

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARAYOLU TABAKALARINDA PLAKA YÜKLEME DENEYİNİN  
UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Ayşegül Güneş KAYA**

**MART 2011**

**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARAYOLU TABAKALARINDA PLAKA YÜKLEME DENEYİNİN  
UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**İnş. Müh. Ayşegül Güneş KAYA**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"İnşaat Yüksek Mühendisi"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15.02.2011  
Tezin Savunma Tarihi : 04.03.2011**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK  
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Trabzon 2011**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalı yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, başlangıcından sonuna kadar, gerekli bütün yardım, tavsiye ve yönlendirmeleri yapan, karşılaştığım problemlerin çözümünde deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez yazımım sırasında yardımını ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili arkadaşım Arş. Gör. Ç. Melisa KAYA'ya teşekkür ederim.

Beni yetiştirip bu topluma kazandıran, eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca sabır ve metanetle her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Ayşegül Güneş KAYA  
Trabzon 2011

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ. ....	XI
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Zemin Taşıma Kapasitesinin Tayininde Kullanılan Başlıca Deneyler .....	2
1.2.1. Koni Penetrasyon (CPT) Deneyi .....	2
1.2.2. Dinamik Koni Penetrasyon (DCPT) Deneyi. ....	4
1.2.3. Statik Koni Penetrasyon Deneyi.....	4
1.2.4. Elektronik Koni Penetrasyon Deneyi .....	5
1.2.5. Standart Penetrasyon (SPT) Deneyi .....	5
1.2.6. Dinamik Penetrasyon (DPT) Deneyi.....	7
1.2.7. Düşen Ağırlık Deflektometresi (FWD) Deneyi .....	9
1.2.8. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi .....	11
1.2.9. Plaka Yükleme (PLT) Deneyi .....	12
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	13
2.1. Plaka Yükleme Deneyi .....	13
2.1.1. Deneyin Yapılışı.....	14
2.1.1.1. Yükleme Zemininin Hazırlanması. ....	14
2.1.1.2. Yükleme Plakasının Seçimi.....	15
2.1.1.3. Yükleme İşlemi .....	16
2.1.2. Deney Sonucunda Elde Edilen Veriler .....	18
2.1.3. Verilerin Hesaplanması ve Grafiklerinin Çizilmesi .....	19
2.2. Esneklik Modülü ( $M_R$ ). ....	21

2.2.1.	Esneklik Modülü ile Su Muhtevası Arasındaki İlişki .....	23
2.2.2.	Esneklik Modülü ile CBR Değeri Arasındaki İlişki.....	25
2.2.3.	Esneklik Modülü, Üstyapı Sayısı ve Maliyet Arasındaki İlişki .....	27
2.3.	Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi .....	27
2.3.1.	CBR Değeri ile Su Muhtevası Arasındaki İlişki. ....	28
2.4.	Elastisite Modülü (E).....	30
2.4.1	Su Muhtevasının Elastisite Modülü ve Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkisi. ....	32
2.4.2.	Alttemel Zemininin Elastisite Modülü Değeri ile Esneklik Modülü Değeri Arasındaki İlişki .....	33
2.5.	Zemin Yatak Katsayısı. ....	34
2.5.1.	Yatak Katsayısını Etkileyen Faktörler. ....	35
2.5.1.1.	Plaka Boyutlarının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi .....	35
2.5.1.2.	CBR Değerinin Yatak Katsayısı Değerine Etkisi.....	36
2.5.1.3.	Zeminin Su Muhtevasının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi.....	39
2.5.1.4.	Zemin Cinsinin Yatak Katsayısı Değerine Etkisi.....	42
2.5.1.5.	Esneklik Modülünün Yatak Katsayısı Değerine Etkisi .....	43
2.5.1.6.	Tabaka Kalınlıklarının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi .....	44
2.5.1.7.	Alttemel Kalınlığının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi .....	45
2.5.1.8.	Yükleme Plakası Boyutlarının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi .....	46
2.5.1.9.	Plaka Çapı ile Elastisite Modülü İlişkinin Yatak Katsayısı Değerine Etkisi .....	50
2.6.	Zeminin Taşıma Kapasitesi .....	51
2.6.1.	Üstyapıya Etki Eden Faktörler. ....	52
2.6.2.	Üstyapı Tabakaları ve Kalınlıkları. ....	52
2.6.3.	Tekerlek Yükünün Üstyapı Gerilme Dağılımı Üzerindeki Etkisi .....	53
2.6.4.	Gerilme Eğrilerinin Özellikleri .....	54
2.6.5.	Plaka Boyutlarının Gerilme Dağılımına Etkisi .....	55
2.6.6.	Plaka Etki Derinliği .....	56
2.6.7.	Tabakalı Zeminlerde Plaka Yüklemeye Deneyinin Sakıncaları .....	57
3.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	59
3.1.	ANSYS Programı .....	59
4.	BULGULAR VE İRDELEME.....	61
4.1.	Giriş.....	61
4.2.	Yüklenen Plaka Altındaki Gerilme-Deformasyon-Vektör Dağılımı.....	61

4.3.	Uygulama Yükünün Etkisi .....	62
4.4.	Plaka Çapının Etkisi .....	63
4.5.	Plaka Kalınlığının Etkisi .....	64
5.	SONUÇLAR. ....	65
6.	KAYNAKLAR.....	66
7.	EKLER .....	74
ÖZGEÇMİŞ		

## ÖZET

Plaka yükleme deneyleri yurtdışında, Illinois Karayolları, Minnesota Yol Araştırma Ağı (MnROAD), Colorado Karayolları gibi birçok kuruluş tarafından esnek kaplamaların tasarım ve değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Türkiye’de ise plaka yükleme deneyini kullanan çok az kuruluş vardır. Kaliforniya Taşıma Oranı deneyi (CBR) ve son yıllarda da düşen ağırlıklı deflektometre deneyi (FWD), zemin tabakalarının mekanistik değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. FWD deneyi çok pahalıdır ve ince tabaka kalınlıkları için yanıtıcı sonuçlar verebilmektedir. Plaka yükleme deneyi ise, tabakanın yatak katsayısı,  $k$ , değerini vermesi bakımından önemli bir deneydir.

Bu çalışmada; plaka yükleme deneyinin karayolu kaplamalarındaki güvenilirliği, deney aletinin boyutlarına ve deney işlemi sırasında uygulanan yüklemeye odaklanılarak incelenmiştir. Kaplama tabakalarındaki gerilme dağılımlarını tespit etmek amacıyla ANSYS sonlu elemanlar modelinden yararlanılmıştır. Yükleme plakası kalınlığının, kaplama tabakalarındaki gerilme dağılımına dayalı sonuçlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Plaka çapının, sonuçları önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Plaka çapının 100 cm’nin üzerinde olması, doğru sonuçlar elde edilmesi bakımından tavsiye edilmektedir. Daha da önemlisi uygulama yükünün, deney sonuçları üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Deney sırasında plakaya uygulanan en büyük yükün 10 kN’dan az olması gerektiği hesaplanmıştır. Aksi takdirde deney sonucunda elde edilen verilerin hangi tabakaya ait olduğu tespit edilemeyecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Plaka Yükleme Deneyi, Boyutlar, ANSYS

## SUMMARY

### **Research on Feasibility of Plate Loading Testing on Highway Pavement Layers**

Plate loading tests are used abroad in evaluation and design of flexible pavements by several organisations such as Illinois Department of Transportation (IDOT), Colorado Department of Transportation, Minnesota Road Project (MnROAD), etc. In Turkey, there are few organisations that use plate loading tests. California bearing ratio tests (CBR) and in recent years the falling weight deflectometer tests (FWD) are used in soil layer mechanistic evaluations. FWD tests are very expensive and can give misleading results for thin pavement layers. The plate loading test is important such that it gives the reaction coefficient value,  $k$ , of the layer.

In this study, the reliability of the plate load test on highway pavements is researched by focusing on the test device dimensions and load applied during the test procedure. The ANSYS finite element modelling was utilized to determine the stress distributions through the pavement layers. It was found that the plate thickness does not have significant effects on the results based on the stress variation through the layers. The diameter of the plate indicated significant effects on the results. Plate diameters above 100 cm are suggested to obtain proper results. More importantly, the applied load has the highest impact on the test results. It is computed that the peak force on the plate should be less than 10 kN during the test. Otherwise it is possible that the plate load testing might be measuring the below sublayers characteristics.

**Key Words:** Plate Loading Test, Dimensions, ANSYS



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. CPT deney aleti .....	3
Şekil 2. DPT deney aleti .....	7
Şekil 3. FWD deney aleti .....	9
Şekil 4. Tipik bir FWD oturma grafiği.....	10
Şekil 5. CBR deneyinden elde edilen yük-oturma grafiği .....	11
Şekil 6. CBR deneyinde kullanılan standart yük-oturma grafiği .....	12
Şekil 7. Plaka yükleme deneyinde plakanın zemine batma aşamaları .....	13
Şekil 8. Plaka yükleme deneylerinde kullanılan deneysel grafik .....	15
Şekil 9. Esnek bir plakanın yüklenmesi durumunda zemin davranışı.....	16
Şekil 10. Plaka yükleme deneyi aleti .....	17
Şekil 11. Tam yüklenmiş damperli kamyonla yapılan plaka yükleme deneyi.....	17
Şekil 12. Plaka yükleme deneyi sonuçlarının tipik grafiği.....	18
Şekil 13. Yük plakası altındaki zeminin oturma davranışı.....	19
Şekil 14. Yük-oturma eğrisinin düzeltilmesi.....	20
Şekil 15. Üç farklı yükleme durumunda yük tekrarlarının oturma üzerindeki etkisi .....	20
Şekil 16. Taşıma kapasitesi ile $M_R$ değeri arasındaki ilişki.....	22
Şekil 17. AASHTO şartnamesinde su muhtevasının $M_R$ değerine etkisi.....	23
Şekil 18. Su muhtevası ile esneklik modülü arasındaki ilişki .....	24
Şekil 19. $M_R$ değerinin su muhtevasına bağlı değişimi.....	25
Şekil 20. $M_R$ değeri ile CBR değeri arasındaki ilişki .....	26
Şekil 21. Esneklik modülü, üst yapı sayısı ve maliyet ilişkisi .....	27
Şekil 22. CBR değeri ile su muhtevası arasındaki ilişki .....	28
Şekil 23. Taban zemini CBR değeri ile tabaka kalınlıkları arasındaki ilişki. ....	29
Şekil 24. Farklı çaplardaki plakaların zemin boyunca oturma grafiği. ....	33
Şekil 25. CBR değeri ile yatak katsayısı arasındaki ilişkinin grafiksel gösterimi. ....	37
Şekil 26. CBR değeri ile Westergaard yatak katsayısı arasındaki ilişki .....	38
Şekil 27. Mevsimsel değişikliklerin k değeri üzerindeki etkisi .....	39
Şekil 28. Zemin cinslerinin değişik su muhtevaları için yatak katsayıları grafiği. ....	41

Şekil 29. Zeminin kuru ve ıslak durumdaki k değeri grafiği. ....	42
Şekil 30. Kaba ve ince daneli zeminlerin yatak katsayısı grafiği.....	43
Şekil 31. 1986 AASHTO rijit kaplama tasarımının tabii zemin k değerine duyarlılığı.....	44
Şekil 32. 1972 AASHTO rijit kaplama tasarımının k değerine duyarlılığı.....	45
Şekil 33. Alttemel kalınlığı ile yatak katsayısı arasındaki ilişki .....	46
Şekil 34. Plaka çapı ile yatak katsayısı arasındaki ilişki. ....	47
Şekil 35. Plaka çapı ile oturma miktarı arasındaki ilişki.....	47
Şekil 36. Yük - oturma eğrileri.....	48
Şekil 37. Elastisite modülü-k değeri ilişkisinin plaka çapına bağlı değişim grafiği. ....	49
Şekil 38. Yatak katsayısı ile plaka çapı arasındaki ilişki. ....	50
Şekil 39. Hesaplamalar sonucu elde edilen yatak katsayısı değerleri.....	51
Şekil 40. Üstyapıda gerilme dağılımı .....	54
Şekil 41. Zemin yüklerinin neden olduğu basınç soğanı çizgileri .....	55
Şekil 42. 10 ve 100 cm çaplı plakaların zeminde oluşturduğu gerilme dağılımları .....	56
Şekil 43. Plaka boyutlarına ve malzeme cinsine bağlı olarak yol tabakalarında meydana gelen gerilme dağılımı .....	56
Şekil 44. Tabaka derinliği boyunca vektör dağılımı. ....	62
Şekil 45. Yükleme altında tabakalardaki düşey deformasyonlar .....	62
Şekil 46. Düşey oturmalara bağlı olarak oluşan toplam birim şekil değiştirme miktarlarının tabakalardaki dağılımları .....	62
Şekil 47. 6 cm kalınlıkta plaka modeli. ....	64
Şekil 48. 9 cm kalınlıkta plaka modeli. ....	64

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1. Koni penetrasyon (CPT) deneyinin üstünlükleri ve sakıncaları .....	3
Tablo 2. Standart penetrasyon (SPT) deneyinin üstünlükleri ve sakıncaları. ....	6
Tablo 3. Düşen ağırlıklı deflektometre (FWD) deneyinin üstünlükleri ve sakıncaları. ....	10
Tablo 4. Plaka yükleme (PLT) deneyinin üstünlükleri ve sakıncaları .....	21
Tablo 5. Çeşitli malzemeler için tipik CBR ve esneklik modülü değerleri.....	26
Tablo 6. Zemin cinslerine göre CBR değerleri. ....	30
Tablo 7. Zemin cinsine bağlı olarak tahmini elastisite modülü değerleri .....	31
Tablo 8. Kuru ve ıslak koşullar altında zemin taşıma kapasitesi ve E değerleri. ....	32
Tablo 9. Yatak katsayısı ile CBR değeri arasındaki ilişki.....	36
Tablo 10. Alttemel zemin cinsleri ve yaklaşık k değeri aralıkları.....	38
Tablo 11. Zemin cinslerinin farklı su muhtevalarındaki yatak katsayıları .....	40
Tablo 12. Farklı zemin türlerinin plaka yükleme deneyinden elde edilen k değerleri .....	42
Tablo 13. Uluslararası Yapı Kodu (CABO)'na göre zemin taşıma kapasitesi değerleri ....	52
Tablo 14. Yol üstyapısı tabakaları ve kalınlıkları .....	52
Tablo 15. Deney zemini için model parametreleri. ....	60
Tablo 16. Farklı çap ve yüklemeler altında temel tabakasında oluşan düşey gerilme değerleri. ....	63

## SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Yükleme plakasının birim alanı
B	: Plaka genişliği (cm)
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı değeri (%)
$C_u$	: Drenajsız kesme mukavemeti
D	: Plaka çapı (cm)
DPT-N	: Dinamik penetrasyon deneyi penetrasyon direnci
E	: Elastisite modülü ( $\text{kN/m}^2$ )
$E_1$	: İlk yüklemeden elde edilen elastisite modülü
$E_2$	: İkinci yüklemeden elde edilen elastisite modülü
$E_s$	: Kumların elastisite modülü
$E_{SB}$	: Alttemelin elastisite modülü
F	: Uygulanan yük (kN)
h	: Tabaka kalınlığı (cm)
k	: Yatak katsayısı ( $\text{kN/m}^3$ )
$k_{30}$	: 30 cm çaplı plaka ile elde edilen yatak katsayısı
$k_{(B \times B)}$	: Kare ( $B \times B$ boyutlu) plaka için yatak katsayısı
$k_{yaş}$	: Islak zeminin yatak katsayısı
LL	: Likit limit
$M_R$	: Esneklik modülü ( $\text{kN/m}^2$ )
$m_v$	: Hacimsel sıkışma indisi
N	: Penetrasyon deneyi için vuruş sayısı
P	: Basınç ( $\text{kN/m}^2$ )
PL	: Plastik limit
$P_s$	: CBR deneyi için standart basınç
$P_{yaş}$	: Islak zemeine gelen basınç
R-Değeri	: HVEEM Direnci
SN	: Üstyapı sayısı
SPT-N	: Standart penetrasyon deneyi penetrasyon direnci
v	: Kayma dalgası hızı

W	: Zeminin su muhtevası (%)
q	: Zeminin taşıma kapasitesi
v	: Poisson oranı
$\emptyset$	: İçsel sürtünme açısı
$\Delta$	: Plakanın oturma miktarı (cm)
$\gamma$	: Birim hacim ağırlık
$\gamma_d$	: Doygun birim hacim ağırlık

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Yol üstyapılarının tasarımında, yol mühendisliği yapılarına ait yüklerin; zeminde bir göçme veya müsaade edilen sınırın üzerinde bir oturma meydana getirmeyecek şekilde aktarılması ve aynı zamanda ekonomik olarak tasarlanması esastır. İyi etüt edilmemiş zemin üzerine inşa edilen bir yapıda, zamanla farklı oturmalarından dolayı tekerlek izleri, çatlaklar ve hatta göçmeler olabilmektedir [1]. Bundan dolayı, taban zemininin yanısıra üstyapı zeminlerinin de iyi etüt edilmesi gerekmektedir [2].

Plaka yükleme deneyi, üzerine çok büyük yapıların inşa edileceği zeminler için çok güvenilir sonuçlar vermese bile daha küçük yüklerin etkidiği yol üstyapısı tasarımında oldukça başarılı bir deneydir. Yol üstyapısı tasarımında tasarım mühendisleri, zeminin taşıma kapasitesini bilmek zorundadırlar. Plaka yükleme deneyi, sahada bu amaca hizmet etmek için kullanılır. Deneyden elde edilen sonuçlar, tasarım parametresi olarak veya tasarım varsayımlarını doğrulamak için kullanılabilir. Bu sonuçlardan elde edilen veriler doğrultusunda hazırlanan basınç-oturma grafiği, üstyapı tasarımında tavsiye edilen izin verilebilir basınç ve yol tasarımı için yatak katsayısı ile ilgili ham verileri içerir. Plaka yükleme deneyi, özellikle yatak katsayısını doğrudan vermesi açısından önemli bir deneydir. Yatak katsayısı bulunduktan sonra basit formül ve abaklardan yararlanılarak zeminin diğer mekanik özelliklerinin (CBR değeri, esneklik modülü, elastisite modülü, ...) tayin edilmesi çok kolay olmaktadır.

Plaka yükleme deneyi birçok ülkede standartlaştırılmıştır ve uygulamada da sıklıkla kullanılmaktadır [3, 4, 5]. Yurtdışında Illinois Karayolları, Minnesota Yol Araştırma Ağı (MnROAD) ve Colorado Karayolları (CDOT) gibi birçok kuruluş tarafından asfalt kaplamaların esnek üstyapıların tasarım ve değerlendirilmesinde kullanılmaktadır [6]. Türkiye’de ise bu deneyi kullanan kuruluş sayısı çok az olmakla birlikte, D. S. İ. tarafından baraj tasarımlarında ve bazı özel firmalar tarafından da tabii zemin üzerinde kullanılmaktadır. Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü’nde ise zemin taşıma kapasitesinin ölçülmesinde düşen ağırlıklı deflektometre deneyi kullanılmaktadır. Oysa bu deney aleti çok pahalı olup ince tabaka kalınlıklarında yanıltıcı sonuçlar vermektedir.

Plaka yükleme deneyinin en büyük sakıncası etki derinliği problemidir. Özellikle karayolu üstyapısı gibi tabakalı zeminlerde bu problemin çözülmesi gerekmektedir. Çünkü deneyden elde edilen verilerin zeminin hangi tabakasına ait olduğunu bilinememektedir. Bu çalışmada, tabakalı zeminlerde etki derinliği problemine çözüm aramak için sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Bu anlamda, plaka boyutlarına ve yüklemesine bağlı olarak alttemel ve temel tabakalarında oluşan düşey gerilme dağılımlarına bakılmıştır. Buradaki amaç farklı plaka çapı, plaka kalınlığı ve yüklemeler altında temel tabakası altında oluşan gerilme değerlerinin sıfır olduğu durumu tespit etmektir. Çünkü tabaka altındaki gerilme değerlerinin sıfırdan büyük olması, alttemel tabakasında gerilme ve deformasyonların oluştuğu, dolayısıyla da plaka yükleme deneyinin aslında her iki tabakanın değerlerini okuduğu anlamını taşımaktadır. Bundan dolayı temel tabakasının gerçek yük-oturma ilişkisi çıkarılamamış olmaktadır.

## **1.2. Zemin Taşıma Kapasitesinin Tayininde Kullanılan Başlıca Deneyler**

Zemin taşıma kapasitesini belirlemek için kullanılan başlıca deneyler aşağıda açıklanmaktadır.

### **1.2.1. Koni Penetrasyon (CPT) Deneyi**

Hollanda koni deneyi veya koni penetrasyon deneyi olarak adlandırılan CPT deneyi, ilk kez Hollanda'da 1934 yılında kumların bağıl birim hacim ağırlığını ölçerek kazık hesaplaması amacıyla kullanılmıştır. Türkiye'de ise zemin etütlerinde 1970'li yıllardan itibaren koni penetrasyon deneyi kullanılmaya başlanmış olup, günümüzde alüvyonel zemin koşullarının hâkim olduğu bölgelerde yaygın bir kullanım alanına erişmiştir [7].

Koni penetrasyon deneyinin amacı; zemine sabit bir hızla batırılan bir koninin batması sırasında, koniye tatbik edilen yük ile basınç artışı arasındaki ilişkiyi saptamaktır (Şekil 1) [8]. CPT genellikle 45 m derinliğe kadar uygulanır ama 90 m derinliğe kadar uygulamak da mümkündür [9]. CPT verileri, temel tasarımlarında, zemin taşıma gücü hesaplanmasında ve sıvılaşma potansiyeli tespitinde kullanılır. Ayrıca bu veriler diğer deney yöntemlerini doğrulamak için kullanılır [10]. Deneyin birçok üstünlüğünün olmasının yanısıra sakıncaları da vardır (Tablo 1).



Şekil 1. CPT deney aleti [11]

Tablo 1. Koni penetrasyon (CPT) deneyinin üstünlükleri ve sakıncaları

#### Üstünlükleri

- Tabakaların daha detaylı tarifi için okumalar her 2 cm'de bir alınabilir.
- Tekrarlanabilir ve güvenilir oturma detayları verir.
- Aşgari zemin tahribatı yapar.
- Numune alımı çok zor olan yumuşak killer ve siltli zeminler için uygundur.
- Jeolojik tabaka profillerini tam olarak elde edebilmektedir.
- Deney sonuçlarının yorumlanmasında dünyada çok yaygın olarak kullanılan teorisi kuvvetli yöntemlerin bulunmaktadır.

#### Sakıncaları

- Ülkemizde deney ekipmanı sınırlıdır.
- Deney, bu konuda uzman bir operatör tarafından yapılmalıdır.
- Belirli aralıklarla ölçümlenmeler yapılması gerekmektedir.
- Zeminden numune alınamamaktadır.
- Çakıllı ve bloklu zeminlerde uygulanamamaktadır.
- Sonuçlar, deneyi yapan operatöre bağlı olarak değişebilmektedir.
- Deney aletinin maliyeti fazla olup yaklaşık 40000 \$ civarındadır.



### 1.2.2. Dinamik Koni Penetrasyon (DCPT) Deneyi

Dinamik koni penetrasyon (DCPT) deneyi, ince daneli ve granüler taban zemininin, granüler temel ve alttemelin, zayıf çimentolu malzemelerin tabii durumundaki sağlamlığının belirlenmesi için kullanılan bir deneydir. Günümüzde, amaca uygun olarak değişik tip ve boyutlarda dinamik penetrometreler kullanılmaktadır.

Dinamik penetrometreler, 16 mm çapında, 1 m uzunluğunda birbirinin ucuna monte edilebilen çelik tijlerden oluşmaktadır. En uçtaki çelik çubuğun ucunda, tij çapından farklı olarak 20 mm çapında ve 60 açığa sahip darbelere karşı dayanıklı bir konik başlık bulunmaktadır. Bu konik uç 575 mm yükseklikten düşürülen 8 kg'lık bir ağırlıkla zemine çakılır. Bu çakılma sırasında DCPT sayısı olarak adlandırılan değerler bulunur. DCPT sayısının düşük olması, dayanım değerlerinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir [13].

Illinois Karayolları (IDOT), inşaat çalışmaları öncesinde ve esnasında, tabii zeminin sabitliğini kontrol etmek amacıyla sıklıkla DCPT deneyini kullanmaktadır [12]. Ülkemizde ise son yıllarda, T. C. K. Genel Müdürlüğü Araştırma Laboratuvarı, Gazi Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı ve diğer bazı kuruluşlar tarafından da kullanılmaya başlanmıştır.

### 1.2.3. Statik Koni Penetrasyon Deneyi

Statik koni penetrasyon (CPT) deneyinde bir çelik boru ile bu borunun içinden geçen ve ucunda bir koni bulunan bir klavuz çubuğu, sırayla zemine itilerek uç ve sürtünme dirençleri ayrı ayrı saptanır. Deney için sondaj kuyusu açmaya gerek yoktur [9]. Deneyde önce ucu 60° açılı ve uç alanı 10 cm<sup>2</sup> olan koni, klavuz çubuğuna bağlanarak zemine sabit bir hızla (20 mm/s) sürekli olarak itilir. Bu itme işlemi genellikle hidrolik krika ile yapılır ve basınçlar kaydedilir. Sondalama sırasında ölçülen uç direnci ve çeper sürtünmesi değerleri ile zemin özelliklerinin derinlikle değişimi saptanır. Herhangi bir derinlikteki uç direnci, koniyi batırmak için gerekli yükün uç alanına bölümüdür [8].

Gevşek ve üniform zeminlerde başarıyla kullanılabilen statik CPT deneyi, sıkı, köşeli, daneli ve çakıllı zeminlerde iyi sonuç vermemektedir. Deney derinliği boyunca zeminin kesintisiz profilini çıkarmak mümkün olsa da, deneyin en olumsuz yönü örnek alınamamasıdır [10]. Bu deneyden elde edilen verilerin, zeminlerin diğer özellikleri ile

karşılaştırılması sonucunda; kumların içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), killerin drenajsız kesme mukavemeti ( $C_u$ ), killerin hacimsel sıkışma indisi ( $m_v$ ), kumların elastisite modülü ( $E_s$ ) gibi parametreler dolaylı olarak tahmin edilebilmektedir [URL-1].

#### 1.2.4. Elektronik Koni Penetrasyon Deneyi

Mekanik penetrometre kullanımında yük değerleri operatör tarafından manometreden okunur. Elektronik tipte ise cihaz, yük değerlerini direkt olarak okur ve bir bilgisayara kaydeder. Ayrıca zemin parametreleriyle ilgili tüm veriler de bilgisayar tarafından okunup, ekranda gerçek zamanlı olarak belirli derinlik aralıklarında kaydedilir [14].

Elektronik CPT deneyinin, sürekli ölçüm alabilmesi, kullanıcı hatalarını minimuma indirmesi ve diğer CPT deneylerine nazaran daha süratli ve sağlıklı ölçümler yapılabilmesi gibi üstünlükleri vardır. Bu deney yumuşak kil ve kohezyonsuz daneli zeminlerde çok iyi sonuçlar vermesine karşın, yüksek yoğunluklu malzemeye sahip zeminlerde uygulanamaz [15].

#### 1.2.5. Standart Penetrasyon (SPT) Deneyi

Standart penetrasyon deneyi, SPT, 1920'lerden itibaren uygulanan faydalı bir arazi deneyidir (Tablo 2). Günümüzde çok geniş bir veri tabanına sahip olup yaygın olarak da uygulanmaktadır [10]. SPT oldukça kapsamlı şekilde Kuzey ve Güney Amerika, Büyük Britanya ve Japonya'da kullanılmaktadır [16]. Japonya'da ön inceleme aşamasında sondajların % 90'dan fazlası SPT ile birlikte yapılmaktadır [17]. Bu deney Türkiye'de ve birçok ülkede en fazla tercih edilen deneydir. Türkiye'de SPT hemen hemen her zemin inceleme programının ana kısımlarından biri olarak kullanılmaktadır [18].

Standart penetrasyon deneyi yapmak için kullanılan alete penetrometre denilmektedir. Penetrometre aleti, iki ucu açık, boylamasına iki yarım parçaya ayrılabilen silindirik çelik bir tüptür. Tüpün iç çapı 3,5 cm, dış çapı 5 cm, uzunluğu 65 cm boyutlarındaki ayrılabilir numune alıcısı, bir kılavuz çubuğuna bağlanır ve sondaj kuyusunun tabanına yerleştirilir. Tüp, 76 cm serbest düşüm yapabilen 63,5 kg ağırlığındaki bir şahmerdan ile çakma yoluyla zemine gömülür. Tüp 15 cm zemine gömüldükten sonra 30 cm daha gömülebilmesi için gerekli olan darbe sayısı zeminin penetrasyon direnci

sayısı (SPT-N) olarak tarif edilir. Ayrıca tüpün zemine her 7,5 cm'lik batmasında tatbik edilen vuruş sayısı da kaydedilir. Eğer 50 vuruşta 30 cm'lik batma elde edilemiyorsa deneye devam edilmez. Eğer zemin çakıllı ise deney, tüpün ucuna 60<sup>0</sup> 'lık bir konik uç takılarak yapılır [8].

SPT deneyi, yumuşak killer ve gevşek kumlardan, çok sert killer ve sıkı kumlara kadar çeşitli zemin türlerinde uygulanabilmektedir. SPT-N değeri, ayrık daneli zeminler üzerinde inşa edilen yapıların taşıma gücü ve oturmasının hesabında, ayrık daneli zeminlerin önemli fiziksel ve mühendislik özelliklerinin tahmin edilmesinde, ayrık daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyeli ile dinamik bir özellik olan kayma dalgası hızının (v) tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. SPT ayrıca, yapılan dolguların kontrolünde de kullanılmaktadır. İnce daneli zeminler için SPT deneyi ile bulunan sonuçlar, ayrık daneli zeminlerdeki kadar güvenilir olmamaktadır [19].

Tablo 2. Standart penetrasyon (SPT) deneyinin üstünlükleri ve sakıncaları

<p>�st�nl�kleri</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deney sırasında numune elde edilebilmektedir.</li> <li>• ok basit ve kolay yapılabilir bir deneydir.</li> <li>• Birçok zemin için uygulanabilir bir deneydir.</li> <li>• Yumuşak ve zayıf kayalarda da uygulanabilmektedir.</li> <li>• �lkemizde çoğu sondaj firması tarafından yapılabilir [19].</li> <li>• Deney, uzun yıllardan beri kullanılmakta olup zemin parametreleri ile ilgili çok sayıda kullanışlı bağıntı geliştirilmiştir [20].</li> </ul> <p>Sakıncaları</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• �rselenmiş numuneler alınmakta ve sadece tanımlama deneylerinde kullanılmaktadır.</li> <li>• Deney sonuçları, numune alımı, sondaj, ekipman ve operatör karakteristiklerinden büyük ölçüde etkilenmektedir [20].</li> <li>• İnce daneli zeminlerde, ayrık daneli zeminler kadar güvenilir sonuçlar vermemektedir.</li> <li>• Sert killer ve molozlu-bloklu zeminlerde yanıltıcı sonuçlar vermektedir.</li> <li>• Zemin direncinin derinlik boyunca değişimi sürekli olarak gözlenememektedir. Bu nedenle, nispeten sıkı tabakalar arasında bulunan ince ve zayıf tabakalar atlanabilmektedir [20].</li> </ul>
---

### 1.2.6. Dinamik Penetrasyon (DPT) Deneyi

Zemin içeriği killi, kumlu ve ince çakıl olduğu durumlarda, sondaj adedini azaltmak amacıyla gerçekleştirilmektedir [21]. Dinamik penetrasyon deneyi (DPT), standart penetrasyon deneyi (SPT) ile aynı prensiplere sahiptir. Bu deneyde 64 mm çaplı ve 60° tepe açılı konik bir başlık kullanılır. 63,5 kg'lık bir ağırlık 76 cm yükseklikten düşürülür ve her 10 cm'lik ilerleme için darbe sayısı tespit edilir (Şekil 2) [22]. Dinamik penetrasyon direnci, DPT-N, konik ucu belirli bir derinlik boyunca çakmak için gerekli darbe sayısı olarak tanımlanmaktadır. Deney için kullanılan aletin tipine bağlı olarak genellikle 10 cm derinlik için darbe sayısı sayılarak, penetrasyon direnci sayısı olarak DPT-N<sub>10</sub> kaydedilmektedir [20].



Şekil 2. DPT deney aleti [URL-2].

Dinamik penetrasyon deney sonuçları, zemin cinsinin bilindiği yerlerde zeminin taşıma kapasitesinin bulunması için kullanılmaktadır. Deneyden elde edilen dinamik darbe sayısı DPT-N<sub>10</sub>, statik darbe sayısı SPT-N<sub>30</sub>'a çevrildikten sonra SPT deneyinde verilen esaslar doğrultusunda zeminin müsaade edilebilir taşıma gücü bulunabilmektedir [23].

Volkanik kül, killler, kumlar ve çakıllar üzerinde yapılan bir çalışmada [24], standart penetrasyon darbe sayısı (SPT-N<sub>30</sub>) ile dinamik penetrasyon darbe sayısı (DPT-N<sub>10</sub>) arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\text{SPT-N}_{30} = 2 \times \text{DPT-N}_{10} \quad (1)$$

Çeşitli amaçlarla, farklı sahalarda yapılan başka bir çalışmada [25] ise, standart penetrasyon ve dinamik penetrasyon deneylerinin sonuçları incelenmiş ve kohezyonsuz zeminler için en uygun ilişki için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$\text{SPT-N}_{30} = 1,7 \times \text{DPT-N}_{10} \quad (2)$$

Burada;

DPT-N<sub>10</sub> : Dinamik penetrasyon direnci

SPT-N<sub>30</sub> : Standart penetrasyon direnci

Dinamik penetrasyon deneyinde, deney sırasında konik uç çıkartılıp yerine numune alıcı takılarak, istenilen derinlikten numune alınabilmektedir. Böylece, zeminin sınıfının tespiti için gerekli olan numune elde edilmektedir. DPT deneyi, özellikle CPT uygulanamayan yüksek dirençli alüvyonlu tabakalarda kullanışlı bir deneydir. İncelenen deney sahasının çok büyük olması durumunda, yapılan sondajlar arasında belirli mesafelerde uygulanarak, incelenen sahadaki zemin profilinin doğru olarak elde edilmesi sağlanabilmektedir [20].

Sondaj kuyusu açma işleminden kaynaklanan olumsuz etkileri ortadan kaldırmasına rağmen, genel olarak SPT'nin sahip olduğu sakıncaların hepsine maruz kalmaktadır. Kuyu açmadan deney yapma durumunda ise, sondaj tijlerinin sürtünmesi dikkate alınmalıdır. Bu durum için muhafazalı konik başlık kullanılması tavsiye edilmektedir.

Deney sonuçlarında, eğer varsa, sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıpları nedeniyle düzeltme gereklidir. SPT' de ise böyle bir düzeltmeye gereksinim yoktur [25]. Dünya genelinde kullanılan DPT deney aletindeki çeşitlilikler nedeniyle standardizasyon eksikliği mevcuttur. Sonuçların doğru değerlendirilmesi de tij sürtünmesinin iyi bir şekilde gözlenmesine bağlıdır [20].

### 1.2.7. Düşen Ağırlıklı Deflektometre (FWD) Deneyi

Esnek üstyapıların mekanik özelliklerinin hesaplanabilmesi için, tahribatsız deney metotları yaygın olarak tercih edilmektedir. Tahribatsız deney metotları arasında sıklıkla kullanılanlardan biri de düşen ağırlıklı deflektometre, FWD, deneyidir [26]. FWD deney aleti ilk kez Fransa'da geliştirilmiş daha sonra Danimarka ve İsveç'te üç farklı tipi üretilmiştir (Şekil 3).



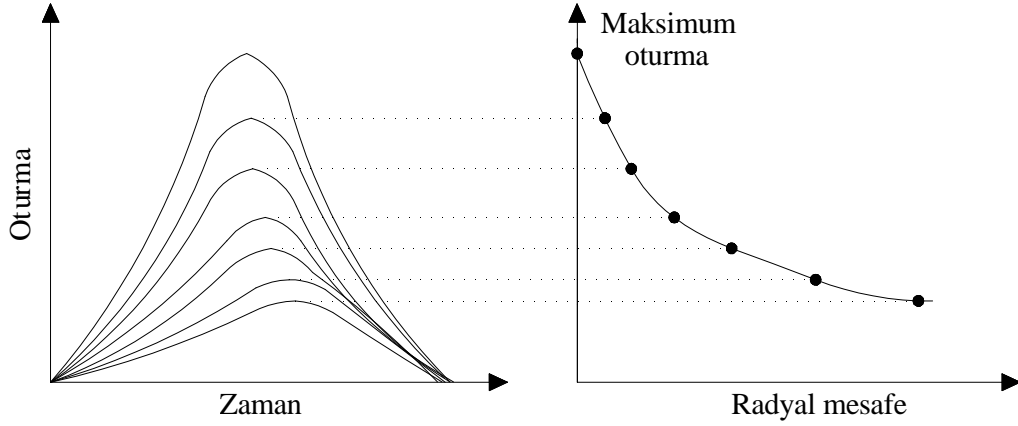
Şekil 3. FWD deney aleti [27].

FWD deneyi, son on yıldır üstyapı tasarımında kullanılmaktadır. Deneyin esnek, rijit ve blok üstyapılar için uygulanması, kaplamasız yollardan havaalanlarına kadar çok farklı üstyapılarda kullanılması gibi birçok üstünlüğü vardır (Tablo 3) [28].

Geçici yükleme esasına göre çalışan FWD deney aletinde belirli bir ağırlık, uygulanmak istenilen etki seviyesine göre belirli bir yükseklikten, yol kaplaması yüzeyine yerleştirilmiş bir dairesel plaka üzerine düşürülür. Yükleme 6,7 kN ile 156 kN arasındadır. Zemin yüzeyi ile plaka arasında ani darbe etkisinin azaltılması için lastik bir conta bulunur. Yüklemenin yapıldığı yerden belirli uzaklıklardaki oturmalar, bir kiriş üzerinde bulunan ölçüm sensörleri (genellikle yedi adet) yardımı ile ölçülür. Yükleme belirli bir frekansta ve zaman aralığında yapılır. Yükleme, sinüzoidal bir biçimde uygulanır ve frekansı  $0,025 \text{ sn}^{-1}$  ile  $0,030 \text{ sn}^{-1}$  arasında değişir [29].

FWD deneyi ile yol yapısının birçok bölgesinde, uygulanan yükler sebebiyle oluşan zamana bağlı oturma değerleri ölçülmektedir. Uygulamada, FWD deneyinden elde edilen oturma değerleri, geri-hesaplama programları yardımı ile üstyapı tabakalarına ait mekanik

özelliklerin (elastisite modülü,  $E$ , ve poisson oranı,  $\nu$ ) belirlenmesi için kullanılır. Fakat, bu programlar, parametre tanımlama algoritmaları kullanarak optimizasyon yapmaktadır, bu durum da işlemsel zorluğa ve zaman kaybına neden olmaktadır. Şekil 4'te tipik bir FWD oturma miktarı kaydı ve oturma çanağı gösterilmektedir.



Şekil 4. Tipik bir FWD oturma grafiği [26].

Tablo 3. Düşen ağırlıklı deflektometre (FWD) deneyinin üstünlükleri ve sakıncaları

<p>Üstünlükleri</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rijit kaplamalarda tabakalar arası yük transferlerini hesabı ve tabaka eklemlerinin altındaki temel malzemesinin büyük bir erozyonu durumunda oluşan büyük boşlukların tespitinde kullanılmaktadır.</li> <li>• Tahribatlı deneylere nazaran bir iş gününde 200-300 deney yapılabilecek kadar hızlıdır.</li> <li>• Yükün uygulandığı noktadaki maksimum oturmanın yanısıra farklı mesafelerdeki 7 sensör yardımıyla tüm oturmaları elde eder.</li> <li>• Kaplama malzemesinin kaldırılmasına gerek kalmadan yapılabilmektedir.</li> </ul> <p>Sakıncaları</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deney sonuçları, deneyde kullanılan aletin modeline, belirlenen deney prosedürüne ve geri hesaplama yöntemine göre çoğu kez değişmektedir.</li> <li>• Deneyin yapılması için mühendis gereklidir.</li> <li>• Deney aletinin maliyeti çok yüksek olup, yaklaşık olarak 500000 \$ civarındadır.</li> </ul>
--

### 1.2.8. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

Çekme gerilmesi almayan yol ve pist gibi üstyapıların kalınlık hesabında CBR deneyi kullanılır [30]. Tamamen ampirik olmasına rağmen altyapının taşıma gücü hakkında karşılaştırmalı bilgi verir [31]. Mühendislerin son yıllarda CBR değerlerini esneklik modülüne çevirecek ampirik bağıntılar kullanmasıyla, esneklik modülü ( $M_R$ ) deneyinin yerini CBR deneyi almaya başlamıştır. Ülkemizde bu deneyi, Milli Savunma Bakanlığı, Ulaştırma Bakanlığı ve Türk Hava Kuvvetleri kullanmaktadır [32].

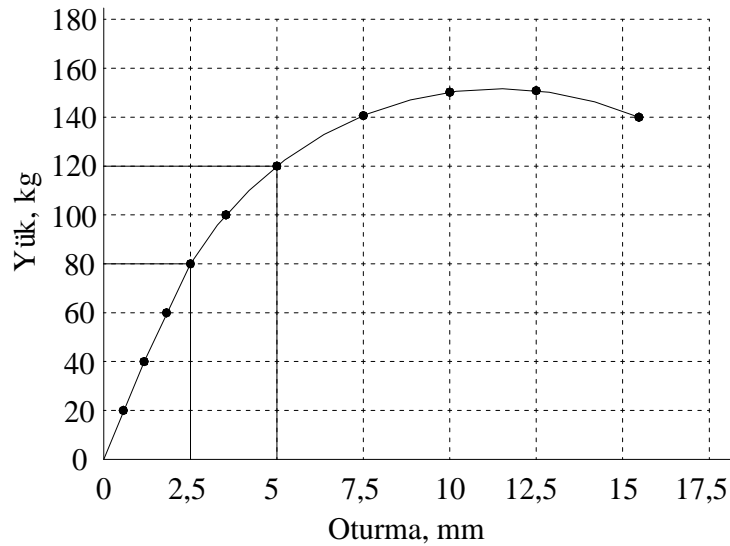
CBR deneyi, kesit alanı  $19,35 \text{ cm}^2$  olan silindrsel bir pistonun belirli bir hızla zemine itilerek elde edilen yük-batma bağıntısının bulunmasını kapsar (Şekil 5). CBR değeri, herhangi bir batma değeri için uygulanan basıncın, standart bir basınca oranı olarak tanımlanır. CBR değeri aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilmektedir [33].

$$\text{CBR (\%)} = (P / P_s) \times 100 \quad (3)$$

Burada;

P : Deney basıncı (2,54 mm ve 5,08 mm batmayı sağlayan basınç miktarları)

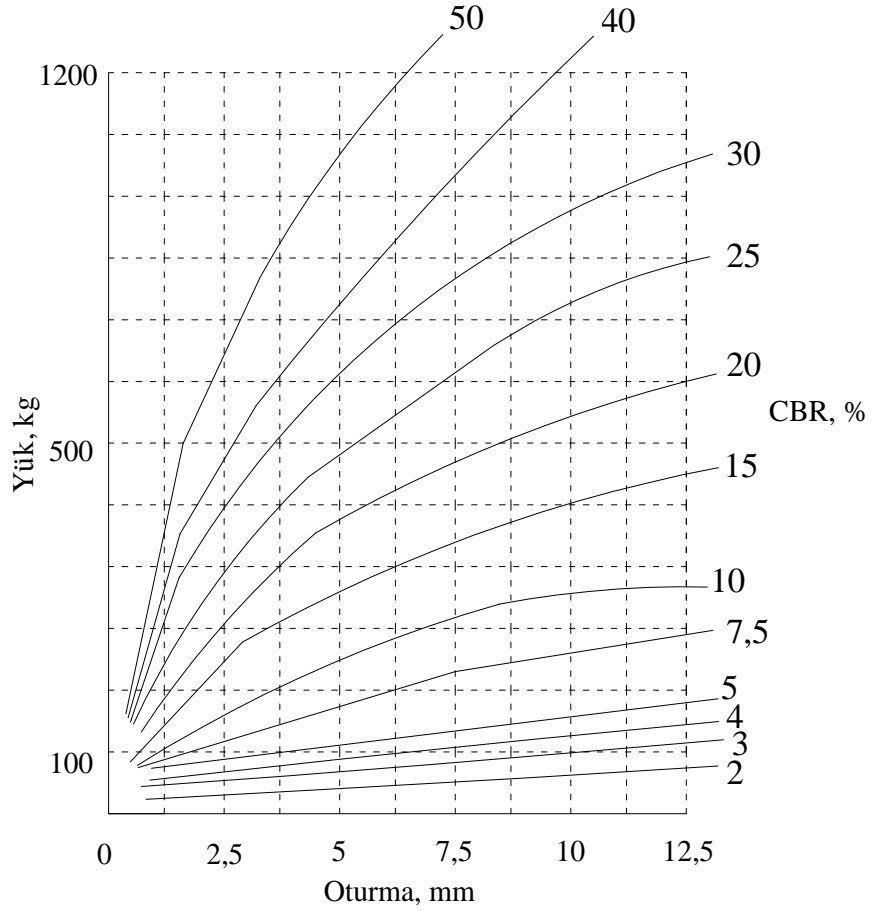
$P_s$  : Standart basınç (2,54 mm batma için  $70,31 \text{ kg/cm}^2$ , 5,08 mm için  $105,46 \text{ kg/cm}^2$ )



Şekil 5. CBR deneyinden elde edilen yük-oturma grafiği [33].



CBR değeri olarak, 2,54 mm batmayı sağlayan oran alınır. Eğer 5,08 mm batmadaki oran, 2,54 mm batmadakinden daha büyükse deney tekrarlanır. Yine aynı sonuç elde ediliyorsa, 5,08 mm'lik batmadaki oran CBR değeri olarak alınır [34]. CBR değerini Şekil 6'daki yük-oturma eğrileri ile belirlemek uygulamada büyük kolaylık sağlar [35].



Şekil 6. CBR deneyinde kullanılan standart yük-oturma grafiği [35].

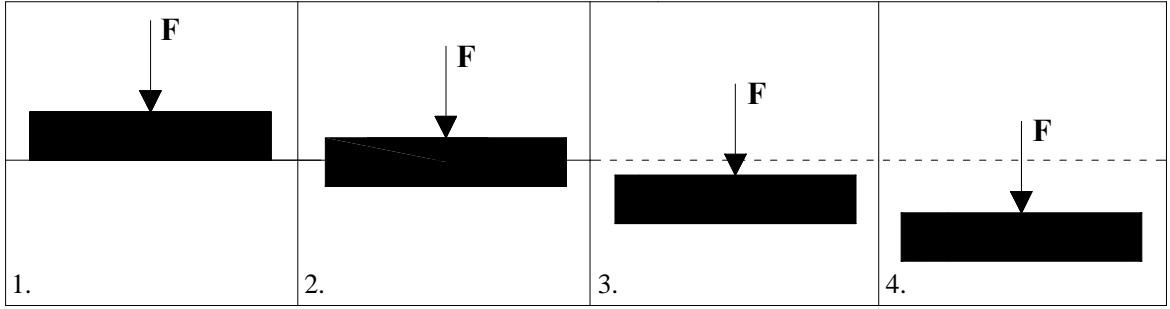
### 1.2.9. Plaka Yükleme (PLT) Deneyi

Plaka yükleme deneyi ile ilgili ayrıntılı bilgi Literatür Taraması kısmında verilmektedir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Plaka Yükleme Deneyi

Plaka yükleme deneyi, çapları 30-100 cm arasında değişen daire veya 30,5 cm kenarlı kare şeklinde olan rijit plakaların belirli adımlarla yüklenmesi ve her bir adımda gerçekleşen oturma miktarının kayıt edilmesi şeklinde yapılır (Şekil 7). Uygulanan her yük değerinde oturmalar sabit hale gelene kadar beklenir ve zemin yenilene kadar deneye devam edilir [36].



Şekil 7. Plaka yükleme deneyinde plakanın zemine batma aşamaları [48]

Yüklenen plaka altındaki toprak zemin veya kaya tabakalarının sıkışmasının genellikle tek doğrultuda (yükleme doğrultusunda) meydana geldiği kabul edilmektedir. Mühendislik projelerinin temeline aktarılan düşey yükler, yatay düzlemler boyunca oluşan sürtünme ve adezyon kuvvetleri nedeniyle temelin yatay doğrultuda şekil değiştirmesini sınırlamaktadır. Bu nedenle oturmaların hesabında tek boyutlu çözümler belirli sınırlar dâhilinde yeterli bulunmaktadır. Bu sebeple plakanın oturma miktarı; plakaya uygulanan yüklerden dolayı zeminin yükleme doğrultusundaki yani düşey doğrultudaki hareketinin miktarı olup, kalıcı ve elastik deformasyonlarının toplamına eşittir [37].

Plaka yükleme deneyi, yapılması sanıldığından kolay olmasının yanı sıra, zeminin taşıma kapasitesini doğrudan yansıtmaya özelliği nedeniyle de rağbet edilmesi gereken bir arazi deneyidir (Tablo 4). Zeminin taşıma gücünü ölçen diğer deneylerde olduğu gibi plaka yükleme deneyinde de  $\text{kg/cm}^2$  veya  $\text{ton/m}^2$  gibi doğrudan bir mukavemet değeri

tanımlanamaz [38]. Bu deney, yol yapısının taban zemini, alttemel, temel ve hatta kaplama tabakasının taşıma gücünün ölçülmesinde kullanılabilir [39].

Plaka yükleme deneyleri yurtdışında, Washington Karayolları, Illinois Karayolları, Minnesota Yol Araştırma Ağı (MnROAD), Colorado Karayolları,... gibi birçok kuruluş tarafından esnek üstyapıların tasarım ve değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca dünyadaki pek çok ülke tarafından da standartlaştırılmıştır [3, 5, 12].

### **2.1.1. Deneyin Yapılışı**

#### **2.1.1.1. Yükleme Zemininin Hazırlanması**

Plaka yükleme deneyi, homojen dağılıma sahip çakıllı ve taşlı toprak zeminler için en elverişli yöntemdir. Ayrıca her çeşit zeminde de kullanılabilir [37]. Bazı araştırmacıların [40, 41], belirttiği gibi zemin özelliklerinin derinlikle değiştiği durumlarda plaka yükleme deneyi yanıltıcı olmaktadır. Bu nedenle plaka yükleme deneyleri kaya zeminlerde uygulanmamasını, ancak tam kohezyonlu veya daneli toprak zeminler üzerinde bu deneyler mutlaka yapılmasını tavsiye etmişlerdir. Plaka yükleme deneyini kayalar üzerinde deneyerek farklı yük taşıma değerleri bulunan ve bu değerleri yorumlayan araştırmacılar da vardır [42, 43].

Deney, yüzeyde ya da açılmış bir çukur içerisinde yapılabilir. Deneyin çukur içinde yapılması durumunda çukur genişliğinin, plaka çapının en az 5 katı genişlikte olması öngörülmektedir. Böylece çukur derinliğinin deney sonucuna etkisi önlenmektedir [40]. Ayrıca deney sonuçları, zeminin yoğunluk ve rutubet miktarına göre değişmektedir. Bu nedenle deney sırasında zemin, sıkışmış ve optimum su muhtevasında olmalıdır [38]. Plaka yükleme deneyi için yeraltı su seviyesi indirilmişse sızma basınçlarının deneyde etkili olacağı da unutulmamalıdır.

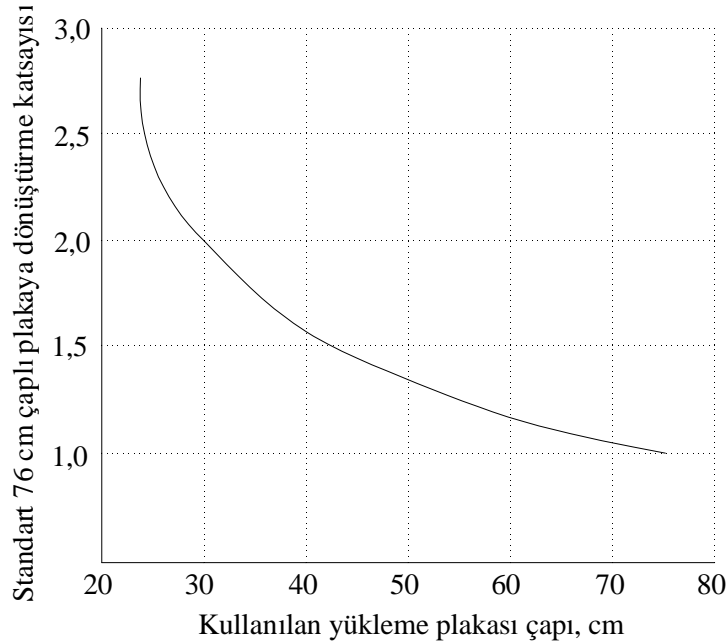
Plaka yükleme deneyi uygulamalarında, plakalar yerleştirilmeden önce zemin yüzeyi iyice sıkıştırılmalı, plaka yüzü zemin üzerine yataya paralel olarak yerleştirilmeli ve plaka, zeminle teması iyi olacak biçimde oturtulmalıdır [37]. Zeminle iyi temas sağlamak üzere, plakanın oturacağı alan dikkatlice düzenlenmeli ve tam temas sağlamak için üzerine ince bir kum tabakası serilmelidir [44]. Hindistan Standartları (ISI)'na göre [6], iyi oturma sağlamak için yükleme plakası bir ön yüklenip boşaltılmalıdır. Plakanın oturacağı alan hazırlanırken, zeminin örselenmemesine özen gösterilmelidir [45].

### 2.1.1.2. Yükleme Plakasının Seçimi

Kullanılan yükleme plakası büyüklüğünün oturma ve sıkışma üzerinde önemli ölçüde etkisi vardır. Göreceli olarak küçük yükleme plakalarıyla ancak, toprak zeminin fazla derinde olmayan tabakaları araştırılabilir. Bu nedenle küçük yükleme plakalarıyla yapılan deneyler karayolu, demiryolu ve havaalanı yapımında kullanılmaktadır [37]. Kullanılacak rijit plakanın alanı en az  $500 \text{ cm}^2$  olmalıdır. Ancak günümüzde  $1 \text{ m}^2$ 'den küçük plakaların verdiği sonuçlar toprak zeminler için şüpheyle karşılanmaktadır [37]. Deney için piyasada genellikle 30-76 cm çaplarında plakalar kullanılmaktadır.

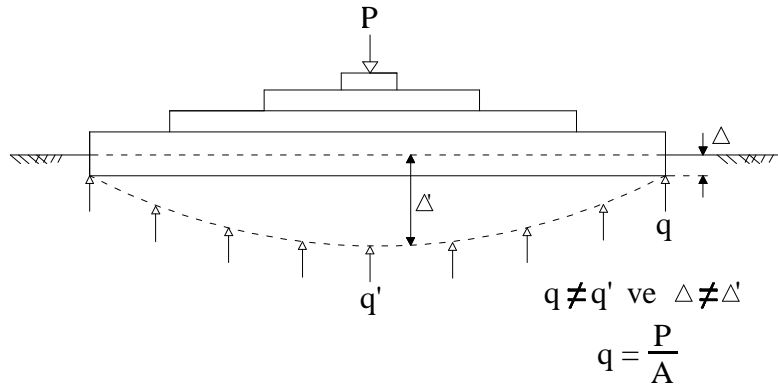
Alman Standartları Enstitüsü (DIN 18134)'ne göre [46], deney için rijit yükleme plakasının 30, 60 veya 76 cm standart çaplarında olması gerekmektedir. Normal durumlarda 30 cm çapındaki plakalardan yararlanılmaktadır. Daha büyük plakalar, en büyük dane çapı, plaka çapının 1/6'sından ( $D/6$ ) büyük olmamak üzere, zeminde iri daneler bulunduğu gereklidir. Fakat burada plaka etkisinin aşağı yukarı 2D derinliğine kadar uzanabileceği varsayımıyla, tabaka kalınlığının dikkate alınması gerekmektedir [39].

Tabii zeminin yatak katsayısını belirlemek için, uygulama yükünün çok büyük olmasını gerektiren bir zeminin varolması veya 76 cm çaplı plakanın olmaması durumunda daha küçük çaplı plakalar da kullanılabilir. Bu durumda, ölçülen değerler "Deneysel Grafik" (Şekil 8) kullanılarak düzeltilmelidir [2].



Şekil 8. Plaka yüklemeye deneylerinde kullanılan deneysel grafik [31].

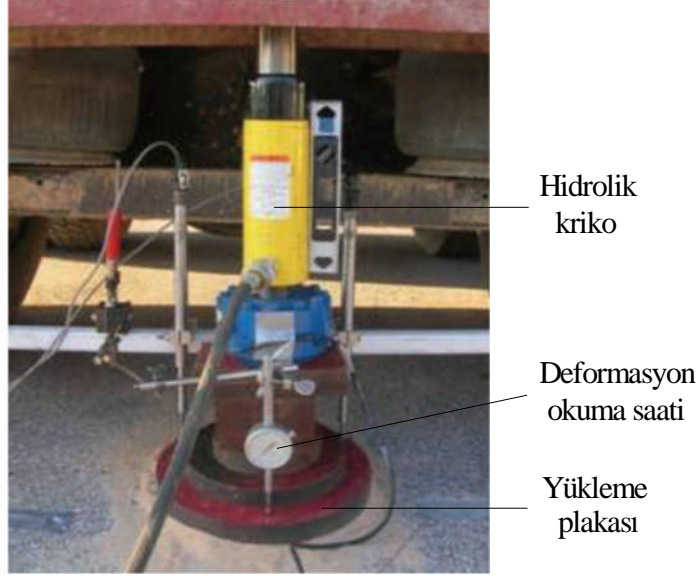
Plakalar, yüklemeler sırasında oluşacak taban basınçlarının kendisini eğmesine karşı koyabilecek ve üzerlerine uygulanan yükü düzgün dağıtabilecek kalınlıkta olmalıdır. Bu nedenle plaka kalınlığının en az 2,5 cm kalınlıkta olması öngörülmektedir [38]. Ayrıca deneyde kullanılan plakanın rijit olması da gerekmektedir. Çünkü esnek bir plakanın kullanılması durumunda yüklenen plaka altındaki zeminin her bir noktasında farklı basınçlar ve oturmalar oluşur (Şekil 9). Böyle bir durumda da sabit bir oturma miktarı ölçümü yapılması mümkün olmaz.



Şekil 9. Esnek bir plakanın yüklenmesi durumunda zemin davranışı [47].

### 2.1.1.3. Yükleme İşlemi

Plaka ya doğrudan ya da bir yerden kriko ile tepki alınarak yüklenebilmektedir. Kriko ile yapılan yüklemelerde zemine yatay olarak yerleştirilen plakanın üzerine kriko yerleştirilip üzerine yükleme cihazı konulur (Şekil 10). Hidrolik kriko, pompa ve kriko bölümü olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Bu iki ünite arası hidrolik hortum ile bağlanmıştır. Bu sistem sayesinde krikoya yağ basma sırasında hidrolik deney düzeneğinin sarsılması en düşük seviyeye indirilmiş olmaktadır. Hidrolik krikonun bu özelliği sayesinde plaka yükleme deneyi sırasında ölçülen oturma verilerinin hiçbir şekilde pompalama titreşiminden etkilenmemesi sağlanmaktadır [48].



Şekil 10. Plaka yükleme deney aleti [URL-3].

Yükleme cihazı; bir kamyon, treyler ya da bunların bir bileşimi treyler-çekici, bir sabitlenmiş çerçeve veya diğer yapılar olabilir (Şekil 11). Bu cihazlar, zeminde gereken reaksiyonu gerçekleştirebilmek üzere yüklenmiş olmalıdır. Destek noktaları ise (treyler ve kamyon kullanılıyorsa, tekerlekler) plaka kenarından en az 2,5 m uzakta olmalıdır [5].

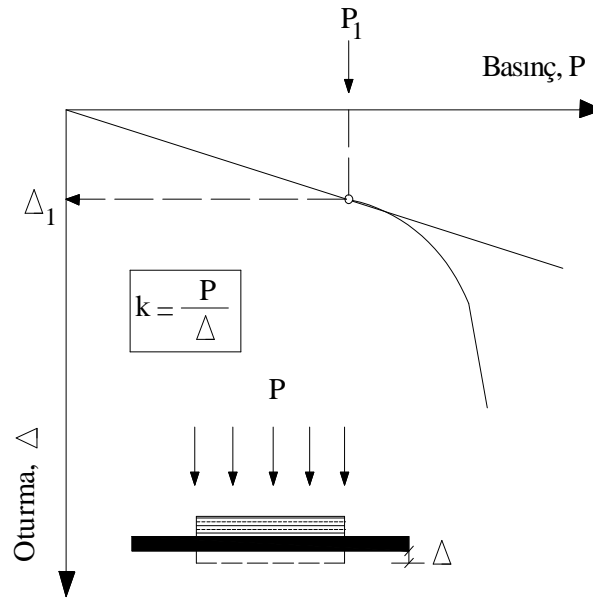


Şekil 11. Tam yüklenmiş damperli kamyonla yapılan plaka yükleme deneyi [URL-3].

Yüklemeler adımlar halinde yükün arttırılıp oturmaların ölçülmesiyle veya sabit bir hızla itilme sırasında yükün ölçülmesi şeklinde yapılır. Yüklemeye, zeminin sınır taşıma gücüne veya plaka emin taşıma gücünün iki katına kadar devam edilir [44]. Adımlar halinde yükleme yapılması durumunda ilk yükleme, tahmin edilen plaka emin taşıma gücünün 1/5'i veya plaka sınır taşıma gücünün 1/10'u mertebesinde seçilir [49]. Her yük, plakanın oturma hızı 0,05 mm/s'nin altına düşene kadar bekletilir. Bir sonraki yüklemeye oturma yükünün yarısı tekrar uygulanıp, oturma göstergeleri sıfıra ayarlanır. Bu işlem 10 tam uygulama tamamlanana dek tekrarlanır [50].

### 2.1.2. Deney Sonucunda Elde Edilen Veriler

Plaka yükleme deneyi, zeminin sıkıştırılabilirliğinin ve taşıma kapasitesinin doğrudan ölçümünü sağlamakla birlikte esasen, rijit bir plaka yardımı ile her bir yük artışına tekabül eden oturma miktarlarının hesaplanması prensibine dayanmaktadır. Bu deneyin sonuçlarından elde edilen basınç-oturma eğrisi Şekil 12'de verilmektedir. Yatak katsayısı,  $k$ , sınır basınç değeri olan  $P_1$ 'e ulaşına dek, eğrinin başlangıçtaki eğimidir [51].



Şekil 12. Plaka yükleme deneyi sonuçlarının tipik grafiği [51].

Yatak katsayısı, zeminde mümkün olan en büyük çaplı plakalar kullanılarak yapılan deneyin birinci yükleme boşaltma aşamasında hesaplanır. Normal konsolide olmuş, suya

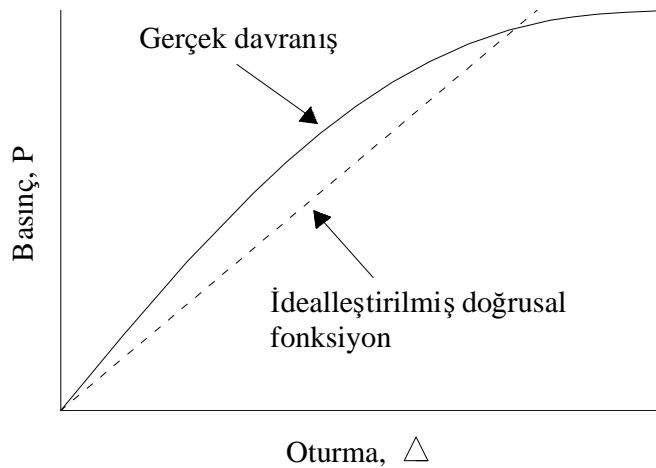
doymun killerde sürtünmesiz ortam olması nedeniyle plaka boyutları taşıma gücünü etkilemez [10].

Deney sonunda, yapılan okuma ve ölçmeler grafik haline getirilerek incelenir. Eğer elde edilen basınç-oturma eğrisinde belirgin bir göçme noktası saptanamıyorsa, plaka çapının %15'ine karşılık gelen değer zeminin son taşıma gücü olarak alınır [45]. Eğride belirgin bir göçme noktası saptanabiliyorsa, basınç-oturma eğrisi;

- 10 mm'ye kadar doğrusal davranış gösteriyorsa, 10 mm'ye karşılık gelen basının
- 10 mm'ye kadar doğrusal davranış göstermiyorsa, eğrinin kırılma gösterdiği noktadaki basının yarısı zemin emniyetli taşıma gücü olarak alınır [41, 52].

### 2.1.3. Verilerin Hesaplanması ve Grafiklerin izilmesi

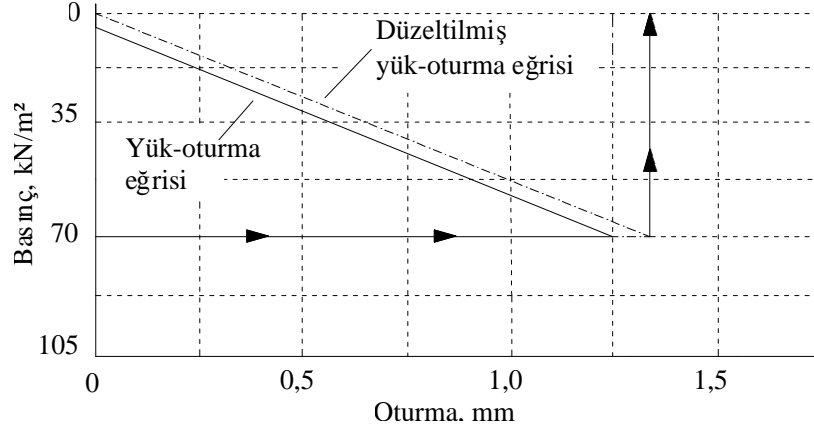
Plaka yükleme deneyinden elde edilen basınç-oturma eğrisinin lineer kabul edilen ilk parçasının eğimi yatak katsayısı olarak ifade edilmektedir. Basınç-oturma ilişkisi doğrusal olmadığı için eşdeğer doğrusal fonksiyon olarak temsil edilmektedir. 10 yükleme-boşaltma sonrasındaki basınç-oturma eğrisini gösteren göre Şekil 13'e göre, yükleme arttığa oturma miktarı da artmaktadır [53].



Şekil 13. Yük plakası altındaki zeminin oturma davranışı [47].

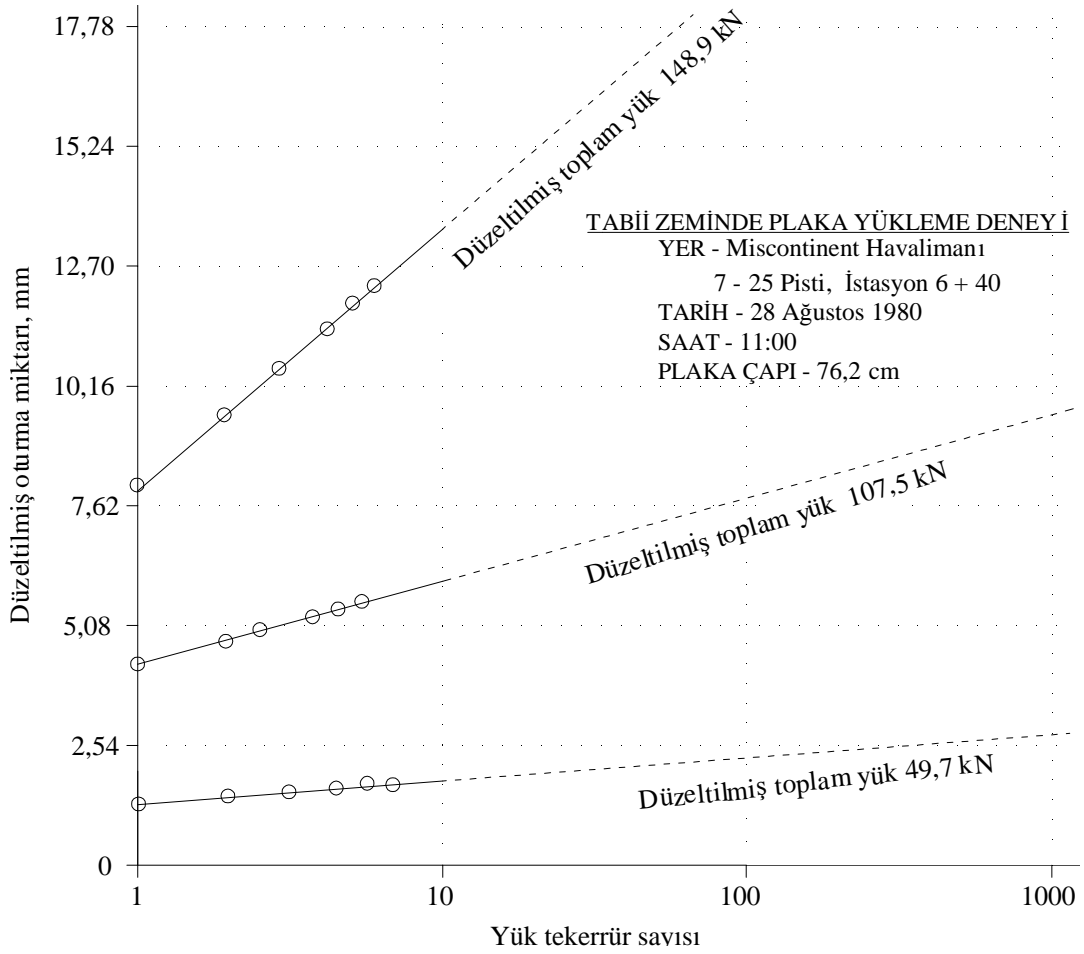
Yükleme-boşaltma işleminin ardından veriler, basınç-oturma grafiğinde işaretlenir. Deneye başlamadan önce okuma saati sifıra ayarlanmamışsa, eğrinin başlangıç noktasını kesmesini sağlayacak bir düzeltme yapılır (Şekil 14), [54].





Şekil 14. Yük- oturma eğrisinin düzeltilmesi [31].

Oturma ve yük değerleri için gerekli olan düzeltmeler yapıldıktan sonra düzeltilmiş yük-oturma değerleri bir grafik üzerine çizilir (Şekil 15). Bu sayede yük tekrürlerinin oturma miktarı üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmış olur [55].



Şekil 15. Üç farklı yükleme durumunda yük tekrarlarının oturma üzerindeki etkisi [55].

Tablo 4. Plaka yükleme (PLT) deneyinin üstünlükleri ve sakıncaları

<p>Üstünlükleri</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Doğal zemin, alttemel, temel ve hatta kaplamanın taşıma gücünün ölçülmesinde kullanılabilir.</li> <li>• Zeminin k değeri, CBR değeri, <math>M_R</math> değeri, taşıma kapasitesi ve sıkıştırılabilirliği gibi değerleri doğrudan veren bir deneydir.</li> <li>• Özellikle yumuşak killerde güvenilir sonuçlar vermektedir.</li> <li>• Deneyden elde edilen sonuçlar, tasarım parametresi olarak veya tasarım varsayımlarını doğrulamak için kullanılabilir.</li> <li>• Deneyin işçiliği yoktur, herkes tarafından yapılabilir.</li> <li>• Deney aletinin maliyeti oldukça düşüktür (3000-5000 TL)</li> </ul> <p>Sakıncaları</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Etki derinliği problemi vardır.</li> <li>• Deney sonuçları, zeminin yoğunluk ve rutubet miktarına bağlı olarak değişmektedir.</li> <li>• Plaka yükleme deneyi kısa süreli bir deney olduğu için, suya doymuş kil zeminlerde meydana gelen uzun süreli konsolidasyon oturmalarını yansıtmaz.</li> </ul>
--

## 2.2. Esneklik Modülü ( $M_R$ )

Üstyapı tasarımında en önemli faktörlerden biri tabii zeminin mukavemet değeridir. Tabii zemin mukavemetinin karakterize edilmesi amacıyla esneklik modülü,  $M_R$ , değeri kullanılmaktadır. Esneklik modülü, Asfalt Enstitüsü tarafından Kaliforniya Üniversitesi'nde başlatılan deneylere [56] dayanılarak geliştirilmiştir.

Esneklik modülü,  $M_R$ , tekrarlı yükler altında da gerilmeye maruz kalan üstyapıları temsil eden şartlar altında, zeminlerin esneklik karakteristiklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Gerçekten de trafik yükleri, kaplama vasıtasıyla zemine tekrarlı yük olarak intikal etmekte ve zeminde yarattığı oturmaların büyük bir kısmı kalıcı olmayan yani elastik oturmalar olmaktadır. Bu nedenle üstyapı tasarımında malzeme özelliklerini temsil etmesi açısından esneklik modülünü kullanmak doğrultusundaki yaklaşımlar oldukça çok kabul görmektedir [57].

$M_R$  değeri, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi, HVEEM direnci (R-Değeri) deneyi ve plaka yükleme (PLT) deneyi verileri kullanılarak aşağıdaki bağıntılardan tayin edilebilmektedir. Lakin bu bağıntıların, agrega temel malzemeleri için geçerli olmadığı unutulmamalıdır [55].

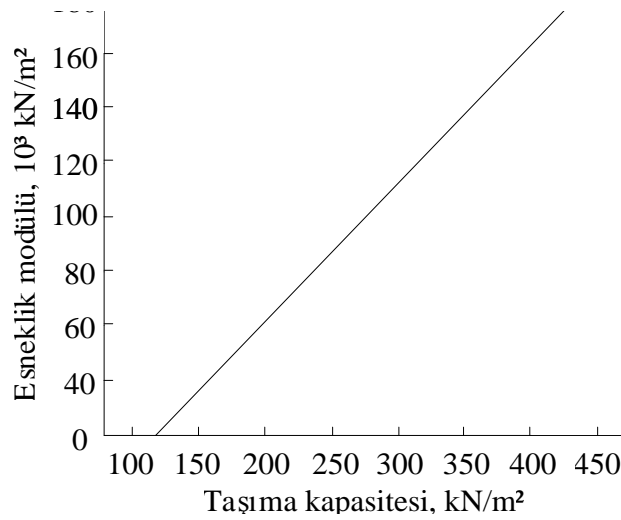
Tabii zeminin  $M_R$  değeri, CBR deney verileri kullanılarak aşağıdaki bağıntıya göre yaklaşık olarak saptanabilmektedir.

$$M_R (10^3 \text{ kN/m}^2) = 10,3 \times \text{CBR} \quad (4)$$

Tabii zeminin  $M_R$  değeri, R-Değeri deneyi sonuçlarından aşağıdaki bağıntıya göre yaklaşık olarak bulunabilmektedir.

$$M_R (10^3 \text{ kN/m}^2) = 8,0 + 3,8 \times (\text{R-Değeri}) \quad (5)$$

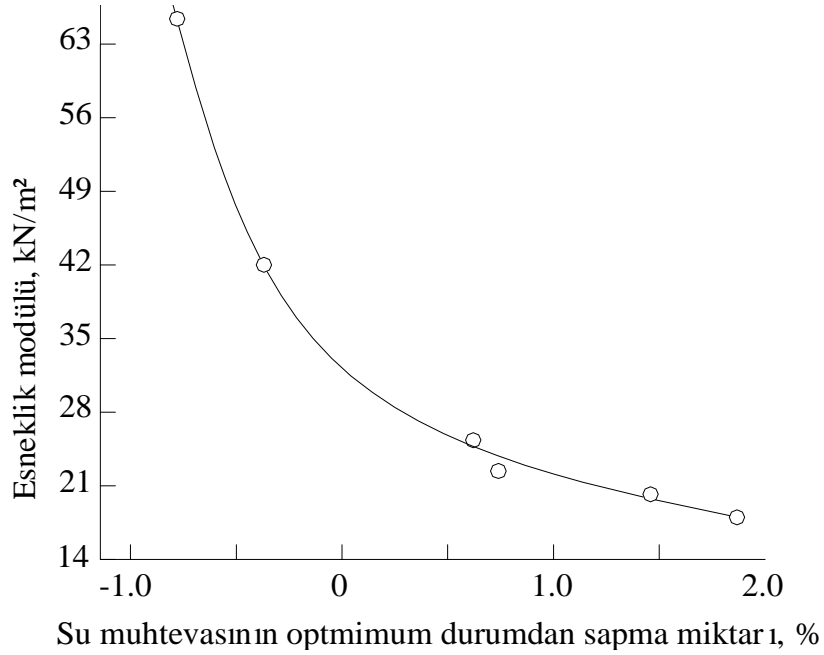
Tasarım amacıyla  $M_R$  değerinin tayin edilebilmesi için projenin boyutuna bağlı olarak minimum 6 ila 8 adet plaka yükleme deney değerinin elde edilmesi tavsiye edilmektedir [55]. Tabii zeminin  $M_R$  değeri, Şekil 16'daki plaka yükleme deneyi değerlerinden elde edilen korelasyon grafiği kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 16. Taşıma kapasitesi ile  $M_R$  değeri arasındaki ilişki [URL-4].

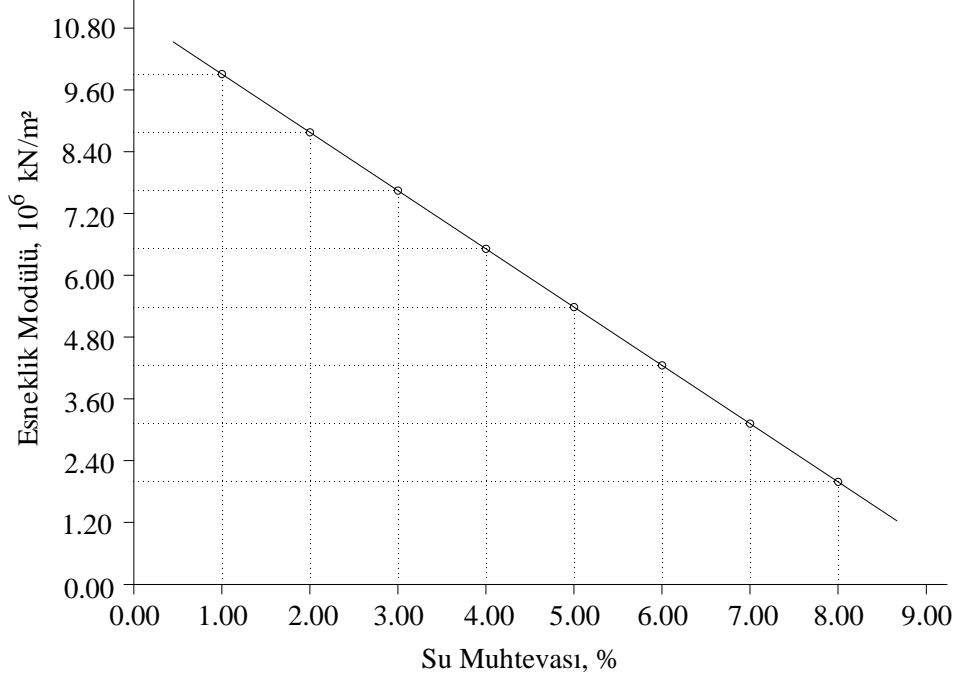
### 2.2.1. Esneklik Modülü ile Su Muhtevası Arasındaki İlişki

Su muhtevası ve yoğunluğun esneklik modülü üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yapılan bir çalışma [58] sonucunda, su muhtevası (%W) arttıkça esneklik modülü ( $M_R$ ) değerinin küçüldüğü gözlemlenmiştir. Sonuçlar, AASHTO şartnamesindeki %W- $M_R$  grafiği ile de desteklenmektedir (Şekil 17). Bu durum, su muhtevasının, esneklik modülü davranışlarını etkileyen kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.



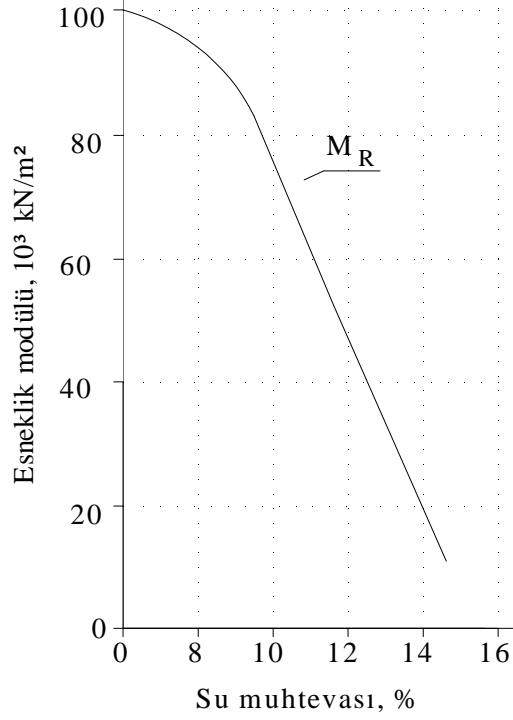
Şekil 17. AASHTO şartnamesinde su muhtevasının  $M_R$ 'ye etkisi [58].

Şekil 17'ye göre, su muhtevasındaki artış, esneklik modülü değerinde lineere yakın bir azalmaya neden olur. Bu etki, kohezyonsuz zeminlerde daha da belirgindir. Bazı araştırmacılar [59], esneklik modülü değeri ile su muhtevası arasındaki ilişkinin Şekil 18'de gösterildiği gibi düz bir çizgi olarak temsil edilebileceğini belirtmişlerdir. Bu eğriye göre su muhtevası değerinin %6'dan %8'e yükseldiği durumda esneklik modülü değerinde %50 civarında bir azalma belirlenmiştir. Bu durum, zeminin doygunluk derecesinin yükseldiğini göstermektedir. Şekilde gösterilen eğim, esnek kaplama tasarımı için önemli bir husustur. Çünkü kaplama tabakası altındaki zeminin su muhtevası mevsimlere göre büyük değişiklikler göstermektedir.



Şekil 18. Su muhtevası ile esneklik modülü arasındaki ilişki [59].

Yol tasarımında, kalıcı deformasyonların oluşmasını engelleyecek bir parametre kullanmak çok önemlidir. Dublin'deki Trinity College'ta yapılan bir çalışmada [60], alttemelin tekrarlanan yükler altındaki kalıcı deformasyonunun, belli bir su muhtevasında hızla arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen  $M_R$  değerinin, su muhtevasına bağlı değişim grafiği Şekil 19'da gösterilmektedir. Grafiğe göre, su muhtevasındaki artış zeminin deformasyon direncini azalttığı için,  $M_R$  değerinde belirli bir su muhtevasından sonra lineer ve hızlı düşüslere neden olmaktadır.



Şekil 19.  $M_R$  değerinin su muhtevasına bağlı değişimi [60].

### 2.2.2. Esneklik Modülü ile CBR Değeri Arasındaki İlişki

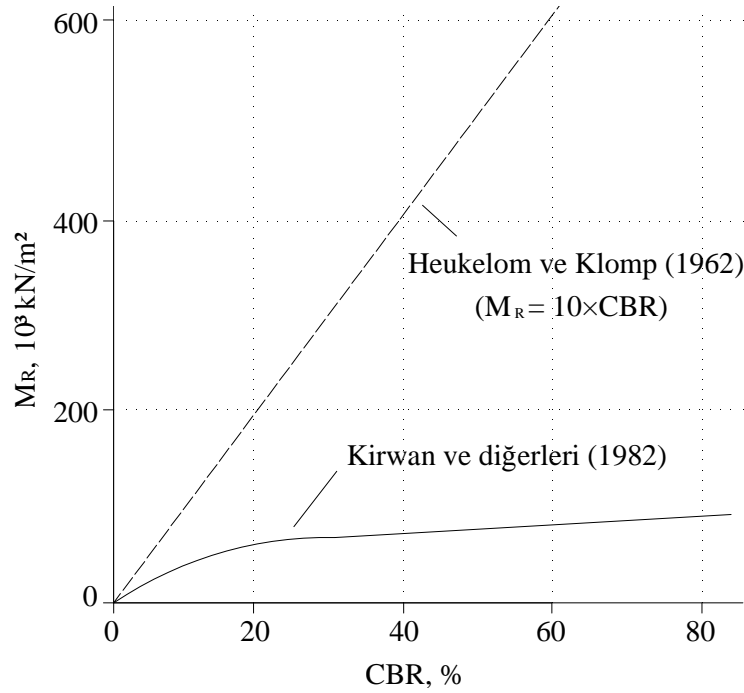
Belirli bir su muhtevastaki ve kuru yoğunluktaki kısmen doymuş buzlu zemin üzerinde ( $\gamma_d=1,9 \text{ t/m}^3$ ,  $LL=\%35$ ,  $PL=\%21$ ) yapılmış olan araştırmalar sonucunda [61], zeminin  $M_R$  değerinin CBR deneyindeki yük tekrür sayısından etkilendiği kaydedilmiştir. Bazı deneylerde 50000 yük tekrüründen sonraki  $M_R$  değerinin, ilk yüklemdeki  $M_R$  değerinin yalnızca yarısı kadar olduğu gözlemlenmiştir.  $M_R$  değerindeki bu düşüşün, etkin gerilmelerdeki değişikliğe ve muhtemelen yüklem sırasında parçacıkların yer değiştirmesine bağlı olduğu ileri sürülmüştür. Bu nedenle, CBR deneyinden elde edilen basınç-oturma eğrisinin başlangıç kısmındaki  $M_R$  değerinin, yol tasarımı için uygun olan  $M_R$  değeri olmayabileceği belirtilmiştir.

Buzlu zeminler üzerinde yapılan başka bir araştırmada [60] ise,  $M_R$  değeri ile CBR değeri arasındaki ilişki incelenmiş olup elde edilen veriler Şekil 20’de sunulmaktadır. Bu incelemede araştırmacılar, zeminin  $M_R$  değeri ile CBR değeri arasındaki ilişkiyle ilgili olarak önerilen (6) No’lu ampirik bağıntısının kendi çalışmalarındaki deney sonuçlarıyla bağdaşmadığını belirtmişlerdir. Bu bağıntının, özellikle yüksek CBR değerlerine sahip

olan zeminlerin rijitliğini olduğundan daha fazla hesapladığını, bu nedenle de yalnızca  $CBR \leq 10$  olan zeminler için kullanılmasını uygun olacağını belirtmişlerdir.

$$M_R (10^3 \text{ kN/m}^2) = 8,0 + 3,8 \times (R\text{-Değeri}) \quad [62] \quad (6)$$

$$M_R (10^3 \text{ kN/m}^2) = 8,0 + 3,8 \times (R\text{-Değeri}) \quad [60] \quad (7)$$



Şekil 20.  $M_R$  değeri ile CBR değeri arasındaki ilişki [60].

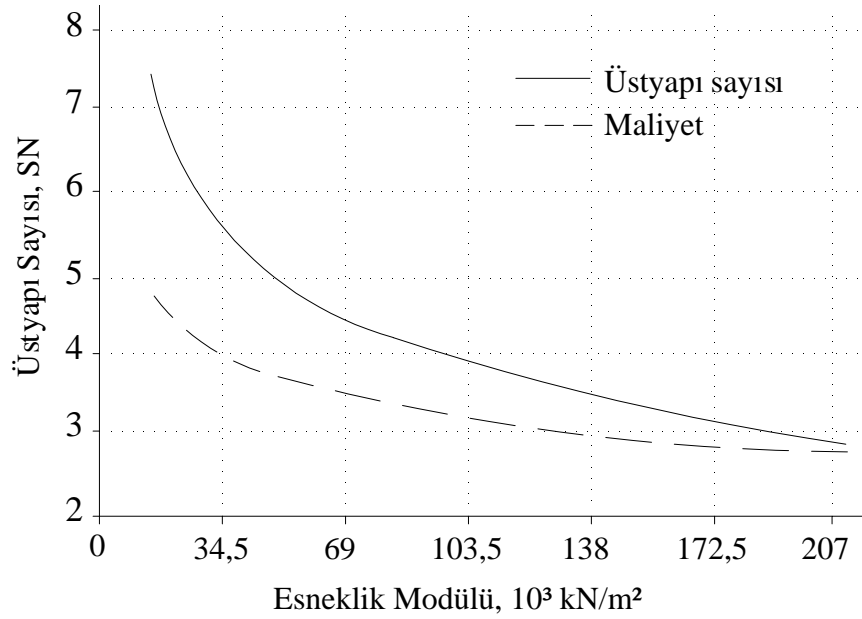
Tablo 5'te çeşitli malzemeler için CBR ve  $M_R$  değerleri gösterilmektedir. Tabloya göre, zemin malzemesinin CBR değeri azaldıkça esneklik modülü değeri de azalmaktadır.

Tablo 5. Çeşitli malzemeler için tipik CBR ve esneklik modülü değerleri [URL-4].

Malzeme	CBR Değeri	Esneklik Modülü ( $10^3 \text{ kN/m}^2$ )
Ahşap	-	7000 – 14000
Parçalanmış taş	20 – 100	137,8 – 276
Kumlu zeminler	5 – 40	48,23 – 207
Siltli zeminler	3 – 15	34,45 – 137,8
Killi zeminler	3 – 10	34,45 – 103,35
Organik zeminler	1 – 5	< 34,45

### 2.2.3. Esneklik Modülü, Üstyapı Sayısı ve Maliyet Arasındaki İlişki

Üstyapı sayısı (SN); üstyapının her bir tabakasındaki kullanılmakta olan malzeme tipine uygun tabaka katsayılarının kullanılması suretiyle, esnek üstyapı tabaka kalınlığına dönüştürülen sayıdır [63]. Şekil 21’de görüldüğü gibi üstyapı sayısı ve maliyetin her ikisi de zemin rijitliğinden önemli ölçüde etkilenmekte ve  $M_R$  değeri arttıkça SN eksponansiyel olarak azalmaktadır.



Şekil 21. Esneklik modülü, üstyapı sayısı ve maliyet ilişkisi [URL-5].

### 2.3. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

Karayolu üstyapı tasarımında kullanılan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi, ilk kez 1930 yılı civarında Kaliforniya Karayolları’nda, O.T. Porter tarafından geliştirilmiştir. İlk yıllarda havaalanı pisti kalınlık tasarımında kullanılmış olup daha sonraları yol üstyapıları için de kullanılmaya başlanmıştır [29]. Kaplama tabakasının dayanımını ölçmek için kullanılan en yaygın yöntem CBR deneyidir. CBR deneyi, gelişmekte olan ülkelerde uzun zamandır kullanılmakta olan en popüler yöntemdir. CBR değerinin büyük olması, tabaka dayanımının yüksek olduğunu, tabaka kalınlığının ise küçük olduğunu göstermektedir [29].

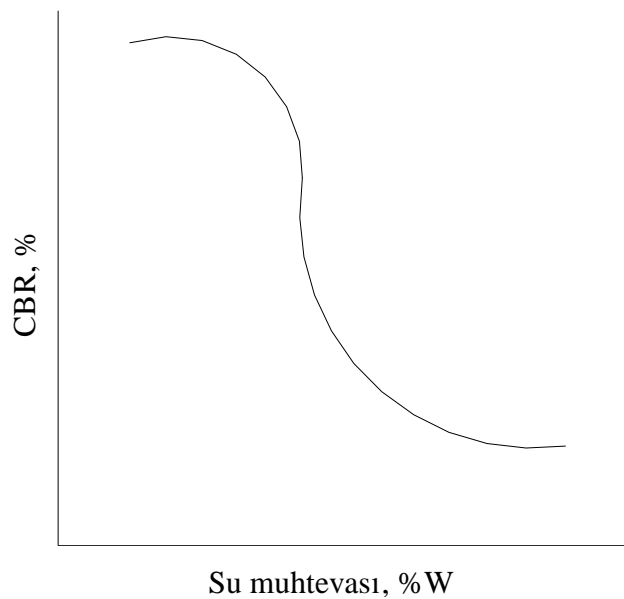


Yol üstyapı malzemelerinin taşıma güçlerinin değerlendirilmesinde, en çok kullanılan verilerden biri olan CBR, bir zeminin dikkatle kontrol edilen yoğunluk ve rutubet şartları altında daneler arası kayma direncinin bir ölçüsü olup, belli boyutları olan bir pistonun özel olarak sıkıştırılarak hazırlanmış bir numuneye belirli bir derinliğe kadar batması için gerekli basıncın, aynı pistonun düzgün bir gradasyonu olan kırmataştan hazırlanmış bir numunede aynı batmayı sağlayan basınca oranı olarak tanımlanan ve yüzde olarak ifade edilen bir sayıdır.

### 2.3.1. CBR Değeri ile Su Muhtevası Arasındaki İlişki

Piston boyutları sebebiyle CBR deneyi, dane çapı en çok 20 mm olan malzemeler için uygulanır. Numunenin hazırlanışı CBR deneyinden elde edilecek sonuçları büyük ölçüde etkiler. Su muhtevasının oldukça yüksek olduğu kohezyonlu zeminlerde (CBR değeri %5'ten küçük) bu deneyin doğru sonuçlar vermediği görülmüştür. Bu nedenle, bu deney daha çok yolların ve hava alanlarının tabanını oluşturan zeminlerin oldukça kuru olduğu bölgelerde uygulanmaya elverişlidir [30].

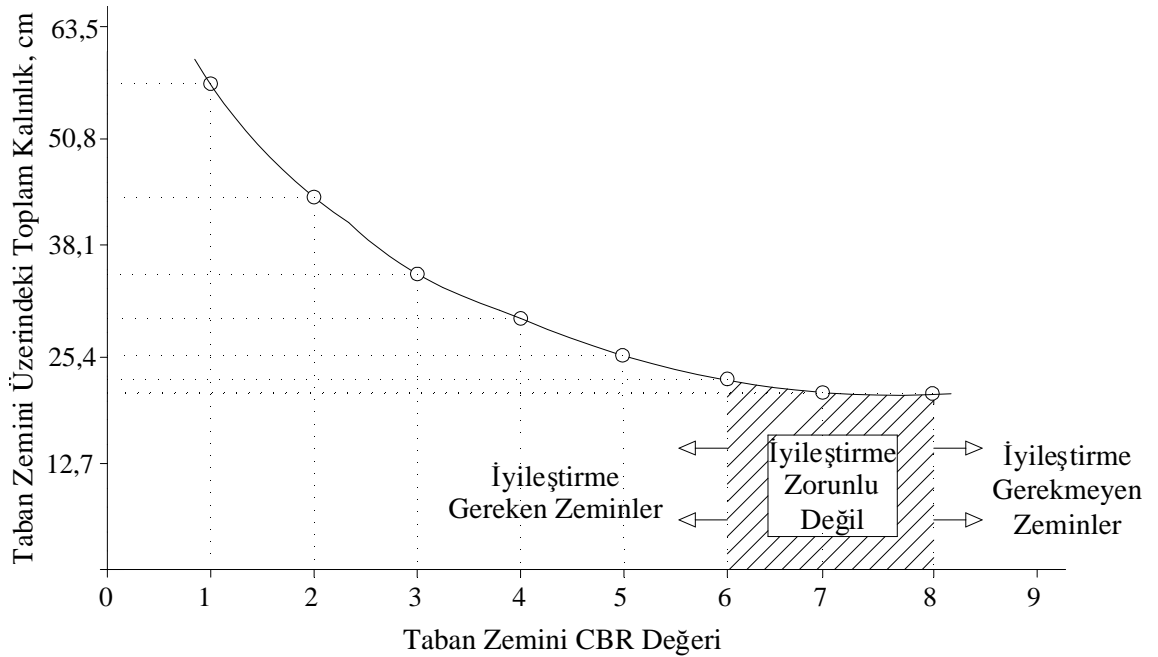
Şekil 22, su muhtevastaki artış ile CBR değerindeki azalışın lineer olmadığı ve belirli bir su muhtevastan sonra da CBR değerinin sabit kaldığını göstermektedir. Bu nedenle özellikle balçık zeminlerde CBR değerinin sabit olacağı aşikârdır.



Şekil 22. CBR değeri ile su muhtevası arasındaki ilişki [64].

Zemin karışımının özellikleri zemindeki su miktarı ile çok yakından ilgilidir. Zeminin taşıma gücü, zemindeki su muhtevasının belirli bir değerinde yeterli iken başka bir su muhtevasında yetersiz olabilir. Su muhtevası değişikliği zeminin hacmini etkilemektedir. Çoğunluğunu iri danelerin oluşturduğu zeminler hacim değişikliği yönünden su muhtevasından az etkilenirken, ince danelerin hâkim olduğu zeminlerde etkilenme derecesi fazla olmaktadır [65]. Az miktarda su, malzemenin sıkışmasını güçleştirirken fazla su, daneleri birbirinden ayıracağından zeminde boşluklar meydana getirir. Bu boşluklar zeminin taşıma gücünü azaltacağı gibi istenmeyen oturmalara da neden olur [66].

Illinois Karayolları (IDOT), yapım sırasında kaplama tabanında herhangi bir problem meydana gelmemesi için minimum CBR değerinin %6 olması gerektiğini belirtmiştir [67]. Taban zemini CBR değerinin %6'dan az olması durumunda çeşitli işlemlerle dayanımın artırılması sağlanmalıdır. Bu sayede yapım işlemleri boyunca gerekli çalışma platformu elde edilmekte, taban yüzeyinin altındaki malzemenin aşırı gerilmelerden korunması, ayrıca yapım trafiği nedeniyle yüzeyde oluşabilecek tekerlek izi miktarının minimum seviyede tutulması sağlanmaktadır [68]. Illinois'te taban zeminini güçlendirmek amacıyla en sık kullanılan yöntem zeminin kireçle modifiye edilmesidir. Şekil 23'teki grafiğe göre, taban zemininin CBR değeri ile tabaka kalınlığı arasında eksponansiyel bir azalma vardır.



Şekil 23. Taban zeminini CBR değeri ile tabaka kalınlıkları arasındaki ilişki [68].

Zemin kireçle modifiye edilmesine rağmen zeminin CBR değeri hala %10'dan küçük ise modifiye zemin üzerine granüler malzeme uygulanması zorunlu hale gelmektedir. Kireç modifiyeli zemin ile granüler malzeme kalınlıklarının toplamının 20 cm'den az olmaması gerekmektedir [68]. Modifiye zeminin CBR değerine bağlı olarak gerekli granüler malzeme kalınlığı Şekil 23 kullanılarak belirlenebilmektedir. Granüler tabaka, yapım trafiğine karşı yeterli rijitlik ve dayanıma sahip olmalıdır.

AASHTO T-193'e göre taban zeminleri için %8, temel ve alttemel tabakaları için ise %10'dan küçük CBR değerine sahip malzemelerin kullanılmaması öngörülmektedir [69]. Bu CBR değerlerine ulaşıldıktan sonra, yol üst yapısının uygun taşıma kapasitesine ulaştığı kabul edilmektedir. Kalite kontrol amacıyla da her tabakanın 5000 m<sup>2</sup>'sinde minimum bir deney yapılmaktadır.

Karayolu üst yapı tasarımında önemli faktörlerden biri de üst yapının oturduğu taban zemininin CBR değeridir [70]. Üst yapı tabakaları için CBR değerlerinin gösterildiği Tablo 6'da, CBR değeri %10'dan büyük olan zeminler, sağlam zeminler olarak kabul edilmektedir. Yol dolgularının en üstteki 30-50 cm'lik kısmında minimum CBR değerinin %10 olma şartı bu nedenle konulmuştur [4].

Tablo 6. Zemin cinslerine göre CBR değerleri [URL-6].

CBR Değeri	Taşıma Gücü	Yorumlar	k Değeri, 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>3</sup>
≤ %3	Çok zayıf zeminler	Mutlaka ıslah edilmelidirler.	20 - 34
%3 - %7	Az zayıf - orta zeminler	İlave tedbirlerin alınması zeminin diğer özelliklerine bağlıdır.	35 - 49
%7 - %10	Sağlam zeminler	Ağır trafik taşıyan yollar hariç iyileştirme gerekmez.	50 - 60

#### 2.4. Elastisite Modülü (E)

Elastisite modülü, E, malzemenin uygulanan bir kuvvet neticesinde, şekil değiştirmeye karşı koymasının yani mukavemetinin ölçüsüdür. Her malzemenin karakteristik bir elastisite modülü değeri vardır. Yani ayırt edici bir özelliktir. Zemin elastisite modülü, mevcut gerilme, sınır koşulları ve zemin yapısı için gerilme-deformasyon ilişkisinin bir göstergesidir [71].

Tablo 7’de görüldüğü gibi, E değeri arttıkça, malzemenin şekil değiştirmelere karşı direnci artacağından o cismin elastiklik özelliği azalır. Fakat bu tablodaki E değerleri, uzun süreli (10 yıldan fazla) değerlerdir. Kısa süreli değerler 3-10 kat fazla olabilmektedir [30].

Tablo 7. Zemin cinsine bağlı olarak tahmini elastisite modülü değerleri [30].

Zemin cinsi	E değeri, 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>3</sup>	Zemin cinsi	E değeri, 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>3</sup>
Örselenmiş kil	36	Karışık sıvı tabakalar	36
Kil klinkeri	18	Sıkıştırılmış taş yığını	36
Kırmataş	60	Kum	6
Sürtünmeli, sıkıştırılmış zemin	36	Kum-sıkı tabakalar	24
Çakıl, gevşek tabakalar	12	Rijit kil üst tabakası	12
Çakıl, sıkı tabakalar	48	Ayrışmış taş yığını üst tabakası	12
Gevşek tabakalar	6	Diğer taş yığınlı üst tabaka	24

Üstyapı malzemesinin yoğunluğu arttıkça elastisite modülü artmakta, yani şekil değiştirme kabiliyeti azalmaktadır [URL-7]. Ayrıca malzemelerin elastisite modülü sıcaklıkla ters orantılıdır [URL-8]. Sıcaklığın yükselmesi malzemenin atomları arasındaki uzaklığın artmasına sebep olacağından elastisite modülü değerini düşürür [URL-9].

Plaka yükleme deneyinde yükleme-boşaltma altındaki zeminin elastisite modülü değişmekte olup yük tekrarı arttıkça zemin sıkıştığı için elastisite modülü önemli ölçüde artmaktadır [72]. Elastisite modülünün artması rijitliğin artması anlamına gelir. Yani yüklenen-boşalan zemin sertleşmektedir. Plaka yükleme deneyi ile zeminin elastisite modülü arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıda belirtilmiştir [35].

$$E = \frac{\pi \cdot P \cdot D \cdot (1 - \nu)}{4 \cdot \Delta} \quad (8)$$

Burada;

E : Zemin elastisite modülü (kN/m<sup>2</sup>)

P : Zemine aktarılan basınç (kN/m<sup>2</sup>)

D : Plaka çapı (m)

Δ : Plakanın oturma miktarı (m)

ν : Zeminin poisson oranı

#### 2.4.1. Su Muhtevasının Elastisite Modülü ve Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkisi

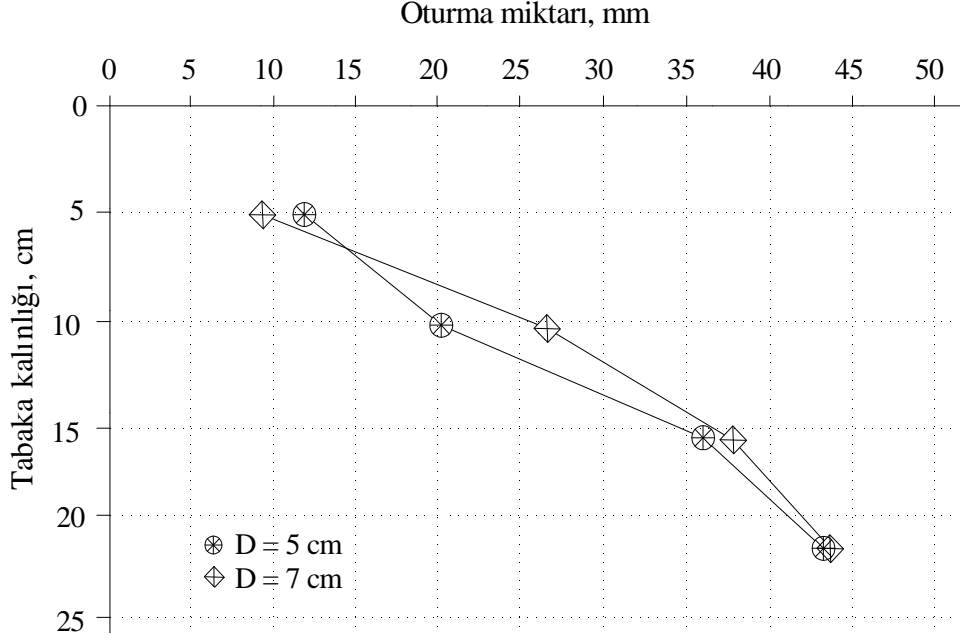
Üç farklı yükleme altındaki bir zeminin, kuru ve ıslak koşullardaki taşıma kapasitesi,  $q$ , ve elastisite modülü,  $E$ , değerleri Tablo 8’de verilmektedir. Sonuçlar zeminin efektif basıncının artmasıyla  $q$  ve  $E$  değerlerinin doğrusal olmayan bir şekilde arttığını göstermektedir. Ayrıca, ıslak durumdaki elastisite modülü değeri ve taşıma kapasitesinde önemli düşüşler olduğu da anlaşılmaktadır [73].

Tablo 8. Kuru ve ıslak koşullar altında zemin taşıma kapasitesi ve  $E$  değerleri [73].

$P$ , kN/m <sup>2</sup>	$q_{\text{kuru}}$ , kN/m <sup>2</sup>	$q_{\text{ıslak}}$ , kN/m <sup>2</sup>	$E_{\text{kuru}}$ , kN/m <sup>2</sup>	$E_{\text{ıslak}}$ , kN/m <sup>2</sup>
5	118	16,4	3403	606
7	123	17	4895	666
9	139	16,4	5405	2412

Plaka çapı arttıkça kuru ve ıslak koşullardaki malzemenin elastisite modülü değeri de artar. Bu nedenle arazi deneylerinde, plaka boyutlarının ve aşırı yüklemenin zeminin elastisite modülü ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin belirlenmesi gerekmektedir.

Şekil 24’te, 100 kN/m<sup>2</sup> basınç altında, farklı çaplardaki plakalar kullanılarak yapılan plaka yükleme deneyinde, zemin derinliği boyunca oturma miktarının fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılan çaplar 5 cm ve 7 cm olup plaka yükleme deneyi için piyasada kullanılan 76 cm çaplı plakalara nazaran oldukça küçüktür. Buna rağmen grafiğe göre plaka çapının değişmesi, oturma miktarını pek de etkilememektedir. Ayrıca eğrilerin eğimlerinden elde edilecek  $k$  değerlerinin de neredeyse aynı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 24. Farklı çaplardaki plakaların zemin boyunca oturma miktarı grafiği [73].

#### 2.4.2. Alttemel Zeminin Elastisite Modülü Değeri ile Esneklik Modülü Değeri Arasındaki İlişki

Alttemel elastisite modülü,  $E_{SB}$ , her mevsim için ayrı ayrı hesaplanır. 1993 AASHTO şartnamesi, alttemel elastisite modülü için aşağıdaki limitleri öngörmektedir [URL-5].

$$103 \times 10^3 \left( \text{kN/m}^2 \right)_{(\text{çözülme})} \leq E_{SB} \leq 345 \times 10^3 \left( \text{kN/m}^2 \right)_{(\text{donma})} \quad (9)$$

$$E_{SB} \leq 4 \times M_R \left( \text{kN/m}^2 \right) \quad (10)$$

Burada;

$E_{SB}$  : Alttemel elastisite modülü

## 2.5. Zemin Yatak Katsayısı

Ülkemizde yatak sayısı yöntemi, dilimize çevrilen hali ile yatak katsayısı yöntemi olarak kullanılmaktadır. Türk Dil Kurumu'nun yayınladığı sözlükte, katsayı sözcüğünü aşağıdaki gibi tanımlamaktadır [74];

- a) Bir yasayı anlatan formülün yazılışında yer alan değişmeyen sayı
- b) Cisimlerin fiziksel özelliklerini belirten değişmeyen büyüklük

Bu nedenle yatak katsayısı ifadesi ülkemizde anlam olarak yanlış kullanılmasına rağmen biz de bu çalışmamızda katsayı terimini kullanacağız.

Yatak katsayısı,  $k$ , doğrudan ve ekonomik olarak plaka yükleme deneyi ile elde edilebilmektedir. Plaka yükleme deneyi, Kögler tarafından ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Westergaard [75] ilk kez rijit yol kaplamalarının (beton yol) boyutlandırılmasında yatak katsayısının bulunması amacıyla plaka yükleme deneylerinden yararlanmıştır [30].

$D$  çapındaki rijit bir dairesel plakanın yüzey alanına ( $A$ ) bir  $F$  yükü uygulandığında oluşan  $P$  basıncı, zeminde  $\Delta$  miktarında bir oturmaya neden olur. Yatak katsayısı, yükleme plakası altındaki herhangi bir noktada oluşan taban basıncının, oturma miktarına oranı olarak ifade edilir. Westergaard tarafından ortaya konulan yatak katsayısı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmaktadır [38].

$$k = \frac{(F/A)}{\Delta} = \frac{P}{\Delta} \quad (11)$$

Burada;

$k$  : Zemin yatak katsayısı ( $\text{kN/m}^3$ )

$F$  : Plakaya uygulanan yük ( $\text{kN}$ )

$A$  : Plakanın temas yüzeyi alanı ( $\text{m}^2$ )

$P$  : Zemine gelen basınç ( $\text{kN/m}^2$ )

$\Delta$  : Zeminde oluşan oturma miktarı ( $\text{m}$ )

Esasları Winkler (76) tarafından verilen ve sonrasında Zimmerman (77) tarafından geliştirilen Winkler-Zimmerman modeline göre, zeminin elastik olduğu ve birbirinden bağımsız sonsuz sayıda yaylardan oluştuğu kabul edilmektedir [URL-5]. Winkler modelinde yapılan ve gerçekçi olmayan bu kabule rağmen, söz konusu yöntem

uygulamadaki basitliği nedeniyle hala kullanılmaktadır. Winkler hipotezine göre yatak katsayısı, birim çökme elde edebilmek için birim alana yüklenmesi gereken yk olup yatak katsayısı olarak adlandırılır [78]. Yatak katsayısı, bir zemin sabiti olmayıp, zemin modeli için sabit veya değişken olabilir [79].

Yatak katsayısı, genellikle temel projelendirilmesi amacıyla kullanılmakta olup, gerçek arazi koşullarını yansıtması nedeniyle dikkatli olunmalıdır. Zemine etkiyen yk arttıkça oturma miktarı, dolayısıyla da yatak katsayısı değerini arttırır [URL-10].

Plaka yükleme deneyinin en büyük üstünlüğü yatak katsayısını doğrudan vermesidir. Plaka altındaki zemin, artan yükler altında deformasyona uğrayarak basınç/oturma oranından yatak katsayısı değerinin kolayca elde edilmesini sağlamaktadır. Fakat plakanın etkisi, zeminin gerçekte maruz kalacağı yükleme ile birebir aynı olmayacağından güvenilirliği tartışılmaktadır. Ayrıca plakanın etkili olduğu derinlik, zemin özelliklerine ve çevresel koşullara göre de değişmekte olup, zeminin tabakalı olması durumunda zemin profilinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

Yatak katsayısı, esneklik modülüne benzer bir parametre değildir. Zemin esneklik modülü, mevcut gerilme, sınır koşulları ve zemin yapısı için gerilme-deformasyon ilişkisinin bir göstergesidir. Yatak katsayısı ise zemin fiziksel özellikleri, tabakalanması, yükleme koşulları, plaka boyutları ve zemin rijitliğinin bir fonksiyonudur. Dolayısıyla yatak katsayısı fiziksel bir sabit olarak tanımlanamaz.

## 2.5.1. Yatak Katsayısını Etkileyen Faktörler

### 2.5.1.1. Plaka Boyutlarının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi

Yatak katsayısı, değermez bir katsayı olmayıp, plaka boyutlarına (B×L) bağlı olarak değerlenebilmektedir. Kullanılacak plaka boyutlarının k değerini etkileyen bir faktör olduğunun ispatı için Terzaghi [71], optimum su muhtevastaki farklı zeminlerde B'ye bağlı olarak bulunan k değerini için, 30×30 cm boyutlu dairesel plakalarla yaptığı deneyler sonucunda aşağıdaki bağıntılarını elde etmiştir.

Kumlu zeminlerde;

$$k = k_{30} \times \left( \frac{B + 30}{2B} \right)^2 \quad (12)$$



Killi zeminlerde;

$$k = k_{30} \times \left( \frac{30}{2B} \right) \quad (13)$$

B×L boyutlu dikdörtgen plaka;

$$k = \frac{k_{(B \times B)} \times [1 + 0,5(B / L)]}{1,5} \quad (14)$$

Burada;

k : B×B boyutlu plaka için yatak katsayısı (kN/m<sup>3</sup>)

k<sub>30</sub> : 30×30 cm boyutlu plaka deneyi ile hesaplanan yatak katsayısı (kN/m<sup>3</sup>)

k<sub>(B×B)</sub> : Kare (B×B boyutlu) plaka için yatak katsayısı (kN/m<sup>3</sup>)

B : Plaka genişliği (m)

Bu bağıntılarda, B genişliğindeki uzun bir plaka için yatak katsayısı değerinin yaklaşık olarak  $0,67 \times k_{(B \times B)}$  olduğu görülmektedir [10]. Plaka boyutları arttıkça plakaya uygulanan yük, daha geniş bir alana yayılacağı için zemine aktarılan basınç azalır. Bu nedenle yatak katsayısı değeri de azalır.

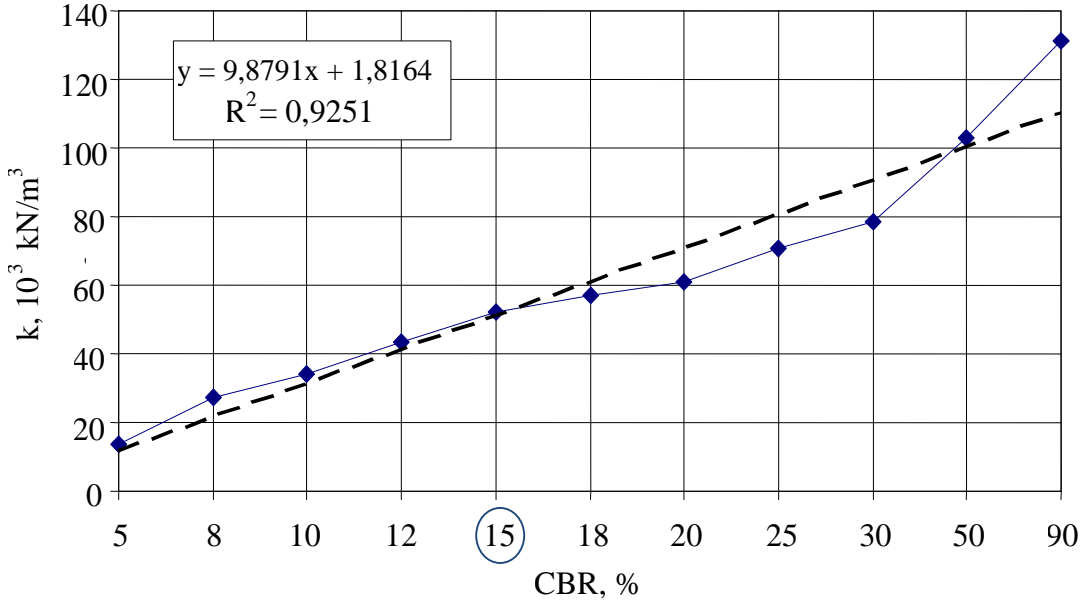
### 2.5.1.2. CBR Değerinin Yatak Katsayısı Değerine Etkisi

Plaka yükleme deneyinden elde edilen yatak katsayısı ile CBR değeri arasındaki ilişki Tablo 9'dan bakılarak tayin edilebilmektedir.

Tablo 9. Yatak katsayısı ile CBR değeri arasındaki ilişki [8].

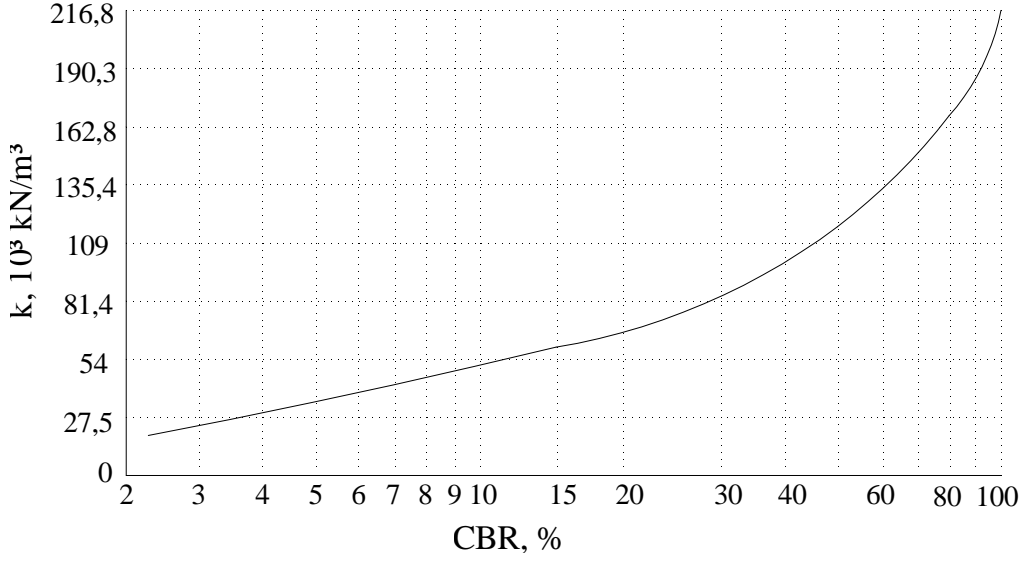
CBR Değeri, %	k, 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>3</sup>	CBR Değeri, %	k, 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>3</sup>
5	13,7	20	60,8
8	27,5	25	70,6
10	34,3	30	78,5
12	43,2	50	103,0
15	52,0	90	131,4

Tablo 9'daki verilerin grafiksel gösterimi olan Şekil 25'te, k değeri ile CBR değeri arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu çalışmada her ne kadar doğrusal bir ilişki kurulsa da aslında k değerinin  $55 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$ 'ten büyük olduğu ( $\text{CBR} > 15$ ) andan itibaren doğrusal değil daha ziyade eksponansiyel bir artışın olduğu görülmektedir. Grafikten ayrıca, CBR değeri ile k değeri arasında çok güçlü bir ilişki olduğu da anlaşılmaktadır ( $R^2 = 0,9251$ ). Benzer sonuçlar Şekil 26'da da tespit edilmiştir.



Şekil 25. CBR değeri ile yatak katsayısı arasındaki ilişkinin grafiksel gösterimi

2006 Karayolları fenni şartnamesinde [69], karayolu tasarımında taban zemini için minimum CBR değeri olarak %10 yerine artık %15 kullanılmaktadır. Minimum k değeri olarak da %15 CBR değerini veren  $55 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$  kullanılmaktadır. Şekil 27'deki grafik, CBR değeri ile Westergaard tarafından tanımlanan şekliyle k değeri arasındaki ilişkiyi vermektedir. Grafiğe göre CBR değeri arttıkça k değeri de artmaktadır.



Şekil 26. CBR değeri ile Westergaard yatak katsayısı arasındaki ilişki [30].

Şekil 26'da, CBR değeri ile k değeri arasında doğru orantı olduğu görülmektedir. Aşağıdaki bağıntıda [61] ise  $M_R$  ile CBR değeri arasında ters orantı vardır. Bu durum,  $M_R$  değerinin artmasının CBR değerinin, dolayısıyla da k değerinin artmasına neden olduğunu ispatlamaktadır.

$$M_R (\text{kN/m}^2) = \frac{10,3}{10^3} \times \text{CBR} \quad (\text{CBR} \leq 10)$$

(15)

İnce daneli malzemeden oluşan zeminlerin CBR değerleri, yatak katsayıları ve dolayısıyla da taşıma kapasiteleri iri daneli zeminlere nazaran daha düşüktür. Tablo 10'da da gösterildiği gibi zemin iyileştirildikçe taşıma gücü, CBR değeri ve dolayısıyla da k değeri artmaktadır.

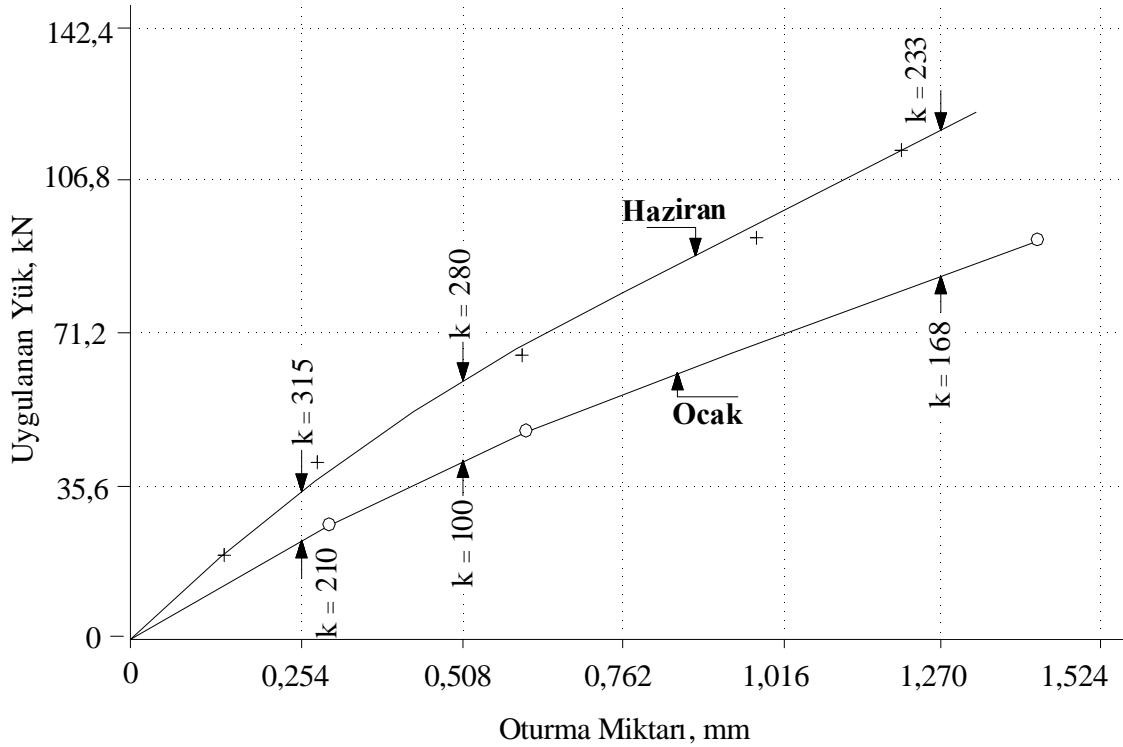
Tablo 10. Alttemel zemin cinsleri ve yaklaşık k değeri aralıkları [URL-11].

Zemin Cinsi	Taşıma Kapasitesi	k, 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>3</sup>	CBR, %
Siltin ve kilden oluşan ince daneli zeminler	Düşük	20 - 34	2,5 - 3,5
Az miktarda killi, kum ve kum-çakıl karışımları	Orta	35 - 49	4,5 - 7,5
Plastik taneciksiz kum ve kum-çakıl karışımları	Yüksek	50 - 60	8,5 - 12

Gerek CBR gerekse k değeri, esnek ve rijit yol tasarımı için zeminin taşıma kapasitesinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Örneğin; CBR değeri %3'ten düşük olan zeminler, taşıma gücü açısından yeterli olmadıkları için ıslah edilmeleri gerekmektedir. Aynı şekilde k değeri  $55 \times 10^3$  kN/m<sup>3</sup>'ten az olan zeminler de yeterli taşıma gücüne sahip olmamaları nedeniyle ya kullanılmamalı ya da uygun stabilizasyon teknikleri ile iyileştirilmelidir [4].

### 2.5.1.3. Zemin Su Muhtevasının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi

Zeminin su muhtevası, zemin dayanımını ve oturma süresini önemli ölçüde etkilemektedir [40]. Ayrıca yatak katsayısı değeri de zemindeki su muhtevasının mevsimsel değişimine oldukça duyarlıdır. Yapılan bir çalışmada [80] araştırmacılar, alttemel su muhtevasının kış deneyleri sırasında %25'ten, yaz deneyleri sırasında %17'ye kadar düştüğünü, bu durumda k değerinde de %40-50 civarında bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 27).



Şekil 27. Mevsimsel değişikliklerin k değeri üzerindeki etkisi [80].

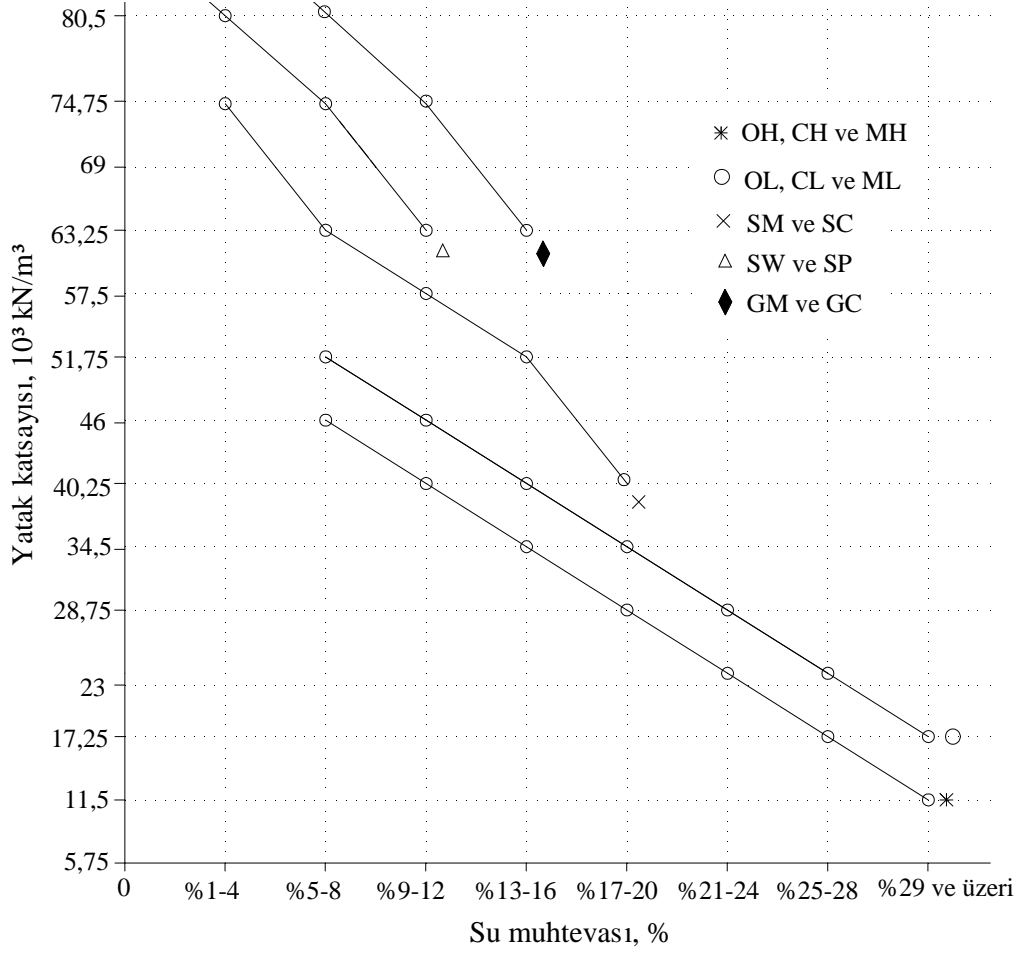
Nispeten yüksek su muhtevasına sahip olan doymamış bir zemin, yumuşaktır ve bundan ötürü de daha fazla deformasyona uğrar. Bu zemin zayıflığı, k değeri gibi rijitlik parametrelerine de yansır. Bunun tersi de doğrudur - düşük su muhtevasına sahip nispeten katı zeminler deformasyona daha fazla direnç gösterirler, dolayısıyla daha büyük k değerine sahiptirler.

İnce daneli zeminlerin su muhtevası, zemin yatak katsayısını hem deney sırasında hem de yol üstyapısının servis ömrü boyunca etkilemektedir [30]. Aynı basınç altında, farklı su muhtevalarındaki zeminlerin oturma miktarları da birbirlerinden farklı olmaktadır. Yüksek su muhtevasına sahip zeminler, daha fazla deforme olmaları sebebiyle yatak katsayısı değerleri daha düşük olmaktadır. Bu da zeminin su muhtevası arttıkça dayanımının düşeceğini anlamına gelmektedir. Tablo 11’de, çeşitli zemin türleri için su muhtevasının zemin yatak katsayısı değerine etkisini gösterilmektedir.

Tablo 11. Zemin cinslerinin farklı su muhtevalarındaki yatak katsayıları ( $10^3$  kN/m<sup>3</sup>) [81].

Malzeme Cinsi \ W, %	<u>1-4</u>	<u>5-8</u>	<u>9-12</u>	<u>13-16</u>	<u>17-20</u>	<u>21-24</u>	<u>25-28</u>	<u>≥29</u>
Siltler ve killer (LL>50) (OH, CH, MH)	~	47,5	40,7	33,9	27,2	20,4	13,6	6,8
Siltler ve killer (LL<50) (OL, CL, ML)	~	54,3	47,5	40,7	33,9	27,2	20,4	13,6
Siltli ve killi kumlar (SM, SC)	81,5	67,9	61,1	54,3	47,5	~	~	~
Çakıllı kumlar (SW, SP)	81,5+	81,5	67,9	~	~	~	~	~
Siltli ve killi çakıllar (GM, GC)	81,5+	81,5+	81,5	67,9	~	~	~	~
Çakıl ve kumlu çakıllar (GW, GP)	81,5+	81,5+	~	~	~	~	~	~

Tablo 11’deki verilere göre çizilen Şekil 28’deki grafikte, zeminin su muhtevasındaki artış, özellikle silt ve kil gibi çok ince daneli malzemeli zeminlerin k değerinde lineer olarak büyük düşüştürmelerine neden olurken, silt ve kilin nispeten daha az olduğu çakıllı ve kumlu zeminlerin k değerleri bu düşüştürmeden daha az etkilenmektedir [46].



Şekil 28. Zemin cinslerinin değişik su muhtevaları için yatak katsayıları grafiği

Zemin ıslak veya kuru olsun, her iki durumda da belirli bir basınçtan sonra yatak katsayısı değeri sabit kalmaktadır (Şekil 29). Islak zeminin k değerinin hesaplanabilmesi için, kuru zeminin k değerinde düzeltme yapılmalıdır [82]. Islak zeminin k değeri aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [31].

$$k_{yaş} = k \times \frac{P_{yaş}}{P} \quad (16)$$

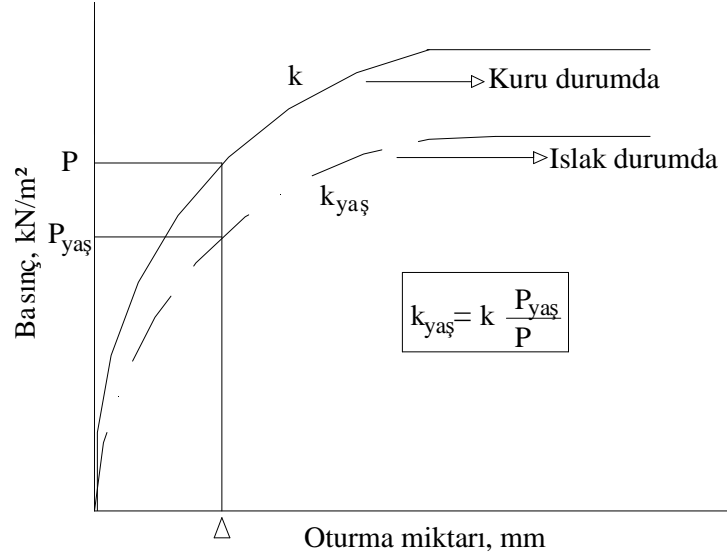
Burada;

$k$  : Kuru zeminin k değeri

$k_{yaş}$  : Islak zeminin k değeri

$P$  : Kuru zemine gelen basınç

$P_{yaş}$  : Islak zemine gelen basınç



Şekil 29. Zeminin kuru ve ıslak durumdaki k değeri grafiği [32].

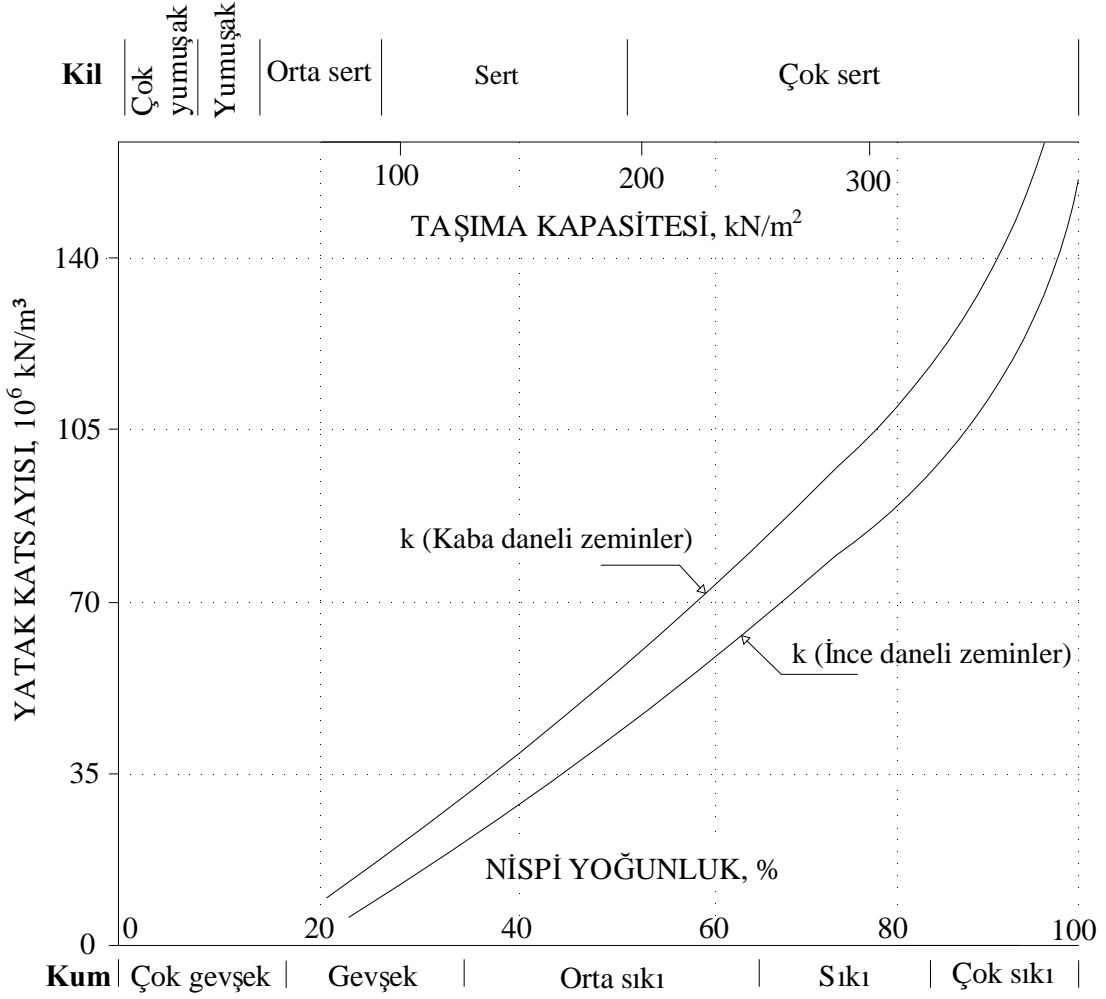
#### 2.5.1.4. Zemin Cinsinin Yatak Katsayısı Değerine Etkisi

Tablo 12’de, k değerlerinin farklı zeminlerdeki büyüklüğü hakkında fikir verebilmek amacıyla veriler sunulmaktadır. Fakat bu değerlerin tasarım amacıyla doğrudan kullanımından kaçınılmalıdır.

Tablo 12. Farklı zemin türlerinin plaka yükleme deneyinden elde edilen k değerleri [51].

Zemin Cinsi	k, 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>3</sup>
Gevşek kum	4,8 – 16
Sıkı kum	64 – 128
Killi orta sıkı kum	32 – 80
Siltli orta sıkı kum	24 – 48
Killi zemin; Taşıma gücü < 200 kN/m <sup>2</sup>	12 – 24
Killi zemin; 200 kN/m <sup>2</sup> < Taşıma gücü < 800 kN/m <sup>2</sup>	24 – 48
Killi zemin; Taşıma gücü > 800 kN/m <sup>2</sup>	> 48

Şekil 30’daki grafikte kaba daneli zeminlerin k değerinin ince daneli zeminlere oranla daha yüksek olduğu ve zemin yoğunluğu arttıkça k değerinin de arttığı anlaşılmaktadır.



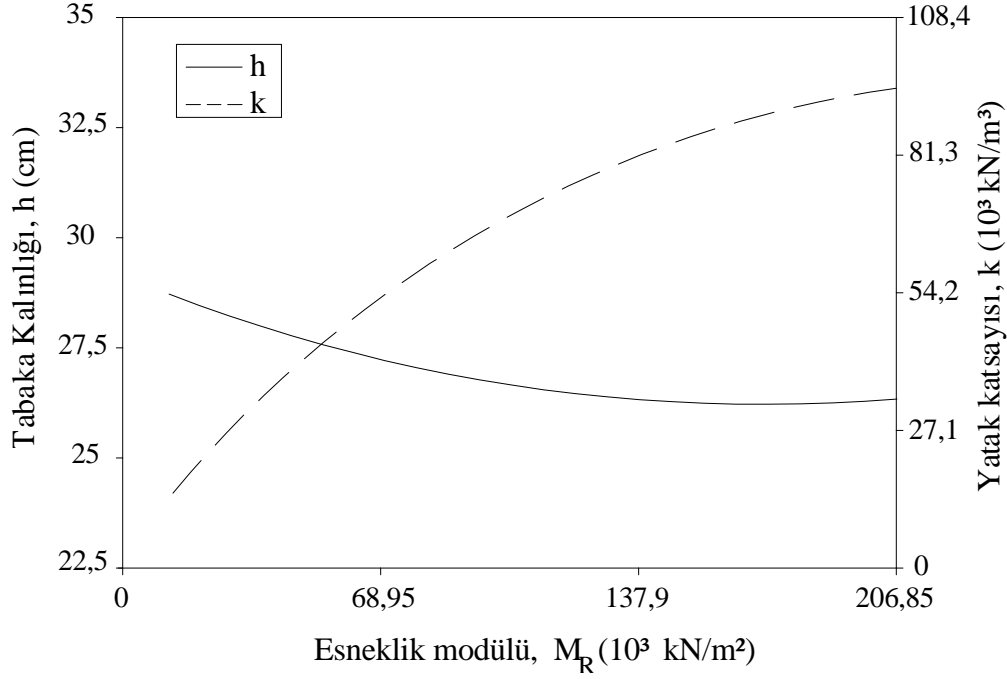
Şekil 30. Kaba ve ince daneli zeminlerin yatak katsayısı grafiği [51].

### 2.5.1.5. Esneklik Modülünün Yatak Katsayısı Değerine Etkisi

Rijit kaplamalarda tabaka kalınlığı zeminin esnekliğinden oldukça bağımsızdır. Rijit kaplamaların, temel zemininin çok zayıf olduğu durumlarda sıklıkla kullanılmasının nedenlerinden biri de budur [URL-5].

Zeminin esneklik modülü değeri, plaka yükleme deneyinin yanısıra esneklik modülü deneyi ve üç eksenli deney ile de bulunabilir. Fakat bunlar zaman alıcı ve pahalı deneyler oldukları için k değerini ve diğer zemin özelliklerini hem doğrudan hem de ekonomik olarak vermesi nedeniyle plaka yükleme deneyi daha cazip bir deney haline gelmiştir. Plaka yükleme deneyi ile elde edilen k değerinden CBR bulunup 10,34 ile çarpılırsa  $M_R$  (kN/m<sup>2</sup>) kolayca tayin edilebilmektedir (Şekil 31).





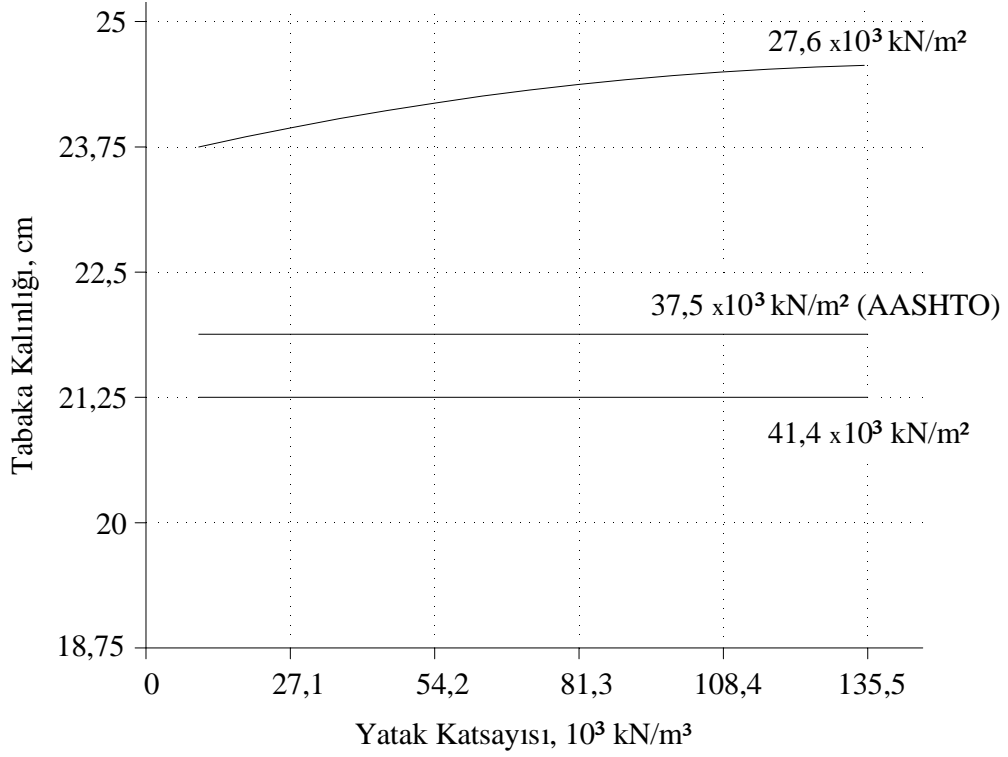
Şekil 31. 1986 AASHTO rijit kaplama tasarımının tabii zemin rijitliğine duyarlılığı [URL-5].

Şekil 31 açıkça gösteriyor ki,  $M_R$  değerinin artması tabaka kalınlığında az miktarda azalmaya neden olur. Yani tabaka kalınlıklarını belirlemede zeminin esneklik özelliğinin çok da etkin bir rolü bulunmamaktadır. Ayrıca esneklik modülü değeri arttıkça k değeri de artmaktadır.

#### 2.5.1.6. Tabaka Kalınlıklarının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi

Rijit kaplama tasarımında kullanılan üç ayrı beton numunesinin basınç dayanım değerleri için tabaka kalınlığının yatak katsayısına bağlı değişim grafikleri Şekil 32’de verilmektedir [URL-5].

Şekil 32’ye göre, rijit kaplama tasarımları tabakanın belli bir kalınlığına dek temel rijitliğine nispeten duyarsızdır. Yatak katsayısı sabit kabul edilirse, tabaka kalınlığı arttıkça basınç dayanımının düştüğü görülmektedir. Tabaka kalınlığı 23,75 cm olduğu andan itibaren aynı basınç dayanımındaki beton numune için yatak katsayısı arttıkça tabaka kalınlığı da artmaktadır.

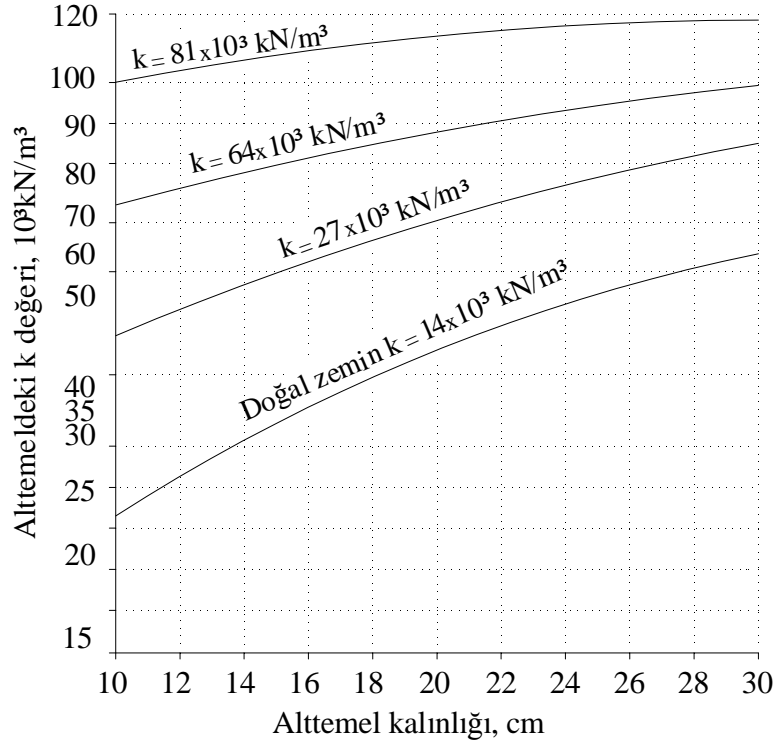


Şekil 32. 1972 AASHTO rijit kaplama tasarımının k değerine duyarlılığı [83].

### 2.5.1.7. Alttemel Kalınlığının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi

Alttemeller genellikle uygun daneli malzemeler kullanılarak oluşturulur. Bunun yanında çimento içeren malzemeler ile imal edilen alttemeller de sıkça kullanılmaktadır. Böylece alttemelin, temelin ve taban zeminin yük taşıma kapasitelerine olumlu olarak önemli katkılar sağlanmaktadır. Alttemelin daneli malzemedan yapılması durumunda kalınlık en az 150 mm olmalıdır.

Yerinde yapılan incelemeler ile mevcut taban zemininin özellikleri, yükün doğrudan zemine oturmasına imkân veriyorsa, başka deyişle k değeri  $100 \times 10^3$  kN/m<sup>3</sup>'ten daha fazla ise, alttemelin kullanılmasına gerek görülmeyebilir [30]. Şekil 33'te daneli malzemedan oluşan alttemel kalınlığı ile yatak katsayısı arasındaki ilişki grafik halinde sunulmaktadır. Grafiğe göre alttemel kalınlığı arttıkça k değeri de artmaktadır. Yani k değeri, alttemel tabakası sağlamlaştırıldıkça artar.

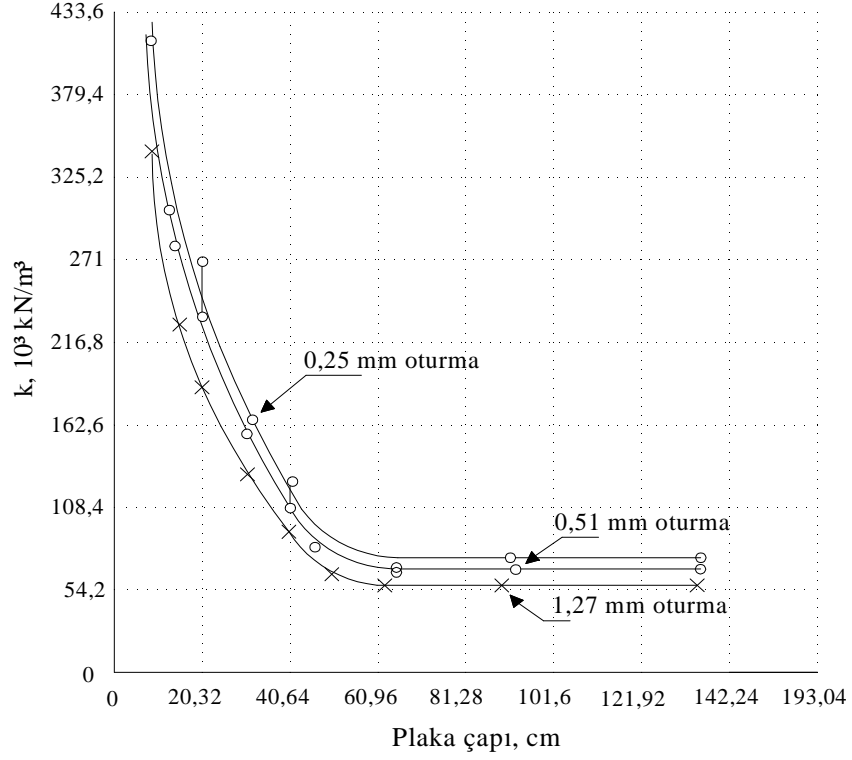


Şekil 33. Alttemel kalınlığı ile yatak katsayısı arasındaki ilişki [83].

#### 2.5.1.8. Yükleme Plakası Boyutlarının Yatak Katsayısı Değerine Etkisi

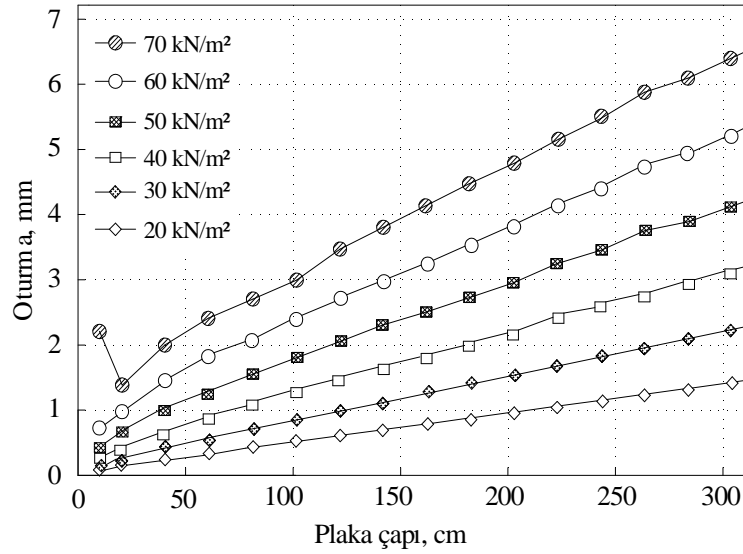
Şekil 34'te gösterildiği gibi, yüklenen plakanın çapı arttıkça  $k$  değeri, plaka çapı 60 cm olana kadar eksponansiyel şekilde azalmakta, daha büyük çaplarda değişmeyip sabit kalmaktadır. Çünkü zemin sıkışabilirlik sınırına dek sıkışmış olup artık daha fazla deformasyona uğrayamaz. Dolayısıyla da zeminin  $k$  değeri sabit kalır. Bu durum gösteriyor ki; 60 cm'den daha küçük çaplı plaka kullanmanın faydası yoktur. Çünkü yüklenen plaka, zemine sürekli olarak batır. Bu durumda oturma miktarı hesaplanamadığından  $k$  değeri de hesaplanamaz ya da güvenilir olmaz.

Kohezyonsuz zeminlerin taşıma kapasitesi, yükleme plakasının boyutları ile doğru orantılıdır. Bu yüzden plaka yükleme deneyinde çok küçük çaplı plakaların kullanılması, taşıma kapasitesini doğru yansıtmayacağı için oldukça sakıncalıdır.

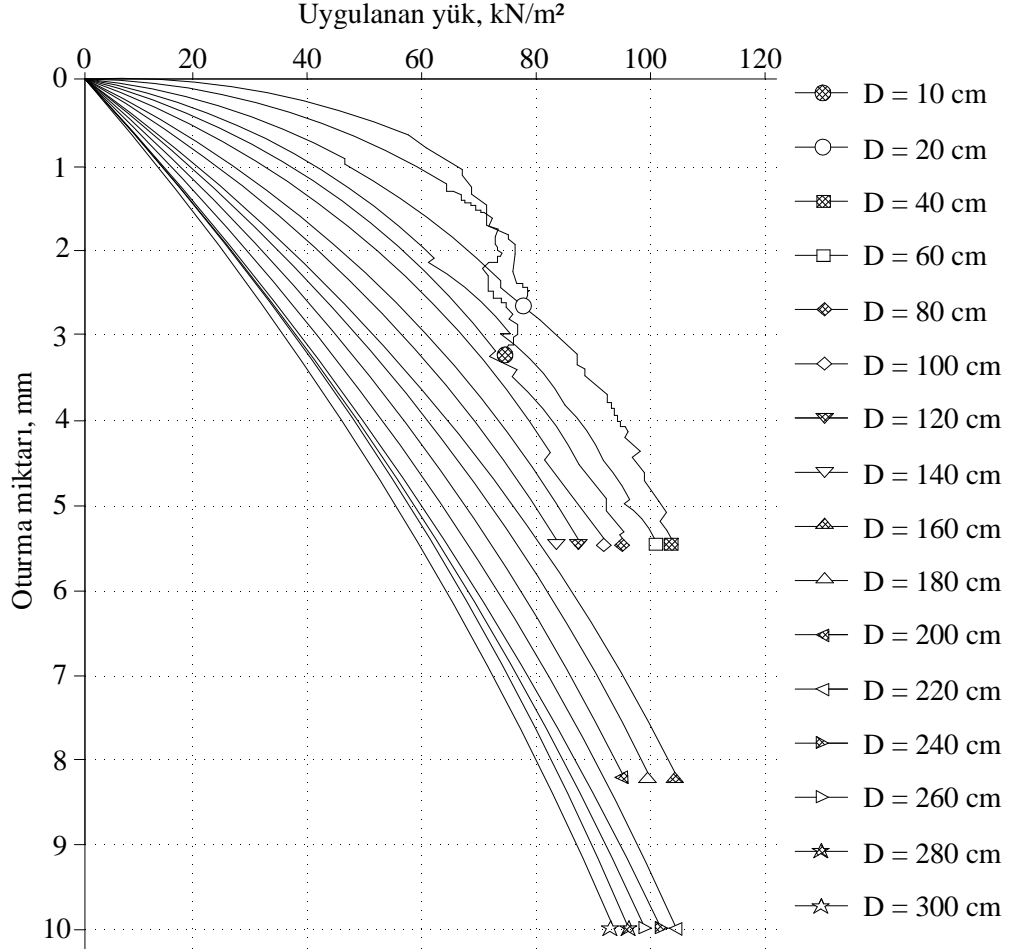


Şekil 34. Plaka çapı ile yatak katsayısı arasındaki ilişki [84].

Şekil 35'te birim hacim ağırlığı ( $\gamma$ ) 17 kN/m<sup>3</sup> olan bir tabii zemin üzerinde yapılan plaka yükleme deneyinde aynı yükleme koşulları altında oturma-plaka çapı ilişkisi gösterilmiştir [50]. Görüldüğü gibi oturma, yükleme yüzeyinin boyutlarına bağlı olarak yalnızca büyük plaka çaplarında ( $D \geq 100$  cm) orantılı olarak artmaktadır (Şekil 36).



Şekil 35. Plaka çapı ile oturma miktarı arasındaki ilişki [50].



Şekil 36. Yük - oturma eğrileri [50].

Elastik teoriye göre, yarı sonsuz isotropik zemin üzerine üniform bir P basıncı uygulandığı takdirde, D çaplı rijit bir plakanın oturması ile elde edilen elastisite modülü, E, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [85].

$$E = \frac{\pi}{4} \times k \times D \times (1 - \nu^2) \quad (17)$$

Burada;

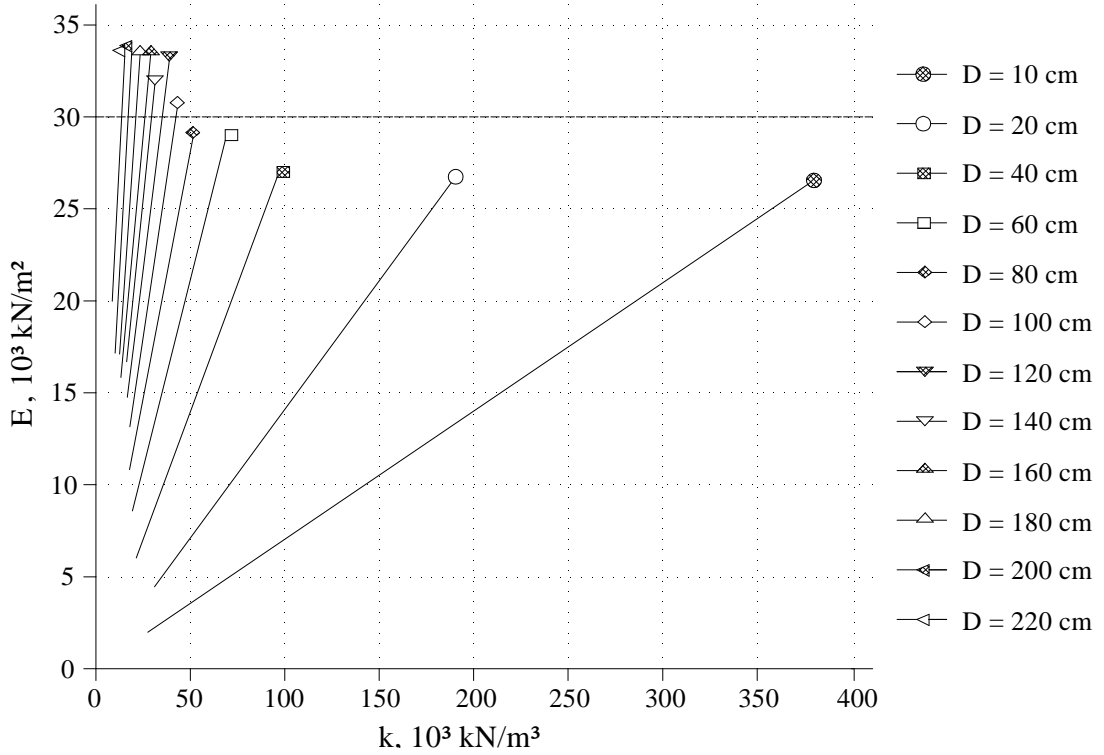
E : Zemin elastisite modülü (kN/m<sup>2</sup>)

D : Plaka çapı (m)

k : Zemin yatak katsayısı (kN/m<sup>3</sup>)

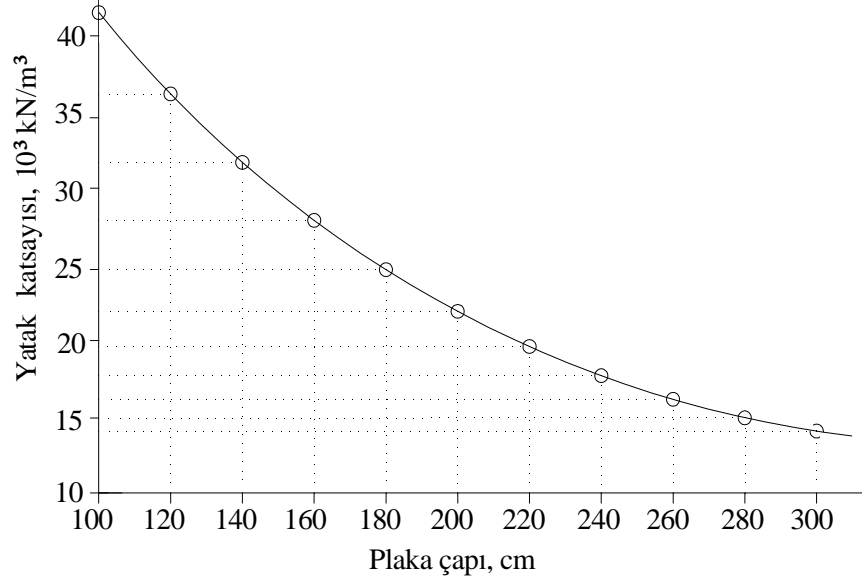
$\nu$  : Zemin poisson oranı

Şekil 36'da gösterilen yük-oturma eğrileri ve Şekil 37'de gösterilen elastisite modülü-yatak katsayısı eğrileri (17) No'lu bağıntıya uygulanacak olursa, 100 cm'den küçük çaplı plakalar kullanılarak yapılan plaka yükleme deneyinden elde edilecek elastisite modülünün değerlendirilmesinde yapılan hatanın çok büyük olduğu kolayca anlaşılabilir. Bunun nedeni, yüklü plaka altındaki zeminin, kendi elastik deformasyonunu küçük temas yüzeyi sebebiyle daha büyük çaplı plakalarinkine ( $D \geq 100\text{cm}$ ) nazaran daha çabuk (neredeyse aniden) tüketmesidir. Yani plaka çapı küçüldükçe zeminin oturma hızı ve miktarı daha fazla olmaktadır. Örneğin, Şekil 37'deki gibi plaka çapının 10 cm olması durumunda, plakaya  $10 \text{ kN/m}^2$ 'lik bir basınç uygulandığı zaman (öngörülen oturma  $0,05 \text{ mm}$ ) plaka altında kalan zeminin neredeyse tamamının yumuşadığı görülmektedir [50].



Şekil 37. Elastisite modülü-k değeri ilişkisinin plaka çapına bağlı değişim grafiği [50].

Çapları 100 ile 300 cm arasında değişen büyük çaplı plakalarla yapılan plaka yükleme deneyinden elde edilen k değerleri Şekil 38'deki grafikte gösterilmektedir. Grafığe göre k değeri, kullanılan yükleme plakasının ebatlarına bağlı olarak değişmekte olup plaka çapı arttıkça azalmaktadır.

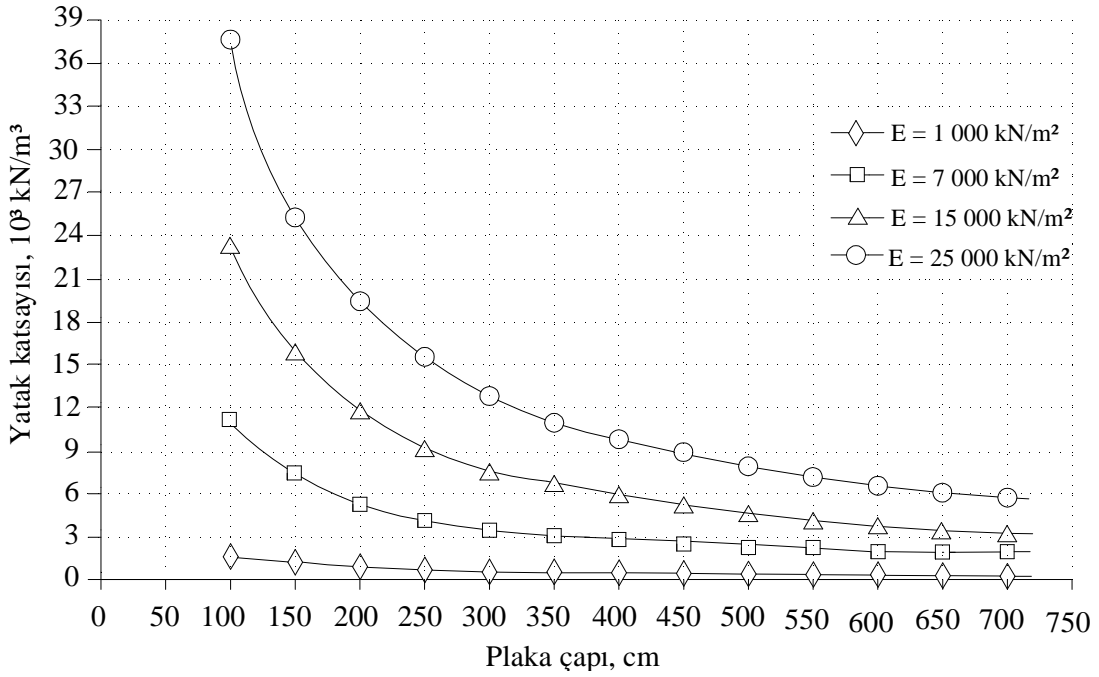


Şekil 38. Yatak katsayısı ile plaka çapı arasındaki ilişki [50].

#### 2.5.1.9. Plaka Çapı ile Elastisite Modülü İlişisinin Yatak Katsayısı Değerine Etkisi

Tabii zeminin elastisite modülü ve kullanılan plakamın çapı, plakaların zemine göre rijitliğinin ve oturma miktarlarının belirlenmesinde belirleyici etkenlerdir. Bu nedenle, zemin elastisite modülü ve plaka çapı değerlerindeki değişim, temel tabanında oluşan oturmaları ve nihayetinde yatak katsayısını değiştirmektedir.

Zeminin elastisite modülü değerlerindeki değişimin yatak katsayısı değerlerine olan etkisini araştırmak amacıyla, değişik plaka çaplarında ve elastisite modülü değerlerinde, tek tabakalı elastik zemine oturan rijit plakalar için yatak katsayısı (k) değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen k değerleri Şekil 39'de gösterilmektedir [URL-5].



Şekil 39. Hesaplamalar sonucu elde edilen yatak katsayısı değerleri [53].

## 2.6. Zeminlerin Taşıma Kapasitesi

Yol taban zemini, üstyapı yüklerinin oturduğu ve iletildiği malzemedir. Yolun geçirileceği taban zemini, sabit ve sonradan eklenen yükler altında bir miktar oturma gösterir [URL-12]. Üstyapı tabakalarının üzerine etkiyen sabit ve hareketli yükleri herhangi bir soruna yol açmadan taşıması gerekir. Bu nedenle üstyapı tabakalarının yeterli kalınlıkta olması, yeterince sıkışmış olması yani yoğun olması ve kullanılacak malzemelerin güvenliğini sağlayabilecek temel özelliklere sahip olması şarttır.

Çevre ve iklim koşullarının değişmesi durumunda taşıma gücünde azalmalar olmaması veya ilave gerilmeler gibi hususların oluşmaması veya oluşması durumunda bile kaplamada olumsuz etkiler yaratmaması gerekir [URL-13].

Uluslararası Yapı Kodu (CABO) tarafından değişik zemin cinsleri için tahmin edilen taşıma kapasitesi değerlerinin bir tablosu yapılmıştır (Tablo 13). Bu tabloya göre, çok ince daneli zeminler, kaba daneli zeminlerden daha düşük taşıma kapasitesine sahiptirler [86].



Tablo 13. Uluslararası Yapı Kodu (CABO)'na göre zemin taşıma kapasitesi değerleri [87].

Zemin Cinsi	Taşıma Kapasitesi kN/m <sup>2</sup>
Kristal kaya	54,4
Tortul kaya	27,2
Kumlu çakıl veya çakıl	22,7
Kum, siltli kum, killi kum, siltli çakıl veya killi çakıl	13,6
Kil, siltli kil veya kumlu kil	9,1

### 2.6.1. Üstyapıya Etki Eden Faktörler

Bir üstyapının taşıma kabiliyeti, donma, sıcaklık, nem ve diğer çevresel değişiklikler gibi çeşitli etkenlere göre yıl boyunca değişim gösterir. Yol üstyapılarında oluşacak yapısal veya fonksiyonel bozulmalar oturmalar üzerinde önemli rol oynar. Genel olarak mevsimsel etkiler her bir üstyapı tabakasının yapısal kapasitesini azaltır veya artırır.

### 2.6.2. Üstyapı Tabakaları ve Kalınlıkları

Esnek üstyapılar, çekme dirençleri fazla olmayan malzemelerden yapılmış alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşur (Tablo 14). Üstyapının altında tabii malzemeden oluşan taban zeminini bulunur. Trafik yükleri altında esnek üstyapı deforme olur ve oluşan gerilmeler üstyapı tabakalarından geçerek taban zeminine iletilir. Üstyapı tasarımında kullanılacak malzemenin mekanik özellikleri de bu gerilme dağılımına uygun olarak seçilir.

Tablo 14. Yol üstyapısı tabakaları ve kalınlıkları [88].

25 - 5 cm	Aşınma	Tabakası
5 - 10 cm	Binder	Tabakası
10 - 30 cm	Temel	Tabakası
10 - 30 cm	Alttemel	Tabakası
15 - 20 cm	Sıkıştırılmış	Taban Zeminini
	Doğal Taban Zeminini	

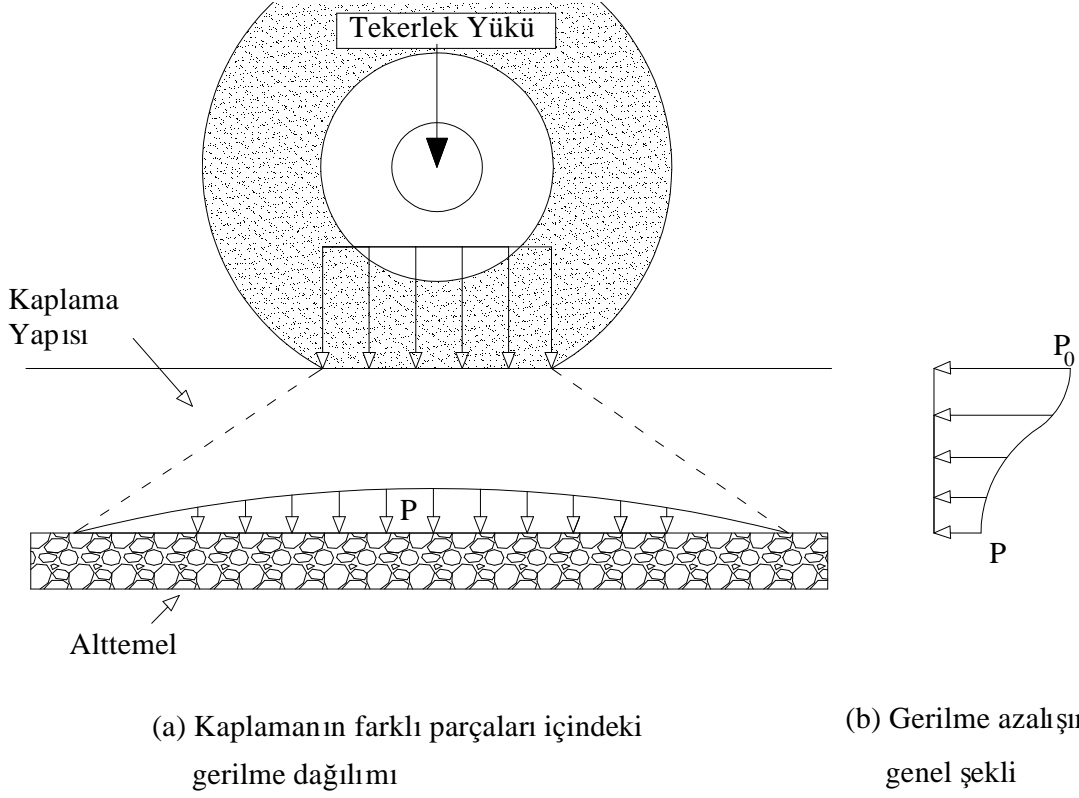
Yollar fenni şartnamesine göre [69], karayolu üstyapının taban zemini CBR değeri %16-%30 arasında ise alttemel kalınlığı; kuru çakıl kullanılması durumunda 20 cm, kırmataş alttemel kullanılması durumunda 15 cm olmalıdır. Üstyapı taban zemini CBR değeri  $\geq 30$  durumunda ise alttemele gerek görülmemektedir [63].

Alttemel malzemesi, inşaat ve tesviyesi tamamlanarak hazırlanmış taban zemini üzerine sıkışmış kalınlığı 20 cm'yi geçmeyecek şekilde tabakalar halinde serilir. Ancak sıkıştırma makinelerinin kapasitelerinin büyük olması durumunda tabaka kalınlığı 30 cm'ye kadar attırılabilir. Taban zemini, sıkıştırılmış tabii zeminden oluşur. Yapısal olarak en önemli tabakadır. Üstyapı yükü son olarak bu tabakaya iletilir.

Karayolu üstyapısı, tabakalı bir sistem olmasından dolayı çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Çünkü tabakalar farklı davranış gösteren malzemelerden meydana gelir. Alttemel ve temel tabakalarını oluşturan granüler malzemeler non-lineer elastik davranış gösterirler. Aşınma tabakasında ise özellikle sıcaklığa ve yükleme hızına bağlı olarak visko-elastik davranış gösteren bitümlü karışımlar kullanılmaktadır [63].

### 2.6.3. Tekerlek Yükünün Üstyapı Gerilme Dağılımı Üzerindeki Etkisi

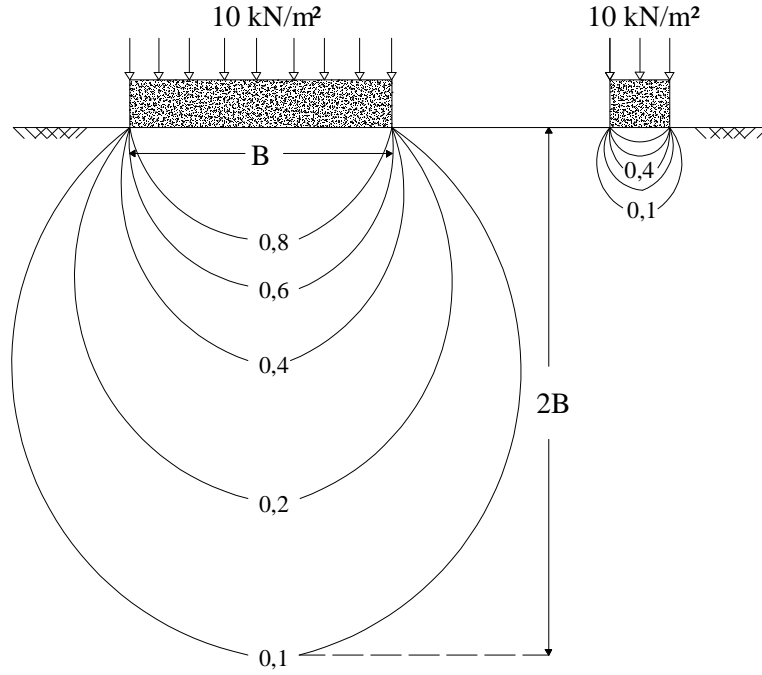
Tekerlek yükleri genelde dairesel üniform yayılı olarak temsil edilmektedir. Bu yükler üstyapı tabakaları arasında gerilme dağılımı meydana getirirler. Yükleme büyüklüğü ve süresi üstyapıda oluşacak oturma üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Üstyapılara gelen yüklerin oluşturduğu gerilme dağılımını en üst tabakadan en alt tabakalara doğru ilerlemektedir. Bu sebeple tabakalarda kullanılan malzeme özellikleri de bu gerilme durumundaki farklılıklardan dolayı çeşitlilik gösterir. Şekil 40'ta gösterildiği gibi üstyapı, tekerlek noktasında oluşan gerilmeleri alt tabakalara yaymakta ve bu yüklemeyi absorbe etmeye çalışmaktadır [51].



Şekil 40. Üstyapıda gerilme dağılımı [88].

#### 2.6.4. Gerilme Eğrilerinin Özellikleri

Plakaların altındaki eğri çizgiler (Şekil 41), yükleme büyüklüğüne bağlı olarak oluşan gerilmedeki eşit artış çizgileridir. Gerilmeler, büyük veya küçük yükleme plakaları altındaki zemine aynı birim basıncı taşırlar. Bu eşit basınç taşıyan eğriler genellikle “basınç soğanı” olarak adlandırılırlar. Basınç soğanı kavramı, incelenmesi gereken taban zemininin hangi derinlikte olduğunu belirlemek için kullanılmaktadır. Plaka yükleme deneyinde, yüklenmiş plaka altında bulunan zeminde oluşan gerilme dağılımındaki en derin çizgi, plaka genişliğinin yaklaşık iki katı kadar derinliğe uzanmış ve uygulanan yükün %10’una eşit miktarda artış gösteren bir gerilmeyi temsil etmektedir [86].



Şekil 41. Zemin yüklerinin neden olduğu basınç soğanı çizgileri [89].

Zeminde yapılan plaka yükleme deneyinin olası sakıncaları şöyledir;

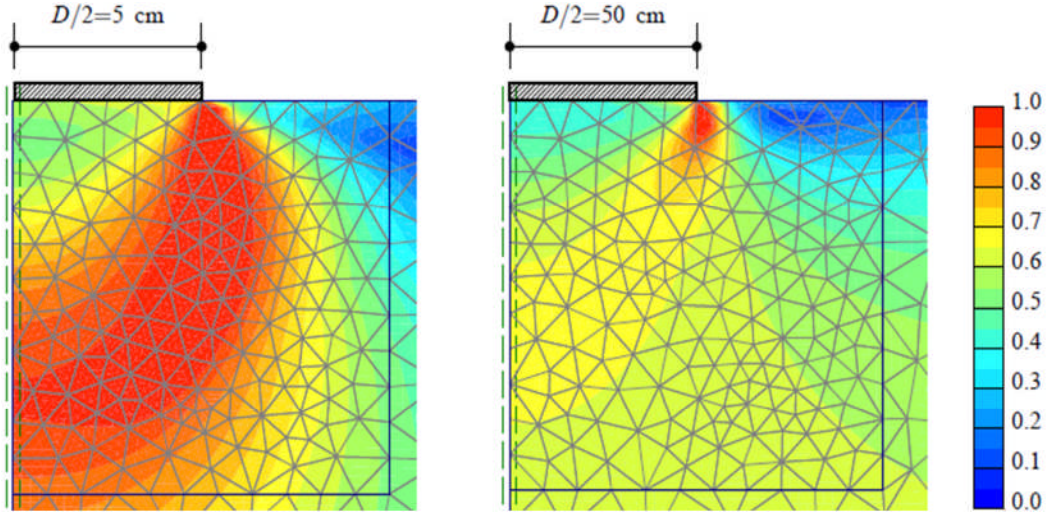
a) Plakanın altında farkına varılmayan iri bir blok veya taşın olması

b) Plakanın kısıtlı boyutu nedeniyle basınç soğanlarının zeminde yeterince derine sarkmaması, böylece alt düzeylerde bulunabilecek çok yumuşak bir tabakanın varlığını algılayamaması

Bu nedenle her deneyden sonra deney yapılmış olan yerin kazılması veya el burgusuyla delinerek zeminin homojenliğinin kanıtlanması gerekmektedir [36].

### 2.6.5. Plaka Boyutlarının Gerilme Dağılımına Etkisi

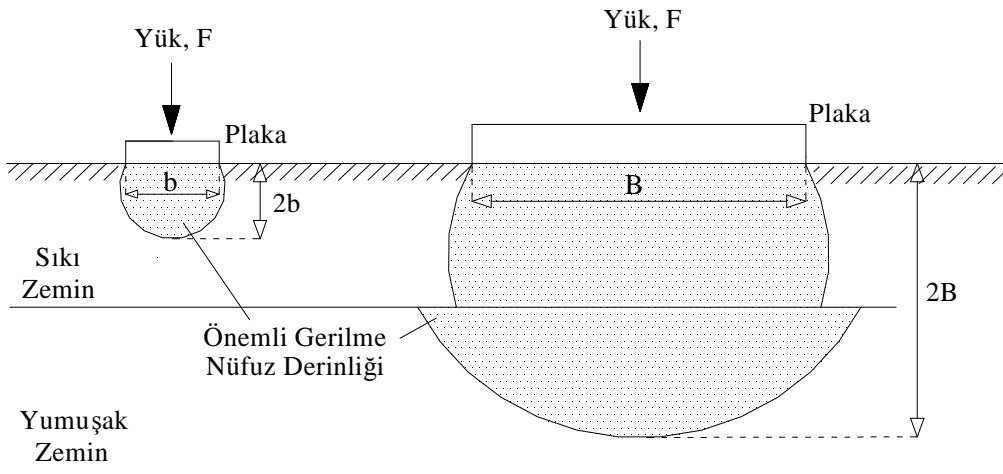
Şekil 42’de nispi kesme gerilmesi taşıyan bir zemin üzerindeki iki farklı yükleme plakasına  $4,7 \text{ kN/m}^2$ ’lik bir basıncın uygulanmasıyla oluşan gerilme dağılımı sonlu elemanlar ile tasvir edilmektedir [50]. Şekildeki 10 cm çaplı plaka zeminde, güçlü ve derin bir alana yayılan gerilmeler oluşturmuştur. Çapın 100 cm olduğu durumda ise plakanın oluşturduğu gerilme 10 cm çapındaki plakaninkine nazaran oldukça küçük olup, çok az bir alanı etkileyebilmiştir. Görüldüğü gibi uç noktadaki gerilme dağılımının şekli plaka çapı arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni, plaka boyutlarının artmasıyla beraber yük daha geniş bir plaka alanına yayılacağından zemine aktarılan basıncının azalmasıdır.



Şekil 42. 10 ve 100 cm çaplı plakaların zeminde oluşturduğu gerilme dağılımları [50].

### 2.6.6. Plaka Etki Derinliği

Üst yapı yükleri, yüzeyden aşağıya doğru azalarak etki eder. Etki belli bir derinlikte sıfırlanır. Bu derinliğe etki derinliği denir. Plaka yükleme deneyinde homojen zeminlerin etki derinliği yaklaşık olarak plaka çapının iki katı kadardır. Plaka yükleme deneyinden elde edilen yatak katsayısı değerinin çok büyük yüklerin etkideği yapıların temelini oluşturan zeminlerin hesabında kullanılması sakıncalıdır [90]. Çünkü plakanın küçük boyutu nedeniyle deney sadece üstteki zeminlerin özelliklerini yansıtmakta olup zemin özelliklerinin derinlikle değiştiği durumlarda yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir (Şekil 43).



Şekil 43. Plaka boyutlarına ve malzeme cinsine bağlı olarak tabakalarda meydana gelen gerilme dağılımı [URL-14].

Plaka yükleme deneyleri ile elde edilen yatak katsayısı değerleri düzeltilmeden kullanılmaları halinde, hareketli yükler altındaki uçak pisti ve yol kaplama tasarımında kullanılabilir. Ancak büyük yüklerin etkidiği bina temeli tasarımında kullanılabilmesi için temel boyutlarına bağlı olarak düzeltilmeleri gerekmektedir.

Avrupa Birliği'ne bağlı ülkeler tarafından yapıların teşkilinde inşaat mühendisliği hizmetlerinin daha doğru, ortak bir anlayış içerisinde gerçekleştirilmesi ve haksız rekabetin önlenmesi için tek standart kullanımı amacıyla kullanmaya başlanan yapısal standart esasları setinin genel adı Eurocode'dur. Bu standartlar setinin 2010 yılı itibariyle Avrupa Birliği'ne bağlı tüm ülkeler tarafından kullanılması zorunlu hale getirilmiştir [URL-15]. Eurocode'un bazı standartları Türk Standartları Enstitüsü (TSE)'ne de eklenmiştir [90].

Eurocode, plaka yükleme deneyi ile elde edilen verilerin karayolu tasarımında kullanılmaları ile ilgili olarak bazı kayıtlara sahiptir. Bu kayıtlara göre, kullanılan plaka boyutlarının, tasarımı yapılmak istenen temel boyutlarına göre seçilmesi durumunda deney sonucunda elde edilen veriler tasarımda direkt olarak kullanılabilir. Plaka boyutlarının, tasarımı yapılan temel boyutlarından küçük olması durumunda ise deney sonuçlarının temel tasarımlarında kullanılabilmesi için, temel boyutlarına bağlı olarak ampirik yaklaşımlarla düzeltilmeleri gerekmektedir [89]. Bu amaçla başta Terzaghi olmak üzere birçok araştırmacı, yatak katsayısı değerlerinin temel boyutlarına göre düzeltilmesi için bağıntılar önermişlerdir [URL-5].

Plaka yükleme deneyleri rijitlik teorisine göre yorumlanmıştır [12]. Deney sonuçları, yükleme hızına, plaka çapına, deney derinliğine ve deneye tabi tutulan zemin özelliklerine göre değişmektedir. Deneyin en zayıf yanı ise plaka çapının gerçek temele oranla ufak olması nedeniyle etkilediği derinliğin kısıtlı olmasıdır. Böylece üstte sert, altta ise yumuşak bir zemin profilinin bulunması halinde kısıtlı boyuttaki plakanın basınç soğanları yumuşak tabakaya dek uzanamayacağından taşıma kapasitesi gerçek değerinden çok yüksek ölçülecek ve tehlikeli bir durum ortaya çıkacaktır. Tersisi durum, yani yumuşak bir tabaka altında sert zemin, ortamı olduğundan daha kötü göstereceğinden aynı ölçüde sakıncalıdır.

### **2.6.7. Tabakalı Zeminlerde Plaka Yükleme Deneyinin Sakıncaları**

Binalar gibi büyük yapıları oturtacağımız bir temel inşasında taban zemininin özelliklerini plaka yükleme deneyi ile bulmaya çalışırsak bu büyük derinlik için çok büyük bir plaka genişliğine ihtiyaç duyulur ki bu da neredeyse imkânsızdır. Zaten alan büyüdükçe

sapmalar da artmaktadır. Dolayısıyla temel tasarımı için bu yöntem kullanışlı değildir. Lakin servis yüklerinin daha küçük alanlar üzerinde etkiği yol üstyapısının (temel zeminleri üzerindeki tekerlek yükleri gibi) tasarım problemleri için yararlı bir deney olarak düşünölmektedir.

Plaka yükleme deneyi ile ulaşım yapılarının taban zeminleri veya diğer tabakaları için taşıma kapasitesinin tespiti mümkündür. Eğer sağlam bir zemin tabakası altında zayıf ve sıkışabilir bir zemin tabakası mevcutsa, özellikle yüksek dolgularda oturmalar ve/veya blok şev kaymasını tahmin edebilmek amacıyla plaka yükleme deneyi yapılmalıdır [8].

Deneyin tabakalı bir zemin üzerinde gerçekleştirilmesi durumunda; eğer üstteki zemin, alttaki zeminden daha sağlam ise plaka yükleme deneyi temel tasarımı için emniyetsiz sonuçlar verecektir. Tam tersi durumda ise temel tasarımı aşırı emniyetli yapılacaktır. Bu durumlardan kaçınmak için ya 100 cm çapındaki plakalar kullanılmalı (bu durumda bile boyut etkisi önemlidir) ya da zemin profili gözden geçirilerek sonuçlar yorumlanmalıdır [36].

### 3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Son yıllarda, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak teorik analizlerde sayısal çözümlerin önemi artmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal çözüm yöntemlerinden en etkili ve sistematik olanıdır [91]. Sonlu eleman analizleri yol yapıları için önemli ve vazgeçilmez olduğundan şimdiye kadar birçok program geliştirilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi, farklı mühendislik dallarınca özel analizler gerektiren mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan nümerik bir yöntemdir. Yöntemin ilk kullanımı 1900'li yıllara dayanır [92]. Sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS programı, 1971 yılından günümüze kadar kendisine giderek daha büyük bir uygulama alanı bulacak şekilde geliştirilmiştir [93].

Bu çalışmada plaka yüklemesine bağlı olarak alttemel ve temel tabakalarında oluşan düşey gerilme dağılımlarına bakılmıştır. Buradaki amaç farklı çap, kalınlık ve yüklemeler altında temel tabakası altında oluşan gerilme değerlerinin sıfır olduğu durumu tespit etmektir. Temel tabakası altındaki gerilme değerlerinin sıfırdan büyük olması, alttemel tabakasında gerilme ve deformasyonların oluştuğu ve dolayısıyla da plaka yükleme deneyinin aslında her iki tabakanın yük-oturma değerlerini okuduğu anlamı taşımaktadır. Bu durumda da temel tabakanın gerçek yük-oturma ilişkisi çıkarılamamış olacaktır. Bir benzetme yapılacak olursa tartışmaların şiddetli olduğu bir ortamda, ses gürültüsünden dolayı kimin ne dediği belli olmayan bir ortama benzetilebilir. Böyle bir durumda yük-oturma ilişkisine bağlı olarak elde edilen k değerlerinin de hangi tabakaya ait olduğunu tespit etmek güç olacaktır.

#### 3.1. ANSYS Programı

ANSYS programı, basitlikten karmaşıklığa, lineerlikten non-lineerliğe, statik analizden dinamik analize kadar çoğu sonlu elemanlar analizini yapabilme özelliklerine sahip olup, bugün tüm dünyada en çok kullanılan programların ilk sıralarında yer almaktadır [94].

Bu çalışmada, modelleme ve analizin gerçekleştirileceği bilgisayar programı olarak dünyada değişik mühendislik dallarınca yaygın şekilde kullanılan ve ülkemizde de son zamanlarda sıkça adını duyduğumuz ANSYS yazılımı seçilmiştir. Plaka yükleme



deneyinin etki derinliği hakkında daha iyi bilgi sahibi olabilmek amacıyla ANSYS programına gerekli veriler girildikten sonra tabakalı zeminlerdeki gerilme dağılımı gözlemlenmiştir.

Literatürde belirtilen plaka yükleme deneyinden elde edilen düşey deformasyonlarla, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen düşey deformasyonlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, yükleme esnasında gerilme ve vektörel dağılımlar gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde 30 cm kalınlığında alttemel ve 30 cm kalınlığında temel tabakası modellenmiştir. Kesit genişlikleri her iki tabaka için de 3,5 m olarak alınmıştır. Yöntemde kullanılan elastisite modülü değerleri temel zemini için  $150 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>, alttemel zemini için  $75 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup> olup, plaka üzerine uygulanan yük 10 kN'dur (Tablo 15).

Tablo 15. Deney zemini için model parametreleri

Tabaka adı	Tabaka kalınlığı, h (cm)	Kesit genişliği, L (m)	Elastisite modülü, E (kN/m <sup>2</sup> )
Temel	30	3,5	$150 \times 10^3$
Alttemel	30	3,5	$75 \times 10^3$

Sonlu elemanlar çalışmasında asfalt yol kaplamalarında kullanılan klasik elastisite modülü değerleri kullanılmıştır. Hâlbuki her tabakanın elastisite modülü veya mukavemet değerinin o tabakanın su muhtevası, boşluk oranı, yoğunluk gibi faktörlere bağlı olduğu unutulmamalıdır. Dolayısıyla elde edilen bulgular, arazide farklı zemin ortamlarında plaka yükleme deneyleri yapılarak doğrulanmalıdır. Bu şekilde yeni AASHTO şartnamesinin de uygun gördüğu mekanistik çalışması tam anlamıyla tamamlanmış olunacaktır. Yine de çalışmada veri olarak girilen esneklik modülü değerleri genel kabul görmüş değerlerdir. Gaye de, plakanın çapının, kalınlığının ve yükleme şiddetinin bir alttaki tabakada gerilmeler oluşturmıyacak şekilde belirlenmesidir

ANSYS programı kullanılarak sırasıyla; anahtar noktaları, çizgiler, alanlar ve hacimler oluşturulmuştur. Yol tabakaları X, Y, Z koordinat sisteminde oluşturulmuş ve elastik elemanlar atanmıştır. Otomatik Mesh seçeneği kullanılarak zemin elemanları nodlara bölünmüştür. Plaka altındaki bölgelerde nod sayısı artacak şekilde refine işlemi yapılmıştır. Problemin çözümü için toplam 35231 eleman kullanılmıştır.

## **4. BULGULAR VE İRDELEME**

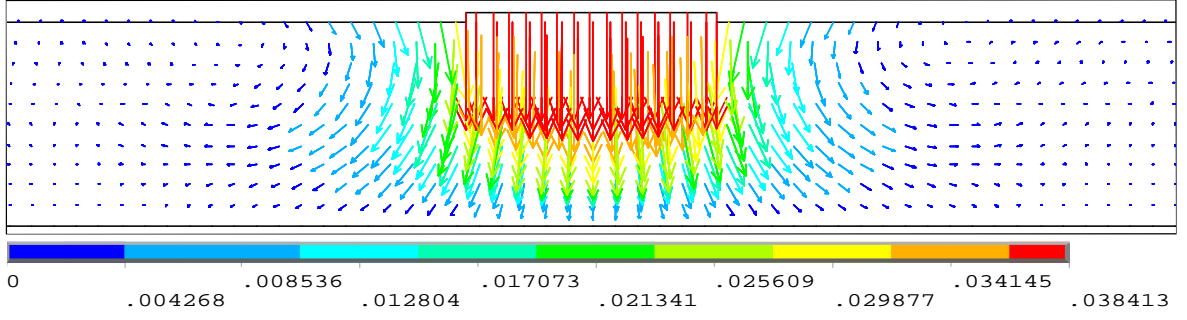
### **4.1. Giriş**

Tezin bu bölümünde uygulama yükünün, plaka çapının ve plaka kalınlığının tabakalardaki gerilme dağılımları üzerindeki etkileri ANSYS programı kullanarak bulunmuş ve bulgulara göre de elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

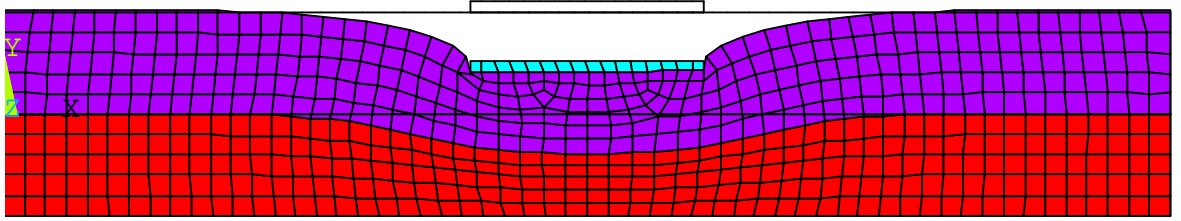
### **4.2. Yüklenen Plaka Altındaki Gerilme-Deformasyon-Vektör Dağılımı**

Zemin danelerinin, vektörün bileşke şiddeti ve doğrultusunda hareket ettikleri fizik ve zemin kuramlarından bilinmektedir. Sonlu eleman vektörel analizleri sayesinde, yükleme altındaki zemin davranışları hakkında genel bir bilgi edinilmesi mümkün olmuştur. Sonlu eleman vektör analizlerinden, 10 kN yükleme altında, 30 cm çapında ve 3 cm kalınlığındaki plakanın altındaki tabakada yüklemekten dolayı oluşan vektörel dağılımlar Şekil 44'te gösterilmekte olup kuvvet dağılımları gösterilmektedir.

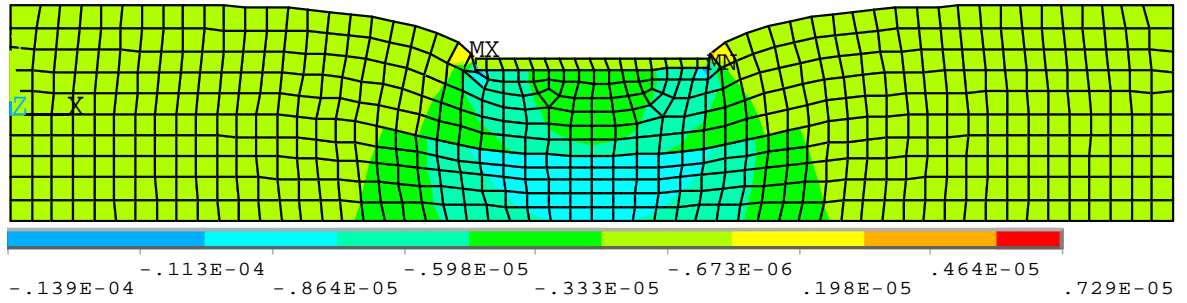
Şekil 44'te vektör şiddetleri plaka altında çok büyük olup, yukardan aşağıya doğru ve kırmızı renkten mavi renge doğru azalmakta, ayrıca sağa ve sola yayılma eğilimi göstermektedir. Ayrıca gerilme çizgileri de sadece incelemesi yapılan temel tabakasında kalmamış, alttemel tabakasını da etkilemiştir (Şekil 45, 46). Bu nedenle deneyde okunan değerler her iki tabakaya ait olacaktır. Bu durumdan kaçınmak için, yükleme büyüklüğünün azaltılması ya da plaka boyutlarının artırılması gerekmektedir. Ayrıca sonlu elemanlar çalışmasında elde edilen düşey deformasyon değerleri 4 mm ile 6 mm arasında değişim göstermekte olup literatür çalışmalarıyla da örtüşmektedir.



Şekil 44. Tabaka derinliği boyunca vektör dağılımı



Şekil 45. Yükleme altında tabakalardaki düşey deformasyonlar



Şekil 46. Düşey deformasyonlara bağlı olarak oluşan toplam birim şekil değiştirme miktarlarının tabakalardaki dağılımları

### 4.3. Uygulama Yükünün Etkisi

Bu çalışmanın esas gayelerinden biri de, arazi uygulamalarında plaka yükleme deneyleri aşırı yüklemeler altında gerçekleştirildiği için sadece ölçümü istenilen tabakanın değil aynı zamanda altındaki diğer tabakaların değerlerinin de hesaba katılması halinde ölçülen değerlerin hangi tabakaya ait olduğunun tam olarak tespit edilemediğinin ispatıdır. Bu anlamda sonlu eleman çalışmasına bağlı olarak arazide 10 kN'dan daha fazla yüklemelerin yapılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Sonlu elemanlar modelinde, farklı çaplardaki plakalar üzerine değişen miktarlarda yüklemeler yapılmış ve elde edilen verilere göre, yükleme değerinin 10 kN ve üstünde olması durumunda temel tabakasinda gerilmelerin  $0,15 \text{ kN/m}^2$  (ihmal edilebilir)'den daha büyük değerlere ulaştığı gözlenmiştir. Böyle bir durumda arazide bu yük değerinden fazla yük uygulandığı takdirde yük-düşey deformasyon değerleri bir nevi alttemel tabakasını da hesaba katmış olacaktır ki bu da bize yanıltıcı bilgiler verecektir. 10 kN daha düşük yüklemelerde ise ilgili tabakanın üst kısmına ait değerler ölçülmüş olacaktır.

#### 4.4. Plaka Çapının Etkisi

İlk modelde, 70 cm çaplı plaka oluşturulmuş sonraki modellerde ise bu genişlik 30, 100 ve 200 cm olarak tutulmuştur. Tablo 16'da, 200 cm çaplı plakanın kullanılmasının daha uygun olacağı görülmektedir. Fakat 200 cm çaplı plakanın 10 kN yükleme altında oluşturduğu  $0,63 \text{ kN/m}^2$  lik gerilme oldukça düşüktür. Sonlu elemanların gerçek arazi koşullarını %10 hata payı ile temsil ettiği düşünülürse, temel tabakasının altında gerilmelerin oluşmama ihtimaline karşın 100 cm çaplı plakanın kullanılması daha uygun olacaktır. 30 cm çaplı plakanın kullanılması durumunda ise düşey gerilme değerlerinde büyük artışların olabileceği anlaşılmaktadır. Karayolu şartnamelerinde alttemel ve temel yol tabaka kalınlıklarının 25-40 cm olduğu göz önünde bulundurulursa ve arazide de bu kalınlıklardan daha fazla kalınlıklar mevcut olmayacağı için plaka çapının daha geniş tutulması durumunda tabakalarda oluşabilecek gerilme değerleri azaltılmış ve daha geniş bir alanı temsil edecek şekilde veriler toplanmış olur.

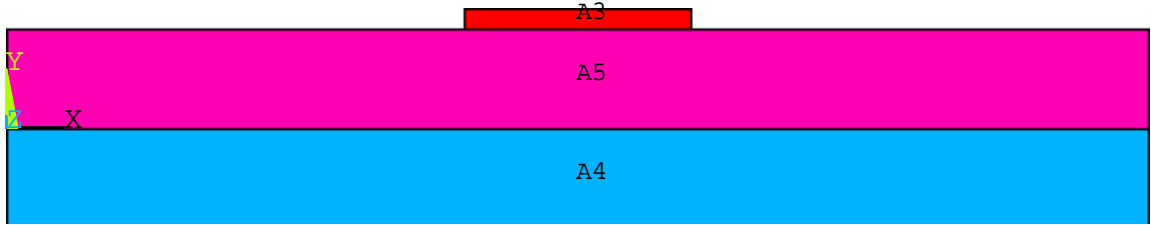
Tablo 16. Farklı çap ve yüklemeler altında temel tabakasinda oluşan düşey gerilme değerleri

Yük, kN	Plaka Çapı, cm			
	200	100	70	30
Düşey Gerilme, $\text{kN/m}^2$				
10	0,636943	2,547771	5,199532	20,79813
50	3,184713	12,73885	25,99766	103,9906
100	6,369427	25,47771	51,99532	207,9813
150	9,55414	38,21656	77,99298	311,9719
200	12,73885	50,95541	103,9906	415,9626

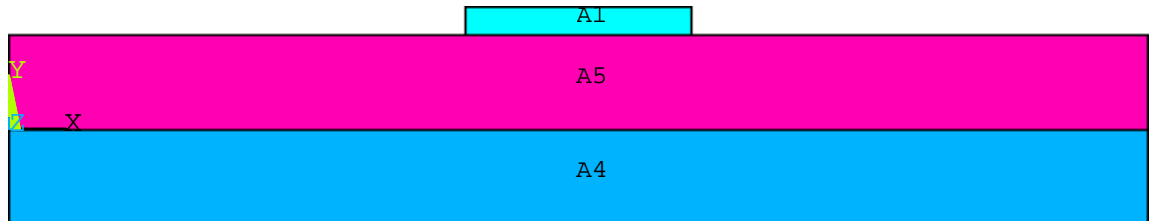
Yapılan başka bir çalışmada [36] da bizim çalışmamızla benzer bulgulara ulaşmıştır. Bu çalışmaya göre, plaka yükleme deneyinin tabakalı bir zemin üzerinde gerçekleştirilmesi durumunda; eğer üstteki zemin, alttaki zeminden daha sağlam ise plaka yükleme deneyi temel tasarımı için emniyetsiz, tam tersi durumda ise temel tasarımı için aşırı emniyetli sonuçlar vereceği belirtilmiştir. Bu durumlardan kaçınmak için ise en az 100 cm çaplı plaka kullanılması önerilmiştir.

#### 4.5. Plaka Kalınlığının Etkisi

İlk modelde, 3 cm kalınlığında plaka modellenmiştir. Plaka kalınlığının artırılması durumunda gerilme dağılımındaki değişimleri belirlemek amacıyla ayrıca 6 cm ve 9 cm kalınlığındaki plakalar da modellenmiştir (Şekil 47, 48). Lakin plaka kalınlığının artırılması düşey gerilme değerlerinde önemli değişikliklere sebep olmamıştır. Her üç kalınlık durumu için de aynı düşey yayılı yükler uygulanmıştır. Benzer sonuçlar 100 cm ve 200 cm çaplı plaka modelleri için de bulunmuştur.



Şekil 47. 6 cm kalınlıkta plaka modeli



Şekil 48. 9 cm kalınlıkta plaka modeli

## 5. SONUÇLAR

Plaka yükleme deneyinin araştırılması kapsamında yürütülen bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Sonlu elemanlar çalışmasından elde edilen veriler ışığında, yükleme plakası çapının en az 100 cm olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

2. Plakaya uygulanması gereken yükün 10 kN olması gerektiği anlaşılmıştır. 10 kN'dan daha büyük yüklemelerde yükleme yapılan tabakanın bir altındaki tabakada da gerilmeler oluşacak ve bunlara bağlı olarak plaka yükleme deneyinin ölçtüğü k değerlerinin hangi tabakaya ait olduğunun kestirmek güç olacaktır. 10 kN'dan daha küçük yüklemelerde ise ilgili tabakanın üst kısmına ait değerler ölçülmüş olacaktır.

3. Plaka yükleme deneyinde plaka kalınlığının artırılması düşey gerilme değerlerinde önemli değişikliklere sebep olmamıştır.

Yukarda bahsedilen boyut ve yüklemeler altında, arazide mekanistik çalışmalar için önem arz eden k (reaksiyon modülü) değerleri sağlıklı bir şekilde elde edilmiş ve diğer deneylere göre daha ekonomik ve etkili arazi çalışmaları yapılmış olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

1. Tekinsoy, M. A., Harbiyeli, S., Örnek M. ve Demir, A., Antakya Aşırı Konsolide Killerinde Plaka Yükleme Deneyi ile Taşıma Gücü Analizi, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 2007.
2. Harbiyeli S., Plaka Yükleme Deneyi ile Laboratuvar Deneylerinden Bulunan Emin Taşıma Gücünün Karşılaştırılması Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 1992.
3. ISI:1888-1982: Method of Load Tests on Soils, Indian Standards Institutions, New Delphi, India, 1988.
4. Suh, C., Kim D. and Won, M., Development of the Thickness Design for Concrete Pavement Overlays Over Existing Asphalt Pavement Structures, Center for Transportation Research, Texas, 2008.
5. ASTM, Part 11, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1967.
6. Atalar, C., Shin, E. C. ve Das, M. D., Kazandırılmış Arazilerde Geogrid Donatı Deneyleri, 2. Ulusal Geosentetikler Konferansı, İstanbul, 2006.
7. Ermem, C. ve Durgunoğlu, T. H., Türkiye CPT Veri Tabanı ve Mevcut Ampirik Bağlantılar İle Karşılaştırma, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, İstanbul, 2000.
8. Tunç, A., Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara, 2002.
9. Toğrol, E. ve Sivrikaya, O., Arazi Deneyleri ve Geoteknik Tasarımda Kullanımları, Birsen Yayınevi, Ankara, 2009.
10. Kılıç, R. ve Ulaş, K., Zemin ve Kaya Mekaniği Uygulama Notları, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, 2009.
11. Geotechnical Engineering and Drilling Services, In-Situ Services, Cone Penetrometer Test, Geolabs Inc., ABD.

12. Illinois Department of Transportation (IDOT), Pavement Technology Advisory-Dynamic Cone Penetrometer Testing and Data Collection, Bureau of Materials and Physical Research, Illinois, 2005.
13. Özbayoğlu, F., Gürel, A. ve Sivrikaya, O., DCP Portatif Penetrasyon Cihazının Dolgu Sıkışma Kontrollerinde Kullanılması, I. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu, Gaziantep, (1997) 317-330.
14. Dipova, N. ve Cangir, B., Antalya Zeminlerinde CPT (Konik Penetrasyon Deneyi) Uygulamaları, Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, Antalya, 2005.
15. Yurtçu Ş. ve Kaval M., Zemin Profilinin Yerinde Tanımlanmasında Etkili Bir Yöntem: Koni Penetrasyon Deneyi (CPT), Electronic Journal of Construction Technologies, 5, 1, (2009) 50-60.
16. Sivrikaya, O. ve Toğrol, E., İnce Daneli Zeminlerde SPT Sonuçlarının Düzeltilmesi Üzerine Bir Çalışma, İTÜ Mühendislik Dergisi, 6, 2, (2003) 59-67.
17. Mori, H., Review of Japanese Sub-surface Investigation Techniques, Journal of South East Asian Society Geotechnical Engineering, 10, (1979) 219-242.
18. Durgunoğlu, H. T. ve Toğrol, E., Penetration Testing in Turkey: State of The Art Report, ESOPT, 1974.
19. Arkün, M. ve Çalışan, O., Zemin Mekaniği, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Seminerleri, Van, 2008.
20. Uzundurukan, S., İnce Daneli Zeminlerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin SPT ve DPT Verilerine Bağlı Ampirik İfadeler İle Tespitine Yönelik Bir Çalışma, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2001.
21. Dinamik Penetrasyon Deneyleri, Arazi Çalışmaları ve Deneyler, Bina ve Bina Türü Yapılar İçin Zemin ve Temel Etüdü Raporu Genel Formatı, 2003.
22. Erbulak, A. ve Bayça, S., Zemin Araştırmalarında (Zemin Etütlerinde) Arazi Çalışmaları, Celal Bayar Üniversitesi, Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, Manisa, 2004.
23. Dursun, M., Taşıma Gücü Hesaplamaları, Bitirme Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 1999.



24. Muromachi, T. and Kobayashi, S., Comparative Study of Static and Dynamic Penetration Tests Currently in Use in Japan, Proc. 2nd European Symposium on Penetration Testing, (1982) 297-302.
25. Tonks, D. M. and Whyte, L., Dynamic Soundings in Site Investigations: Some Observations and Correlations, Penetration Testing in the U. K., London, (1988) 113-117.
26. Göktepe, A. B., Ağar, E. ve Lav, A. H., Esnek Üstyapıların Mekanik Özelliklerinin Geri Hesaplanmasında Yapay Zeka Kullanımı, 7. Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 2007.
27. Sezgin, H. M., Karayolu Esnek Üstyapılarında Alttemel Tabakasının Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2003.
28. Brandley, D., Falling Weight Deflectometers, Experimental Methods in Structures and Materials, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.
29. Stolle, D. F., Modeling of Dynamic Response of Pavements to Impact Loading, Computers and Geotechnics, 11, 1, (1991) 83-94.
30. Porter, O. J., Development of the Original Method for Highway Design, Symposium on Development of CBR Flexible Pavement Design Methods for Airfields, Transachan, ASCE, (1950) 461-467.
31. Tunç, A., Yol Güvenlik Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.
32. Kuloğlu, N., Özdemir, M. A. ve Kök, B. V., Havaalanı Esnek Üstyapı Tasarım Metodlarının Değerlendirilmesi, 7. Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 2007.
33. Rao, K. V. K., Material Characterization, Indian Institute of Technology Bombay Powai, India.
34. Fındık, F. S., Karayolu Esnek Üstyapıları Alttemel Tabakasının Stabilizasyonunda Hafif Agregaların Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2005.
35. M.E.B., MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), İnşaat Teknolojisi Zemin Deneyleri-IV, Ankara, 2006.

36. Palalı, A., Handere Kilinde Su İçeriği Değişimi ve Kompaksiyon Enerjisinin Mukavemete Olan Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006.
37. Doğan, K., Plaka Yükleme Deneyi Uygulamaları ve Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2004.
38. Önalp A. ve Sert S., Geoteknik Bilgisi III: Bina Temelleri, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2006.
39. Tunç, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 2001.
40. Uzuner, B. A., Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara, 1998.
41. Köseoğlu, S., Temeller I, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 263, (1987).
42. Hoek, E. and Brown, E. T., Underground Excavation in Rock, The Institute of Mining and Metallurgy, London, 1980.
43. Gökay, M. K., Bearing Capacity Analysis of Layered Rock for an Underground Mine, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1988.
44. Uzuner, B. A., Plaka Yükleme Deneyi Üzerine, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 340, (1988) 15-18.
45. Özçoban, M. Ş., Arazi Deneyleri, İMO Antalya, 2006.
46. DIN 18134: Determination of Deformation and Strength Characteristics of Soil by The Plate Loading Test, Deutsche Norm, 1999.
47. Bowles, J. E., Foundation Analysis and Design, The McGraw-Hill Companies Inc., 5th Edition, New York, 1996.
48. Doğan, K. ve Gökay, M. K., Plaka Gerilmeleme Deney Sonuçlarının Toprak ve Kayaç Zeminlerde Gösterdiği Farklılıklar, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Konya, 1, 2, (2006).
49. Sing, A. and Punmia, B. C., Soil Mechanics and Foundations, Mehta Printers, 628-631, Delhi, 1970.

50. Kılıç, R. ve Ulaşım, K., Zemin ve Kaya Mekaniği Uygulama Notları, Jeoteknik Araştırma Grubu (JETAG), Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, 2009.
51. Teodoru, I. B. and Toma, I. O., Numerical Analyses of Plate Loading Test, Universitatea Tehnica Gheorghe Asachi, Buletinul Institutului Politehnic Din Iași, Romania, 2009.
52. Arılı, S., Yapı İşleri Uygulaması, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü Teknik El Kitapları-5, Ankara, 1985.
53. Birand, A. A., Kazıklı Temeller, Teknik Yayınevi, Ankara, 2001.
54. Kökten, Ö., Yüzeysel Temellerin TS 500'e Göre Hesap ve Tasarım Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
55. İSFALT, Asphalt Enstitüsü El Kitabı Serisi (MS-4), İstanbul, 4, (1989).
56. Seed, H. B., Chan, C. K. and Lee, C. E., Resilience Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavements, Proceedings International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan, (1962) 611-666.
57. Kavlak, Y., Isparta Gelincik Pomzasının Karayolu Esnek Üstyapıları Taban Zemini Stabilizasyonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2008.
58. Yeh, S. T. and Su, C. K., Resilient Properties of Colorado Soils, U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 1989.
59. Long, R. P. and Delgado, M. G., Report 88-1: Resilient Modulus of Subgrades, Completed Research Projects, Connecticut Cooperative Transportation Research Program, 1991.
60. Hight, D. W. and Stevens M. G. H., An Analysis of The California Bearing Ratio Test in Saturated Clays, *Géotechnique*, 4, (1982) 35-322.
61. Kirvan, R. W., Farrell, E. R., Hartford, D. N. D. and Orr, T. L. L., The Influence of Repeated Load Parameters for a Glacial Subgrade from Soil Properties, Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Delft, 1982.

62. Heukelom, W. and Klomp, A. J., Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction, First International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, 1962.
63. Ulutaş, Ö., Yol Üstyapı Tabaka Kalınlıklarının Boyutlandırılması, Bitirme Çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
64. Design Manual for Roads and Bridges, Pavement Design and Maintenance, 7, 2, (2001).
65. Yayla, N., Karayolu Güvenliği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2006.
66. Cofcof, Ş., Zeminlerin (Dolguların) Sıkıştırılması -Kompaksiyon-, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 1969.
67. Illinois Department of Transportation (IDOT), Subgrade Stability Manual, Policy MAT-10, Springfield, 1982.
68. Ahmedzade, P. ve Yılmaz, M., Uzun Ömürlü Esnek Üstyapıların Tasarımı, 7. Ulaştırma Kongresi, İMO Bildiriler Kitabı, İstanbul, (2007) 354-363.
69. T. C. K. Fenni Şartnamesi, Teknik Yayınevi, 2006.
70. Ilıcalı, M., Uygun Karayolu Üstyapı Tipi Seçiminin Önemi, Hazır Beton Dergisi, 9, 51, (2002).
71. Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics, John Wiley&Sons, New York, 1943.
72. Bilgehan, M., Betonarme I Ders Notları, Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa.
73. Alawaji, H. A., Model Plate Load Tests on Collapsible Soil, Master's Thesis, Collage of Engineering King Saud University, Civil Engineering Department, Saudi Arabia, (1997) 255-270.
74. T. D. K., Türk Dil Kurumu Türkçe Sözlük, T. D. K. Yayınları, Ankara, 2005.
75. Westergaard, H. M., Analysis of Stress in Concrete Pavement due to Variations in Temperature, Proc. 6th Annual Meeting, Highway Research Board, National Research Council, Washington D. C., (1926) 201-205.
76. Winkler, E., Die Lehre Von Elasticitaet Und Festigkeit (On Elasticity and Fixity), H. Dominicus, Prague, 1, 182, (1867).

77. Zimmermann, H., *The Calculation of Railway Superstructures*, Berlin, 1888.
78. Vlasov, V. Z. and Leont'ev, N. N., *Beams, Plates and Shells on Elastic Foundations, An Israel Program for Scientific Translations*, Jarusalem, 1966.
79. Pasternak, P. L., *On a New Method of Analysis of an Elastic Foundation by Means of Two Foundation Constants (in Russian)*, Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu i Arkhitekture, Moscow, 1954.
80. Lukanen, E. O., *Load Testing of Instrumented Pavement Sections: Improved Techniques for Applying The Finite Element Method to Strain Prediction in PCC Pavement Structures*, Offife of Materials & Road Research (MnROAD) Reports, Minnesota, 2002.
81. *Concrete Floor Slabs on Grade Subjected to Heavy Loads, Technical Manual (TM), Chapter 4: Site Investigation*, Headquartes Departments ofThe Army and The Air Force, Washington D. C., 1987.
82. Rao, K. V. K., *Material Characterisation*, Indian Institute of Technology Bombay Powai, Transportation Systems Engineering, India.
83. Federal Aviation Administration (FAA), *Rigid Pavement Design Method AC 150/5320-6D, Part-1*.
84. Darter, M. I. and Lee, Y. H., *Loading and Curling Stress Models for Concrete Pavement Design*, Transportation Research Record 1449, Transportation Research Board, National Research Council, 101-113, Washington D. C., 1994.
85. Stanciu A., Lungu I., *Fundații*, Editura Tehnică, București, 2006.
86. Anderson, B., *Footing Fundamentals*, *The Journal of Light Construction*, 2000.
87. International Building Code (CABO), *One and Two Family Dwelling Code*, International Conference of Building Official, 1995.
88. Karaşahin, M., Tığdemir, M. and Saltan, M., *Artificial Neural Network Modelling of Granular Material Behaviour Under Repeated Loading*, *Unbound Aggregates in Road Construction*, (2000) 369-375.
89. Köseoğlu, S., *Temeller Statiği ve Konstrüksiyonu II Yüzeysel Temeller*, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 3, (1986) 161-280.

90. T.S.E., TS 3168 EN 1536, Türk Standardı, Ankara, (2001) 7-20.
- URL-1. [http://www.muhendisim.org/standart\\_penetrasyon\\_testi\\_spt-t2735.0.html](http://www.muhendisim.org/standart_penetrasyon_testi_spt-t2735.0.html).  
16 Ağustos 2010.
- URL-2. [http://web.sakarya.edu.tr/~ebol/resimler/Fotolar/sondaj\\_01.JPG](http://web.sakarya.edu.tr/~ebol/resimler/Fotolar/sondaj_01.JPG). 28 Mart 2010.
- URL-3. [http://www.utexas.edu/research/ctr/pdfreports/0\\_5482\\_2.pdf](http://www.utexas.edu/research/ctr/pdfreports/0_5482_2.pdf). 12 Kasım 2010.
- URL-4. [http://www.asphaltwa.com/wapa\\_web/modules/04\\_design\\_factors/04\\_subgrade.html](http://www.asphaltwa.com/wapa_web/modules/04_design_factors/04_subgrade.html). 10.12.2009.
- URL-5. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/03b.cfm>. Ocak 2010.
- URL-6. <http://www.highwaysmaintenance.com/cbrtext.htm>. 12 Temmuz 2010.
- URL-7. <http://www.yeneryapi.com.tr/vitrin-detay.asp?id=706>. 25 Nisan 2010.
- URL-8. <http://www.insaatmuhendisligi.net/>. 02 Mart 2010.
- URL-9. <https://www.veribaz.com/viewdoc.html?www.veribaz.com:443/login.htmlm=1&ul=elastisite-modulu-tayini-deneyi-357857.html>. 2 Nisan 2010.
- URL-10. <http://www.serki.com/index.php?bolumsec=terimler&terim=yatak%20katsayısı&id=5a66ra>. 22 Aralık 2009.
- URL-11. <http://www.perviouspavement.org/structural%20design.htm>. 1 Mart 2010.
- URL-12. Çetin, M. B., Zemin Mekaniği, <http://www.bilgiportal.com/v1/idx/100/2998/Teknik-Analiz/makale/Zemin-Mekanii.html>. 15 Mart 2010.
- URL-13. [http://www.odevarsivi.com/dosya.asp?islem=gor&dosya\\_no=18418](http://www.odevarsivi.com/dosya.asp?islem=gor&dosya_no=18418).  
7 Aralık 2010.
- URL-14. [http://www.sts.co.th/qa/pdf/Plate%20bearing%20\(Eng\).pdf](http://www.sts.co.th/qa/pdf/Plate%20bearing%20(Eng).pdf). 9 Ocak 2010.
- URL-15. İlgin, G., Eurocode, Geoteknik ve Türkiye. <http://www.gurkanilgin.com/>.  
11 Şubat 2010.

Ek Tablo 1. Yol ve havaalanı kaplamaları için zemin karakteristikleri [8].

Zemin Sınıfı	Don Etkisi Olmadığında Zemin Kalitesi	Esnek Kaplama Altında Temel Olarak Kalitesi	Potansiyel Don Etkisi	Sıkışabilirlik ve Şişme	Drenaj Karakteristiği	Kuru Birim Ağırlık (ton/m <sup>3</sup> )	Zemin CBR Değeri	Yatak Katsayısı, k (kg/cm <sup>3</sup> )	
GW	Mükemmel	İyi	Yok	Hiç	Mükemmel	2,00 - 2,24	60 - 80	8,3 veya fazla	
GP	İyi - Mükemmel	Orta - Zayıf	Yok veya çok az	Hiç	Mükemmel	1,76 - 2,08	25 - 60	8,3 veya fazla	
GM	d	İyi - Mükemmel	Orta-iyi	Orta-Az	Çok az	Orta - Zayıf	2,08 - 2,32	40 - 80	8,3 veya fazla
	u	İyi	Zayıf	Orta-Az	Az	Geçirimsiz	1,92 - 2,24	20 - 40	5,5 - 8,3
GC	İyi	Zayıf	Orta-Az	Az	Geçirimsiz	1,92 - 2,24	20 - 40	5,5 - 8,3	
SW	İyi	Zayıf	Yok veya çok az	Hiç	Mükemmel	1,76 - 2,08	20 - 40	5,5 - 8,3	
SP	Orta-iyi	Zayıf - Uygun değil	Yok veya çok az	Hiç	Mükemmel	1,60 - 1,92	10 - 25	5,5 - 8,3	
SM	d	İyi	Zayıf	Az-Çok	Çok az	Orta - Zayıf	1,92 - 2,16	20 - 40	5,5 - 8,3
	u	Orta - İyi	Uygun değil	Az-Çok	Az-orta	Geçirimsiz	1,68 - 2,08	10 - 20	5,5 - 8,3
SC	Orta - İyi	Uygun değil	Az-Çok	Az-orta	Geçirimsiz	1,68 - 2,08	10 - 20	5,5 - 8,3	
ML	Orta - Zayıf	Uygun değil	Orta - Çok	Az-orta	Orta - Zayıf	1,60 - 2,00	5 - 15	2,8 - 5,5	
CL	Orta - Zayıf	Uygun değil	Orta - Çok	Orta	Geçirimsiz	1,60 - 2,00	5 - 15	2,8 - 5,5	
OL	Zayıf	Uygun değil	Orta - Çok	Orta - Çok	Zayıf	1,44 - 1,68	4 - 5	2,8 - 5,5	
MH	Zayıf	Uygun değil	Orta-Çok fazla	Çok	Orta - Zayıf	1,28 - 1,60	4 - 8	2,8 - 5,5	
CH	Zayıf - Kötü	Uygun değil	Orta	Çok	Geçirimsiz	1,44 - 1,76	3 - 5	1,4 - 2,8	
OH	Zayıf - Kötü	Uygun değil	Orta	Çok	Geçirimsiz	1,28 - 1,68	3 - 5	1,4 - 2,8	
PT	Uygun değil	Uygun değil	Az	Aşırı	Orta - Zayıf	-	-	-	

## ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül Güneş KAYA, 1986 yılında Trabzon'da doğdu. İlkokul ve ortaokul tahsilini Erdoğan İlköğretim Okulu'nda (Trabzon), Lise tahsilini Trabzon Kanuni Anadolu Lisesi (K.A.L)'nde tamamladıktan sonra 2004 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2008 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2009 yılından itibaren Gümüşhane Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmakta olan A. Güneş KAYA, yabancı dil olarak iyi derecede İngilizce bilmektedir.