

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN İŞLETMELERİNDE NAKLİYE  
YOLLARI TASARIMI**

**Servan ATAY**

**Ekim, 2011**

**İZMİR**

# **MADEN İŞLETMELERİNDE NAKLİYE YOLLARI TASARIMI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Doktora Tezi  
Maden Mühendisliği Bölümü, Maden İşletme Anabilim Dalı**

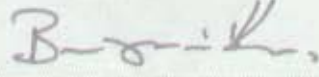
**Servan ATAY**

**Ekim, 2011**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SERVAN ATAY, tarafından YRD. DOÇ. DR. BAYRAM KAHRAMAN yönetiminde hazırlanan "MADEN İŞLETMELERİNDE NAKLİYE YOLLARI TASARIMI" başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. Bayram KAHRAMAN

Yönetici



Prof. Dr. Halil KÖSE

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Doç. Dr. Selçuk TÜRKEK

Tez İzleme Komitesi Üyesi



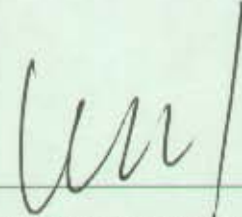
Doç. Dr. Hayati YERİCE

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Ahmet DAĞ

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŐEKKÖR

Bitirme projemin hazırlanması sırasında bana her türlü desteği ve ilgiyi sağlayan hocam Sayın Yrd. Doğ. Dr. Bayram Kahraman'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Servan ATAY

## MADEN İŞLETMELERİNDE NAKLİYE YOLLARI TASARIMI

### ÖZ

Ülkemiz madenciliğinde yüksek tonajlı büyük kamyonların kullanılmaya başlanması uygun nakliye yollarının tasarımını gerektirmektedir. Maden işletmeleri tasarımlarını hiçbir bilimsel veriye dayanmayan, geçmiş deneyimlere göre yapmaktadırlar. Madencilik sektöründe kullanılan nakliye yollarının dayanıklı ve uzun ömürlü olması için, yapılacak yolun her bir tabakasındaki uygun kalınlık ve malzeme kullanılması gerekmektedir. Ancak maden ocaklarında planlanan yol güzergâhı tabanında istenilen özellikte malzeme her zaman bulunamamaktadır. Bu nedenle mühendisler, yol güzergâhındaki zayıf zemini kaldırarak yerine her bir tabaka için uygun özellikte malzeme getirmek zorunda kalmaktadırlar. Bu durumda ise yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Maden firmaları yüksek maliyetler nedeniyle yolu ya olduğu gibi kullanmakta ya da düşük tabaka kalınlığında malzeme sermektedirler. Her iki durumda da özellikle kış aylarında nakliye yollarında büyük sıkıntılar yaşanmakta ve yol çalışamaz duruma gelebilmektedir. Nakliye yolunun bozulması nedeniyle araçların lastik, tamir-bakım giderleri de artmaktadır. Bu nedenle işletmeler büyük zararlara uğramaktadır.

Bu projede kaplama tasarımı için Avrupa ve Amerika'da pratik oluşu nedeniyle yaygın olarak kullanılan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) yöntemi kullanılmıştır. Ülkemiz orta ve küçük ölçekli maden işletmelerinde büyük bir oranda yüklü ağırlığı elli ton olan nakliye kamyonları kullanılmaktadır. Bu kamyonların nakliye yollarında deformasyona neden olmadan faaliyet gösterebilmeleri için tekerlek yükünü taşıyabilecek üst yapı tabanı oluşturulmalıdır. Bunun için CBR yöntemi ile yapılan hesaplamada gereken tabaka kalınlığı atmış cm olarak hesaplanmıştır. Phase2 programı ile doğal malzeme, 60 cm sağlam malzeme, 50 cm kireç stabilizasyonu ile 10 cm sağlam malzeme ve elli cm kireç stabilizasyonu için yola gelecek maksimum yüke göre yolda oluşacak deformasyonlar incelenmiştir. Ayrıca klasik yöntem ve kireç ile stabilizasyon yöntemi ile yol yapımı ekonomik olarak karşılaştırılmıştır.

Elde edilen verilere göre kireç stabilizasyonu uygulamasının klasik yöntemle göre daha ekonomik olduğu saptanmıştır. Ayrıca aynı tabaka kalınlığı için klasik yöntem ve kireç stabilizasyonu tabakalarında yaklaşık aynı miktarda deformasyon

gerçekleştđđ ve bu oranın maden nakliye yolu için kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görölmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Stabilizasyon, kireç, tasarım, nakliye yolları, proktor, CBR, likid limit

## DESIGN of the MINING HAULAGE ROADS

### ABSTRACT

In Turkey, because of using high loaded capacity trucks, it is necessary to have well designed haulage roads. Conception of running mining has never been on scientific base but on past experiences.

In order to have the haulage roads durable and long term, the required layer thickness and soil types should be used in each layer of the road. However, it is too difficult to find the required materials in the planned road direction. So the engineers have to remove the poor top of the surface and replace with the good compactible materials. That causes a high cost. So the mining companies use neither the road direction without any stabilization nor poor layered road design than normal. In both cases, especially in winter, the haulage roadways can have some deformations and be closed. As the haulage roadway deformations increase, the tires and maintenance of the cost also increase.

In this Project, CBR method which is commonly used in Europe and the USA is used for the haulage roadway design due to its' practicability. In Turkey, the small and medium sized companies generally use fifty tonned loaded weighted trucks. Haulage roadways should be designed for carrying on the wheel loads of the trucks. Sixty cm. layer thickness is calculated for that trucks. Conditions of the natural soil, sixty cm. good compactible soil, fifty cm. lime stabilisation plus ten cm. good compactible soil and fifty cm. lime stabilisation deformations are determined as the maximum wheel load on the haulage roadways. Besides the traditional and lime stabilisation methods are economically compared.

In conclusion, lime stabilisation method is more economical than the traditional method. Both the traditional and lime stabilisation methods have roughly the same deformation amount for the same layer thickness. This amount of deformations are acceptable for the mining haulage roadway design.

**Keywords:** Stabilization, lime, cement, liquid limit, proctor, CBR, haulage roads

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	vi
<b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Araştırmanın Amacı .....	1
<b>BÖLÜM İKİ - NAKLİYE YOLU GEOMETRİK TASARIMI VE KULLANILAN PARAMETRELER.....</b>	<b>3</b>
2.1 Maden yolu Geometrisi .....	3
2.2 Maden Yolu Yapımında Kullanılan Malzemeler .....	5
2.3 Nakliye Yolunun Bozulma Belirtileri ve Nedenleri .....	5
2.4 Nakliye Yolu Bakımı .....	6
2.6 Tabaka Kalınlığı .....	6
2.7 Nakliye Yolu Genişliği .....	7
2.8 Yapım Teknikleri .....	7
2.9 Nakliye Yolu Planı ve Güzergâhı .....	8
2.10 Yol Güzergâhı ve Güzergâh Faktörleri.....	9
2.10.1 Durma Mesafesi .....	9
2.10.2 Görüş Mesafesi .....	9
2.10.3 Yol Genişliği ve Enine Hendek .....	9
2.10.4 Eğim açısı .....	9
2.10.5 Eğim ve Dever .....	9
2.10.6 Kesişmeler .....	9
2.10.7 Nakliye Yolu Durma Mesafesi .....	9
2.10.8 Görüş Mesafesi ve Dikey Kurp .....	11



2.10.9 Yol Genişliği.....	12
2.10.10 Kurplar .....	14
2.10.11 Dever .....	16
2.10.12 Deverin Bitişi.....	18
2.10.13 Optimum Eğim .....	20
2.10.14 Maksimum S¼rekli Eğim.....	26
2.10.15 Emniyet Tedbirleri .....	27
2.10.16 Yatay ve D¼řey G¼zergahnın Birleşimi.....	27
2.10.17 G¼venlik Bariyerleri ve Kanallar.....	28

## **B¼L¼M ÜÇ - NAKLİYE YOLU YAPISAL TASARIMI.....29**

3.1 Nakliye Yolu Kaplama En Kesiti .....	29
3.1.1 Esnek Yol Kaplama En Kesiti .....	29
3.1.2 Stabilize Kaplama En Kesiti.....	31
3.2 Nakliye Yolu Kaplama Tasarımı Prensibi .....	33
3.3 Nakliye Kamyonları Tekerlek Y¼k¼, Gerilmesi ve Lastik Temas Alanı Hesabı 35	
3.3.1 Lastik Basıncı Esas Alınarak Lastik Temas Alanı ve Zemine Uygulanan Gerilmenin Hesabı .....	41
3.3.2 Lastik Temas Alanı Hesabında, Lastik Genişliğinin Yarıçapının Kullanılmasıyla Lastik Temas Alanı ve Zemine Uygulanan Gerilmenin Hesabı .42	

## **B¼L¼M D¼RT - ZEMİN İYİLEşTİRME Y¼NTEMLERİ.....43**

4. 1 Kireç Stabilizasyonu .....	44
4.1.1 Kireç Stabilizasyonu ve Mekanizması .....	44
4.1.2 Toprak-Kireç Karışımlarında Kimyasal Olaylar .....	46
4.1.3 Toprak + Kireç Karışımlarında Fiziksel Olaylar .....	49
4.2 Arazide Kireç Stabilizasyonunun Tatbik Şekilleri.....	52
4.2.1 Killi Malzemenin Yerinde Kireç ile Stabilizasyonu .....	52
4.2.2. Dışarıdan Getirilen Malzeme ile Kireç Stabilizasyonu.....	55

4.2.3 Karışımın Optimum Rutubete Getirilmesi .....	57
4.2.4 Tesviye ve Sıkıştırma İşlemi .....	58
4.2.5 Kireç İlavesi İle Toprakların Modifikasyonu .....	60
4.2.6 Toprak + Kireç Karışımlarının Kalite Kontroluna Ait Deney Usulleri ...	61
4.2.7 Karıştırma ve Rutubet Kontrolü .....	62
4.2.8 Karışımın İncelik (pulverizasyon) Kontrolü .....	63
4.2.9 Karışımın Uniform Olup Olmadığının Kontrolü .....	63
4.2.10 Sıkışma ve Sıkışmış Kalınlık Kontrolü .....	64
4.2.11 Kireç Stabilizasyonuna Tesir Eden Faktörler .....	64
4.3. Kireç Stabilizasyonu Uygulaması Öncesi ve Sahada Yapılan Deneyler .....	66
4.3.1 Su Muhtevasının Ölçümü .....	66
4.3.2 Yıkamalı Elek Analizi .....	66
4.3.3 Aterberg Limitleri .....	66
4.3.5 Metilen Mavisini Deneyi .....	68
4.3.6 Ph Metodu .....	68
4.3.7 Proktor .....	68
4.3.8 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) .....	69
4.3.9 Kum Konisi .....	69
4.3.10 Plaka Yükleme Deneyi .....	70
4.3.11 Organik Madde Tayini .....	71

## **BÖLÜM BEŞ - MADEN NAKLİYE YOLU TASARIMI ve SONLU ELEMENLER GERİLME ANALİZİ .....**

**72**

5.1 CBR Temel Alınarak Nakliye Yolu Dizaynı .....	73
5.2 CBR Yöntemine Göre Nakliye Yolu Tasarımı .....	74
5.3 Mekanistik Dizayn Yaklaşımı .....	78
5.3.1 Mekanistik Dizayn Kriterleri .....	80
5.4 Nakliye Yolu Kesitinde Phase2 Programı ile Mekaniksel Yaklaşım .....	81
5.5 Phase2 Programı ile Taşıma Kapasitesi Analizi .....	82
5.6 Düşey Gerilmede Tabaka Sertliğinin Etkileri .....	84

5.7 Doğal malzeme, Kireçle iyileştirilmiş malzeme ve sağlam malzemenin yol dizaynında kullanılması durumunda tek tekerleğin yol tabakasında toplam yer değiştirme etkileri .....	85
5.8 Doğal malzeme, Kireçle iyileştirilmiş malzeme ve sağlam malzemenin yol dizaynında kullanılması durumunda çift tekerleğin yol tabakasında toplam yer değiştirme etkileri .....	89
5.9 Klasik Yöntem ve Kireç Stabilizasyonu Uygulaması Ekonomik Mukayesesi	93
5.9.1 Klasik Yöntem İle Zayıf Zemin Taşınması Ve Yerine Sağlam Zemin Serilmesi Durumunda Yakıt Tüketim Maliyeti .....	96
<b>BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR.....</b>	<b>99</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>101</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>104</b>

## **BÖLÜM BİR**

### **GİRİŞ**

Ülkemiz madencilğinde kamyonların yüklü ağırlıkları 300 tona kadar ulaşabilmektedir. Maden işletmelerinde verimliliğin maksimize edilmesi söz konusu taşıtların öngörülen hız ve sıklıkta taşınabilmesine, nakliye sırasında hem taşıtlarda nakliye yollarında önemli sayılacak arızaların önlenmesine bağlıdır. Oysa birçok maden işletmesinde hiç bir bilimsel çalışmaya dayanmayan ve geçmiş deneyimlere göre yapılmış nakliye yolları bulunmaktadır. Maalesef yeni nakliye yolları tasarımlarında da aynı anlayış hâkimdir. Bu nedenle bu büyüklükteki ve tonajdaki kamyonları taşıyabilecek maden nakliye yolları tasarımı büyük önem arz etmektedir.

Madenlerde nakliye yolu tasarımı geometrik ve yapısal olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bu iki tasarım çeşidi, güvenli, mükemmel, pürüzsüz ve kolay araç kullanımını sağlayan uzun ömürlü yolların yapılabilmesini sağlar.

✓ Nakliye yolunun geometrik tasarımı; genişlik, eğim, görüş ve durma mesafesi gibi yolun fiziksel boyutlarının hesaplanmasını kapsamaktadır.

✓ Nakliye yolunun yapısal tasarımı; yol yapımında kullanılacak malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesini, üzerine gelecek yükleri taşıyabilmesi için gerekli tabaka kalınlıklarının hesaplanmasını kapsamaktadır.

#### **1.1 Araştırmanın Amacı**

Ülkemizde birçok maden işletmesi, ilk bakışta düşük maliyetli görünmesi nedeniyle ocak nakliye yolu yapımında sahada mevcut ve taşıma gücü düşük malzemeden yararlanmaktadır. Bu doğal malzeme yol yüzeyi altındaki üst yapı tabanı (taşıyıcı temel) görevini üstlenmektedir. Ancak bu yeterliliğin asıl ölçütü, kullanılacak yol tabakasının, üzerinde hareket edecek kamyon ağırlıklarını emniyetli bir şekilde taşıyıp taşımayacağı bilimsel olarak tayin edilmesidir. Günümüzde birçok maden işletmesi yukarıda sözü edilen yanlış kaplama tasarımı davranışı nedeniyle birçok problemle karşı karşıya kalmaktadırlar. Tüm bu problemler verimliliği azaltmakta, yakıt, tamir bakım ve lastik giderlerini arttırdığı gibi yolun bakımı boyunca kapatılması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır.

Bu nedenle çalışma kapsamında, nakliye yolu tasarımına uygun olmayan zeminlerin yerinde iyileştirilmesi (kireç stabilizasyonu) ve sonrasında üzerinde hareket edecek kamyon ağırlıklarını emniyetli bir şekilde taşıyıp taşımayacağını bilimsel olarak araştırılması özel bir yaklaşım olarak ele alınmıştır.

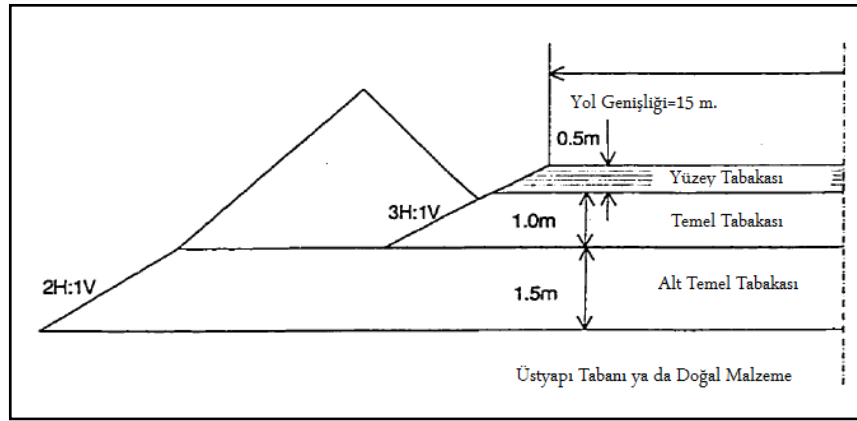
## **BÖLÜM İKİ**

### **NAKLIYE YOLU GEOMETRİK TASARIMI VE KULLANILAN PARAMETRELER**

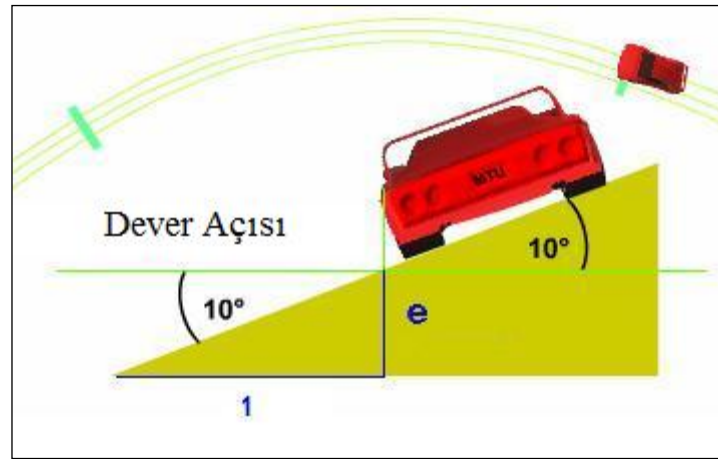
Ülkemizde kullanılan esnek yol döşemeleri için geleneksel tasarım yöntemleri maden nakil yolları için genellikle uygun değildir. Çünkü bu yollar, tekerlek yükleri 8,2 tondan daha az olan kamyonları taşıyabilirler. Maden kamyonlarının tekerlek yükleri ise 55 tonu bile geçebilmektedir. Madencilikte ara sıra hava alanı inşaatı kriterleri uygulanabilir fakat bu tip yöntemleri madencilığe uygulamak oldukça zordur. Bu yüzden genellikle Kaufman ve Ault (1977) tarafından önerilen daha yeni bir yaklaşım tercih edilmektedir. Bu sistem öncelikli olarak CBR değerleri ve tekerlek yüklerini dikkate almaktadır. CBR değerleri taban, yol temeli ve yol döşeme malzemeleri için belirlenmelidir. Yol temeli veya yol döşemesi üç farklı tabakaya kadar çıkabilir, bunlar yüzey katı, temel katı ve alt temel katı olarak adlandırılır. Belirli durumlarda alt temel, hatta temel katı atılabilir. Maksimum tekerler yükleri, imalatçı tarafından belirtilen aks yüklerinin her aksa düşen tekerlek sayısına bölünmesiyle hesaplanabilir. Birbiri ardına çift tekerleklerdeki teker yükleri %20 artırılır.

#### **2.1 Maden yolu Geometrisi**

Maden yollarının geometrisi; maksimum tane büyüklüğü, yolun şev kesiti, çalışma genişliği gibi birçok faktöre bağlıdır. Maksimum nakliye yolu eğimi %10 ile sınırlandırılmıştır. Fakat pratikte en fazla %8 eğim kullanılmaktadır. Maksimum dever (yatay dönemeçlerde merkezkaç kuvvetin birazını ya da hepsini dengeleyen, yol enine eğimi) %4 ile sınırlandırılmıştır ve hız limitleri dever eğimine göre belirlenir.



Şekil 2. 1 Tipik maden nakliye yol kesiti (Dwayne ve Bruce, 2001).



Şekil 2. 2 Dever açısı.

Yolun maksimum şev kesiti maden yolundaki malzemenin doğası ve çökmesine göre %1,5 ve %4 arasında değişebilmektedir. Fakat genelde %2 şev kesiti kullanılmaktadır.

Hendek boyutları çökelmeye bağlı olarak geniş aralıklarda değişebilmektedir. Ortalama hendek genişliği ve derinliği 3 m'dir. Güvenli banket yüksekliği en geniş lastik çapının  $\frac{1}{2}$  ve  $\frac{3}{4}$ 'üne göre hesaplandığı için 1.2 m ve 3.5 metre arasında değişebilmektedir.

Birçok madende yol tasarımı yapılırken fren mesafesi göz önüne alınmamaktadır.

## **2.2 Maden Yolu Yapımında Kullanılan Malzemeler**

Birçok maden firması nakliye yolu yapımında dışarıdan malzeme almamaktadır. Son 10 yılda nakliye kamyonları taşıma kapasitelerinin artmasından dolayı tabaka kalınlıkları artmasına rağmen nakliye yol malzemeleri değişmemiştir.

Maden nakliye yol kesiti 4 tabakaya ayrılabilir. Üst yapı tabanı yolda bulunan doğal malzemedir. Doğal zemin özelliğine göre kazı ya da dolgu işlemi yapılabilir. Genellikle alt temel 1 metre kalınlığında, temel tabakası 2 metre kalınlığında olmaktadır. Fakat yüksek yol kotu istenilen durumlarda alt temel kalınlığı 10 metreye kadar artabilir. Birçok maden firması alt temel tabakasında madenden çıkan pasayı kullanmaktadır. Üst tabakada ise maksimum tane boyutu 100 mm olan taş kullanmaktadır. Bazı durumlarda alt temel tabakasında 100 mm üstündeki kaya parçaları kullanılmaktadır. Yüzey tabakası genellikle 30 cm ve 50 cm arasında döşenir. Yol yüzeyinde genellikle kırılmış pasa kullanılmaktadır. Bazı madenler açık işletmelerde kırılan -19 mm boyutunda stabilize malzeme kullanmaktadır.

Yola gelen suyun drene edilebilmesi için genellikle 0,61 m. Çapında drenaj boruları kullanılmaktadır.

## **2.3 Nakliye Yolunun Bozulma Belirtileri ve Nedenleri**

Çukurlar, tekerlek izleri ve çökmeler nakliye yolunun bozulacağını gösteren başlıca belirtilerdir. Donma kabarması ve sudan kaynaklı deformasyonlar da yolun bozulmasına neden olabilmektedir. Yol yüzey alanı (temel tabakası) genellikle çökelme, yüksek trafik hacmi, araçlardan dökülen malzemelerden ve zeminin tam sıkıştırılmamasından zarar görebilmektedir. Zayıf zemin sıkıştırması, yer altı su seviyesinin yüksek olması ve çökelme diğer tabakaların zarar görmesinde başlıca nedenlerdir.



## 2.4 Nakliye Yolu Bakımı

Nakliye yolu trafik yükünü arttırabilmek için sınıflandırma, yol yüzeyinin tekrar kaplanması, taneleme işlemleri yapabilmektedir. Bazı maden firmaları yolda deformasyon olan bölgelerde kazıma yapmakta ve yolun alt temel seviyesine kadar dolgu yapmaktadır.

Toz oluşumunun önlenmesi için yolda sulama, kalsiyum klorid ya da yağ kullanılmaktadır.

Farklı madenler yol bakım takvimlerini geçmiş deneyimlerine ve anlık ihtiyaca göre ayarlamaktadır. Yol temizlemesi, reglaj ve tamir yapma aralıkları madene özeldir. Toz sorunu yaz aylarında artabilmekte ve/veya karla mücadele yapılabilmektedir.

Farklı madenlerin ihtiyaca ve geçmiş deneyimlere göre çeşitli bakım programları bulunmaktadır. Nakliye yolu temizlenmesi, greyderle düzeltilmesi ve tamir-bakım sıklığı madene özgüdür. Bazı madenlerde temizleme ve greyderle düzeltme günlük olarak yapılmakta yolda bozulma olduğunda büyük tamir-bakım yapılmaktadır. Toz bastırma özellikle yaz aylarında gün boyunca yapılabilmektedir.

## 2.6 Tabaka Kalınlığı

Nakliye yolu genellikle 3 farklı malzeme ile yapılır. Taneli malzemeler (kırılmış kayaç, doğal taneli malzeme, dekapaj malzemesi olabilir) yüzeyde ve temelde kullanılırken, kum alt temel gibi kullanılır. Her tabakanın kalınlığı 8 mm defleksiyon kriteri kullanılarak hesaplanır fakat geçmiş deneyimlere ve malzeme teminine göre geliştirilebilir. Kombine kesitlerde yüzeyde ve temel tabakalarında daha büyük kamyonlar için daha kalın taneli malzeme içeren tabakalar gereklidir. Fakat alt temelde kum tabaka kalınlığı düşük kapasiteli kamyonlarla aynıdır. Çünkü büyük kamyonlar zemine daha derin gerilime neden olurlar sert malzemeler gerilimin tasarım limitlerine bağlı olarak (8 mm) daha aşağı inmesini azaltır.

## 2.7 Nakliye Yolu Genişliği

Nakliye yolu genişliği büyük nakliye kamyonları kullanılıyorsa daha geniş tutulmalıdır. Yol genişliği en geniş kamyon genişliğinin 3,5 katı kadar olmalıdır. Böylece kamyonların geçişleri sırasında yeterli açıklık sağlanacaktır. Kamyonlar arasında minimum mesafe olacak şekilde yol genişliği tasarlanması önerilir. Çünkü mesafe kamyon genişliğinin fonksiyonu olmamalıdır.

360 tonluk kamyonların kullanılmasıyla lastik boyutunun büyümesinden dolayı banketlerin güvenlik yüksekliği 2 m'den 2,9 m'ye yükseltilmiştir. Banketlerin güvenlik yüksekliği genellikle tekerleğin çapı ve kamyonların büyüklüğü ile ilgilidir. Çünkü büyük kamyonlarda büyük tekerlekler kullanılır. Önerilen banket yüksekliği, tekerlek çapı 1 m'den büyük banketler için tekerlek büyüklüğünden bağımsız olarak yaklaşık  $\frac{3}{4}$ 'tür.

Nakliye yolu geometrisinin diğer elementleri (yüzey eğimi, kazı derinliği...) yıllar boyunca sabit kalmıştır. Daha fazla malzeme için yol yüzeyi 3H:1V'de muhafaza edilmiştir. Hendeğin derinliği alt temelin 0,5 metre aşağısında olmalıdır.

## 2.8 Yapım Teknikleri

Nakliye yolu yapılırken nakliye kamyonları malzeme taşımada (aynı zamanda sıkıştırma), greyderler ve dozerler (malzeme serimi ve pürüzsüz yüzey eldesi) kullanılır. Nakliye yolu 0 derecenin altında donan alt temel malzemesi ile imal edilmemelidir. Yol yapımında kullanılacak malzemenin nem içeriği, optimum nem içeriğinin %2-%4'ünde tutulmalıdır. (Cameron & Lewko 1999).

Bazı alt temeller yarma ve doldurma operasyonları gerektirir. Kil ya da benzeri malzemeler 240 tonluk kamyonlarla sıkıştırılır. Yolun geri kalan kısmı bu malzemenin üzerine sıkıştırılmadan hemen sonra konulmalıdır. Çünkü nem durumu zamana bağlı olarak değişir ve alt temel çok çabuk özelliğini kaybeder. Ayrıca kamyonlar alt temel malzemenin üzerine malzeme alınmadan önce geçmeye başlarsa yolda deformasyonlar oluşur. Malzemeler büyük kamyonlarla yola boşaltıldığında

dozerlerle veya başka iş makinaları ile serilebilir. Alt temel %95 standart proktor sıklığında titreşimli silindir ile sıkıştırma yapılır. Kum sıkıştırmadan önce 35 cm yükseltilir (Cameron & Lewko 1999). Temel tabakası işletmeden çıkan granül malzeme kullanılarak 50 cm yüksekliğinde dozer ile serilerek sıkıştırılır. Bu malzeme 4 ya da 6 pas silindir veya 200 tonluk kamyonlar ile 4 ya da 6 pas ile %98 standart proktor sıklığına getirilir (Cameron & Lewko 1999).

Yüzey tabakasında genellikle kırılmış malzeme kullanılır. 25 cm yüksekliğinde (greyder ile serilir) %98 standart proktor sıklığına silindir yardımı ile getirilir.

## **2.9 Nakliye Yolu Planı ve Güzergâhı**

Nakliye yolları için farklı sınıflandırmalar bulunmaktadır. Birincil ve kalıcı yollar 6 aydan daha uzun kullanılmaktadır. Yardımcı ya da ikincil yollar birincil yollar gibi sınıflandırılmaz. Diğer tanımlamalar yolların üç sınıfa ayırır; uzun dönemli nakliye yolları, açık işletme yolları, işletme içi yollar. Sadece son grup yolda granül ya da dirençli malzeme dışında yerel malzeme kullanılabilir.

Kaufman ve Ault'un (1977) tekrarladığı gibi nakliye yolunun geometrik elemanları güvenliği sağlamak için tasarlanmalı ve normal operasyon hızlarında normal ulaşımı sağlamalıdır. Operatör önündeki araçla mesafeye dikkat edip aracın duracağını göz önüne alarak hareket etmelidir. Her aracın durma mesafesi aracın özelliğine göre değerlendirilmelidir, yol güzergâhı hem dikey hem de yatay olarak nakliye filosuna göre belirlenmelidir. Durma mesafesi operatörün görüş mesafesine göre belirlenmelidir. Yol çeşidi ve güzergâh ne olursa olsun araç hareket ederken tehlikeli durumla karşılaştığında yeterli görüş açısına sahip olmalıdır. Dikey eğimli görüş mesafesi yüzeydeki tepelerle sınırlıdır. Yatay eğimler bu durumlarda kayalar, ağaçlar ya da binalar görüşü sınırlar. Bu mesafe sürücünün gözüyle ilerideki tehlikeyi öngörerek eşit ya da daha büyük mesafede güvenli duruşu sağlayabilmek için hesaplanmalıdır.

## **2.10 Yol Güzergâhı ve Güzergâh Faktörleri**

### **2.10.1 Durma Mesafesi**

Durma mesafesi her araç için güzergâh üzerinde güvenli durma mesafesine göre hesaplanmalıdır.

### **2.10.2 Görüş Mesafesi**

Operatörün görüş mesafesi duruş mesafesine eşit ya da daha büyük olmalıdır. Düşey ve yatay eğimler bu kriterine uygun tasarlanmalıdır.

### **2.10.3 Yol Genişliği ve Enine Hendek**

Nakliye yolunun bir kısmı birden fazla büyük kamyonun rahatlıkla geçebileceği genişlikte olmalıdır. Genelde yolun düz kısmı 3-4 ağır aracın geçebileceği genişliktedir. Köşeler düz kısımlara göre daha geniş tutulur.

### **2.10.4 Eğim açısı**

Düzenli yol drenajı için 1:25 olmalıdır.

### **2.10.5 Eğim ve Dever**

Düz kısımdan köşelere yaklaşıldığında kamyonların viraj boyunca güvenli ve rahat manevra yapabilmesi için seviyeden devere tedrici değişim olmalıdır.

### **2.10.6 Kesişmeler**

Kesişmeler mümkün olduğunca düz olmalı ve üstte rampa olmamalıdır.

### **2.10.7 Nakliye Yolu Durma Mesafesi**

Birçok kamyon üreticisi tarafından fren performansı için özellikler genellikle hız örnekleriyle limitlidir. İnişlerde sürüş bileşenleri boyunca hidrolik ya da dinamik geciktirici tarafından inişte fren yapılabilir. Bu iniş hızı için mükemmel bir yöntem

olsa da etkili servis freni ile bir tutulamaz. Geciktirici sistemde hata olursa tekerlek frenleri aracı durdurmak için kullanılır.

Etkili fren performansı standartlarının ihtiyacının farkına varılmasıyla Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (SAE) farklı ağırlık kategorisindeki kamyonlar için test prosedürlerini ve minimum duruş mesafesi tasarım kriterlerini geliştirdi. Fren performansının yüzey durumları, başlangıç hızı değişimleri için nasıl çeşitlendirileceği belli değildir.

Kaufman ve Ault (1977) SAE'yi temel alarak ampirik formül geliştirmiştir.

$$SD = \frac{1}{2}gt^2 \sin \theta + V_0 t + \frac{gt \sin \theta + V_0}{2g(U_{min} - \sin \theta)^2} \quad (2.1)$$

SD= Durma mesafesi (m)

g= Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

t= Şoförün fren yapmayı algılaması ile frenlerin sürtünme temasının başlaması için geçen zaman

θ= İniş açısı (derece)

U<sub>min</sub>=Lastik yol temas alanında sürtünme katsayısı

V<sub>0</sub>= Araç hızı

t faktörü t<sub>1</sub> ve t<sub>2</sub> olarak ayrılabilir. t<sub>1</sub> fren pedalına basıldığında fren mekanizması lastiklerin etkili biçimde yavaşlamasını sağlar. Kamyonlar için SAE tarafından önerilen tipik fren reaksiyon değeri 4.5 saniyedir. Fren reaksiyon zamanı daha büyük kamyonlar için kullanılan daha uzun olabilir.

t<sub>2</sub> ise şoför reaksiyon zamanıdır. Şoförün tehlikeyi algılama ve frene basma zamanıdır. t<sub>2</sub>'nin makul değeri 1.5 saniyedir.

U<sub>min</sub> ise aşağıdaki formülden elde edilir.

$$U_{min} = \frac{v^2}{2gS} \quad (2.2)$$

V=SAE test hızı 8,94 m/s

$$g=9,81 \text{ m/s}^2$$

S= Durma mesafesi SAE'nin önerdiği durma mesafesinden çıkarılarak (8,94xt<sub>1</sub>) hesaplanır.

Fren mesafesi ve t<sub>1</sub> faktörleri her ağırlık kategorisinde denklem 2'deki ortalama minimum elde edilen sürtünme katsayısı U<sub>min</sub>= 0,3 ve yaklaşık taşıt yavaşlamasına (2,94 m/s<sup>2</sup>) eşittir.

Formül 2.1 ve 2.2 durma mesafesi kurbu farklı hız ve eğimler için geliştirilebilir. Fakat bu formüller ısı yükseldiğinde kullanılmaz. Kaufman ve Ault (1977) bu formüllerin gerçek alan testlerinin sonuçlarının baz alınmadığını belirtmişlerdir. Ve yol dizaynının basit planlama safhasında kullanılacak rehber olabileceğini belirtmişlerdir. Duruş mesafeleri ayarlamaları yapılmadan önce kamyon üretici firmaları ile temasa geçerek araçların durma mesafeleri hakkında dinamik ya da hidrolik yavaşlatma sistemi göze alınmadan bilgi almak gerekmektedir.

### **2.10.8 Görüş Mesafesi ve Dikey Kurp**

Yol tasarımında düşey güzergâh düşey kurp ve eğimin mantıklı seçimi, nakliye yollarının bütün kategorilerinin yeterli fren mesafesine ve görüş açısına izin verir. Operatör görüş mesafesi ve fren mesafesi arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.

Düşey kurp bir yoldan diğer yola sarsıntısız geçişi sağlar. Düşey kurpun uzunluğu dizayn edilen araç hızında konforlu sürüş ve geniş görüş açısı sağlamalıdır. Kurp uzunluğu için Monenco (1989) aşağıdaki eşitliği önermektedir.

S, L'den büyükse;

$$L = \frac{(2S - 200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2)}{A} \quad (2.3)$$

S, L'den küçükse;

$$L = \frac{AS^2}{100 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} \quad (2.4)$$

L=Düşey kurp uzunluğu (m)

S=Elde edilen araç duruş mesafesi (m)

A= Eğimlerdeki cebirsel fark (%)

$h_1$ = Şoförün göz hizasının yerden yüksekliği

$h_2$ = Nesnenin yerden yüksekliği

$h_2$  hayvan ya da yolda bulunabilecek nesnelerin görülebilmesi için 0,15m olarak alınmalıdır.

Genellikle minimum hesaplanandan daha büyük çıkan kurp açısı, daha uzun görüş mesafesi sağlamaktadır. Herhangi bir olayda düşey kurp uzunluğu 30 m'den az olmasından kaçınılmalıdır.

### **2.10.9 Yol Genişliği**

Düz yol ve kurplarda yeterli genişlik sağlanarak şoförlerin güvenli geçişi ve manevra yapabilmeleri sağlanmalıdır. Kullanılan ekipmanların boyutları her madende farklı olabilir. Yol genişliği hesabında araç genişliği, araç çeşidi ve ağırlığından daha etkilidir. Geçmişte düz yollarda her şerit için en geniş aracın 1,5 katı kadar mesafede yol genişliği öneriliyordu (AASHTO 1965). Çok şeritli yollarda şeritlerin paylaşılmasına izin veriliyordu.

Yol çok darsa bankette diğer aracı geçerken yolun zorlayıcı etkisi lastikleri ve operatörü zorlar. Bunun sonucu olarak yolun yan tarafında hasarlar, yolda engebeler ve çukurlar olur. Bu özel bir problemdir. Operatör var olan filoya yeni büyük

kamyonlar ekleyip daha geniş araçların geçmesini sağlayacak düzenlemeler yapmadığında bu olumsuzluklar olmaktadır.

Tek ya da çok şeritli yollar için temas alanının minimum genişliği aşağıdaki formülle hesaplanmalıdır.

$$W = (1.5L + 0.5)X \quad (2.5)$$

W=Yol genişliği (m)

L=Şerit sayısı

X=Araç genişliği (m)

Formül 2.5'ten minimum hesaplanan ilave yol genişliğinin fazlalığı yerel yol güzergahı boyunca istenilir. Mesela:

Bazı ekipmanların genişliği yolun temel kullanıcıları olan kamyon genişliğinden daha fazla olmaktadır.

Tek şeritli yollarda araçların geçişi için yeterli odalar tasarlanmalıdır.

Tek şeritli yollarda görüş mesafesi durma mesafesinden daha az ise hareket eden araçların çarpışmasını engellemek için yeterli alan sağlanmalıdır.

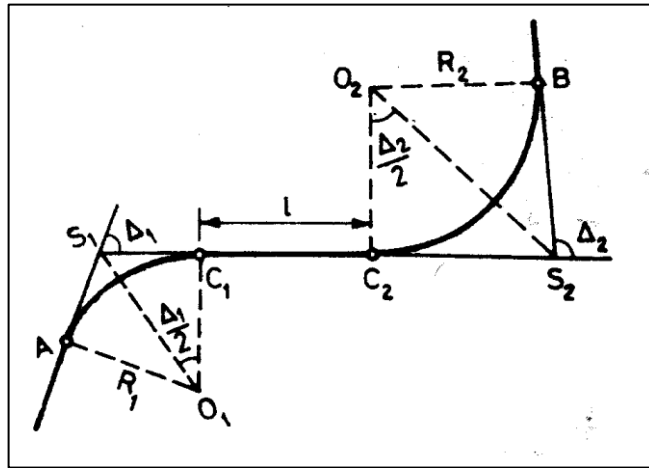
Güzergâhta bulunan keskin kurplar kamyonların dönüş yarıçapı dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Farklı ağırlıktaki araçların tipik dönüş açıları da farklı kategorilerdedir.

Aracın ön ve arkasındaki çıkıntılar göz önüne alınarak geniş yollar istenir. Kurplardaki yol genişliğine karar verirken ekstra büyük ve manevra kabiliyeti düşük araçların geçişi dikkate alınmalıdır. Kurp genişliği araç çeşidine göre değiştiği için Kaufman ve Ault (1977) her ağırlık kategorisi ve kurp yarıçapı için farklı değerler önerir.



### 2.10.10 Kurplar

Proje yatay ve düşey hattındaki doğrusal kesimleri birleştiren eğrisel veya dairesel karayolu kesimine kurp (Şekil 2.3) denir. Yatay nakliye yol güzergâhı gerekli yol genişliğini belirler ve yolun deveri araçların verilen hızda, görüş mesafesinde ve minimum araç dönüş yarıçapı ile güvenli olarak kurpu geçmesini sağlar. Kurplar oluşturulurken fiziksel çalışmaların uygulama maliyeti mesela gerekli kazı miktarı göz önünde bulundurulmalıdır. Mesela dağlık bölgedeki kaya çıkıntıları civarında kurplar yapılıyorsa tasarımcı kazı masraflarını da göz önünde bulundurmalıdır ve bu güvenli bir şekilde tepenin aşılmasını sağlar.



Şekil 2. 3 Kurp açısı.

Kurpların tasarımı kamyon performansı da göz önüne alınarak tasarlanmalıdır. Nakliye yolu sabit bir hız için tasarlanmalı ve bu kamyonların kendi potansiyellerini ortaya koymalarını sağlamalıdır. Kamyon performansının madencilik maliyetlerine başlangıç yol yapım maliyetlerinden daha fazla etkisi vardır. Zayıf tasarlanmış kurplar dönüş zamanını yavaşlattığı için her gün binlerce doların nakliye maliyetini etkilemesine neden olur. Aşağıdaki formül genelde kurp dizaynı için kabul edilen formüldür. Bu formül kamyonun hızını yol yüzeyini sürtmeyi, deveri ve kurp yarıçapını göz önünde bulundurur. Bu formül dışa yönelik merkezkaç kuvvetleri ile birlikte yan dirençler içten gelen kamyonun ağırlığı ve deverden oluşan gücü

dengelemeye çalışır. Yol üzerindeki 0'dan büyük olan kurplar hızlı kamyonlar için tasarlanmıştır. Bu kamyonlar genellikle yokuş aşağı gider.

$$R = \frac{v^2}{127(e+f)} \quad (2.6)$$

R= Kurp yarıçapı (m)

V=Araç hızı (km/saat)

e=Dever

f= Lastik ve zemin arasındaki sürtünme katsayısı

Örnek olarak 60 km/saat hızla yol alan bir kamyon %20 sürtünme faktörü ve %5 dever yaklaşık 113 m'lik kurp yarıçapı gerektirir.

Mümkünse sabit hız için yol dizayn edilmelidir. Bu da sabit kamyon performansı ile birlikte minimum yavaşlamaya neden olur. Kurp için eğim arttırılması kamyonun yavaşlamasına sebep olur ve bu çok fazla aşınmaya sebep olur. Mümkün olduğunca geniş kurp açıları kullanılmalıdır. Geniş kurp açıları güvenli yol hızına sebep olur ve trafik sıkışıklığını azaltır. Bunun yanı sıra yolda daha az aşınma olur. Bazen keskin kurplar gereklidir ama bunlar nakliye maliyetini arttırır. Bu boş ve dolu kamyonların yavaşlamasına ve üretimin düşmesine neden olur. Ekstra yol bakımı gereklidir ve sonra yola ilave malzeme serilmelidir. Keskin kurplar ayrıca görüş mesafesi ve görünürlüğü azaltır.

Kurpları tasarlarken her iki talimatı da göz önüne almak gerekir. Tasarım mutlaka boş kamyon için yapılmalı ki bu genellikle daha hızlı yol alır.

Operasyonel güvenlik hafife alınmamalı, nitelikleri azaltmak yapım maliyetini düşürür. Ama bu aynı zamanda operasyonel hızını da düşürür.

### 2.10.11 Dever

Kurpları geçmek yüksek yanal tekerlek kuvvetlerini yaratır. Bu kuvvetler yüksek tekerlek yıpranmasına ve tabaka ayrılmasına neden olur. İdeal olarak lastik yıpranması düşürülebilir ve eğer yol deveri araç ağırlığına eşitse dönüş eforsuz olabilir. Dever olan yollarda pratik limitler vardır. Çünkü kurp çevresindeki yüksek eğimler yavaş hareket eden araçlar için tekerlek üzerinde yüksek yüke sebep olur ve tekerlekteki yıpranmayı artırır. Potansiyel virajlar araç şasesi üzerine baskı yaparlar ve buzla kaplı yüzeylerde araç kayar.

Deverin miktarı kurp açısına ve kamyon hızına bağlıdır. Tablo 2.1 yanal kuvvetleri yok etmek için gerekli bir rehberdir. Dever kurpları yol yüzeyi kaygansa tehlike gösterir. Uygun hız sağlanmazsa araç yol kenarına kayar. Bu nedenle %10'un üzerindeki dever kullanılmamalıdır. Dever kurplarına araçlar için iyi sürüş ortamı yaratmak amacıyla bakım yapılmalıdır. Dever değerleri Tablo 2.1'de listelenmiştir.

Tablo 2.1 Örnek Bir Kamyon için Tekerleğe gelecek yanal kuvveti önlemek için viraj dever açısı (Caterpillar 1999).

Dönme Çapı	Araç Hızı								
		16 km/hr 10 mph	24 km/hr 15 mph	32 km/hr 20 mph	40 km/hr 25 mph	48 km/hr 30 mph	56 km/hr 35 mph	64 km/hr 40 mph	72 km/hr 45 mph
15.2	50	13%	-	-	-	-	-	-	-
30.5	100	7%	15%	-	-	-	-	-	-
45.7	150	4%	10%	-	-	-	-	-	-
61	200	3%	8%	13%	-	-	-	-	-
91.5	300	2%	5%	9%	14%	-	-	-	-
152.4	500	1%	3%	5%	8%	12%	16%	-	-
213.4	700	1%	2%	4%	6%	9%	12%	15%	-
304.9	1000	1%	2%	3%	4%	6%	8%	11%	14%

Dever kurplarını oluşturmak için bir başka yaklaşım yatay lastik kuvvetlerinde dönüşü aşmak için güvenli hıza karar vermek gerekir. Genellikle %20'lik yanal sürüş katsayısı kaygan durumlar hariç hepsinde güvenlidir. Tablo 2.2 çeşitli deverlerdeki

%20'lik yanal sürüş katsayısı için maksimum hızı göstermektedir. Geçiş bölgesi dever dönüşlerinden varış ve ayrılıştta yüksek hız gerektirebilir.

Tablo 2.2 Çeşitli dever açılarında maksimum güvenli hız (Caterpillar 1999).

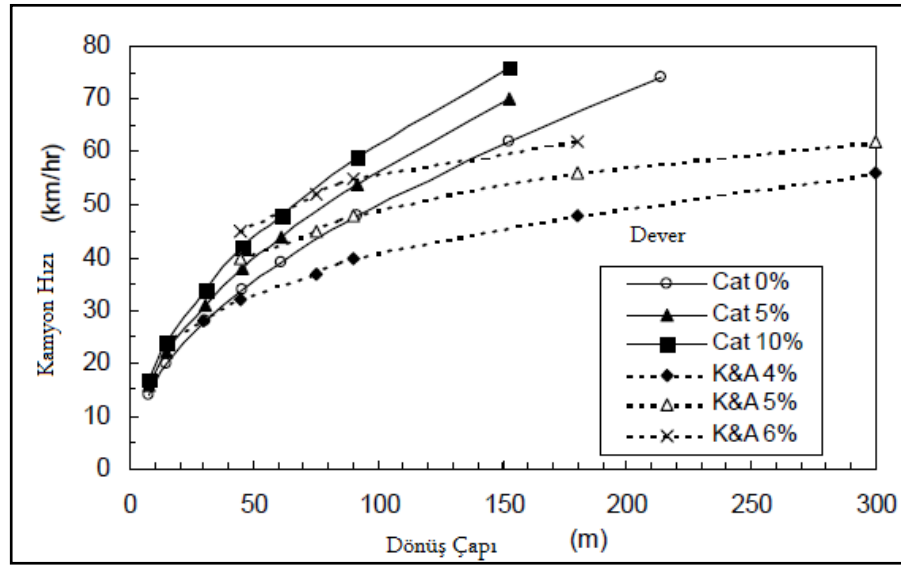
Yarıçap (m)	%0 Düz	%5 Dever	%10 Dever
7.6	14	16	17
15.2	20	22	24
30.5	28	31	34
45.7	34	38	42
61	39	44	48
91.5	48	54	59
152.5	62	70	76

Kısa kurp yarıçapları için alan deneyleri gösterilmiştir (AAHSTO 1965). Araç hızı düştüğü zaman yan sürtünmeler artar. Formül 2.6'ya göre hesaplanan dever değeri küçüktür ve eğim yüzey drenajı için kullanılır. Bu bilgi dever oluşturmak için kısa kurplar da daha az elverişli ortam sağlar ve biter. Tablo 2.3 farklı kurp yarıçapı ve hızdaki önerilen dever formülasyonlarını verir.

Tablo 2.3 Yatay eğimler için önerilen dever açıları (Dwayne ve Bruce 2001).

Dönüş çapı (m)	Araç Hızı km/saat				
	24	32	40	48	>56
15	4%				
30	4%	4%			
45	4%	4%	5%		
70	4%	4%	4%	6%	
90	4%	4%	4%	5%	6%
180	4%	4%	4%	4%	5%
300	4%	4%	4%	4%	4%

Tablo 2.2 ve 2.3 'teki veriler Şekil 2.3'te birleştirilmiştir. Bu şekil gösteriyor ki Kaufman ve Ault (1977) ve Caterpillar (1999) dever, sıkı kurplar ve yavaş hareket eden kamyonlar için aynı önerilerde bulunmuşlardır.



Şekil 2.1 Tablo 2.2 ve 2.3'teki veriler birleştirilmiştir (Dwayne ve Bruce, 2001).

İdeal olarak geniş trafik, yüksek hızlı nakliye yolu her şerit için dever kurp profili ayrılması yararlıdır. Böylece her iki şeritte sabit hızda lastiklere gerilim uygulamadan, kayaların yayılımı ya da yol kenarlarının kayması önlenir.

Syncruda Canada %6'dan fazla dever kullanmamaktadır. %4-5 deveri geçen madenleri de içermektedir. Bu yağışlı ve nemli operasyon durumlarında yol tabanındaki kaygan yüzeyin erozyonunu minimize etmektedir. Pratik limitler maksimum izin verilen dever hızın azaltılması demektir ki bu da sıkı kurplardaki lastiklerin merkezkaç yanal kuvvetlerini minimize etmek için gereklidir veya büyük kurp yarıçapları mümkün olursa kullanılabilir.

### 2.10.12 Deverin Bitişi

Normal yol kesit alanı ve dever kesiti arasındaki geçiş operatörün kurp boyunca manevra yapabilmesini sağlamalıdır. Kaufman ve Ault(1977) yolun bu bölümünde geçiş 1/3'ünü kurpa ve 2/3'ünü de tanjanta paylaştırılmasını tavsiye etmektedir.

Tablo 2.4 Her 30 m'de maksimum dever açısının değişimi (Kaufman ve Ault, 1977).

Araç hızı (km/saat)	Yol Uzunluğunun Her 30 km'de Değişimi (%)
16	8
24	8
32	8
40	7
48	6
56 ve Üzeri	5

Bu tablonun kullanımını en iyi bir örnekle açıklayabiliriz. Bir aracın 56 km/saat hızla ve %4 sağa eğimli düz bir yolda hareket ettiğini varsayalım. Burada da %6'lık deverle sola bir kurpla karşı karşıya gelmektedir. Böylece toplam eğim (4+6) veya %10'dur. 56 km/saat için toplam eğim toplam tavsiye edilen eğim değişimi %5 olmalıdır. Böylece toplam bitiş uzunluğu  $(10/5)*30=60$  metre olmalıdır. Bu uzunluğun 1/3'ü olan 20 metre kurpun her bitiş uzunluğuna tam gelmelidir ve geri kalan 40 metre kurpun başlangıç ve bitişindeki her tanjanta uygulanmalıdır. Düzgün helezonik geçişler sadece araçların daha kolay geçişini sağlamakla kalmaz aynı zamanda araç şasisindeki burulmayı azaltır.

Yolun devamlılığını sağlamak için tamir ve bakımı yapılmalıdır. Bu nedenle araç şasisindeki potansiyel metal yorulmalarını azaltmak için araç gözetim sistemi şase burulma gerilmelerini ölçecek sistemle beraber kullanılmalıdır. Araç hareket halindeyken şasideki burulmaları ölçecek pratik aparat geliştirilmiştir. Cihaz römorktan oluşmuştur ve nakliye kamyonuna bağlanmıştır. Römorkun aksı ve kamyonun arka aksı ayarlanması önceden kurulması ve eşleştirilmesini sağlar ve bu kamyonla beraber hareket edebilmektedir. Römork tekerlekleri kamyon lastikleriyle eşleştirebilmek için boyutlandırılır. Bu düzenlemeler kamyon ve römork aksı arasındaki açılmalarda kamyon-yol kontak noktası tarafından kamyon şasisine neden olur Römorkun ön şasesinde yer alan dönme noktasında bükülme çözümlenir ve bükülmenin direk ölçümü araç içi kabinde bulunan kayıt cihazıyla bükülmenin direk ölçümü sağlanır. Römorkun tekerleğine kurulan dijital göstergeler yol tablosunu oluşturmak için kamyon hareketini kayıt amacıyla kullanılır. Kamyon şasisindeki kritik noktalarda sayısız gerilme ölçümleri yaparak hız, bükülme ve gerilim kayıtları

yapılabilir ve böylece test römorku tarafından biriktirilen burulma ölçümleri şasinin tepkisini korele eder. Burulma ve şasi gerilmeleri arasında iyi bir korelasyon elde edilir. Römork basit bir yapı olduğu için gerçek zamanda sonuç verir. Karmaşık bilgisayar aşamaları içermez ve normal maden operasyonlarına minimum bozulmaya neden olur.

### **2.10.13 Optimum Eğim**

Kamyon performansının en iyi bir şekilde kullanılması uygun eğim seçilmesine bağlıdır. Özellikle birçok dikey yükseltinin bulunduğu yollarda uygun eğim seçilmelidir. En iyi eğimin seçilmesi nakliye yolunun geometrik değerlendirmesini ve eğim üzerindeki kamyon performansını gerektirir. Kamyonun dönüş zamanı en iyi eğimin belirlenmesinde temel performans göstericidir çünkü dönüş zamanı verimliliğin göstergesidir. Zaman aynı zamanda yakıt tüketimin de ölçüsüdür.

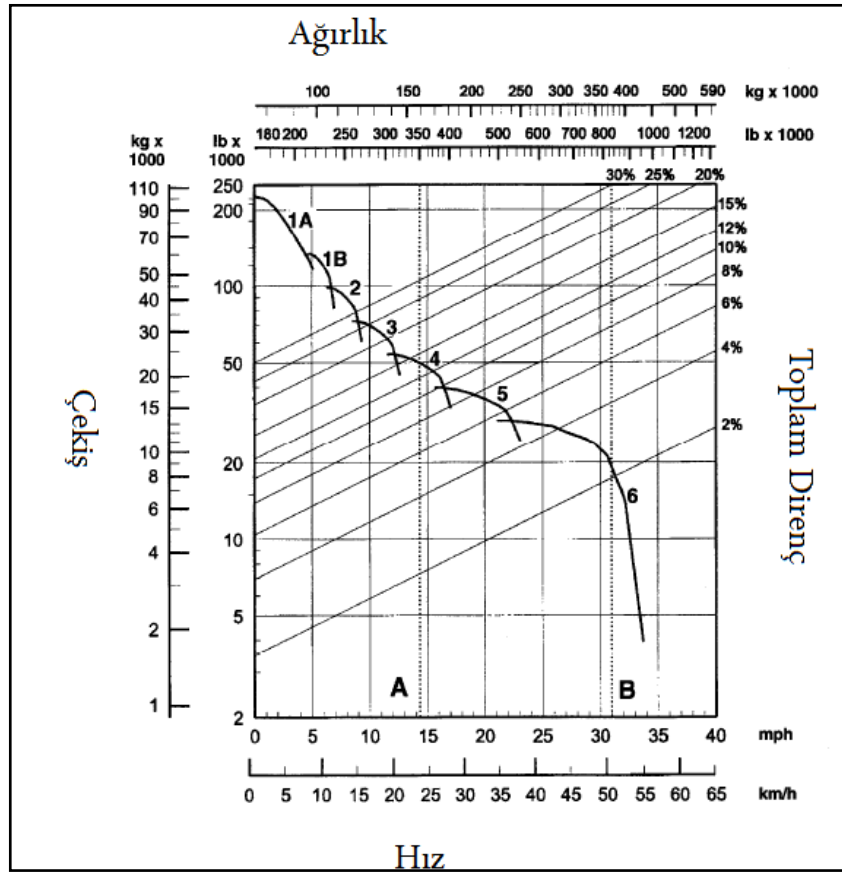
Kısa mesafeler genellikle kısa ulaşımı gerektirir. Fakat madenlerde genellikle dikey yükseltelerin etkilerini de göz önünde bulundurmak gerekir. Eğim üzerinde yol alınan mesafe dikey yükseltelerin ve yol üzerindeki eğimlerin değişkenliğine bağlıdır. Örneğin 100 m'lik bir dikey yükseltiyi tırmanmak için kamyon 5 km/saat'lik hızla yol almalıdır ya da %10 eğimde 1 km.

Mesafe, kamyon performansı, eğim direnci ve dönme direnci kamyonun eğimi aşmak için alacağı zamanı belirlemede kullanılır. Kamyon performans özellikleri sık sık çekiş-hız kurplarında gösterilir. Bu kurplar verilen durumda kamyonların ne kadar hızlı yol alacağını gösterir ve aracın randıman gücünü gösterir. Birçok mühendis aracın yük altında yol üzerinde aracın randımanlarının sabit kaldığını gördüğü için kamyonlar daha kolay ortamlarda daha hızlı gider ve zor ortamlarda yavaşlar. Çekiş kurplarında araç hızını belirlemek için kamyon ağırlığına bağlı çekiş ve toplam direnç hesaplanır. Tırmanırken toplam direnç eğim ve dönme direncine eşittir. Gerekli çekiş belirlendiğinde hız performans özelliklerinden görülebilir. Eğim üzerindeki sabit hız her kamyon için kamyon ağırlığı ve direnç özelliğine göre değişir. Seyahat zamanı mesafenin kamyon hızına bölünmesiyle verilir.

Madenlerde kamyon ağırlığı değişir. Çünkü her nakliyede aynı oranda malzeme yüklenemez. Bundan dolayı kamyon ağırlığındaki değişme eğim hesaplanırken göz önünde bulundurulmalıdır. Dikey yükseltiyi ve sarp eğimi aşmak zamandan kazanmayı ve daha az yakıt tüketimini sağlar. Dik rampalar maden planını etkiler ve daha fazla cevherin ortaya çıkmasını sağlar.

Sadece arazinin karakteristik özellikleri değil nakliye kamyonlarının verimliliği ve durma mesafesinin güvenliği maksimum pratik eğim ile belirlenir. Eğer eğimler çok dikse nakliye kamyonları aşağı inerken hızını azaltmak zorunda güvenli durma mesafesini sağlamak için hızını düşürmek zorunda ve tırmanırken sık sık vites düşürmek zorundadır ve böylece hız kaybedilir. Böyle hız değişiklikleri verim kaybına, ek yakıt kaybına, mekanik yıpranmalara ve yüksek kayıplara neden olur. Yol tasarımı düşük eğimlerde verimliliği arttırmak için tasarımı yatırımlarını, kazı ve dolgulardan oluşan sermaye giderlerini dengelemelidir. Araç eğimi aşarken, eğimin araç performansı üzerindeki etkileri şekil 2.5 gösterilmiştir. Örneğin Şekil 2.6 rampada CAT 793C için 350 t'luk kamyon ağırlığı ve 100 m'lik yükselti için nakliye süresini vermiştir (Şekil 2.4'e dayanarak). Bu şekil yüksek eğimin düşük nakliye mesafesiyle değerlendirildiğini gösterir. Eğim direnci ve dönme direnci toplam eğimi verir. Şekil açıkça gösteriyor ki düşük eğimlerde kamyon daha hızlı yol alıyor. Daha uzun mesafe yükseltiyi aşmak için daha fazla zamana ihtiyaç duyar. Şekil dönme direncine bağlı olarak %8 ve %14 arasındaki eğimlerde nakliyenin minimum yol zamanı oluşumunu gösteriyor. Yaklaşık %10 eğimler oldukça dik rampalar oluşturur ve bu kamyon üzerindeki aşınma ve yıpranmayı önemli ölçüde artırır. Yol süresindeki minimum artış %9 ve %2'lik eğimlerde en iyi seçim ve operasyon maliyetlerini düşürmede en iyi çözümdür.





Şekil 2.2 Kamyon/hız/çekiş ilişkisi (Caterpillar, 1999).

Açıkça görülüyor ki %10'dan az eğimler yüksek tırmanma hızına izin verir. Böylece nakliye periyodu, yakıt tüketimi ve mekanik parçalar üzerindeki baskı (bakımı arttırır) eğimin dikliği azaltılarak bu giderler belirli ölçüde minimuma indirilebilir.

Kurplardaki çekiş hızı toplam direnç ve kamyon ağırlığı kombinasyonlarını dengelemek için kullanılır. Böylece çekiş sabit kalır. Düşük eğimlerde daha etkilidir.

Yol tasarımları yüklü kamyonların sadece rampa performansına odaklanmamalı boş dönüşlerde dikkate alınmalıdır. Yokuş aşağı kamyonun hız kontrolü ve belirli eğimlerdeki performansı yönetilir. Kamyonun gecikmesi ve fren performansını etkileyen faktörler yavaşlama gücü, enerji tüketim kapasitesi ve net kamyon performansdır.

İstenen yavaşlama gücü kamyon ağırlığının bir fonksiyonu, yardımcı eğim ve yuvarlanma direncidir. Yokuş aşağı giderken yardımcı direnç kamyonun hızlanmasını sağlar. Bu arada yuvarlanma direnci kamyonu yavaşlatır. Kamyon ağırlığı kombinasyonundan oluşan net direnç istenen yavaşlama gücünü belirli hızda devam ettirir bu arada rampadan inilir.

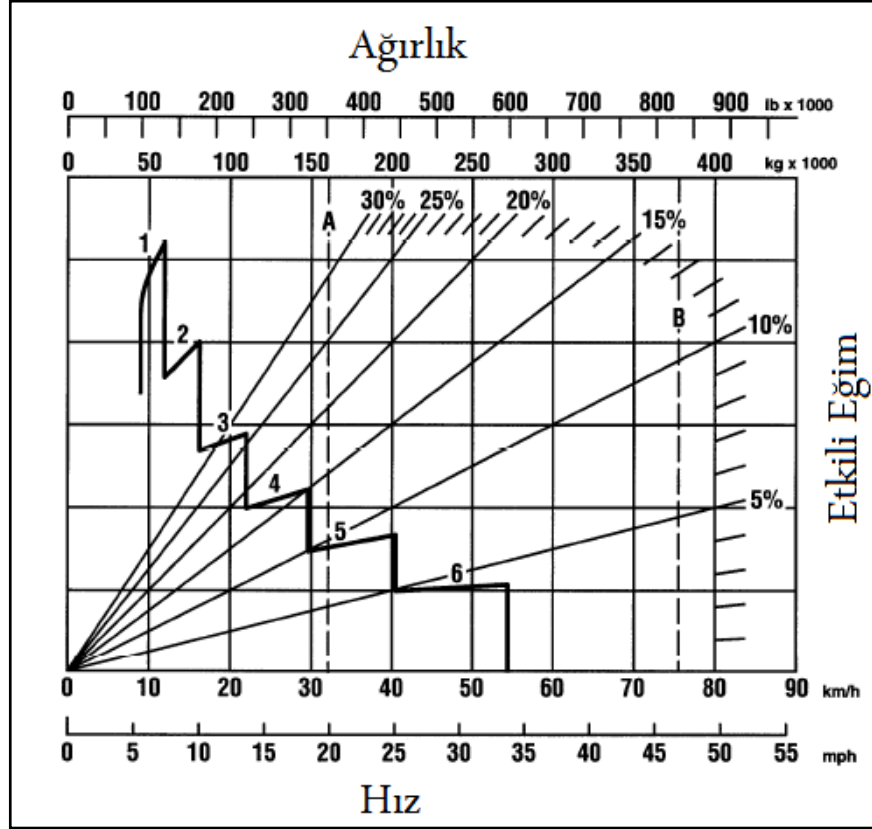
Neredeyse tüm kamyon yavaşlatma sistemleri gerekli mekanik enerjiyi absorbe ederek yavaşlar ya da kamyonu sabit hızda tutar. Bu mekanik enerji ısıya çevrilir ve soğutma sistemi yoluyla atmosfere atılır. Kamyon yavaşlatma sisteminin enerji tüketim kapasitesi, rampa çıkış nakliyesi için çekiş kurplarına benzer şekilde yavaşlatma operasyonu için performansı belirler. Kamyonun enerji tüketim kapasitesi yol mesafesine, atmosfer ısısına, yükseklik ve kamyonun fiziksel yapısına bağlıdır. Mesafe performansı etkileyebilir mesela kısa eğimlerde sabit enerji tüketimi sağlanamayabilir. Eğim kısaysa dik eğime ya da güvenli yüksek hıza izin verir. Eğim boyunca sabit duruma ve sabit hıza ulaşılabilir. Bu da uygulanabilir sonuca ulaşır.

Sürüş parçalarındaki hidrolik ve dinamik yavaşlama yoluyla yokuş aşağı hız kontrolünde önemli gelişmeler sağlanmıştır (Macmillian 1989, Holman 1989, Johnson 1989). Bütün gecikme sistemleri ısı oluşumu sırasında oluşan enerji gelişiminin tüketiminin fonksiyonudur. Hidrolik sistemlerde su soğutma radyatörler ile sağlanır; dinamik yöntem genellikle hava soğutma direnç yığılmasına bağlıdır. Eğim ve uzunluğun kombinasyonu aşırı ise her sistemde aşırı ısıtma mümkündür.

Kamyonu en iyi şekilde kullanmak için ısı değişimlerinden kaçınılmalıdır. Bu sabit kamyon hızı, yavaşlama ve durmalar yok edilerek başarılabilir.

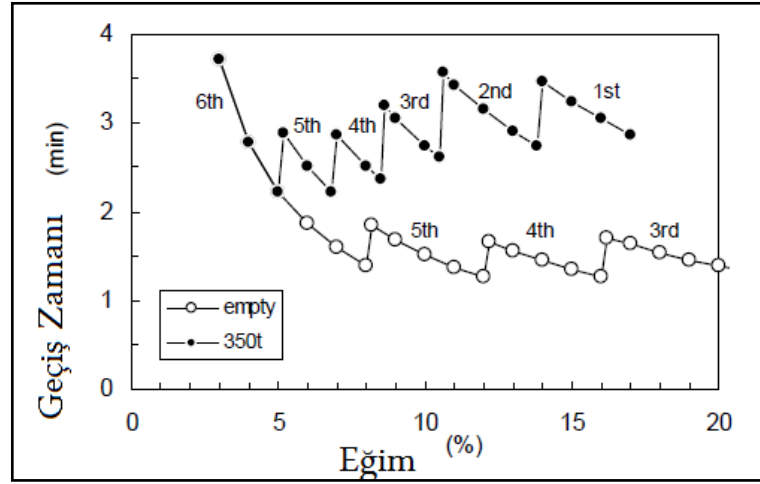
CAT 793C kamyon için tipik yavaşlama performans tablosu Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Yokuş aşağı kamyon hızı istenen yavaşlama güç girişine bağlıdır. Bu giriş kamyon ağırlığı ve etkin eğime bağlıdır. Kamyon hızı nakliye süresini belirlemek için kullanılır. Şekil 2.7 100 m'lik düşey eğim için geçen süreyi vermektedir. Minimum zaman kamyonun hangi vitesi kullandığına ve bunun yanı

sıra etkin eğim ve kamyon ağırlığına bağlıdır. Durumu kabul etmek için şekil 1.6 boş komyonun %8 eğimde 6. Viteste 100 m'yi 1.4 dakikada aldığını gösterir. Eğer kamyon yüklü ise mesela kamyon ağırlığı 350 MT ise vitesi 4'e almak gerekir ve bu aynı mesafeyi 2.5 dakikada alır.

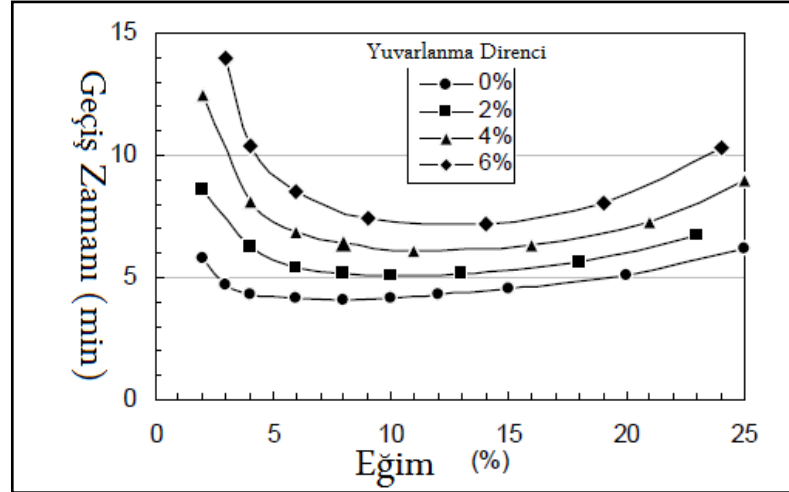


Şekil 2.3 CAT 793 C fren performansı (Caterpillar, 1999).

Yuvarlanma direnci %2 kabul edilirse 100 m'lik çıkışlar için %8 ve %12 eğimde dolu çıkıp boş dönüş minimum nakliye zamanını gösterir. Nakliye periyodu (100 m'lik yükselti değişikliklerinde ) %8 eğim için 6.6 dakika ve %12 eğim için 6.6 dakikadır. Verilen değerler arasındaki fark azdır. Bu da düşük eğimin (%8) sürüş esnasında yıpranma ve yırtılmaları minimuma indirdiğini gösterir.



Şekil 2.4 CAT 797 için eğimli yolda geçiş zamanı (Dwayne ve Bruce, 2001).



Şekil 2.5 CAT 793C için en yüksek hızda 100 m. için yokuş aşağı zamanı (Caterpillar ,1999)

Tablo 2.5 Yol Dizayn Parametrelerinin Çeşitli Değişkenleri (Dwayne ve Bruce, 2001).

Parametreler	Arazi Değerleri
Eğim	±%5
Yuvarlanma Direnci	% 1-% 10
Boş Ağırlık	±%5
Yüklü Ağırlık	±%20
Güç	±%5

#### 2.10.14 Maksimum Sürekli Eğim

Bütün nakliye kamyonlarına uygun en iyi eğimi kurmak olası değildir. Bunun yanı sıra madendeki yerel durumlar operatör tekniğine ya da mevsimine ya da günlük yol durumuna bağlı olarak değişir. Bundan dolayı yol tasarımcısı nakliye filosunun performans kapasitesini ve fren performansını ölçmek zorundadır. Ve bu veriye bağlı olarak havanın ideal eğimi oluşturmaya izin verip vermeyeceğine karar vermelidir. Bu konuda yetkili kişilerin önerilerine göre eğim derecesi belirlenebilir. Mesela Amerika'da çoğu eyaletler %15 maksimum eğim kullanırken çok azı %20'ye kadar eğim oluşturabiliyor.

Dikey yol güzergâhından nakliye yol geometrisi için sürekli eğim uzunluğu göz önünde bulundurulması gereken bir diğer faktördür. Bazı maden operatörleri en iyi operasyon durumunun %7 ve %9 dan daha az maksimum ve sürekli eğimlerde olduğunu belirtmektedir. Bunun yanı sıra birçok eyalet kanunları ve düzenlemeleri %10'luk maksimum sürekli eğime izin vermektedir. Fakat bu birçok eğimde çalışma yapılabileceğini göstermemektedir.

%10 maksimum sürekli eğim güvenli ve kabul edilebilir değerdir. Güvenlik ve drenajdan dolayı uzun dik eğimler her 500-600 m'lik dik eğimlerde %2'lik eğimlerle 50 m'lik bölümler içermelidir.

### **2.10.15 Emniyet Tedbirleri**

Freni patlayan kamyonlar yol tasarımının bir parçası olmalı böylece oluşacak tehlikeler en aza indirilir. Bir yöntem yol merkezi boyunca stratejik olarak yerleştirilmiş yön verici banketler zayıf granüle malzemenin yığınlarıyla yapılır. Fren ya da yavaşlama hatalarında kamyon operatörü kamyonu zayıf granül malzemedan oluşan bankete manevra eder ve kamyon durur. Diğer yöntem ise arabaların durabileceği yerler oluşturmaktır. Zikzak nakliye yollarının kullanıldığı alanlarda keskin virajlarda bekleme şeritleri uygun bir şekilde sık sık yerleştirilir. Bekleme şeridi ters yöne %20'ye kadar eğime sahip olabilir ve zayıf malzeme ya da kum ile kaplanır. Zayıf materyal ile yapılan banketler bekleme şeritlerinden daha ucuzdur.

### **2.10.16 Yatay ve Düşey Güzergahın Birleşimi**

Nakliye yolunun tasarımında yatay ve düşey güzergâhlar birbirini tamamlamalıdır.

Kaçınılması gereken potansiyel tehlike durumları

- Tepe yakınındaki keskin yatay kurplar. Çünkü sürücü özellikle gece ve sisli havalarda bu kulpları algılamada zorluk yaşar.
- Özellikle çok şeritli yollarda kısa tanjant ve değişen eğimler
- Keskin yatay kurplar ya da yatay kurpların kesiştiği tepe yakınlarında kesişme dört açıdan görme mesafesi göz önünde bulundurularak olabildiğince düz olmalı.

Nakliye Yolu ve Yol Güzergahı Planlanırken Göz önünde Bulundurulması Gereken Noktalar:

- Operatör her zaman durma mesafesine eşit olan ön mesafeyi görebilmelidir.
- Keskin yatay kurpların rampanın en altında ve en üstünde yapılmasından kaçınılmalıdır.

- Kesişme mümkün olduğunca düz yapılmalı ve rampanın tepesinde oluşturulmamalıdır.
- İki şeritli nakliye yolları için minimum şerit genişliği en geniş aracın 3.5 araç genişliği kadar olmalıdır. Keskin kurpları güvenli şekilde aşmak için bu genişlik geçme şeritleri ve güvenlik banketleriyle arttırılabilir.
- İyi drenaj için yol yüzey kesiti 1:25 ve kanallar “V” şeklinde olmalı ve şevler 2H:1V yi aşmamalıdır.
- Yatay kurplar kurp yarıçapı ve ekipman hızına bağlı olarak %4-%6 deverde olmalıdır.
- Kurb yarıçapı nakliye ekipmanlarının minimum manevra çapından fazla olmalıdır.
- Zeminin doğal şekline bağlı olarak nakliye yolu yarmalardan (dolgu bölümleri ve kazı-dolgu bölümleri) yapılabilir. Yol bölgesinin optimize edilmesi için gerekli dolgu miktarı, soyulma oranı ve güvenlik bariyerleri arasındaki ilişki analiz edilmelidir.

#### **2.10.17 Güvenlik Bariyerleri ve Kanallar**

Yol genişliğinde güvenlik bariyerleri ve kanallarda hesaba katılmalıdır. Güvenlik bariyerleri için genellikle pasa kullanılır ve kontrolden çıkan araçlar için yapılmaktadır.

Bariyer yüksekliği genellikle kullanılan en büyük aracın tekerlek yüksekliğinin 2/3'ü kadar olmaktadır. Güvenlik bariyerinin eğimi malzeme stabilitesi izin verirse 1H:1V dikliğinde olabilir. Güvenlik bariyerleri drenajı kolaylaştırmak amacıyla her 25 metrede 1-2 m boşluk bırakılarak yapılmalıdır.

Drenaj kanalı yolun her iki tarafında kazılmalıdır. Kanal derinliği değişebilir fakat genelde alt temelde 0.5 metre aşağıda yapılmaktadır. Kanalın kenarları 3H:1V'den dik olmamalıdır.

## **BÖLÜM ÜÇ**

### **NAKLIYE YOLU YAPISAL TASARIMI**

Nakliye yolu yapısal tasarımı, kamyonların ağırlık ve yük tekrarları altında mevcut taban tabakasının belirlenmiş bir proje ömrü süresince istenen seviyede servis verebilmesi için gerekli tabaka veya tabakaların kalite ve kalınlık tayinlerini kapsayan bir terimdir. Bu amaca yönelik iki tür kaplama mevcuttur. Birincisi tabakaların esnek davranış gösteren malzemelerden oluşturulduğu esnek kaplamalardır. İkinci tür ise yük taşıyan asıl yüzey tabakasının portland çimentosundan teşkil edildiği rijit kaplamalardır.

Ayrıca bu türlere, maliyet açısından düşük ancak hizmet ömrü ve servis kabiliyeti bakımından oldukça verimsiz sonuçlar veren, mevcut taban malzemesinin düzeltilmesi-sıkıştırılması ile elde edilen stabilize kaplama tipini eklemek mümkündür. Bu stabilize kaplama tipi, birçok maden işletmesi tarafından ilk bakışta düşük maliyetli görünmesi nedeniyle (düşük taşıma gücüne rağmen) ocak nakliye yolu yapımında kullanılmaktadır.

Maden işletme ömrünün uzun olduğu durumlarda ise esnek kaplama tipinin kullanılmasına yer verilmelidir. Uygulamada esnek kaplamanın maliyetli görünmesi ve/veya bununla ilgili bilginin olmaması nedeniyle pek uygulanmamaktadır. Bunun yerine mevcut yollar devamlı tamir edilmektedir. Bu nedenle bu bölümde esnek yol kaplama ve stabilize kaplama kesitlerine yönelik ve nakliye yolu yapısal tasarımı ile ilgili bilgilere yer verilecektir.

#### **3.1 Nakliye Yolu Kaplama En Kesiti**

Genel tanımıyla tipik maden nakliye yolu kaplama en kesitleri Şekil 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.

##### **3.1.1 Esnek Yol Kaplama En Kesiti**

Esnek kaplama nakliye yolu başlıca 4 tabakaya ayrılmıştır (Şekil 3.1).





Şekil 3. 1 Esnek Yol Kaplama En Kesiti

✓ **Üst yapı tabanı (Doğal Malzeme):** Yol güzergâhında bulunan malzemenin üzerindeki bitkisel tabakanın alınması ile oluşan tabakaya denir. Eğer bu malzeme gerekli taşıma kapasitesine sahip değilse uygun malzeme ile değiştirilir. Sıkıştırma, geotekstil, kimyasal stabilizasyon ya da binder ilavesi ile taşıma kapasitesi artırılabilir. Yüzeiden gelen yükler bu tabakaya da etkir.

✓ **Alt temel tabakası:** Üst yapı tabanı ve temel arasındaki tabakadır. Bu tabaka da sıkıştırılabilir temiz malzeme kullanılmalıdır. Granüler dekapaj malzemesi ve iri malzeme bu tabakada kullanılır. Bu tabaka dayanımı sağladığı gibi üst yapı tabanındaki malzemenin temel tabakasına karışmasını engellemesi, donma etkisini azaltması, suya dayanımı arttırması, yapısal desteği arttırması ve araç yükünü dağıtması gibi başka avantajlar da sağlamaktadır.

✓ **Temel Tabakası:** Alt temel tabakasının üzerinde ve aşınma tabakası altında bulunan tabakaya temel tabakası denir. Eğer alt temel yoksa üstyapı tabanına da serilebilir. Temel tabakası yüksek sağlamlık ve yoğunlukta olmalıdır. Bu yüzden uygun gradasyonda, yüksek kaliteli malzeme kullanılmalıdır. Bu tabaka, aşınma tabakasından gelen yükün yolda deformasyona neden olmasını engellemede ve alt temelde yer değiştirmeyi önlemede rol oynar.

✓ **Aşınma Tabakası:** Yolun en üst tabakasıdır. Lastikle temas halindeki yüzeydir. Aşınma tabakasında, tozu az iri taneli malzeme kullanılmalıdır. Bu tabaka, aşınmaya karşı direnci artırır, çekiş gücü sağlar, tekerlek yükünü temele aktarır ve suyun diğer tabakalara geçmesini engeller. Bu tabaka beton ya da asfalt olabilir. Genellikle kırılmış kaya kullanılmaktadır.

### 3.1.2 Stabilize Kaplama En Kesiti

Stabilize kaplama nakliye yolu başlıca 2 tabakaya ayrılmıştır (Şekil 3.2). Bunlar,



Şekil 3. 2 Stabilize Kaplama En Kesiti

- ✓ Üst yapı tabanı (Doğal Malzeme)
- ✓ Sıkıştırılmış ve stabilize edilmiş taban malzemesi

Ülkemizde maden işletmelerinin büyük bir çoğunluğu bu tür yol kaplamasını tercih etmektedir. Gerek çakıl ve gerekse kırma taş kaplamalar, şartnamesine uygun olarak inşa edildikleri ve bakıldıkları sürece, yüksek adhezyon katsayısı ve düşük yuvarlanma direnci verecek şekilde yeterli performans göstermektedirler. Bu tip kaplamaların en büyük avantajı düşük maliyete ve kısa yapım süresine sahip

olmalarınıdır. Bilhassa kısa dönemlerde güzergâhlarının değişmesi muhtemel ağır vasıta taşıyan yollar için bu kaplama türü verimli olmakta, asfalt betonu yol için yüksek yatırıma gitmeye gerek kalmamaktadır. Bazı durumlarda temel ve aşınma tabakası için aynı tip malzeme kullanılabilir. Bununla beraber, temel malzemesi 10 cm boyutlarında parçalar da içeriyorsa, aşınma tabakası malzemesinin daha da ince olması gerekmektedir. T.C. Karayolları bu tip temel ve aşınma tabakası malzeme gradasyonlarını (1980, 1983) vermiş olmasına karşın, bu gradasyonlar daha ziyade yük tekrarı fazla, ancak yükü az olan karayolları için geçerli olmaktadır. Tablo 3.1 ise taşıma yolları için tavsiye edilen çakıl veya kırma taş aşınma tabakası gradasyonunu vermektedir. Bu şartnameyi tutturana veya daha ince tarafta kalan gradasyonlar, taşıma yolları aşınma tabakası inşaatı için geçerli olan karışımlar olarak kabul edilmektedir. Dere malzemesi (çakıl ve kum) maden işletmelerinde çoğunlukla mevcut olan malzemedir. Bu yüzden bu tüvenan malzeme ucuz maliyetli aşınma tabakası malzemesi olarak kullanılabilir. Ancak, bu malzeme, verilmeden önce iri taş ve çakıllardan bitkisel malzemelerden ve diğer zararlı bileşenlerinden arıtılmalıdır. Aşınma tabakası için kullanılacak diğer malzeme türleri; ince parlatılmış kaya parçaları, cüruf, ayrışmış granit ve şeyl, volkanik kül, mil artıkları gibi malzemelerdir.

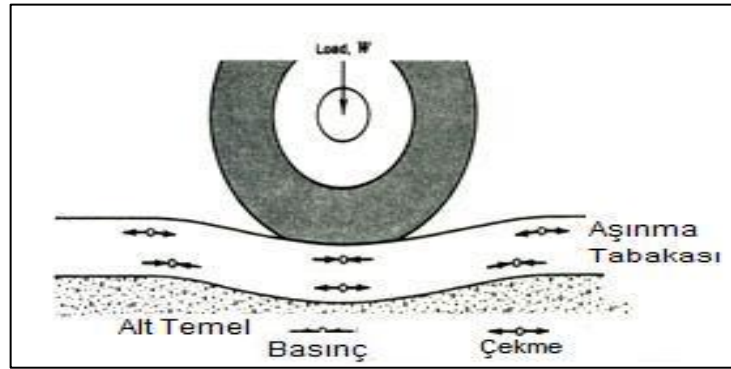
Tablo 3. 1 Tablo Çakıl veya kırma taş aşınma tabakası gradasyon limitleri ve zemin karakteristikleri (Kaufman ve Ault, 1977)

Elek Açıklığı (inç)	Geçen Malzeme (%)
1 <sup>1/2</sup> "	100
1"	98
3/4"	92
3/8"	82
4	65
10	53
40	33
200	16
Likit Limit	25.2
Plastik limit	15.8
Plastisite İndisi	9.4
Serme Sırasındaki optimum Nem Yüzdesi	%12.2

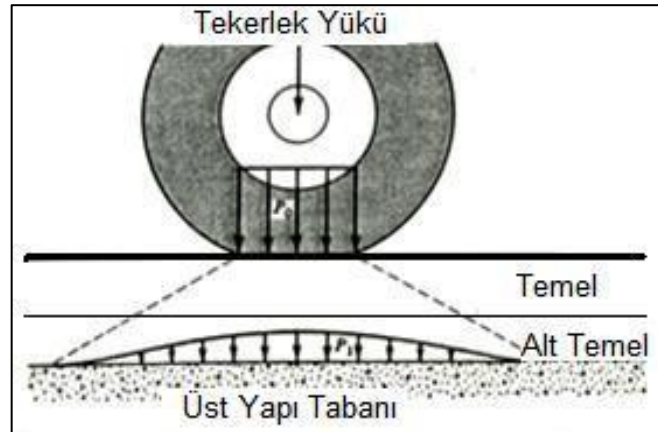
### 3.2 Nakliye Yolu Kaplama Tasarımı Prensibi

Yol kaplama tasarımındaki en önemli husus, yol üst yapısının altında araçların tekerlek yükünü taşıyabilecek üst yapı tabanı yaratabilmektir. Bunun sağlanamaması durumunda yolda deformasyonlar meydana gelecektir (Şekil 3.3).

Yol kaplamasında üzerine gelen yükü taşıyan esas tabaka, en alta bulunan üst yapı tabanı (taşıyıcı temel) malzemesidir. Bunun üzerindeki kaplama tabakaları tekerleğin yükünü tabana aktaran birimlerdir (Şekil 3.4). Taban malzemesinin taşıma gücü zayıfladıkça, üzerine gelecek yükü taşıyabilmesi için yükü tabana aktaracak tabaka ve/veya tabakaların kalınlıkları da artacaktır.



Şekil 3. 3 Kaplamada Oluşan Basınç ve Çekme Gerilmeleri



Şekil 3. 4 Tekerlek Yükünün Tabana Aktarılması

Tabii taban malzemesini yeterli hale getirecek bir alt temel tabakasının tüm ayrıntıları ile inşası, ilk bakışta ekonomik açıdan bir külfet gibi görünecektir. Ancak uzun vadede, böyle bir temel malzemesinin varlığının, işletmenin üretim hızı ve taşıma şebekesinin işlerliği bir arada düşünüldüğünde, çok büyük yararlar getireceği ve bu yararların ilk yatırımdaki fazla maliyeti kapatarak işletmeyi karlı hale getireceği düşünülmelidir.

Birçok maden işletmesi, ilk bakışta düşük maliyetli görünmesi nedeniyle ocak nakliye yolu yapımında sahada mevcut ve taşıma gücü düşük malzemeden yararlanmaktadır. Bu doğal malzeme yol yüzeyi altındaki üst yapı tabanı (taşıyıcı temel) görevini üstlenmektedir. Kimi işletmelerde ise, kaya parçaları gömülü üst yapı tabanı malzemesi üzerine yüzey malzemesinin serilmesi yeterli görülebilmektedir. Ancak bu yeterliliğin asıl ölçütü, kullanılacak yol tabakasının, üzerinde hareket edecek kamyon ağırlıklarını emniyetli bir şekilde taşıyıp taşımayacağı bilimsel olarak tayin edilmesidir. Günümüzde birçok maden işletmesi yukarıda sözü edilen yanlış kaplama tasarımı davranışı nedeniyle aşağıdaki sorunlarla karşı karşıya kalmaktadırlar.

- ✓ Zayıf taşıyıcı zeminlerde kısa zamanda deformasyonlar ve/veya çamurlaşma oluşarak araçların sürüş kontrolleri zorlaşmaktadır,
- ✓ Özellikle killi zeminler, taşıma güçlerinin düşük olması, suyu bünyelerinde tutmaları ve konsolidasyona neden olmalarından dolayı tekerlik izi oluşumuna, alt ve üst temel malzemenin tabana gömülmesine ve taşıma yolunun tamamen bozulmasına neden olmaktadır,
- ✓ Doğal zemindeki malzemeyle yol yapılması, yüzeyde kötü gradasyonlu, sivri uçlu düzensiz malzeme bulunmasına neden olabilmektedir.

Tüm bu problemler verimliliği azaltmakta, yakıt, tamir bakım ve lastik giderlerini arttırdığı gibi yolun bakımı boyunca kapatılması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır.

Yol kaplama tasarımı amacıyla değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunların en pratik ve yaygın olarak kullanılanı California Bearing Ratio (CBR) testinin

sonuçlarına ve tekerlek yüküne göre yapılan yol tasarımıdır (CBR yöntemi bölüm 5’de ayrıntılı olarak açıklanmıştır). Kaplama malzemesinin CBR ve kamyonların maksimum tekerlek yükü değerlerine göre gerekli malzeme seçimi ve yol tabaka kalınlıkları hesaplanmalıdır. Bu şekilde yapılan hesaplarla tespit edilen tabaka kalınlıklarının, ocak yolunda kullanılacak kamyonların tekerlek yükünü kolaylıkla karşılaması sağlanabilmektedir. Çeşitli zemin gruplarının  $\text{kg/cm}^2$  cinsinden yaklaşık taşıma kapasiteleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3. 2 Çeşitli zemin sınıflarının yaklaşık taşıma kapasiteleri (Eskikaya ve Karpuz, 2005)

<b>Zemin Malzemesi</b>	<b>Taşıma Kapasitesi <math>\text{kg/cm}^2</math></b>
Sert Kaya	60
Orta sert kaya	35
Kaya taban üzerinde sert küskülük	12
Sıkı çakıl ve iri taşlı çakıllı formasyon, sıkı kum çakıl	10
Yumuşak kaya	8
Gevşek çakıl veya kumlu çakıl, sıkı kum veya çakıllı kum, Çok sıkı kum-organik olmayan siltli zemin	6
Sert-kuru konsolide kil	5
Gevşek orta-iri kum, orta sıklıkta ince kum	4
Sıkı kum-killi zeminler	3
Gevşek ince kum orta sıklıkta kum-organik olmayan siltli zeminler	2
Sıkı veya sert kil	1.5
Gevşek doymuş kumlu killi zeminler, orta yumuşak kil	1

### **3.3 Nakliye Kamyonları Tekerlek Yükü, Gerilmesi ve Lastik Temas Alanı**

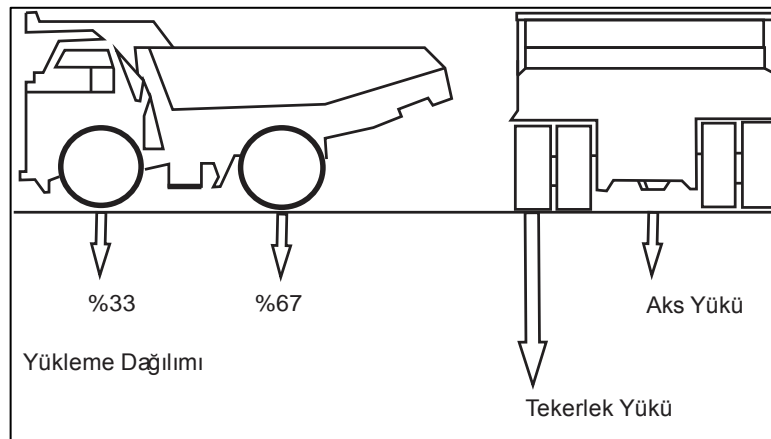
#### **Hesabı**

Madencilik sektöründe nakliye kamyonları taşıma kapasiteleri 30 ton’dan 350 ton’a kadar büyük bir yükselme göstermiştir. 30 yıl önce en fazla 20 tonluk taşıtları

taşıması için projelendirilen yolların günümüzde 350 ton mertebesindeki yükleri taşıması beklenemez. Nakliye yolunda kullanılacak kamyonun çeşidi ve ağırlığına göre projelendirmenin yapılması gerekir.

Lastiklerin iki önemli bileşimi olan lastik temas alanı ve basıncı yol tasarımını etkilemektedir. Nakliye kamyonlarının lastik basıncı son beş yılda 80 PSI'den 130 PSI'ye artmıştır. Lastik basıncının artması yol yüzeyindeki gerilmelerin de artmasına neden olurken, yola gelen gerilmeleri azaltmak için lastik genişliği arttırılmaktadır. Yol yüzeyinde deformasyon olmaması için yolda kullanılan malzemenin taşıma kapasitesi lastik gerilmelerinden daha yüksek olmalıdır. Yüksek taşıma kapasitesi için geniş lastik kullanılmaktadır. Ancak nakliye kamyonlarının yük taşıma miktarlarının arttırılması, gerilmelerin yol yüzeyinden çok aşağıya etkimesine neden olmaktadır. Bu nedenle temel, alt temel ve üstyapı tabanında kullanılacak malzemelerin iyi seçilmesi gerekmektedir. Yol kesiti tasarlanırken yolda kullanılacak en büyük kamyonun ağırlığına göre hesaplama yapılmalıdır. Zemine etkiyen gerilmenin bulunabilmesi için ilk olarak nakliye kamyonundan tekerleğe gelen yük hesaplanmalıdır.

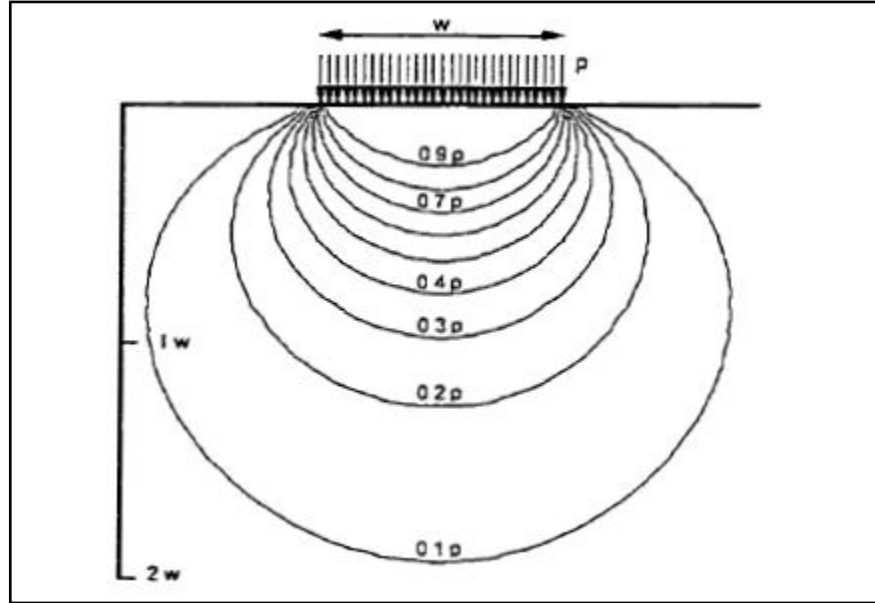
Kamyon lastiklerine gelen yük dağılımı, %33 ön lastikler ve %67 arka lastikler olarak alınabilir (Hustrulid ve Kuchta, 1995). Şekil 3.5'te lastiğe gelen yük dağılımı verilmiştir.



Şekil 3. 5 Lastiklere gelen yük dağılımı

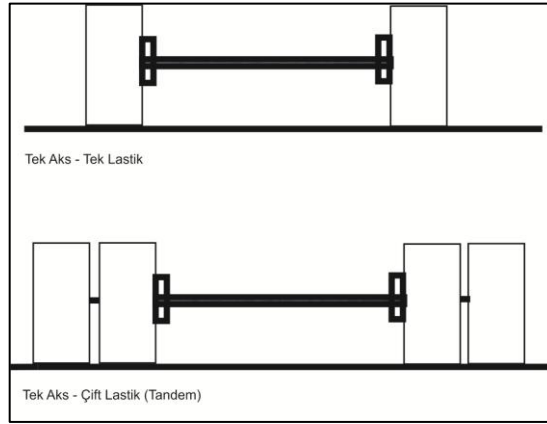
Nakliye kamyonununun arka aksında tek lastik ya da çift lastik olabilir (Şekil 3.7). Arka aksta tek lastik olması durumunda arka lastiklere gelen yük, toplam yükün %67'si kadar alınabilir. Arka aksa gelen yükün iki lastiğe eşit olarak dağıldığı kabul edilir.

Şekil 3.6 tekerlek temas alanı ve lastik basıncının yol yüzeyinde meydana getirdiği gerilme balonlarını göstermektedir. Burada  $W$ , lastik temas alanını ve  $P$  de lastiğin basıncını göstermektedir. Gerilme yol yüzeyinin altında tipik olarak 0,3-0,6 m. arasında başlar ve lastik basıncının 0,65-0,95 katı arasında olur ya da 0,3-0,65 MPa arasında olur. Benzer şekilde alt temel yaklaşık 1,5 m. altta başlar. Böylece alt temel deneyimi lastik basıncının 0,2 katı kadar ya da 0,1-0,2 MPa arasında olur. Gerilme kriterine dayanarak temel ve alt temel için uygun materyalin taşıma kapasitesi yüzeyden gelecek gerilmelerden daha yüksek olmalıdır.



Şekil 3. 6: Tek tekerlek için gerilme balonları





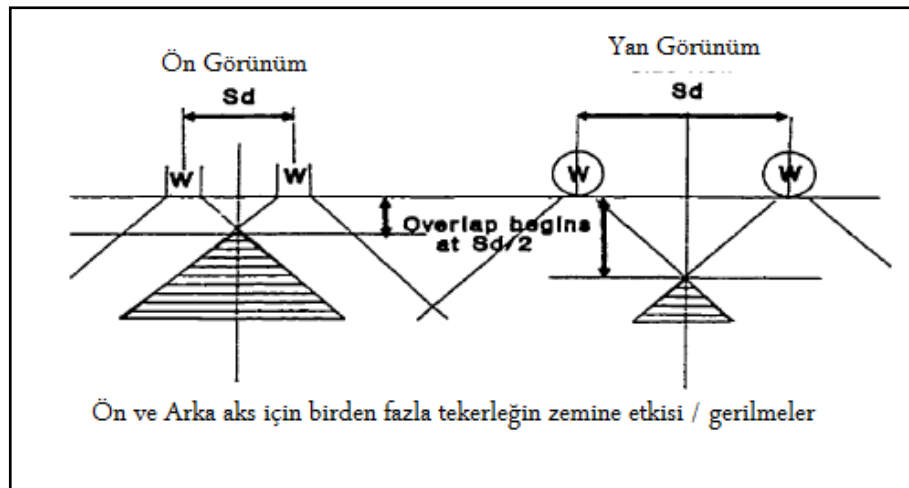
Şekil 3. 7 Kamyon arka aks lastik çeşitleri

Arka aksta çift lastik olması durumunda iki lastiğin basınç balonları kesişmektedir (Şekil 3.7). Lastiklerin basınç balonlarının kesiştiği bölgede en fazla etki oluşmaktadır. Bu kesişim, lastik genişliği, iki lastik arasındaki mesafe ve derinliğe göre değişir. Bu tip durumlarda yol tasarımı hesabı yapılırken lastikten zemine gelen yükün %20 arttırılması önerilir (Kaufman ve Ault, 1977).

$$L_E = 1.20 \times L_T \quad (3.1)$$

$L_T$ =Tek teker yükü

$L_E$ = Tandem tekerlekler için teker yükü



Şekil 3. 8 Lastik gerilme balonlarının kesişimi.

Nakliye kamyonu zemine, lastikleri vasıtasıyla yük uygulamaktadır. Lastiğin yol yüzeyi ile olan temas alanı, uygulanan gerilme miktarını etkiler. Temas alanı ne kadar yüksekse uygulanan gerilme de o kadar az olur.

Tablo 3.3 Örnek lastik temas alanları ve basınçları (Dwayn ve Bruce, 2001).

Lastik	Kamyon Yüklü mt	Temas Alanı (m <sup>2</sup> )	Lastik Yükü mt	Lastik Basıncı (kpa/psi)	Yarıçap (mm)
Standart Lastik 40.00R57	218	1.11	63	689 (100)	1776
Retrofit Lastik 44.80R57	218	1.11	63	586 (85)	1705
Düşük Profil 55.80R63	327	1.68	93	586 (85)	1946

Lastiğin zemine temas ettiği bölümün izi dairesel ya da yuvarlaklaşmış dikdörtgen şeklinde olur. Geleneksel lastiklerin dairesel izleri olurken yeni lastiklerin izleri yuvarlaklaşmış dikdörtgen şeklindedir. Lastiğin zemine yaptığı basınç özellikle geleneksel lastiklerde eşit dağılmamaktadır. Fakat nakliye yol tabakalarında gerilme analizleri için lastik izinden yola iletilen gerilmelerin eşit dağıldığı farz edilirse tatminkâr sonuçlar elde edilebilir.

Tablo 3.4 Maden nakliye yolunda çalışan bazı kamyonlar ve özellikleri

Model No		CAT 793	CAT 797	T 262	TI 272	T 282	MT 4400	MT 5500	830E	930E	BMC
Make		Caterpillar	Caterpillar	Liebherr	Liebherr	Liebherr	Unit Rig	Unit Rig	Komatsu	Komatsu	940 EDB
Kapasite	mt m <sup>3</sup>	232 129	326 220	218 119	270 164	308-327 173.6	236 139	308 181	218-255 147	272-290 184	25
Çalışma Ağırlığı	mt	377	558	370	411	529	392	510	386	480	39
Lastik Basıncı	kpa	40.00R57 690	55.80R63 590**	40.00R57 690	44.80R57 690	55.80R63 590**	100.57* 690	55.80R63 590**	40.00-57* 690	50.90R57 690	315.80R22.5 123 (PSI)
Yükleme Yüksekliği Boş	m	5.21	7	5.9	6.2	6.5	6.6	6.7	6.71	6.68	3.1
Genişlik	m	7.67	9.15	7.4	7.9	8.7	7.4	9.05	7.32	8.43	2.5
Uzunluk	m	12.18	14.5	13.3	13.7	14.5	13.9	14.77	13.51	15.24	7.7
Dönme Çapı	m	30.2	31.9	28.5	32.6	32.7	30.4	-	28.4	-	848
Aks Ağırlığı	mt										
Boş Ön		70	-	68.5	64	99	74.1	96.9	76.5	92.7	4
Arka		78	-	83.5	74.4	102	82.2	104.9	77.8	97.6	5.2
Yüklü Ön		124	-	122	127.3	188.3	130.8	170.1	128	160.1	7.8
Arka		253	-	248	283.2	340.3	261.5	340.1	257.8	320.2	18.2
Maksimum Hız	km/saat	55	64	51	68	64	59	-	56.9	64.5	

\* Hem radyal hem geleneksel lastik kullanıldı

\*\* düşük basınç, düşük profil lastik

Ülkemiz dekapaj işlerinde kamyonlara yoğun olarak 30-35 ton malzeme yüklenmektedir. Örnek hesaplama bu kamyon özelliklerine göre yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan nakliye kamyonu BMC'nin 940 EDB modelidir ve teknik özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

BMC 940 EDB'nin boş kamyon ağırlığı 14 ton, yüklü ağırlık (14 + 35) 49 ton olarak alınmıştır. Ön lastiklere gelen yük %33, arka lastiklere gelen yük %67 kabul edilmiştir.

Bu kabule göre;

Ön aks yükü= $49 \times 0.33=16.17$  ton,

Tek tekerlek yükü de ( $16.17/2$ ) 8.09 ton bulunur (sağ önde bir, sol önde bir lastik olmak üzere toplam 2 lastik bulunmaktadır). %15 güvenlik yüzdesi ile nihai değerimiz tek tekerlek için yük 9.3 ton bulunur.

Arka aks yükü= $49 \times 0.67=32.83$  ton,

Tek tekerlek yükü 8.21 ton olarak bulunur. Arka lastikler tandem olduğu için zemine etkiyen yük %20 fazla olacağından bu değer 1.2 ile çarpılır ve 9.85 ton olarak bulunur. %15 güvenlik yüzdesi ile nihai değerimiz tek tekerlek için yük 11.33 ton bulunur (Arka sağ iki, arka sol iki olmak üzere toplam 4 lastiğe göre hesaplama yapılmıştır).

Lastiğe gelen en fazla yük 11.33 ton olduğu için yol kaplama dizaynı 11.33 ton tekerlek yüküne göre yapılmıştır. Lastik yükü hesapları Tablo 3.4'te özet olarak verilmiştir.

Tablo 3. 5: Lastik yükü hesapları özet tablosu.

Model	BMC 940 EDB (ton)
Kamyonun Boş Ağırlığı	14.00
Kamyonun Dolu Ağırlığı	49.00
Ön Aksa Gelen Yük (%33)	16.17
Herbir Ön Tekerleğe Gelen Yük	8.09
Tekerleğe Gelen Yük için %15 Güvenlik Faktörü Kabul Edildi	9.30
Arka Aksa Gelen Yük (%67)	32.83
Herbir Arka tekerleğe Gelen Yük (Arka lastikler tandemdir)	8.21
Tandem Lastiklerin Gerilme Balonlarından Dolayı Yük %20 Fazla Olur	9.85
Arka Tekerleğe Gelen Yük için %15 Güvenlik Faktörü Kabul Edildi	11.33

### 3.3.1 Lastik Basıncı Esas Alınarak Lastik Temas Alanı ve Zemine Uygulanan Gerilmenin Hesabı

Lastik temas alanının hesaplanması, lastik basıncına veya lastik temas alanına göre iki farklı şekilde hesaplanmaktadır. Yapılan hesaplamalarda zemine elde edilen gerilme değerlerinden yüksek olan değer kullanılması önerilir. Hustrulid ve Kuchta, lastik temas alanını hesaplarken zemine uygulanan yükü lastik basıncına oranlamıştır (Formül 3.2). Aşağıda bu yöntemle göre maksimum tekerlek yükü için zemine uygulanan gerilmenin hesabı (Formül 3.3) verilmiştir.

$$\text{Lastik Temas Alanı (LTA)} = \frac{\text{yük (Nm}^2\text{)}}{\text{lastik basıncı (kN/m}^2\text{)}} \quad (3.2)$$

$$\text{LTA} = \frac{11300 \cdot 9,81}{126 \cdot 6,89} = 0,133 \text{ m}^2 = 1330 \text{ cm}^2$$

$$\text{Zemine Uygulanan Gerilme (ZUG)} = \frac{\text{yük (kg)}}{\text{Alan (cm}^2\text{)}} \quad (3.3)$$

$$\text{ZUG} = \frac{11330}{1330} = 8,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 0,85 \text{ MPa}$$

### ***3.3.2 Lastik Temas Alanı Hesabında, Lastik Genişliğinin Yarıçapının Kullanılmasıyla Lastik Temas Alanı ve Zemine Uygulanan Gerilmenin Hesabı***

Lastik temas alanının hesaplanmasında lastik genişliğinin yarısı alınarak ta hesaplama yapılabilir (Dwayne, D.T. ve Regensburg B, 2001).

$$\text{Lastik Temas Alanı} = \pi \times r^2 \quad (3.4)$$

$$LTA = \pi \times 15.6^2 = 764 \text{ cm}^2$$

$$ZUG = \frac{11330 \times 9,81}{764} = 1.48 \text{ Mpa}$$

Yapılan hesaplamalarda lastik temas alanı iki farklı formülle elde edilmiştir. Elde edilen alanlara göre zemine gelen yükte farklı çıkmıştır. Güvenli aralıkta kalmak için bu çalışmada zemine uygulanan gerilmede yüksek olan değer baz alınmıştır.

## BÖLÜM DÖRT

### ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Zeminlerin problem yaratan özellikleri tam olarak belirlendikten sonra hangi tip stabilizasyon metodunun uygulanması gerektiği saptanmalıdır. Bunun için eskiden beri başarıyla uygulanmış olan klasik zemin stabilizasyon yöntemleri bulunmaktadır. Zemin stabilizasyon metotları, aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir,

- Kompaksiyon
- Mekanik Karıştırma
- Kimyasal Stabilizasyon (Çimento, Kireç, Uçucu Kül, vb.)
- Bitüm Stabilizasyonu
- Zemin Enjeksiyonu

Zeminin cinsine göre değişik amaçlar için uygulanacak stabilizasyon yöntemleri Tablo 4.1’de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 4.1 Stabilizasyon yöntemleri (Tunç, 2002).

Amaç	Zemin Cinsi	Stabilizasyon Yöntemleri
Yük Taşıma ve Deformasyon Direncini Arttırma	İnce Granüler	Asfalt, Çimento, Mekanik Karıştırma, Kompaksiyon
	Kaba Granüler	Asfalt, Çimento, Mekanik Karıştırma, Kompaksiyon
	Düşük PI Killer	Kompaksiyon, Çimento, Kireç
	Yüksek PI Killer	Kireç
Don Duyarlılığını Azaltmak	İnce Granüler	Çimento, Asfalt, Uçucu Kül
	Düşük PI Killer	Çimento, Kireç
Su Geçirimsizliği	Düşük PI Killer	Çimento, Kireç, Asfalt
Kabarma Büzülme Kontrolü	Düşük PI Killer	Çimento, Kompaksiyon, Kireç
	Yüksek PI Killer	Kireç
Esnekliği Azaltmak	Yüksek PI Killer	Kireç
	Elastik Kil veya Siltler	Çimento

Tablo 4.2’de zemin sınıfına göre önerilen iyileştirme yöntemleri verilmiştir.

Tablo 4 2 Stabilizör seçimi için rehber.

Alan	Zemin Sınıfı	Önerilen Stabilizasyon Çeşidi	Kısıtlar	No:200'den Geçen	Açıklamalar
1A	SW	Asfalt			
	SP	Çimento K-Ç-UK	PI<25		
1B	SW	Asfalt	PI<10		
	SP	Çimento	PI<30		
	SW-SC	Kireç	PI>12		
1C	SM	Asfalt	PI<10		
	SC	Çimento	*		
	SM-SC	Kireç K-Ç-UK	PI>12 PI<25	Max %30	
2A	GW	Asfalt			Sadece iyi gradasyonlu zemin No:4'ten
	GP	Çimento K-Ç-UK	PI<25		ağırlıkça geçen min %45 -
2B	GW	Asfalt	PI<10		Sadece iyi gradasyonlu zemin No:4'ten
	GP	Çimento	PI<30		ağırlıkça geçen min %45
	GW-GC	Kireç	PI>12		-
	GP-GC	K-Ç-UK	PI<25		-
2C	GM	Asfalt	PI<10	Max %30	Sadece iyi gradasyonlu zemin No:4'ten
	GC	Kireç	*	-	ağırlıkça geçen min %45
	GM-GC	K-Ç-UK	PI>12 PI<25	- -	- -
3	CH	Çimento	LL<40 ve PL<20		Organik ve kuvvetli asidik zeminler bu alana giriyorsa zemin stabilizasyon için uygun değildir.
	CL	Kireç	PI>12		
	MI				
	OL				
	ML-CL				

K-Ç-UK: Kireç Çimento Uçucu Kül Karışımı

\* PI<20 - 50 No:200'den geçen yüzdesi

Bu bölümde taşıma gücü düşük, düşük nem muhtevalarında çamurlaşabilen killi zeminlerin kireçle iyileştirilmesi ile ilgili detaylı bilgi verilecektir.

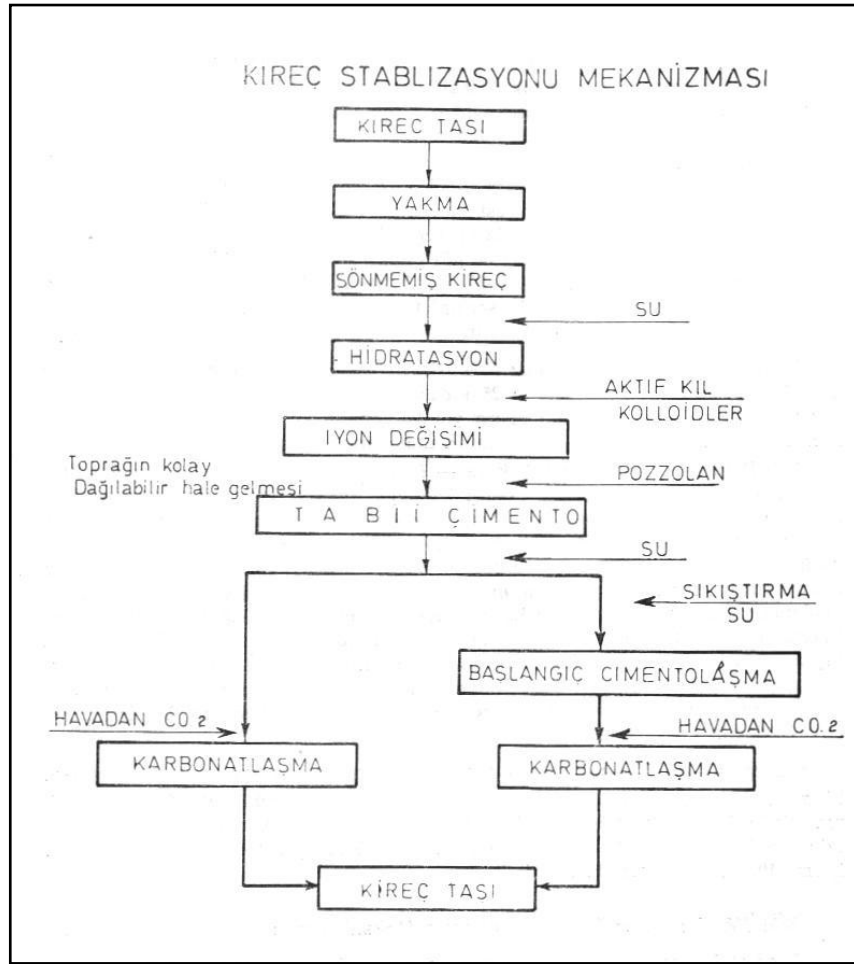
## 4. 1 Kireç Stabilizasyonu

### 4.1.1 Kireç Stabilizasyonu ve Mekanizması

Kireç stabilizasyonunun mekanizması aşağıda gösterilen şekilde oluşur: Kireç taşı veya Dolomit belli bir ısıda (Magnezyum karbonat 500 C°, Kalsiyum karbonat ise 900 C°'nin üstünde) fırında yakıldığında kalker ve Dolomitte parçalanma meydana gelerek Karbon Dioksit açığa çıkar ve geriye kalsiyum oksit veya Kalsiyum —

Magnezyum Oksit (Sönmemiş kireç) kalır. Sönmemiş kirecin su ile muamelesinden hidrasyon meydana gelir. Diğer bir deyimle sönmüş kireç meydana gelmektedir.

Killi zemin ile kireç karıştırıldığı zaman iyon alış verişi başlar. Aynı zamanda killerin bir çoğu pozzolan olduğundan pozzolanik reaksiyon meydana gelir. Bu arada toprak kolay dağılıbilir bir hal alır. Pozzolanlar ile kirecin reaksiyona girmesi neticesinde tabii çimento meydana gelmiş olur. Tabii çimento maddesi belirli bir rutubette sıkıştırılır ve ilk sertleşme başlar (Atanur, 1973 S.19). Şekil 4.1'de kireç stabilizasyonu mekanizması verilmiştir.



Şekil 4 1Kireç stabilizasyonunun mekanizması (Atanur, A, 1973).

Toprak — Kireç stabilizasyonunda Kimyasal ve Fiziksel olmak üzere iki olay meydana gelmektedir.

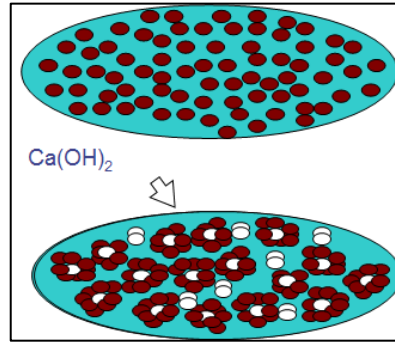


#### 4.1.2 Toprak-Kireç Karışımlarında Kimyasal Olaylar

Toprak — Kireç stabilizasyonunda aşağıdaki üç kimyasal olay meydana gelmektedir.

##### 4.1.2.1 İyon Alış Verişi:

Sönmüş kireç killi topraklarla muamele edildiğinde aktif kil (Kolloidlerle) iyonları ile kalsiyum iyonları arasında iyon alışverişi olur. İyon alışverişinden sonra kilin kimyasal yapısı değişip topaklanma başlar ve zemin kolay dağılabilir, siltimsi bir hal alır. Killi toprağın kireç ilâvesiyle siltli bir toprağa dönüşmesi aşağıdaki durumlardan ileri gelmektedir.



Şekil 4 2 İyon alışverişi.

Kil taneciğinin yüzeyindeki Sodyum ve Hidrojen gibi zayıf metalik iyonlarda kirecin kuvvetli kalsiyum iyonları (Pozitif yüklü) arasında iyon değişimi meydana gelir (Şekil 4.2).

Kil partikülleri kalsiyum katyonlarını yüzeylerinde tutarlar. Her ne kadar kil partikülleri üzerinde başka iyonlarda varsa da partikül yüzeyindeki kalsiyum katyonları hakim durumdadır.

Her iki olay da kil partiküllerinin yüzeyindeki elektrik yüklerinin sayısını değiştirmektedir. Kil partikülleri arasındaki yapışma, iyonların yük ve büyüklüğüne bağlı olduğundan; tek değerli iyonların yerini alan iki değerli kalsiyum iyonları, kil

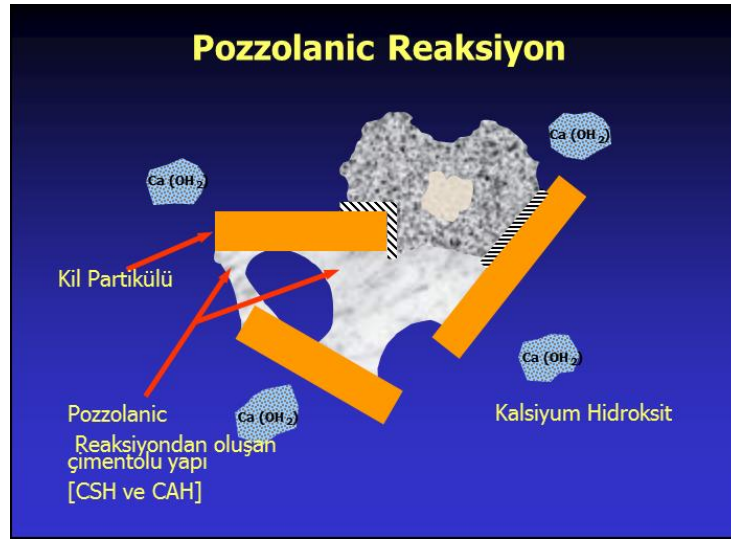
partiküllerini birbirlerine çeker. Bu reaksiyon olurken killi toprağın plastisitesi düştüğü gibi, toprak daha gevşek bir hal alır (Şekil 4.3). Karışım gevşek durumda iken kireçle toprak arasındaki kimyasal reaksiyon hızlı olur ve genellikle bir kaç gün sonra tamamlanır.



Şekil 4.3 İyon alış verişinden sonra zemin daneli yapıya dönüşür.

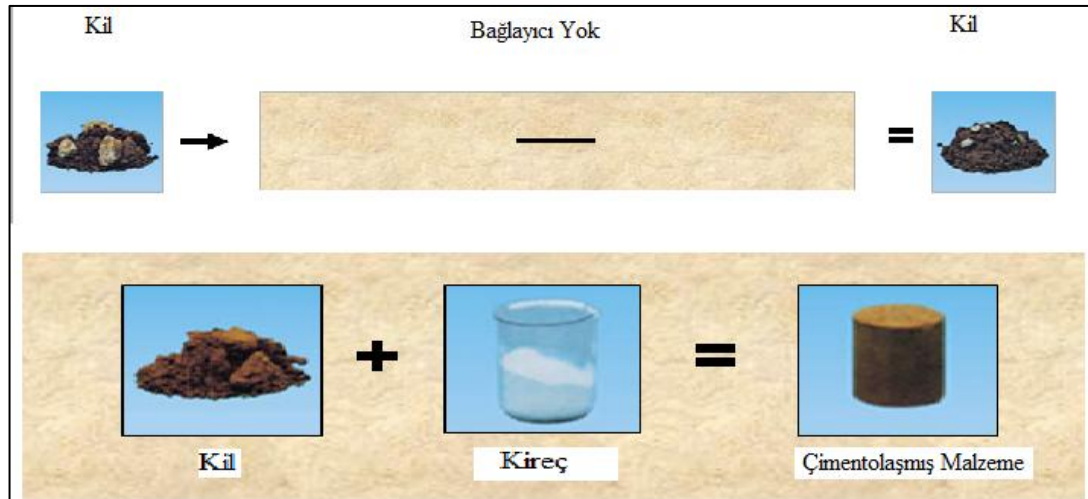
#### 4.1.2.2 Çimentolaşma Olayı:

Toprak-Kireç karışımlarında meydana gelen önemli reaksiyonlardan biri de çimentolaşmadır. Kireçte mevcut olan kalsiyum katyonu toprakta mevcut olan Alüminyum ve Silisyum mineralleri ile reaksiyona girerek kalsiyum Alüminat ve kalsiyum silikatlar meydana getirirler. Meydana gelen bu bileşikler çimentonun hidrasyonundan meydana gelen bileşiklere benzer. Bu reaksiyona çimentolaşma olayı denir (Şekil 4.4).



Şekil 4 4 Çimentolaşma reaksiyonu.

Toprak içindeki çimentolaşmayı meydana getiren minerallere pozzolanlar denir. Çimentolaşmayı pozzolanın tipi, miktarı ve kirecin aktivitesi etkiler. Toprak + Kireç karışımında çimentolaşmanın olabilmesi için Portland çimentosuna nazaran daha fazla zamana ihtiyaç vardır. Diğer taraftan çimentolaşmanın iyi olabilmesi için toprak + kireç karışımının tespit edilen rutubette ve arzu edilen yoğunlukta sıkıştırılması gereklidir.



Şekil 4 5 Kil ve kirecin kimyasal reaksiyonu çimentolaşmış malzemeyi oluşturur.

#### 4.1.2.3 Karbonatlaşma

Kirecin reaksiyonlarından üçüncüsü havadan karbon dioksit emmesidir. Karbon dioksit kalsiyum karbonat teşkil etmek üzere kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer.

Toprak + Kireç karışımında kalsiyum karbonatın meydana gelmesi çimentolaşma olayını etkilediği gibi pozzolanik reaksiyona mani olur ve toprak + kireç karışımlarının normal mukavemet kazanmalarını önler. Diğer bir deyimle karbonatlaşma olayı ne kadar fazla olursa karışımın mukavemet kazanması o nispette azalır. Bu nedenle kireç stabilizasyonu uygulamalarında kirecin hava ile uzun süre teması engellenmelidir. Karbonatlaşma olayı karbondioksit miktarı fazla olan sanayi bölgelerinde daha süratli olur.

#### 4.1.3 Toprak + Kireç Karışımlarında Fiziksel Olaylar

Toprak + Kireç karışımlarında aşağıdaki olaylara rastlanmaktadır.

##### 4.1.3.1 Topaklanma

İnce taneli topraklara (Killere) kireç ilave edildiği zaman ilk meydana gelen fiziki değişmelerden biri kil taneciklerinin topaklanmasıdır. Neticede; ince taneli killi topraklara kireç ilavesi ile iri taneli ve gevrek bir toprak meydana gelir. İnce taneli killi bir toprağa % 10 kireç ilave edildiğinde ve 14 günlük kürden sonra toprakta büyük değişiklikler olur. Aynı toprak-kireç karışımı 240 günlük bir kürden sonra kum şekline dönüşür.

Killi topraklara kireç ilave edildiğinde topaklaşmadan dolayı tane çapı büyümekte, böylece yol yapımına elverişli olmayan killi topraklar kullanılabilir duruma gelmektedir. Topaklanma neticesinde meydana gelen iri tanecikler ıslatıldıktan sonra dahi uzun bir süre vasıflarını muhafaza etmektedirler.

Topaklanma, toprağın cinsine göre değişmektedir. Topaklanma killi topraklara nazaran siltli, kumlu topraklarda daha az olmaktadır. Buda göstermektedir ki, kirecin tane dağılımı üzerindeki etkisi daha fazla killi topraklarda olmaktadır. Topaklaşma üzerine etki yapan başka bir faktörde kirecin özelliğidir. Kirecin toprağın fiziki ve

tane dağılımı üzerindeki etkisini tespit için killi toprağa % 1, 3, 6 ve 10 oranında kireç ilave edilerek karıştırma işlemi yapıldıktan bir saat 2 ve 14 ve 240 gün sonra elek analizine tabi tutulmuştur. Kür müddeti ve ilave edilen kireç miktarlarının artması ile topaklanma neticesinde tane boyutunda büyüme meydana gelmektedir. Çoğu hallerde, ince kil tanecikleri 0.074 mm. elekten geçenlerden daha büyük tanecikler halinde topaklanmış ve 0.074 mm. elek üzerinde kalan malzemenin miktarı artmıştır (Atanur, 1973).

#### *4.1.3.2 Plastisite İndeksinde Düşüş*

Yol inşaatında kullanılacak malzemelerin plastisite indeksleri limitler dahilinde olmalıdır. Tabiatta mevcut toprakların plastisite indekslerine arzu ettiğimiz limite nadiren rastlanmaktadır. Zemine kireç ilave edildiğinde zeminin plastisite kısa süre içerisinde düşmektedir. Toprağın plastisite indeksi düştüğü gibi toprakların taşıma güçleri ve dona karşı mukavemetleri de artmaktadır. Kireç hem toprağın plastik limitine hem de likit limitine tesir etmektedir. Toprağa kireç ilave edildiğinde likit limitte düşüş, plastik limitte ise yükseliş meydana gelmektedir.

Plastisite indeksi yüksek olan topraklara az miktarda kireç ilave edildiğinde plastisite indeksinde % 50-80 arasında bir düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Örnek olarak, likit limiti 51, Plastisite indeksi 30 olan bir killi toprağa % 6 kireç ilave edildiğinde non-plastik hale gelmiştir. Topraklara kireç ilâvesi ile plastisite indeksinde meydana gelen düşüşler, toprağın cinsine, ilave edilen kireç miktarına, kirecin çeşidine, kirecin toprakla reaksiyona girme süresine de bağlıdır.

#### *4.1.3.3 Hacim Değişimi*

Killi topraklara kireç ilave edildiği zaman hacim değişimlerinde azalma olmaktadır. İlave edilen kirecin tesiri ile büzülme limiti artar ve büzülme oranı azalır. Neticede de toprağın hacim değişmesinde azalma meydana gelir.

#### *4.1.3.4 Optimum Rutubette Yükseliş ve Maksimum Kaba Yoğunlukta Düşüş*

Aynı enerji ile sıkıştırıldığında Toprak + Kireç karışımı kireçsiz olan orijinal topraktan daha düşük yoğunlukta sıkışmaktadır. Toprağa ilave edilen kireç yüzde miktarı arttıkça maksimum kuru kaba yoğunluklarda düşüş o nispette fazla olur.

Toprak+Kireç karışımlarımda optimum rutubet fazla olmakla birlikte bu karışımlar, kireç ilave edilmeyen toprağa nazaran daha iyi sıkışabilmektedir. Dikkat edilecek diğer husus da kireç ilavesi ile toprağın kuru yoğunluğu her ne kadar düşmekte ise de karışımının mukavemeti artmaktadır.

#### *4.1.3.5 Stabilitenin Artması*

Toprak+Kireç karışımlarının mukavemetini değerlendirmek için serbest basınç, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), Hveem Stabilometresi, üç eksenli basınç mukavemeti, penetrasyon iğnesi deneyleri yapılmaktadır. Stabilize edilmiş toprak serbest basınç mukavemet deneyleriyle bir mukavemet artışı gösteriyorsa, CBR deneyinde de artış göstermektedir.

#### *4.1.3.6 Toprak+Kireç Karışımlarının Uzun Ömürlü Olması (Süreklilik)*

Toprak+Kireç karışımları üzerinde yapılan arazi deneyleri mukavemetin zamanla arttığını göstermektedir. Diğer bir deyimle toprak+kireç karışımı, zamanla kireç ilave edilmeyen, toprağın vasfına dönmemektedir.

#### *4.1.3.7 Tabii Rutubet ve Boşluk Basıncı*

Killi topraklara ilave edilen kireç miktarının artmasına paralel olarak karışımın arazi rutubeti de artar. Killi topraklar sulandırılmakla kendi hacminin birkaç misli artarlar. Diğer bir deyimle bazı killi topraklar suyun etkisi altında çok fazla şişme göstermektedirler. Neticede de şişme basıncıda pek fazla olur. Kireç ilavesi ile şişme basıncında bariz miktarda azalmalar meydana gelir.

#### *4.1.3.8 Don ve Rutubete karşı Mukavemet (Dayanıklılık)*

Yol inşaatında kullanılacak toprakların Donma — Çözüm ve Islatma — Kurutma gibi tabii tesirlere karşı mukavim olması şarttır. Bu gibi iklim şartlarına mukavemet göstermeyen topraklarla teşkil edilen taban, alt temel, temel ve kaplama altı malzemeleri ilk ve sonbahar yağmurlarının taban veya temel tabakasına işlemesi neticesinde, kısa bir zamanda topraklarda kabarmalar, şişmeler meydana geldiği gibi sıkışmalarında ve taşıma değerlerinde bariz bir düşüş görülür. Neticede de yolda kısa zamanda çökmeler ve dağılmalar meydana geldiğinden yol trafiğe geçit vermeyecek bir duruma dahi düşebilir. Kireç ile stabilize edilen killi zeminin şişme değerleri kabul edilebilir sınırlarda kalmaktadır ve yolda deformasyona neden olacak şişmeler meydana gelmemektedir.

### **4.2 Arazide Kireç Stabilizasyonunun Tatbik Şekilleri**

Kireç stabilizasyonunun arazi tatbikatı makina, yol ve stabilizasyona tabi tutulacak malzemenin durumuna göre aşağıdaki şekillerde olabilir.

- a) Killi malzemenin yerinde kireç ile stabilizasyonu,
- b) Dışarıdan getirilen malzemenin kireçle stabilizasyonu

#### **4.2.1 Killi Malzemenin Yerinde Kireç ile Stabilizasyonu**

Kireç stabilizasyonu tatbikatı iki safha halinde düşünülebilir.

- 1 — Hazırlık safhası
- 2 — Stabilizasyon işlemi

##### *4.2.1.1 Hazırlık Safhası*

Yola kireç stabilizasyonu tatbik edilmeden evvel, kireçle muamele görmüş tabakanın altına gelecek taban, alt temel veya temel tabakasının arzu edilen şekilde sıkıştırılması şarttır. Tesviye edilen satıhta büyük taşlar, enkaz artıkları ve nebati artıklar olmamalıdır.

#### 4.2.1.2 İrtifa Ve Eğime Göre Yolun Tesviye Edilmesi

İrtifa ve eğime göre yolun tesviye edilmesi ve arzu edilen rutubette maksimum kuru kaba yoğunlukta elde edilecek şekilde sıkıştırılması ve sıkışmanın arzu edilir şekilde olup olmadığının kısa mesafelerde kontrol edilmesi önerilir. Sıkışması düşük olan kesimlerin tekrar arzu edilen şekilde sıkıştırılması şayet yolda karıştırma usulünde ariyet toprağı kullanılıyorsa tespit edilen kalınlığa tekabül edecek gevşek toprağın yol üzerine serilmesi, pulverize edilmesi ve yol kenarına figüre edilmesi gereklidir.

#### 4.2.1.3 Stabilizasyon Uygulaması

İlk iş taban toprağının eğim ve meyile göre tesviye işi bittikten sonra taban toprağı elde mevcut makinalar (Greyder, Karıştırıcı-Parçalayıcı...) vasıtası ile tesbit edilen kalınlıkta gevşetilir (Şekil 4.6).



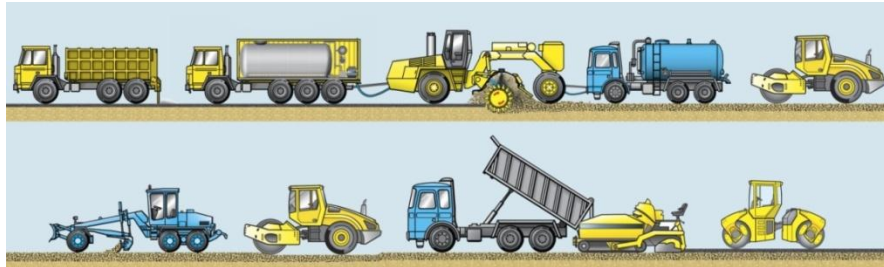
Şekil 4.6 Toprağın ripetlenmesi.





Şekil 4.7 Riperlenmiş toprak.

Pulverizasyon işi için yurt dışında yaygın olarak kullanılan karıştırıcı-parçalayıcı, greyder ya da tarımda da kullanılan basit tarım makinelerinden yararlanılabilir. Şayet taban toprağı çok killi ise pulverizasyon işi çok zor olduğundan bu gibi hallerde su verme (serpme) suretiyle killi toprakların yumuşatılması temin edildikten sonra pulverizasyon işi yapılmalıdır. Rutubet ile karşı karşıya gelindiğinde kirecin killeri yumuşatma etkisi vardır. Kirecin killi topraklar üzerindeki yumuşatma etkisi, killi toprağın plastisite indeksine göre değişir. Mesela yumuşama süresi 12-72 saat arasında değişmektedir. 24 saatlik bekletme süresinden sonra karışımda arzu edilen yumuşama ve dağılma meydana gelmediği takdirde, tekrar karışım optimum rutubetin üstüne getirilmeli ve bir 24 saat daha bekletilmek suretiyle arzu edilen incelik sağlanmalıdır. Killi toprağımız ne kadar çok ince taneciklere ayrılmışsa ve kireç homojen şekilde karışmışsa, stabilizasyondan elde edilen netice o nispette tatminkâr olur.



Şekil 4 8 Uygun ekipmanlarla kireç stabilizasyonu uygulaması örneği.

#### ***4.2.2. Dışarıdan Getirilen Malzeme ile Kireç Stabilizasyonu***

Kireç stabilizasyonuna tabi tutulacak toprak, tespit edilen kalınlık elde edilebilecek şekilde takriben % 20-30 fazlası ile yol kenarına figüre edilir.

Yol kenarına figüre edilmiş toprağın yol üzerine yayvan figüre halinde serilmesinden sonra toprağın kuru ağırlığına göre üzerine sönmemiş kireç veya sönmüş kireç serilir. Kireç ile killi malzemenin karıştırılması için eldeki imkanlara göre greyder, karıştırıcı-parçalayıcı ya da basit tarım aletlerinden faydalanılabilir. Daha sonra malzemenin optimum nem miktarı sağlanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Uygulama bittikten sonra doğal çimentolaşmanın etkisini yitirmemesi için yaklaşık 2 gün boyunca sulama yapılmalıdır.

##### ***4.2.2.1 Kireci Serme İşlemi***

Kireç stabilizasyonu uygulaması yapılacak alan küçük ise, torba kireç kullanılarak uygulama yapılabilir. Ancak uygulama alanı büyük ise günlük kullanılacak ortalama kireç miktarı belirlenmelidir. Bu miktarın iki katı kadar kireç depolaması sağlayacak silo kurulması uygulamanın aksamadan yapılabilmesini sağlar. Silonun doldurulması silobas denilen araçlarla yapılır. Silodaki kireç, kireç serme makinesi vasıtası ile homojen olarak sahaya serilebilir.

*4.2.2.1.1 Torba Kirecin Serilmesi.* Yol kenarına figüre edilen stabilize kaplama üzerine yayvan bir figüre halinde serildikten sonra kireç torbaları figürenin sağ, sol ve baş kısmına konur. Torbanın dip kısmı baştan sonuna kadar kesilir ve kireç boşaltılır.



Şekil 4.9 Torba Kirecin Serilmesi.

Boşaltılan kireç basit aletler ile figüre üzerine mümkün merteye bağdaşık bir şekilde serilir. Serilen kireçten işçilerin zarar görmemesi için tedbirler alınmalıdır (Lastik çizme, eldiven, kenarları kapalı gözlükler kullanılmalıdır v.s.).

*4.2.2.1.2 Kireç Serme Makinası ile Serme İşlemi.* Bu uygulama pratik, hızlı ve tatbiki kolaydır. 20 ton'a kadar kireç taşıma kapasitesi olan kamyonlardan yararlanır. Bu kamyonların kasası kapalı ve kireci serme amacıyla içinde özel ekipmanı bulunmaktadır. Hıza duyarlı sistem sayesinde kamyon hareketi ile beraber istenilen oranda kireç yola serilebilmektedir.



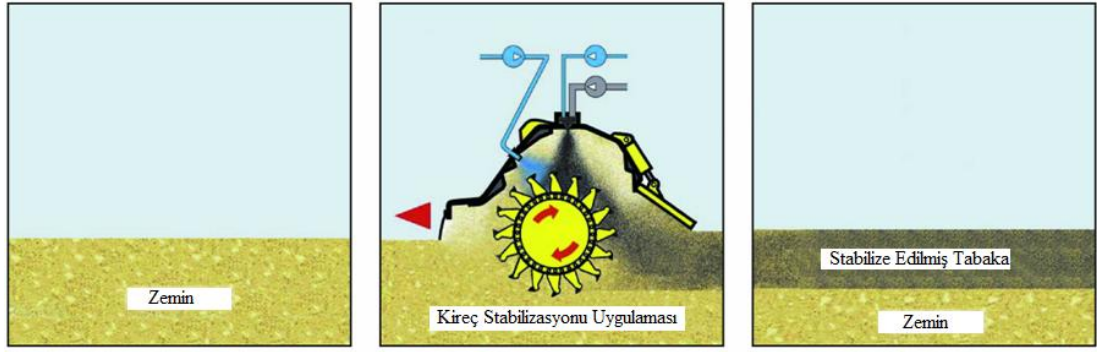
Şekil 4.10: Kireç serme makinası.

#### **4.2.3 Karışımın Optimum Rutubete Getirilmesi**

Toprak+Kireç karışımı homojen bir vaziyete getirildikten sonra karıştırma işlemine son verilir. Karışımın muhtelif yerlerinden rutubet numunesi alınarak rutubet yüzdesi tespit edilir. Karışım optimum rutubetin üstünde rutubet ihtiva ediyorsa mikser veya greyder vasıtası ile karışım havalandırmak suretiyle optimum rutubete getirilir. Şayet karışım optimum rutubetin altında ise karışımı ince tabakalar halinde sermek ve yavaş yavaş su vermek suretiyle optimum rutubete getirilir. Killi zemin ile kirecin homojen karıştırılabilmesi ve pulverizasyon için karıştırıcı-parçalayıcı araçlardan faydalanılır.



Şekil 4.11 Karıştırıcı Parçalayıcı.



Şekil 4 12 Kireç stabilizasyonu makinasının çalışma prensibi.



Şekil 4 13 Parçalama işini yapan tambur.

#### 4.2.4 Tesviye ve Sıkıştırma İşlemi

Kireç stabilizasyonunda tesviye işlemi (Reglaj) iki şekilde yapılır.

- a) Kaba reglaj
- b) İnce (Nihai) Reglaj

(a)Kaba Reglaj: Toprağa kireci karıştırma ve optimum rutubete getirme işlemleri bittikten sonra karışım yol üzerine tespit edilen genişlikte serilir. Bağdaşık bir kalınlık elde edilmesi için kaba reglaj işlemi yapılır.

Kaba reglaj bittikten sonra arzu edilen sıkışmış kalınlığın elde edilip edilmeyeceğini tespit için kısa mesafelerde karışımda ayna açmak suretiyle gevşek kalınlık tespiti yapılır. Arzu edilen sıkışmış kalınlık elde edileceğine kanaat getirildikten sonra sıkıştırma işlemi yapılır.



Şekil 4.14 Sıkıştırma işlemi ve zemine etkisi.

(b) İnce Reglaj : Toprak+Kireç karışımlarının nihai reglaj, toprağın durumuna ve makine imkânlarına göre değişir. Reglaj şekli ne olursa olsun ana kaide toprak+kireç karışımının arzu edilen rutubette ve arzu edilen yoğunlukta sıkıştırılmasıdır. Sıkıştırma için kullanılan muhtelif makine ve aletler mevcuttur. Toprak+Kireç stabilizasyonunda toprağın cinsine göre keçi ayağı, lastik veya demir tekerlekli silindirler. Az plastik granüler kumlu toprakların sıkıştırılmasında lastik ve demir tekerlekli silindirler kullanılır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Yolun sıkılaştırılması ve diğer çalışmalar.

#### ***4.2.5 Kireç İlavesi İle Toprakların Modifikasyonu***

Düşük vasıflı taban topraklarının veya plastisite indeksi yüksek olan granüler toprakların modifikasyonunda kireç başarıyla kullanılabilir. Kireçle toprağın modifikasyonunda taban toprağı veya granüler karışımda herhangi bir stabilite değeri istenmemekte ve aynı zamanda donma-çözülme, ıslatma-kurutma gibi etkilere karşı deneyler ve bu deneylerden elde edilen zayıf yüzde miktarları alınmamaktadır. Kireçli toprakların modifikasyonunda daha fazla fiziki vasıflarında meydana gelen değişiklikler göz önünde tutularak değerlendirilmeler yapılmaktadır. Modifikasyon maksadı ile topraklara ilave edilecek kireç, toprağın plastisite indeksini düşürmekte ve toprağı kolay işlenebilir bir hale getirmektedir. Yüksek plastisiteli toprakların işlenebilir hale getirilmesi için çok az miktarda kireç yeterli gelmektedir.

Toprak+Kireç karışımlarında meydana gelen sathi çatlama ve aşğıdaki sebeplerden ileri gelmektedir.

- Kireçle stabilizasyona tabi tutulan yolun zeminde meydana gelen hacim değışmelerinden,
- Toprak + Kireç karışımlarının arzu edilenden daha fazla sıkıştırılmasından,
- Kür işleminin gerektiğı şekilde yapılamamasından,
- Tatbik edilen kireç miktarı, kireç çeşidi ve stabilizasyona tabi tutulan toprağın fiziki yapısından,
- Kireç stabilizasyonuna tabi tutulan yoldan kür devam ederken ağır trafiğın seyretmesinden,
- Kür zamanında hava rutubetinin yokluğu ve kür işleminin sıcak havalarda yapılmasından çatlama ve gevşemeler olmaktadır.

#### 4.2.6 Toprak + Kireç Karışımlarının Kalite Kontrolüne Ait Deney Usulleri

Kireç stabilizasyonu uygulamasında kullanılacak malzemeye yapılacak deneyler, Karayolu Teknik Şartnamesinde belirtilmiştir.

##### 4.2.6.1. Yolun İrtifa ve Eğime Göre Kontrolü

Yol inşaatına başlamadan evvel, mevcut plan ve kesitlerine göre kotunda olup olmadığı nivelman yapmak suretiyle kontrol edilir. Yol kotunda değilse, yol kotuna getirilir veya fazlalık mevcut ise bertaraf edilir. Diğer taraftan da muayyen mesafelerde kazıklar çakılarak stabilizasyona tabi tutulacak yolun sathı kesin olarak tespit edilir. Yol sathı greyder vasıtası ile tesviye edilir. Bu esnada satıhta mevcut gevşek toprak, bitki kalıntıları bertaraf edilir. Tesviye işlemi bittikten sonra, sıkıştırma işlemine başlanır. Şayet taban toprağı önceden sıkıştırılmış ise sıkıştırma yüzdesinin arzu edilen limitte olup olmadığı arazi sıkışma deneyi yapmak suretiyle kontrol edilir. Sıkışma tam değilse, arzu edilen sıkışma elde edilinceye kadar yeniden sıkıştırma işlemi yapılmalıdır.

##### 4.2.6.2 Optimum Kireç Miktarının Hesaplanması

Serilmesi gereken kireç miktarının hesabı aşağıdaki örnekte gösterilmiştir.

- ✓ Yolun uzunluğu: 200 metre
- ✓ Yol genişliği: 10 metre
- ✓ Stabilizasyona tabi tutulacak
- ✓ kalınlık : 0.15 metre
- ✓ Stabilizasyonu yapılan toprağın
- ✓ kuru-kaba yoğunluğu : 84.4 Lb /Ft' (1.36 ton/m<sup>3</sup>)
- ✓ İlâve edilecek kireç yüzdesi = % 5
- ✓ Toprağın hacmi : 200x10x0.15 = 300 m<sup>3</sup>
- ✓ Toprağın kuru ağırlığı : 300x1.36 = 408 Ton
- ✓ Kireç ihtiyacı = (408x5)/100 = 20.4 ton kirece ihtiyaç vardır.



Bu kireç 200 m lik mesafede damperli kamyonlar ile bağdaşık bir şekilde takribi bir hesapla 5 tonluk kireç yüklü bir kamyon, 50 m. ye serilebilecek şekilde damper arkasındaki zincir ayarlanmalıdır. Şayet projede torba kireci kullanılıyorsa ve kirecin torbasının net ağırlığının 30 Kg. olduğunu kabul edersek:

$20.4 \times 30 = 612$  torba kirece ihtiyaç vardır.

Metrekareye düşen torba sayısı ise  $612/200 = 3.06$  torba yani metrekareye 3 torba kireç serilmesi gerekmektedir.

Kireç serme işlemine başlamadan evvel stabilizasyon işlemi yapılacak toprak yolun tespit edilen genişliğinde serilmeli ve uniform bir kalınlık elde edilmesi için dikkatli bir şekilde tesfiye işlemi yapılmalıdır. Bundan sonra, şayet kireç torbalar halinde ise metrekareye düşen kireç yolun kenarına eşit mesafelerde konur ve torbalar yol genişliğinde eşit aralıklarla dizilir. Bu torbalar boşaltılır, tırmık veya benzeri aletlerle uygun bir şekilde serilir. Bundan başka özel kireç serme makineleri ile de serme yapılabilir.



Şekil 4 16 Kireç serme kamyonu.

#### ***4.2.7 Karıştırma ve Rutubet Kontrolü***

Kireç serme işlemi bittikten sonra, stabilizasyonda kullanılan kireç sönmemiş kireç ise, arasözler vasıtası ile bol miktarda su ile kirecin söndürme işi yapılmalıdır.

Kirecin tam sönmesini temin için arasözle sulama işlemi yapılmalıdır. Bu işleme kirecin tam söndüğüne kanaat getirilinceye kadar devam edilir.

Diğer taraftan toprak+kireç karışımına rutubetlendirme işlemi de aynı zamanda yapılır. Optimum rutubetin üstündeki toprak+kireç karışımında ilk karıştırma işlemi yapılır ve yol kenarına figüre edilmek suretiyle bir gece rutubetli kür işlemine tabi tutulur. Bu kur esnasında toprakta meydana gelecek kimyasal reaksiyonların ilki, kil topraklarında kirecin etkisiyle yumuşama (killi toprağın kolay dağılma) olmasıdır. İkinci günün sabahı figürenin serme ve karıştırma işi yapılır. Karıştırma esnasında karışımın muhtelif yerlerinden rutubet numuneleri alınır. Karışım optimum rutubetin üstünde ise karıştırma esnasında buharlaşmadan dolayı kısa bir müddet sonra karışım optimum rutubete gelecektir.

Şayet karışım optimum rutubetin altında ise karıştırma ve serme esnasında hafif rutubet vermek suretiyle karışımın optimum rutubete getirilmesine çalışılır. Bu durum rutubet numuneleri alınmak suretiyle kontrol edilir.

#### ***4.2.8 Karışımın İncelik (pulverizasyon) Kontrolü***

Kireç stabilizasyonuna tabi tutulacak killi malzemenin, pulverizasyonu önemlidir. Çünkü, kirecin etkisi ince kil partikülleri üzerinde olduğuna göre, pulverizasyon işlemi ne kadar iyi yapılırsa, kirecin etkisi o nispette fazla olur. Diğer taraftan da esasen kireç, killi toprakların yumuşamasını ve bundan dolayı da kolay pulverizasyonunu sağlar.

#### ***4.2.9 Karışımın Uniform Olup Olmadığının Kontrolü***

Stabilizasyonda kirecin iyi bir şekilde karıştırılması e faktörlerden biridir. Toprak+kireç karışımının arzu edilen şekilde karışıp karıştırılmadığının kontrolü için, karışım gevşek kalınlıkta ise, muhtelif yerlerde çukurlar açarak tabakalaşma ve kümeleşmenin mevcut olup olmadığı kontrol edilir. Bu açılan çukurlarda aynı zamanda karışımın gevşek kalınlığı ölçülür. Tespit edilen gevşek kalınlığın arzu

edilen sıkışmış kalınlığa tekabül edip etmeyeceğine de bakılır. Karışım uniform bir renk almışsa kireç toprakla bağdaşık bir şekilde karışmış demektir.

#### ***4.2.10 Sıkışma ve Sıkışmış Kalınlık Kontrolü***

Uygulama yapılan alanda sıkışma ve sıkışmış kalınlık kontrolü, kum konisi veya nükleer metot ile yapılır.

#### ***4.2.11 Kireç Stabilizasyonuna Tesir Eden Faktörler***

Toprak + Kireç karışımında mukavemetin yükselmesi, kireç ile toprak mineralleri arasında meydana gelen çimentolaşmadan ileri gelmektedir. Aşağıda detaylı bilgi verilmiştir.

##### ***4.2.11.1 Toprak Çeşidi***

Kireç stabilizasyonunda, kirecin etkisi killi toprakların çeşidine göre değişmektedir. Bu da killi toprağın mineral yapısından ileri gelmektedir. Montmorillonitik killer tabii pozzolan olduğundan kireçle reaksiyona girerek çimentolaşma meydana getirdiğinden bu gibi topraklarda kireç stabilizasyonu etkili olmaktadır. Mineralojik yapısı bakımından pozzolan olmayan topraklarda ise pozzolanik reaksiyon meydana gelmediğinden arzu edilen sertleşme olmamaktadır. Bu gibi toprakların kireçle stabilizasyonunda suni veya tabii pozzolanlar ilave edilmesi gerekmektedir.

Killi toprakların plastisite indeksi, kil partiküllerinin üzerinde mevcut su tabakası kalınlığının fonksiyonudur. Kil, su ve kireç arasında kısmi iyonlaşma meydana gelir. Neticede de toprak içerisinde Ca iyon konsantrasyonu artar. Konsantrasyonun artmasıyla, killi taneler üzerinde mevcut su filmi tabakaların da difüzyon meydana gelir ve kil partikülü üzerindeki su filmi tabakasındaki kalınlıkta eksilme meydana gelir. Neticede de Ca konsantrasyonu düşer. Su film tabakası kalınlığının eksilmesi toprağın plastisite indeksinin düşmesine sebep olur. Bu bakımdan killi topraklara kireç ilave edildiğinde, plastisite indeksinde düşüş meydana gelmektedir. Siltli topraklarda ise su filmi tabakası kalın olmadığından siltin plastisitesindeki düşüş az

olmaktadır. Plastik olmayan topraklara kireç ilave edildiğinde, plastisite indekslerinde hafif yükselme meydana geldiği gözlenmiştir.

#### *4.2.11.2 Pulverizasyon ve Karıştırmanın Etkisi*

Toprağa kireç ilave edilir edilmez, toprakların plastisitesi diyagramında kil sahasından silt sahasına doğru kaydığı görülmektedir. Kireç ilâvesinden evvel plastik olan bir toprak kireç ilave edilince plastikliğini kaybeder, böylece toprağın taşıma gücü artar, çabuk kırılabilir, kuru ve az koheziv bir duruma geçer. Çok killi toprakların pülverizasyon işlemi zor olmaktadır. Bu topraklara kireç ilavesi toprağı kolay dağıtılabilir hale getirmekte ve pülverizasyon işlemi kolay ve çabuk olmaktadır.

#### *4.2.11.3 Toprağın İçindeki Organik Madde Miktarının Etkisi*

Pozzolanik reaksiyonun meydana gelmesinde, organik maddeler zararlı etki yaparlar. Toprağa kireç ilâvesi ile meydana gelen kalsiyum katyonları organik madde tarafından absorbe edilir. Çünkü organik madde ile kalsiyum arasındaki reaksiyon hızı pozzolandakinden daha fazladır.

#### *4.2.11.4 Sıcaklık Etkisi*

Kireç stabilizasyonunda ısı artması ile mukavemette de artış meydana gelmektedir. Kireç stabilizasyonunda kür esnasında ısının artmasından dolayı mukavemet artışının, topraktaki kil ile kireç arasındaki reaksiyon sonucu olduğu gözükmektedir. Toprak + kireç karışımlarının mukavemet kazanma oranı sıkıştırılan karışımın kür edildiği ısı ile doğrudan doğruya ilgilidir.

#### *4.2.11.5 Karbondioksitin Etkisi*

Kirecin karbonatlaşması ile pozzolanik reaksiyonun meydana gelmesi azalmaktadır ve boşaltıcı olarak tesir etmektedir.

#### *4.2.11.6 Sıkıştırma ve Sıkıştırma Süresinin Etkisi*

Toprak+kireç karışımı üzerinde inşa edilen alt temel ve temel tabakasının taşıyacağını dikkate alarak taban toprağının arzu edilen limitler dahilinde

sıkıştırılması zaruridir. Kâfi derecede sıkıştırılmamış toprak+kireç karışımlarında oturmaların meydana geleceği tabidir.

### **4.3. Kireç Stabilizasyonu Uygulaması Öncesi ve Sahada Yapılan Deneyler**

Aşağıda kireç stabilizasyonu uygulamalarında kullanılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. Bu çalışmada Yıkamalı elek analizi, likid limit, plastik limit, proktor, CBR, kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

#### **4.3.1 Su Muhtevasının Ölçümü**

Bu deney ile zeminin doğal su muhtevası öğrenilir. Elde edilen değer, zeminde kullanılacak malzemenin bu orandaki su muhtevasında davranışı hakkında bize fikir verir.

#### **4.3.2 Yıkamalı Elek Analizi**

Zeminde kullanılacak malzemenin tane dağılımı öğrenilir. Bu sayede zeminin özellikleri, sıkışma verimliliği, zemin çeşidi hakkında fikir edinmemizi sağlar.



Şekil 4 17 Yıkamalı elek analizi.

#### **4.3.3 Aterberg Limitleri**

Zemin cinsi ve zemin davranışı hakkında fikir verir.

#### 4.3.3.1 Likid Limit Deneyi

Malzemenin plastik durumdan, akıcı duruma geçtiği andaki su muhtevasını öğrenmek için yapılan deneydir.



Şekil 4 18 Cassagrande Aleti

#### 4.3.4.1 Plastik Limit

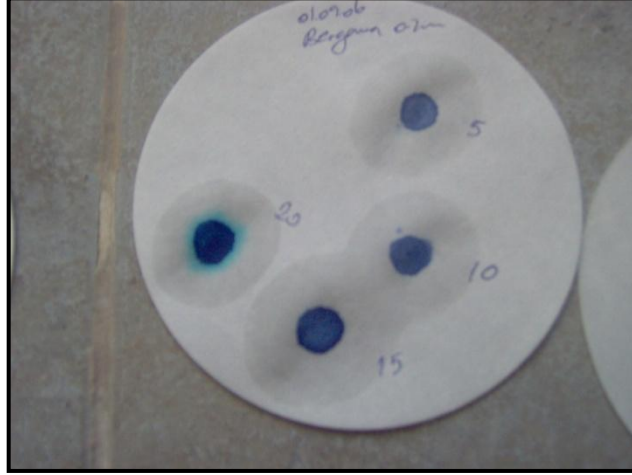
Kurumakta olan bir zeminin plastik limit deneyi ile ölçülen, plastik özelliğini yitirerek, yarı katı hale dönüştüğü andaki su muhtevasına denir.



Şekil 4 19 Plastik limit

#### 4.3.5 Metilen Mavisi Deneyi

Metilen mavi deneyi ile malzeme içerisindeki kilin yüzey alanı hakkında bize bilgi verir.



Şekil 4 20 Metilen mavisi

#### 4.3.6 Ph Metodu

Zeminin kireç ile iyileştirilebilmesi için gerekli optimum kireç miktarı belirlenir.

#### 4.3.7 Proktor

Malzemenin yoğunluğu ve optimum su miktarı belirlenir.



Şekil 4 21 Proktor deneyi

#### **4.3.8 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)**

Deney kesit alanı  $19.35 \text{ cm}^2$ ,den silindirel pistonun belirlenmiş bir hızla zemine itilmesiyle bulunan yük penetrasyon bağıntısını kullanarak taşıma oranının bulunması ile ilgilidir.

#### **4.3.9 Kum Konisi**

Proktor deneyi ile optimum su muhtevası belirlendikten sonra sahada uygulama yapılır. Optimum su muhtevası ile maksimum sıkışma sağlanmaktadır. Sahada yapılan uygulamada proktor gibi sıkıştırma işlemidir. Kum konisi ile sıkışma miktarı ve nem miktarına bakılır.





Şekil 4 22 Kum konisi

#### ***4.3.10 Plaka Yükleme Deneyi***

Plaka Yükleme Deneyi (Plate Loading Test) zeminin arazideki taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan bir deneştir.

Bu testin uygulama amacı, zeminin iyileştirmeden önceki ve sonraki taşıma kapasitesinin ölçülmesi ve bu dayanımların mevcut makine altında nasıl bir dayanım sağlayacağını öngörülmesidir.



Şekil 4 23Plaka yükleme deneyi.

#### ***4.3.11 Organik Madde Tayini***

Zemindeki organik madde miktarı ne kadar fazla ise yol inşaatında kullanılma şansı o kadar az olmaktadır.



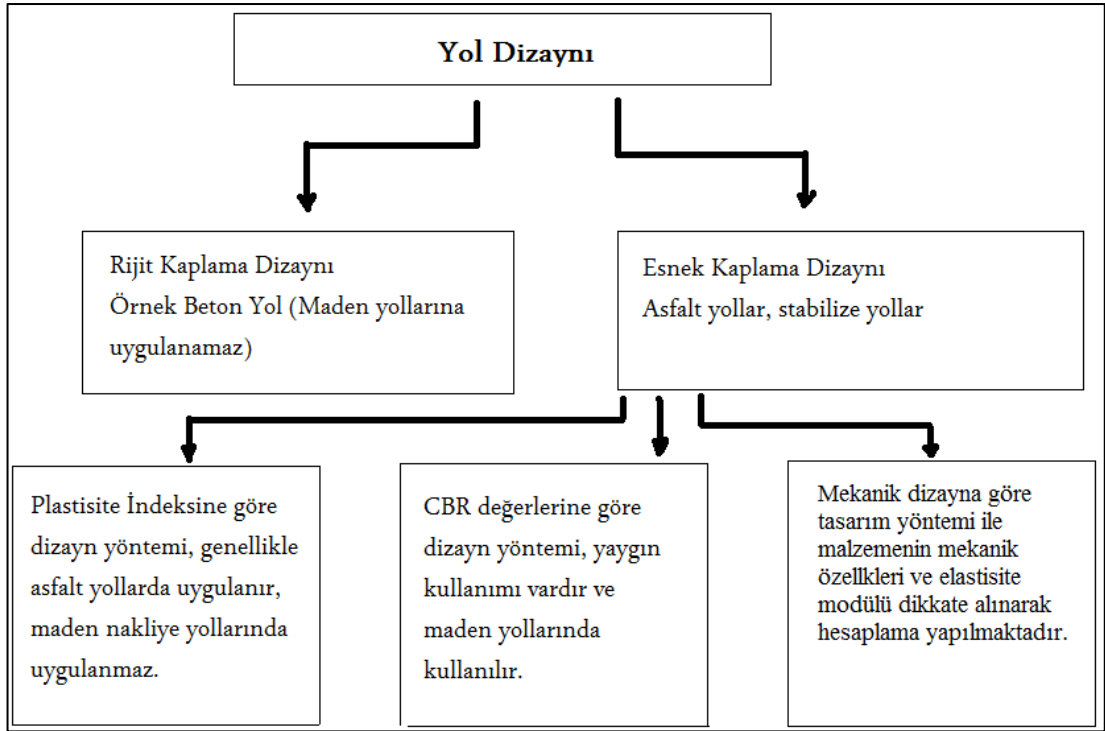
Şekil 4 24 Organik madde tayini cetveli.

**BÖLÜM BEŞ**  
**MADEN NAKLİYE YOLU TASARIMI ve SONLU ELEMANLAR**  
**GERİLME ANALİZİ**

Yol dizaynı için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler her tabaka için kullanılacak malzemenin özelliğine göre (plastisite indeksi, CBR, esneklik modülü...) yaklaşık kalınlığı hesaplamaktadır.

Plastisite indeksine göre dizayn yapan yöntem ticari yollar için esnek kaplama yolları ile sınırlıdır. Yol dizaynında popüler yöntem dizayn kriteri olarak kullanılacak malzemenin CBR değerine göre hesaplanan tabaka kalınlıklarıdır. Bu yöntem 1928-1929 yılları arasında ticari yollar ile sınırlandırılarak kullanılmaya başlanmış fakat 1949 yılından sonra hava alanları dahil bir çok yolda kullanım alanı bulmuştur.

Nakliye yolu dizaynı için yapılan son çalışmalarda mekanik dizayn yöntemi popüler olmaya başlamıştır. Bu durumda yol tabakaları gerilmeler ve her tabaka için esneklik modülü temel alınarak dizaynı yapılmaktadır. Kritik gerilme limiti her tabaka için hesaplanır. Bu çalışmada CBR yöntemi ve mekanik dizayna göre hesaplamalar ayrı ayrı yapılmıştır.



Şekil 5. 1: Yol tasarım çeşitleri.

### 5.1 CBR Temel Alınarak Nakliye Yolu Dizaynı

CBR yöntemi gerekli tabaka kalınlığının hesaplandığı ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde yolda kullanılacak karakteristik malzemenin taşıma kapasitesinin standart kırılmış kayanın taşıma kapasitesine yüzdesel olarak oranı CBR değerini vermektedir. Deneysel eğri (CBR eğrisi), tabaka kalınlığı ve tekerlek yükü ile ilişkilidir. CBR değerinin ilk kullanımı yerindeki malzemenin tabaka kalınlığının hesaplanması California Karayolu bölümü tarafından 1928-1929 yıllarında yayınlanmıştır. CBR standart deneyleri 1930 yılında California Karayolu malzeme araştırma bölümü tarafından yapılmıştır. 1949 yılında hava alanı dizaynı için de kullanılmaya başlamıştır.

CBR değeri, yüzdesel olarak tanımlanması toprağın standart ölçülerdeki CBR kabına sabit yük, belirli vuruş sayısı ve tabaka kalınlıklarında sıkıştırılması ve

sonrasında sabit yük altında meydana gelen deformasyonunun standart kırılmış kayanın aynı koşullarda meydana gelen deformasyonunun oranlanmasına denir.

Dizayn grafiği, ilgili kaplamaya göre tekerlek yükü ve CBR değerine göre temel ve alt temel kalınlıkları için geliştirilmiştir.

Tabaka kalınlıkları hazırlanmış tablodan kabaca hesaplanabildiği gibi günümüzde programlarla da hesaplanmaktadır.

## 5.2 CBR Yöntemine Göre Nakliye Yolu Tasarımı

Tipik CBR grafiği Şekil 5.3'teki gibidir. Bu grafik yardımıyla deneylerle hesaplanacak CBR değerlerine göre veya tablonun altında verilen tipik malzemeler için yaklaşık CBR değerleri kullanılarak zemine etkiyecek tekerlek yükü eğrisinden faydalanılarak gerekli tabaka kalınlıkları hesapları yapılabilmektedir. Tablonun altında bulunan tipik malzemeler için yaklaşık taşıma kapasitesi değerleri baz alınarak yapılacak tabaka kalınlıkları hesaplamaları sadece kaba tasarımlarda kullanılmalıdır. Final tasarımları yapılırken zeminde kullanılacak malzemelere yapılacak CBR değerlerine göre hesaplamalar yapılmalıdır.

Üstyapı tasarımı için güzergâhta kullanılacak zemin çeşitlerinin yaş CBR değerlerinin ve zemine etkiyecek maksimum gerilmenin hesaplanması gerekmektedir. Lastik temas alanı, lastiğe etkiyecek maksimum yük ve zemine etkiyecek maksimum gerilmenin hesaplanması Bölüm Üç'te verilmiştir. Ancak bu bilgiler üretici firmalardan da elde edilebilir.

Şekil 5.3'ün kullanımı ile ilgili örnek hesaplama aşağıda verilmiştir.

Örnek olarak;

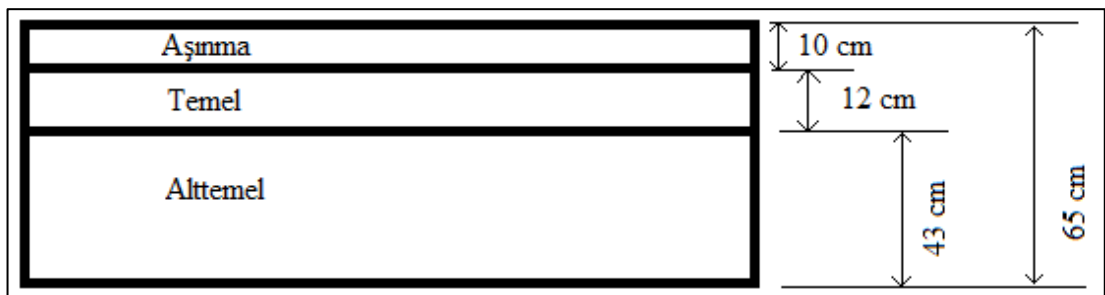
1. Nakliye güzergahındaki doğal zeminin CBR değeri %3 ve yolun taşınması gereken tekerlek yükü 9 ton olsun. Tablonun üstündeki CBR %3 değerinden aşağıya doğru dik inilerek 9 ton tekerlek yükü eğrisi kesiştirilir. Kesişim noktasından sola

doğru yere paralel gidilerek nakliye yolunun s¼rekli kullanılabilmesi için gerekli tasarım kalınlığı bulunur. Şekil 5.3'ten 65 cm bulunur. Yani CBR değeri %3 olan zayıf bir malzemenin istenilen taşıma y¼klerini g¼zergah boyunca sorunsuz bir Şekilde karşılayabilmesi için gerekli toplam tabaka kalınlığı 65 cm'dir.

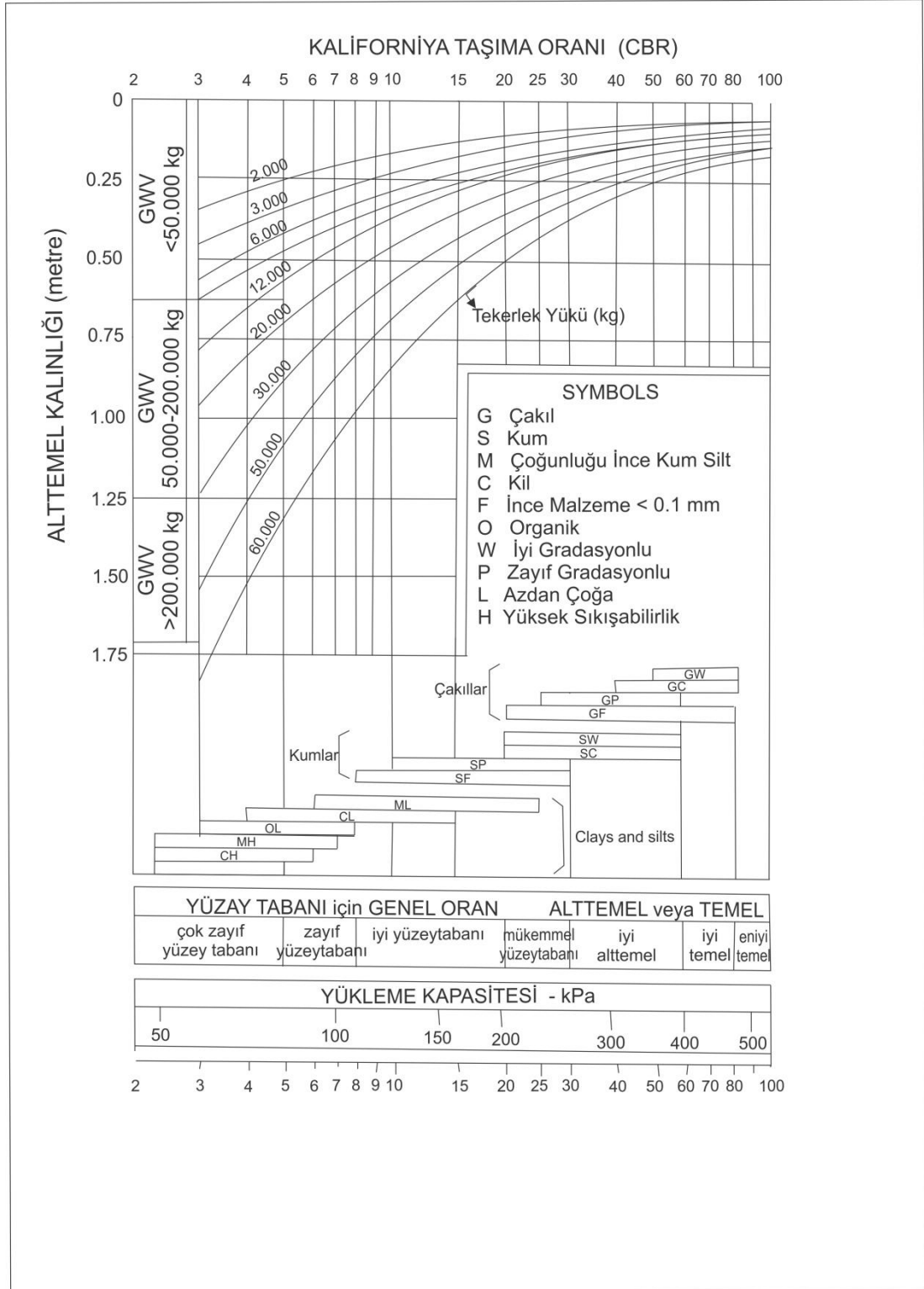
2. Doğal zemin ¼zerine dışarıdan tedarik edilerek serilmesi d¼ř¼n¼len malzemenin CBR değeri %15 olsun. Şekil 5.3'te CBR %15 değerinden aşağıya doğru inilir ve 9 ton tekerlek y¼k¼ eğrisi ile keşiştirilir. Keşişim noktasından yine sola doğru yere paralel gidilerek tabaka kalınlığı değeri okunur. Eğride 22 cm'ye denk gelmektedir. Bu değerin anlamı yol ¼st seviyesinden 22 cm aşağıya kadar bu malzemeden kullanılabilir anlamına gelmektedir.(rnek  $65-22=43$  cm).

3. Temel malzemesi CBR değeri %80 olsun. Şekil 5.3'ten CBR %80 değerinden aşağı dik inilirken 9 ton tekerlek y¼k¼ eğrisi ile keşiştirilir. Keşişim noktasından yine sola doğru yere paralel gidilerek tabaka kalınlığı değeri okunur. Eğride 10 cm'ye denk gelmektedir. CBR değeri %15 olan malzemeden 43 cm serilmesi gerekli olduğu bulunmuştu. CBR değeri %80 olan malzemeden de 12 cm ( $22-10=12$  cm) serilmesi gerektiği bulunmuştu.  $43 + 12 = 55$  cm tabaka kalınlığı elde edilmiş olur.

4. G¼zergahta kullanılacak zemin eşitlerinin CBR dayanımlarına göre toplamda 55 cm malzemenin serilmesi tespit edildi. Geriye kalan 10 cm tabaka da nihai kaplama tabakası (aşınma) olacaktır.



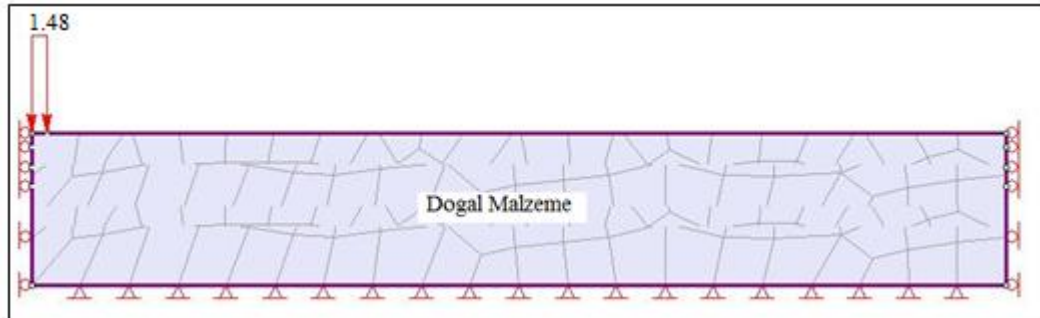
Şekil 5. 2 rnek yol kaplama tasarımı



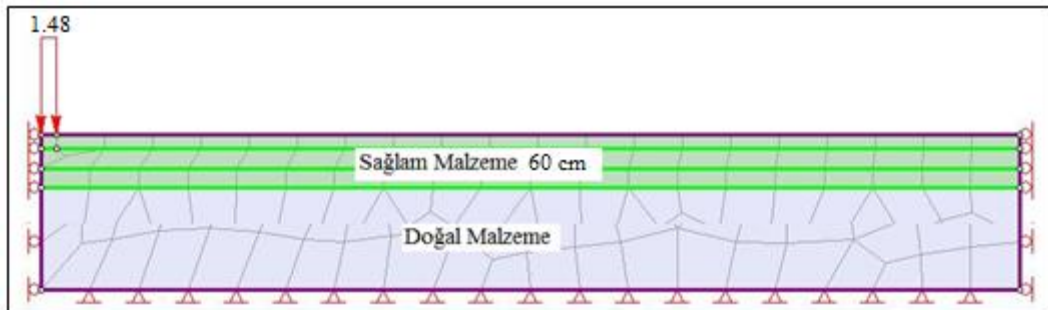
Şekil 5. 3 CBR dizayn yönteminin modifikasyonu (Atkinson, 1992).

Nakliye yolu zemininden alınan numunelere yapılan analizlerde doğal zeminin yaş CBR değeri % 3.92, doğal zeminin kireçle iyileştirilmesi ile elde edilen yaş CBR değeri %54.17, en üst tabakada kullanılması düşünülen dolgu malzemesinin yaş CBR değeri % 92 olarak bulunmuştur.

Bu değerlere göre Şekil 5.3'ten 11.3 ton maksimum tek tekerlek yükü için doğal malzeme üzerine konulması planlanan malzeme kalınlığı 60 cm olarak bulunur. Maden firması zayıf zemin üzerine isterse 60 cm kalınlığında sağlam stabilize malzeme serilebilir, ya da aynı malzemeyi kireç ile stabilize ederek CBR değerini % 54.17'ye çıkartıp 50 cm kalınlığa kadar kireç ile stabilize edip 10 cm'sini sağlam stabilize malzeme serilebilir. Yapılacak her iki dizayn da maden nakliye yolunda çalışacak kamyonların yolda deformasyona neden olmasını engelleyecektir.



Şekil 5. 4 Doğal malzeme.



Şekil 5. 5 Kireç stabilizasyonu ve sağlam malzeme ile zemin taşıma gücünün artırılması.

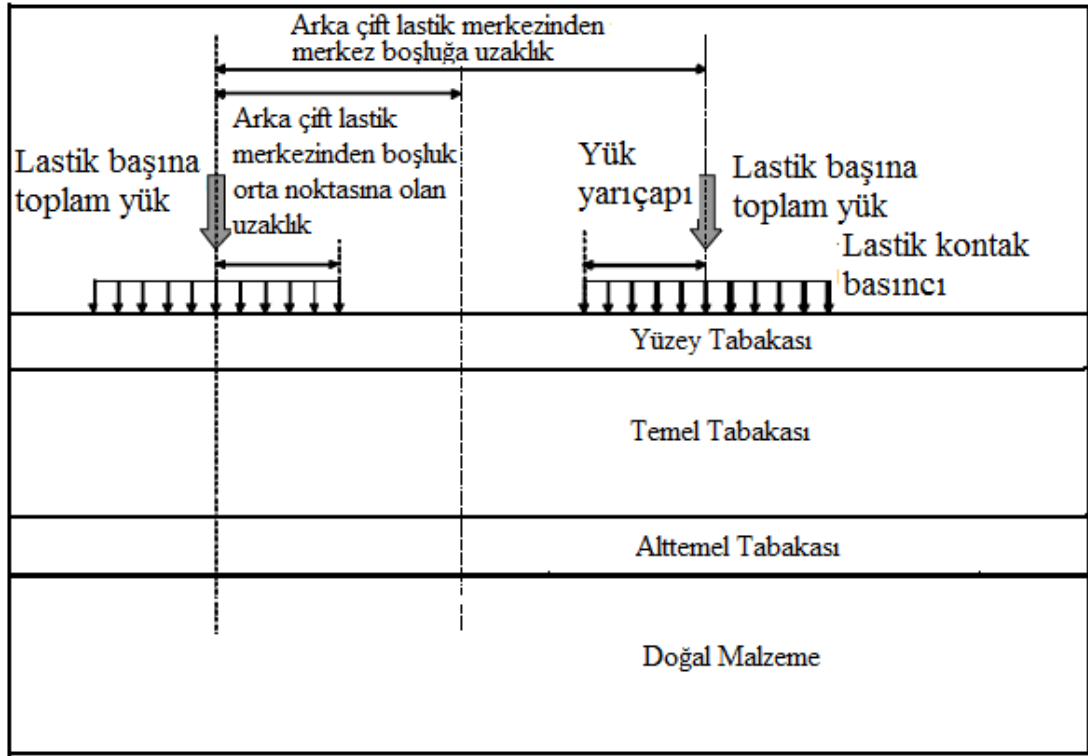


### 5.3 Mekanistik Dizayn Yaklaşımı

Mekanistik dizayn yaklaşımı nakliye yol tabaka kalınlığının hesaplanmasında kullanıldığı gibi yol üst tabakasına etkiyen gerilme değerine göre yol dizaynındaki her tabaka için oluşacak gerilmeleri, düşey deformasyon değerlerini verir ve yol malzemelerinin inşa edildikten sonra nasıl davranacağını tahmin etmemize yardımcı olur. Zemine etkiyen yük simule edilip, her tabakada meydana gelecek gerilme ve deformasyon ilgili dizayn kriterleri ile karşılaştırılabilir. Bu yaklaşım çok tabakalı elastik model birçok nakliye yol tabakalarının tasarımını göstermek için geliştirilmiştir ve hesaplamalarda MinCAD's CIRCLY, MePADS ve PHASE 2 gibi programlar kullanılmaktadır.

Düşey deformasyon ve gerilme değerlerinin hesaplanabilmesi için malzemenin elastisite modülü ve poison oranının bilinmesi gerekmektedir.

Hesaplamalar yapılırken istenilen kriterlere göre tek tekerlek yükü ya da arka akstaki çift tekerlek yükünün dağılımına göre programda veriler girilir.



Şekil 5. 6 Mekanistik yapısal dizaynın değerlendirilmesi için çok tabakalı model.

Zeminde oluşan deformasyonlar, her tabaka için belirlenen efektif elastik modülünün bir fonksiyonudur. Elastisite modülü deneylerle hesaplanabildiği gibi formülle de hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada CBR değerinden elastisite modülüne geçiş için formül 5.1 kullanılmıştır (R. Thompson, 2011).

$$E_{elf} = 17.63 \times CBR^{0.64} \quad (5.1)$$

Tablo 5. 1 Yol güzergâhında kullanılacak malzemelerin elastisite değerleri

Yol Tabakaları	CBR %	E (MPa)
Temel	3.92	42
Alttemel	54.17	226
Üstyapı tabanı	92	318

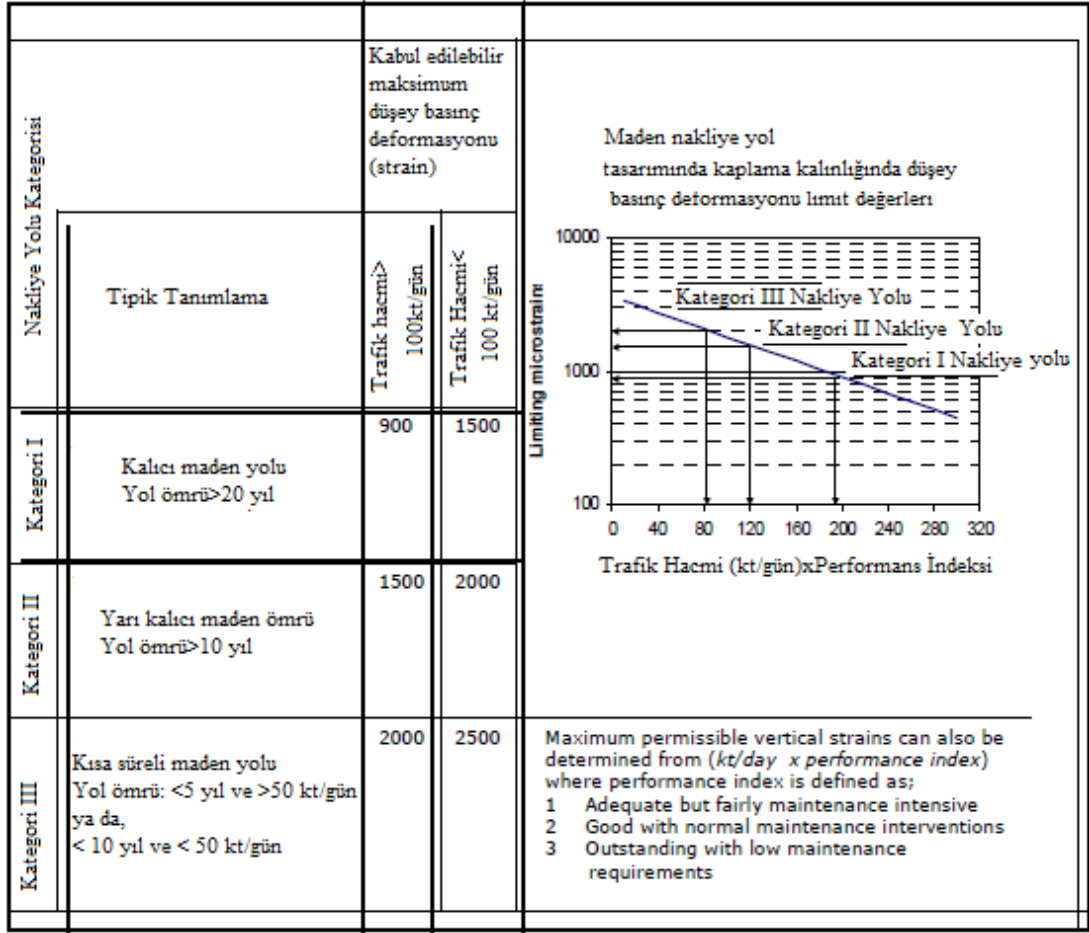
### ***5.3.1 Mekanistik Dizayn Kriterleri***

Genelde uygulanan yük, alt tabaka dayanıklılığı, yolun yapısal kalınlığı ve tabaka esneklik modülü, nakliye yolunun yapısal performansını kontrol eder. Maden yolunda zemine etkiyecek gerilmenin maksimum değeri 2000 mikro strain olarak kabul edilmektedir (Cameron R. ve Lewko R, 1999a). Yola etkiyecek daha yüksek gerilmeler kalıcı deformasyon oluşmasına sebep olur ve yol üzerindeki birçok tekrar deformasyonu tekerlek izi oluşumuna ve yol şeklinin kaybına neden olur. Bu benzer kriterler Morgan et al tarafından doğrulanmıştır.

Otoyollardaki düşey gerilmeler 1000-1500 microstarin ile sınırlıdır. Ama nakliye yol yapımlarında daha yüksek limitler uygulanabilir çünkü,

- Yol tekrarları otobanlardan daha azdır.
- Yol ömrü daha kısadır.

Şekil 5.7'deki veriler limitli gerilim değerlerini seçmekte, inşa edilen yolun kategorisine göre, yol ömrüne, trafik yoğunluğu ve performans indeksine göre yardımcı olarak kullanılabilir. Bununla birlikte yüksek orandaki zararları önlemek için üst tabakadaki deformasyon 3-6 mm ile sınırlandırılmalı ve daha yüksek olmamalıdır. Otoyolun aksine defleksiyon değerleri yol tabakasının sertliğinin ölçümünde tek başına kullanılamaz çünkü birçok defleksiyon alt tabakada oluşur (Thompson R, 2011).



Şekil 5. 7 Maden nakliye yol sınıflandırması ve mekanik dizayn deformasyon kriterleri

#### 5.4 Nakliye Yolu Kesitinde Phase2 Programı ile Mekaniksel Yaklaşım

Herhangi bir nakliye yolu dizaynında kamyon lastiğinden nakliye yol kesitine etkileyen yük ve gerilme dağılımının anlaşılması zorunludur. Teorik olarak toprağın taşıma kapasitesiyle ilgili gerilme analizi, birçok nakliye yolunda belirleyici faktör olan düşey gerilimi göstermek için yapılmaktadır. Taşıma kapasitesini göstermek için yapılmaz. Düşey deformasyon dağılımı bu tezde "Phase2" yazılımı ile analiz edilmiştir. Deformasyon ve değişimleri göstermek için 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamalar yapılmıştır. Nakliye yolu tasarımında kullanılan her tabakanın kalınlığı ve her tabakada kullanılacak zemin cinsleri için düşey gerilme analizleri modellenmiştir. Nakliye yol kesitinin herhangi bir noktasındaki gerilme

oradaki malzemenin dayanımından daha düşükse ve düşey deformasyon değeri kritik deformasyon limitinden (genelde 2000-2500 microstrain arasında kabul edilir) daha düşükse nakliye yol kesitinin yeterli olduğu anlaşılır.

### **5.5 Phase2 Programı ile Taşıma Kapasitesi Analizi**

Phase2 programı, geniş aralıklarda maden ve inşaat mühendisliği problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. Bu program elastik analizler için kullanılmakla beraber aynı zamanda plastisiteyi de desteklemektedir. Bu yazılım öncelikli olarak yer altı problemleri için dizayn edilmiş olsa da aynı zamanda iki boyutlu yakın yüzey problemlerini (tekerlek yükü gibi çekme ya da yüzey yüklerini içerir) çözmek için de kullanılmaktadır.

Dairesel yüklemeye izin veriyorsa Axisymmetric seçeneği seçilir. Aynı zamanda şerit yükünü yüzey gerilme seçeneğine simüle eder. Tekerleğin yol yüzeyinde dairesel gerilme dağılımı, şerit yükünden daha iyi yaklaşımdır.

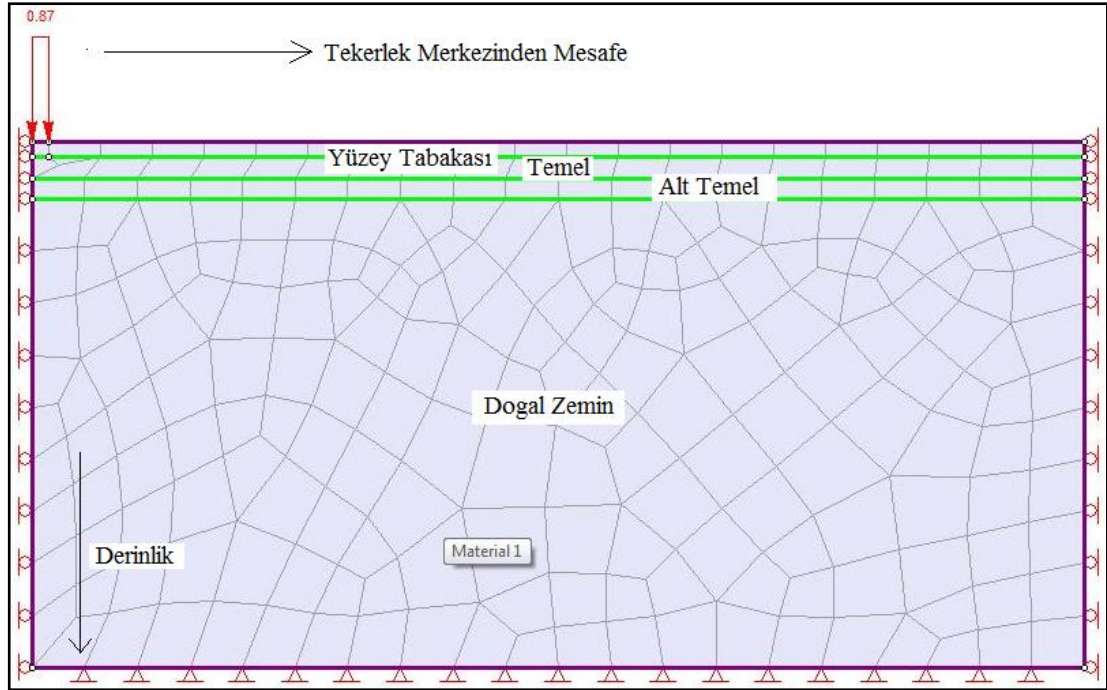
Modelde genellikle kullanılan varsayımlar;

- Kullanılan Model tipi: Axisymmetric
- Yarı modelin boyutu: genişlik=10 metre, derinlik=5 metre, w tekerlek izinin genişliğidir.
- Materyal tipi: İzotropik ve elastik,
- Mesh tipi: Graded
- Madde Tipi: 4 noded quadrilaterals
- Element sayısı:1600
- Nod sayısı: 1700
- Yükleme: 1.45 MPa dairesel alan üzerine (çap w)
- Initial Element Loading: Field stress & body field only

- Failure Criterion: Mohr Coulomb
- Material Type: Plastic

Gerilim uygulaması boyunca (1.45 MPa) basınçlar ya da gerilmeler model tarafından hesaplandığı gibi yoldaki lastikten meydana gelen gerilmelerin (genellikle lastik basıncı alınır) ölçülendirilmesi de yapılabilir. Ayrıca model boyutları gerçek lastik boyutlarıyla ölçülendirilir.

Şekil 5.8 tipik axisymmetric modelin alt bölümlerde düşey gerilme çizimlerini hazırlamak için kullanımını göstermektedir. Yönün eksenini  $x=0$ 'dır ( $x$  ve  $y$  sırasıyla yatay ve düşey eksenlerdir). Tekerlek yükü  $(0,0)$  ile  $(0,0.156)$  noktaları arasında uygulanmıştır. Modelin sınırı ( $y=0$ 'da) nakliye yol yüzeyini tanımlar ve böylece bu serbest sınırdır. Modelin düşey sınırı  $x$  yönünde ( $x=0$  ve  $x=10$ 'da) sınırlandırılır. Böylece sınırdaki materyalin dikey ( $y$ ) yönünde hareketine izin veriliyor. Modelin  $y$  yönündeki en düşük sınırı  $y=-5$  ile sınırlandırılmıştır. Sağ ve en düşük sınır tekerlekten makul uzaklıkta seçilmiştir ve böylece sınır koşulları tekerleğin altındaki gerilme ve basınçtan etkilenmez. Üst tabaka ( $y=0$  ve  $y=-0,15$  arasında) yüzey kaplamasını tanımlar. Temel tabakası  $y=-0,15$  ve  $y=-0.35$  arasındayken, alt temel tabakası  $y=-0,53$  ve  $y=-0.55$  arasındadır. Tabaka  $y=-0.55$  üst yapı tabanı ya da yerindeki malzemeyi tanımlar. Axisymmetric model sadece bir dairesel yüklemeye izin verir.



Şekil 5.8 B durumu çalışması için asimetrik model.

## 5.6 Düşey Gerilmede Tabaka Sertliğinin Etkileri

Axisymmetric Phase2 modeli tabakaların arasındaki düzenli sertlik, sert yüzey kaplaması, sert temel kaplaması, ve sert alt temel tabakası içeren, materyallerin farklı kombinasyonları için alttaki dairesel yüklerin düşey gerilme analizlerini hesaplar. Analizler için çeşitli tabakaların kalınlıkları,

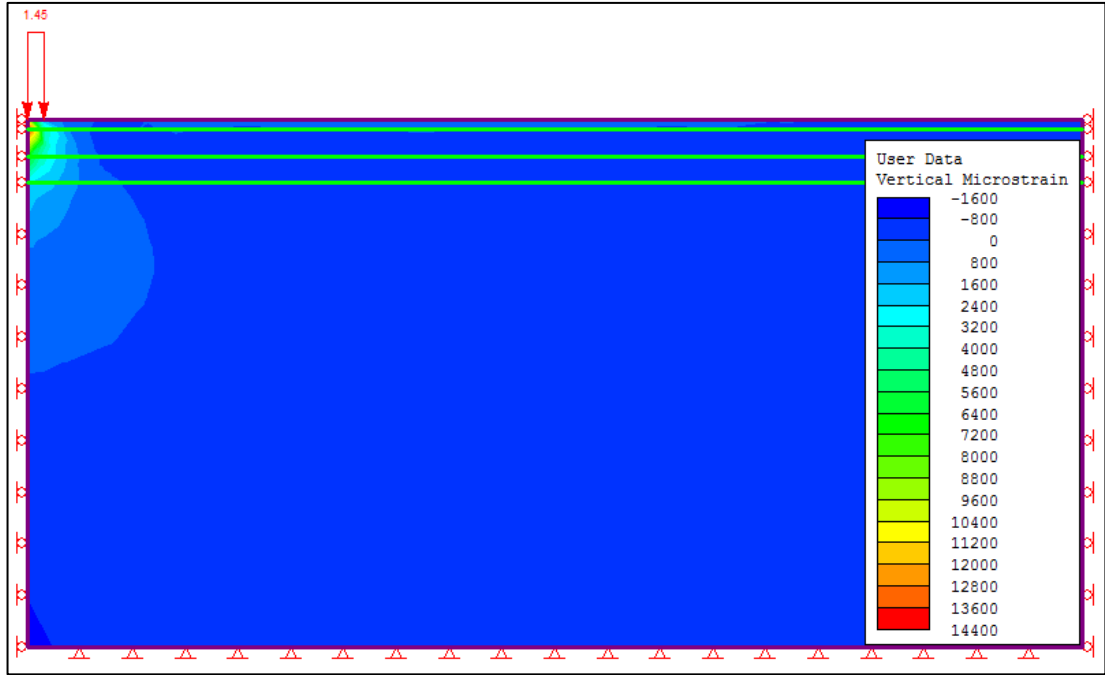
- Yüzey kaplaması=0,10 m
- Temel Kaplaması=0,25 m
- Alt Temel=0,25 m

Tablo 5.2 farklı durum çalışmaları için çeşitli tabakaların Young Modülünü gösteriyor. Maksimum Young Modülü için kullanılacak materyalin çok iyi sıkışabilir olması gerekmektedir.

Tablo 5.2 Yol dizaynında kullanılacak malzemelerin zemin özellikleri.

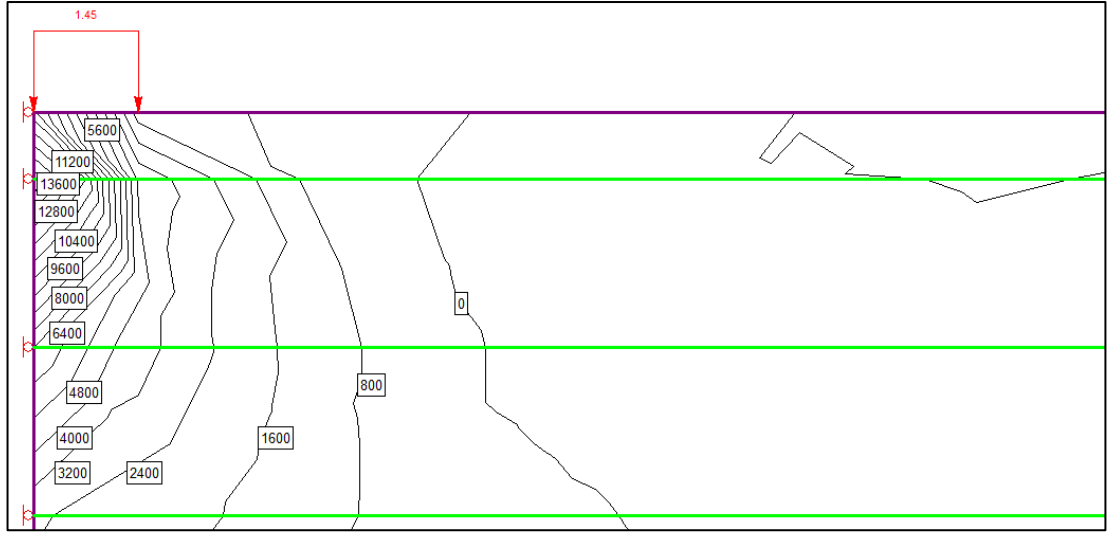
	Poisson Oranı	Elastisite Modülü Mpa	Sürtünme Açısı Derece	Kohezyon Mpa
<b>Doğal Malzeme</b>	0.4	50	35	0
<b>Kireç Stabilizasyonu Uygulanmış Doğal Malzeme</b>	0.4	320	43	2.5
<b>Sağlam Stabilize Malzeme</b>	0.4	350	45	0

**5.7 Doğal malzeme, Kireçle iyileştirilmiş malzeme ve sağlam malzemenin yol dizaynında kullanılması durumunda tek tekerleğin yol tabakasında toplam yer değiştirme etkileri**

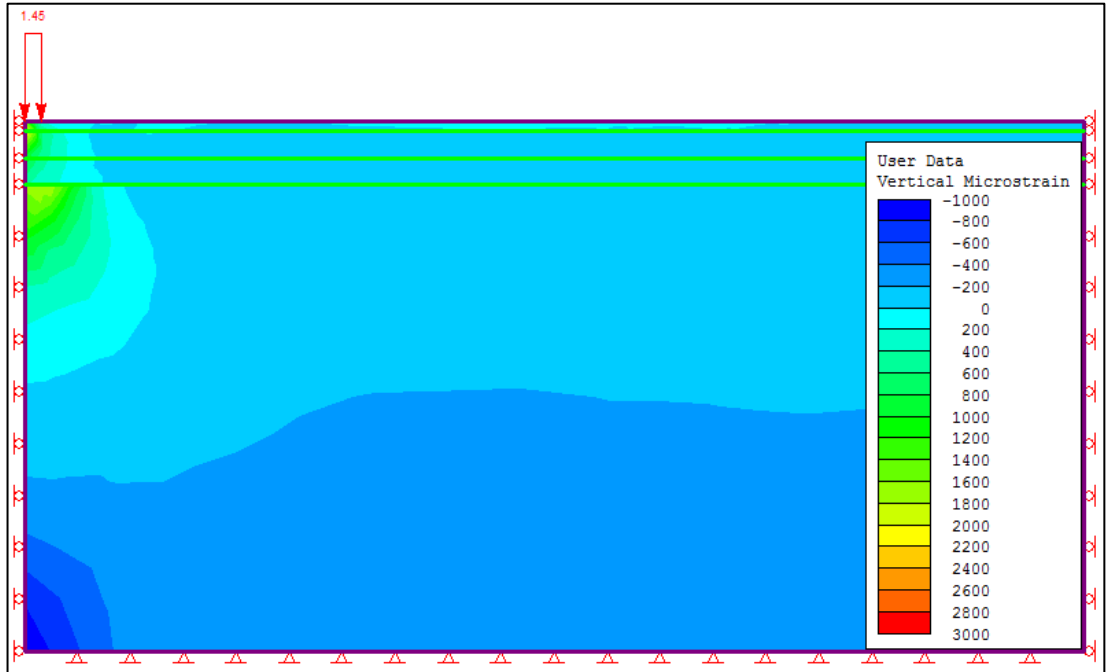


Şekil 5.9 Doğal malzemede zemin içi düşey deformasyon dağılımı.

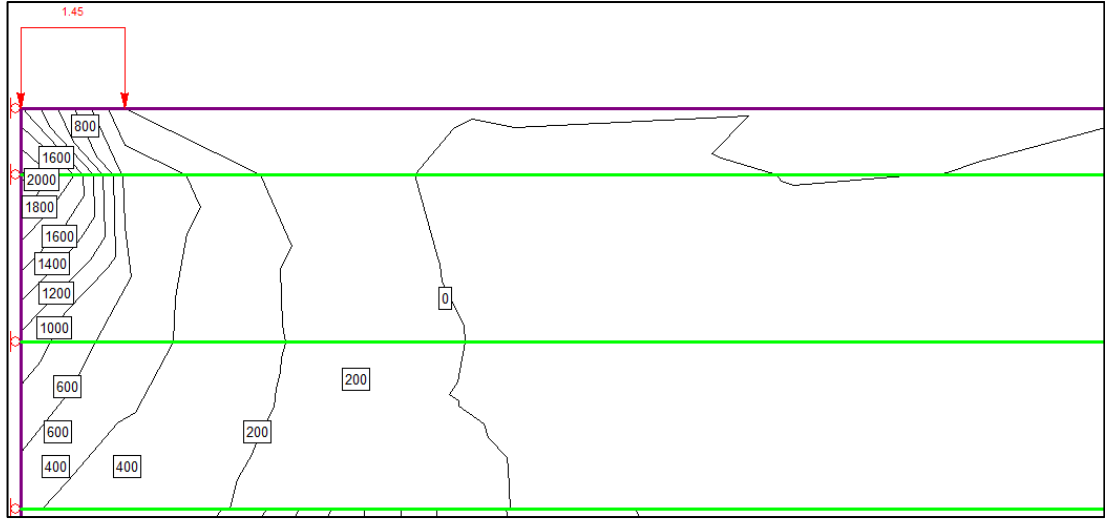




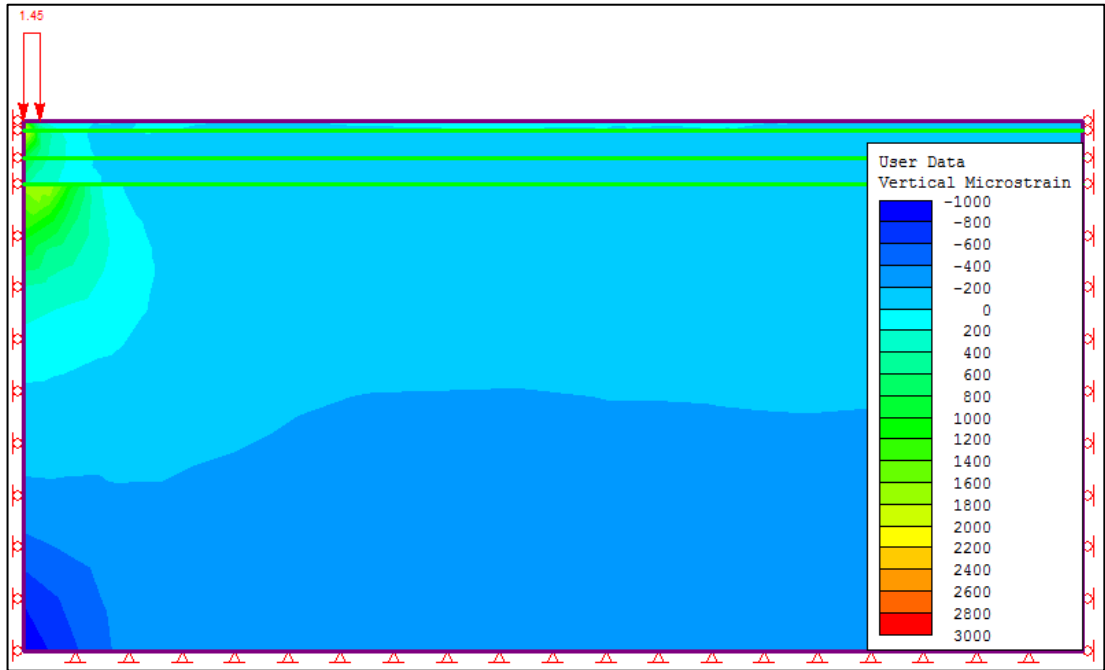
Şekil 5.10 Doğal malzemede zemin içi düşey deformasyon dağılımı yakın plan.



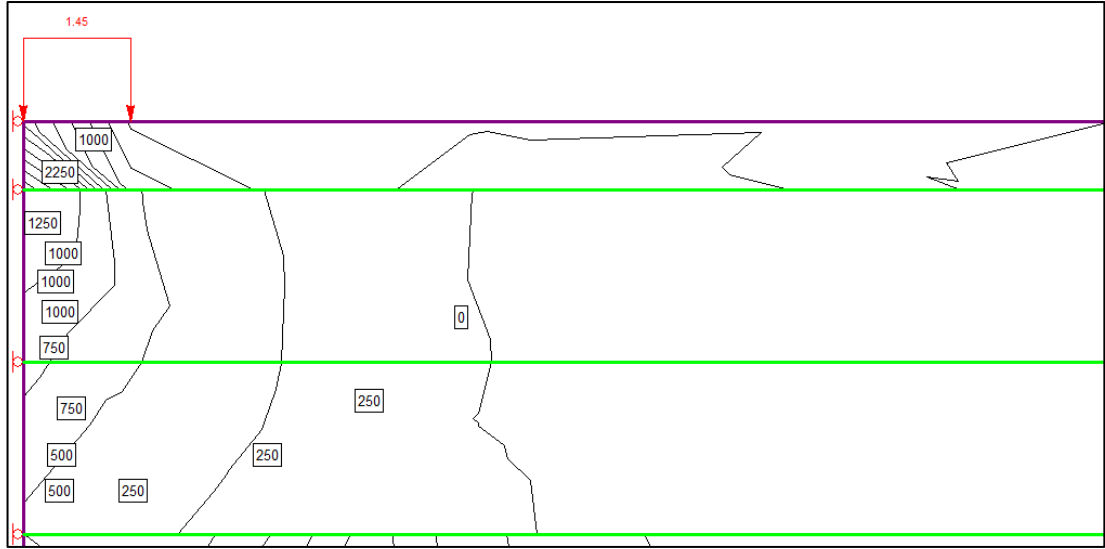
Şekil 5.11 Doğal malzeme üzerine 60 cm sağlam stabilize malzeme serilmesi durumundaki zemin içi düşey deformasyon dağılımı.



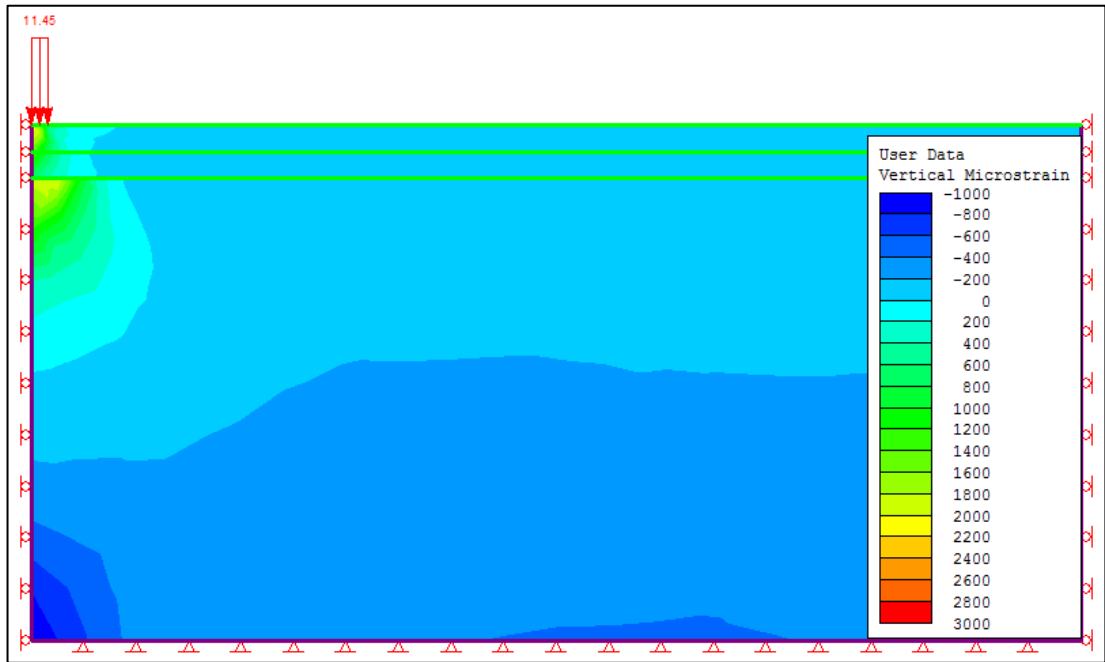
Şekil 5.12 Doğal Malzeme Üzerine 60 cm sağlam stabilize malzeme serilmesi durumundaki zemin içi düşey deformasyon dağılımı yakın plan.



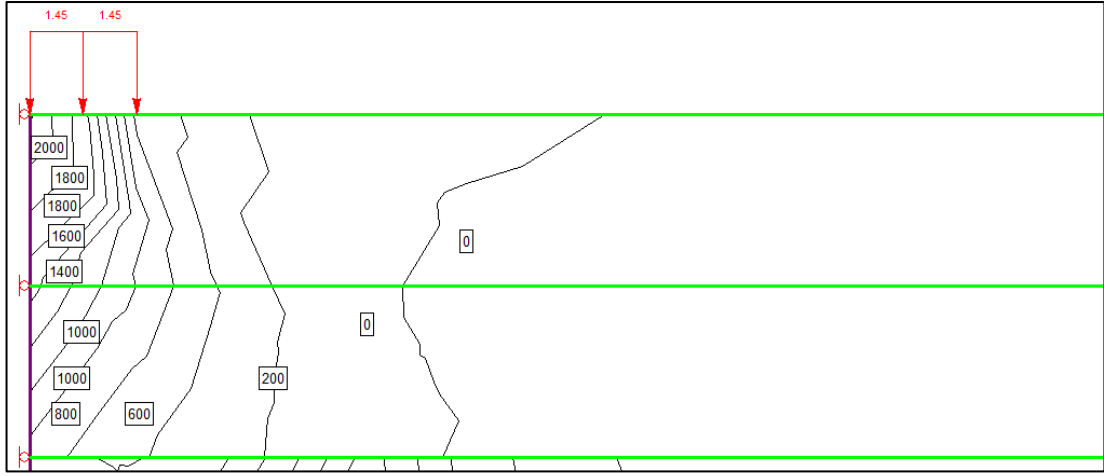
Şekil 5.13 50 cm kireç stabilizasyonu tabakası üzerine 10 cm stabilize malzeme serilmesi durumundaki zemin içi düşey deformasyon dağılımı.



Şekil 5.14 50 cm kireç stabilizasyonu tabakası üzerine 10 cm stabilize malzeme serilmesi durumundaki zemin içi düşey deformasyon dağılımı yakın plan.

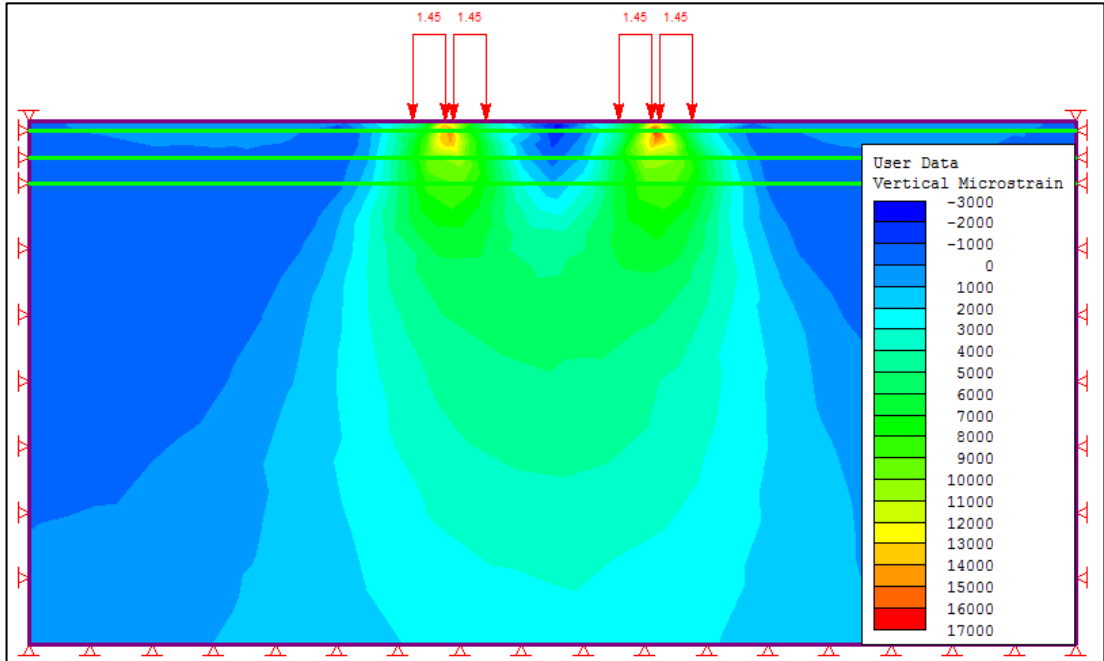


Şekil 5.15 50 cm kireç stabilizasyonu malzeme serilmesi durumunda zemin içi düşey deformasyon dağılımı.

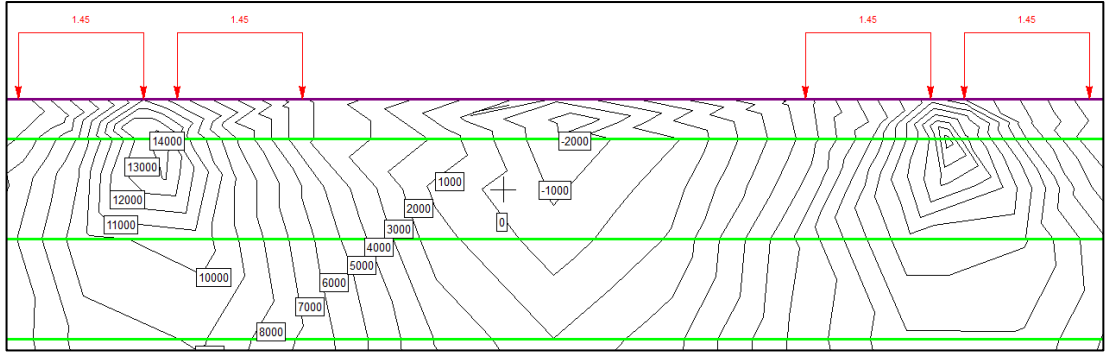


Şekil 5 16 50 cm kireç stabilizasyonu tabakası serilmesi durumundaki zemin içi düşey deformasyon dağılımı yakın plan.

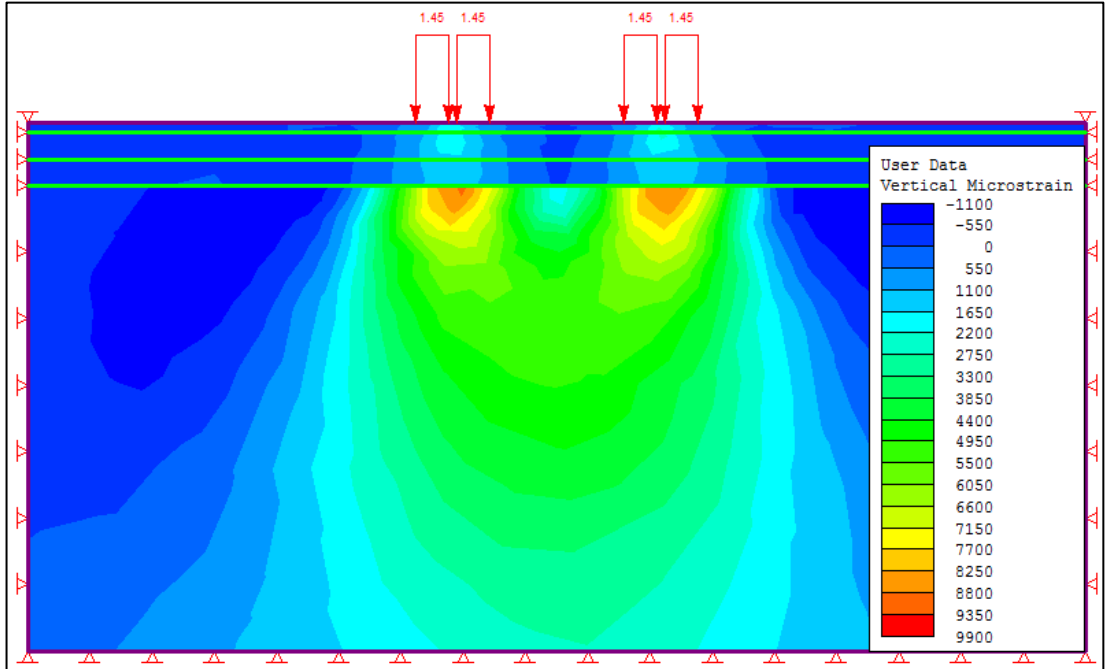
### 5.8 Doğal malzeme, Kireçle iyileştirilmiş malzeme ve sağlam malzemenin yol dizaynında kullanılması durumunda çift tekerleğin yol tabakasında toplam yer değiştirme etkileri



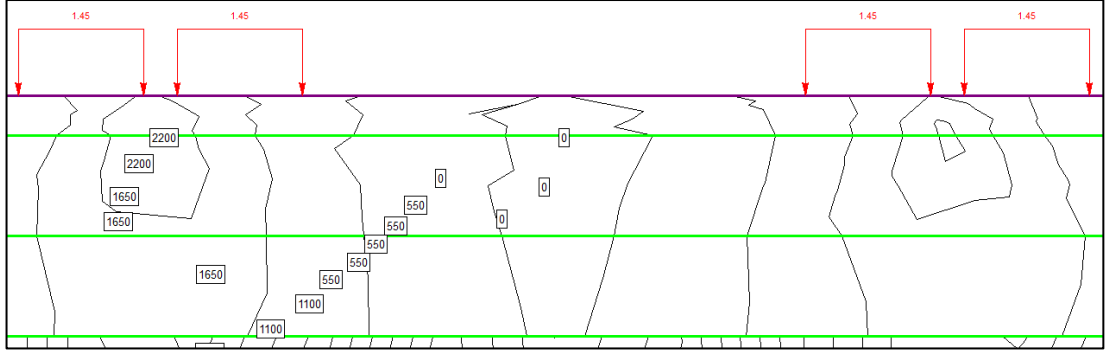
Şekil 5.17 Doğal malzemede zemin içi düşey deformasyon dağılımı.



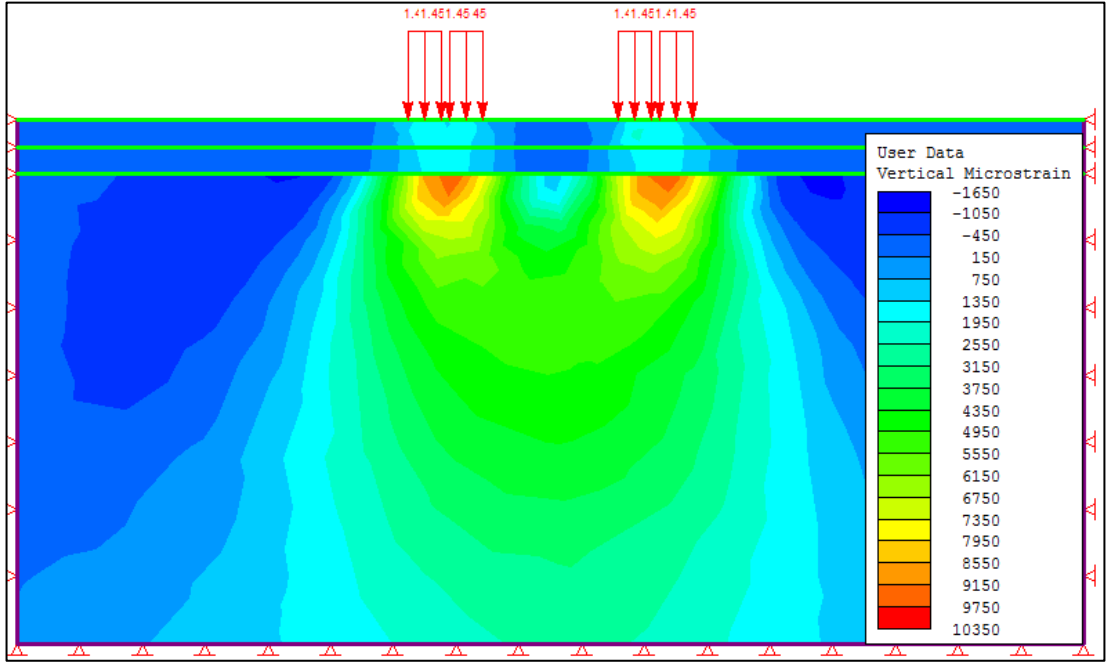
Şekil 5.18 Doğal malzemede zemin içi düşey deformasyon dağılımı yakın plan.



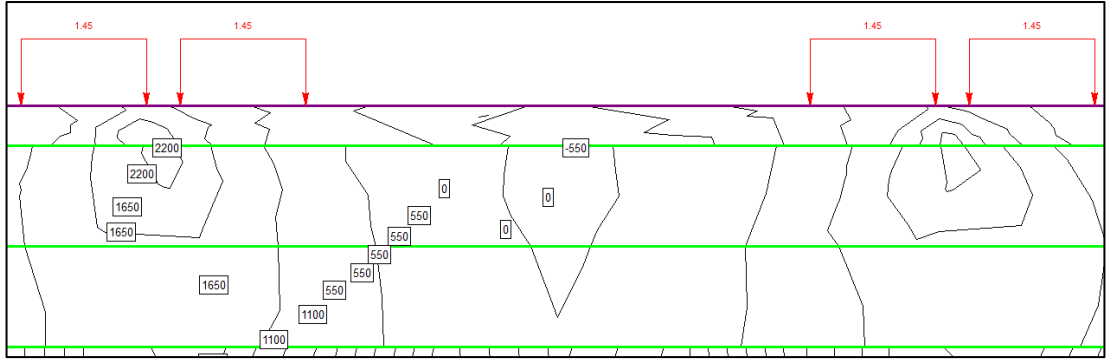
Şekil 5.19 60 cm sağlam malzeme zemin içi düşey deformasyon dağılımı.



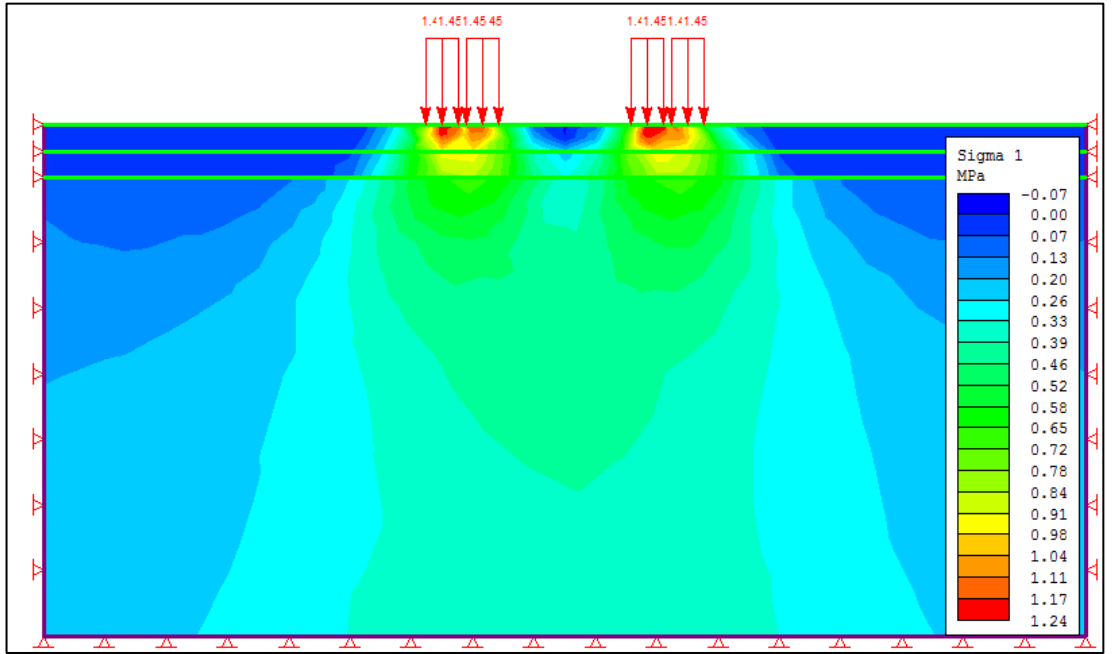
Şekil 5.20 60 cm sağlam malzeme zemin içi düşey deformasyon dağılımı yakın plan.



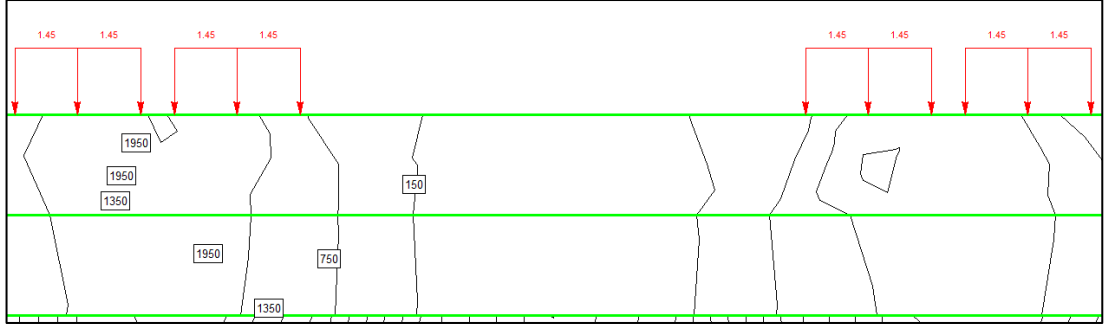
Şekil 5.21 50 cm kireç stabilizasyonu üzerine 10 cm sağlam malzeme zemin içi düşey deformasyon dağılımı.



Şekil 5.22 50 cm kireç stabilizasyonu üzerine 10 cm sağlam malzeme zemin içi düşey deformasyon dağılımı.



Şekil 5.23 50 cm kireç stabilizasyonu zemin içi düşey deformasyon dağılımı.



Şekil 5.24 50 cm kireç stabilizasyonu zemin içi düşey deformasyon dağılımı yakın plan.

### 5.9 Klasik Yöntem ve Kireç Stabilizasyonu Uygulaması Ekonomik Mukayesesi

Bu çalışmada yol tasarımında klasik yöntem dışında kireç ile stabilizasyon yapılması durumunda da tasarım yapılmıştır. Ülkemizde sorun yaşanan zayıf zeminlerin büyük kısmında kil olması nedeniyle düşük CBR değerleri bulunmaktadır. Kirecin kil ile reaksiyona girerek zeminin taşıma gücünü arttırması, dışarıdan ihtiyaç duyulan malzeme miktarını azaltması ve yol yapım maliyetini düşürmesi nedeniyle kireç stabilizasyonu uygulamasına da yer verilmiştir.

Deneyleri yapılan nakliye yol güzergahında 60 cm sağlam malzeme serilmesi gerekmektedir. Yapılan hesaplamalarda 60 cm malzemenin tamamının dışarıdan temin edilmesi ya da 50 cm'sinin kireç ile stabilize edilmesi bulunmuştur. Her iki durum için de üst 10 cm aynı malzeme ile kaplanacağı için aşağıda 50 cm derinlik için kireç stabilizasyonu ya da dışarıdan malzeme getirilmesi durumları için ekonomik mukayese yapılmıştır.

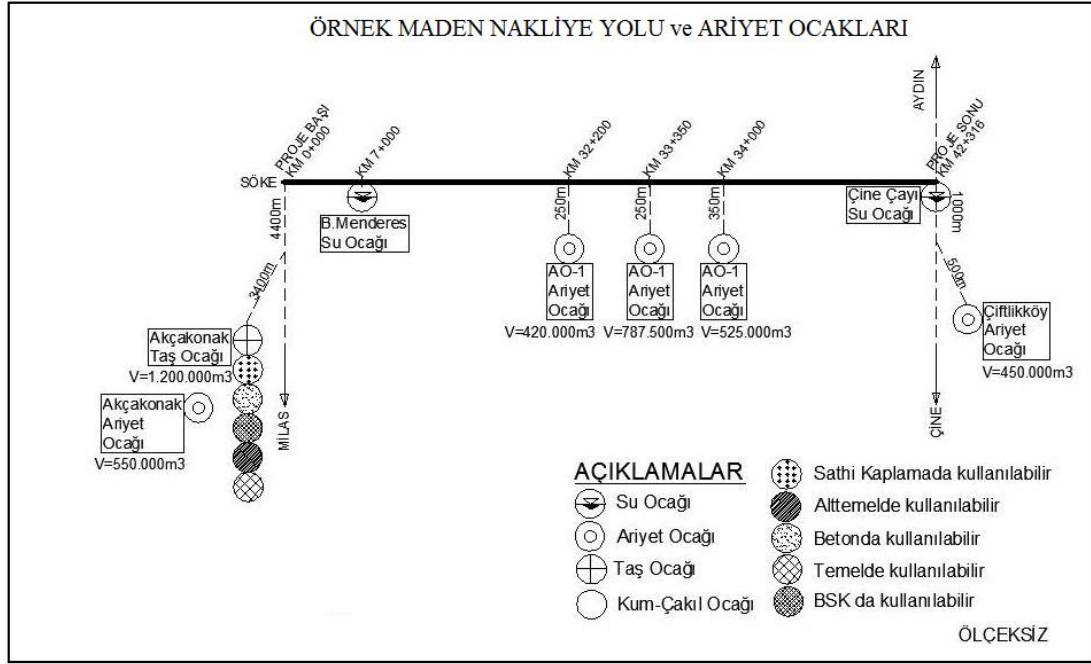
Yol tasarımı klasik yöntem ile yol yapımında düşük CBR'lı malzeme ile karşılaşıldığında bu malzeme kaldırılmakta, nakliye edilmekte ve depolama alanına taşınmaktadır. Depolama alanında bazı durumlarda silindir ve dozerin devamlı çalışması gerekmektedir. Zayıf zemin kazısında asıl maliyeti akaryakıt ve amortisman giderleri tutmaktadır.



Zayıf zemin kazısına alternatif olarak kireç stabilizasyonu önerilmektedir. Bu sayede zayıf zemin kazısı, nakliyesi, depolanması, ariyet ocağından seçme malzeme kazısı, nakliyesi ve serilmesi işlerine gerek kalmamaktadır. Bu uygulamalar yerine düşük yakıt tüketimi olan zemin gevşetme, kireç serme, karıştırma-parçalama işlemleri uygulanmaktadır. Kireç stabilizasyonunun başlıca üstünlükleri:

- Düşük maliyet,
- Zeminin taşıma gücünü arttırdığı için üst tabaka kalınlığında azalmaya neden olması,
- Sönmemiş kireç kullanılmasıyla kış aylarında da çalışmaya imkân verdiği için iş bitim süresinin kısaltılması,
- Daha az iş gücü ve ekipman kullanımınıdır.

Aşağıda örnek maden yolu zayıf zemin kaldırma işlemi için klasik yöntem ve kireç stabilizasyonu uygulaması maliyet karşılaştırılması verilmiştir. Klasik yöntem yakıt hesaplamalarında seçme malzeme kazısı, nakliyesi, zayıf zemin kazısı ve nakliyesi göz önüne alınmış, zayıf zemin depolama alanında taşınan malzemenin serilmesi ve sıkıştırılması için dozer ve silindirin olmadığı varsayılmıştır.



Şekil 5. 25 Örnek maden yolu planı

Tablo 5. 3 Örnek maden ocak yolu bilgileri

Uzunluk (m)	KM	Çukur No	CBR	SIYIRMA (cm)	MALZEME ÇEKİLECEK OCAK	zayıf zemin siyırma, m3
1,030	5+700 - 6+730	6+040	5.4	50	Akçakonak A. O.	10300
380	6+755 - 7+135	6+040-7+820 verileri	5.7 - 7.9	50	"	3800
2,805	7+195 - 10+000	7+820, 8+760, 9+500	6.4 - 7.9	50	"	28050
2,020	14+430 - 16+450	14+725, 15+750, 16+100	5.8 - 6.9	50	AO-1	20200
930	17+050 - 17+980	17+360	6.3	50	"	9300
640	21+200 - 21+840	21+400	5.3	50	"	6400
2,200	22+750 - 24+950	2+960, 24+460	7.7 - 7.4	50	AO-2	22000
1,150	24+950 - 26+100	25+420	4.8	50	"	11500
1,600	26+100 - 27+700	26+420, 27+300	7.5 - 6.2	50	"	16000
1,110	28+390 - 29+500	28+780, 29+100	6.9 - 5.5	50	AO-3	11100
1,350	30+800 - 32+150	31+060, 31+600	5.9 - 4.9	50	"	13500
1,550	33+000 - 34+550	33+325, 34+050	5.7 - 7.0	50	"	15500
900	36+500 - 37+400	36+570, 37+240	7.9 - 6.3	50	Çiftlikköy A.O.	9000
580	38+600 - 39+180	38+790	7.7	50	"	5800
450	40+500 - 40+950	40+750	5	50	"	4500
						<b>186950</b>

Tablo 5. 4 Klasik yöntemle göre yol yapım maliyeti

Uzunluk (m)	KM	Çukur No	CBR	SİHRMA (cm)	MALZEME ÇEKİLECEK OCAK	Ocak-Uygulama Alanı Ort. Mesafe	zayıf zemin sayıma, m3	Kamyon Hacmi (m3)	Malzemenin Taşınması İçin Yükleme Gereken Toplam Araç Sayısı	1 Kamyon yaklaşık 1 TL/km Yakıt Yakmaktadır. İş bitimine kadar kamyon yakıt sarfiyatı (Dolu gidüş, Boş Dönüş /2 TL/km)	Ariyet ocağından 88.000 m3 malzemenin yüklemesinde kullanılacak ekskavatörün yakacağı yakıt (100 m3/saat)	Sağlam zemini serme maliyeti (0,5 TL/m3)	88.000 m3 malzemenin yüklemesinde kullanılacak ekskavatörün yakacağı yakıt (100 m3/saat)	1 Kamyon yaklaşık 1 TL/km Yakıt Yakmaktadır. İş bitimine kadar zayıf zemin için kamyon yakıt sarfiyatı ortalama 10 km için (Dolu gidüş, Boş Dönüş /2 TL/km)
1,030	5+700-6+730	6+040	5.4	50	Akçakonak A.O.	14015	10300	10	1,030	28,871	5,150	5,150	5,150	20,600
380	6+755-7+135	6+040-7+820 verilere	5.7 - 7.9	50	*	14745	3800	10	380	11,206	1,900	1,900	1,900	7,600
2,805	7+195-10+000	7+820, 8+760, 9+500	6.4 - 7.9	50	*	16397.5	28050	10	2,805	91,990	14,025	14,025	14,025	56,100
2,020	14+430-16+450	14+725, 15+750, 16+100	5.8 - 6.9	50	AO-1	17010	20200	10	2,020	68,720	10,100	10,100	10,100	40,400
930	17+050-17+980	17+360	6.3	50	*	14935	9300	10	930	27,779	4,650	4,650	4,650	18,600
640	21+200-21+840	21+400	5.3	50	*	10930	6400	10	640	13,990	3,200	3,200	3,200	12,800
2,200	22+750-24+950	2+960, 24+460	7.7 - 7.4	50	AO-2	9750	22000	10	2,200	42,900	11,000	11,000	11,000	44,000
1,150	24+950-25+100	25+420	4.8	50	*	8075	11500	10	1,150	18,573	5,750	5,750	5,750	23,000
1,600	26+100-27+700	26+420, 27+300	7.5 - 6.2	50	*	6700	16000	10	1,600	21,440	8,000	8,000	8,000	32,000
1,110	28+390-29+500	28+780, 29+100	6.9 - 5.5	50	AO-3	5405	11100	10	1,110	11,999	5,550	5,550	5,550	22,200
1,350	30+800-32+150	31+060, 31+600	5.9 - 4.9	50	*	2875	13500	10	1,350	7,763	6,750	6,750	6,750	27,000
1,550	33+000-34+550	33+325, 34+050	5.7 - 7.0	50	*	1675	15500	10	1,550	5,193	7,750	7,750	7,750	31,000
900	36+500-37+400	36+570, 37+240	7.9 - 6.3	50	Çiftikköy A.O.	6966	9000	10	900	12,539	4,500	4,500	4,500	18,000
580	38+600-39+190	38+790	7.7	50	*	6806	5800	10	580	7,895	2,900	2,900	2,900	11,600
450	40+500-40+950	40+750	5	50	*	6741	4500	10	450	6,067	2,250	2,250	2,250	9,000
							186950			376,924	93,475	93,475	93,475	373,900
TÜM GÜZERGAH											986,780	563,874		1,031,249

### 5.9.1 Klasik Yöntem İle Zayıf Zemin Taşınması Ve Yerine Sağlam Zemin Serilmesi Durumunda Yakıt Tüketim Maliyeti

**Sütun 1:** Ariyet ocaklarından uygulama alanına ortalama mesafe hesaplaması

**Sütun 9:** Kamyon taşıma kapasitesi 10 m<sup>3</sup> olarak alınmıştır.

**Sütun 11:** Kamyonun ariyet ocağından seçme malzemeyi alarak uygulama alanına taşınması durumundaki yakıt tüketiminin hesaplanması. Dolu gidüş boş dönüş düşünülmüş ve yol durumuna göre 2 t/km yakıt tüketeceği öngörülmüştür.

**Sütun 12:** Ekskavatörün ariyet ocağından seçme malzemeyi yüklemesi durumunda ortalama yakıt tüketiminin hesaplanmasında 100m<sup>3</sup>/saat çalışacağı ve 20lt/saat yakıt tüketeceği öngörülmüştür.

**Sütun 8:** Seçme malzemenin yola serilme maliyeti. Kolay bir is olacağı için 0.5 t/m<sup>3</sup> yakıt tüketimi olacağı öngörülmüştür. (8=3\*0,5)

**Sütun 9:** Ekskavatörün zayıf malzemeyi yüklemesi durumunda ortalama yakıt tüketiminin hesaplanmasında  $100\text{m}^3/\text{saat}$  çalışacağı ve  $20\text{ lt/saat}$  yakıt tüketeceği öngörülmüştür ( $9=(3/100)*20*2,5$ ).

**Sütun 10:** Zayıf malzemenin depolama alanı henüz belli olmadığı için  $10\text{ km}$  mesafeye malzeme taşınacağı öngörülmüştür. . Dolu gidiş bos dönüş düşünülmüş ve yol durumuna göre  $2\text{ tl/km}$  yakıt tüketeceği öngörülmüştür ( $10=5*10*2$ )

- ✓ Yol güzergahı boyunca toplam  $88.000\text{ m}^3$  malzeme taşınması gerekmektedir.
- ✓ Akaryakıt litresi  $2,5\text{ TL}$  olarak alınmıştır.

Tablo 5. 5 Kireç stabilizasyonuna göre yol yapım maliyeti

Uzunluk (m)	KM	Cukur No	CBR	SIYIRMA (cm)	MALZEME CEKİLECEK OCAK	Ocak- Uygulama Alanı Ort. Mesafe	zayıf zemin siyirma, m3	Kullanılacak Kireç Miktarı (ton) (30 kg/m3 kireç tüketimi alınmıştır)	Kireç tutarı (100 TL/ton)	Zemin Gevsetme	Kireç Serme	Karıştırma Parçalama
1,030	5+700 - 6+730	6+040	5.4	50	Akçakonak A.O.	14015	10300	309	30,900	644	1,288	2,575
380	6+755 - 7+135	6+040- 7+820 verileri	5.7 - 7.9	50	"	14745	3800	114	11,400	238	475	950
2,805	7+195 - 10+000	7+820, 8+760, 9+500	6.4 - 7.9	50	"	16397.5	28050	841.5	84,150	1,753	3,506	7,013
2,020	14+430 - 16+450	14+725, 15+750, 16+100	5.8 - 6.9	50	AO-1	17010	20200	606	60,600	1,263	2,525	5,050
930	17+050 - 17+980	17+360	6.3	50	"	14935	9300	279	27,900	581	1,163	2,325
640	21+200 - 21+840	21+400	5.3	50	"	10930	6400	192	19,200	400	800	1,600
2,200	22+750 - 24+950	2+960, 24+460	7.7 - 7.4	50	AO-2	9750	22000	660	66,000	1,375	2,750	5,500
1,150	24+950 - 26+100	25+420	4.8	50	"	8075	11500	345	34,500	719	1,438	2,875
1,600	26+100 - 27+700	26+420, 27+300	7.5 - 6.2	50	"	6700	16000	480	48,000	1,000	2,000	4,000
1,110	28+390 - 29+500	28+780, 29+100	6.9 - 5.5	50	AO-3	5405	11100	333	33,300	694	1,388	2,775
1,350	30+800 - 32+150	31+060, 31+600	5.9 - 4.9	50	"	2875	13500	405	40,500	844	1,688	3,375
1,550	33+000 - 34+550	33+325, 34+050	5.7 - 7.0	50	"	1675	15500	465	46,500	969	1,938	3,875
900	36+500 - 37+400	36+570, 37+240	7.9 - 6.3	50	Çiftlikköy A.O.	6966	9000	270	27,000	563	1,125	2,250
580	38+600 - 39+180	38+790	7.7	50	"	6806	5800	174	17,400	363	725	1,450
450	40+500 - 40+950	40+750	5	50	"	6741	4500	135	13,500	281	563	1,125
<b>TÜM GÜZERGAH</b>							<b>186950</b>	<b>5608.5</b>	<b>560,850</b>	<b>11,684</b>	<b>23,369</b>	<b>46,738</b>
											<b>1,124,621</b>	<b>642,641</b>

Ekonomik mukayese hesaplarına göre:

Klasik yöntem ile zeminin kullanıma hazır hale getirilmesi 1.031.249 TL yakıt sarfiyatı gerekirken, aynı iş kireç ile stabilizasyon uygulaması ile 642.641 TL (yakıt + kireç sarfiyatı) maliyet ile gerçekleştirilebilir.

## BÖLÜM ALTI

### SONUÇLAR

Maden nakliye yollarının kaplama tasarımı yapımında CBR yöntemi kullanılmıştır. CBR yöntemi için gerekli deneylerin basit ve kolay olması, bir hafta içerisinde deneylerin sonuçlanabilmesi ve kaplama tasarımının işletme mühendisleri tarafından yapılabilmesi CBR yönteminin yaygın kullanılma nedenleridir.

Örnek maden yolu kaplama tasarımı yapıldığında toplam kaplama kalınlığı 60 cm olarak bulunmuştur. Bu tabaka kalınlığı 60 cm sağlam malzeme, 50 cm kireç stabilizasyonu + 10 cm sağlam malzeme olarak yapılabilmektedir. Her iki durum dışında doğal malzeme ve 50 cm kireçli tabaka kalınlığı içinde Phase2 programı ile tek tekerlek ve arka aks dört tekerlek etkileşimi için deformasyon değerleri incelenmiştir.

Doğal malzemede deformasyon 13.600 mikrostrain değerini alırken, 60 cm sağlam ve 50 cm kireç + 10 cm sağlam malzeme için bu değer yaklaşık 2000 mikrostrain değerine düşmüştür. Deformasyon miktarı yedi kat azalmaktadır. 50 cm kireç stabilizasyonu tabakasında deformasyon değeri düşük olmasına rağmen üstyapı tabanında gerilme daha fazla etkimektedir. Üstyapı tabanına daha fazla yük gelmesinin nedeni kaplama kalınlığının optimum kaplama kalınlığından 10 cm az olmasından dolayıdır.

Tek tekerlekten dolayı oluşan deformasyon ile arka aks dört tekerlekten oluşan deformasyonlar incelendiğinde doğal malzemede 400 microstrain, sağlam malzemede 200 microstrain, 50 cm kireçli tabaka + 10 cm sağlam malzemede ve 50 cm kireçli tabakada 50 microstrain daha fazla gerilme oluşmaktadır. Bu değerlerden kireçli tabakalarda deformasyon değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Kireçli tabakaların kohezyonlu olması nedeni ile yükün dağılmasından dolayı kireçli tabakalarda daha az deformasyon oluşmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre sağlam malzeme ve kireç stabilizasyonu tabakası deformasyon değerleri birbirine yakın çıkmıştır. 2500 microstrain nakliye yolları için kabul edilebilir deformasyon değeridir. CBR yöntemi ile kaplama tasarımı ve Phase2 programı ile yapılan hesaplamalar literatür bilgileri ile benzerlik göstermiştir.

Klasik yöntem (sağlam malzeme ile zeminin doldurulması) ve kireç stabilizasyonu yöntemi ekonomik mukayesesine göre kireç stabilizasyonu uygulaması %38 daha ekonomik çıkmıştır. Ekonomiklik sağlam malzemenin uygulama alanına mesafesine göre değişiklik göstermektedir.

**KAYNAKLAR**

- Ansar, A.M. ve Güneş, M. (1987) *Konsolidasyon Özelliklerinin İstatistiksel Bir Değerlendirmesi*, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği İkinci Ulusal Kongresi. Cilt 1, İstanbul.
- Atanur, A. *Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikatı*. Ankara, 1973
- Bowles, J.E. (1970). *Engineering properties of soils and their measurement*. NY: McGraw- Hill.
- Bowles, J.E. (1982). *Foundation analysis and design* (3rd ed.). NY: McGraw- Hill.
- Bowles, J.E. (1984) *Physical and Geotechnical Properties Soils*. McGraw-Hill, Inc. , New York.
- Cameron R. ve Lewko R. (1999a) *Haul Road Design, Construction and Monitoring Procedures for 320-Ton and 360-Ton Heavy Haulers at Syncrude Canada Limited*. Internal Report. Syncrude Canada Limited
- Capper, P.L. ve Cassie, W.F. (1969) *The Mechanics of Engineering Soils* (5th ed). E. & F.N. SPON, London.s
- Ciason, N. *Toprak Stabilizasyonu*, Ankara, 1964
- Craig, R.F. (1987). *Soil Mechanics* (4th ed.). UK: Van Nostrand Reinhold Co. Ltd.
- Dallas, L. (1999). *Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates Volume :1 summary of findings*, prepared for the National Lime Association.
- Department of the Army, *The Navy, and The Air Forces, Soil Stabilization for pavements*. Washington DC, 1994



- Department of the Army, *The Navy, and The Air Forces*. (1994). *Soil stabilization for pavements*. Washington DC.
- Dwayne, D.T. ve Regensburg B. (2001) *Guidelines for Mine Haul Road Design*. University of Alberta, Edmonton.
- Eskikaya, Ş., Karpuz, C., Hindistan, M. A. (Ed.). (2005). *Maden Mühendisliği Açık Ocak İşletmeciliği El Kitabı*. Ankara: Kozan Ofset.
- Hartman, H. L. (1992). *SME Mining Engineering Handbook*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.. Littleton, Colorado.
- Hustrulid, W. Kuchta, M. (1995). *Open Pit Mine Planning and Design*. Nederland: A.A. Balkema.
- Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şube Müdürlüğü. (2005). *Kireç stabilizasyonu Teknik Şartnamesi*. Ankara.
- Karayolları Genel Müdürlüğüygm, *Ankara Bala ayrımı-Kulu ayrımı Bölünmüş Yolu Kireç Stabilizasyonu Uygulaması*. Ankara, 2004
- Kaufman W.W. ve Ault J.C. (1977) *Design of Surface Mining Haulage Roads*. Bureau of Mines, Information Circular 8758.
- Kenneth, R.R.,& Meyers M.G.(1981). *Soil stabilization materials and methods*.
- Kumbasar, V. ve Kip F. (1972) *Zemin Mekaniği Problemleri*. Çağlayan Kitabevi.
- KYGM. (2004). *Ankara Bala ayrımı-Kulu ayrımı bölünmüş yolu kireç stabilizasyonu uygulaması*. Ankara.
- National Lime Association.(1991). *Lime Stabilization Construction manual* (Anonim).

- Ordemir, İ. (1985) İslanmadan Dolayı Zeminlerde ve Dolgularda Meydana Gelen Sıkışmalar, *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*, DSİ, Adana.
- Schmertmann, J.H. (1970) Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand Proc. ASCE, Vol.96, No.SM-3.
- Sowers, G.F. (1979) Introductory Soil Mechanics and Foundations: *Geotechnical Engineering*, (4th ed). Macmillan Publishing Co. Inc. Mew York.
- Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, *Kireç Stabilizasyonu Teknik Şartnamesi*. Ankara, 2005
- Thompson, R. (2011) Building Better Haul Roads Designing for Structural Strength *SME Annual Meeting*. Denver CO, 2011
- Tunç, A. (2002) *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*. Atlas Yayın Dağıtım.
- Tunç, A. (2007) *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım.
- Ülker, R. (1985) Arazide Zemin ve Dolgu Malzemesi Etüdü ve Zemin Numunesi Alınması, *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*, DSİ, Adana.
- Ülker, R. (1985) Toprak Barajlar İnşasında Zemin Mekaniği. *EİE Hidroelektrik Enerji Sempozyumu Tebliğleri*. Ankara.
- Ülker, Ş. (2005). *Karayolu altyapısında zeminlerin kireçle iyileştirilmesi*. Ankara.
- Wasti, Y. ve Ergun, U. (1985) Zeminlerin Şişme Davranışı, *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*, DSİ, Adana.
- Yılmaz, R. (1987) Zemin İstatistiğinin Önemi ve İzmir-Bostanlı Yöresi Deniz Dibi Sedimanlarının Sıkışma İndisi için İstatistiksel Bulgular, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği İkinci Ulusal Kongresi*, Cilt 1, s.101-112, İstanbul.

## EKLER

Ek 1

GRAIN SIZE DISTRIBUTION TEST					
ELEK ANALİZİ TESTİ ( TS 1900 - 1 )					
PROJECT / PROJE :	Ggümüşhane				
LOCATION of PROJECT / PROJE YERİ :-	-				
CONTRACTOR / MÜTEAHHİT :	-				
CONTROL / KONTROL :	-				Job. No / Deney No :
Description of Soil / Zeminin Cinsi :	KAZIDAN ÇIKAN DOĞAL ZEMİN				Coor. / Koordinat :
Test Performed By / Deneyi Yapan :					Date of T. / Deney Tar. :
Mass of dry soil before wash / Yıkamadan önce kuru zemin ağırlığı					1843,00
Mass of dry soil after wash / Yıkamadan sonra kuru zemin ağırlığı					431,78
Mass of washed material / Yıkamadaki kayıp ağırlık					1411,22
Clay+Silt ratio / Kil + Silt oranı ( % )					<b>76,57</b>
Sieve Num.	Sieve Diameter	Passing	Mass Retained	% Retained	% Passing
Elek No	Elek Çapı (mm)	Geçen (gr)	Elekte Kalan (gr)	% Kalan	% Geçen
2 1/2"	63,500	1843,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	1843,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	1843,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	1843,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,53	1839,74	3,26	0,18	99,82
No 4	4,760	1827,56	15,44	0,84	99,16
No 10	2,000	1807,10	35,90	1,95	98,05
No 20	0,845	1777,44	65,56	3,56	96,44
No 40	0,425	1740,58	102,42	5,56	94,44
No 100	0,149	1562,60	280,40	15,21	84,79
No 200	0,075	1411,22	431,78	23,43	76,57
	PAN		1411,22		
	TOTAL / TOPLAM		1843,00		
<p style="text-align: center;"><b>GRAIN SIZE ANALYSIS / ELEK ANALİZİ</b></p>					
D <sub>60</sub> =	---	C <sub>u</sub> = D <sub>60</sub> / D <sub>10</sub>	= ---	PL ( % )	26,46
D <sub>30</sub> =	---	C <sub>c</sub> = ( D <sub>30</sub> / D <sub>60</sub> * D <sub>10</sub> )	= ---	LL ( % )	42,91
D <sub>10</sub> =	---			PI ( % )	16,44
USCS Class / USCS Sınıf :	MI				
Soil Definition / Zemin Tanımı :	ORTA PLASTİSİTELİ SİLT				
TS 1500 / 2000	ASTM 2487-90 ( USCS )				
2,00 mm passing / geçen % =	98,05	4,75 mm passing / geçen % =	99,16		

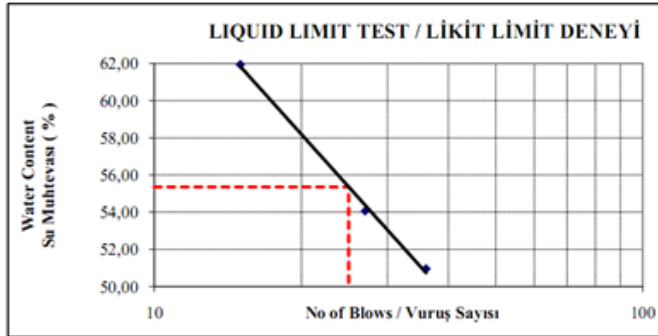
Ek 2:

## LIQUID AND PLASTIC LIMIT TESTS LİKİT VE PLASTİK LİMİT TESTLERİ ( TS 1900 - 1 )

PROJECT / PROJE : \_\_\_\_\_  
 LOCATION of PROJECT / PROJE YERİ : \_\_\_\_\_  
 CONTRACTOR / MÜTEAHHİT : \_\_\_\_\_  
 CONTROL / KONTROL : \_\_\_\_\_ Job. No / Deney No : \_\_\_\_\_  
 Description of Soil / Zeminin Cinsi : \_\_\_\_\_ Coord. / Koordinat : \_\_\_\_\_  
 Test Performed By / Deneyi Yapan : \_\_\_\_\_ Date of T. / Deney Tar. : \_\_\_\_\_

Liquid Limit Test / Likit Limit Testi			
	L L		
	1	2	3
Moisture can number / Kap no :			
Mass of can / Kap ağırlığı gr. :	22,19	22,63	21,27
Mass of wet soil + can / Islak zemin + kap ağırlığı gr. :	28,27	27,32	26,15
Mass of dry soil + can / Kuru zemin + kap ağırlığı gr. :	26,14	25,74	24,29
Mass of water / Su ağırlığı gr. :	2,13	1,58	1,87
Mass of soil / Zemin ağırlığı gr. :	3,95	3,10	3,01
Water content / Su muhtevası w % :	54,07	50,96	61,95
No of blows / Vuruş sayısı N :	27	36	15

Natural Water Content / Doğal Su Muhtevası	
Wn	4
	612,00
	3567,00
	3151,00
	416,00
	2539,00
	16,38
	-



<b>LIQUID LIMIT / LİKİT LİMİT DEĞERİ ( % ) :</b>	<b>55,36</b>
--	--------------

Plastic Limit Test / Plastik Limit Testi		
	PL	
	1	2
Moisture can number / Kap no :		
Mass of can / Kap ağırlığı gr. :	22,14	22,14
Mass of wet soil + can / Islak zemin + kap ağırlığı gr. :	25,97	25,97
Mass of dry soil + can / Kuru zemin + kap ağırlığı gr. :	25,08	25,08
Mass of water / Su ağırlığı gr. :	0,89	0,89
Mass of soil / Zemin ağırlığı gr. :	2,94	2,94
Water content / Su muhtevası w % :	30,31	30,31

<b>PLASTIC LIMIT / PLASTİK LİMİT ( % ) :</b>	<b>30,31</b>
--	--------------

<b>PLASTICITY INDEX / PLASTİSİTE İNDİSİ ( % ) :</b>	<b>25,05</b>
---	--------------

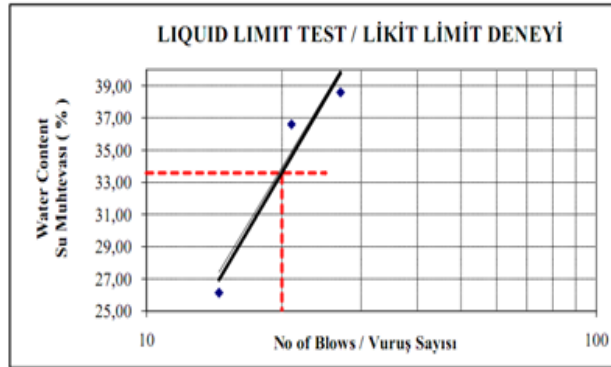
Ek 3:

### LIQUID AND PLASTIC LIMIT TESTS LİKİT VE PLASTİK LİMİT TESTLERİ ( TS 1900 - 1 )

PROJECT / PROJE : \_\_\_\_\_  
 LOCATION of PROJECT / PROJE YERİ : \_\_\_\_\_  
 CONTRACTOR / MÜTEAHHİT : \_\_\_\_\_  
 CONTROL / KONTROL : \_\_\_\_\_ Job. No / Deney No : **LL / PL - 001**  
 Description of Soil / Zeminin Cinsi : **KAZIDAN ÇIKAN DOĞAL ZEMİN** Coord. / Koordinat : \_\_\_\_\_  
 Test Performed By / Deneyi Yapan : \_\_\_\_\_ Date of T. / Deney Tar. : \_\_\_\_\_

Liquid Limit Test / Likit Limit Testi			
	L L		
	1	2	3
Moisture can number / Kap no :			
Mass of can / Kap ağırlığı gr. :	17,31	17,51	17,49
Mass of wet soil + can / Islak zemin + kap ağırlığı gr. :	27,54	34,28	44,77
Mass of dry soil + can / Kuru zemin + kap ağırlığı gr. :	25,42	29,61	37,46
Mass of water / Su ağırlığı gr. :	2,12	4,67	7,31
Mass of soil / Zemin ağırlığı gr. :	8,11	12,10	19,97
Water content / Su muhtevası w % :	26,14	38,60	36,60
No of blows / Vuruş sayısı N :	15	27	21

Natural Water Content / Doğal Su Muhtevası	
W <sub>n</sub>	
4	



<b>LIQUID LIMIT / LİKİT LİMİT DEĞERİ ( % ) :</b>	<b>33,58</b>
--	--------------

Plastic Limit Test / Plastik Limit Testi		
	PL	
	1	2
Moisture can number / Kap no :		
Mass of can / Kap ağırlığı gr. :	17,33	17,33
Mass of wet soil + can / Islak zemin + kap ağırlığı gr. :	19,54	19,54
Mass of dry soil + can / Kuru zemin + kap ağırlığı gr. :	19,20	19,20
Mass of water / Su ağırlığı gr. :	0,34	0,34
Mass of soil / Zemin ağırlığı gr. :	1,87	1,87
Water content / Su muhtevası w % :	18,18	18,18

<b>PLASTIC LIMIT / PLASTİK LİMİT ( % ) :</b>	<b>18,18</b>
<b>PLASTICITY INDEX / PLASTİSİTE İNDİSİ ( % ) :</b>	<b>15,40</b>

Ek 4:

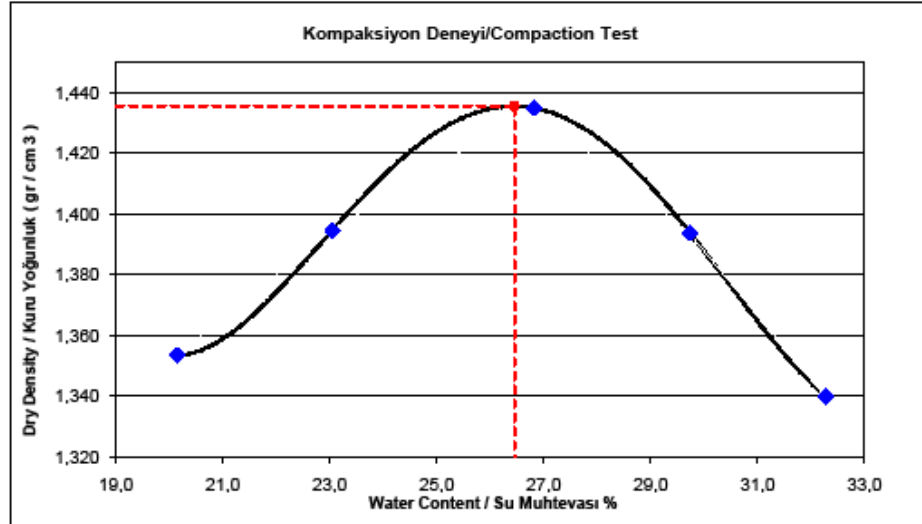
## STANDARD COMPACTION TEST STANDART KOMPAKSİYON TESTİ

CONSULTANT / İŞ VEREN :	Job. No/ Deney No:
LOC.OF PROJECT / PROJE YERİ:	Coor./Koor.:
Contractor / MÜTEAHHİT :	Date of T. / Deney Tar. :
Control / Kontrol :	
Description of Soil / Zeminin Cinsi:	Mold Dim/Kalıp Boyutları:
Test Performed By / Deneyi yapan :	Diam/Çap cm: 10,16
Blows/layer: Vuruş/Tabaka:	Ht./Yüks.cm: 11,64
No of layers / Tabaka sayısı :	Vol / Hacim: 944

### Water Content Determination / Optimum Su Muhtevasının Bulunması

Sample No / Or. Num no.	1		2		3		4		5	
Moisture can no. / Kap no	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7	W 8	W 9	W 10
Mass of can / Kap ağırlığı gr.	55,64	55,64	58,94	58,94	56,84	56,84	58,76	58,76	49,56	49,56
M. wet soil+can / Islak Z.+Kap g	186,74	186,74	185,90	185,90	159,67	159,67	172,10	172,10	186,44	186,44
M. dry soil+can / Kuru Z.+Kap g.	164,76	164,76	162,12	162,12	137,92	137,92	146,12	146,12	153,04	153,04
Mass of water / Su ağırlığı gr.	21,98	21,98	23,78	23,78	21,75	21,75	25,98	25,98	33,40	33,40
Mass of soil / Zemin ağırlığı gr.	109,12	109,12	103,18	103,18	81,08	81,08	87,36	87,36	103,48	103,48
Water c. w % / Su mnhT. w % gr.	20,14	20,14	23,05	23,05	26,83	26,83	29,74	29,74	32,28	32,28

Ass. Water con./Tahm. Su mnh. %	20	23	27	30	32
Water c. w % / Su mnhT. w % gr.	20,14	23,05	26,83	29,74	32,28
Mass of soil+mold/kalıp + Zemin g	5066	5151	5249	5238	5204
Mass of mold / Kalıp ağırlığı gr.	3531	3531	3531	3531	3531
Mass of soil / Zemin gr. Mws	1535	1620	1718	1707	1673
Wet unit wt. / Doğ. BHA gr/cm <sup>3</sup> g	1,63	1,72	1,82	1,81	1,77
Dry unit wt./ Kuru gr/cm <sup>3</sup> g kuru	1,353	1,395	1,435	1,394	1,340



Optimum Moisture / Optimum su muhtevası ( w %) :	26,45
Dry density gr./cm <sup>3</sup> / Kuru yoğunluk gr./cm <sup>3</sup> :	1,436

Ek 5:

## CALIFORNIA BEARING RATIO TEST ( CBR ) KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI TESTİ ( CBR )

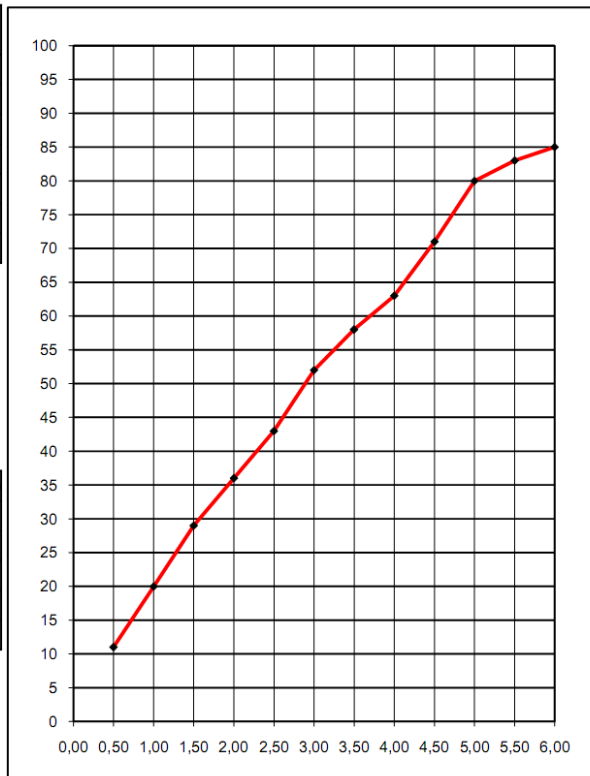
CONSULTANT / İŞ VEREN :		Job. No/ Deney No:	CBR - 002
LOC.OF PROJECT / PROJE YERİ:		Coor./Koor.:	Numune Malzeme
Contractor / MÜTEAHHİT :		Date of T. / Deney Tar. :	20.12.2008
Control / Kontrol :			
Description of Soil / Zeminin Cinsi :	WAY 18 - DOĞAL KİREÇSİZ	Mold Dim/Kalıp Boyutları:	
Test Performed By / Deneyi yapan :	GEO-TEK DANIŞMANLIK A.Ş.	Diam/Çap cm:	15,2
Blows/layer: Vuruş/Tabaka:	61	Ht./Yüks.cm:	11,58
No of layers / Tabaka Sayısı:	5	Vol / Hacim:	2100

	Dry / Kuru	Wet / Islak
Moisture can no. / Kap no	1	2
Mass of can / Kap ağırlığı gr.		
M. wet soil+can / Islak Z.+Kap g		
M. dry soil+can / Kuru Z.+Kap g.		
Mass of water / Su ağırlığı gr.		
Mass of soil / Zemin ağırlığı gr.		
Water c. w % / Su muhT. w % gr.		

Mass of soil+mold/kalıp + Zemin g	
Mass of mold / Kalıp ağırlığı gr.	
Mass of soil / Zemin gr. Mws	
Wet unit wgt / Doğ. BHA gr/cm3 g	
Dry unit wgt./ Kuru gr/cm3 g kuru	

Date / Tarih	Time / Saat	Swell / Şişme ( mm )
16.12.2008	0	0
17.12.2008	24	0,12
18.12.2008	48	0,21
19.12.2008	72	0,28
20.12.2008	96	0,36

Penetration / Penetrasyon ( mm )	Loading / Düz Yükleme ( kgf )
0	0
0,50	11
1,00	20
1,50	29
2,00	36
2,50	43
3,00	52
3,50	58
4,00	63
4,50	71
5,00	80
5,50	83
6,00	85



	Load / Düz Yükleme		Load / Ters Yükleme	
	2,50	5,00	2,50	5,00
Penet. / Penetrasyon ( mm )	2,50	5,00	2,50	5,00
Standart Load / Stan. Yük	1360	2040	1360	2040
Load / Yük ( kgf )	43	80	0	0
CBR Value / Değerleri ( % )	3,16	3,92	0,00	0,00

Swell / Şişme ( mm )	0,31
----------------------	------

Project CBR Value / Proje CBR Değeri ( % )	3,92
--	------

## Ek 6

**CALIFORNIA BEARING RATIO TEST ( CBR )**  
**KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI TESTİ ( CBR )**

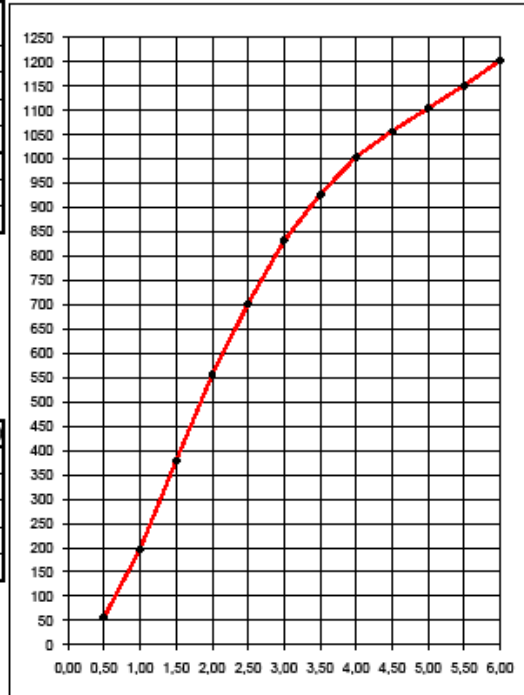
CONSULTANT / İŞ VEREN :	Job. No/ Deney No:	<b>CBR - 004</b>
LOC.OF PROJECT / PROJE YERİ:	Coor./Koor.:	<b>Numme Malzeme</b>
Contractor / MÜTEAHHİT :	Date of T. / Deney Tar. :	<b>26.12.2008</b>
Control / Kontrol :		
Description of Soil / Zeminin Cinsi :	Mold Dim/Kalp Boyutları:	
Test Performed By / Deneyi yapan :	Diam/Çap cm:	<b>15,2</b>
Blows/layer: Vuruş/Tabaka:	Ht./Yüks.cm:	<b>11,58</b>
No of layers / Tabaka Sayısı:	Vol / Hacim:	<b>2100</b>

	Dry / Kuru	Wet / Islak
Moisture can no. / Kap no	1	2
Mass of can / Kap ağırlığı gr.		
M. wet soil+can / Islak Z.+Kap g		
M. dry soil+can / Kuru Z.+Kap g.		
Mass of water / Su ağırlığı gr.		
Mass of soil / Zemin ağırlığı gr.		
Water c. w % / Su mmhT. w % gr.		

Mass of soil+mold/kalp + Zemin g	
Mass of mold / Kalp ağırlığı gr.	
Mass of soil / Zemin gr. Mws	
Wet unit wgt / Doğ. BHA gr/cm <sup>3</sup> g	
Dry unit wgt/ Kuru gr/cm <sup>3</sup> g kuru	

Date / Tarih	Time / Saat	Swell / Şişme ( mm )
22.12.2008	0	0
23.12.2008	24	0,04
24.12.2008	48	0,12
25.12.2008	72	0,21
26.12.2008	96	0,24

Penetration / Penetrasyon ( mm )	Loading / Düz Yükleme ( kgf )
0	0
0,50	57
1,00	198
1,50	379
2,00	556
2,50	703
3,00	832
3,50	927
4,00	1005
4,50	1058
5,00	1105
5,50	1152
6,00	1203



Penet. / Penetrasyon ( mm )	Load / Düz Yükleme		Load / Ters Yükleme	
	2,50	5,00	2,50	5,00
Standart Load / Stan. Yük	1360	2040	1360	2040
Load / Yük ( kgf )	703	1105	0	0
CBR Value / Değerleri ( % )	51,69	54,17	0,00	0,00

Swell / Şişme ( mm )	<b>0,21</b>
----------------------	-------------

Project CBR Value / Proje CBR Değeri ( % )	<b>54,17</b>
--	--------------