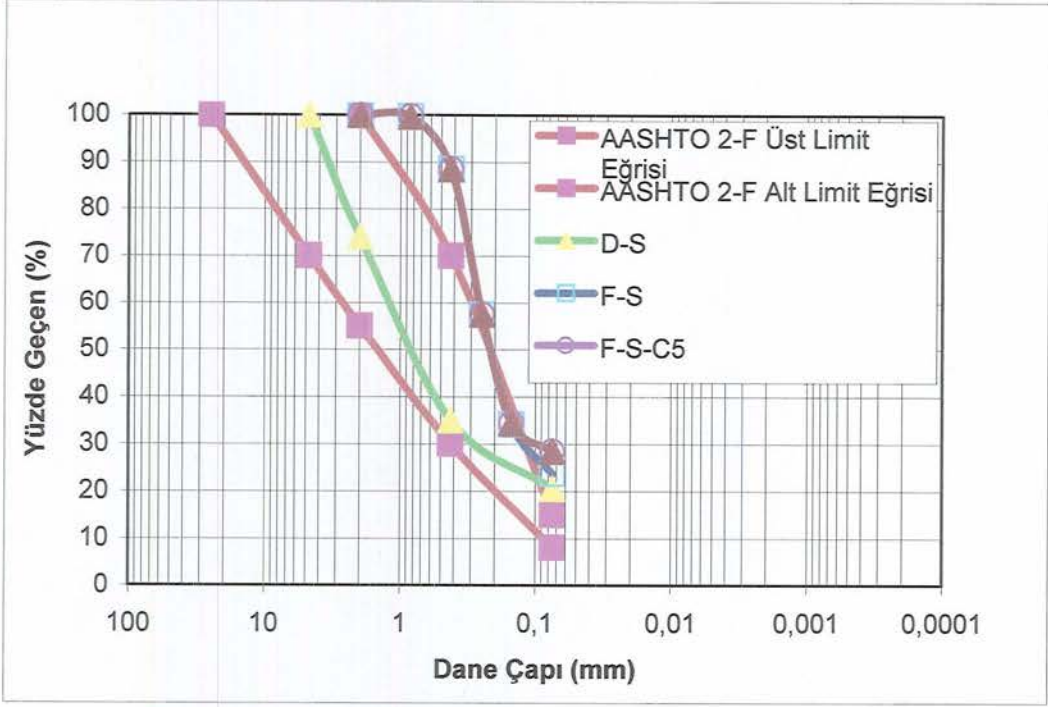
Şekil 7.1, Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'te, hazırlanan karışımların, AASHTO ve KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) tarafından verilen granülometrik sınırlar ile karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 7.1. Granülometrik Sınırlar (KGM)



Şekil 7.2. Granülometrik Sınırlar (AASHTO 1-C)



Şekil 7.3. Granülometrik Sınırlar (AASHTO 2-F)

F-S-R73-C5 numunesi AASHTO 1-C ve Karayolları granülometrik sınırlarını sağlamaktadır. %45 kalıp kumu içeren F-S-R55 numunesi, Karayolları limitlerini sağlarken AASHTO 1-C sınırlarının içinde kalmamaktadır. AASHTO 2-F ise kumlar için verilmiş olan sınırlardır. Bu limitlere göre; kalıp kumu sınırların dışında kalmaktadır.

7.2.1.3. Atterberg kıvam limitleri

Laboratuarda likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Atık kalıp kumu non-plastiktir. Likit limit ve plastisite indisi değerleri Tablo 7.4'te verilmiştir.

Tablo 7.4 Likit Limit Değerleri

Malzeme	Likit Limit	Plastisite İndisi
F-S	-	Non-plastik
F-S-L5	-	Non-plastik
F-S-C5	-	Non-plastik
B-S	%27	%6,8

7.2.2. Mekanik özellikler

7.2.2.1. Kompaksiyon deneyi sonuçları

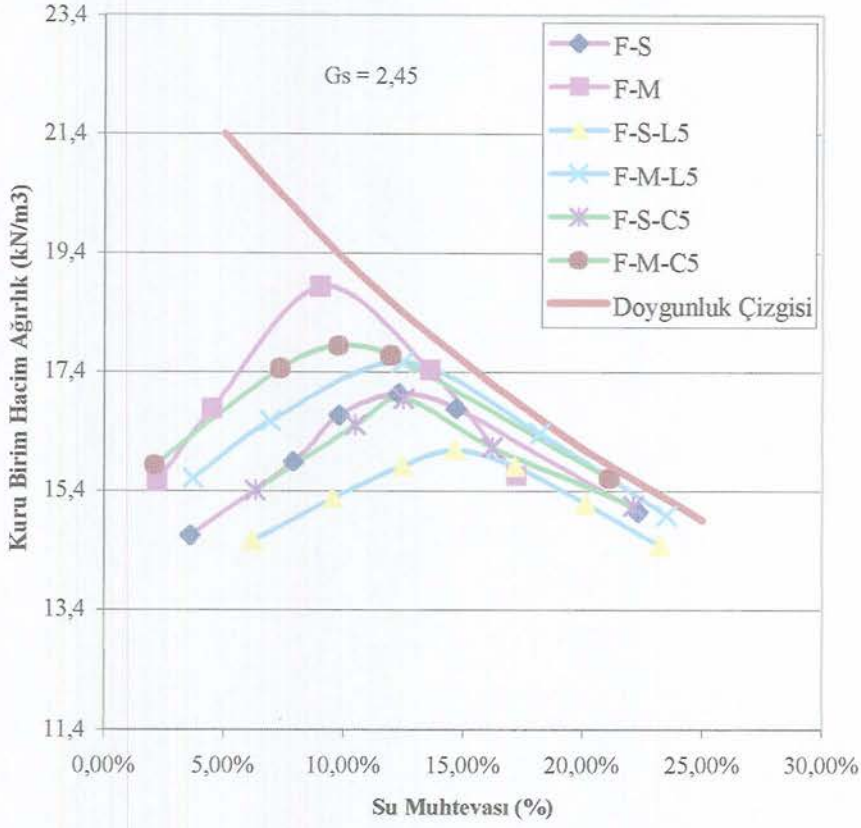
Kalıp kumu ve kalıp kumu karışımları için optimum su muhtevaları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 7.5., Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te verilmiştir.

Standart proktor deneyi ile sıkıştırılan kalıp kumunun optimum su muhtevası %12.3 iken, modifiye proktor enerjisi ile sıkıştırılan kalıp kumu numunesinin optimum su muhtevası %9 olarak bulunmuştur. Sıkıştırma enerjisi arttıkça optimum su muhtevası düşmektedir. Ayrıca kırmataşlı numunelerde, kırmataş oranı arttıkça, optimum su muhtevasında azalma meydana gelmiştir.

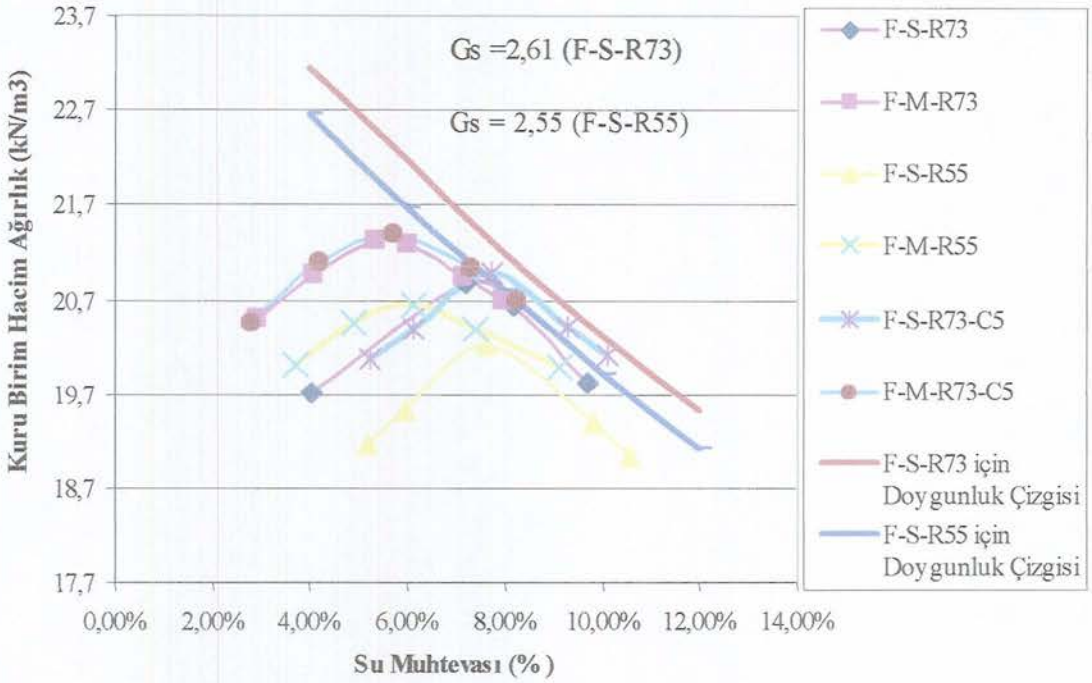
Kimyasal stabilizasyon yapılan numunelerde, numuneye kireç veya çimento ilavesiyle optimum su muhtevasında artış meydana gelmiştir.

Tablo 7.5. Optimum Su Muhtevası Deneyi Sonuçları

Numune Çeşitleri	Kuru Birim Hacim Ağırlık γ_d (kN/m ³)	Optimum Su Muhtevası W_{opt} (%)
F-S	17,03	12,3
F-M	18,83	9
F-S-L5	16,09	14,7
F-M-L5	17,56	12,5
F-S-C5	16,96	12,5
F-M-C5	17,84	10
F-S-R73	20,95	7,5
F-M-R73	21,34	5,6
F-S-R55	20,22	7,7
F-M-R55	20,65	6,1
F-S-R73-C5	20,99	7,7
F-M-R73-C5	21,40	5,7
B-S	22,25	8,3
B-M	23,22	6,5
D-S	20,77	7
D-M	21,88	6



Şekil 7.4. Kırmataşsız Numunelerin Optimum Su Muhtevası - Kuru Birim Hacim Ağırlık Grafiği

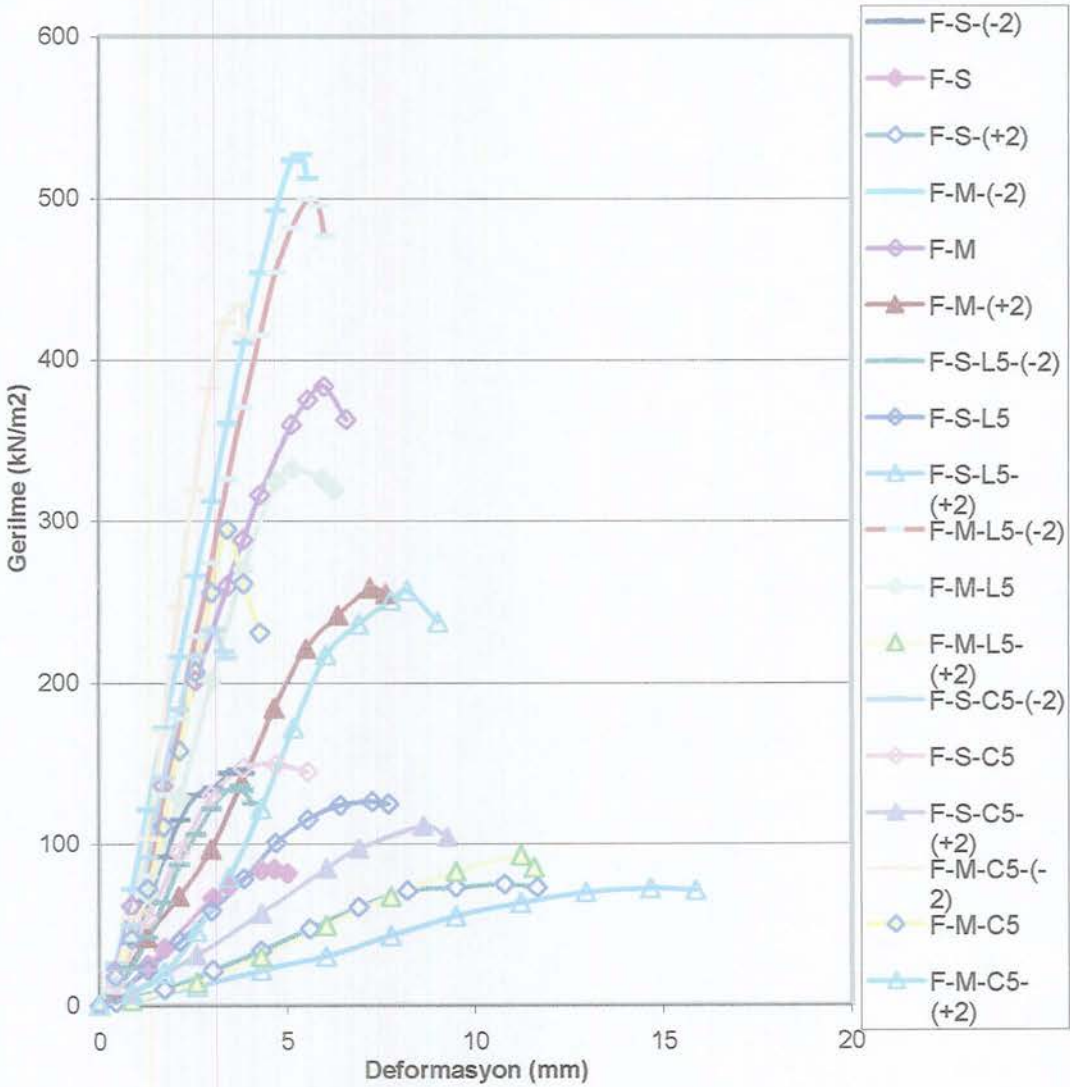


Şekil 7.5. Kırmataşlı Numunelerin Optimum Su Muhtevası-Kuru Birim Hacim Ağırlık Grafiği

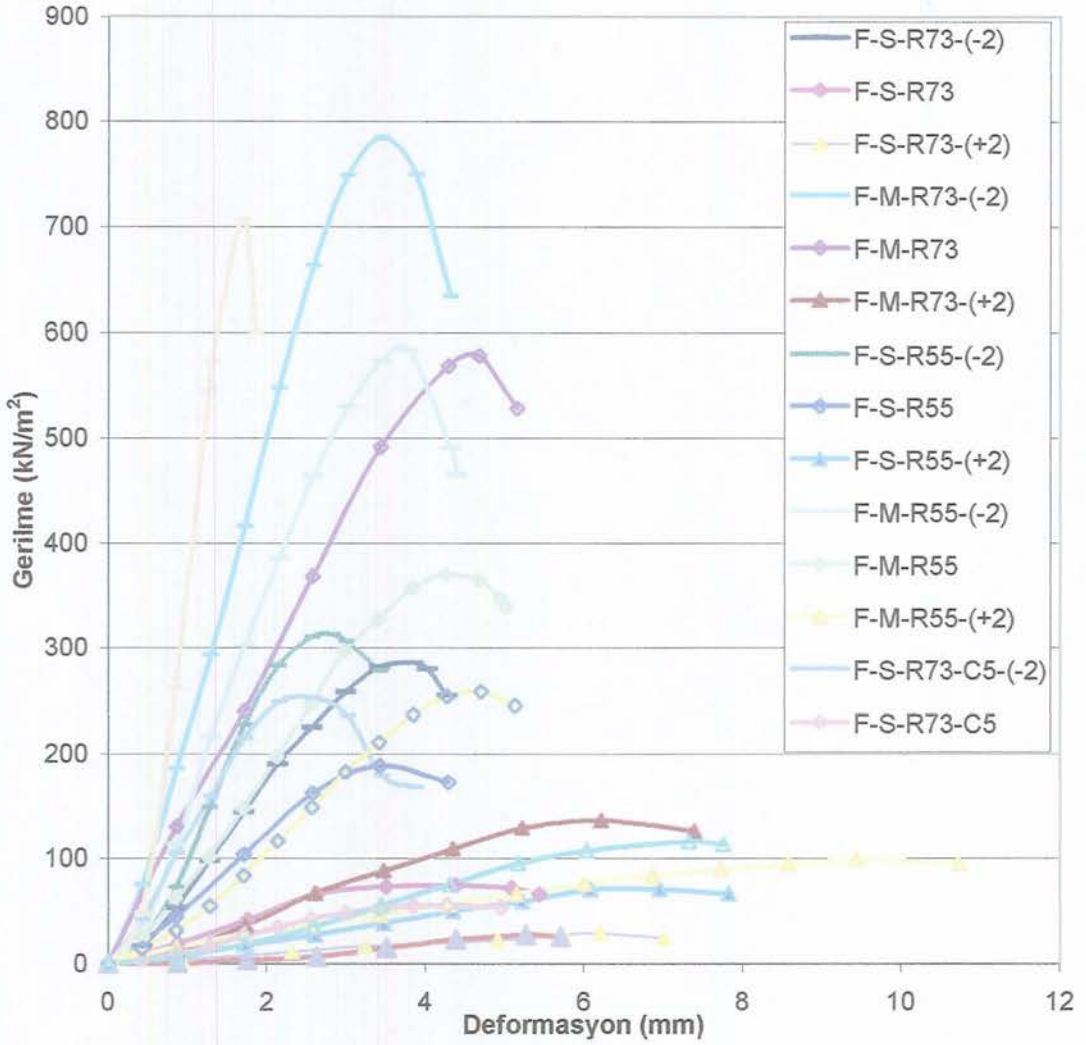
7.2.2.2. Serbest Basınç deneyi

Serbest basınç mukavemeti, zamana bağlı olarak taze (0) ve 7 gün olarak belirlenmiştir. Standart Proktorla sıkıştırılan kalıp kumu numunesinin serbest basınç direnci, $84,6 \text{ kN/m}^3$ olarak saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9'da verilmiştir.

Şekil 7.6. ve Şekil 7.7'de görüldüğü gibi, kalıp kumu numuneleri, optimumun ıslak tarafında sıkıştırıldıklarında, serbest basınç mukavemeti açısından sünek davranış sergilerken, optimumun kuru tarafında sıkıştırıldıklarında ise, kırılma özellik taşımaktadır.

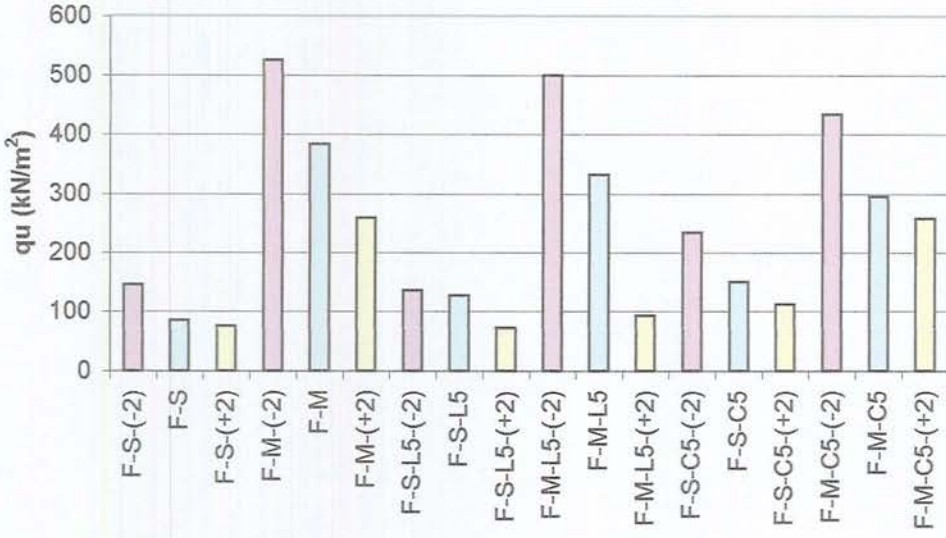


Şekil 7.6. Kırmataşsız Numunelere Ait Gerilme Deformasyon Eğrileri



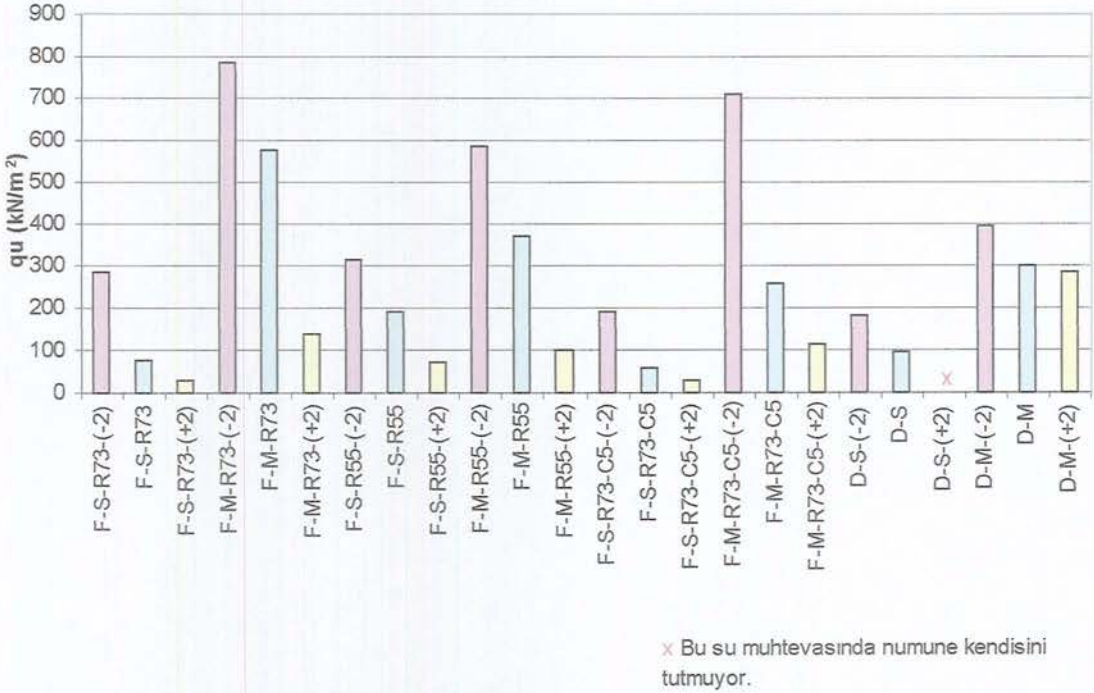
Şekil 7.7. Kırmataşlı Numunelere Ait Gerilme Deformasyon Eğrileri

Kimyasal stabilizasyon yapılan numunelerde, numuneler taze sıkıştırıldıklarından ve hemen deneye tabii tutulduklarından dolayı, kürlere oluşacak mukavemet artışları meydana gelmemiştir. Bu yüzden mukavemet değerlerinde önemli değişiklikler olmamıştır (Şekil 7.8).



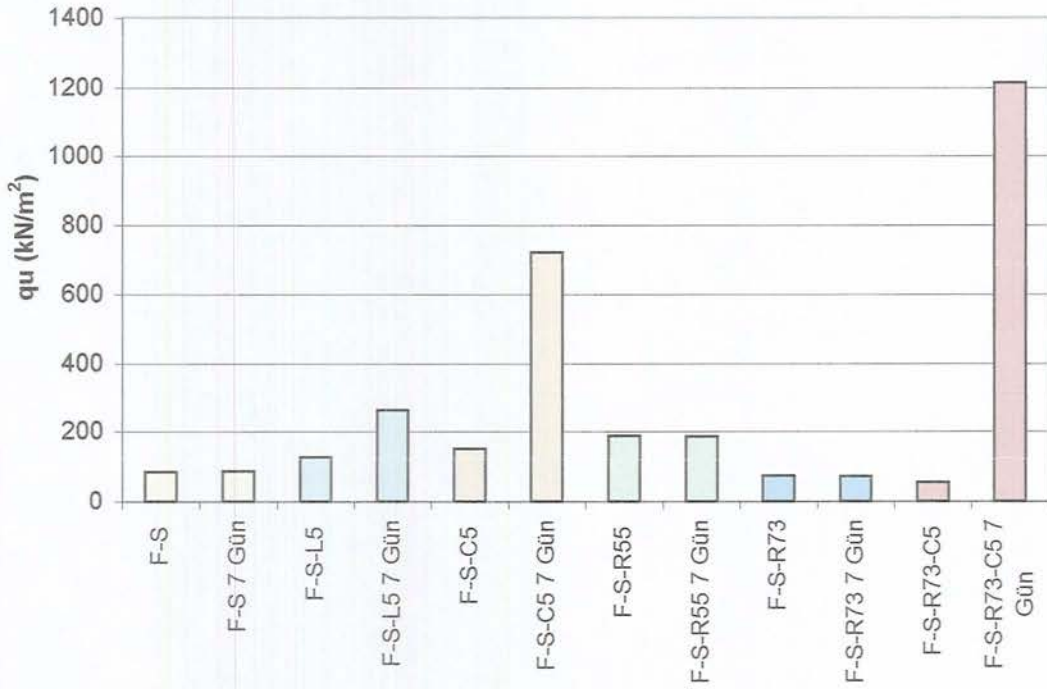
Şekil 7.8 Kırmataşsız Karışımların Serbest Basınç Dayanımları

Şekil 7.9’da görüldüğü gibi, modifiye proktor ile sıkıştırılan, kalıp kumu – kırmataş karışımlarında, yeterli sıkıştırma enerjisi sağlanarak, yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Ancak standart proktor enerjisi ile sıkıştırılan karışımlarda, yeterli enerji sağlanamadığından dolayı, mukavemet değerleri düşüktür.



Şekil 7.9. Kırmataşlı Karışımların Serbest Basınç Dayanımları

Şekil 7.10 'da, 1 hafta kür edilen numunelerin serbest basınç dayanımları gösterilmiştir. Kimyasal stabilizasyon yapılan numunelerde kür zamanına bağlı olarak, dayanımlarında da artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi kalıp kumunda bulunan silika ve alüminyum mineralleri ile kireç ve çimento içerisindeki kalsiyum iyonlarıyla reaksiyona girerek kalsit ve portlandit hidratasyonu sağlayan mineralleri oluşturmuştur. Böylece kireçle stabilize edilen numunelerde topaklaşma, çimento ile stabilize edilen numunelerde ise, çimento jeli ile dane yüzeyleri arasında adhezyon kuvvetleri oluşmuştur. Bunun sonucunda her iki stabilizasyonda da Şekil 7.10'da görüldüğü gibi mukavemet q_u artışı görülmüştür.



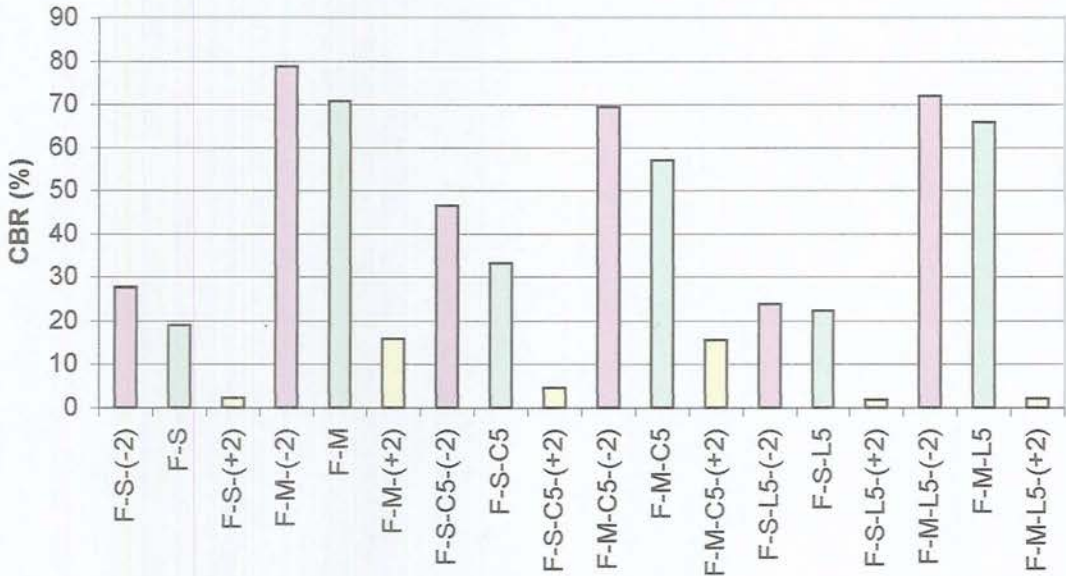
Şekil 7.10. Bir Hafta Kür Edilmiş Numunelerin Serbest Basınç Dayanımları

7.2.2.3. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR metodu)

Numuneler standart proktor ve modifiye proktor ile iki farklı sıkıştırma enerjisinde sıkıştırılmıştır. Fikir vermesi amacı ile hem kuru CBR, hem de Yaş CBR deneyleri yapılmıştır. İyi bir alttemel malzemesinin CBR değeri %30-%50 arasında olmalıdır (5).

Yaş CBR sonuçlarını değerlendirecek olursak, kalıp kumu iyi bir taban malzemesi olabilirken, kırmataş-kalıp kumu karışımları da iyi bir alttemel malzemesi olabilmektedir. Kırmataş kalıp kumu karışımına %5 çimento katkısıyla stabilizasyon yapılarak, malzeme, temel malzemesi olarak da kullanılabilir. CBR deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de verilmiştir. Standart proktor enerjisiyle sıkıştırılan kalıp kumu numunelerinin CBR değeri, %19 olarak bulunmuştur.

Kalıp kumu numuneleri ve stabilizasyon yapılmış numuneler, üç farklı su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Farklı enerji seviyelerinde sıkıştırılan bu numunelerde, en yüksek CBR değerleri, optimumun kuru tarafında sıkıştırılan numunelerde elde edilmiştir (Şekil 7.11).

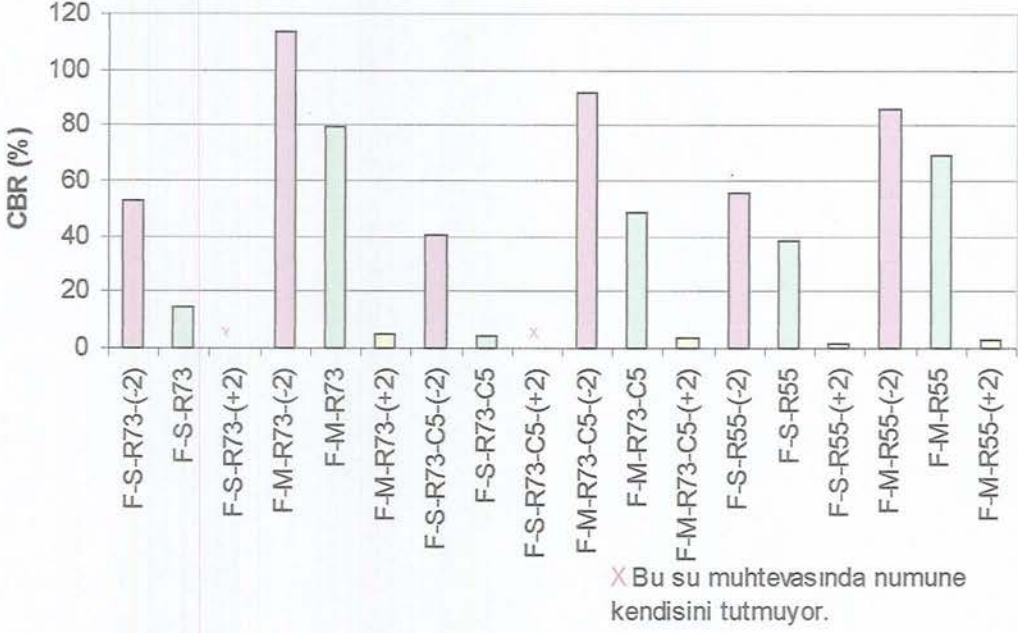


Şekil 7.11 Kırmataşsız Numunelerin CBR değerleri

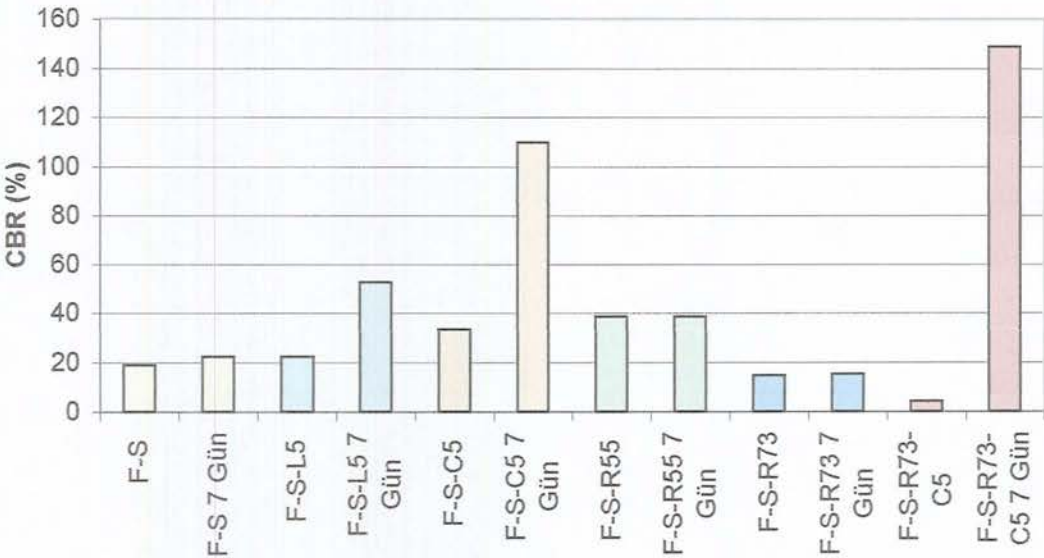
Mekanik stabilizasyon yapılan kalıp kumu numunelerinde, standart proktor enerjisi yeterli olmamıştır. Bu nedenle bazı numunelerde (F-S-R73 ve F-S-R73-C5), yeterli bağlayıcı malzeme olmamasından dolayı, numune kendisini tutmamıştır.

Modifiye proktor enerjisi ile sıkıştırılan kırmataşlı karışımlarda, yol alt temel malzemesi için istenen limit CBR değerleri sağlanmıştır.

Kireç ve çimentonun mukavemet üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, numunelere bir haftalık kür uygulanmıştır. %5 oranında kireç veya çimento katkısı ile yapılan kimyasal stabilizasyonla, alttemel için gerekli olan mukavemet değerleri elde edilmiştir. Şekil 7.13'te, bir hafta kür edilmiş numunelerin, CBR değerleri gösterilmiştir.

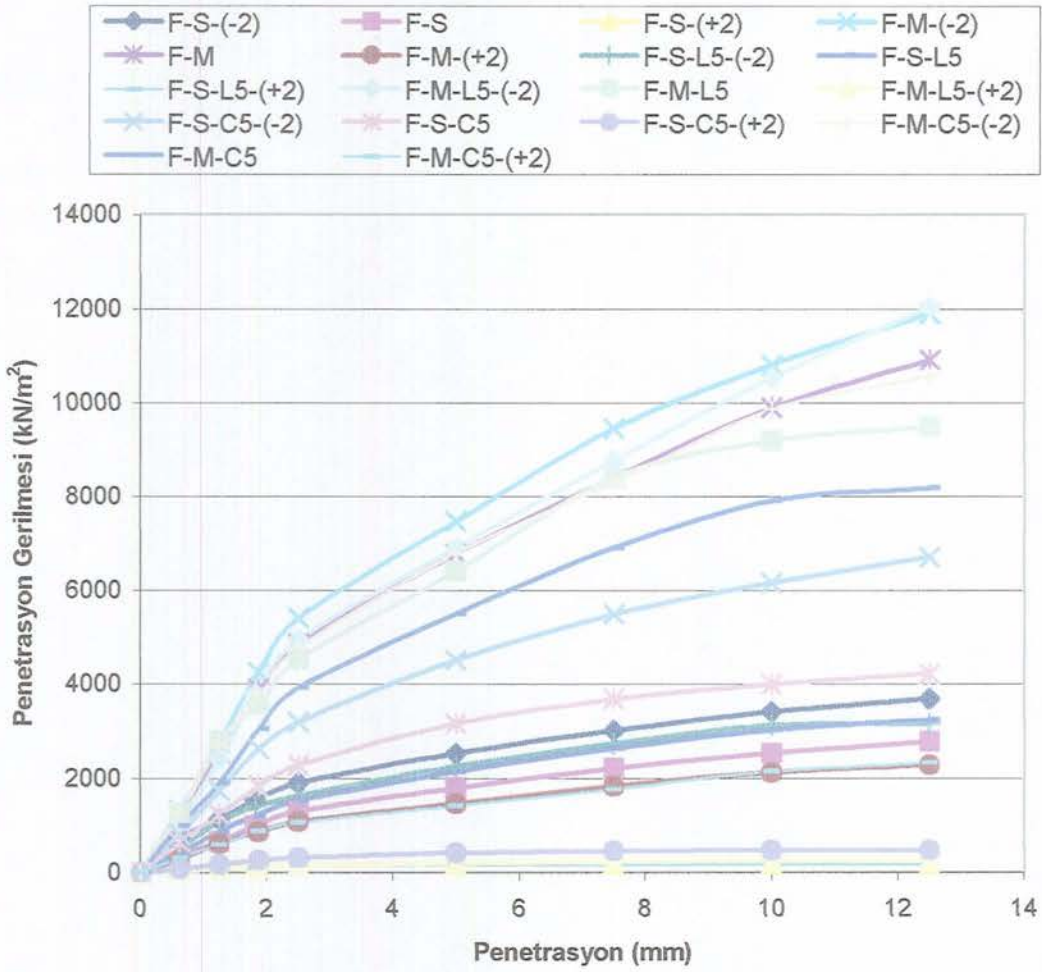


Şekil 7.12 Kırmataşlı Numunelerin CBR değerleri

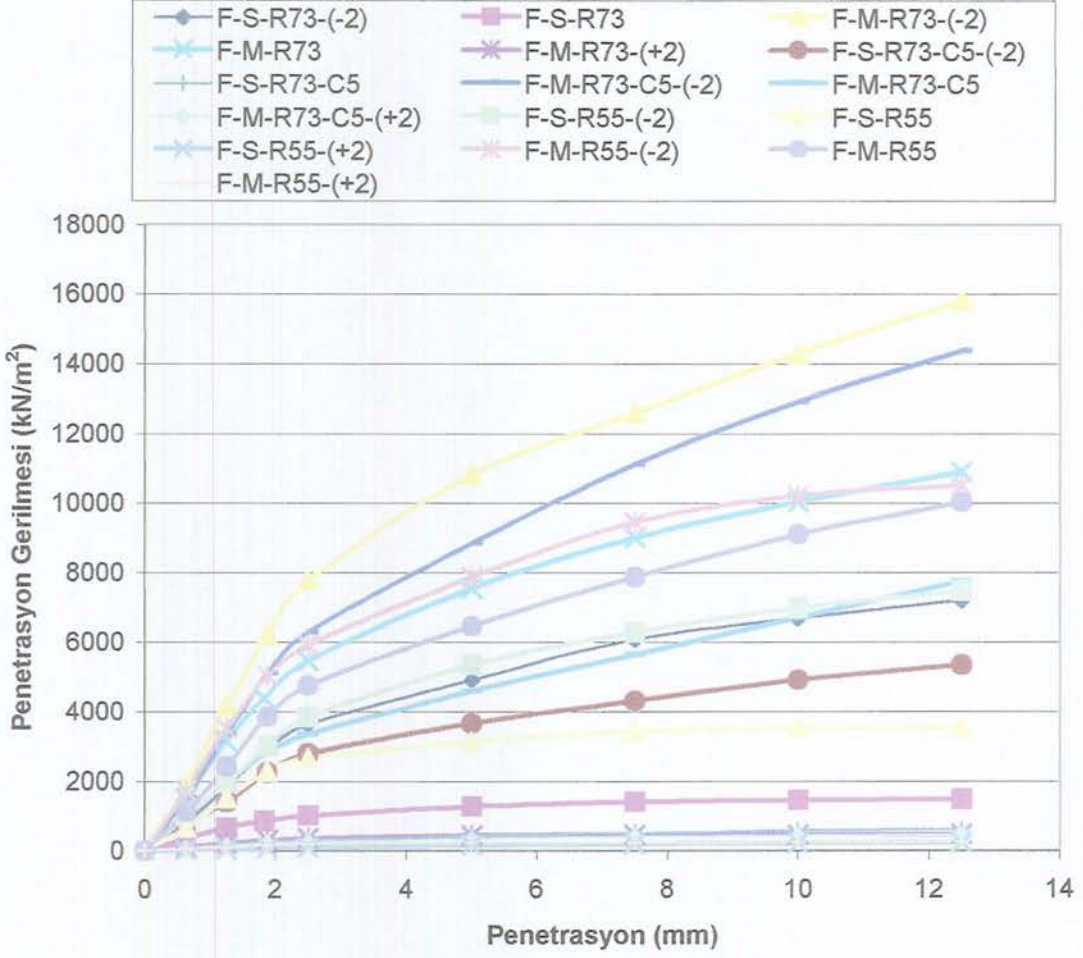


Şekil 7.13 Kür Zamanı İle Değişen CBR Değerleri

Şekil 7.14 ve 7.15 'te CBR deneyinden elde edilen verilerle Penetrasyon - Penetrasyon Gerilmesi grafiği gösterilmiştir. Bu grafik, normal şartlarda konkav bir eğriden oluşmalıdır. Ancak bazen başlangıçta konveks sonra konkav olabilir. Bunun nedeni yüzey pürüzlülüğü veya gevşekliği olabilir. Bazen de pistonun altına taş parçası gelebilir. Bu durumda, deney tekrarlanmalıdır [11]. Nitekim, Şekil 7.14 ve Şekil 7.15 'teki eğrileri elde etmek için, konveks eğriye sahip deneyler tekrarlanmıştır.



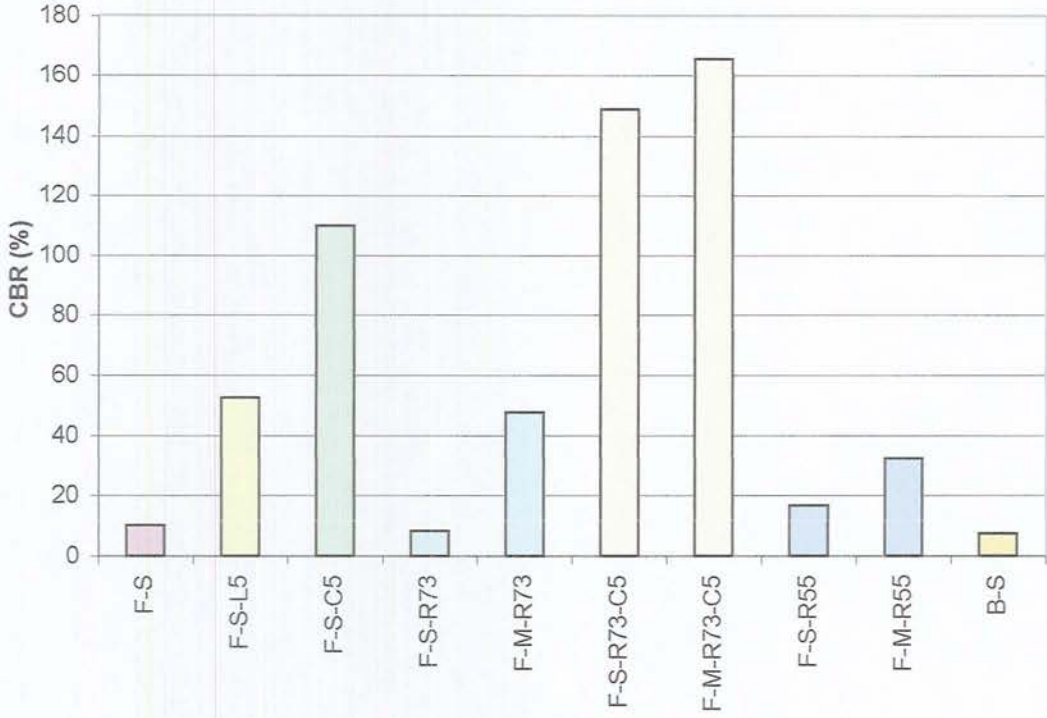
Şekil 7.14 Kırmataşsız Numuneler İçin Penetrasyon –Penetrasyon Gerilmesi Değerleri



Şekil 7.15 Kırmataşlı Numuneler İçin Penetrasyon –Penetrasyon Gerilmesi Değerleri

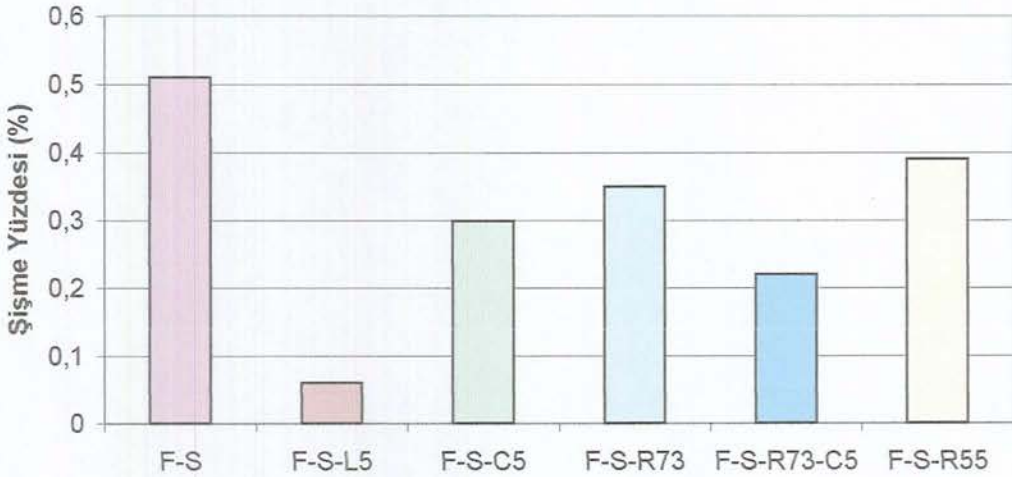
Yaş CBR deneyleri sonrasında elde edilen değerler, Şekil 7.16'da verilmiştir. Laboratuarda yapılan deneyler sonucunda, yaş CBR değerleri, kuru CBR değerlerinden daha düşük bulunmuştur. Ayrıca standart enerji ile sıkıştırılan numunelerin, CBR değerlerindeki kayıplar, modifiye ile sıkıştırılanlara göre daha fazladır. Bunun nedeni, 4 günlük doygunlaştırma esnasında, standart enerji ile sıkıştırılan numunelerin boşluklarının daha fazla olması ve bu boşlukların su ile dolmasıdır.

Karayolları standartlarında verilen, limit CBR değerleri yaş CBR deneyinden elde edilen değerlerdir. Buna göre F-S-L5, F-S-C5, F-M-R73, F-S-R73-C5, F-M-R73-C5 ve F-M-R55 numuneleri, alttemel için gerekli CBR değerlerini sağlamaktadır.



Şekil 7.16 Yaş CBR Değerleri

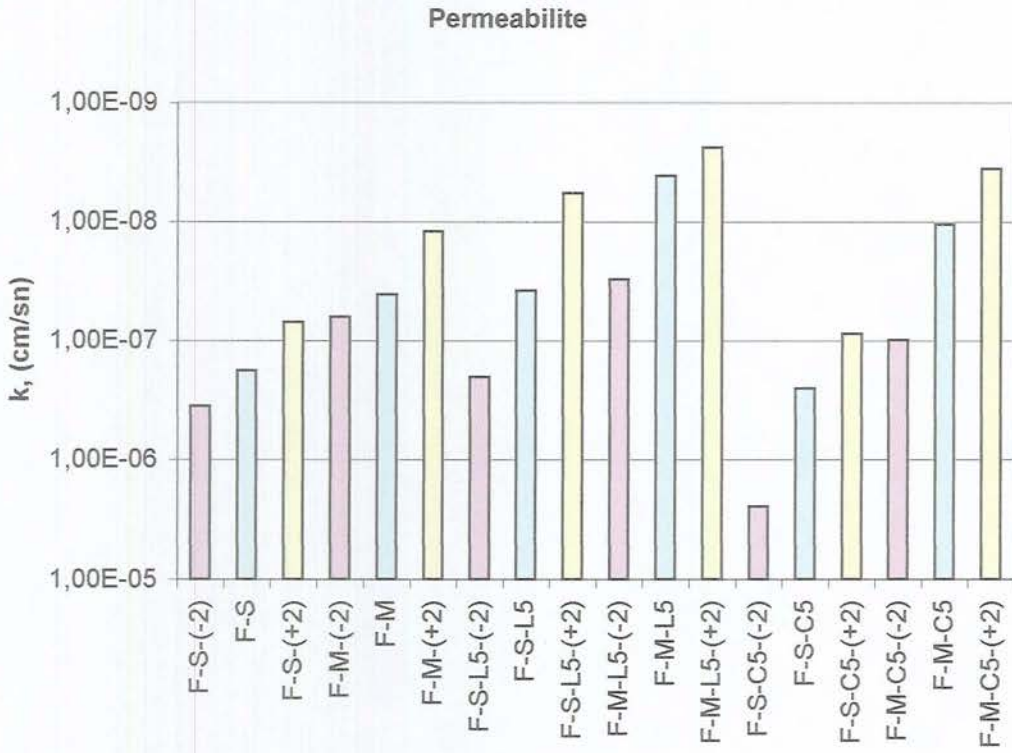
Numuneleri doygunlaştırırken, şişme miktarındaki değişimler de kaydedilmiştir. Tablo 7.17’de numunelerin şişme yüzdeleri verilmiştir. Buna göre kalıp kumuna %5 oranda ilave edilen kirecin, iyi bir stabilizör olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 7.17 Numunelere ait şişme yüzdeleri

7.2.2.4. Permeabilite (Hidrolik Geçirgenlik) katsayısı

Taze ve 7 gün kür sonucunda permeabilite deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda standart proktorla sıkıştırılan kalıp kumu numunesinin permeabilitesinin 10^{-7} cm/sn mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Atık kalıp kumunun içerdiği kil miktarı değişkenlik gösterdiğinden sonuçlarda da farklılık oluşabilmektedir. Deneylerin permeabilite katsayıları Şekil 7.18 ve Şekil 7.19'da verilmiştir. Şekil 7.20'de bir haftalık kür sonrası permeabilite değerleri verilmiştir.



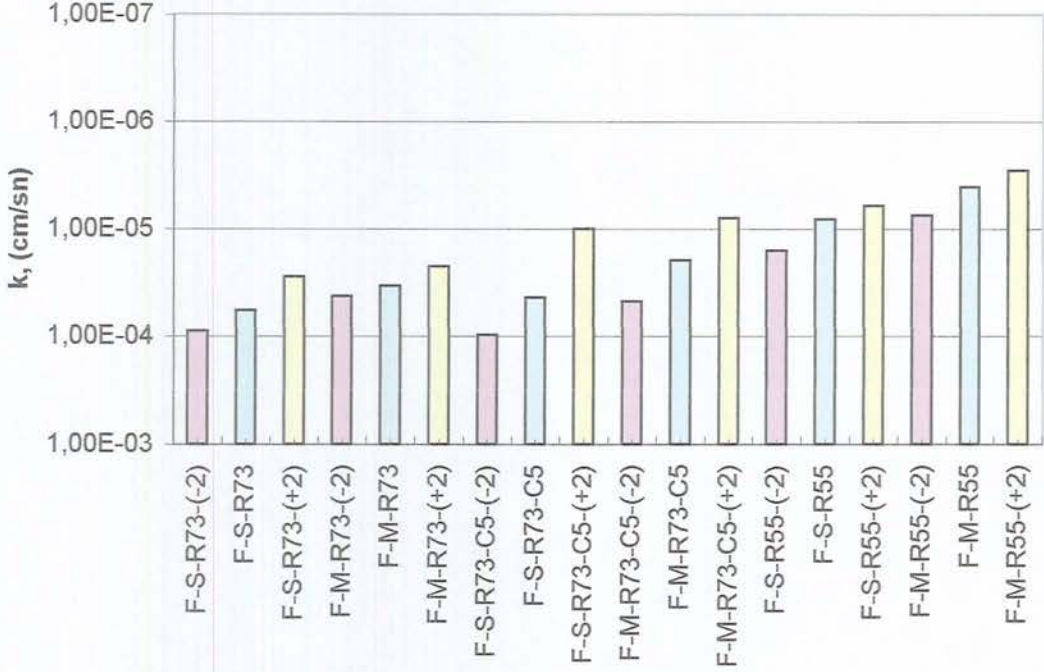
Şekil 7.18 Kırmataşsız Numunelerin Permeabilite Katsayıları (Deneyler, numuneler sıkıştırıldıktan hemen sonra yapılmıştır)

Permeabilite deneyleri sonucunda, optimumun ıslak tarafında sıkıştırılan numunelerin daha geçirimsiz oldukları, optimumun kuru tarafında sıkıştırılan numunelerin de daha geçirimli oldukları görülmüştür.

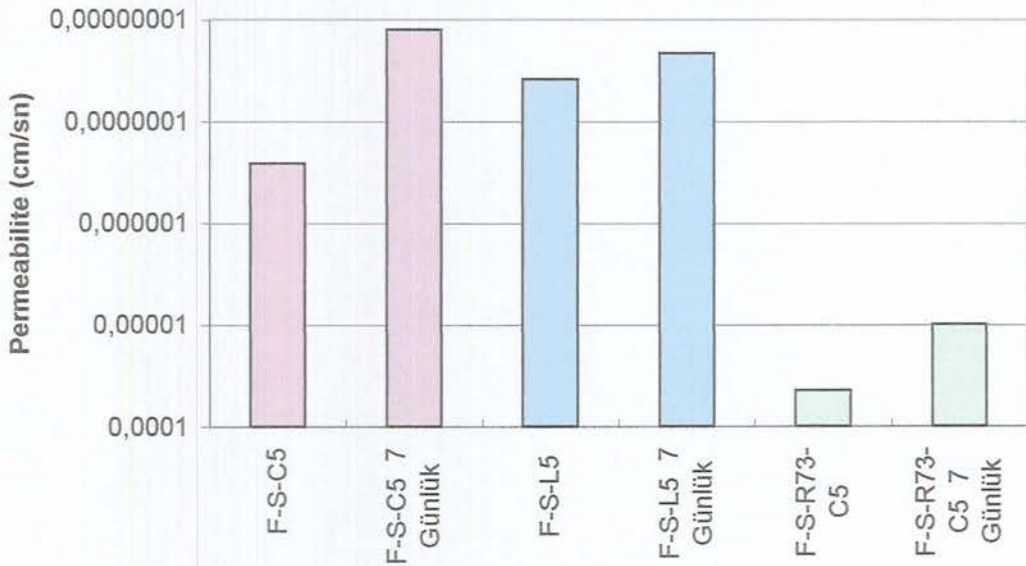
Kimyasal stabilizasyon yapılan taze numunelerde, kür süresi yeterli olmadığından önemli değişiklikler yoktur.

Sıkıştırma enerjisinin artırılmasıyla, boşluklar azalarak geçirimliliği düşürmektedir.

Kırmataşlı karışımların geçirgenlikleri, kırmataşsız numunelere göre daha yüksek elde edilmiştir.



Şekil 7.19 Kırmataşlı Numunelerin Permeabilite Katsayıları (Deneyler, numuneler sıkıştırıldıktan hemen sonra yapılmıştır)



Şekil 7.20 Bir Haftalık Kür Sonrası Permeabilite Değerleri

7.3.Fiziko - Kimyasal Özellikler

7.3.1. pH

Tablo 7.6 'da, kimyasal stabilizasyon yapılan numunelerin, deneyler sonucunda elde edilen pH değerleri gösterilmiştir. pH değerleri kireç, çimento ilavesi ile artmıştır.

Tablo 7.6. pH değerleri

Malzeme	pH Değeri
Kalıp Kumu	9.67
Kalıp Kumu + %5 Kireç	12.62
Kalıp Kumu + %5 Çimento	12.08

7.3.2. Elektriksel İletkenlik

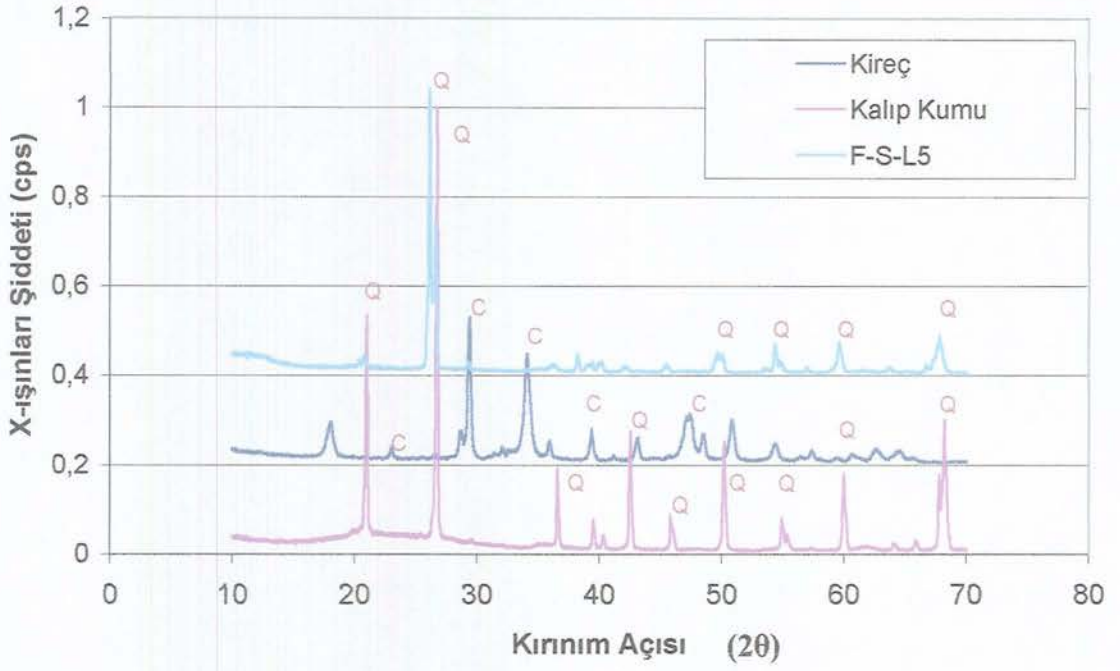
Tablo 7.7'de kalıp kumu ve kimyasal stabilizasyon yapılmış karışımların, elektriksel iletkenlikleri verilmiştir. Kireç ve çimento ilavesi ile elektriksel iletkenlik artmıştır.

Tablo 7.7 Elektriksel İletkenlik Değerleri

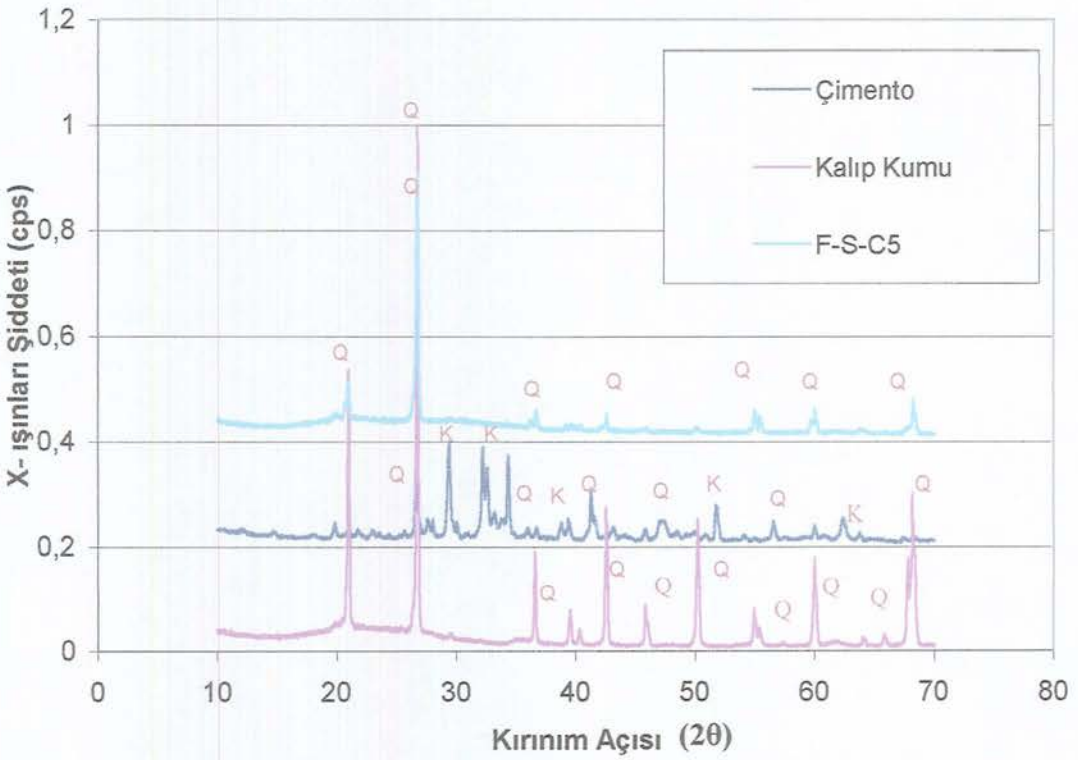
Malzeme	Elektriksel İletkenlik mS/cm
F-S	1,12
F-S-L5	3,13
F-S-C5	4,89

7.3.3. X Işını Kırınımı deneyi (XRD)

Kalıp kumu-Çimento ve Kalıp kumu – Kireç karışımlarının, X ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle mineral içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 7.21 ve 7.22'dedir. Şekilde görüldüğü gibi, kalıp kumu numuneleri yüksek oranda kuvars ihtiva etmektedir. Stabilize edilmiş kalıp kumu karışımlarında, kireçteki kalsit ve çimento bünyesindeki kalsiyum silikat, çok düşük miktarlarda görülmektedir.



Şekil 7.21. Kalıp Kumı-Kireç X ışınları Kırınımı (XRD) (C: Kalsit (CaCO_3) Q: Kuvars (SiO_2))



Şekil 7.22. Kalıp Kumı-Çimento X Işınları Kırınımı (XRD)

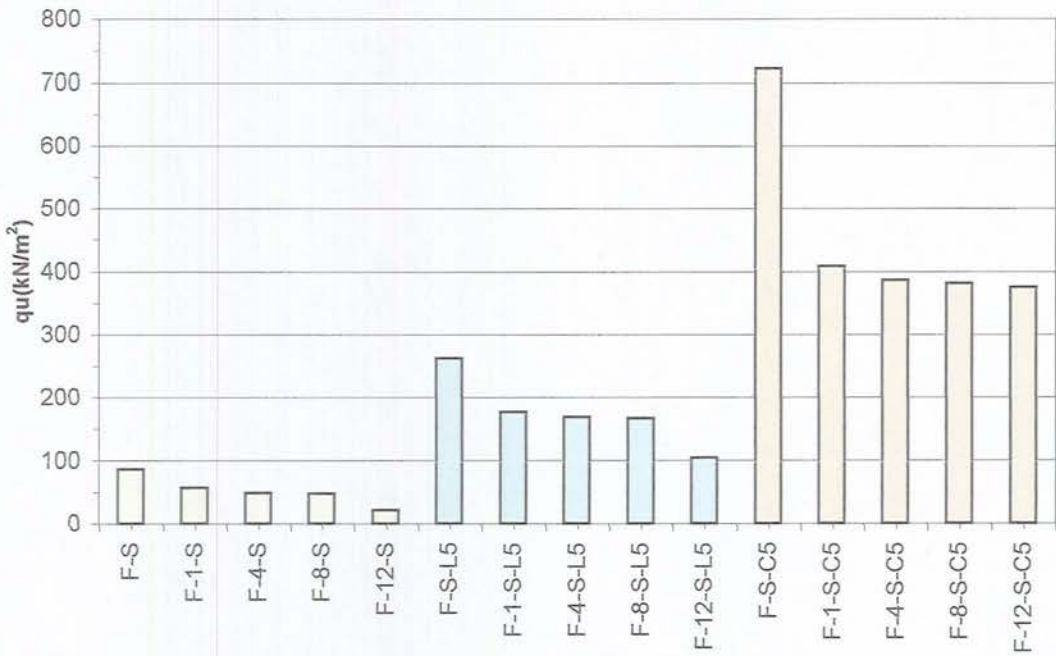
(K: Kalsiyum Silikat (Ca_3SiO_5) Q:Kuvars (SiO_2))

7.4. Çevresel şartlara ait özellikler

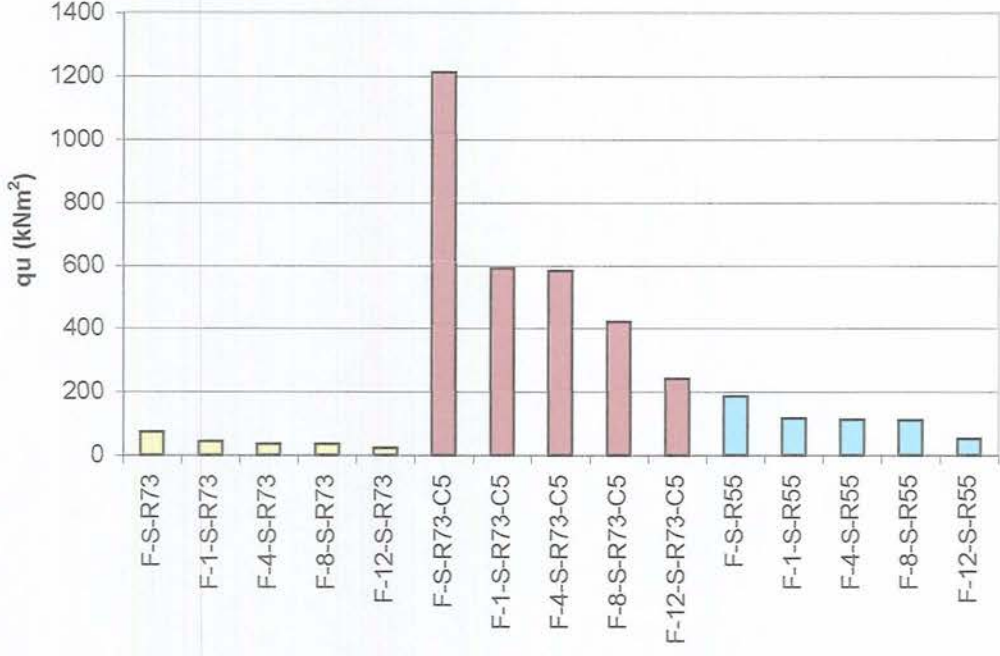
Standart proktorla, optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelere ait donma çözülme deneyleri 1,4,8 ve 12 çevrim olmak üzere yapılmıştır. Numunelere bir haftalık kürden sonra donma çözülme uygulanmıştır. Durabilite şartlarını değerlendirmek amacı ile serbest basınç, CBR ve permeabilite deneyleri 1,4,8,12 çevrimden sonra yapılmıştır.

Donma çözülme sonrası CBR, Serbest Basınç ve Permeabilite değerleri Şekil 7.23, Şekil 7.24, Şekil 7.25, Şekil 7.26, Şekil 7.27 ve Şekil 7.28 'de gösterilmiştir. Donma çözülme sonrasındaki serbest basınç ve CBR değerlerinde, en büyük mukavemet düşüşleri 1. çevrimden sonra olmuştur. Bundan sonraki çevrimlerde önemli değişiklikler meydana gelmemiştir.

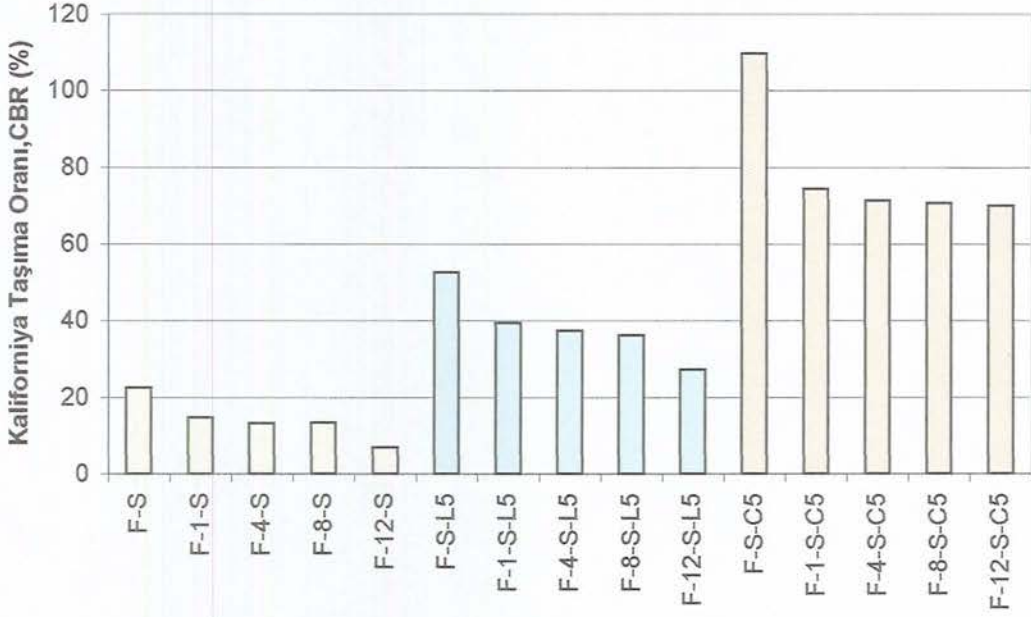
Donma çözülme sonrasındaki permeabilite değerlerinde artış meydana gelmiştir (Şekil 7.23, Şekil 7.24).



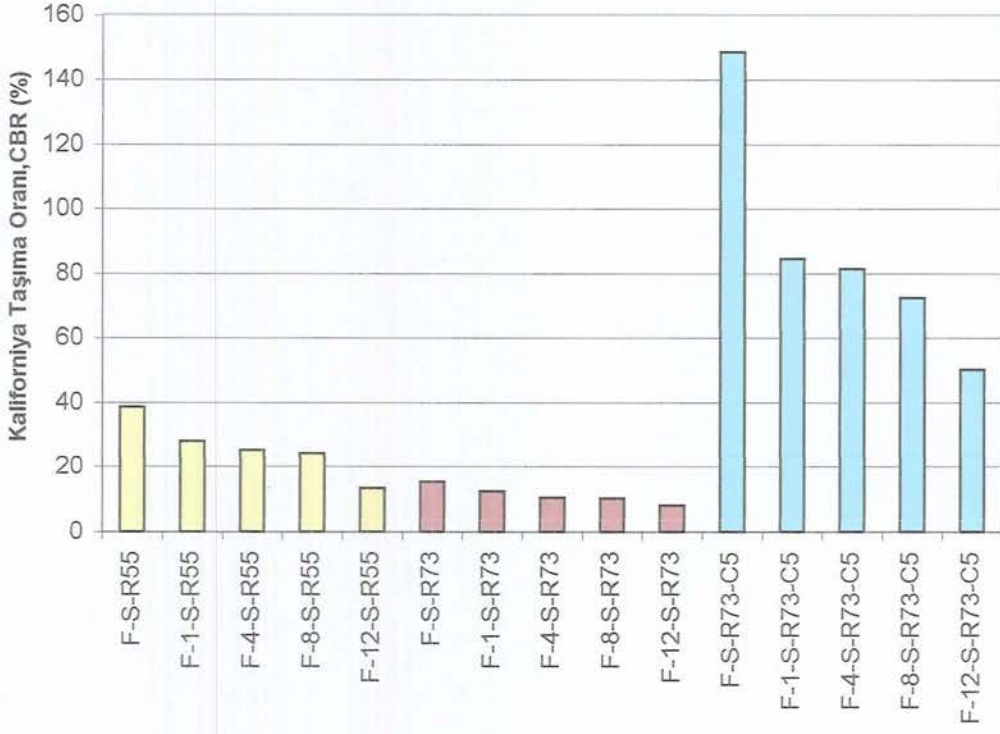
Şekil 7.23 Kırmataşsız Numunelerin Donma Çözülme Sonrası Serbest Basınç Dayanımı



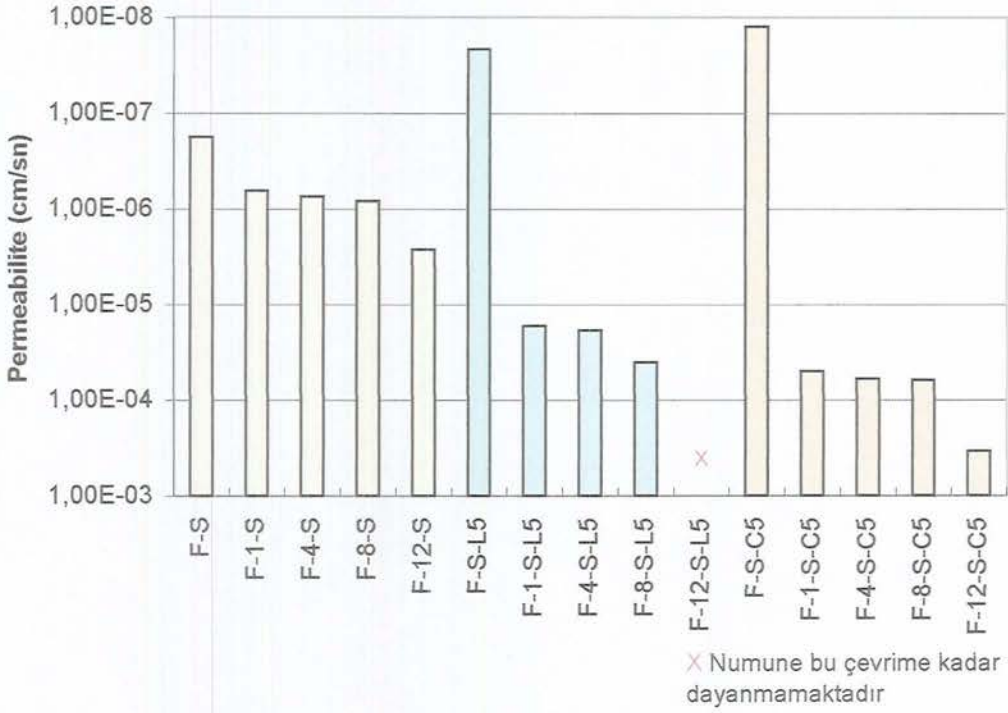
Şekil 7.24 Kırmataşlı Numunelerin Donma Çözülme Sonrası Serbest Basınç Dayanımı



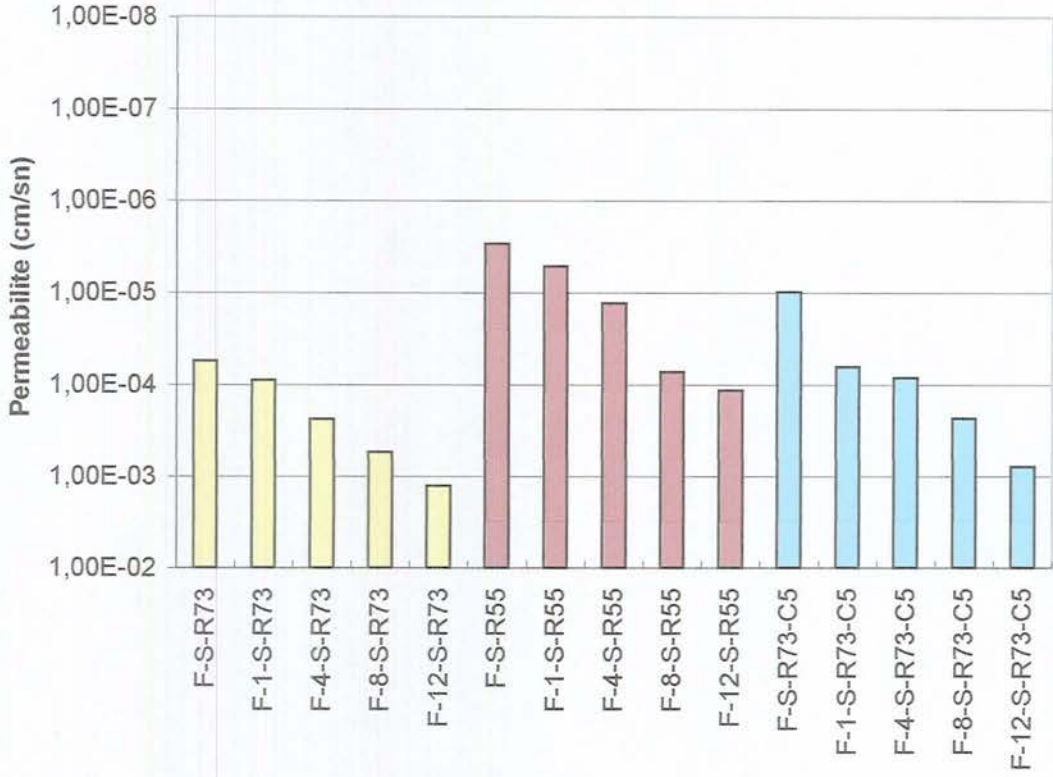
Şekil 7.25 Kırmataşsız Numunelerin Donma Çözülme Sonrası CBR Değerleri



Şekil 7.26 Kırmataşlı Numunelerin Donma Çözülme Sonrası CBR Değerleri



Şekil 7.27 Kırmataşsız Numunelerin Donma Çözülme Sonrası Permeabilite Değerleri

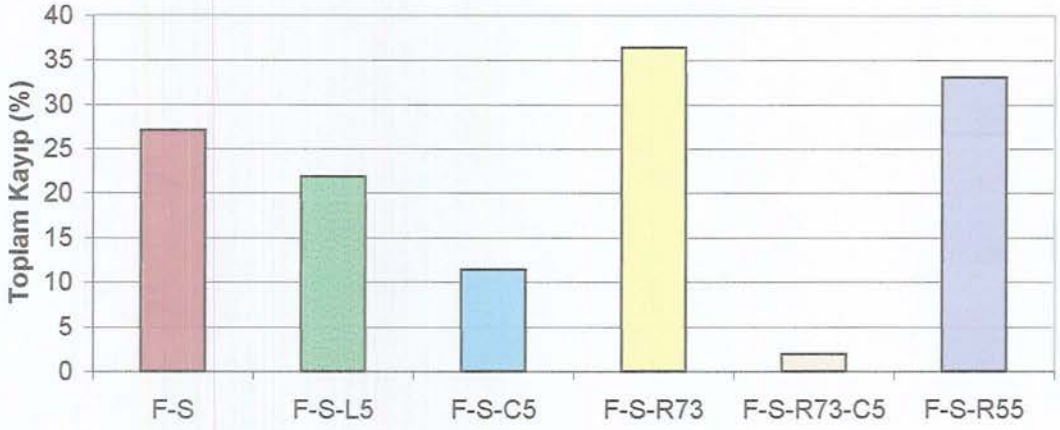


Şekil 7.28 Kırmataşlı Numunelerin Donma Çözülme Sonrası Permeabilite Değerleri

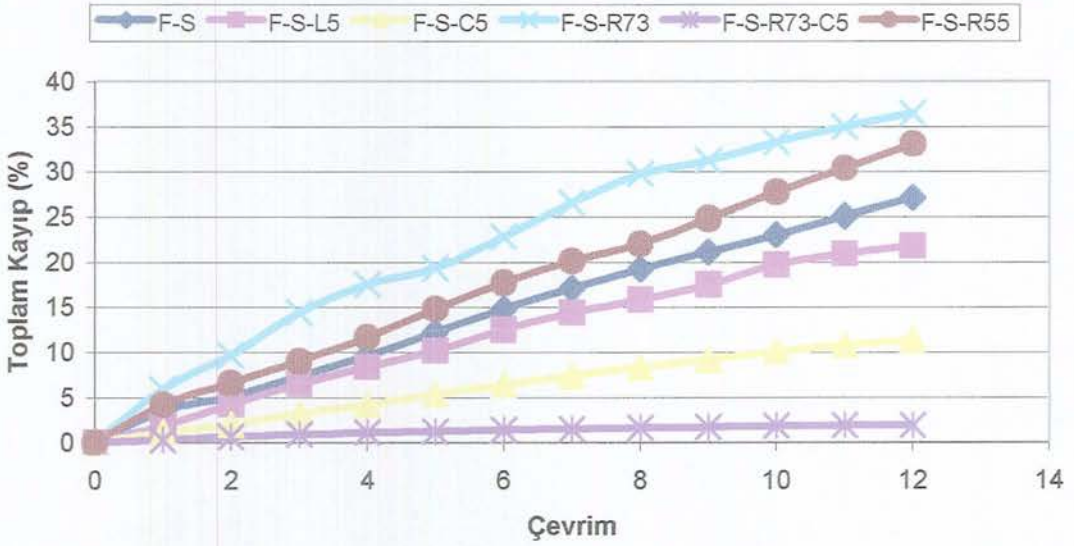
7.4.1. Donma – Çözülme sonrası ağırlık kaybı

Literatürde, yol alt malzemesi olarak kullanılacak malzemenin 12 çevrim sonundaki kaybının ağırlıkça %10 – 15 arasında olması istenmektedir [32].

Şekil 7.29’de ve Şekil 7.30’da görüldüğü gibi çimento ile stabilizasyon yapılan karışımlarda ağırlık kaybı %2-12 arasındadır. Diğer karışımlarda kaybın büyük olmasının nedeni olarak bağlayıcı malzemenin yetersiz olması veya sıkıştırma enerjisinin yetersiz olması gösterilebilir.



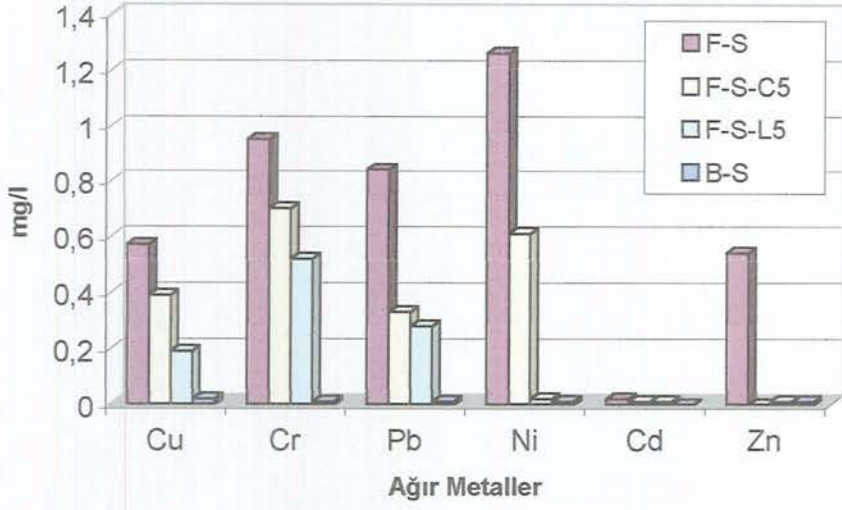
Şekil 7.29 Numune Tipine Bağlı Ağırlık Kayıpları



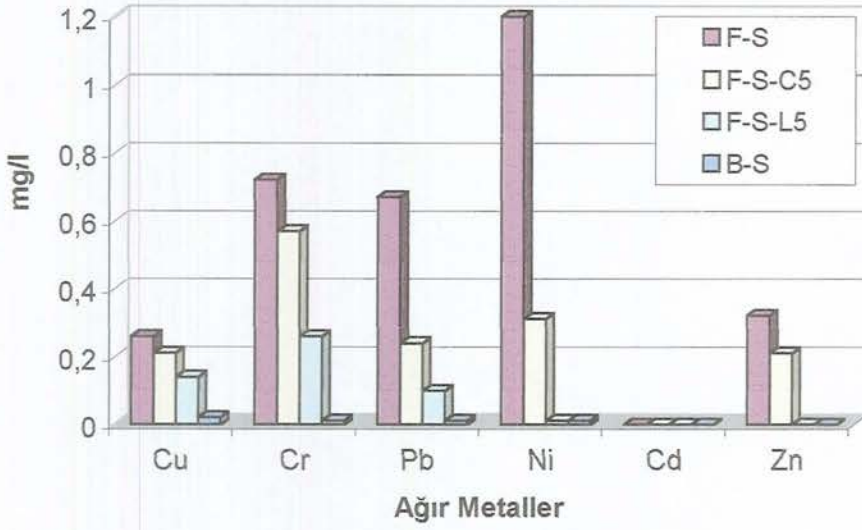
Şekil 7.30 Donma Çözülme Çevrimi ile Artan Ağırlık Kayıpları

7.4.2. Sızıntı (leachate) deneyi

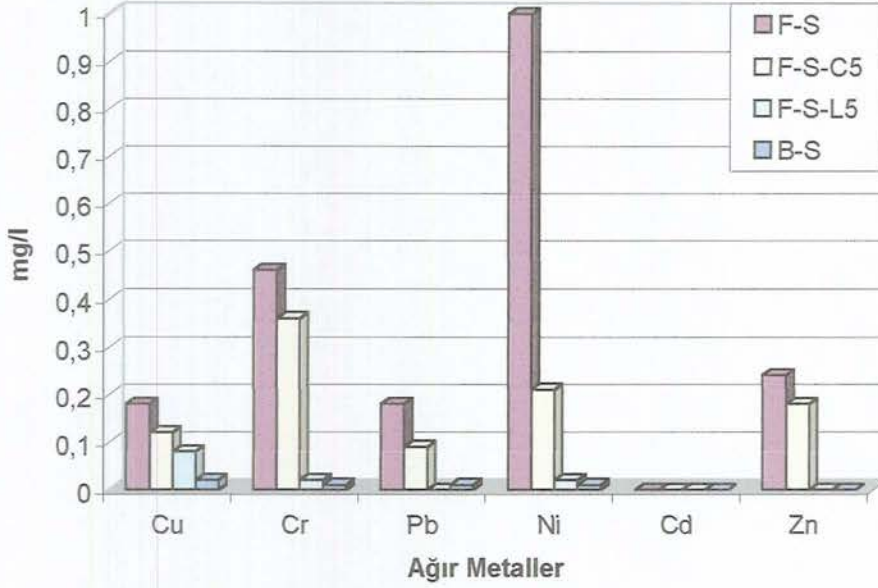
Permeabilite deney düzeneğine yerleştirilen numuneler saf su ile doygun hale getirilmiştir. 24 saatlik dilimler içinde toplanan sızıntı sularındaki toplam metal miktarı, atomik absorpsiyon aleti ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Şekil 7.31, Şekil 7.32 ve Şekil 7.33'de verilmiştir. Yine sızıntı sularının, pH ve elektriksel iletkenlikleri ölçülmüştür (Şekil 7.34, Şekil 7.35).



Şekil 7.31. 24 Saat Sonunda Sızıntı Sularındaki Ağır Metaller



Şekil 7.32. 48 Saat Sonunda Sızıntı Sularındaki Ağır Metaller



Şekil 7.33. 72 Saat Sonunda Sızıntı Sularındaki Ağır Metaller

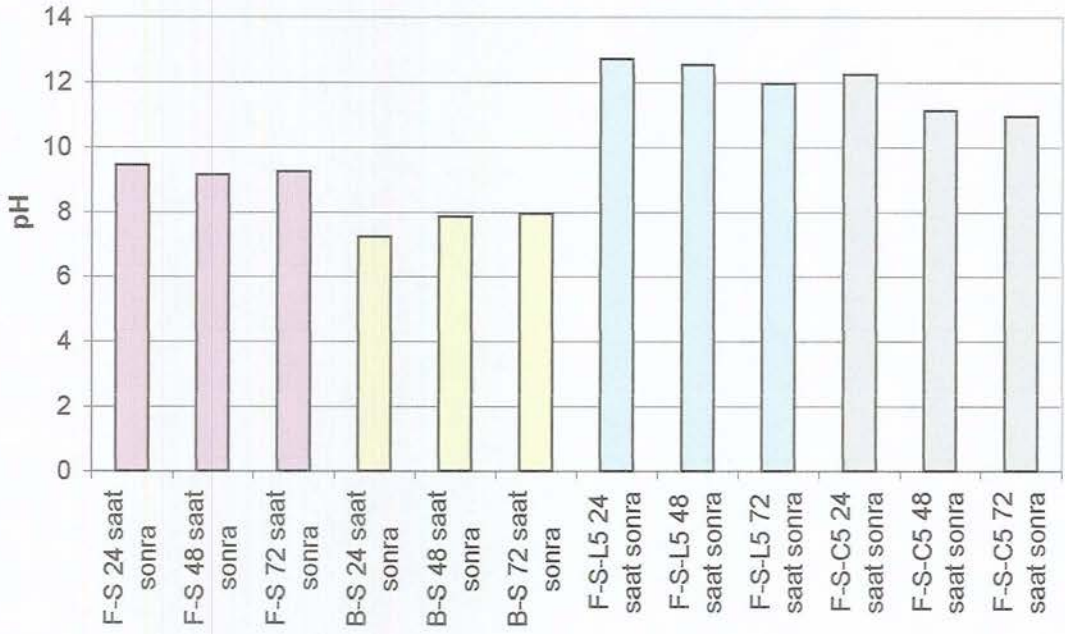
Sızıntı suları için müsaade edilen maksimum metal miktarları Tablo 7.8 'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, kalıp kumu sızıntı suyunun, limit değerlerin altında olduğu görülmektedir. Ancak ağır metal miktarlarını, minimuma indirmek amacıyla kimyasal stabilizasyon yapılmıştır. Kalıp kumunun ağırlıkça %5'i kadar kireç ve çimento katkısı ile değerler düşürülmüştür.

Tablo 7.8 Sızıntı Suyu (leachet) için metallerin, müsaade edilen maksimum limitleri [11,34]

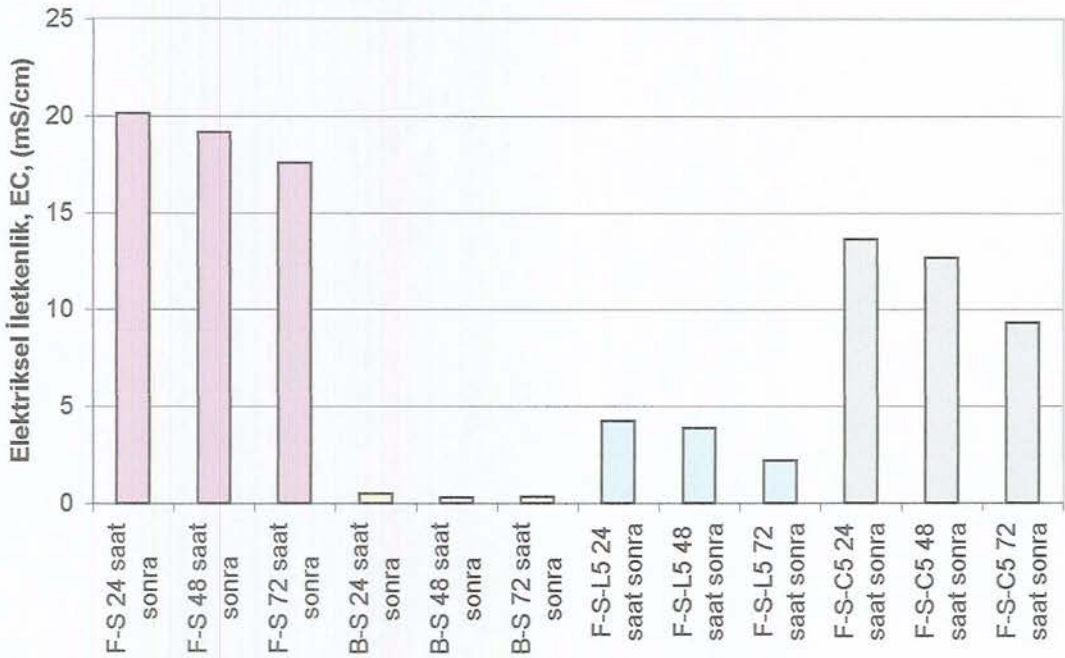
Metaller	EP Toxicity (mg/l)
Bakır (Cu)	-----
Krom (Cr)	5,0
Kurşun (Pb)	5.0
Nikel (Ni)	-----
Kadmiyum (Cd)	1,0
Çinko (Zn)	-----

Karışıma kireç ve çimento ilavesi, pH değerini arttırmaktadır. Yüksek pH değeri ağır metallerin zemin içinde dağılmasını azaltmaktadır [11]. Şekil 7.34'te pH değerleri verilmiştir.

Elektriksel iletkenlikler, kireç ve çimento ilavesi ile azalmaktadır (Şekil 7.35).



Şekil 7.34. Sızıntı Sularındaki pH Değerleri



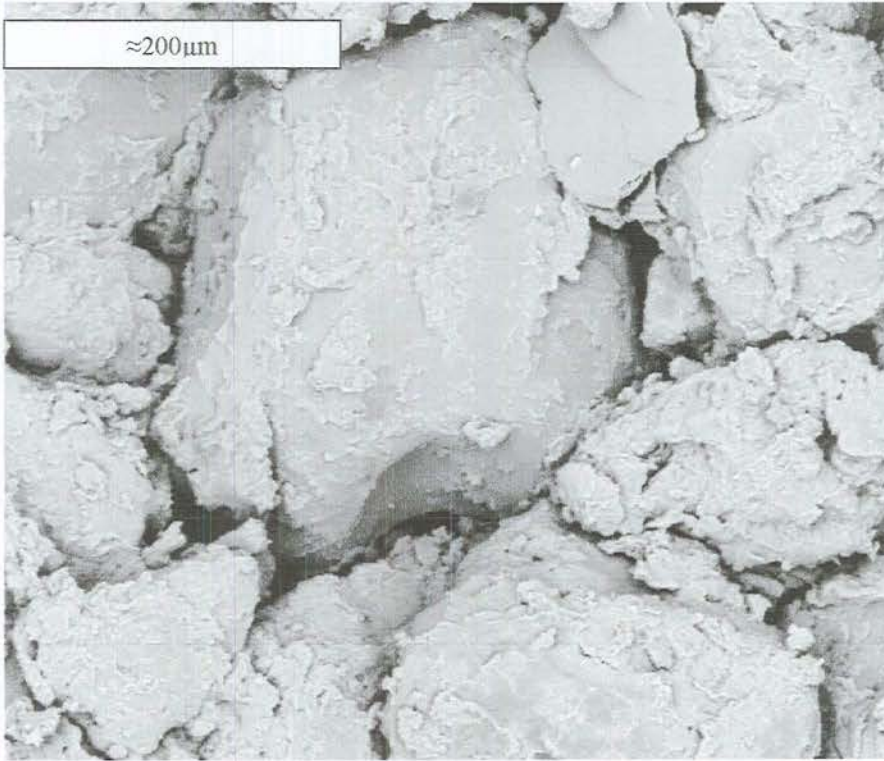
Şekil 7.35. Sızıntı Sularındaki Elektriksel İletkenlik Değerleri

7.5. Mikro-Yapısal özellikler

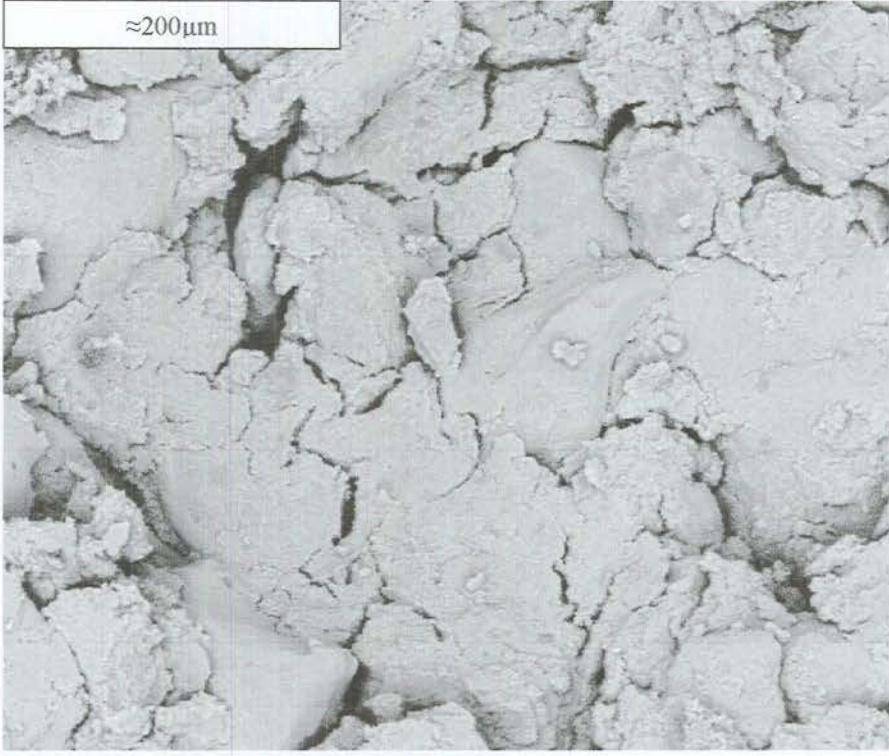
Bu bölümde, kalıp kumu ve kalıp kumu karışımlarının SEM fotoğrafları görülmektedir (Şekil 7.36, Şekil 7.37 ve Şekil 7.38). Numuneler taze olarak sıkıştırılıp, fotoğrafları çekilmiştir.

Kompaksiyon sonrasında, kalıp kumunun sıkıştırılmadan önceki haline göre (Şekil 5.9), daha yoğun bir yapı oluşmuştur. Şekil 7.36 ve Şekil 7.37 karşılaştırıldığında, kireç katkılı kalıp kumu numunesinin, katkısız kalıp kumu numunesine göre, daha farklı bir yapı gösterdiği görülmektedir. Kireç stabilizasyonu sonucunda topaklanmalar net bir şekilde görülmektedir.

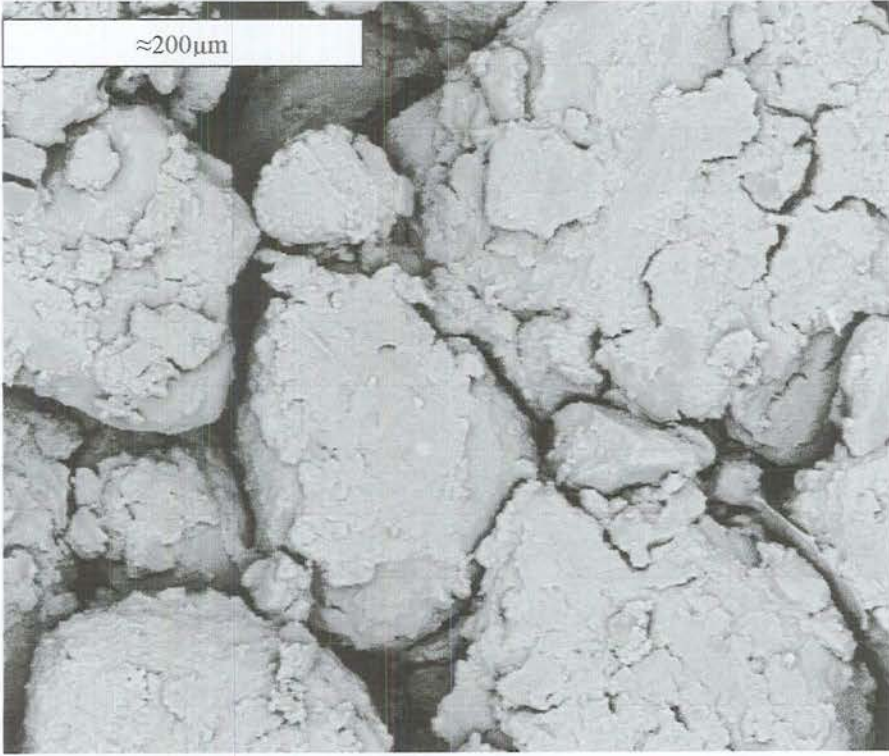
Çimentolu numunelerde ise başlangıca göre bir değişiklik görülmemektedir. Ancak kür süresi sonrasında çimento jeli ve dane yüzeyleri arasında adhezyon kuvvetleri oluşarak zemin tanecikleri birbirine bağlanmıştır.



Şekil 7.36. Kalıp kumu numunesine ait SEM fotoğrafı (x200)



Şekil 7.37. Kalıp kumu- %5 Kireç numunesine ait SEM fotoğrafı (x200)



Şekil 7.38. Kalıp kumu- %5 Çimento numunesine ait SEM fotoğrafı (x200)

8. PRATİK UYGULAMA

8.1. Giriş

Yol üst yapısının projelendirilmesinde esas amaç, proje süresince yolun üzerinden geçecek olan trafiği taşıyabilen, çevre ve iklim şartlarına dayanıklı bir üstyapı kalınlığının tayin edilmesidir. Esnek yol üst yapısı, alttemel, temel ve kaplama tabakalarının birbiri üzerine inşa edilmesiyle oluşturulan tabakalı bir sistemdir. Bu tabakalar hakkında ikinci bölümde detaylı bilgiler verilmiştir. Bu bölümde yol üst yapısı sınıflandırılarak, kalıp kumu kullanılan esnek yol üst yapısının, tabaka kalınlıkları belirlenmiştir.

8.2. Esnek Yol Üstyapısının Projelendirilmesinde Kullanılan Yöntemler

Esnek yol üst yapısının projelendirilmesi için henüz ortak kullanılan bir yöntem yoktur. Çeşitli ülke ve kuruluşlar, farklı yöntemler kullanmış ve kullanmaktadırlar. Projelendirmede önerilen yöntemleri, zeminin fiziksel özelliklerine dayanan deneysel yöntemler, zeminin mukavemet değerlerine dayanan deneysel yöntemler ve yarı teorik yöntemler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [4].

Bu yöntemler içerisinde Türkiye'de, önceleri, zeminin fiziksel özelliklerine dayanan deneysel yöntemlerden grup indisi ve zeminin mukavemet değerine dayanan deneysel yöntemlerden CBR yöntemi kullanılmaktaydı. Bugün, birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de AASHTO yöntemi kullanılmaktadır. Mevcut yöntemler içerisinde en gelişmiş olan bu yöntemdir. AASHTO yöntemi ile üstyapı tabaka kalınlığı hesabında; yolun ekonomik hizmet ömrü yanında, yolun servis kabiliyeti, trafik hacmi, dingil yükü, dingil yüklerinin tekerrür sayısı, bölgesel iklim faktörleri, taban zemininin taşıma gücü ve üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin direnç özellikleri gibi parametreler dikkate alınmaktadır. Aşağıda projelendirmede kullanılan yöntemler kısaca özetlenmiştir.

8.2.1. Zeminin fiziksel özelliklerine dayanan deneysel yöntemler

Bu yöntemlerden en çok bilineni "Grup İndisi Yöntemi"dir. Grup indisi, değişik zemin tiplerinin 0.075 mm'den ince bölümünün yüzdesi ile, likit ve plastik limitinden bulunmaktadır. Bu yöntemde yol gövdesi, alttemel ve üzerinde bulunan temel ve kaplama tabakası olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Temel ve kaplama kalınlığı trafik yüküne, alttemele verilecek olan kalınlık ise zemin cinsine göre hesaplanmaktadır. Grup indisi yöntemi yalnız ağır trafik için geçerli olduğundan ve tabaka kalınlıkları ekonomik olarak saptanamadığından uygulama alanı kısıtlı kalmıştır. Kalınlık saptanması, daha çok ön tasarım ve ön araştırma çalışmaları için uygun olmaktadır [4].

8.2.2. Zeminin mukavemet değerlerine dayanan deneysel yöntemler

8.2.2.1. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) yöntemi

CBR yöntemi, zeminin mukavemet özelliklerini kullanarak geliştirilen bir yöntemdir. Bu yöntem kolay uygulanabilirliğinden dolayı dünyanın birçok yerinde geniş uygulama alanı bulmuştur. Birçok ülke ve kuruluşları ilk CBR yönteminde bazı küçük değişiklikler yaparak tasarımlarını buna göre gerçekleştirmişlerdir [4].

8.2.2.2. Hveem stabilometre yöntemi

Üç eksenli basınç deneyi yapılarak zeminin mukavemet değeri hesaplanmaktadır, düşey ve yatay basınçlar arasındaki ilişki kontrollü koşullar altında belirlenmekte ve "R" stabilite katsayısını saptamak için bu değerlere bağlı olarak deneysel formüller kullanılmaktadır. Gerekli kalınlıklar "R" değerinin fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Bu değer geliştirilmiş CBR yöntemindeki abaklarla benzerliği vardır. Karmaşıklığından dolayı bu yöntem Avrupa ülkelerinde kullanılmamıştır. Ayrıntılı laboratuvar gereçleri ile CBR ve "R" değerleri arasında birçok bağıntıların bilinmesini gerektirmektedir [4].

8.2.3. Yarı teorik yöntemler

8.2.3.1. Makaslama kuvveti yöntemi

Yöntem, serbest basınç direnci gösterebilen kohezyonlu zeminlere uygulanabilmektedir. Makaslama kuvveti yöntemi bir basınç altında gerilmelerin sebep olduğu bozulmalara benzer bir gerilme düzeyini göstermektedir. Bu sınırlamadan ve trafiğin karışık yük-dingil dağılımını içermediğinden bu yöntem daha çok yoldaki bozuklukların araştırılmasında kullanışlı olmaktadır [4].

8.2.3.2. Shell yöntemi

Esnek kaplama tasarımında kullanılmak üzere, üç tabakalı sistemlerin, Jones tarafından yapılmış çözümüne, Peattie'nin bazı uyarlamalar yaparak geliştirmiş olduğu bir yöntemdir. Zayıf temelli kaplamaların hesabında kullanılamamaktadır.

8.2.3.3. İngiliz yöntemi

Kaplama yüzeyinde meydana gelen aşırı gerilmeler, kaplama ve yol yapı sistemini tümüyle bozabilmektedir. Bu gerilmeleri karşılayan uygun bir güvenlik katsayısı kullanılarak bozulmalar önlenebilir. İlk İngiliz yöntemi böyle bir yaklaşımla oluşturulmuştur [4].

Kaplama tasarımında;

1. Tasarım ömrü süresince, ticari araç ve yığılımlı sayısının saptanması,
2. Standart dingil eşdeğerlik faktörünün saptanması,
3. Alttemel kalınlığının saptanması,
4. Temel ve kaplama kalınlığının saptanması,
5. Kaplama bileşenlerinin en ekonomik şekilde hizmet etmesi için gerekli işlemler yapılır.

Basitleştirilmiş Tasarım Yöntemi, İngiltere koşulları için bitüm temelli kaplamaların tasarımına bağlı olarak Nottingham Üniversitesi tarafından

geliştirilmiştir. Ana amaç birçok abak ve eşitliklerden yararlanılarak tasarımı gerçekleştirmektir [4].

8.2.3.4. Kanada yöntemi

İlke olarak plaka-taşıma analizinden geliştirilmiştir. Bu yöntem gerekli kaplama kalınlığını, uygulanmış yükün ve zemin mukavemetinin bir fonksiyonu olarak ifade etmektedir. Adım adım yaklaşımla bu yöntem çok tabakalı bir sistemi eşdeğer iki tabakalı bir sisteme dönüştürebilmektedir. Bu olgudan hareketle belirli kalınlıktaki bir malzemeyi eşdeğer kalınlıktaki bir başka malzemeye dönüştürme kavramı ortaya çıkmıştır [4].

8.2.3.5. AASHTO yöntemi

AASHTO kaplama tasarımı yöntemi yol deney programlarının doğal bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Kaplama performansı ve yeteneği "Hizmet Yeteneği indisi" olarak ifade edilmektedir. Hizmet yeteneğindeki değişim, zemin durumu ve kaplama kalınlığı dahil, yukarıda sözü edilen etkenlerin bir fonksiyonu olmaktadır. Trafik indisi, yük tekrarı etki değerini göstermektedir. Tabaka eşdeğerlik kavramı ise, trafik indisi bilindiğinde bir başka tabaka ile verilen başka bir tabaka kalınlığının saptanmasını ortaya koymaktadır. AASHTO Metodu kısım 8.3'te detaylı olarak anlatılmıştır [4].

8.2.3.6. Asfalt Enstitüsü yöntemi

WASHO yol deneyimi bilgileri ile AASHTO yol deney değerlerinin teorik ilişkilerinden geliştirilmiştir. Trafik tipi ve hacmi eşdeğer tekerlek yükü, CBR değeri ile ifade edilen zemin mukavemeti stabilölçer "R" değeri veya taşıma plakası deney değerlerinin fonksiyonu olan bir yöntemdir. Tasarımda çevre etkileri, drenaj don etkisi ve diğer olağan iklim koşulları göz önünde tutulmaktadır [4].

8.3. AASHTO Yöntemi

Bu metot, Ottawa'da (Illinois-ABD) AASHTO tarafından yapılan deneme yolu sonuçlarına dayanılarak hazırlanmış bir dizayn metodunu anlatmaktadır. Bu yolun inşaatına Ağustos 1956 'da başlanıp, üzerindeki deneme trafiği 15 Ekim 1958-30 Kasım 1960 arasında faaliyette olan AASHTO deneme yolundan elde edilen neticelere dayanılarak yol üstyapılarının dizaynı (tasarımı) hazırlanmıştır [4].

8.3.1. AASHTO dizayn metodu (1972)

AASHTO dizayn metodunda, yapısal dizayn ve yükleme şartlarının kaplamaya olan etkilerinin analizleri ve kaplama performansının değişimi esas alınmaktadır. Bir kaplamanın performansı, taşıtların konforlu ve emniyetli olarak trafikte seyredebilmesinin göstergesidir. Bu dizayn metodunda performans 'Servis Yeteneği' kavramı ile tanımlanmaktadır. AASHTO dizayn metodunda kaplamanın başlangıç ve belirli kullanım sonundaki servis yeteneğine göre performans değerlendirilmesi yapılmaktadır. Mevcut servis yeteneği indeksi (PSI) For. 8.1'de verilmiştir [4].

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log(1 + \overline{SV}) - 1,38 \overline{RD}^2 - 0,01 \sqrt{C + P} \quad (8.1)$$

Burada,

\overline{RD} = Her iki teker izindeki ortalama derinlik, inç

\overline{SV} = Ortalama eğim değişimi * 10^6 (Boyuna öndülasyon ölçümü)

C: Çatlaklar (Her 1000 ft² 'de yorulma ve diğer tip çatlakların alanı)

P: Yamalar (Her 1000 ft² 'de yapılan yama alanı)

$$\overline{SV} = \frac{\sum X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum X_i)^2}{n-1} \times 10^6 \quad (8.2)$$

Burada X_i , i. eğim ölçümü ve n ise yapılan toplam ölçüm sayısıdır. \overline{SV} kaplamanın pürüzlülüğünü ifade etmektedir.

AASHTO yol testlerinden, kaplamanın performansının, trafik ve çevresel etkilerle azaldığı görülmüştür. Servis yeteneği indeksi 0-5 arasında değişen bir değerdir. Kaplama yeni yapıldığı zamanlarda servis yeteneği 5 iken zamanla

azalarak nihai değerine ulaşmaktadır. Kaplama performansı azaldığında, kaplama ömrünün tamamlandığı kabul edilmektedir. Kaplama üzerine takviye tabakası yapılarak performansı arttırılmaktadır. Yeni kaplamanın servis yeteneği indeksi 4.2-4.5 arasında değişmektedir. Ancak dizayn denklemlerinde 4,2 olarak alınmaktadır. Nihai servis yeteneği indeksi (P_t) yolun standardına göre seçilmektedir. Ülkemizde duble yollarda $P_t = 2.5$, daha düşük standartlı yollarda $P_t = 2,0$ olarak alınmaktadır. Üst yapı sayısı (SN) For. 8.3. 'teki gibi hesaplanmaktadır [4].

$$SN = 0,44 D_1 + 0,14 D_2 + 0,11 D_3 \quad (8.3)$$

Burada;

D_1 : Kaplama kalınlığı, cm (min 5 cm)

D_2 : Temel Kalınlığı, cm (min 7.5 cm)

D_3 : Alttemel kalınlığı, cm

Burada SN izafi mukavemet katsayılarının, tabaka kalınlıkları ile çarpılmasıyla bulunmaktadır. İzafi mukavemet katsayıları tabakanın sahip olduğu malzemenin kalitesine göre farklılık göstermektedir.

Esnek kaplamaların dizaynı için 1972 Dizayn Rehberi'nde For. 8.4 kullanılmıştır.

$$\log W_{8,2t} = 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log[(4,2 - P_t)/(4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094/(SN + 1)^{5,19}]} \quad (8.4)$$

Burada;

$W_{8,2t}$: 8,2 ton tek dingil yükünün nihai servis yeteneğine (P_t) erişmesi için gerekli toplam tekerrür sayısı

SN: Üstyapı sayısı

P_t : Nihai servis yeteneği indeksidir.

Bu formülde başlangıç servis yeteneği 4,2 ve kaplamanın ömrünü tamamladığında servis yeteneğinin en fazla 1,5 olacağı kabul edilmiştir. Her bölgenin çevresel koşulları ile zemin taşıma gücü farklı olduğundan, bu formüle bölgesel faktör (R) ile zemin taşıma gücü (S) parametresi ilave edildiğinde kaplama kalınlığı, yol testinin yapıldığı bölgeden ve zemin şartlarından farklı olduğu durumlarda da hesaplanmaktadır. Şu halde gerçek dizayn formülü For.8.5'teki gibi olmaktadır [4].

$$\log W_{8,2t} = 9,36 \log(\overline{SN} + 1) - 0,20 + \frac{\log[(4,2 - P_t)/(4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094/(SN + 1)^{5,19}]} + \log \frac{1}{R} + 0,372(S_i - 3) \quad (8.5)$$

\overline{SN} : Düzeltilmiş üstyapı sayısı

S_i : Kaplamanın üzerine oturduğu zeminin taşıma gücü

R : Bölgesel faktör

AASHTO yol testinin yapıldığı bölgedeki zeminin taşıma gücü değeri $S_0=3$ olarak alınmıştır. Daha sonra kırmataştan bir zemin tabanı için testler devam ettirilerek kaplamanın performansı gözlenmiştir. Bu tip zemin için $S=10$ olarak alınmış ve ara değerler doğrusal ilişki ile saptanmıştır. Ayrıca zeminin CBR değeri ile logaritmik bir ilişki ortaya konmuştur.

$$\log W_{8,2t} = \log N'_{8,2t} + K (S_i - S_0) \quad (8.6)$$

S_i = Herhangi bir durumda zeminin taşıma gücü değeri

S_0 = Yolun test şartlarındaki zemin taşıma gücü değeri

$W_{8,2t}$ = Toplan dingil yükü sayısı

$N'_{8,2t}$ = Yol test şartları için standart dingil yükü sayısı

K = Regresyon sabiti (=0,372)

Tablo 8.1. Bölgesel Faktör Değerleri (AASHTO)

Zemin Tabanı Durumu	R
Zemin tabanı 12.5 cm veya daha fazla dona maruz	0,2-1,0
Zemin tabanı kuru (yaz veya sonbahar)	0,3-1,5
Zemin tabanı yaş (baharda donma çözülmesi)	4,0-5,0

8.3.2. AASHTO Dizayn Metodu (1986)

1986 AASHTO Dizayn Metodu eskisine nazaran daha realistik yaklaşımlar ve kavramlar içermektedir. Bunlar;

- Zemin dayanımı (S) yerine zeminin esneklik modülü (M_R)
- Bölgesel Faktör R yerine rasyonel değerlere dayalı çevre etkileri
- Trafik tahminine bağlı hata risklerini azaltmak amacıyla güvenilirlik katsayısı
- Tabaka katsayılarının M_R ile belirlenebilmesi ve drenaj şartları
- Kademeli inşaat kavramı

Dizayn esası kümülatif 8.2 ton eşdeğer tek-dingil yükü sayısına bağlı olup, For. 8.7 ile belirlenmektedir.

$$\bar{W}_{8,2t} = D_D \times D_L \times W_{8,2t} \quad (8.7)$$

D_D = Trafığın yönsel dağılım faktörü, 0,50

D_L = Şerit dağılım faktörü, tek yöndeki şerit sayısına göre, Tablo 8.2'den

$W_{8,2t}$: Kümülatif çift yöndeki tekerrür sayısı

Tablo 8.2. Önerilen D_L katsayıları (AASHTO)

Her Bir Yöndeki Şerit Sayısı	D_L
1	1,00
2	0,80-1,00
3	0,60-0,80
≥ 4	0,50-0,75

Geleceğe yönelik trafik tahminlerinde ve 8,2 ton tek-dingil yüküne dönüştürme faktöründeki yanlışlıkların elimine edilmesi için güvenilirlik riskinin belirlenmesi gerekmektedir. Güvenirlik seviyeleri Tablo 8.3'te verilmiştir.

Tablo 8.3. Tavsiye Edilen Güvenirlik Seviyeleri (AASHTO)

Fonksiyonel Sınıflandırma	Kırsal R, %	Fonksiyonel Sınıflandırma	Kentsel R, %
Otoyollar	85-99,9	Ana Arterler	85-99,9
1. Sınıf Yollar	75-95	Önemli Arterler	80-99
2. Sınıf Yollar	75-95	Toplayıcı Arterler	80-95
3. Sınıf Yollar	50-80	Bölgesel Arterler	50-80

Bir kaplamanın mevcut servis yeteneği indeksi (PSI) seyir eden taşıtlara belirli bir konforda hizmet verebilme ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Servis yeteneği indeksi (PSI) 0 ila 5 arasında değişen bir değerdir. Kaplama yeni yapıldığında PSI değerinin 4,2 ila 4,5 arasında olduğu saptanmıştır. Yolu kullandıkça bu değer azalmaktadır. Kaplamanın kullanımdan ötürü meydana gelen kayıp For. 8.8 'de verilmiştir.

$$\Delta PSI = P_0 - P_t \quad (8.8)$$

ΔPSI = Servis yeteneğindeki kayıp

P_0 = Kaplamanın trafiğe açıldığı andaki PSI değeri

P_t = Kaplamanın rehabilite edileceği andaki PSI değeri

P_0 değerinin AASHTO tarafından 4,2 olarak alınması esas alınmıştır. P_t değeri ise yüksek standartlı yollar için 2,5 ve düşük standartlı yollar için 2,0 olarak alınması önerilmektedir. Dolayısıyla $\Delta PSI = 4,2 - 2,5 = 1,7$ olarak alınmaktadır.

1986 dizayn metodundaki önemli yeniliklerden birisi de, zeminin ve kaplamada kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin, esneklik modülü (M_R) değeri ile tanımlanmasıdır.

Zeminin CBR değeri ile M_R değeri arasında $M_R = 1500 \text{ CBR}$ bir ilişki mevcuttur. Ancak CBR değeri arttıkça bu bağıntıdaki hata oranı da artmaktadır. Genellikle $CBR \leq 10$ değerleri için bu bağıntı kullanılmaktadır.

Üst yapı sayısının bulunmasında diğer bir parametre de Tablo 8.4 'teki izafi tabaka katsayılarıdır (a_i)

Tablo 8.4 Tabaka Katsayıları (1)

Tabaka Cinsi	Marshall Stabilitesi (kg)	7 Günlük Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm ²)	Min CBR	a_i
Kaplama Tabakası:	Ağır Trafik Hafif Trafik			Min. 4 cm
Aşınma	≥ 900	750		0,42-0,44
Binder	≥ 750	600		0,40-0,42
Temel Tabakası:				Min. 20 cm
Bitümlü Temel	≥ 400			0,32-0,34
Çimento Stab Temel		35-55		0,23
Granüler Temel			100	0,14
Plentmiks Temel			120	0,15
Alttemel Tabakası:				Min.20 cm
Bitüm Stab. Zemin	≥ 250			0,20
Kireç Stab. Zemin		7		0,12
Çimento Stab Zemin		17,5		0,14
Kum-Çakıl Alttemel			30	0,11
Kırmataş Alttemel			50	0,13

Temel ve alttemel tabakalarındaki yetersiz drenaj koşullarından dolayı azalma meydana gelebilir. Bu nedenle tabaka kalınlıklarının artırılması gerekmektedir (Tablo 8.5).

Tablo 8.5 Önerilen m_i Değerleri (AASHTO-1986)

DRENAJ KALİTESİ	Kaplamanın doygunluk seviyesine yakın su içeriğine maruz kaldığı sürenin yıl içindeki yüzdesi			
	< % 1	% 1-5	% 5-25	> % 25
Çok İyi	1,40 - 1,35	1,35 - 1,30	1,30 - 1,20	1,20
İyi	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	1,00
Vasat	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,00 - 0,80	0,80
Kötü	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80 - 0,60	0,60
Çok Kötü	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,40	0,40

Elde edilen bu parametrelerle, tabaka kalınlıklarının tayini For. 8.9 ile yapılmaktadır.

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3 \quad (8.9)$$

SN: Üstyapı sayısı

A_i : İzafi tabaka katsayıları

D_i : Tabaka kalınlıkları

M_i : Drenaj faktörleri

$$\log W_{8,2 t} = Z_R S_0 + 9,36 \log(SN+1) - 0,20 + \frac{\log[\Delta PSI \div (4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094 \div (SN + 1)^{5,19}]} + 2,32 \log M_R - 8,07 \quad (8.10)$$

Burada Z_R standart normal sapma değeri olup güvenirliliğin yüzdesine bağlı olarak Tablo 8.6'dan alınmıştır.

Tablo 8.6 Z_R Değeri (AASHTO)

Güvenirlilik Seviyesi (% R)	Z_R	Güvenirlilik Seviyesi (%R)	Z_R
50	-0,000	93	-1,476
60	-0,253	94	-1,555
70	-0,524	95	-1,645
75	-0,674	96	-1,751
80	-0,841	97	-1,881
85	-1,037	98	-2,054
90	-1,282	99	-2,327
91	-1,340	99,9	-3,090
92	-1,405	99,99	-3,750

For. 8.10 'dan SN değeri çekilerek For. 8.9 'da yerine konur. D_1 ve D_2 kalınlıkları bellidir. Buradan alttemel kalınlığı olan D_3 bulunmuş olur.

8.4. Kalıp Kumu Kullanılarak Esnek Yol Üst Yapısının Dizaynı

Trafik yükleri, yol üst yapısının projelendirilmesinde üstyapı tabaka kalınlıklarını tespit etmemize yarayan en önemli faktörlerden birisidir. Üst yapı hesabında, yolun hizmete açıldığında ve hizmet süresi sonunda geçecek olan ortalama trafik bilinmelidir. Üstyapının hizmet süresi 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Ortalama günlük trafik, üstyapı hesabında proje trafiği olarak kullanılmaktadır.

Karayolları Genel Müdürlüğü'nden elde edilen verilere göre, Bozüyük-Eskişehir 2*1 şeritli devlet karayolunda YOGT (Yıllık ortalama günlük trafik) değerleri bilinmektedir. Bu değerler, 7117 Otomobil, 789 Otobüs, 4714 Kamyon, 677 Treyler'dir.

Tablo 8.7 Şerit Dağılım Faktörleri (KGM)

Her İki Yöndeki Şerit Sayısı	Şerit Dağılım Faktörü (η)
2	1,00
4	0,90
6 veya daha fazla	0,80

Taşıt eşdeğerlik faktörlerinin (TEF) hesabında, projesi yapılacak yola ait lodometre çalışması ve dingil yükü etütleri sonucunda çıkacak dingil yükü dağılımı dikkate alınmıştır. Bu şekilde elde edilmiş TEF değerleri Karayolları Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. 2004 yılı itibari ile kullanılan TEF değerleri Tablo 8.8'de verilmiştir.

Tablo 8.8 Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (KGM)

Taşıt Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörü
Treyler	4,40
Kamyon	2,80
Otobüs	3,90
Otomobil	0,0006

Bu değerlere göre kaplamanın eşdeğer 8.2 ton tek dingil yükü tekerrür sayısı Tablo 8.9'da verilmektedir.

Tablo 8.9. Toplam Standart Tek Dingil Yükünün Bulunması

	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Treyler	Toplam
Başlangıç Trafik, YOGT	7117	789	4714	677	13297
Trafik artış yüzdesi, r (%)	8	6	3,5	3,5	-
Nihai Trafik, YOGT (n=20 yıl)	33172	2530	9380	1347	46429
Proje Trafik, $t_p = 0,4343 \frac{t_s - t_0}{\log((t_s / t_0))}$	16927	1494	6782	974	26177
Taşıt Eşdeğerlik Faktörü (TEF)	0,0006	3,90	2,80	4,40	-
Hesap şeridindeki günlük 8,2t dingil yükü, $T_s = (t_p/2)(TEF)(\eta)$, $\eta=1,00$	5	2913	9495	2143	14556
Toplam standart tek dingil yükü (8.2 ton)	$W_{8,2t} = 14556 * 365 * 20 = 106258800$				

Görüldüğü gibi, trafik hacminin %55'i otomobil olmakla beraber kaplamaya verdiği hasar miktarı ancak 5 adet 8,2 ton tek dingilli kamyon kadar olmaktadır. Dolayısıyla kaplama kalınlığına ve zaman içinde bozulmasına ağır taşıt sayısı daha fazla etki etmektedir.

Tabaka Kalınlıklarının Belirlenmesi:

Tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde üst tabakadan aşağıya doğru yol izlenir. Granüler temel malzemesi olarak, %27 Kalıp kumu + %73 Kırmataş + %5 Çimento (F-M-R73-C5) malzemesi, alttemel malzemesi olarak da %27 Kalıp kumu + %73 Kırmataş (F-M-R73) kullanılmıştır. Yaş CBR değerleri sırasıyla EK 1'den 165,7 ve 47,7 olarak okunmuştur. Formülde kullanılacak diğer parametreler:

$$R = \%95$$

$$S_0 = 0,35$$

$$W_{8,2t} = 106.258.800$$

$$\Delta PSI = 1,7$$

$$Z_R = -1,645$$

$$m = 1$$

$$M_R = 35660,2 \text{ PSI} \quad (\text{Granüler Temel Tabakası } M_R \text{ değeri})$$

$$\log W_{8,2 t} = Z_R S_0 + 9,36 \log(SN+1) - 0,20 + \frac{\log[\Delta PSI \div (4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094 \div (SN + 1)^{5,19}]} + 2,32 \log M_R - 8,07$$

formülünden SN çekilerek;

$$SN = 4,11 \text{ inç olarak bulunmuştur.}$$

$$4,11 * 2,54 = 10,44 \text{ cm}$$

KGM'den alınan şartnameden (Tablo 8.10), 100-160 Milyon standart tek dingil yüküne sahip yol için aşınma ve binder tabaka kalınlıkları sırası ile 5 ve 8 cm alınmıştır.

$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$ formülünde, aşınma ve binder tabakaları belli olduğundan,

$$D_1 = 5 \text{ cm, } D_2 = 8 \text{ cm}$$

$$a_1 = 0,43 \quad a_2 = 0,41 \quad a_3 = 0,33 \quad (\text{Tablo 8.4})$$

$$10,44 = (0,43 * 5) + (0,41 * 8) + (0,33 * D_3)$$

$$D_3 = 15,2 \approx 15 \text{ cm bulunmuştur.}$$

Temel tabakası kalınlığını hesaplanmıştır.

$$M_R = 16580,2 \text{ PSI (Alttemel tabakası } M_R \text{ değeri)}$$

$$SN = 5,33 \text{ inç}$$

$$5,33 * 2,54 = 13,54 \text{ cm}$$

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 + a_4 D_4$$

$$D_1 = 5 \text{ cm, } D_2 = 8 \text{ cm, } D_3 = 15 \text{ cm}$$

$$a_1 = 0,43 \quad a_2 = 0,41 \quad a_3 = 0,33 \quad a_4 = 0,14 \quad (\text{Tablo 8.4})$$

$$13,54 = (0,43 * 5) + (0,41 * 8) + (0,33 * 15) + (0,14 * D_4)$$

$$D_4 = 22,6 \approx 23 \text{ cm bulunmuştur.}$$

Alttemel tabakası kalınlığını hesaplariken, dolgu malzemesi olarak kalıp kumu kullanılmıştır, yaş CBR değeri Ek 1 'den 10,3 değeri alınmıştır.

$$M_R = 6459,4 \text{ PSI (Doğal zemin } M_R \text{ değeri)}$$

$$SN = 7,12 \text{ inç}$$

$$7,12 * 2,54 = 18,08 \text{ cm}$$

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 + a_4 D_4 + a_5 D_5$$

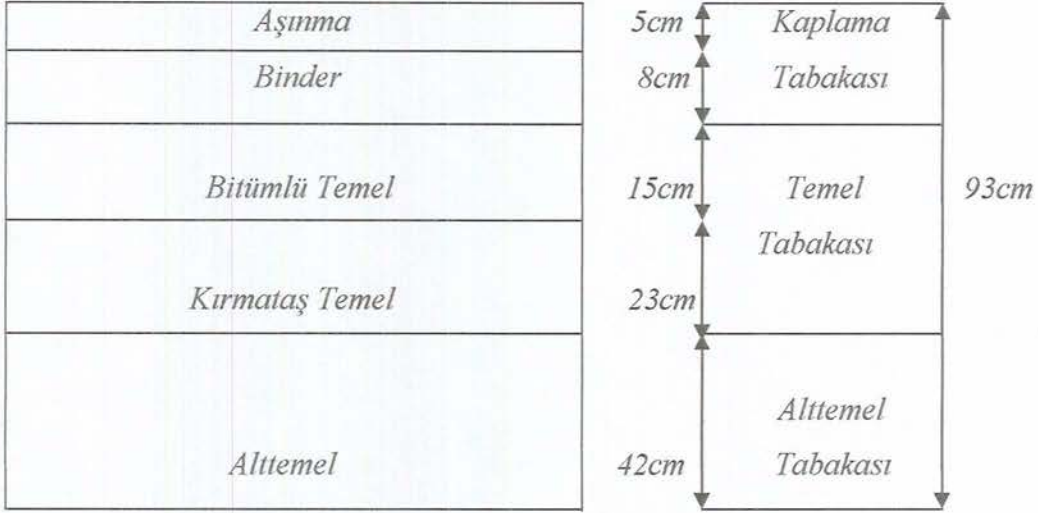
$$D_1 = 5 \text{ cm} \quad D_2 = 8 \text{ cm}$$

$$D_3 = 15 \text{ cm} \quad D_4 = 23 \text{ cm}$$

$$a_1 = 0,43 \quad a_2 = 0,41 \quad a_3 = 0,33 \quad a_4 = 0,14 \quad a_5 = 0,11 \quad (\text{Tablo 8.4})$$

$$18,08 = (0,43*5) + (0,41*8) + (0,33*15) + (0,14*23) + (0,11*D_5)$$

$D_5 = 41,3 \approx 42$ cm bulunmuştur.



Taban Zeminini

Granüler temel malzemesi olarak, %27 Kalıp kumu + %73 Kırmataş + %5 Çimento (F-M-R73-C5) malzemesi, alttemel malzemesi olarak da %45 Kalıp kumu + %55 Kırmataş (F-M-R55) kullanılmıştır. Yaş CBR değerleri sırasıyla Ek 1'den 165,7 ve 32,3 olarak okunmuştur. Formülde kullanılacak diğer parametreler:

$$R = \%95$$

$$S_0 = 0,35$$

$$W_{8,2t} = 106.258.800$$

$$\Delta PSI = 1,7$$

$$Z_R = -1,645$$

$$m = 1$$

$$M_R = 35660,2 \text{ PSI} \quad (\text{Granüler Temel Tabakası } M_R \text{ değeri})$$

$$\log W_{8,2t} = Z_R S_0 + 9,36 \log(SN+1) - 0,20 + \frac{\log[\Delta PSI \div (4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094 \div (SN + 1)^{5,19}]} + 2,32 \log M_R -$$

$$8,07$$

formülünden,

SN = 4,11 inç olarak bulunmuştur.

$$4,11 * 2,54 = 10,44 \text{ cm}$$

KGM'den alınan şartnameden, 100-160 Milyon standart tek dingil yüküne sahip yol için aşınma ve binder tabaka kalınlıkları sırası ile 5 ve 8 cm alınmıştır.

$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3$ formülünde, aşınma ve binder tabakaları belli olduğundan,

$$D_1 = 5 \text{ cm}, D_2 = 8 \text{ cm}$$

$$a_1 = 0,43 \quad a_2 = 0,41 \quad a_3 = 0,33 \quad (\text{Tablo 8.4})$$

$$10,44 = (0,43 * 5) + (0,41 * 8) + (0,33 * D_3)$$

$$D_3 = 15,2 \approx 15 \text{ cm} \text{ bulunmuştur.}$$

Temel tabakası kalınlığını hesaplanmıştır.

$$M_R = 13045,48 \text{ PSI (Alttemel tabakası } M_R \text{ değeri)}$$

$$SN = 5,75 \text{ inç}$$

$$5,75 * 2,54 = 14,61 \text{ cm}$$

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3 + a_4D_4$$

$$D_1 = 5 \text{ cm}, D_2 = 8 \text{ cm}, D_3 = 15 \text{ cm}$$

$$a_1 = 0,43 \quad a_2 = 0,41 \quad a_3 = 0,33 \quad a_4 = 0,14 \quad (\text{Tablo 8.4})$$

$$13,54 = (0,43 * 5) + (0,41 * 8) + (0,33 * 15) + (0,14 * D_4)$$

$$D_4 = 30 \text{ cm} \text{ bulunmuştur.}$$

Karşılaştırma yaparsak, alttemel malzemesi olarak F-M-R73 yerine F-M-R55 kullanıldığında kırmataş temel kalınlığı 23 cm'den 30 cm'ye yükselmektedir. F-S, F-S-L5 ve F-S-C5 'in dolgu malzemesi olarak kullanılması değerlendirilmiştir. F-S, F-S-L5 ve F-S-C5 numunelerinin yaş CBR değerleri sırasıyla 10.3, 52.5 ve 109.7 'dir.

Alttemel kalınlığı hesaplanırken dolgu malzemesi CBR değeri kullanılmaktadır.

Dolgu malzemesi olarak F-S kullanılmışsa,

$$M_R = 6456,5 \text{ PSI (Dolgu tabakası } M_R \text{ değeri)}$$

$$SN = 7,1 \text{ inç}$$

$$7,1 * 2,54 = 18,03 \text{ cm}$$

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3 + a_4D_4 + a_5D_5$$

$$D_1 = 5 \text{ cm}, D_2 = 8 \text{ cm}, D_3 = 15 \text{ cm}, D_4 = 23 \text{ cm}$$

$$a_1 = 0,43 \quad a_2 = 0,41 \quad a_3 = 0,33 \quad a_4 = 0,14 \quad a_5 = 0,11 \quad (\text{Tablo 8.4})$$

$$18,08 = (0,43*5) + (0,41*8) + (0,33*15) + (0,14*23) + (0,11*D_5)$$

$D_5 = 42$ cm bulunmaktadır.

Dolgu malzemesi olarak F-S-L5 kullanılmışsa;

$M_R = 17587,3$ PSI (Dolgu tabakası M_R değeri)

$SN = 5,23$ inç

$$5,23*2,54=13,28 \text{ cm}$$

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3 + a_4D_4 + a_5D_5$$

$D_1 = 5$ cm, $D_2 = 8$ cm, $D_3 = 15$ cm, $D_4 = 23$ cm

$a_1 = 0,43$ $a_2 = 0,41$ $a_3 = 0,33$ $a_4 = 0,14$ $a_5 = 0,11$ (Tablo 8.4)

$$13,28 = (0,43*5) + (0,41*8) + (0,33*15) + (0,14*23) + (0,11*D_5)$$

$D_5 < 20 \approx 20$ cm bulunmaktadır.

Dolgu malzemesi olarak F-S-C5 kullanılmışsa

$M_R = 27669,4$ PSI (Dolgu tabakası M_R değeri)

$SN = 4,49$ inç

$$4,49*2,54=11,4 \text{ cm}$$

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3 + a_4D_4$$

$D_1 = 5$ cm, $D_2 = 8$ cm, $D_3 = 15$ cm

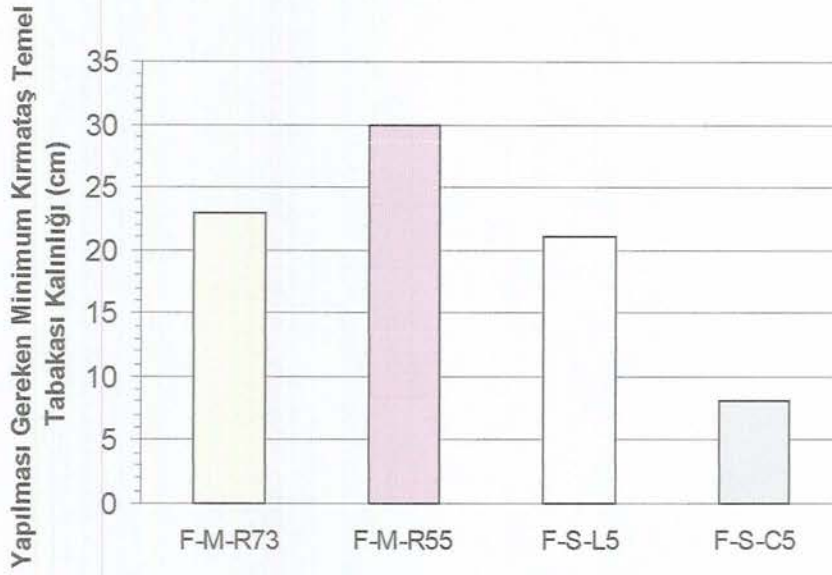
$a_1 = 0,43$ $a_2 = 0,41$ $a_3 = 0,33$ $a_4 = 0,14$ (Tablo 8.4)

$$11,4 = (0,43*5) + (0,41*8) + (0,33*15) + (0,14*D_4)$$

$D_4 < 20 \approx 20$ cm bulunmaktadır.

Alttemel tabakasının kalınlığı dolgu malzemesinin mukavemetine göre değişmektedir. Buna göre F-S, F-S-L5 ve F-S-C5 numuneleri için alttemel kalınlıkları sırasıyla 42, 20 ve 20 cm bulunmuştur.

Kırmataş temel tabakası hesaplanırken alttemelde kullanılacak malzemenin yaş CBR değerleri dikkate alınmıştır. Buna göre, Şekil 8.1 'de, alttemelde, yaş CBR değeri 30'dan büyük olan numunelerin kullanılması halinde, yapılması gereken minimum tabaka kalınlıkları verilmiştir.



Şekil 8.10 Minimum Kırmataş Temel Tabakası Kalınlıkları

8.5. Ekonomik Analiz

Dolgu malzemesi olarak atık kalıp kumu kullanılması durumunda yapılması gereken alttemel tabakası kalınlığı 42 cm olarak hesaplanmıştı.

Platform genişliği 12 m olan birinci sınıf karayolunda, 1 km'lik mesafe için gerekli olan malzeme miktarı:

$$0.42 \text{ m} * 12 \text{ m} * 1000 \text{ m} = 5040 \text{ m}^3 \text{ malzeme gerekmektedir (F-M-R73).}$$

$$5040 * 0.73 = 3679 \text{ m}^3 \text{ kırmataş}$$

$$5040 * 0.27 = 1361 \text{ m}^3 \text{ kalıp kumu}$$

$$\gamma_{k(F-M-R73)} \rightarrow 2.137 \text{ t/m}^3 \quad (\text{Optimumun \%2 Kurusundaki } \gamma_k)$$

$$5040 * 2.137 = 10770 \text{ ton malzeme gerekmektedir.}$$

Bu miktarın %73'ü kırmataş ve %27'si kalıp kumudur.

$$0.73 * 10770 = 7862 \text{ ton kırmataş} \quad 0.27 * 10770 = 2908 \text{ ton kalıp kumu}$$

Malzemenin 30 tonluk kamyonlarla taşındığı düşünülmektedir.

$$262 \text{ Kamyon Kırmataş} * 20\text{km} = 5240 \text{ km (Kırmataş malzemesi 10 km uzaklıktadır)}$$

$$97 \text{ Kamyon Kalıp Kumu} * 0 \text{ km} = 0 \text{ km (Duble yol projesi atık alanının hemen önünden geçmektedir)}$$

$\gamma_{\text{Referans alttemel}} = 2.3 \text{ t/m}^3$ (optimumun %2 kurusunda)

$5040 \text{ m}^3 * 2.3 \text{ t/m}^3 = 11592 \text{ ton} = 387 \text{ kamyon referans alttemel}$

$387 \text{ Kamyon} * 20 \text{ km} = 7740 \text{ km}$

Sonuç olarak, ekonomik kazanç = $\frac{7740 - 5240}{7740} \times 100 = \%32$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 8.11 Esnek Kaplamalı Yollarda Uygulanacak Üstyapı Kompozisyonu (KGM)

Üst Yapı Tabakaları (cm)		Trafik Kategorileri											
		(3-10) MİLYON	(10-20) MİLYON	(20-30) MİLYON	(30-40) MİLYON	(40-50) MİLYON	(50-65) MİLYON	(65-80) MİLYON	(80-100) MİLYON	(100-160) MİLYON	160-250) MİLYON	(>250) MİLYON	
Aşınma		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Binder		8	6	6	6	7	7	7	8	8	8	8	
Bitümlü Temel		-	8	9	10	10	11	12	12	14	16	18	
Kırmataş Temel		15	15	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Toplam SN		7,55	9,31	10,38	10,70	11,10	11,42	11,74	12,14	12,78	13,42	14,06	
Alttemel Kalınlıkları (cm)	Taban CBR %	Kırmataş Alttemel Kalınlıkları (cm)											
	6-7	35	30	30	30	30	35	35	35	35	35	40	
	8-9	30	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30	
	10-12	25	20	20	20	20	20	20	25	25	25	25	
	13-16	20	15	15	15	15	15	15	15	20	20	20	
	17-22	15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	15	15
	23-30	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	*
	>30	Alttemel tabakası gerektirmemektedir. Ancak kaya yarma veya kaya malzemesi ile oluşturulmuş dolgu kesimlerde düzeltme amaçlı 15 cm. kırmataş temel serilecektir.											
	Taban CBR %	Kum-Çakıl Alttemel Kalınlıkları (cm.)											
	6-7	40	35	35	35	35	40	40	40	45	45	45	
	8-9	35	30	25	30	30	30	30	30	35	35	35	
	10-12	30	25	20	25	25	25	25	25	30	30	30	
	13-16	25	20	*	*	*	*	*	20	20	20	20	
	17-22	20	20	*	*	*	*	*	20	20	20	20	
23-30	20	*	**	**	**	**	**	**	*	*	*		
>30	Alttemel tabakası gerektirmemektedir. Ancak, kaya yarma veya kaya malzemesi ile oluşturulmuş dolgu kesimlerde düzeltme amaçlı 20 cm. kum-çakıl alttemel serilecektir.												

* Alttemel verilmeyecek, PMT 10 cm. arttırılacak

** Alttemel verilmeyecek, PMT 5 cm. arttırılacak

9. TARTIŞMA

9.1. Giriş

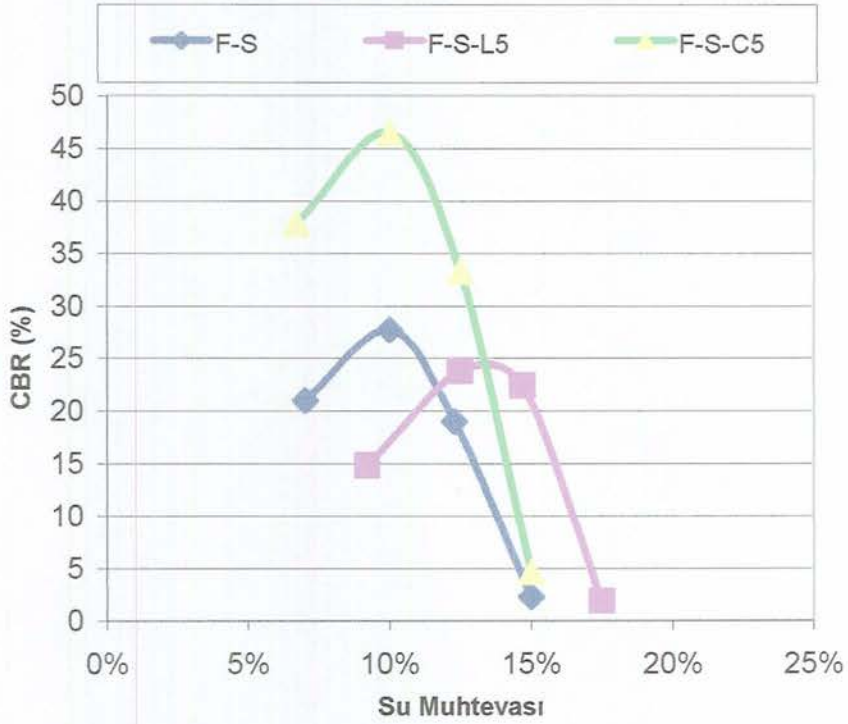
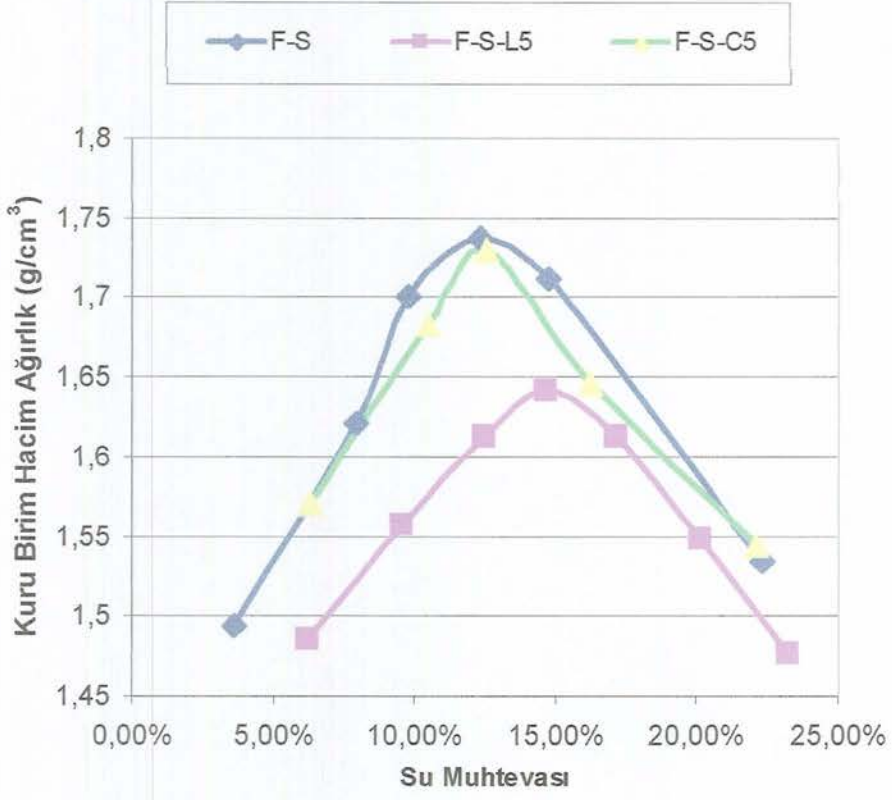
Bu bölümde, laboratuarda elde edilen deneysel sonuçlar, daha önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bunun dışında grafiklerin kendi aralarında da karşılaştırması yapılmıştır. Bu sayede yorum yapılması kolaylaştırılmıştır.

9.2. CBR

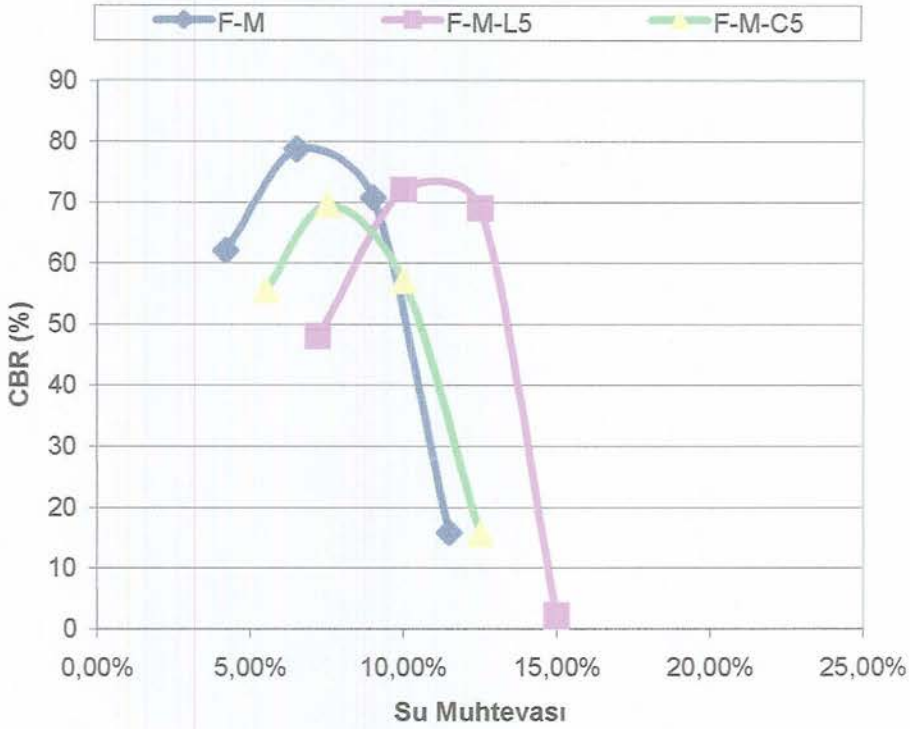
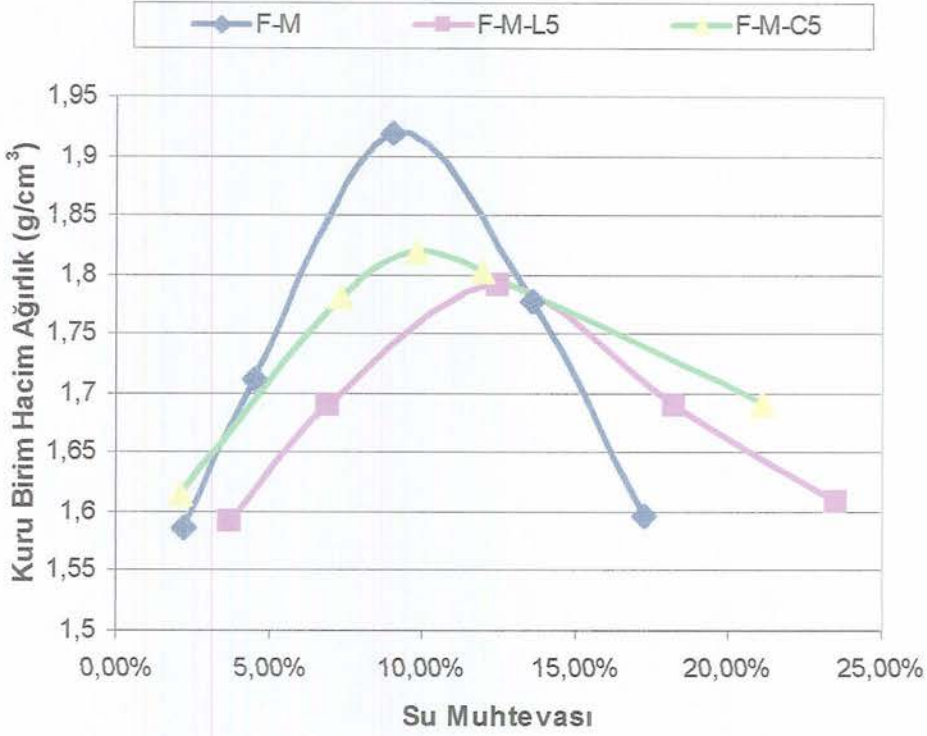
Şekil 9.1 ve Şekil 9.2 'de kalıp kumu numuneleri için, Optimum su muhtevası – Kuru birim hacim ağırlık grafiği ile, CBR – Su muhtevası grafiklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Laboratuardaki deney sonuçlarına göre, en yüksek CBR değerleri, optimumun %2 kuru tarafında elde edilmiştir. Optimumun ıslak tarafında sıkıştırılan numunelerin, rijitlikleri kaybolmaktadır. Bunun sonucunda, CBR değerleri düşmektedir. Bu nedenle kalıp kumunun, optimumun %2 kuru tarafında sıkıştırılması önerilmektedir.

Yapılan literatür çalışmasında, Kleven et al. ve West LAFAYETTE 'nin de maksimum CBR değerlerini, optimumun kuru tarafında bulduğu görülmüştür.

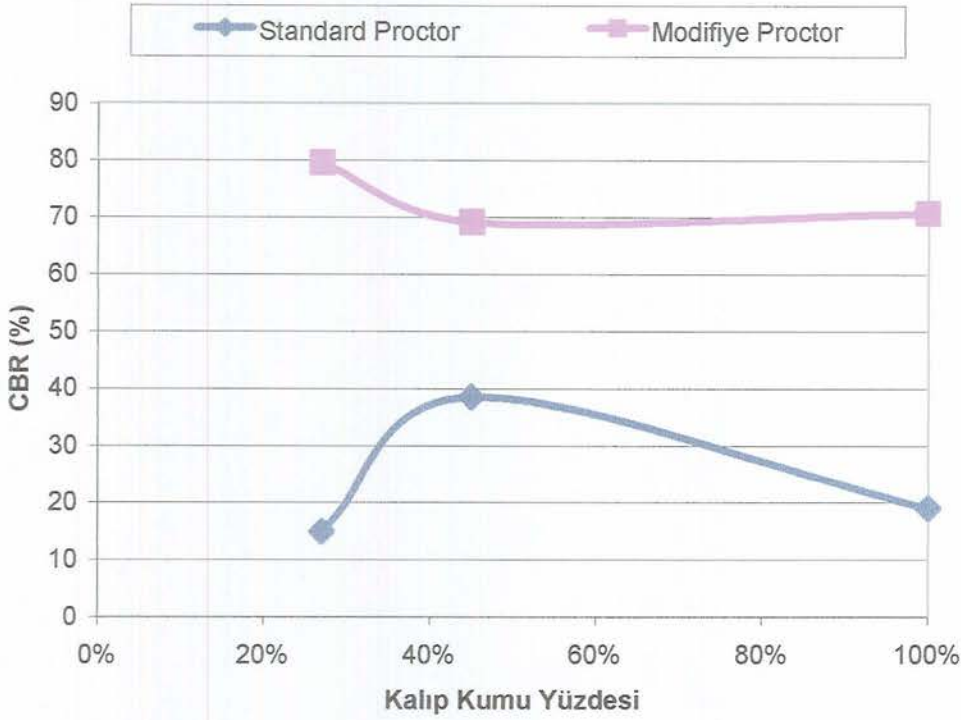
Numunedeki kalıp kumu oranının değişimine bağlı olarak mekanik özellikler de değişmektedir. Örneğin, Şekil 9.3 'te CBR değerlerinin kalıp kumu yüzdesine bağlı olarak değişimi gözlenmektedir. Standart proktorla sıkıştırılan numunelerde, kalıp kumu yüzdesinin, belli bir limite kadar artmasıyla mukavemet değerleri de artmaktadır [15]. Bu limitten sonra dayanım azalmaktadır. Ancak modifiye proktor ile sıkıştırılan numunelerde izlenen trendde farklılık görülmektedir. Düşük kalıp kumu yüzdesine sahip numunelerde, yüksek sıkıştırma enerjisi ile iyi sıkışma elde edilmektedir. Modifiye proktorla sıkıştırılan numunelerde, kalıp kumu yüzdesinin artmasıyla CBR değerleri de düşmektedir.



Şekil 9.1 Kuru Birim Hacim Ağırlık-Su Muhtevası – CBR-Su Muhtevası Karşılaştırması (Std Pr.)



Şekil 9.2 Kuru Birim Hacim Ağırlık-Su Muhtevası-CBR-Su Muhtevası Karşılaştırması (Mod.Pr)

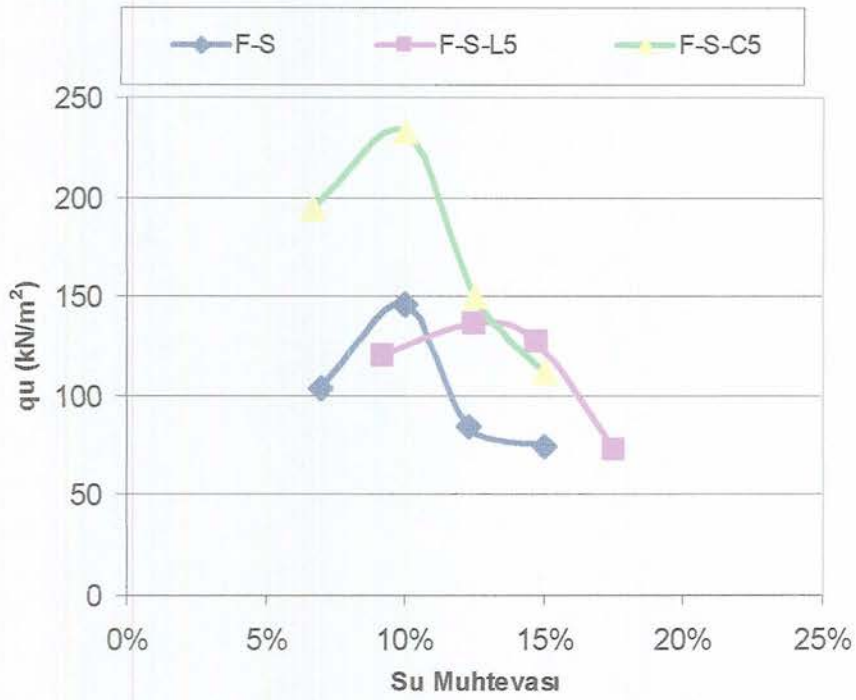
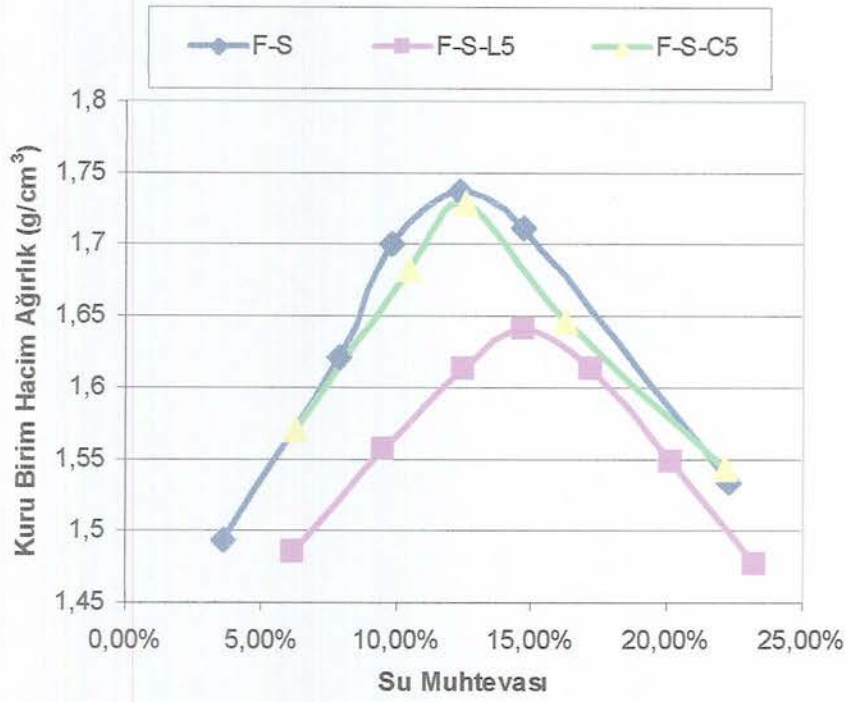


Şekil 9.3. Kalıp Kumu yüzdesi - CBR Değişimi

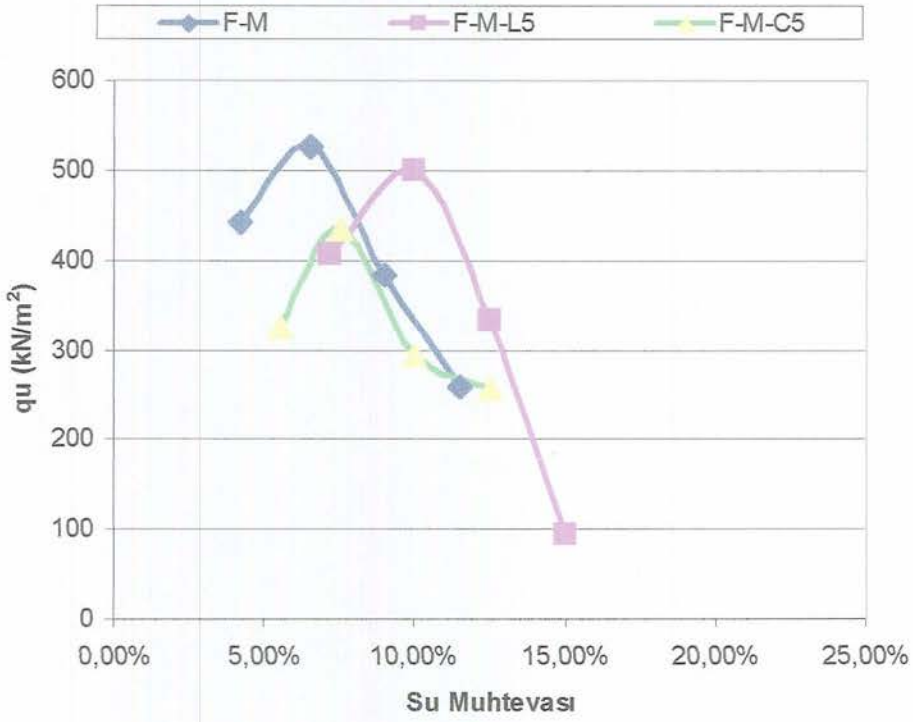
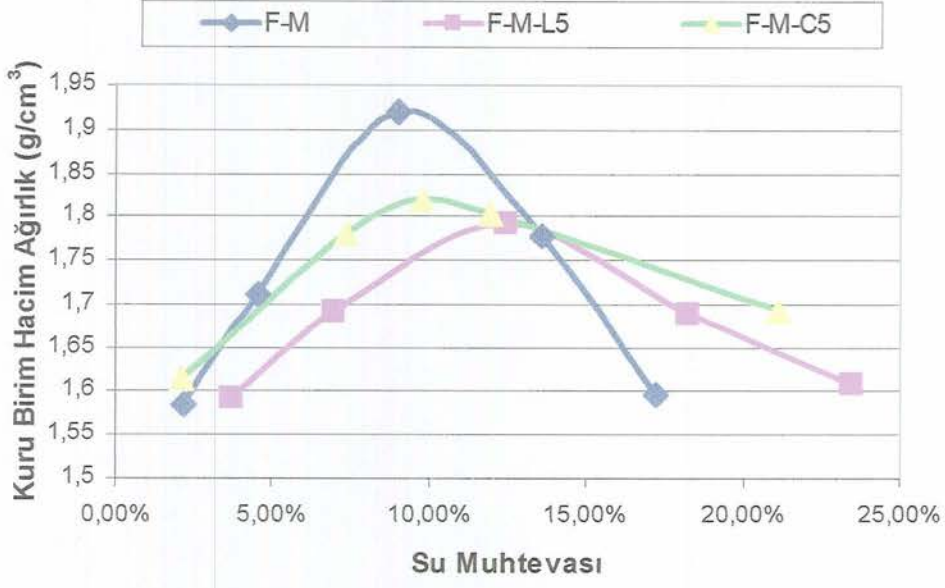
9.3. Serbest Basınç

Şekil 9.4 ve Şekil 9.5 'te kalıp kumu numuneleri için, Optimum su muhtevası – Kuru birim hacim ağırlık grafiği ile, Serbest Basınç Dayanımı – Su muhtevası grafiklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Laboratuardaki deney sonuçlarına göre, en yüksek dayanım değerleri, optimumun %2 kuru tarafında elde edilmiştir.

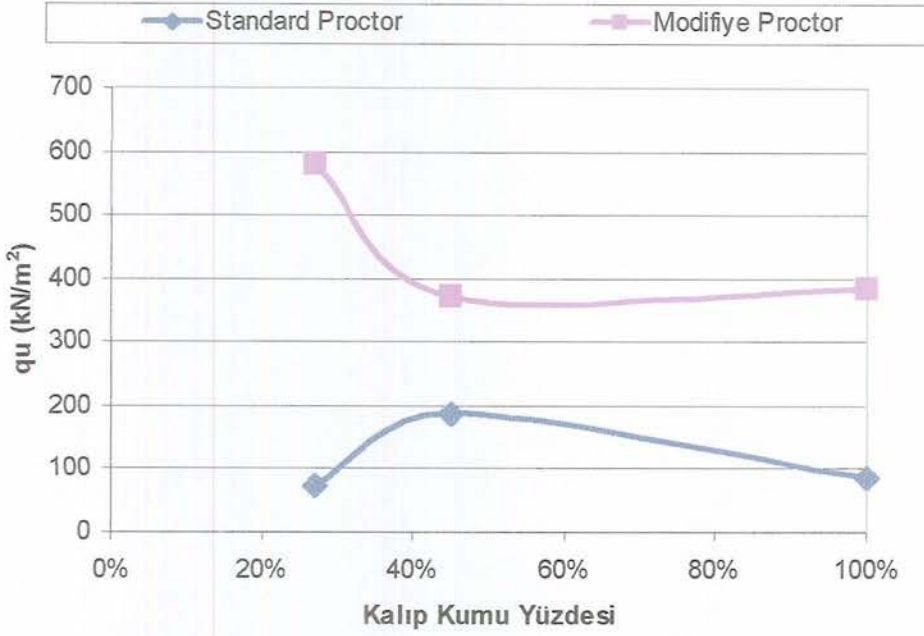
Karışımlardaki kalıp kumu yüzdesi, numunenin serbest basınç dayanımını etkilemektedir. Şekil 9.6'da standart proktorla sıkıştırılan numunenin dayanım değerlerinde, belli bir kalıp kumu yüzdesine kadar artış meydana geldiği görülmektedir. Modifiye proktorla sıkıştırılan numunelerde ise durum tersinedir. Çünkü, standart proktorla sıkıştırılan kırmataşlı numunelerde sıkıştırma enerjisi yeterli olmamaktadır. Bu nedenle belli bir limite kadar kalıp kumu ilavesi ile serbest basınç dayanımı artmaktadır. Modifiye proktorla sıkıştırılan numunelerde ise iyi sıkışma sağlanmaktadır ve ince malzeme ilavesi ile mukavemet düşmektedir.



Şekil 9.4 Kuru B.Hacim Ağ.- Su Muhtevası-Serbest Basınç-Su Muhtevası Karşılaştırması (Std.P.)

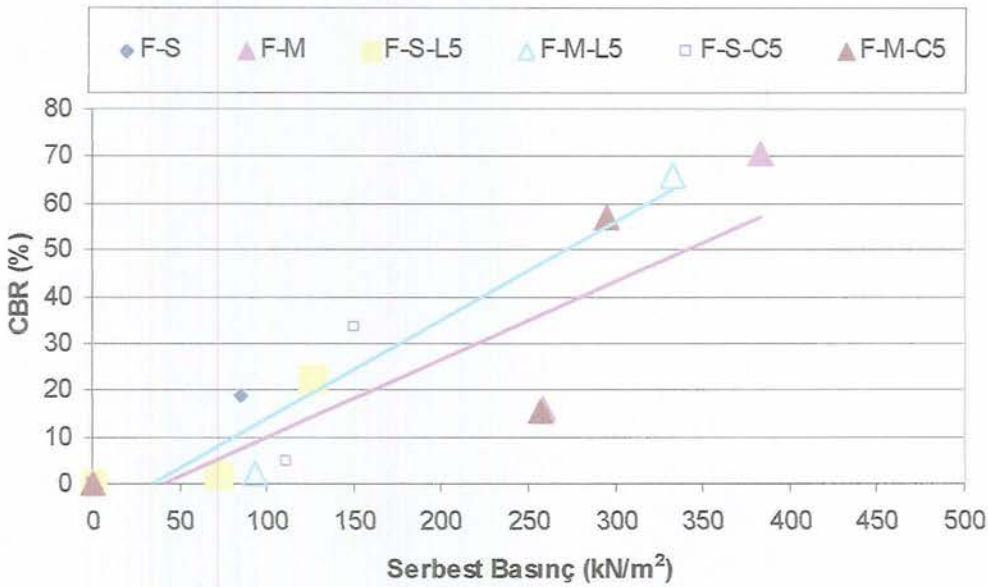


Şekil 9.5 Kuru B.Hacim Ağ.- Su Muhtevası-Serbest Basınç-Su Muhtevası Karşılaştırması (Mod.P)

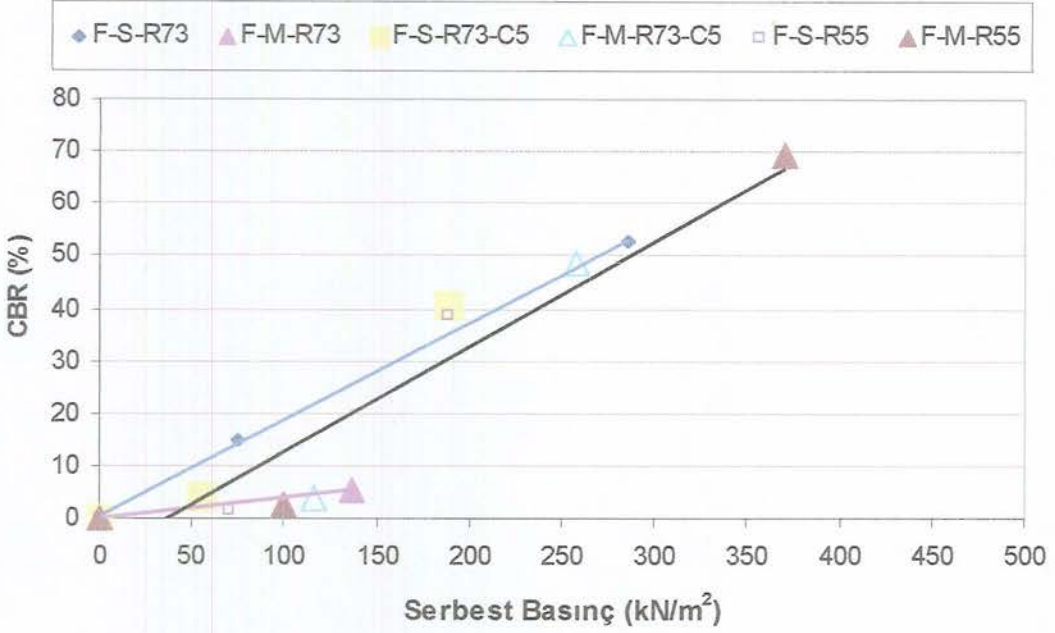


Şekil 9.6. Kalıp Kumu yüzdesi – Serbest Basınç Değişimi

CBR ve serbest basınç sonuçlarından da görüldüğü gibi, sonuçlar benzerlik taşımaktadır. Bu amaçla CBR – Serbest Basınç grafiği çizilerek aralarında doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Şekil 9.7 ve Şekil 9.8). Yapılan literatür çalışmasında da, CBR ve serbest basınç değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu görülmüştür [12]. Literatürden alınan ilgili grafik Ek 5’tedir.



Şekil 9.7. Kırmataşsız Numuneler İçin Serbest Basınç – CBR Karşılaştırması



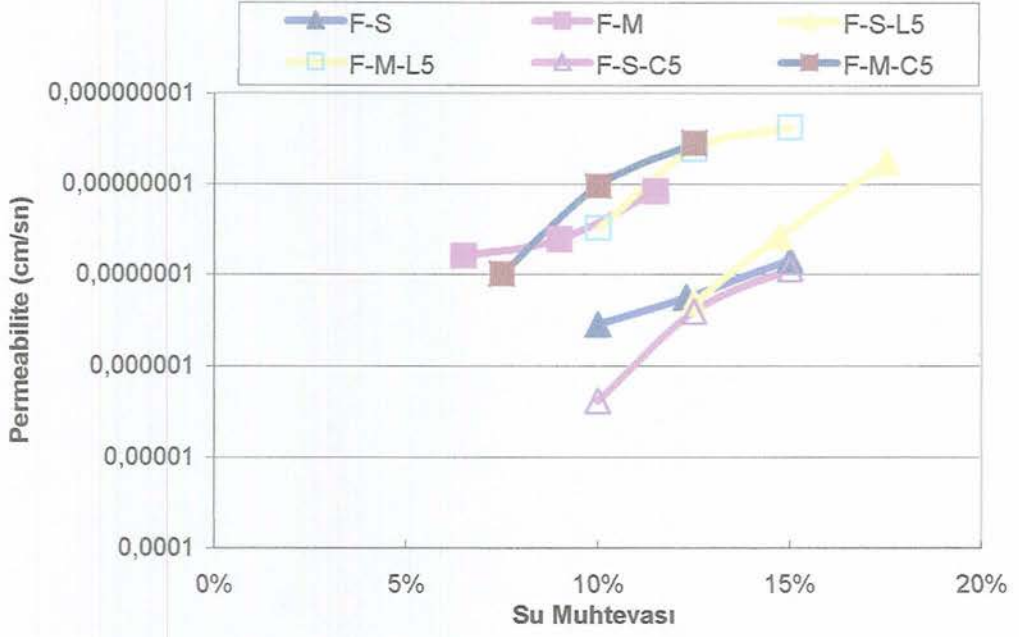
Şekil 9.8. Kırmataşlı Numuneler İçin Serbest Basınç – CBR Karşılaştırması

9.4. Permeabilite

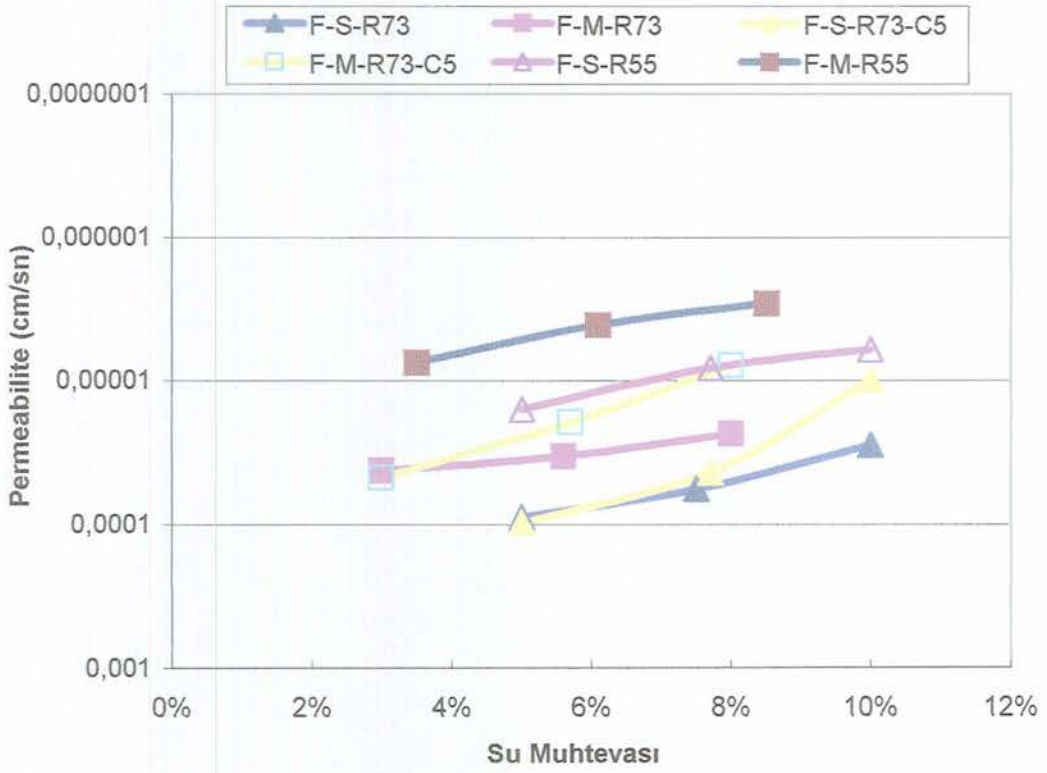
Yapılan deneylerde, su muhtevasının değişimiyle hidrolik iletkenliğin de değiştiği görülmüştür. Su muhtevası arttıkça hidrolik iletkenlik azalmaktadır. Şekil 9.9 ve Şekil 9.10'da Hidrolik İletkenlik – Su Muhtevası karşılaştırması yapılmıştır.

Permeabilite değerinin kırmataş oranına bağlı olarak değiştiği de gözlenmiştir. Kırmataş oranı arttıkça permeabilite artmıştır. Ayrıca modifiye proktor enerjisi ile sıkıştırılan numunelerde boşluklar minimize edildiğinden permeabilitelerinde düşme meydana gelmiştir. M. F. ATTOM da Ürdün zeminleri kullanarak yaptığı çalışmada, benzer sonuçlar bulmuştur [25].

Kimyasal stabilizasyon yapılan numunelerde, bir haftalık külden sonra permeabilite düşmektedir. Çünkü, çimento ve kireç katkısı ile bir haftalık külden sonra boşluklar en aza indirilmektedir. Taze numunelerde ise, kireç çabuk reaksiyona girdiğinden dolayı kireç katkılı numunelerin permeabiliteleri azalmaktadır. Ancak taze sıkıştırılan, çimento katkılı numunelerin permeabilitelerinde önemli değişiklikler olmamaktadır.



Şekil 9.9. Kırmataşsız Numuneler için Hidrolik İletkenlik – Su Muhtevası Karşılaştırması



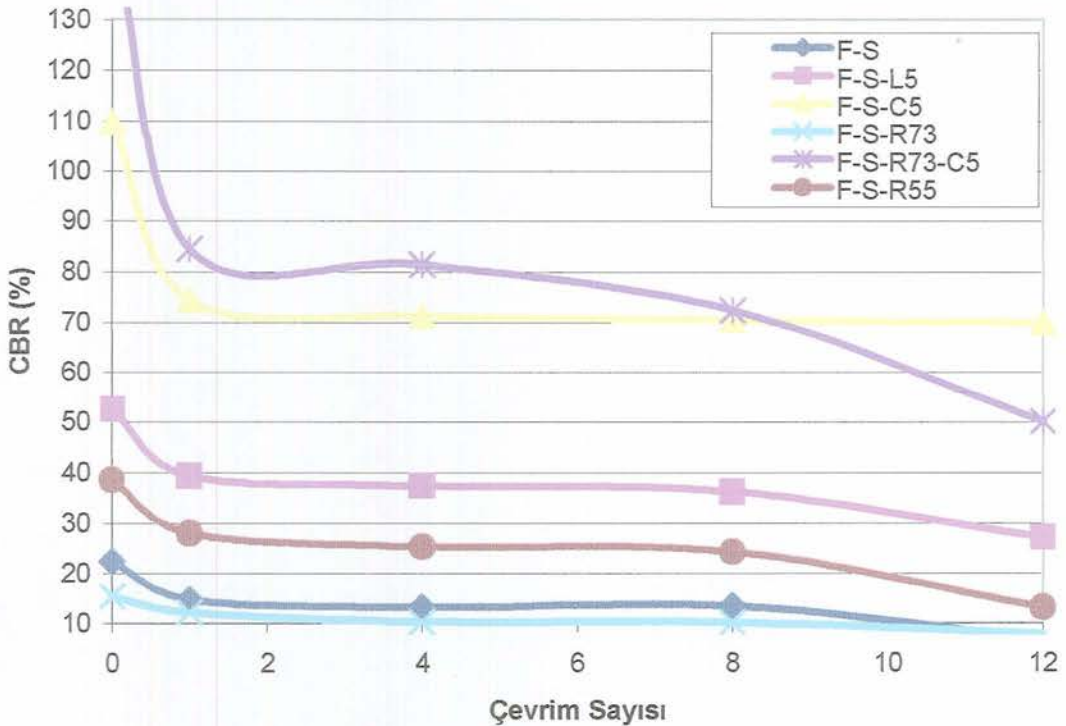
Şekil 9.10. Kırmataşlı Numuneler için Hidrolik İletkenlik – Su Muhtevası Karşılaştırması

9.5. Donma Çözülme Sonrası

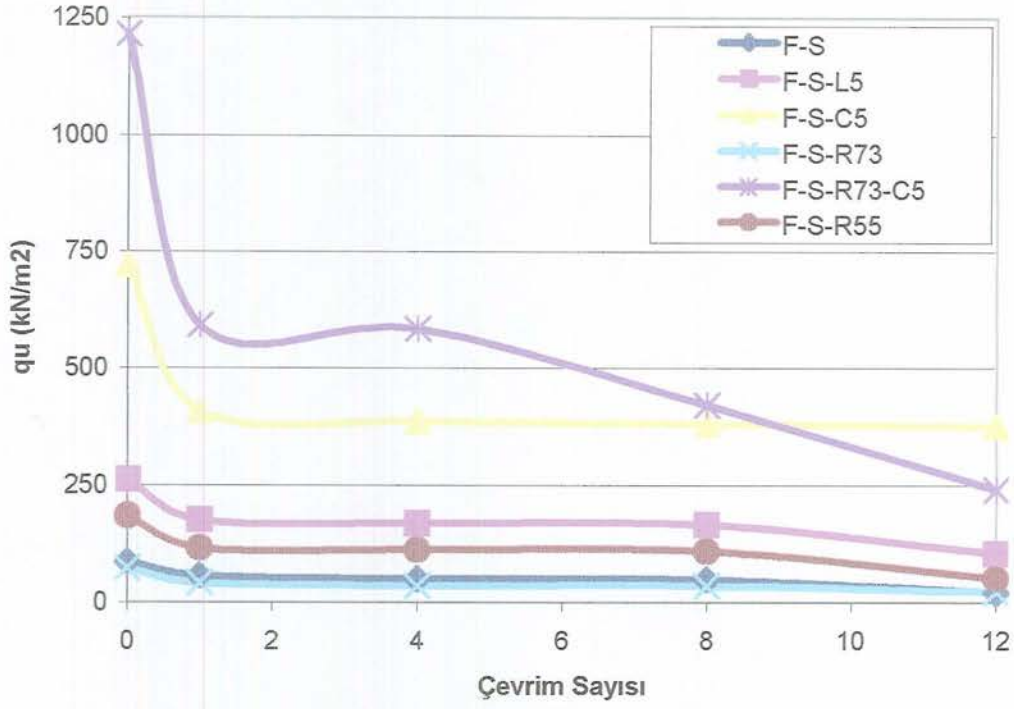
Numuneler, muhtemel kış şartları açısından değerlendirilmek amacıyla donma çözülme deneylerine tabii tutulmuştur. Şekil 9.11, Şekil 9.12 ve Şekil 9.13'te numunelerin donma çözülme çevrimlerinden nasıl etkilendiği görülmektedir. Buna göre mukavemet değerleri açısından CBR ve serbest basınç değerleri benzerlik taşımaktadır.

Grafiklerdeki CBR ve serbest basınç mukavemeti değerlerinden de görüldüğü gibi kalıp kumu numuneleri, birinci çevrimden sonra diğer çevrimlerden çok fazla etkilenmemektedir. Bu nedenle dona dayanıklı bir malzemedir [13].

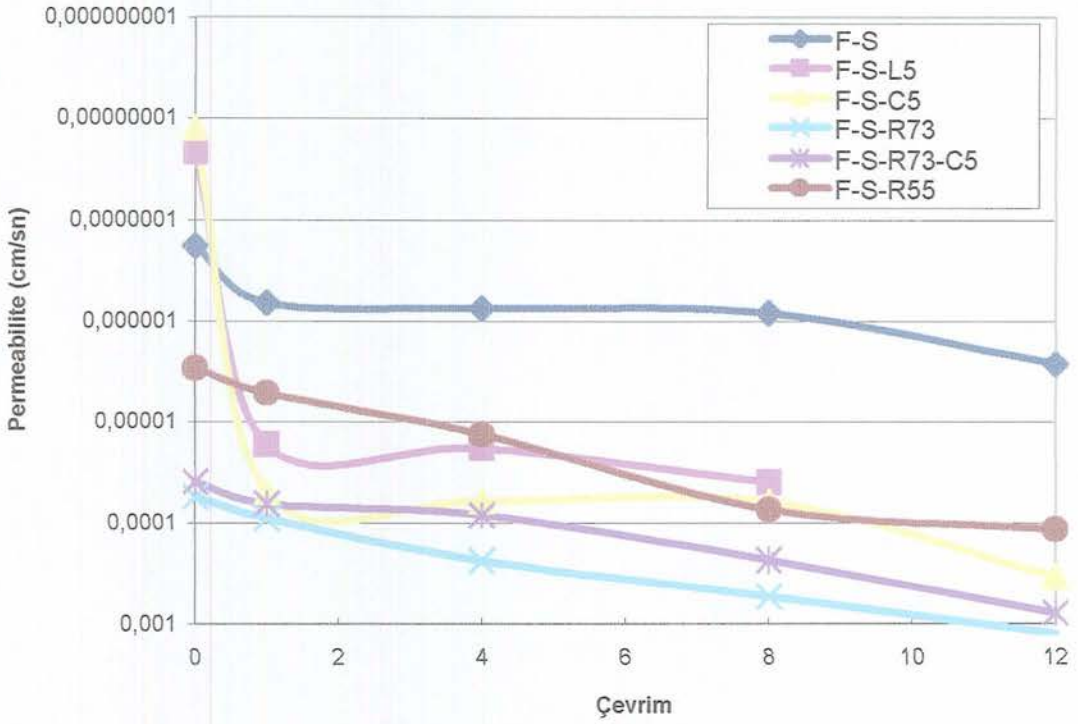
Permeabilite değerlerinde ise, zemin içerisindeki buz zerreciklerinde hacim genişlemesi meydana gelmekte ve boşluklar artmaktadır. Bu sebeple donma çözülme çevrimleriyle permeabilitede artışlar görülmektedir. (Şekil 9.13).



Şekil 9.11. CBR Değerlerinin Donma Çözülme Çevrimleri İle Değişimi



Şekil 9.12. Serbest Basınç Değerlerinin Donma Çözülme Çevrimleri İle Değişimi



Şekil 9.13. Hidrolik İletkenlik Değerlerinin Donma Çözülme Çevrimleri İle Değişimi

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada demir döküm sanayi atıkları olan, atık kalıp kumlarının bertarafı ve yol inşaatında yeniden kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda varılan sonuçlar ve öneriler aşağıda belirtilmiştir.

- a) Numunelerin optimum su muhtevası belirlendikten sonra, taşıma gücü deneyleri, optimum su muhtevası değerinin kuru ve ıslak tarafında yapılmıştır. En yüksek taşıma gücü değerleri optimumun kuru tarafında elde edilmiştir. Bu yüzden sıkıştırma işleminin, optimumun kuru (-2) tarafında yapılması önerilmektedir.
- b) Yapılan permeabilite deneyleri sonucunda, kalıp kumunun geçirimsiz bir malzeme olduğu tespit edilmiştir. Bu, kalıp kumu açısından olumsuz bir özelliktir. Alttemel malzemesi olarak kullanılacak malzemenin geçirimli olması gerekmektedir.
- c) 7 günlük kürler sonunda, çimento ve kireç, kimyasal reaksiyona girerek mukavemetin artmasına, permeabilitenin düşmesine, neden olmuştur. Bu nedenle, atık kalıp kumuna %5 çimento veya %5 kireç ilavesi ile dayanım açısından çok iyi bir alttemel malzemesi elde edileceği görülmüştür.
- d) Laboratuarda, kalıp kumundan elde edilen sızıntı suları üzerinde, ağır metal miktarları tayin edilmiştir. Bu miktarlar, standartlardaki limitler dahilinde kalmıştır. Bunun dışında, kalıp kumuna kireç ve çimento ilavesi ile sızıntı sularındaki ağır metaller minimuma indirilmiştir.
- e) İklimsel farklılıkları değerlendirmek amacıyla yapılan donma çözünme deneyleri sonucunda, kalıp kumu numunelerinin donma çözünme çevrimlerinden fazla etkilenmediği tespit edilmiştir.
- f) Donma çözülme sonrası ağırlık kaybı deneylerinde, kırmataş oranının artmasıyla kayıplar artmıştır. Çimento ilavesi ile kayıplar minimize edilmiştir.
- g) Numunelerin göstermiş olduğu mekanik ve fiziksel özelliklerini de göz önünde bulundurarak, en iyi karışımın F-M-R73-C5 numunesi olduğu tespit edilmiştir. Bu malzeme, alttemel malzemesi olarak kullanılabileceği gibi temel malzemesi olarak da kullanılabilecektir.

h) Kalıp kumlarının tekrar kullanımı sayesinde, doğal kaynak kullanımı azaltılmıştır. Bunun sonucunda, deponi alanlarına olan ihtiyaç azalacaktır ve mevcut çöplük kapasiteleri korunacaktır. Böylece atık masrafları da azalacaktır.

Bu çalışmanın devamı için yapılacak öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda, optimum su muhtevasının farklı yüzdelerindeki kuru ve ıslak değerler bulunabilir.
- 2) Kalıp kumuna diğer katkı malzemeleri, (uçucu kül, kireç+uçucu kül) karıştırılarak stabilizasyonu düşünülebilir.
- 3) Deneyleerde kullanılan katkı malzemeleri toplam ağırlığın %5'i kadar eklenmiştir. Bu oranlar artırılarak veya azaltılarak deneysel verilerdeki değişim izlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] *Karayolları Genel Müdürlüğü, Yollar Fenni Şartnamesi*, Yayın No: 170/2, (1994).
- [2] *Karayolları Genel Müdürlüğü, Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikati*, Yayın No: 208, (1996).
- [3] *Karayolları Genel Müdürlüğü, Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvarı El Kitabı*, (1996).
- [4] TUNÇ Argun, *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Atlas Yayın Dağıtım, (2001).
- [5] UMAR F. ve YAYLA N., *Yol İnşaatı*, İ.T.Ü. Yayınları, (1995).
- [6] *Devlet Planlama Teşkilatı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu*, Cilt 1, Yayın No: DPT 2421-ÖİK: 480, Ankara, (1996).
- [7] KLEVEN ve ark., *Mechanical Properties of Excess Foundry System Sand and Evaluation of its Use in Roadway Structural Fill*, Geotechnical Engineering Report **98-1**, 125, (1998).
- [8] HOTAMAN F., *Esnek Yol Üstyapısının Projelendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, (1998).
- [9] LAFAYETTE W., *Geotechnical Performance of a Highway Embankment Constructed Using Waste Foundry Sand*, INDOT Research, **98-18**, 21-36, (1998).
- [10] GÜNGÖR M. M., *Afşin Elbistan Uçucu Küllerinin Yol Kaplamalarında Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (1996).
- [11] KOYUNCU H., *Stabilizasyon/Solidifikasyon Yöntemiyle İyileştirilmiş Petrollü Sondaj Atıklarının Fiziko-Kimyasal, Mikro Yapısal ve Geoteknik Özellikleri*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1998).
- [12] EL-RAWI N. M. ve AL-SAMADI M. M. Y., *Optimization of Cement-Lime-Chemical Additives to Stabilize Jordanian Soils*, Journal of Islamic Academy of Sciences, **8**, **4**, 46-55, (1995).

- [13] FIRST, *Foundry Sand Facts for Civil Engineers*, Foundry Industry Recycling Starts Today, **1**, 1-59, (2002).
- [14] JAVED S. ve LOVELL C. W., *Uses of Waste Foundry Sand in Civil Engineering*, Purdue University, Report INDOT FHWA, **94-8**, 101-155, (1994).
- [15] EDİL. T., BENSON C. ve ACOSTA H., *Soil Stabilization and Drying Using Fly Ash*, Geo Engineering Report No:03 University of Wisconsin Madison, **125**, (2003).
- [16] ABICHOU, BENSON T. ve TUNCER B., *Beneficial Reuse of Foundry by Products*, University of Wisconsin, Environmental Geotechnics Report, **99-1**, 42-55, (1999).
- [17] KUNES T. ve SMITH M., *Waste Disposal Considerations for Green Sand Use in the Foundry Industry*, AFS-CMI Conference on Green Sand Productivity for the 80's, **47**, 27-55, (1983).
- [18] SIMONSEN E. ve ISACSSON U. *Thaw weaking of pavement structures in cold regions*, Science and Technology, **29**, 135-151, (1999).
- [19] JEGEDE G., *Effect of soil properties on pavement failures along the F209 highway at Ado-Ekiti, South western Nigeria*, Construction and Building Materials, **14**, 311-315, (1999).
- [20] PAGOTTO C., LEGRET M. ve CLOIREC P. L., *Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement*, Pergamon, **34, 18**, 4446-4454, (1999).
- [21] OKAGBUE C. O. ve ONYEObÌ T.U.S. *Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction*, Engineering Geology, **53**, 371-380, (1998).
- [22] FREMPONG E. M. ve TSİDZİ K. E. N., *Blending of marginally suitable tropical subbase materials for use in base course consimeter*. Construction and Building Materials, **13**, 129-141, (1999).
- [23] QINGBAİ W., SHİ B. ve YANG FANG H., *Engineering geological characteristics and processes of permafrost along the Qinghai-Xizeng (Tibet) Highway*, Engineering Geology, **68**, 387-396, (2002).

- [24] GUTIERREZ M., ØİNO L. E. ve NYGARD R., *Stress-dependent permeability of a de-mineralised fracture in shale*, Marine and Petroleum Geology, **17**, 895-907, (2000).
- [25] ATTOM M. F., *The effect of compactive energy level on some soil properties*, Applied Clay Science, **12**, 61-72, (1996).
- [26] HUANG W. H., *Properties of cement-fly ash grout admixed with bentonite, silics fume, or organic fiber*, Pergamon Cement and Concrete Research, **27**, 395-406, (1997).
- [27] NELSON J. D. ve DEBORA J. M., *Expansive Soil Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, Willey and Sons, New York, 250-259, (1992).
- [28] CHEN F. H., *Foundation on Expansive Soils*, American Elsevier Science Publication, New York, **41**, 95-118, (1988).
- [29] GEÇİM D., *Yüksek Şişme Potansiyeline Sahip Zeminlerin Stabilizasyonu*, Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, (2002).
- [30] CULLINANE M. J. Jr. ve JONES L. W., *Solidification and Stabilization of Hazardous Wastes*, US Environmental Protection Agency, **540**, **2-86**, 146-198, (1989).
- [31] TÜZÜNER A. *Toprak ve Su Analizi Laboratuvarı El Kitabı T.C. Orman ve Köy İşleri Bakanlığı, Köy Hizmetleri*, Yayın No: 110, Ankara, (1984).
- [32] PAMUKÇU S., *Additive Stabilization of Petroleum Contaminated Soils*, Petroleum Contaminated Soils, **3**, 367-385, (1993).
- [33] TUNCAN A., TUNCAN M. ve KOYUNCU H. *Petrollü Sondaj Atıklarının Toprakta Meydana Getirdiği Kirliliğin Fiziksel ve Kimyasal Etkilerinin Araştırılması*, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TUBİTAK), Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu, Proje No: **KTÇAG-136**, Eskişehir (1996).
- [34] TAHA ve MORGAN *EP Toxicity: US EPA Extraction*, Journal of Climate, **1**, 10-88, (1999).
- [35] <http://www.turkcadcaml.net>.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Antalya'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Antalya'da tamamladı. Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü bitirdi. Halen yüksek lisans eğitimini, Anadolu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalında sürdürmektedir.

EK-1
DENEY SONUÇLARI

Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Numune	Serbest Basınç Direnci (kN/m ²)
F-S	84,6
F-S-(+2)	75
F-S-(-2)	146
F-M	383,6
F-M-(+2)	258,4
F-M-(-2)	526,5
F-S-L5	126,6
F-S-L5-(+2)	72,1
F-S-L5-(-2)	136,2
F-M-L5	332,1
F-M-L5-(+2)	92,8
F-M-L5-(-2)	499,6
F-S-C5	149,8
F-S-C5-(+2)	111,6
F-S-C5-(-2)	233
F-M-C5	294,8
F-M-C5-(+2)	256,9
F-M-C5-(-2)	434,4
F-S-R73	74,43
F-S-R73-(+2)	29,13
F-S-R73-(-2)	285,5
F-M-R73	578,1
F-M-R73-(+2)	136,6
F-M-R73-(-2)	784,7
F-S-R55	188,3
F-S-R55-(+2)	70,71
F-S-R55-(-2)	313
F-M-R55	370
F-M-R55-(+2)	99,2
F-M-R55-(-2)	583,5
F-S-R73-C5	55,3
F-S-R73-C5-(+2)	27,56
F-S-R73-C5-(-2)	188,2
F-M-R73-C5	257,9
F-M-R73-C5-(+2)	116,1
F-M-R73-C5-(-2)	707,5
B-S	Tutmadı
B-S-(+2)	Tutmadı
B-S-(-2)	Tutmadı
B-M	Tutmadı
B-M-(+2)	Tutmadı
B-M-(-2)	Tutmadı
D-S	96,1
D-S-(+2)	Tutmadı
D-S-(-2)	181,2
D-M	300,5
D-M-(+2)	283,8
D-M-(-2)	394,8

CBR Deney Sonuçları

Numune	CBR (%)
F-S	19
F-S-(+2)	2,27
F-S-(-2)	27,7
F-M	70,71
F-M-(+2)	15,81
F-M-(-2)	78,7
F-S-L5	22,4
F-S-L5-(+2)	1,84
F-S-L5-(-2)	23,79
F-M-L5	65,89
F-M-L5-(+2)	2,11
F-M-L5-(-2)	72
F-S-C5	33,23
F-S-C5-(+2)	4,61
F-S-C5-(-2)	46,53
F-M-C5	57,06
F-M-C5-(+2)	15,56
F-M-C5-(-2)	69,4
F-S-R73	14,77
F-S-R73-(+2)	Tutmadı
F-S-R73-(-2)	52,8
F-M-R73	79,5
F-M-R73-(+2)	5,3
F-M-R73-(-2)	113,3
F-S-R55	38,47
F-S-R55-(+2)	1,59
F-S-R55-(-2)	55,89
F-M-R55	69,1
F-M-R55-(+2)	2,6
F-M-R55-(-2)	86,1
F-S-R73-C5	4,2
F-S-R73-C5-(+2)	Tutmadı
F-S-R73-C5-(-2)	40,56
F-M-R73-C5	48,6
F-M-R73-C5-(+2)	3,7
F-M-R73-C5-(-2)	91,5
B-S	18,63
B-S-(+2)	Tutmadı
B-S-(-2)	21,81
B-M	26,7
B-M-(+2)	3,3
B-M-(-2)	34,54
D-S	17,67
D-S-(+2)	Tutmadı
D-S-(-2)	39
D-M	56,67
D-M-(+2)	18,46
D-M-(-2)	64,73

Yaş CBR Deney Sonuçları

Malzeme	Yaş CBR Değeri
F-S	10.3
F-S-L5	52.5
F-S-C5	109.7
F-S-R73	8.3
F-M-R73	47.7
F-S-R73-C5	148.7
F-M-R73-C5	165.7
F-S-R55	16.6
F-M-R55	32.3
B-S	7.4

Permeabilite Deney Sonuçları

Numune	Hidrolik İletkenlik (cm/sn)
F-S	1.801E-07
F-S-(+2)	7,05E-08
F-S-(-2)	3,578E-07
F-M	4,109E-08
F-M-(+2)	1,213E-08
F-M-(-2)	6,325E-08
F-S-L5	3,81E-08
F-S-L5-(+2)	5,759E-09
F-S-L5-(-2)	2,05E-07
F-M-L5	4,115E-09
F-M-L5-(+2)	2,363E-09
F-M-L5-(-2)	3,08E-08
F-S-C5	2,56E-07
F-S-C5-(+2)	8,76E-08
F-S-C5-(-2)	2,436E-06
F-M-C5	1,048E-08
F-M-C5-(+2)	3,54E-09
F-M-C5-(-2)	9,894E-08
F-S-R73	5,7E-05
F-S-R73-(+2)	2,82E-05
F-S-R73-(-2)	8,96E-05
F-M-R73	3,38E-05
F-M-R73-(+2)	2,26E-05
F-M-R73-(-2)	4,26E-05
F-S-R55	8,2E-06
F-S-R55-(+2)	6,1E-06
F-S-R55-(-2)	1,6E-05
F-M-R55	4,1E-06
F-M-R55-(+2)	2,9E-06
F-M-R55-(-2)	7,5E-06
F-S-R73-C5	4,36E-05
F-S-R73-C5-(+2)	9,98E-06
F-S-R73-C5-(-2)	9,84E-05
F-M-R73-C5	1,96E-05
F-M-R73-C5-(+2)	7,89E-06
F-M-R73-C5-(-2)	4,75E-05
B-S	4,1E-06
B-S-(+2)	2,1E-06
B-S-(-2)	2,7E-05
B-M	2,8E-06
B-M-(+2)	1,6E-06
B-M-(-2)	1,1E-05
D-S	3,8E-05
D-S-(+2)	2,2E-05
D-S-(-2)	7,5E-05
D-M	1,1E-05
D-M-(+2)	2,2E-06
D-M-(-2)	4,8E-05

Donma Çözülme Sonrası Serbest Basınç Değerleri

Numune	Serbest Basınç Direnci (kN/m ²)
F-S	87,1
F-1-S	56,8
F-4-S	49,3
F-8-S	48,2
F-12-S	21,3
F-S-L5	261,7
F-1-S-L5	176,3
F-4-S-L5	168,8
F-8-S-L5	166,3
F-12-S-L5	104,5
F-S-C5	721,3
F-1-S-C5	408,1
F-4-S-C5	386,3
F-8-S-C5	381,2
F-12-S-C5	375
F-S-R73	72,5
F-1-S-R73	41,3
F-4-S-R73	35,1
F-8-S-R73	35,0
F-12-S-R73	22,3
F-S-R55	185,1
F-1-S-R55	116,5
F-4-S-R55	112,4
F-8-S-R55	109,6
F-12-S-R55	51,4
F-S-R73-C5	1213,9
F-1-S-R73-C5	591,7
F-4-S-R73-C5	583,6
F-8-S-R73-C5	420,6
F-12-S-R73-C5	240,3
B-S	Tutmadı
B-1-S	Tutmadı
B-4-S	Tutmadı
B-8-S	Tutmadı
B-12-S	Tutmadı
D-S	95,3
D-1-S	53,9
D-4-S	Tutmadı
D-8-S	Tutmadı
D-12-S	Tutmadı

Donma Çözülme Sonrası CBR Değerleri

Numune	CBR (%)
F-S	22,41
F-1-S	14,77
F-4-S	13,19
F-8-S	13,44
F-12-S	6,86
F-S-L5	52,51
F-1-S-L5	39,31
F-4-S-L5	37,31
F-8-S-L5	36,17
F-12-S-L5	27,19
F-S-C5	109,71
F-1-S-C5	74,34
F-4-S-C5	71,23
F-8-S-C5	70,51
F-12-S-C5	69,93
F-S-R73	15,36
F-1-S-R73	12,2
F-4-S-R73	10,29
F-8-S-R73	10,14
F-12-S-R73	7,91
F-S-R55	38,5
F-1-S-R55	27,97
F-4-S-R55	25,31
F-8-S-R55	24,3
F-12-S-R55	13,2
F-S-R73-C5	148,7
F-1-S-R73-C5	84,5
F-4-S-R73-C5	81,4
F-8-S-R73-C5	72,4
F-12-S-R73-C5	50,17
B-S	19,5
B-1-S	13,4
B-4-S	12,7
B-8-S	6,9
B-12-S	4,7
D-S	18,1
D-1-S	12,66
D-4-S	12,96
D-8-S	10,4
D-12-S	6,9

Donma Çözülme Sonrası Permeabilite Değerleri

Numune	Permeabilite (cm/s)
F-S	1,758 E-07
F-1-S	6,526 E-07
F-4-S	7,447 E-07
F-8-S	8,331 E-07
F-12-S	2,658 E-06
F-S-L5	2,127 E-08
F-1-S-L5	1,679 E-05
F-4-S-L5	1,845 E-05
F-8-S-L5	4,005 E-05
F-12-S-L5	Tutmuyor
F-S-C5	1,24 E-08
F-1-S-C5	4,977 E-05
F-4-S-C5	6,05 E-05
F-8-S-C5	6,215 E-05
F-12-S-C5	3,42 E-04
F-S-R73	5,53 E-05
F-1-S-R73	8,98 E-05
F-4-S-R73	2,36 E-04
F-8-S-R73	5,38 E-04
F-12-S-R73	4,26 E-03
F-S-R55	2,95 E-06
F-1-S-R55	5,2 E-06
F-4-S-R55	1,3 E-05
F-8-S-R55	7,32 E-05
F-12-S-R55	1,2 E-04
F-S-R73-C5	9,83 E-06
F-1-S-R73-C5	6,42 E-05
F-4-S-R73-C5	8,36 E-05
F-8-S-R73-C5	2,32 E-04
F-12-S-R73-C5	7,86 E-04
B-S	2,8 E-05
B-1-S	1,7 E-04
B-4-S	4,7 E-04
B-8-S	8,8 E-04
B-12-S	1,59 E-03
D-S	3,71 E-05
D-1-S	3,3 E-04
D-4-S	4,7 E-04
D-8-S	8,8 E-04
D-12-S	1,59 E-03

EK-2

DONMA ÇÖZÜLME SONRASI AĞIRLIK KAYBI DENEY SONUÇLARI

Kalıp Kumu

Numune #1

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	1762,0/1702,0	60,0	60,0	3,4	3,4
2	1699,0/1669,5	29,5	89,5	1,7	5,1
3	1670,2/1616,9	53,3	142,8	3,2	8,1
4	1616,6/1575,9	40,7	183,5	2,5	10,4
5	1575,9/1534,0	41,9	225,4	2,7	12,8
6	1533,9/1486,0	47,9	273,3	3,1	15,5
7	1485,8/1444,5	41,3	314,6	2,8	17,9
8	1444,3/1409,3	35,0	349,6	2,4	19,8
9	1409,3/1377,4	31,9	381,5	2,3	21,7
10	1377,1/1346,4	30,7	412,2	2,2	23,4
11	1346,8/1315,3	31,5	443,7	2,3	25,2
12	1315,3/1282,3	33,0	476,7	2,5	27,1

Numune #2

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	1773,4/1710,0	63,4	40,6	3,6	3,6
2	1707,3/1683,0	24,3	85,6	1,4	5,0
3	1683,7/1658,5	25,2	129,32	1,5	6,4
4	1658,1/1615,0	43,1	164,6	2,6	8,8
5	1614/11564,2	49,8	199,72	3,1	11,6
6	1563,6/1521,0	42,6	240,33	2,7	14,0
7	1520,9/1480,3	40,6	273,53	2,7	16,3
8	1480,0/1441,7	38,3	298,59	2,6	18,5
9	1441,3/1406,7	34,6	324,47	2,4	20,4
10	1406,8/1370,7	36,1	345,47	2,6	22,5
11	1370,5/1327,8	42,7	366,1	3,1	24,9
12	1327,7/1289,7	38,0	382,98	2,9	27,0

Kalıp Kumu+%5Kirec

Numune #1

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	1763,6/1741,3	22,30	22,3	1,26	1,26
2	1740,3/1700,1	40,20	62,5	2,31	3,54
3	1700,22/1663,83	36,39	98,89	2,14	5,61
4	1663,84/1632,97	30,87	129,76	1,86	7,36
5	1632,64/1604,05	28,59	158,35	1,75	8,98
6	1603,81/1562,76	41,05	199,4	2,56	11,31
7	1562,11/1530,18	31,93	231,33	2,04	13,12
8	1529,75/1504	25,75	257,08	1,68	14,58
9	1503,58/1469,48	34,10	291,18	2,27	16,51
10					
11					
12					

Numune #2

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	1755,5/1714,9	40,6	40,6	2,31	2,31
2	1713,9/1668,9	45	85,6	2,63	4,88
3	1668,68/1624,96	43,72	129,32	2,62	7,37
4	1624,73/1589,45	35,28	164,6	2,17	9,38
5	1588,60/1553,48	35,12	199,72	2,21	11,38
6	1553,28/1512,67	40,61	240,33	2,61	13,69
7	1511,88/1478,68	33,2	273,53	2,20	15,58
8	1478,62/1453,56	25,06	298,59	1,69	17,01
9	1453,33/1427,45	25,88	324,47	1,78	18,48
10	1427,15/1406,15	21	345,47	1,47	19,68
11	1405,90/1385,27	20,63	366,1	1,47	20,85
12	1385,18/1368,30	16,88	382,98	1,22	21,82

Kalıp Kumu+%5Cimento

Numune #1

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	1808,1/1788,8	19,3	19,3	1,1	1,1
2	1788,6/1769,5	19,1	38,4	1,1	2,1
3	1769,1/1748,8	20,3	58,7	1,1	3,2
4	1748,3/1730,5	17,8	76,5	1,0	4,2
5	1730,4/1711,7	18,7	95,2	1,1	5,3
6	1711,3/1693,1	18,2	113,4	1,1	6,3
7	1693,0/1676,1	16,9	130,3	1,0	7,2
8	1675,7/1660,5	15,2	145,5	0,9	8,0
9	1659,2/1641,3	17,9	163,4	1,1	9,0
10	1640,9/1624,9	16	179,4	0,9	9,9
11	1624,9/1611,4	13,5	192,9	0,8	10,7
12	1611,1/1601,1	10	202,9	0,6	11,2

Numune #2

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	1825,4/1807,2	18,2	18,2	1,0	1,0
2	1807/1790,9	16,1	34,3	0,9	1,9
3	1790,8/1769,2	21,6	55,9	1,2	3,1
4	1769,0/1749,4	19,6	75,5	1,1	4,1
5	1749,2/1727,7	21,5	97	1,3	5,3
6	1727,4/1704,9	22,5	119,5	1,3	6,5
7	1704,6/1685,5	19,1	138,6	1,1	7,6
8	1685,1/1668,6	16,5	155,1	1,0	8,5
9	1668,2/1652,2	16	171,1	1,0	9,4
10	1651,7/1636,2	15,5	186,6	0,9	10,2
11	1637,9/1626,1	11,8	198,4	0,7	10,9
12	1626,7/1614,9	11,8	210,4	0,7	11,5

%27 Kalıp Kumu + %73 K.Tas

Numune #1

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	4691/4378	313	313	6,7	6,7
2	4381/4170	211	524	4,8	11,2
3	4166/3963	203	727	4,9	15,5
4	3962/3814	148	875	3,7	18,7
5	3813/3725	88	963	2,3	20,5
6	3725/3543	182	1145	4,9	24,4
7	3541/3447	94	1239	2,6	26,4
8	3448/3313	135	1374	3,9	29,3
9	3312/3243	69	1443	2,1	30,8
10	3241/3151	90	1533	2,8	32,7
11	3149/3049	100	1633	3,2	34,8
12	3041/2969	72	1705	2,4	36,3

Numune #2

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	4715/4473	242	242	5,1	5,1
2	4472/4331	141	383	3,2	8,1
3	4325/4082	243	626	5,6	13,3
4	4079/3935	144	770	3,5	16,3
5	3935/3856	79	849	2,0	18,0
6	3856/3708	148	997	3,8	21,1
7	3706/3447	259	1256	7,0	26,6
8	3448/3291	157	1413	4,6	30,0
9	3285/3210	75	1488	2,3	31,6
10	3208/3104	104	1592	3,2	33,8
11	3103/3034	69	1661	2,2	35,2
12	3027/2961	66	1727	2,2	36,6

%27Kalıp Kumu+K.Taş+Cimento

Numune #1

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	4826/4812	14	14	0,3	0,3
2	4806/4793	13	27	0,3	0,6
3	4794/4785	9	36	0,2	0,7
4	4785/4775	10	46	0,2	1,0
5	4774/4764	10	56	0,2	1,2
6	4765/4758	7	63	0,1	1,3
7	4761/4755	6	69	0,1	1,4
8	4754/4749	5	74	0,1	1,5
9	4752/4748	4	78	0,1	1,6
10	4748/4745	3	81	0,1	1,7
11	4746/4742	4	85	0,1	1,8
12	4742/4738	4	89	0,1	1,8

Numune #2

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	4825/4811	14	14	0,3	0,3
2	4806/4789	17	31	0,4	0,6
3	4789/4776	13	44	0,3	0,9
4	4777/4768	9	53	0,2	1,1
5	4769/4762	7	60	0,1	1,2
6	4764/4755	9	69	0,2	1,4
7	4759/4752	7	76	0,1	1,6
8	4752/4747	5	81	0,1	1,7
9	4748/4743	5	86	0,1	1,8
10	4743/4740	3	89	0,1	1,8
11	4740/4737	3	92	0,1	1,9
12	4737/4734	3	95	0,1	2,0

%45Kalıp Kumu+K.Tas

Numune #1

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	4575/4365	210	210	4,6	4,6
2	4365/4227	138	348	3,2	7,6
3	4228/4115	113	461	2,7	10,0
4	4114/4032	82	543	2,0	11,9
5	4032/3942	90	633	2,2	13,8
6	3943/3803	140	773	3,6	16,9
7	3801/3726	75	848	2,0	18,5
8	3726/3651	75	923	2,0	20,2
9	3680/3559	121	1044	3,3	22,8
10	3556/3419	137	1181	3,9	25,8
11	3419/3337	82	1263	2,4	27,6
12	3337/3229	108	1371	3,2	30,0

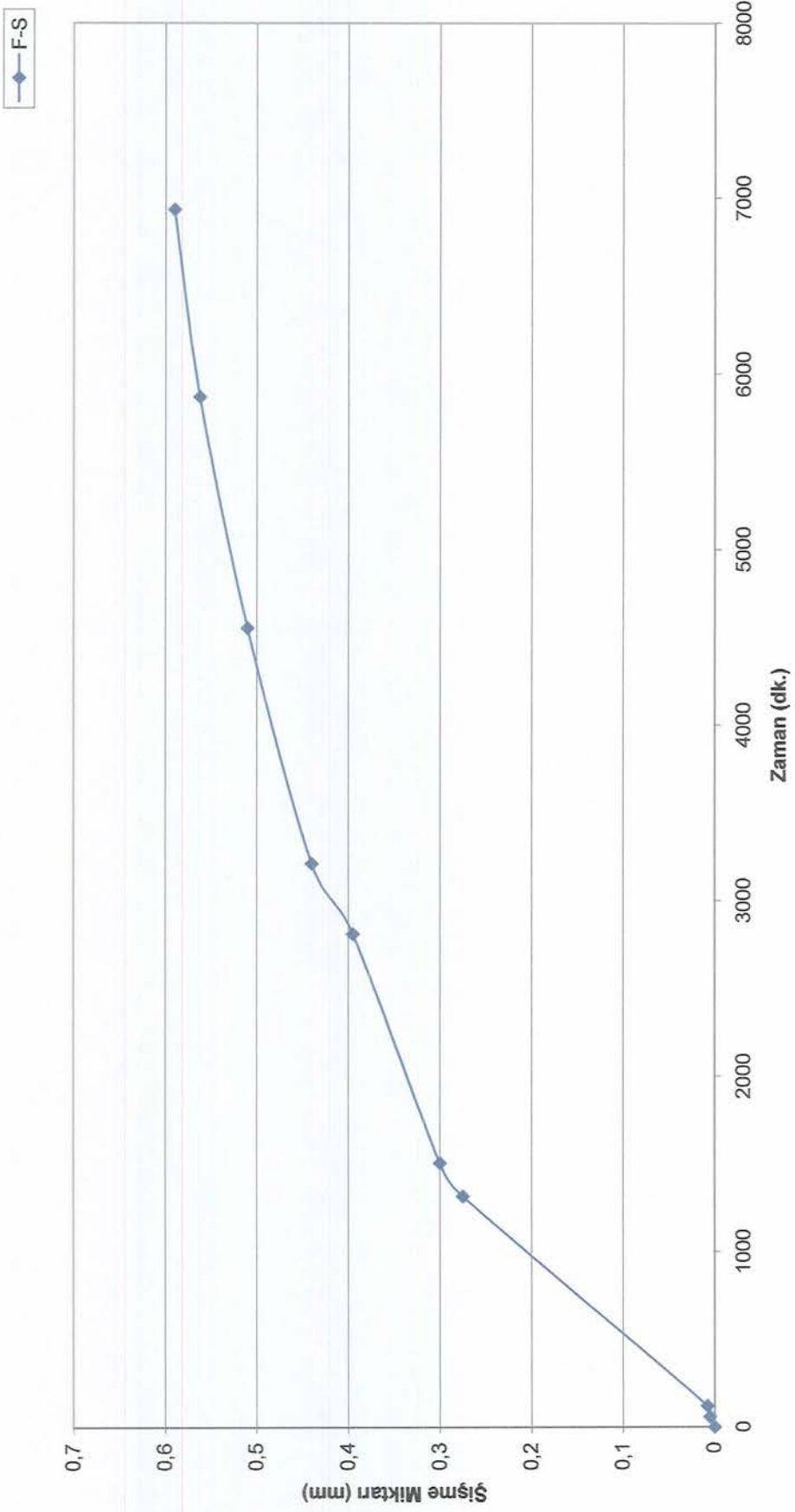
Numune #2

Çevrim	Ağırlık (gr)	Kayıp (gr)	Toplam Kayıp (gr)	(%)	Toplam (%)
1	4564/4393	171	171	3,7	3,7
2	4393/4307	86	257	2,0	5,6
3	4306/4204	102	359	2,4	7,9
4	4202/4042	160	519	3,8	11,4
5	4040/3843	197	716	4,9	15,7
6	3842/3717	125	841	3,3	18,4
7	3716/3573	143	984	3,8	21,6
8	3572/3476	96	1080	2,7	23,7
9	3475/3335	140	1220	4,0	26,7
10	3330/3202	128	1348	3,8	29,5
11	3202/3033	169	1517	5,3	33,2
12	3033/2896	137	1654	4,5	36,2

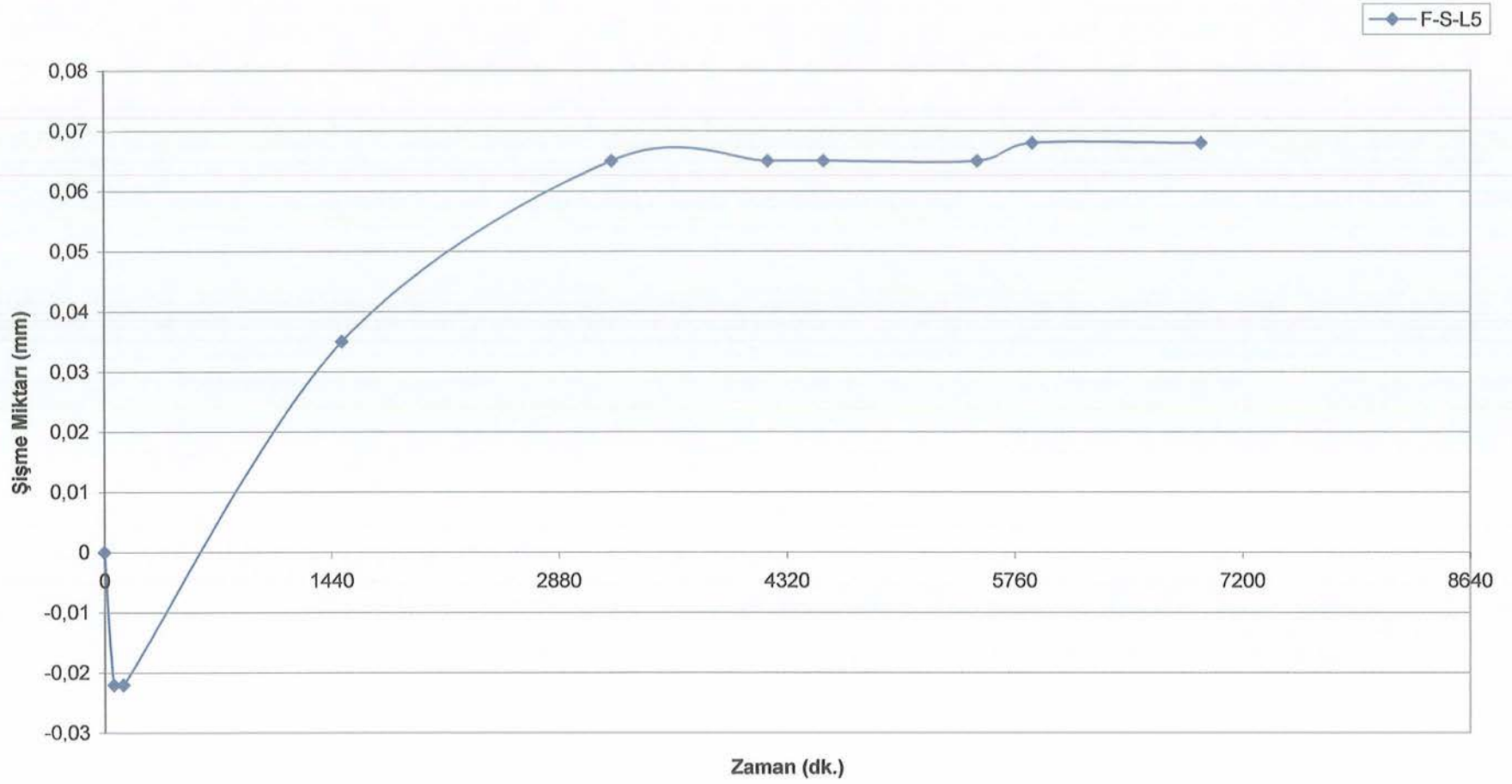
EK-3

SERBEST ŞİŞME DENEYLERİ

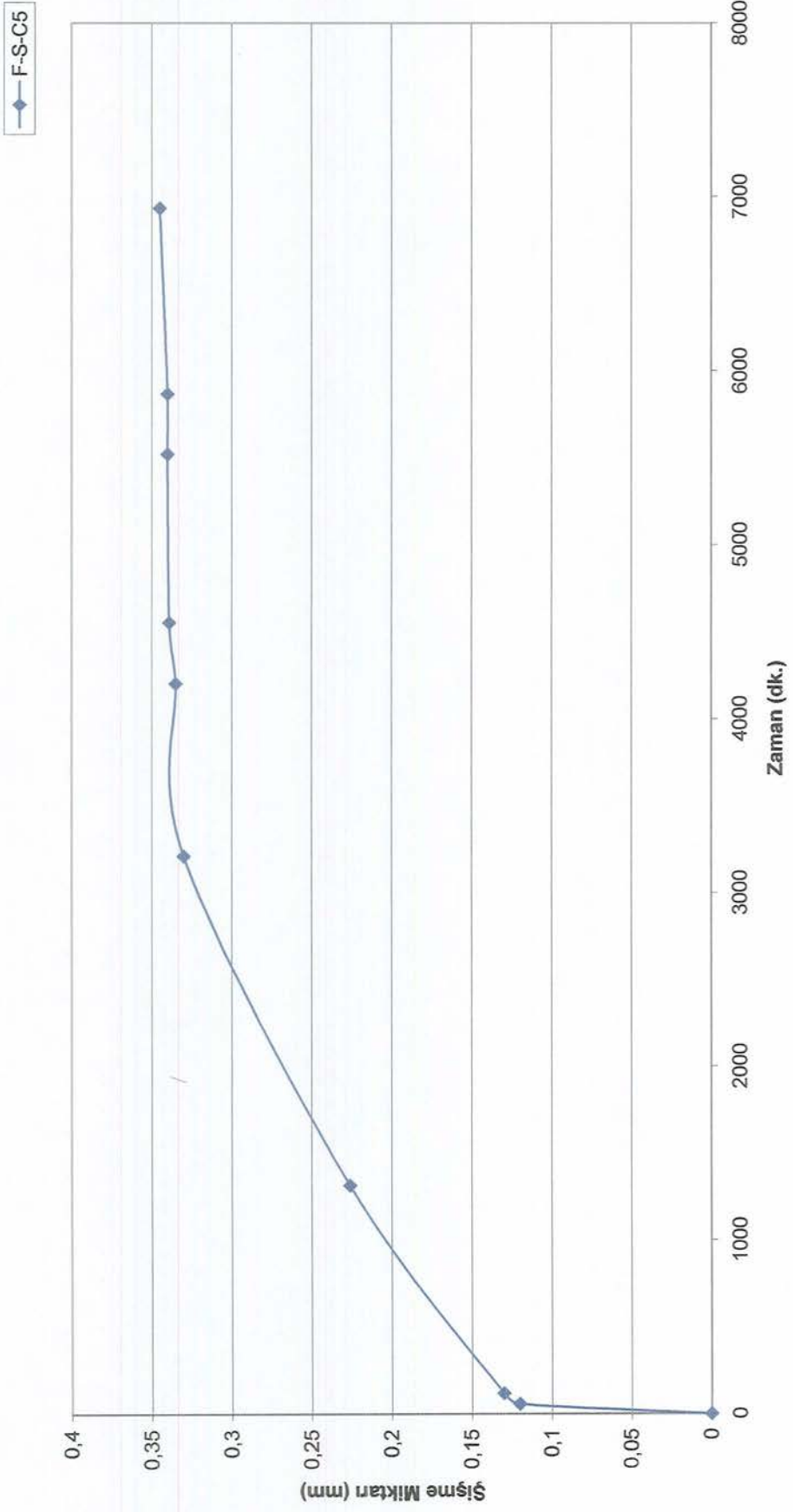
Şişme Zaman Grafiği



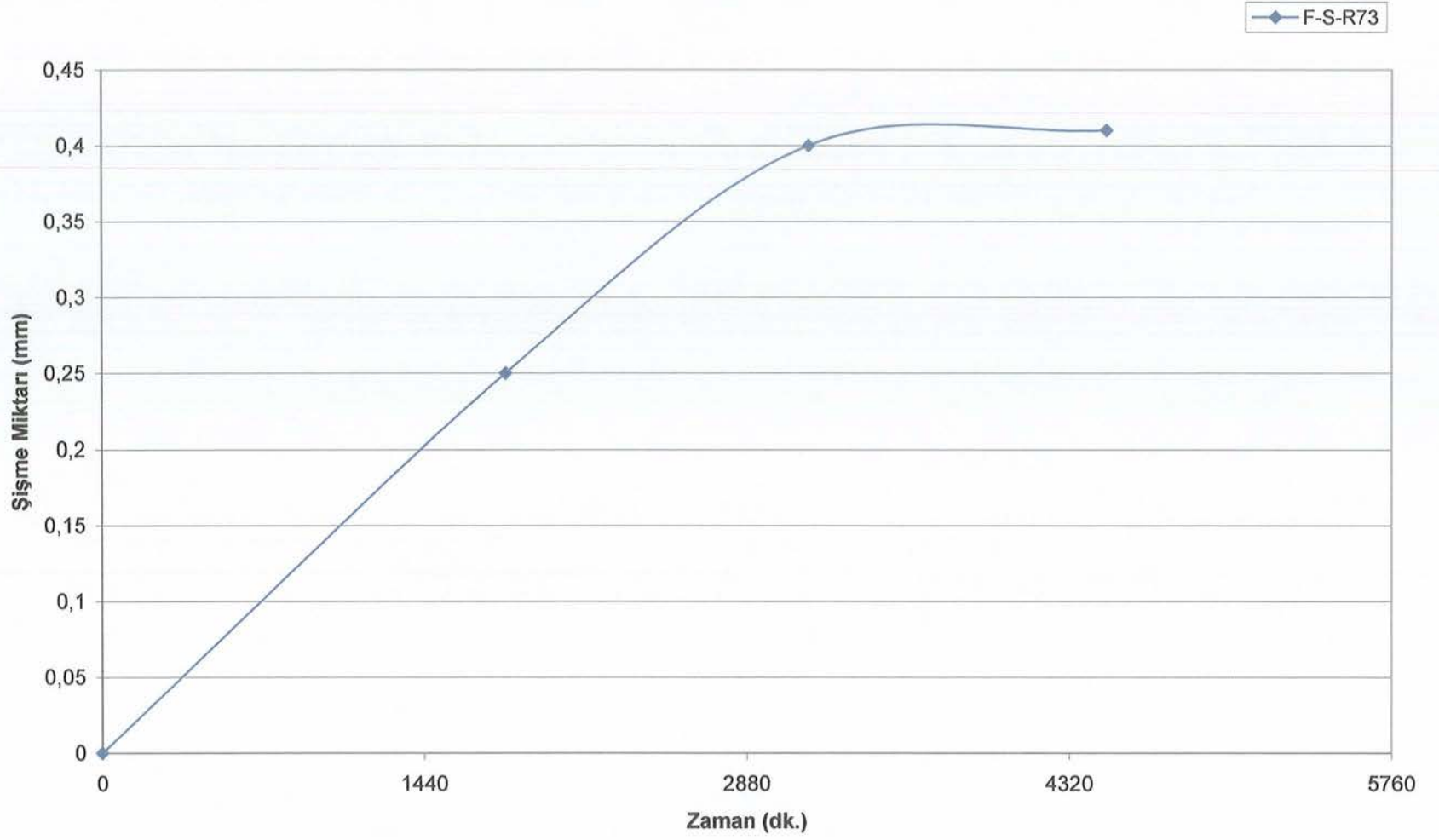
Şişme Zaman Grafiği



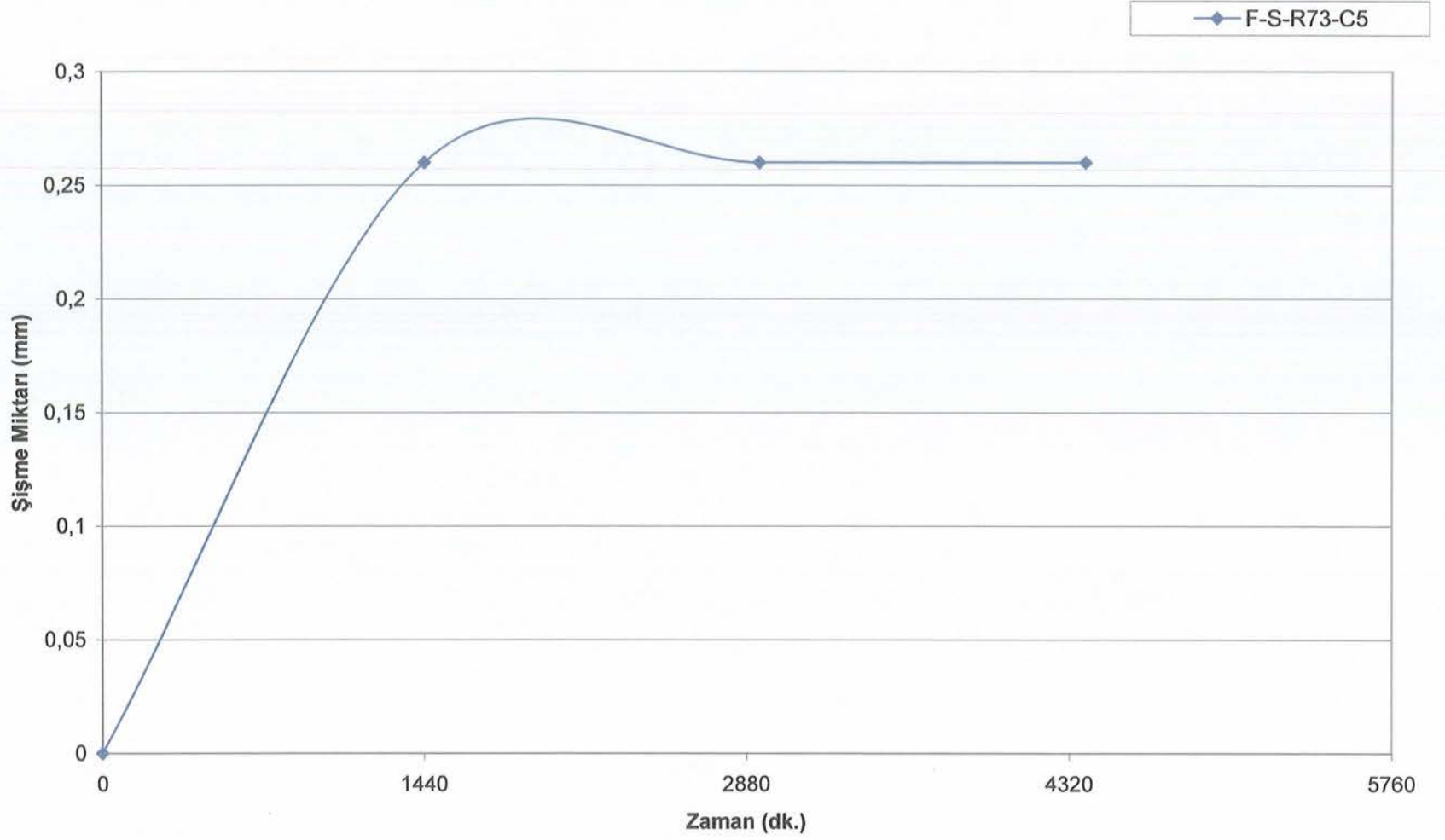
Şişme-Zaman Grafiği



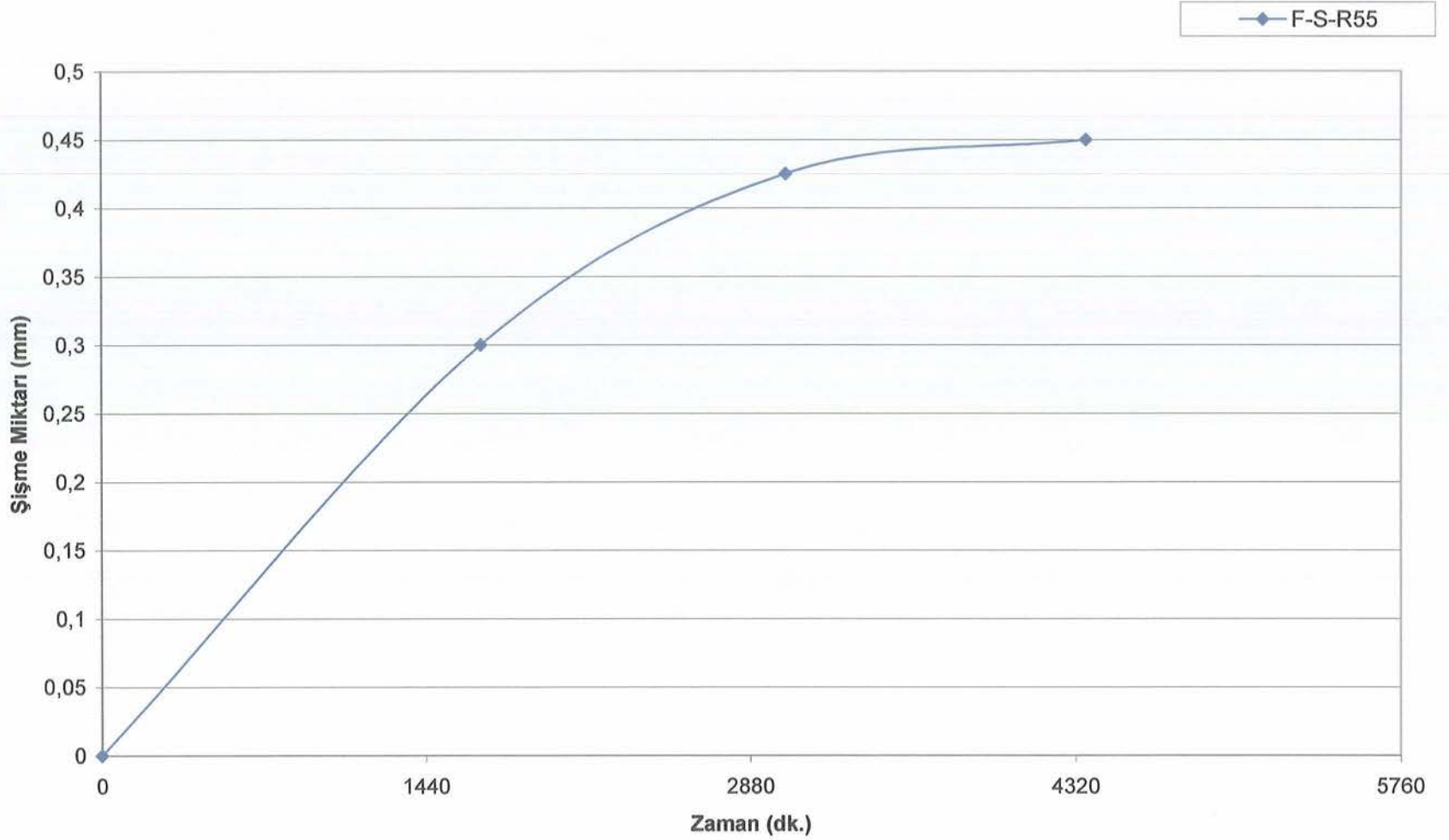
Şişme Miktarı - Zaman



Şişme Miktarı - Zaman



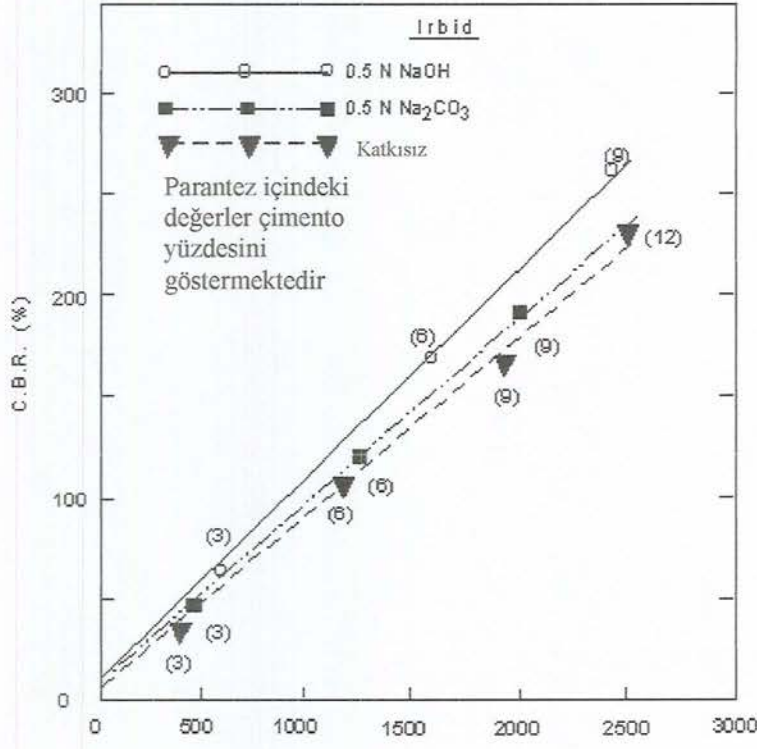
Şişme Miktarı - Zaman



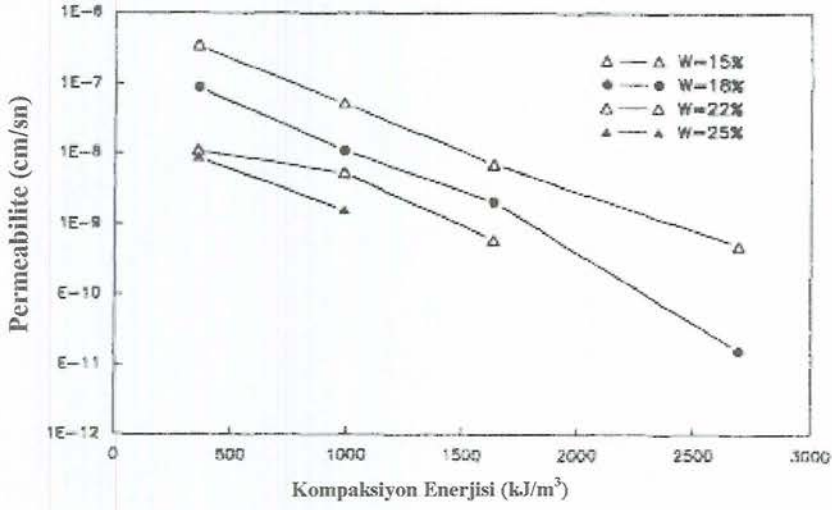
EK-4

LİTERATÜRDEN ALINAN GRAFİKLER

Serbest Basınc – CBR Karşılaştırması (12)



Kompaksiyon Enerjisi – Permeabilite Karşılaştırması (25)



Su Muhtevası – Permeabilite Karşılaştırması (25)

