

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PNÖMATİK LASTİKLİ BİR ARACIN YOL DIŞI ÇEKİŞ PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oytun KARADUMAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Lisansüstü Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PNÖMATİK LASTİKLİ BİR ARACIN YOL DIŞI ÇEKİŞ PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Oytun KARADUMAN
(503121715)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Lisansüstü Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özgen AKALIN

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121715 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi Oytun KARADUMAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “PNÖMATİK LASTİKLİ BİR ARACIN YOL DIŞI ÇEKİŞ PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Özgen AKALIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İsmail Ahmet GÜNEY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **27 Nisan 2015**
Savunma Tarihi : **29 Mayıs 2015**

ÖNSÖZ

Arazi araçlarının arazi üzerindeki performanslarını etkileyen tasarım kriterlerini belirlemek adına anlaşılması gereken en önemli konu, toprağın lastik ile etkileşimi ve davranışdır. Mühendisler ilk olarak II. Dünya Savaşı sırasında bu konu üzerine çalışmaya başlamışlardır ve o günden bu güne geliştirmişlerdir. Daha önceleri sadece deneysel olan çalışmalar, daha sonra toprağın gerçek davranışını elastik-plastik malzeme varsayımıyla anlamaya çalışmışlardır. Bunun sonucu olarak yarı deneysel yöntemler ortaya çıkmıştır. Yarı deneysel yöntemlerle beraber, toprağın fiziksel özelliklerini test etmek içinde birçok cihaz ve yöntem geliştirilmiştir. Bu projede yarı deneysel toprak modeli oluşturularak, arazi aracının hangi özelliklerinin arazi performansını nasıl etkilediği ortaya konmuştur. Bununla beraber bir aracın bir arazide maksimum hız ve ivmelenme gibi performans çıktılarının belirlenmesini sağlayan bir araç modeli de oluşturulmuştur.

Yüksek lisans tez çalışmamda bana yardımcı olan ve fikirleri ile bana yön gösteren tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Özgen AKALIN' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2015

Oytun Karaduman

(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. TEORİ VE GENEL BİLGİ.....	11
2.1 Toprağın Mekaniği	11
2.1.1 Toprağın elastik davranışı.....	12
2.1.2 Toprağın plastik davranışı.....	15
2.2 Toprak Parametrelerinin Ölçüm Yöntemleri.....	17
2.2.1 Konik penetrasyon cihazı.....	17
2.2.2 Doğrudan kaydırma testi.....	19
2.2.3 Burulmalı kaydırma testi.....	21
2.2.4 Üç eksenli test	22
2.2.5 Bevameter yöntemi	23
2.3 Toprakta Basınç-Batma İlişkisi.....	29
2.3.1 Deformasyon hızının batmaya etkisi.....	35
2.3.2 Tekrarlanan basınç durumunda toprağın davranışı.....	36
2.3.3 Rijit lastik-toprak etkileşiminde basınç-batma ilişkisi.....	37
2.3.4 Elastik lastik-toprak etkileşiminde basınç-batma ilişkisi.....	43
2.4 Toprakta Kayma Gerilmesi-Deformasyon İlişkisi	50
2.4.1 Toprak-tekerlek etkileşiminde parametre ölçüm yönteminin etkisi	54
2.4.2 Toprak-tekerlek etkileşiminde kaydırma plakası şeklinin etkisi.....	56
2.4.3 Toprak-tekerlek etkileşiminde eğri uydurma yönteminin etkisi	57
2.4.3.1 Kırılğan toprakta eğri uydurma.....	58
2.4.3.2 Plastik toprakta eğri uydurma	60
2.4.4 Toprak tipine göre kayma-deformasyon ilişkisinin karakterize edilmesi .	61
2.4.4.1 Yumuşak geçişli kayma-deformasyon karakteristiğine sahip toprak.	61
2.4.4.2 Bitki örtülü topraklar.....	62
2.4.4.3 Kırılma noktasına sahip topraklar	64
2.4.5 Toprağın tekrarlanan kayma gerilmesi durumunda davranışı.....	65
2.4.6 Toprak-tekerlek etkileşiminde çekiş kuvveti	66
2.4.7 Toprak-tekerlek etkileşiminde kayma yer değiştirmesi	68
2.5 NRMM İle Araç Performansının Modellenmesi.....	75
3. TEORİK ARAÇ PERFORMANSININ MODELLENMESİ İÇİN YÖNTEM	79
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	91
5. SONUÇLAR VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR.....	109

KAYNAKLAR.....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	115

KISALTMALAR

CI	: Cone Index
NRMM	: Nato Reference Mobility Model
NWVPM	: Nepean Wheeled Vehicle Performance Model
RI	: Remolding Index
USDA	: The United States Department of Agriculture
VCI	: Vehicle Cone Index
VDANC	: Vehicle Dynamic Analysis, Non-Linear
VTIM	: Vehicle Terrain Interaction Model
WES	: Waterways Experimen Station

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bevameter yöntemi ile bulunan Bekker toprak parametreleri (Wong, 2001).	28
Çizelge 4.1 : Performans eğrileri çıkarılacak aracın özellikleri.	91
Çizelge 4.2 : Karşılaştırılan iki farklı toprağın fiziksel özellikleri.	92

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Birleşik Devletler Tarım Bakanlığı toprak dokusu üçgeni (Meirion-Griffith, 2012).	11
Şekil 2.2 : İdeal elastik-plastik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Wong, 2010).	12
Şekil 2.3 : Yüzeyde noktasal yüke maruz kalmış yarı sonsuz hacimde gerilimler (Wong, 2010).	13
Şekil 2.4 : Dairesel yükleme yüzeyinin altındaki gerilme (Wong, 2001).	14
Şekil 2.5 : Kırılgan ve plastik toprağın karakteristiğini gösteren kayma gerilmesi-toprak deformasyonu eğrisi (Bekker, 1969).	15
Şekil 2.6 : Mohr-Coulomb gerilme daireleri (Wong, 2010).	16
Şekil 2.7 : (a) Konik penetrasyon cihazı, (b) konik penetrasyon cihazının kullanılışı (Wong, 2001; Fatherree, 2006).	18
Şekil 2.8 : Doğrudan kaydırma test düzeneği (Classification of Soil, 2015).	20
Şekil 2.9 : Normal gerilme ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki (Classification of Soil, 2015).	20
Şekil 2.10 : Burulmalı kaydırma testi.	21
Şekil 2.11 : Üç eksenli test düzeneği (Oravec, 2009).	23
Şekil 2.12 : Bevameter cihazının şeması (Oravec, 2009).	24
Şekil 2.13 : Birkaç homojen toprağın basınç-batma grafiği (Wong, 2001).	25
Şekil 2.14 : Bekker' in batma parametreleri elde etmek için kullandığı yöntemin bir şeması. a_1 ve a_2 , $z=1$ batmasındaki basıncı ifade etmektedir (Oravec, 2009).	26
Şekil 2.15 : Lastik ile toprağın etkileşim yüzeyinin geometrisi ve semboller.	29
Şekil 2.16 : Tekerlek çapının temas yüzeyine etkisi (Wong, 2001).	31
Şekil 2.17 : Logaritmik skalada, çeşitli homojen topraklarda aynı plaka ile yapılan basınç-batma testi sonuçları (Bekker, 1969).	32
Şekil 2.18 : Farklı tipteki toprakların aynı plaka ile basınç-batma testi sonuçları (Bekker, 1969).	33
Şekil 2.19 : Nem yüzdesinin toprağın parametrelerinde ve davranışında etkisi (Bekker, 1960).	34
Şekil 2.20 : Basınç-Batma ilişkisinin deformasyon hızı ve basınç ile değişimi (Bekker, 1969).	36
Şekil 2.21 : Tekrarlanan statik yükleme durumunda toprağın davranışı (Bekker, 1969).	37
Şekil 2.22 : Toprak ile etkileşimde tekerleğe etki eden kuvvetler (Bekker, 1956). ..	38
Şekil 2.23 : Batma miktarının hesaplanması için geometrik yaklaşım.	39
Şekil 2.24 : Rijit lastik için deforme olan toprakta serbest çizim diyagramı (Hutangkabodee, vd. 2006).	42
Şekil 2.25 : Rijit lastikte temas yüzeyinde temas açısına bağlı gerilme dağılımı.	43
Şekil 2.26 : Pnömatik lastiğin rijit ve elastik çalışma durumunda davranışı (Wong, 2001).	44
Şekil 2.27 : Ortalama yer basıncının şişirme basıncı ve düşey yük ile değişimi (Wong, 2001).	46

Şekil 2.28 : Yumuşak yüzeyde hareket eden pnömatik lastik.	47
Şekil 2.29 : Hareket direncinin lastik şişirme basıncı ile değişimi (Bekker, 1960)... ..	48
Şekil 2.30 : Elastik lastik ile toprağın temas yüzeyi açıları.	49
Şekil 2.31 : Elastik lastikte temas yüzeyindeki gerilme dağılımı.	50
Şekil 2.32 : Kırılgan toprak ve plastik toprağın karakteristiği (Bekker, 1969).	51
Şekil 2.33 : Plastik bir toprak ile yapılan moment-kayma açısı testinin sonucu (Bekker, 1969).....	52
Şekil 2.34 : Kırılgan bir toprak ile yapılan moment-deformasyon testi sonucu (Bekker, 1969).....	53
Şekil 2.35 : İdealleştirilmiş gerilme-deformasyon grafiği (Bekker, 1969).	54
Şekil 2.36 : Yapay olarak hazırlanmış iki toprak tipi ile oluşturulan Coulomb çizgileri (Bekker, 1969).....	55
Şekil 2.37 : Kaydırma plakaları: Dikdörtgen plaka (a) dairesel plaka (b) (Bekker, 1969).....	56
Şekil 2.38 : Düzensiz bir Bevameter çiziminden interpolasyon ile kayma gerilmesi- deformasyon ilişkisinin belirlenmesi (Bekker, 1969).	58
Şekil 2.39 : Kayma katsayılarının bulunması için kullanılan hizalama çizelgesi (Bekker, 1960). (Notasyon tez ile uyumlu olması için değiştirilmiştir.)	59
Şekil 2.40 : Yumuşak geçişli toprakta kayma gerilmesi-deformasyon grafiği (Wong, 2001).....	62
Şekil 2.41 : Bitki örtülü toprakta görülen kayma gerilmesi deformasyon ilişkisi (Wong, 2001).	63
Şekil 2.42 : Kırılma noktasına sahip topraklarda kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisi (Wong, 2001).....	64
Şekil 2.43 : Kuru kumun tekrarlayan kayma gerilmesi altında davranışı (Bekker, 1969).....	65
Şekil 2.44 : Toprak-tekerlek temas yüzeyinde çekiş kuvvetinin oluşumu.	67
Şekil 2.45 : Kayma gerilmesinin ve normal gerilmenin temas açısı ile değişimi (Wong, 2001).	68
Şekil 2.46 : Toprağın tekerlek ile temas yüzeyinde meydana gelen akış bölgeleri (Wong, 2001).	69
Şekil 2.47 : Kayma yüzdesi %100 olduğunda toprak akış çizgileri (Wong, 2001) ..	69
Şekil 2.48 : Frenlenerek kilitlenmiş tekerleğin altındaki toprakta akış çizgileri (Wong, 2001).	70
Şekil 2.49 : Kil tanelerinin akış çizgileri. (a) Çekilen tekerlek, (b) tahrik edilen tekerlek %37 kayma, (c) tahrik edilen tekerlek %63 kayma.....	70
Şekil 2.50 : Kayma hızının temas yüzeyindeki hareketi.....	71
Şekil 2.51 : Kayma yüzdesi ile rijit lastikte temas yüzeyindeki kayma gerilmesinin değişimi.	72
Şekil 2.52 : Elastik lastik davranışında kayma yer değiştirmesi.....	73
Şekil 2.53 : Deforme olan bölgede x uzunluğunun temas açısı cinsinden ifadesi.	74
Şekil 2.54 : Kayma yüzdesi ile elastik lastikte temas yüzeyi boyunca kayma gerilmesi değişimi.	75
Şekil 3.1 : Toprak üzerindeki bir araca etki eden kuvvetler.	80
Şekil 3.2 : Temas yüzeyinin toprak çekiş kuvvetine etkisi (Bekker, 1960).....	83
Şekil 3.3 : Tekerelek ekseninde oluşan momentler.	85
Şekil 3.4 : Araç modeli algoritma akış diyagramı.	89
Şekil 4.1 : Performans eğrileri çıkarılacak aracın motor karakteristiği eğrileri.....	92
Şekil 4.2 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve araç kütlesi ile değişimi.....	93

Şekil 4.3 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve araç kütlesi ile değişimi.....	94
Şekil 4.4 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve lastik genişliği ile değişimi.....	95
Şekil 4.5 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve lastik genişliği ile değişimi.....	96
Şekil 4.6 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve lastik çapı ile değişimi.....	97
Şekil 4.7 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve lastik çapı ile değişimi.....	98
Şekil 4.8 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) lastik çapı ve lastik genişliği ile değişimi. Kayma %50.	99
Şekil 4.9 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) lastik çapı ve lastik genişliği ile değişimi. Kayma %50.	100
Şekil 4.10 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) lastik çapı ve lastik şişirme basıncı ile değişimi. Kayma %50.....	100
Şekil 4.11 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) lastik çapı ve lastik şişirme basıncı ile değişimi. Kayma %50.	101
Şekil 4.12 : Killi toprak üzerinde hareket eden referans aracın hız değişimi.	102
Şekil 4.13 : Sıkı kum üzerinde hareket eden referans aracın hız değişimi.	103
Şekil 4.14 : Killi toprak üzerinde hareket eden referans aracın tekerlek kayma yüzdesi değişimi.....	104
Şekil 4.15 : Sıkı kum üzerinde hareket eden referans aracın tekerlek kayma yüzdesi değişimi.....	104
Şekil 4.16 : Killi toprak üzerinde hareket eden referans aracın net çekiş kuvveti değişimi.....	105
Şekil 4.17 : Sıkı kum üzerinde hareket eden referans aracın net çekiş kuvveti değişimi.....	106
Şekil 4.18 : Killi toprak üzerinde hareket eden referans aracın gerçek ve teorik ivmelenmesi.	107
Şekil 4.19 : Sıkı kum üzerinde hareket eden referans aracın gerçek ve teorik ivmelenmesi.	107

SEMBOL LİSTESİ

a	: Araç ivmesi [m/s^2]
b	: Lastik genişliği [m]
c	: Görünür kohezyon [Pa]
d_t	: Zaman aralığı [s]
dV	: Bir zaman aralığında araç hızı değişimi [m/s]
dV_t	: Bir zaman aralığında teorik araç hızı değişimi [m/s]
D	: Lastik çapı [m]
DP	: Net toprak çekiş kuvveti [N]
F	: Toprakta alınabilecek çekiş kuvveti [N]
F_f	: Ön akstan alınabilecek çekiş kuvveti [N]
F_r	: Arka akstan alınabilecek çekiş kuvveti [N]
h	: Araç ağırlık merkezinin yerden yüksekliği [m]
i	: Tekerlek kayma yüzdesi [-]
i_t	: Vites oranı [-]
i_d	: Diferansiyel oranı [-]
I	: Döner kütle eylemsizliği [kg.m^2]
j	: Temas yüzeyindeki bir noktada kayma yer değiştirmesi [m]
j_0	: Maksimum kayma gerilmesinin görüldüğü kayma yer değiştirmesi [m]
k	: Bernstein-Goriatchkin batma modülü [N/m^{n+2}]
k_c	: Toprak parametresi olan kohezyon modülü [N/m^{n+1}]
$k_\emptyset$	: Toprak parametresi olan iç sürtünme modülü [N/m^{n+2}]
K	: Tekerlek batma oranı [-]
K_1, K_2	: Kayma yüzdesi katsayıları [m]
K_w	: Toprakta maksimum kayma gerilmesi oluşması için gereken kayma yer değiştirmesi miktarı [m]
K_r	: Kırılma noktasına sahip toprakta sabit kayma gerilmesi bölgesindeki kayma gerilmesinin maksimum kayma gerilmesine oranıdır [-]
l	: Tekerlek yuvalanma mesafesi [m]
l_a	: Aracın iki aks arası mesafesi [m]
l_f	: Araç ağırlık merkezinin ön aksa olan mesafesi [m]
l_r	: Araç ağırlık merkezinin arka aksa olan mesafesi [m]
l_t	: Deforme olan lastiğin temas yüzeyinin yataydaki uzunluğu [m]
L	: Toprağı sıkıştırmak için birim alanda yapılan iş [N/m]
m	: Araç kütlesi [kg]
M	: Motordan tekerleklerle gelen moment [Nm]
MF	: Döner kütlelerin araç kütlesi cinsinden oranı [-]
M_m	: Motor momenti [Nm]
M_t	: Kayma gerilmesi nedeniyle lastiğe etkiyen moment [Nm]
M_{tf}	: Ön tekerleklerdeki kayma gerilmesi nedeniyle oluşan moment [Nm]
M_{tr}	: Arka tekerleklerdeki kayma gerilmesi nedeniyle oluşan moment [Nm]
n	: Batma üssü [-]
N	: Toprak tarafından tekerleğe uygulanan reaksiyon kuvveti [N]

N_{tf}	: Aktarma organlarının toplam çevrim oranı [-]
p	: Temas yüzeyi basıncı [Pa]
p_c	: Lastik karkasının gerginliğinden dolayı temas yüzeyinde oluşan basınç [Pa]
$p_{g,kr}$	: Lastik temas yüzeyindeki kritik basınç [Pa]
$p_{gf,kr}$	: Ön lastik için kritik basınç [Pa]
$p_{gr,kr}$	: Arka lastik için kritik basınç [Pa]
p_{gr}	: Lastik ortalama yer basıncı [Pa]
p_i	: Lastik şişirme basıncı [Pa]
r	: Lastik yarıçapı [m]
R_c	: Toprak sıkışma direnci [N]
R_{cf}	: Ön aksta meydana gelen hareket direnci [N]
R_{cr}	: Arka aksta meydana gelen hareket direnci [N]
TN	: Net tekerlek momenti [Nm]
V	: Lastiğin yataydaki hızı (aynı zamanda aracın hızı) [m/s]
V_j	: Kaymaya başlayan lastikte temas yüzeyine teğet olan hız [m/s]
V_t	: Teorik araç hızı [m/s]
W	: Tekerlek üzerine etkiyen kuvvet [N]
W_f	: Ön lastiğe etkiyen düşey kuvvet (Ağırlık) [N]
W_r	: Arka lastiğe etkiyen düşey kuvvet (Ağırlık) [N]
x	: Deforme olan lastik temas yüzeyindeki herhangi bir noktanın deformasyonunun başlangıç noktasına olan uzaklığı [m]
z	: Toprak yüzeyinden uzaklık (derinlik) [m]
z_0	: Dengede iken maksimum tekerlek batması [m]
α	: Tekerleklerdeki toplam açısal ivme [$1/s^2$]
α_1	: Araç ivmesinden dolayı tekerleklerde oluşan açısal ivme [$1/s^2$]
α_2	: Net moment nedeniyle oluşan açısal ivme [$1/s^2$]
$\emptyset$	: Toprak iç sürtünme açısı [°]
θ	: Temas yüzeyindeki bir noktadaki normal gerilmenin düşey eksenle yaptığı açı [°]
θ_d	: Deforme olan lastikte deforme olan bölgenin başladığı temas açısı [°]
θ_m	: Maksimum gerilmenin oluştuğu temas açısı [°]
θ_1	: Tekerleğin toprağa giriş açısı [°]
θ_2	: Tekerleğin topraktan çıkış açısı [°]
σ	: Temas yüzeyindeki normal gerilme [Pa]
σ_c	: Üç eksenli testte lastik kılıfı saran basınç [Pa]
τ	: Temas yüzeyindeki kayma gerilmesi [Pa]
τ_{max}	: Temas yüzeyindeki maksimum kayma gerilmesi [Pa]
ω	: Lastik açısal hızı [$1/s$]
δ_t	: Lastik deformasyon miktarı [m]

PNÖMATİK LASTİKLİ BİR ARACIN YOL DIŞI ÇEKİŞ PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez, toprak mekaniği alanında gerçekleştirilen yenilikleri kullanarak deforme olabilen toprak üzerinde bir aracın hareket kabiliyetinin modellenmesini ve araç performansının tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Bununla beraber; arazi araçlarının tasarım parametrelerinin, arazi performanslarını nasıl etkilediğinin anlaşılmasını amaçlamaktadır.

Araç ile toprağın etkileşiminin modellenmesi, en yeni basınç-batma denklemleri kullanılarak yapılmıştır. Toprak mekaniği alanında yapılan ilk çalışmalar araç performansını tahmin etmekten çok, tarım araçlarının ve ticari yük taşıyan büyük tekerlekli araçların tasarlanmasında araç parametrelerinin etkisinin anlaşılabilmesi için kullanılmaktaydı. Toprakla etkileşimde bulunan bir aracın performansının tahmin edilmesinde kullanılan ilk yarı deneysel denklemler, Bekker tarafından 1950 yıllarında oluşturulmuştur. Bekker tarafından oluşturulan ilk denklemler, araç hareket sistemleri ile toprağın jeoteknik özelliklerini bir araya getirerek arazi koşullarında çekiş kuvvetini anlamak için bir yol oluşturmuştur. Bu yaklaşımın önemi, deforme olabilen toprak üzerinde çekiş kuvveti, aracın motor momenti ya da gücü ile sınırlı olmaktan çok toprağın sertliği ve hareketi destekleme kabiliyeti ile sınırlı olmasıdır.

Toprağın fiziksel özelliklerini anlamak, araç tekerleği ile etkileşimin modellenmesi için ilk adımdır. Zaman içinde bilim adamları, toprağın çeşitli fiziksel özelliklerini ölçmek için yöntemler geliştirmiş ve aletler tasarlamışlardır. Fiziksel özellikler ile oluşturulan toprak mekaniği denklemleri de, eş zamanlı olarak toprağın ölçülebilen özellikleri arttıkça gelişmiştir. Günümüzde toprak tipine göre kısmen standartlaşmış toprak özellikleri bulunmaktadır. Oluşturulan yarı deneysel modeller birçok varsayıma dayalı olduğundan, hassasiyetleri çok yüksek değildir. Fakat arazi performansının nelerden etkilendiğini ve ne derece etkilendiğini belirlemede kullanılabilirler.

Bu tezde, toprak ile 4x4 arazi aracının etkileşimi modellenmiştir. Matematik model, lastiğin elastik veya rijit davranma şekline göre iki farklı hesaplama yönteminden oluşmaktadır ve hangi yöntemin kullanılacağına dair koşullar model içinde hesaplanmaktadır. Oluşturulan model, topraktan alınabilecek maksimum çekiş kuvvetini ve toprağın deforme olmasından dolayı oluşan direnci hesaplayarak, arazi taşıtının belirlenen toprak üzerindeki ivmelenme ve maksimum hız gibi araç performansı tahminlerini yapmaktadır. Ayrıca bu model kullanılarak, arazi aracı tasarım parametrelerinin toprak çekişi üzerindeki etkileri üzerine karşılaştırmalı incelemeler yapılmıştır. Yapılan incelemeler ile, belirli bir toprak türüne göre arazi aracı tasarım parametreleri ön görülmeye çalışılmıştır.

OFF-ROAD TRACTIVE PERFORMANCE ASSESMENT OF A WHEELED VEHICLE

SUMMARY

The objective of this thesis is modelling the mobility of a vehicle on a terrain and predicting the performance of the vehicle by using the innovations achieved in terramechanics. Also, it is aimed to understand how off-road vehicle design parameters affect the vehicle performance.

In modern society, wheeled vehicles are used more on paved roads but transportation activities on a deformable, loose soil are not quite low. Therefore, it is important to understand the interaction between soil and wheel. Traction of a wheel on a deformable soil and the limitations for a vehicle on soil are subjects of terramechanics.

Soil mechanic models developed by scientists in many years can be grouped in three categories. These are empirical models, semi-empirical models and physics based models. First developed models are fully empirical models because knowledge about behavior of the soil and mechanics of soil was very little. Empirical models can only be used with existing vehicles; they cannot be used to compare design parameters of a vehicle. This is the reason for the development of semi-empirical models. Semi-empirical models are based on geotechnical equations of soil, most of which were developed by Bekker and Wong. Semi-empirical equations are based on many assumptions, so accuracy of these models are changing with the homogeneity of soil and the dimensions of vehicle used. Increasing the accuracy can only be achieved by physics based models. Physics based models are basically finite element models or discrete element models. The problem with the physics based models is that they take too much time to get a result. Thus, they are not used very much. On the other hand, semi-empirical models are accurate enough to compare the effects of design parameters, so they are commonly used models for predicting the performance of a vehicle on deformable terrain. In this thesis, semi-empirical model is used to calculate the performance of a vehicle and also the effects of design parameters compared by using this semi-empirical model.

Understanding the physical properties of soil is the first step for modelling the interaction between the soil and wheels of vehicle. In time, scientists designed tools and developed methods for measuring the various physical properties of soil. Soil mechanic equations, created by these physical properties, were developed simultaneously by the increase of measurable properties of soil. The first developed tool to measure properties of soil is called cone penetrometer. Cone penetrometer consists of a conical tip to penetrate in soil and a dial. Cone penetrometer device represents the resistance of penetration per unit cone area. Resistance is presented as a parameter called 'cone index'. Cone index is not a physical value; it is a reflection of combined shear and compressive characteristics of the soil. It is used in empirical equations to assess vehicle mobility on a 'go-no go' basis. Development of semi-empirical equations brought new tools to measure soil properties. Semi-empirical

models based on plastic flow equations. Mohr-Coulomb criterion is the base of semi-empirical equations. According to Mohr-Coulomb criterion, shear resistance of soil depends on cohesion of soil, load on soil and internal friction angle among soil particles. Tools are developed to measure these properties of soil. Main principles are applying shear deformation on soil and measuring maximum shear resistance. Different loads are used for tests to construct Coulomb circles. The most advanced tool for measuring soil properties is developed by Bekker which is called bevameter. Bevameter consists of two different sized penetration plates and a shearing plate. Penetration plates are used to calculate cohesion and friction modulus of soil. These parameters are used in Bekker's pressure-sinkage equations. Shear plate is used to determine shearing behavior and maximum shearing resistance of the soil. At the present time, partially standardized soil properties exist according to soil type. The problem with semi-empirical equations is that semi-empirical equations are dependent on various assumptions, so they are not very accurate. One of the assumptions is that contact area of the tire is assumed to be in rectangular shape, but contact area cannot be perfectly rectangular for a wheel. For a big diameter and loaded wheel, contact area is close to rectangular. Because of that, for wheels under 50 cm diameter, semi-empirical Bekker model cannot be accurate. However, they can be used to determine the things that affect vehicle performance and their affecting level.

Modeling the interaction between the vehicle and the terrain is done with the newest pressure-sinkage equations. First studies on terramechanics were used more to understand the effect of design parameters for agriculture vehicles and commercial heavy load vehicles in comparison with predicting the performance of vehicle. First semi-empirical equations predicting the performance of a vehicle which is interacting with soil was found by Bekker in 1950s. Equations which are created by Bekker generated a way to understand the traction force on terrain by using the geotechnical properties of soil and vehicle motion systems together. The importance of this approach is that traction force on a deformable soil is limited by the soil strength and the capability of the soil supporting the movement more than the vehicle engine torque or power. Bekker developed two ways to calculate performance of a vehicle according to tire behavior. According to Bekker, a tire can be modeled rigidly or elastically. Rigid tire keeps its circular form, but elastic tire is deformed because of the load on it. Behavior of tire depends on tire inflation pressure, load and soil properties. There is a critical pressure on contact area for determining the behavior of tire. Sinkage of tire depends on tire diameter, tire width, load on tire, inflation pressure of tire and soil properties. Tire dimensions and inflation pressure change the contact area. Contact area affects the contact pressure and sinkage value. In this thesis, the effect of tire dimensions and inflation pressure on vehicle performance are evaluated.

Pressure sinkage equations are used to calculate sinkage of tire. With the help of pressure-sinkage equations, compression resistance is calculated. Compression resistance can be called motion resistance because compression resistance is the resistance applied by the soil against compression. While the wheel moving on soil, it compresses the soil and causes deformation. The work done by the tire to compress soil is used to calculate compression resistance. By the increase of sinkage, deformation increases, so compression resistance increases.

Shearing resistance of the soil is used to calculate traction force of the vehicle. Shearing resistance depends on the shear deformation of the soil. When there is a slip

on contact area, shear deformation and shear resistance occur. Shear resistance of soil is the same as vehicle traction. There are two types of soil according to shearing behavior. They are brittle soil and plastic soil. Brittle soil has a peak shear resistance at a specific deformation. After the peak point, shear resistance decreases. Plastic soil has continuously increasing shear resistance behavior against deformation. For wheel-soil interaction, brittle soils can be modeled the same as plastic soil. That means peak shear value of brittle soil can be ignored. Shearing resistance equations depend on curve fitting techniques. By the help of measurements with shearing plate, shear-deformation plots can be obtained. These plots are used to develop shear resistance equation by curve fitting.

In this thesis, interaction between soil and 4x4 off-road vehicle was modeled. Mathematic model consists of two different calculation methods according to elastic or rigid behavior of tires and conditions for determining method are calculated in the model. Created model calculates the maximum traction force that can be taken from soil and the resistance due to the deformation of soil for determining the vehicle performance predictions like acceleration and maximum speed. Also, by using this model, the effect of off-road vehicle design parameters on soil traction force was investigated by using comparisons. With the help of investigations, it has been studied to predict design parameters for an off-road vehicle on a specific type of terrain. Semi-empirical equations are steady-state equations. Accelerating performance of a vehicle can only be calculated by transient equations. In this thesis, for converting semi-empirical equations into time dependent equations, very short time intervals are used. In every time interval, net traction force, tire angular acceleration and vehicle acceleration are calculated. When the accelerations are known, velocities of the vehicle and tires are calculated. Difference between tire and vehicle means that tire is slipping. Slipping value of tire is used to calculate the net traction force in the next time interval. In this way, acceleration performance of a vehicle can be assessed.

1. GİRİŞ

Modern toplumda araçların asfalt yol üzerinde kullanılması, ulaşım aktivitelerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Ancak asfalt dışı, deforme olabilen gevşek toprak üzerinde yapılan ulaşım aktiviteleri de azımsanmayacak düzeydedir. Bu nedenle arazi ortamında kullanılacak bir aracın toprakla nasıl etkileştiğini, çekişin nasıl oluştuğunu ve aracın hareket limitlerinin nasıl oluştuğunu inceleyecek bir alana ihtiyaç duyulmaktadır. Toprakla tekerleğin veya paletlerin etkileşiminin mekaniğini inceleyen bu alan toprak mekaniği (Terramechanic) olarak adlandırılır.

Zaman içinde asfalt dışında kullanılacak araçların tasarlanması daha önemli hale gelmiştir. Tarımda kullanılacak araçlar, maden araçları, sondaj araçları gibi zorlu arazi şartlarında çalışabilecek araçlar için tasarımda toprakla tekerleğin etkileşimin bilinmesi zorunlu olmaktadır (Reece, 1964). Bununla birlikte askeri araçların arazide hareket kabiliyetlerinin önem kazanması, mühendisleri toprak mekaniği alanında çalışmaya itmiştir.

Taşıttan gelen yük altında toprağın davranışını anlamak toprak mekaniğinin incelediği en önemli uygulama alanıdır. Geçmişte toprağın elastik veya plastik malzeme yaklaşımı ile modellenmesi, oldukça çok kullanılmıştır. Toprağın elastik malzeme olarak modellenmesi toprakta sıkıştırma direncinin teorik alt yapısını oluştururken; toprağın plastik malzeme olarak modellenmesi, topraktan alınabilecek maksimum çekiş kuvvetinin tahmin edilmesinde rol oynamaktadır (Wong, 2014).

Toprak mekaniği için, toprağın karakteristik özellikleri büyük bir önem taşır. Bu karakteristik özellikler, toprağın adezyon kuvveti ve kohezyon direnci karakteristiğinden oluşur. Bu özellikleri ölçmek için yıllar içinde teknikler geliştirilmiştir. İlk geliştirilen ölçme aygıtı II. Dünya Savaşı sırasında Waterways Experiment Station (WES) tarafından geliştirilen konik penetrasyon cihazıdır. Bu cihaz bir aracın hareket kabiliyetinin gider/gitmez (go/no go) şeklinde belirlenmesi için askeri amaçla icat edilmiştir. Fakat konik penetrasyon cihazı toprağın iki ana karakteristiğini ayrı ayrı ölçmemektedir. Konik penetrasyon cihazı deneysel toprak mekaniği modellerinde kullanılıyor olsa da, deneysel modeller bir arazi taşıtının

tasarımında, önceden araç performansının tahmin edilmesi için yeterli olmamaktaydı. Bu nedenle Bekker tarafından Bavemeter aygıtı geliştirilmiştir. Bavemeter aygıtı ile toprağın kohezyon ve adezyon kuvveti parametreleri ile beraber toprak tanelerinin iç sürtünme açısı parametreleri ayrı ayrı bulunabilmektedir (Wong, 2014).

Geçmişten günümüze tekerlek ile toprak arasındaki etkileşim çeşitli modellerle anlaşılmaya çalışılmıştır. Modellerin karmaşıklığı modelin uygulama alanına, hassaslığına ve geliştirme için harcanan çabaya bağlıdır. Geliştirilen bu modeller üç ana kategoride toplanabilir. Bunlar deneysel modeller, yarı deneysel modeller ve fizik tabanlı modellerdir (Taheri, vd. 2014).

İlk geliştirilen toprak mekaniği modelleri sadece deneysel verilere bağımlı olmaktaydı. Bunun en büyük nedeni toprağın davranışı hakkında ve toprağın mekanik özellikleri hakkında bilginin az olmasıydı. Deneysel modellerin temelinde araç performansını etkileyen ve ölçülebilen faktörler yer alır. Bu faktörlerin bazıları bir takım ölçülebilen büyüklüklerin fonksiyonları olabilir.

Deneysel modellerin ilk örneği 1971 yılında US Army Corps of Engineers WES tarafından oluşturulmuştur (Rula ve Nuttall, 1971). WES Vehicle Cone Index (VCI) modeli olarak adlandırılan model, aracın çekiş kuvveti, hareket direnci ve araç konik indeksini, birimi olmayan bir büyüklük olan konik indeks olarak tanımlar. Konik indeks konik penetrasyon cihazı tarafından okunan değere verilen terim ismidir. Ardından araçtan ve topraktan alınan ölçümler ile hareketlilik indeksi hesaplanır. Hareketlilik indeksi konik indeksten büyük çıkar ise araç hareket edebilir sonucu çıkmaktadır.

Zaman içinde toprağın sertliğinin ve bu sertliğe etki eden toprak nemi, toprak yoğunluğu, topraktaki boşluğun oranı ve toprağın sıkıştırılabilirliği gibi yeni parametreleri, toprağı belirli bir basınç ile sıkıştırarak tekrar konik penetrasyon cihazı ile ölçmeye dayanan bir yöntemle ölçen WES, yeni modeli olan sayısal yöntemi oluşturmuştur. Bu şekilde farklı sıkışma oranlarındaki aynı toprağın farklı davrandığı bulunmuştur.

Wismer ve Luth (1973), toprak ile tekerleğin etkileşimini formüle etmek için 7 adet boyutsuz sayıya ihtiyaç olduğunu bulmuştur. WES' in modelini geliştiren Wismer ve Luth, tekerleğin kaymasının etkisini de modele eklemiştir. Ayrıca 2500 test verisi ve 121 adet toprak-tekerlek numunesi ile matematik modellerini kurmuşlardır.

Toprak mekaniği alanında kullanılan bir başka model, NATO Reference Mobility Model (NRMM) olarak adlandırılır. NRMM, U.S. Army Tank-Automotive Command (TACOM) ve WES tarafından 1979 yılında FORTRAN tabanlı bir bilgisayar simülasyon programı olarak geliştirilmiştir (Ahlvin, 1992). NRMM, tamamen deneysel verileri ele alarak paletli ve tekerlekli arazi araçlarının performanslarını karşılaştırmak için hazırlanan bir takım denklemlerden oluşmaktadır. Program başlangıç verisi olarak; taşıt karakteristiği, hava koşulları, mevsim, şoförün etkisi, toprak tipi ve çeşitli arazi engelleri gibi birçok veriye ihtiyaç duymaktadır. NRMM programı sonuç olarak girilen senaryoya göre aracın gider/gitmez (go/no go) kararını, bir noktadan bir noktaya en hızlı gidiş yolunu, aracın maksimum çıkabileceği hızı, maksimum tırmanma açısını verir. Bununla beraber NRMM ile arazide bulunan engeller oluşturularak aracın hareket kabiliyetinin arazi için yeterli olup olmadığı analizi de yapılabilmektedir (Haueisen, 2003; Schimd, 1995).

Deneysel geliştirmeler ekonomik olmamakla birlikte taşıt tasarımı açısından yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, toprağın davranışını ve toprakla tekerleğin etkileşimini daha kesin ortaya koyan yöntemler üzerine çalışmalara ihtiyaç vardır (Wong, 2006). Bunun üzerine teorik alt yapıya sahip ama gene deneysel katsayılarla ihtiyaç duyan yarı deneysel modeller geliştirildi. Bu alanda geliştirilen modellerin büyük çoğunluğu Bekker ve Wong tarafından oluşturulan iki boyutlu deneysel denklemleri kullanmaktadır (Taheri, vd. 2014). Bu denklemlerde tekerlek ve toprağın temas yüzeyindeki normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri kinematik değişkenler olarak tanımlanmıştır (Wong, 2006).

Toprak mekaniği alanında geliştirilen yarı deneysel denklemler daha çok jeoteknik mühendisliğine dayanmaktadır (Meirion-Griffith ve Spenko, 2010). Dr. M.G. Bekker, jeoteknik mühendisliği ile geliştirilen teorik bilgiyi toprak ile tekerlek arasındaki etkileşimi modellemek için kullanmıştır. (Terzaghi, 1954) gibi toprağın jeotekniği üzerine çalışan araştırmacıların çalışmalarından yola çıkan Bekker, bu teorik anlayışı toprak ile tekerleğin etkileşimini modellemek için kullanmıştır. Bunun üzerine Bekker deforme olabilen toprak üzerindeki kuvvet, normal gerilme ve kayma gerilmesi denklemlerinden oluşan modelini kurmayı başarmıştır. Bu sayede toprak mekaniği (terramechanic) terimi Dr. M.G. Bekker tarafından 1956 yılında bulunmuştur (Bekker, 1960).

Bekker icat ettiği Bavemeter cihazı ile toprağın kohezyonu, i sürtünme açısı gibi karakteristiklerini ölçerek bu parametreler ile basınç-batma ilişkisini kurmuştur. Tekerleğin batması ile oluşan temas yüzeyinde yer değiştiren toprak kütlesinde meydana gelen kayma gerilmesinin, yer değiştirme ile belli bir değere kadar arttığını bulmuştur (Wong, 2014; Wong, 2010). Bekker' in kayma gerilmesi denklemi, deneysel kayma gerilmesi ile deformasyon eğrilerini tanımlamaya çalışan bir denklemdir. Fakat denklemde yer alan deneysel katsayıların bulunması için oldukça karmaşık ölçümler ve hesaplar yapılması gerektirdiğinden ve sonuçları yeterince hassas olmadığından Janosi tarafından daha basit ve yine deneysel bir denklem geliştirilmiştir (Janosi ve Hanamoto, 1961). Janosi' nin oluşturduğu denklem iki adet sertlik parametresi (kohezyon, i sürtünme açısı) ve bir deformasyon katsayısından oluşmaktadır ve bugün en çok kullanılan kayma gerilmesi denklemidir (Shamay, 1971).

Bekker' in toprak mekaniği modeli, tamamen bir tasarım aracı olarak geliştirilmiştir. Farklı araçların performans karakteristiklerinin karşılaştırılması için kullanılan Bekker' in toprak mekaniği modeli, arazi taşıtlarının tasarımında  öncelikli parametreyi analiz etmek için kullanılmıştır. Bunlar aracın boyutları, ağırlığı ve yer basıncıdır (Goetz, vd. 1990). Bu üç parametre ile Bekker' in modeli bir arazi aracının çekiş performansını tahmin edebilmektedir.

Bekker tarafından geliştirilen ve basınç ile batma arasındaki ilişkiyi temel alan model, toprak mekaniğinin temelini oluşturmaktadır. Bekker' in geliştirdiği basınç-batma modeli temelde tekerleği basit yüklü yüzeyler olarak kabul eder. Dikdörtgen şeklinde varsayılan bu yüzeyler tekerleğin batma miktarına göre farklı genişlik ve uzunlukta olabilirler (Goetz, vd. 1990). Fakat bu varsayım tekerlek çapı küçüldükçe ve yükler azaldıkça hassaslığını yitirerek yanlış sonuç verir. Bu nedenle özellikle 50 cm' den küçük çapa sahip araçlar için kullanılması uygun değildir (Meirion-Griffith ve Spenko, 2010; Meirion-Griffith, vd. 2013).

Yıllar geçtikçe Bekker ve Wong tarafından temelleri atılan toprak-tekerlek etkileşim modeli Vehicle System Development Corporation tarafından geliştirilmiştir. NWVPM (Nepean Wheeled Vehicle Performance Model) adı verilen modelde, tekerlek üzerindeki düşey yükler, hareket direnci ve çekiş kuvveti temas yüzeyi boyunca normal ve kayma gerilmelerinin entegre edilmesiyle hesaplanmıştır. Toprağın davranışına göre temas yüzeyinin her bölgesinde farklı değerde

gerilmelerin olduğu bulunmuştur. Ayrıca bu modelde tekerleğin rijit davranışı ile elastik davranışı ayrı ayrı modellenmiştir.

Bekker' in oluşturduğu basınç-batma ilişkisi daha sonra Wong ve Reece tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde, tekerleğin toprak üzerinden çoklu geçişi modellenmiştir. Bunu yapmak için Reece modele yoğunluk parametresi ekleyerek toprağın sıkışabilme özelliğini analize katmıştır. Ayrıca Bekker' in modelinde adezyon ve kohezyon karakteristiğini ifade eden parametreleri değiştirmiştir. Bekker' in modelindeki bu parametreler, parametreleri bulmak için yapılan testte kullanılan plakanın boyutlarına bağlı iken; Reece bu parametreleri boyutsuz büyüklük olarak tekrar tanımlamıştır. Fakat Reece' in oluşturduğu model hassaslık yönünden yeterli olmamıştır. Bunun nedeni boyutsuz büyüklük olarak tanımlanan parametreler birbirinden çok farklı büyüklükteki plakalar arasındaki performans farkını gösteremiyordu (Shamay, 1971). Bunun üzerine denklem Sela ve Ehrlich tarafından tekrar düzenlenerek plaka boyutlarının etkisinin denkleme katılmasına çalışılmıştır (Sela ve Ehrlich, 1971).

Toprak mekaniği alanında geliştirilen bir diğ er yarı deneysel model de System Technologies Inc. tarafından geliştirilmiştir. Vehicle Dynamic Analysis, Non-linear (VDANL) adı verilen modelde toprağın sıkışma direnci modellenmiş ve oluşan kuvvetin hareket direncine neden olduğu bulunmuştur. Ayrıca bir diğ er hareket direnci olan ve tekerleğin hareketi sırasında hareket yönüne göre tekerleğin önünde toprak birikmesi nedeniyle oluşan sürüklenme direnci (bulldozing resistance) hesaplanmıştır. Sürüklenme direnci, Mohr çemberi tekniği ile hesaplanan pasif toprak basıncının tekerlek önüne entegre edilmesi ile hesaplanmıştır. Bu aşamada Terzaghi' nin toprak taşıma kapasitesi hesapları kullanılmıştır (Terzaghi, 1954).

Teknolojinin gelişmesi ile fizik kanunlarının bilgisayar ortamında modellenmesi olanağı doğmuştur ve bu sayede toprak hacmini bilgisayar üzerinde modelleyerek davranışını inceleyen fizik tabanlı modeller ortaya çıkmıştır. Deneysel analizleri kullanmak yerine, toprak-tekerlek etkileşimini fizik ilkelerini kullanarak hesaplayan modeller geliştirilmiştir (Taheri, vd. 2014). Birden fazla disiplini içinde barındıran bu modellerin hesaplama süreleri oldukça uzun olduğundan sadece özel uygulamalarda kullanılabilirler. Bunun nedeni hem tekerleğin hem toprağın sonlu elemanlar veya ayrık elemanlar temelli yöntemler ile modellenmeleridir.

Geliştirilen fizik temelli modellere örnek olarak Vehicle Terrain Interaction Model (VTIM) gösterilebilir. 2012 yılında Madsen ve Seidel tarafından oluşturulmuştur. Bu model gerçek zamanlı olarak çalışabildiğinden taşıt dinamiği simülasyon programlarının içine eklenebilmektedir. Tekerlek ve toprak için iki ayrı model içermektedir. Tekerlek birbirine bağlı kütlelere ayrılmıştır ve bu kütleler janta yaylar ve sönümleyiciler ile bağlıdır. Ayrıca her kütle birbirine radyal yaylar ile bağlıdır. Arazi ise toprak sütunlarına bölünmüştür ve bu sütunların deformasyonu visko-elastik-plastik sıkışabilme ilişkisi ile modellenmiştir. Temas yüzeyindeki gerilme dağılımı için Boussineq ve Ceruti toprak mekaniği denklemleri kullanılmıştır (Wong, 2001). Sürüklenme direnci için gene pasif toprak basıncı denklemleri kullanılmıştır.

Bir diğer yöntem olan ayırık elemanlar yöntemi ise toprak hacminin ayrı ayrı elemanlar olarak oluşturulması ve bu elemanlar arasında etkileşiminin hesaplanması üzerine kurulmuştur. Elemanların arasında bir yay ve sönümleyici olduğu yaklaşımı ile elemanları arası etkileşim kurulmuştur. Ayrıca elemanlar arası teğetsel yönde sürtünmede modellenmiştir. Ayırık elemanlar yöntemi halen gelişmekte olan bir yöntemdir. Bu yöntemin zorluğu ise çok uzun zaman gerektirmesidir. En basit geometrik şekillerin bile ayırık elemanlar yöntemi ile modellenmesi uzun sürmektedir ve analizin sonucu eleman sayısının çokluğu ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla eleman sayısının artması da hesaplama için gereken donanımın performansının yüksek olmasına ve analiz için sürenin uzamasına yol açmaktadır (Taheri, vd. 2014)

Toprağın fiziksel özellikleri, içindeki materyallere, tanecik şekline, nem miktarına ve bunun gibi birçok parametreye bağlıdır ve toprağın büyük bir yüzdesi homojen değildir bu yüzden toprak parametrelerini standartlaştırmak çok mümkün değildir. Ancak geçmiş yıllardan buyana geliştirilen bazı gereçler ve metotlar ile çeşitli topraklar ile yapılan laboratuvar deneyleri, toprak türlerinin standartlaştırılmasına olanak sağlamıştır (Wong, 2001). Bu sayede bazı toprak çeşitlerinin ideal koşullarda standartlaşması sağlanmıştır. Standartlaşmış toprak karakteristiği verileri arazi taşıtlarının tasarım aşamasında performans tahminlerinin yapılmasını kolaylaştırmıştır.

Toprak mekaniği Dünya üzerinde kullanılacak olan arazi taşıtlarının tasarımında büyük rol oynarken, aynı zamanda günümüzde Ay'a ve Mars'a gönderilen keşif amaçlı araçların tasarımında da toprak mekaniği modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu tip atmosfer dışı araçların tekerlek çaplarının küçük olması ve ağırlıklarının

az olması nedeniyle toprak mekaniği alanında bu araçların tasarlanması için geliştirmelere ihtiyaç duyulmuştur (Meirion-Griffith ve Spenko, 2012).

Bekker ve Wong' un geliştirdiği tekerlek-toprak etkileşimine temel olan denklemlerde, tekerlek ile toprağın temas yüzeyinin dikdörtgen şeklinde bir levhadan farksız olarak modellenmesi bu denklemlerin ağırlığı az olan ve küçük tekerleklerle sahip araçlarda hassas sonuç vermemesine yol açmaktadır. Bunun nedeni, gerçekte temas yüzeyinin eliptik bir şekle sahip olmasıdır. Fakat çapı büyük olan lastikler ve ağırlığı fazla olan araçlarda temas yüzeyi dikdörtgene çok yaklaştığından bu denklemler geçerli olmaktadır. Bunun üzerine Reece, Bekker'in denklemlerini güncelleyerek denkleme çapa bağlı bir parametre katmıştır. Çapa bağlı bu parametre, deneyler ile bulunan bir katsayı şeklinde denkleme etkiyerek çapa bağlı bir model oluşmasını sağlamaktadır. Reece' in çalışmasını devam ettiren mühendisler, zamanla çapa bağlı parametreyi kayma gerilmesi denklemlerine de uyarlayarak tekerlek çapına bağlı modeli oluşturmuşlardır. Sonuçta ortaya çıkan model ıslak toprakta (kohezyon karakteristiği yüksek) daha etkin sonuç vermiştir (Meirion-Griffith, Nie ve Spenko, 2013; Meirion-Griffith ve Spenko, 2011).

Zaman içinde arazi araçlarının gelişmesi ile araçların hızları da artmıştır. Artan taşıt hızı beraberinde bir gereksinim daha doğurmuştur. Bekker ve Wong'un oluşturduğu model, toprakla tekerleğin oluşturduğu kuvvetlerin denge durumunu ifade etmektedir. Fakat hızların artması ile toprak-tekerlek etkileşiminin dinamik davranışının farklı olduğu anlaşılmıştır (Shmulevich, vd. 1998). Bunun üzerine Pope, hız parametresinin yuvarlanma derecesi üzerindeki etkisini çalışmıştır. Pope yuvarlanma direncinin hız ile azaldığını bulmuştur (Pope, 1971). Bununla beraber Grahm hız parametresinin tekerleğin batması üzerindeki etkisini çalışmaya başlamıştır. Grahm da Pope ile benzer sonuçlara ulaşmıştır (Grahm, 1991). Pope hızın etkisini ifade edebilmek için bir penetrasyon testi geliştirmiştir ve penetrasyon testinde normal gerilmenin derinlik ile değişiminden bir takım deneysel fonksiyonlar geliştirmiştir. Onafeko ve Reece'de tekerleğin belirli bir hızda hareket ederken ve bir yandan da toprak içinde batarken (düşey yönde ve yatay yönde hareket) temas yüzeyindeki hareketin hızının fonksiyonunu çıkarmıştır. Bu hız fonksiyonunu Pope'nin denkleminde kullanmıştır. Bekker'in basınç-batma ilişkisi denklemi ile Pope'nin denklemini iterasyona sokarak, hızın batma ile ilişkisi için bir yöntem oluşturmuşlardır.

Toprak ile tekerlek arasındaki etkileşimde çalışılan bir diğer konu da tekerlek dişlerinin batmaya etkisidir. Bekker'in denklemlerinin temel olduğu modellerde tekerleğin dişlerinin etkisinden bahsedilmemektedir. Bazı bilim adamları, lastik dişlerinin etkisini hesaba katmak için lastiğin etkin yarıçapının artırılmasının yeterli olduğunu düşünmüşlerdir (Iagnemma, vd. 2003). Fakat yapılan deneylerde, lastik dişlerinin titreşime yol açtığı ve bu nedenle topraktaki batmanın sürekli değişken (salınımlı) olduğu sonucu ortaya çıkmıştır (Irani, vd. 2011). Bu değişimin özellikle hafif ve küçük tekerlekli araçların performansını etkilediği bulunan sonuçlardan biridir. Bu nedenle Irani, salınımın etkisini modele ekleyerek dinamik bir model yaratmıştır. Salınımın frekansını, tekerlek açılal hızını ve diş sayısını kullanarak hesaplayan Irani, salınımın büyüklüğünün iki parametreye bağlı olduğunu bulmuştur. Bunlardan biri lastik dişlerinde meydana gelen aktif ve pasif toprak basınçları, diğeri ise dişlerin temasta olduğu toprak yüzeyinde gerçekleşen bölgesel toprak yoğunluğu değişimidir. Oluşturulan model ile zamana bağlı batma değeri hesaplanmış ve deneysel verilerle onaylanmıştır (Irani, Bauer ve Warkentin, 2011).

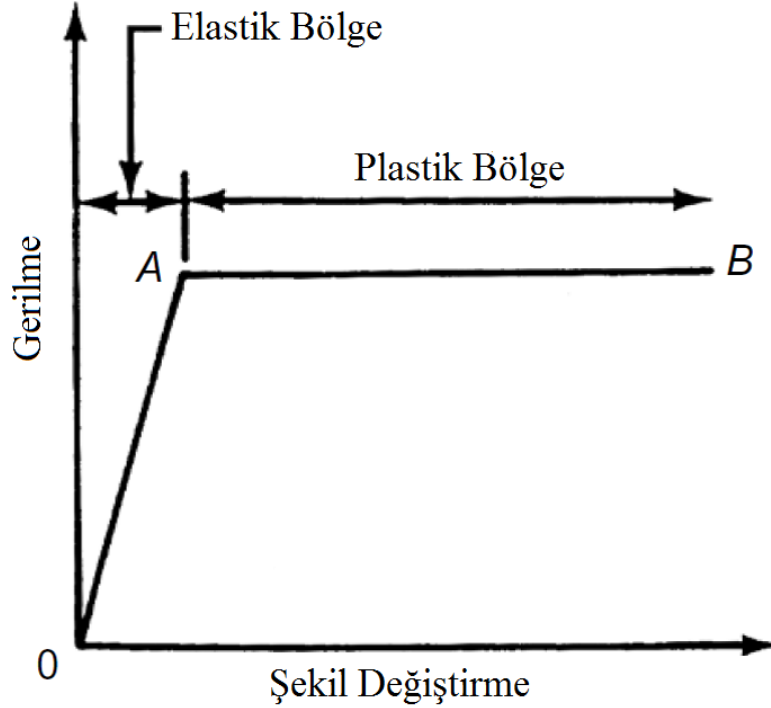
Bekker ve Wong'un modelinde eksik olan bir konu da, tekerleğin kayması durumunda aynı batmaya sahip olmasıdır. Fakat deney sonuçları göstermektedir ki tekerlek kaymaya başladığında, lastik dişleri bir miktar toprağı kazarak tekerleğin daha çok batmasına neden olmaktadır. Bu etkinin, kayma yüzdesi %50 değerine kadar çok etkili olmadığı, fakat %100'e yaklaştıkça tekerleğin batmasının çok ciddi değerlere ulaştığı bulunmuştur (Lyasko, 2009). Vasil'ev, kaymadan dolayı oluşan ilave batma için yarı deneysel bir formül geliştirmiştir. Vasil'ev, bir tekerleğin belirli bir hızda belirli bir mesafe itilmesinde harcanan enerjinin, temas yüzeyinden belirli bir derinliğe kadar olan toprak hacmini deforme etmek için harcanan enerjiye eşit olduğunu varsaymıştır. Deforme olan toprak hacmini deney yoluyla bulan Vasil'ev, bu toprak hacmini hareket ettirdiğinde sistemden potansiyel enerji eksildiğini kabul ederek bu potansiyel enerji değişimini, kaymadan dolayı oluşan ilave batmayı bulmak için kullanmıştır (Vasil'ev, vd. 1969).

Bu tezde, toprağın yarı deneysel bir matematik modeli oluşturularak, arazi araçlarının tasarım parametrelerinin topraktan alınabilecek net çekiş kuvvetini nasıl etkilediği anlaşılmaya çalışılmaktadır. Farklı toprak tiplerinin davranışlarının incelenmesi amacı ile oluşturulan araç etkileşim modeli kullanılarak özellikleri belirli olan bir aracın hızlanma ve maksimum hız eğrileri çıkarılmaktadır. Ayrıca net çekiş

kuvvetinin maksimum olabilmesi için, ideal arazi aracı tasarım parametrelerinin tahmin edilmesi amaçlanmaktadır.

2.1.1 Toprağın elastik davranışı

Sıkışmış kum ve benzeri gibi yoğun olan toprak hacmi, ideal elastik-plastik malzeme gibi düşünülerek bir gerilme-deformasyon ilişkisi ile ifade edilebilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : İdeal elastik-plastik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Wong, 2010).

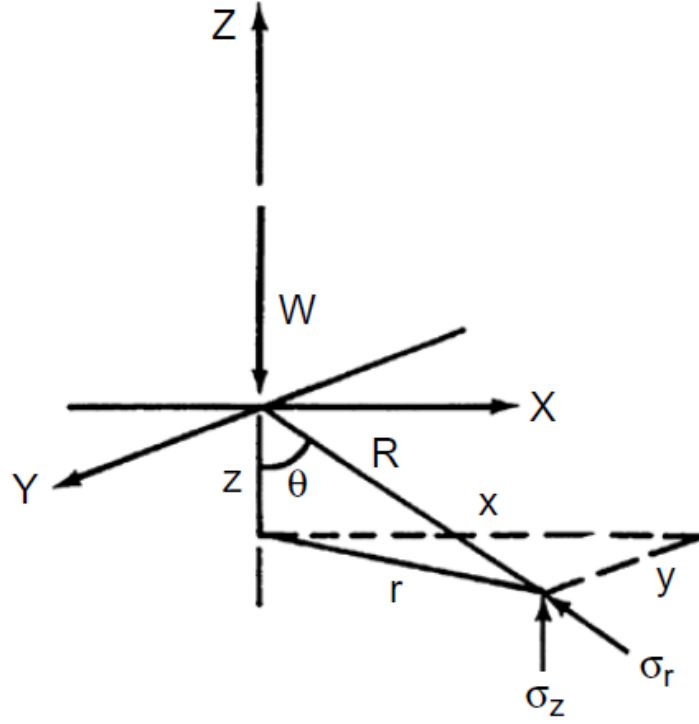
Toprak üzerine uygulanan yük eğer belli bir değeri aşmıyor ise (Şekil 2.2 A noktası) toprak elastik özellik göstermektedir. Toprağın elastik hacim olarak düşünülmesi ve klasik elastisite teorisi ile birlikte gerilim dağılımının tahmin edilerek toprak sıkışması anlaşılmaya çalışılmıştır (Wong, 2010).

Yarı sonsuz hacimde gerilim dağılımının tahmin edilmesi, hacim içinde belirli bir noktadaki noktasal yük kabulü ile yapılabilir. Yarı sonsuz, homojen, izotropik, elastik bir hacimde gerilimi elde etmek için çalışan ilk kişi Boussinesq olmuştur (Boussinesq, 1885). Boussinesq, çalışmaları sonucunda gerilimin materyallerin elastiklik modüllerinden bağımsız olduğunu ve üzerlerindeki yükün ve gerilimin ölçüldüğü noktanın yükün uygulandığı noktadan uzaklığının bir fonksiyonu olduğunu keşfetmiştir. Böylece düşey yük fonksiyonu yüzey altındaki bir noktanın koordinatlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\sigma_z = \frac{3W}{2\pi[1 + (r/z)^2]^{5/2}z^2} \quad (2.1)$$

$$= \frac{3W}{2\pi R^2} \cos^3 \theta \quad (2.2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \text{ ve } R = \sqrt{z^2 + r^2} \quad (2.3)$$

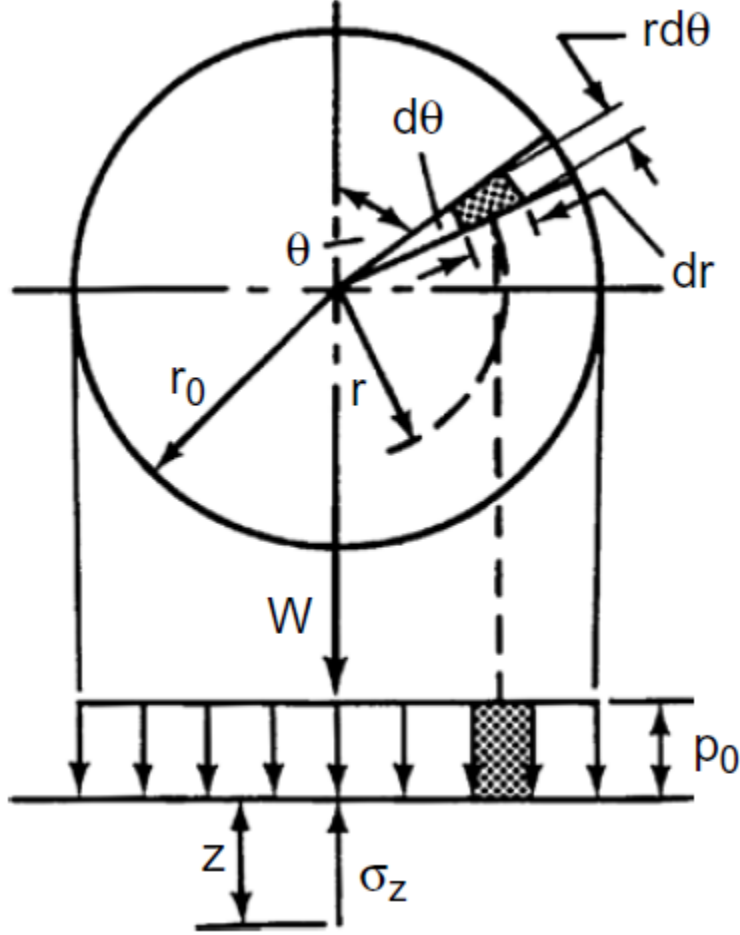


Şekil 2.3 : Yüzeyde noktasal yüke maruz kalmış yarı sonsuz hacimde gerilimler (Wong, 2010).

Bunun yanında denklemlerinin yükleme noktasından belirli bir uzaklıkta geçerli olduğunu keşfetmiştir. Bunun nedeninin, yükleme noktasına yakın iken materyalin elastik davranış göstermemesi olduğunu belirtmiştir.

Noktasal yük altında yapılan analizlerden yola çıkarak, belli bir forma sahip yük dağılımının toprakta meydana getirdiği gerilme dağılımı süper-pozisyon yöntemi ile bulunabilir. Yarıçapı r_0 olan dairesel bir yük altında değişmeyen yük dağılımı ile yükleme yapılır ise; dairenin merkezinden z kadar aşağıda bir noktadaki yük, temas yüzeyinin birden çok noktasal yüke bölünerek bulunabilir. Her noktasal yükün dairenin merkezinde ve z kadar aşağıda yarattığı yükler toplamı bu noktadaki toplam yükü verir (Wong, 2001).

$$\sigma_z = \frac{3p_0}{2\pi} \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \frac{r dr d\theta}{[1 + (r/z)^2]^{5/2} z^2} = 3p_0 \int_0^{r_0} \frac{r dr}{[1 + (r/z)^2]^{5/2} z^2} \quad (2.4)$$



Şekil 2.4 : Dairesel yükleme yüzeyinin altındaki gerilme (Wong, 2001).

$$(r/z)^2 = u^2 \quad (2.5)$$

$$\sigma_z = 3p_0 \int_0^{r_0/z} \frac{u du}{(1 + u^2)^{5/2}} = p_0 \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + r_0^2)^{3/2}} \right] \quad (2.6)$$

Daire merkezinden daha farklı yerlerdeki noktaların gerilmelerini bulmak için daha karmaşık denklemlere ihtiyaç duyulur. Temas yüzeyi tekerlek temas yüzeyi gibi elips şekline yakın olan durumlarda benzer bir yöntemle yükler bulunabilir. Fakat temelde yatan yöntem aynıdır.

Boussinesq' in metodundan ayrı olarak toprağa uygulanan kuvvet belirli bir değeri geçerse gerilmede büyük bir artış oluşturmak için çok az bir kuvvet yeterli olacaktır. Bu noktada toprak plastik akış gösterecektir (Şekil 2.2). Bu davranış nedeniyle

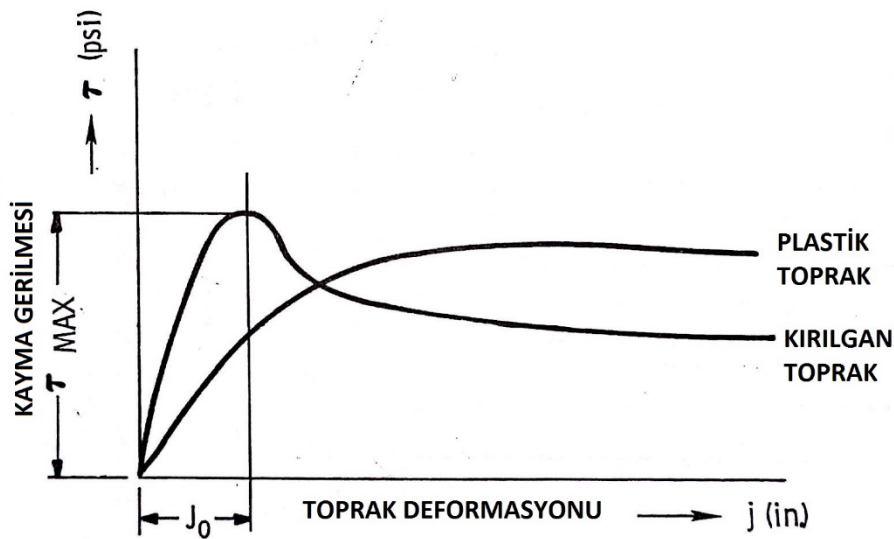
Boussinesq' in elastik modeli araç hareketliliği için kullanılamaz (Wong, 2001). Plastik deformasyon modelinin oluşturulması gerekmektedir.

2.1.2 Toprağın plastik davranışı

Toprak yüzeyine etkiyen yük arttıkça, ideal elastik-plastik gerilme-şekil değiştirme eğrisinde “A” ile gösterilen belirli bir değerin üstüne çıkar ve bu noktada sonsuz küçüklükteki bir gerilme artışı, şekil değiştirmede ani bir artışa sebep olur. Bu ani artış, plastik akışı ifade eder. Topraktaki plastik akış, geçmişte ve günümüzde plastik malzemelerin ifadesi için en çok kullanılan Mohr-Coulomb kriteri ile ifade edilebilir. Mohr-Coulomb kriterine göre, bir malzeme hacmindeki bir noktada kayma gerilmesi aşağıdaki koşulu sağlar ise malzeme deformasyona uğrar (Bekker, 1956):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.7)$$

Denklemden τ kayma gerilmesini, c görünür kohezyonu, σ kaymaya zorlanan yüzeydeki normal gerilmeyi ve ϕ malzemenin içsel sürtünme açısını ifade etmektedir. Mohr-Coulomb kriterine göre, toprak iki genel toprak karakteristiği altında toplanabilir. Bunlar kırılğan toprak ve plastik toprak olarak adlandırılır. Kırılğan toprakta kayma gerilmesi, τ_{max} kayma gerilmesinde j_0 deformasyon gösterecek şekilde artar ve bu noktada kırılma gerçekleşerek kayma gerilmesi bir miktar düşerek deformasyonla değişmeyen bir hal alır. Bunun yanında plastik toprak elastik-plastik davranıştan plastik akışa kademeli bir şekilde geçer (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Kırılğan ve plastik toprağın karakteristiğini gösteren kayma gerilmesi-toprak deformasyonu eğrisi (Bekker, 1969).

Kırılğan topraklara örnek olarak alüvyon, donmuş kar ve yoğun kum verilebilir. Plastik topraklara ise gevşek topraklar olan kuru kum, doymuş kil ve kuru kar verilebilir.

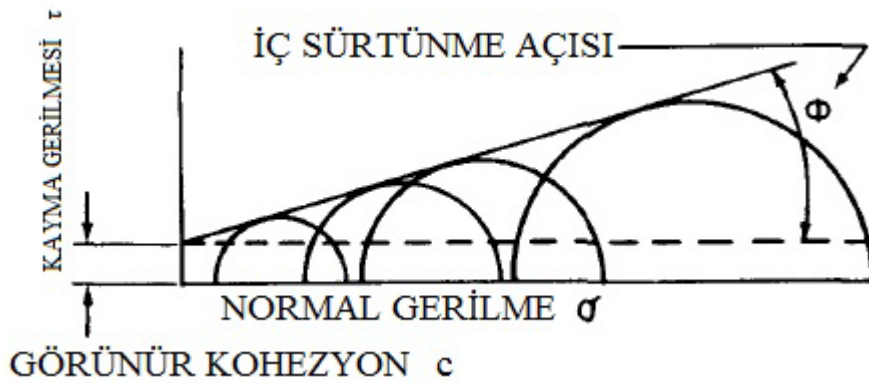
Bir malzemenin kohezyonu, bir malzemeyi oluşturan küçük parçaların arasındaki normal yükten bağımsız olan bağlardan dolayı sahip olduğu kuvveti ifade eder. Kohezyon kuvveti normal yükten bağımsız olmasına rağmen sürtünmesiz kütlelerin birlikte durabilmeleri için normal yüke sahip olmaları gerekir. Fakat yapılan deneyler sonucu doymuş kil gibi kohezyon karakteristiği yüksek olan topraklarda kayma gerilmesinin normal yükten bağımsız olduğu görülmüştür.

$$\tau = c \quad (2.8)$$

Sürtünme karakteristiği yüksek toprakta ise kayma gerilmesi normal yük ile artmaktadır. Malzemenin sahip olduğu iç sürtünme açısı da kayma gerilmesini etkileyen önemli bir faktör olmaktadır.

$$\tau = \sigma \tan \phi \quad (2.9)$$

Dünya yüzeyini kaplayan tanecikli kütlelerin çoğu hem kohezyon hem de sürtünme karakteristiğine sahiptirler. Bu nedenle Mohr-Coulomb kriterini Mohr gerilme daireleri ile ifade etmek daha kolay olur. Bir toprak örneği bir çok farklı yükleme durumuna maruz bırakılırsa, her yükleme durumu için Mohr dairesi çizilebilir (bkz. Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Mohr-Coulomb gerilme daireleri (Wong, 2010).

Mohr dairelerini çizmek için Denk. 2.7 ile belirtilen eşitliğe uygun olarak, malzemenin kohezyonu da hesaba katılarak gerilme eksenine ϕ açı yapacak düz bir sınır çizilir. Çizginin kayma gerilmesi eksenini kestiği yer, malzemenin görünür kohezyonudur ve Mohr-Coulomb kriterine göre, toprak içindeki bir noktada gerilme

durumunu ifade eden dairenin sınır çizgisi ile kesiştiği noktada toprakta kayma meydana gelir.

Kayma gerilmesi-toprak deformasyon eğrilerinin farklı basınçlar (normal yükler) kullanılarak çıkarılmasının ardından, Coulomb kriterine göre Mohr daireleri çizilir. Mohr daireleri ile c ve ϕ parametreleri hesaplanarak toprağın sertliği ve/veya plastik akış karakteristiği çıkarılabilir. Parametrelerin elde edilme yöntemleri daha sonra detaylandırılacaktır.

2.2 Toprak Parametrelerinin Ölçüm Yöntemleri

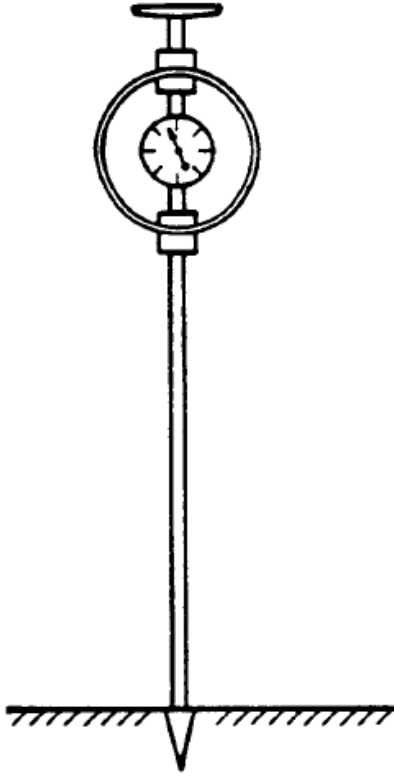
Toprağın sertliği ve plastik akış karakteristiğini gösteren toprak parametreleri, topraktan alınabilecek maksimum çekişin ve bir temas yüzeyine uygulanan normal yük neticesinde toprakta meydana gelecek deformasyonun hesaplanması için büyük önem taşımaktadır. Toprak homojen olmayan bir malzeme olduğundan toprağı hassas bir şekilde modellemek ve arazi araçlarının tekerlekleri ile olan etkileşimini hesaplamak oldukça zordur. Bu nedenle, daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi deneysel ve yarı deneysel modeller geliştirilmiştir. Bu modellerin ortak noktası, hepsinin deneysel ölçümler sonucu oluşturulan parametrelere ihtiyaç duymalarıdır. Bu bölümde en çok kullanılan ölçüm yöntemleri ve ölçme prensipleri anlatılmıştır.

2.2.1 Konik penetrasyon cihazı

Konik penetrasyon cihazı, tamamen deneysel olan toprak mekaniği modellerinde kullanılmak üzere 2. Dünya Savaşı sırasında (WES) tarafından geliştirilmiştir. Konik penetrasyon cihazı 1940 yılında bulunmuştur ve o dönemde toprağın davranışı hakkında çok az bilgi olduğundan, arazi araçlarının toprak ile etkileşimi teknoloji yokluğu nedeniyle de anlaşılamamıştır. Bu nedenle bir arazi aracının, üzerinde bulunduğu arazide hareket edip edemeyeceğini anlamak için toprağın mekanik karakteristiğini tek bir değer olarak veren konik penetrasyon cihazı geliştirilmiştir (Wong, 2001).

Konik penetrasyon cihazının verdiği değer, koni indeksi (Cone Index: CI) olarak adlandırılır. Koni indeksi, toprak içine bastırılan koni şekilli uca toprak tarafından uygulanan ortalama yükün bir göstergesidir. Konik penetrasyon cihazının batırıldığı derinlik, bir aracın lastiklerinin o arazide batacağı derinlik ile belirlenir. Konik penetrasyon cihazının kullanılabilmesi için var olan bir aracın birçok toprak üzerinde

test edilmesine ihtiyaç duyulur. Her toprak konik penetrasyon cihazı ile ölçülerek, bir aracın hangi koni indeksine sahip araziler üzerinde hareket edebildiği hangilerinde edemediği kayıt altına alınmalıdır. Bir aracın belirli bir arazide hareket edebilir olduğuna karar verilmesi için o araziden 50 kere geçebilmesi gerekmektedir (Bekker, 1969).



(a)



(b)

Şekil 2.7 : (a) Konik penetrasyon cihazı, (b) konik penetrasyon cihazının kullanılışı (Wong, 2001; Fatherree, 2006).

Daha sonra bu araç test edilmeyen bir araziye gittiğinde arazinin koni indeksine bakılarak aracın bu arazide hareket edip edemeyeceği anlaşılır. Fakat araziye girecek araç daha önce test edilmediyse, bu yöntem işe yaramaz.

WES tarafından geliştirilen standart konik penetrasyon cihazı 1,59 cm çapında bir çubuk, uygulanan kuvveti görmek için bir kadran ve 30° açığa sahip koni ucundan oluşur. Koni bölümünün yüzey alanı 323 mm² dir. Farklı tipteki topraklar için iki farklı konik penetrasyon cihazı geliştirilmiştir. Kaba taneli, gevşek olan toprakta 323 mm² alana sahip konik penetrasyon cihazı kullanılırken; daha sıkı ve ince taneli olan toprak için 130 mm² yüzey alanına sahip konik penetrasyon cihazı kullanılır (Bekker,

1960). Gevşek olan topraklara örnek olarak kuru kum verilebilir. Sıkı olan topraklara örnek olarak da kil verilebilir.

Konik penetrasyon cihazının gösterdiği değer boyutsuzdur ve gerçek bir fiziksel ölçümü vermez. Gerçekte konik penetrasyon cihazının ölçtüğü değer; toprağın şekil değiştirmeye gösterdiği direnç, sıkıştırılabilirlik, sürtünme özelliklerinin bir kombinasyonudur. Bu özelliklerin hiç biri konik penetrasyon cihazı ile ayrı ayrı ölçülemez.

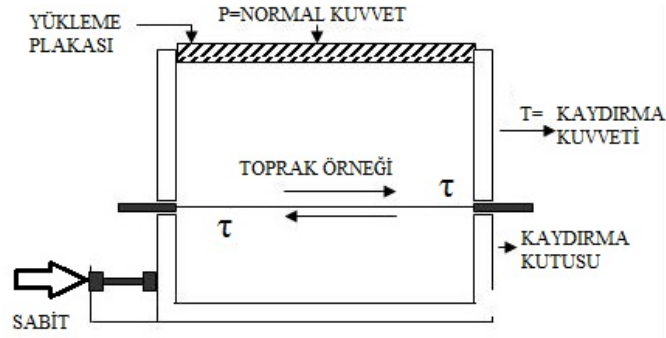
Koni indeksinin yanında konik penetrasyon cihazı kullanılarak ölçülebilen başka deneysel indeksler de vardır. İnce taneli topraklarda veya ıslak kumlarda, toprağın üzerine arka arkaya birden fazla kez yük uygulanması durumunda, toprağın direncinin değişimini ifade eden indeks olan RI (Remolding Index) elde edilebilir. RI, birden fazla kez üzerine yük uygulanmış toprağın konik indeksinin, üzerine tek sefer yük uygulanmış toprağın konik indeksine oranıdır. RI ile toprağın sıkıştırılabilirlik özelliği hakkında gene fiziksel olmayan bir değer elde edilmiş olur (Wong, 2001).

Konik penetrasyon cihazı ile yapılan testlerde, penetrasyon cihazının batırıldığı her derinlikte koni indeksi kayıt edilerek koni indeksi-derinlik grafikleri elde edilebilir. Bu grafiğin eğimi de toprağın sertliği konusunda bilgi verir. Eğim ne kadar çok ise, o toprak o kadar sert olmaktadır (Bekker, 1956).

2.2.2 Doğrudan kaydırma testi

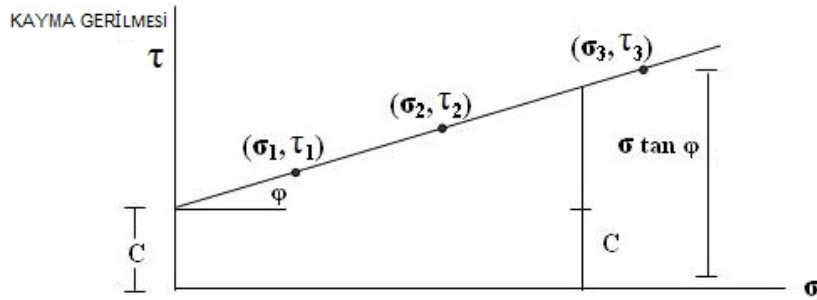
Literatürde yer alan en eski ve en kolay metottur. Doğrudan kaydırma testi, temelde iki boyutlu doğrusal bir testtir. Doğrudan kaydırma testi, önceden belirlenmiş kayma yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmelerini analiz etmek için kullanılmıştır. Testte kohezyon c , sürtüne açısı ϕ ve kayma direnci τ bulunabilmektedir. Doğrudan kaydırma testi, tamamen kuru olan toprakta en iyi sonuç vermektedir.

Doğrudan kaydırma testinde, toprak örneği iki yarımdan oluşan kare veya daire şeklindeki bir kabın içine konur. Bu kap, kaydırma kutusu olarak adlandırılır. Kaydırma kutusunun üzerine bir yük uygulanarak toprak örneği üzerinde normal gerilme yaratılır. Toprak normal yük altında iken, bir yandan kaydırma kutusunun üst yarımına yatayda kuvvet uygulanarak toprak örneğinde kayma gerilmesi oluşturulur. Toprağın deformasyona uğradığı kayma gerilmesi değeri kayıt edilir (Das, 2002).



Şekil 2.8 : Doğrudan kaydırma test düzeneği (Classification of Soil, 2015).

Doğrudan kaydırma testinde minimum üç adet olacak şekilde birden çok test yapılır. Her testte farklı normal yükler kullanılarak elde edilen veriler, kayma gerilmesi-normal gerilme grafiğine işlenerek her test noktasını birleştirecek düz bir çizgi ile birleştirilir. Oluşan düz çizginin yatay eksen ile yaptığı açı iç sürtünme açısını, çizginin düşey eksenini kestiği nokta kohezyonu verir. Oluşan çizginin denklemi, Coulomb kriterine göre oluşturulan Denk. 2.7 ile aynıdır.



Şekil 2.9 : Normal gerilme ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki (Classification of Soil, 2015).

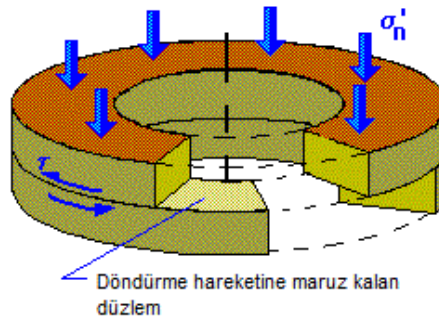
Doğrudan kaydırma testi biraz karmaşık olan ve daha sonra anlatılacak olan üç eksenli teste göre daha hızlı sonuç verir. İç sürtünme açısı 35° 'den az olan kumlarda, üç eksenli test ile doğrudan kaydırma testi sonuçları arasındaki fark, ihmal edilebilecek düzeydedir. Fakat iç sürtünme açısı 35° 'den fazla olursa, üç eksenli test ile doğrudan kaydırma testi arasında $3-4^\circ$ fark oluşabilmektedir. Bunun nedeni doğrudan kaydırma testinde toprağın belirli bir yüzeyde kaymaya maruz bırakılmasıdır. Bu nedenle toprağın en zayıf noktasının değil herhangi bir noktasının kaymaya maruz kalması söz konusudur. Bununla beraber, doğrudan kaydırma testinde kullanılan toprak örneğinin hacmi çok küçüktür. Bu nedenle örneğin hazırlanışında dahi yapılan bir değişiklik sonucu çok fazla etkilememektedir. Ayrıca doğrudan kaydırma testine toprağın gerilme durumu tam olarak ifade edilemez.

Bunun nedeni normal ve kayma gerilmeleri sadece yatay düzlemde ölçülebilmektedir (Oravec, 2009).

2.2.3 Burulmalı kaydırma testi

Burulmalı kaydırma testi, aynı zamanda halka kaydırma testi olarak da bilinir. Bu yöntemde toprak örneği halka şeklinde kaydırma hücrelerinin içine konur ve doğrudan kaydırma testinde olduğu gibi iki kaydırma hücresi, halkalar arasındaki belirli bir düzlem ile birbirinden ayrılır. Kaydırma hücresi kapaklarının üzerinde, toprak örneğinin hücre içerisinde kaymasını önlemek için dişler bulunur. Bu sayede toprak örneği, kaydırma hücresi ile beraber hareket edebilir. Kaydırma hücrelerinin üzerine düşey yük uygulanarak toprak örneği üzerinde normal yük yaratılır. Kaydırma hücrelerinden biri döndürülerek toprak örneği burulmaya zorlanır. Toprak örneği maksimum kayma direnci gösterinceye kadar kaydırma hücresi döndürülür. Farklı düşey yükler ile birden fazla test yapılarak kayma gerilmesi-normal gerilme grafiğine her test verisi işlenerek, doğrudan kaydırma testinde olduğu gibi her test verisinin üzerinden geçen eğri çizilir. Eğrinin yatayda yaptığı açı iç sürtünme açısını, düşey eksen kestiği nokta ise kohezyonu verir (Bekker, 1969).

Burulmalı kaydırma testinin doğrudan kaydırma testine göre avantajı, toprak örneğinin kayma gerilmesine maruz bırakıldığı düzlemdeki kesit alanının test sırasında değişmemesidir. Ayrıca test süresince toprak örneği devamlı olarak kayma gerilmesine maruz bırakılabilir. Doğrudan kaydırma testinde, kaydırma kutusu hareket ettikçe kesit alanı azalır ve kaydırma kutusunun uzunluğu boyunca örnek deformasyona uğratılabilir. Burulmalı kaydırma testinde hareket dairesel olduğundan deformasyonun sınırı yoktur.



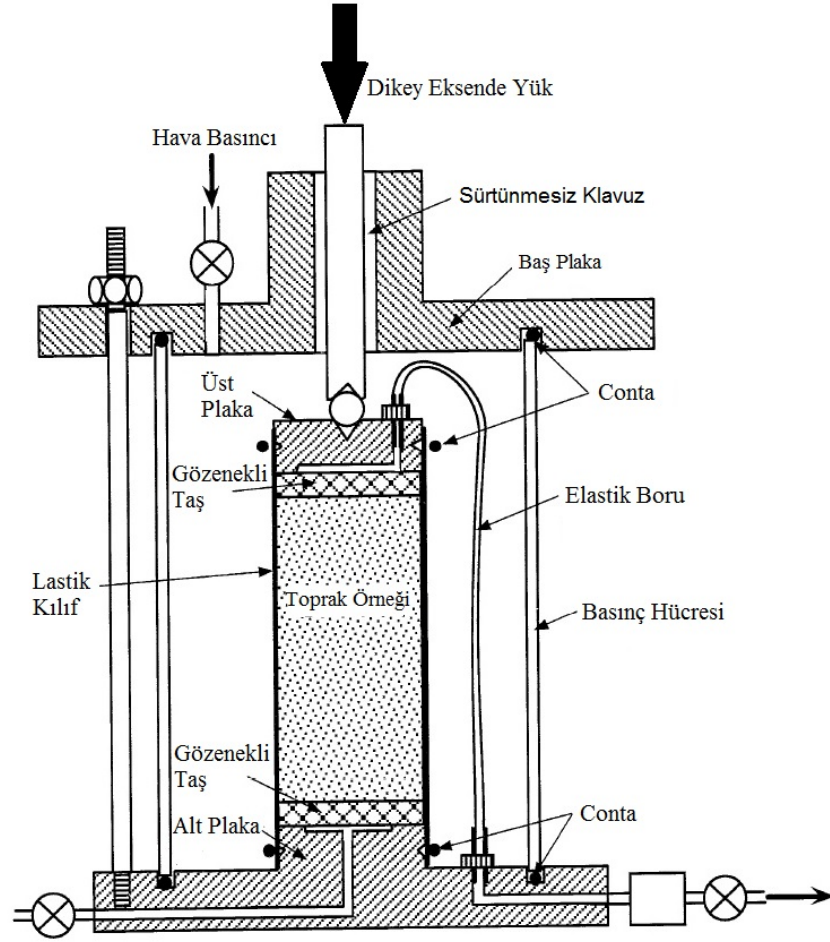
Şekil 2.10 : Burulmalı kaydırma testi.

2.2.4 Üç eksenli test

Üç eksenli test yöntemi; toprağın gerilme-deformasyon karakteristiğini, toprak içindeki suyun miktarını kontrol ederek belirleyen bir test yöntemidir. Üç eksenli test yöntemi, toprağın maksimum kayma direncini ve deformasyona uğrayana kadar olan gerilme değişimini ölçmede en hassas yöntemdir.

Üç eksenli test metodunda, silindirik toprak örneği lastik bir kılıf içerisinde bulunur. Lastik kılıfın içinde bulunduğu ikinci hücre, görece sıkıştırılamayan bir akışkan ile doludur. Bu akışkan su veya yağ olabilir. Toprak örneğinin bulunduğu lastik kılıfın iki ucunda gözenekli taşlar bulunur. Kılıfın en uç noktalarında ise plakalar bulunur ve bu plakalar drenaj sistemine bağlıdır. Drenaj sistemi ile toprak örneğinin doygunluğu ayarlanabilir.

Üç eksenli test yönteminde, toprak örneğinin içinde bulunduğu lastik kılıfı saran ikincil hücre sabit σ_c basıncı ile basınçlandırılır. Bu sırada toprak örneği de silindirik eksenli doğrultusunda bir kuvvet ile yüklenir. Lastik kılıf çeperlerindeki basınç ile sabit deformasyon oranı olacak şekilde yüklenen toprak örneği, maksimum kayma gerilmesi oluşuncaya kadar yüke maruz bırakılır. Her birinde farklı hücre basıncı (σ_c) olacak en az üç test yapılır. Normal yük ve deformasyon ölçümleri alınarak gerilme-şekil değiştirme eğrisi oluşturulur. Bu eğri ile daha sonra maksimum kayma gerilmesi bulunabilir. Test verileri Mohr gerilme dairelerini oluşturmak için kullanılır. Dairelerin oluşturulması için en büyük ve en küçük ana gerilmeler gerekmektedir. Üç eksenli testte en küçük ana gerilme ikincil hücrenin basıncı olan σ_c' dir. En büyük ana gerilme ise, en küçük ana gerilme ile silindir merkezi doğrultusunda uygulanan yükün toplamıdır. En küçük ana gerilme, Mohr dairesinin yatay eksen kestiği noktalardan biridir. Diğer kestiği nokta da en büyük ana gerilmedir. Bu iki nokta ile Mohr dairesi çizilebilir. En az üç farklı hücre basıncı ile oluşturulan üç Mohr dairesine en iyi yaklaşma ile teğet olan çizgi çizilir. Bu çizginin yatay eksen ile yaptığı açı, iç sürtünme açısıdır. Çizginin düşey eksen kestiği nokta ise toprağın kohezyonudur (Wills, 1966).

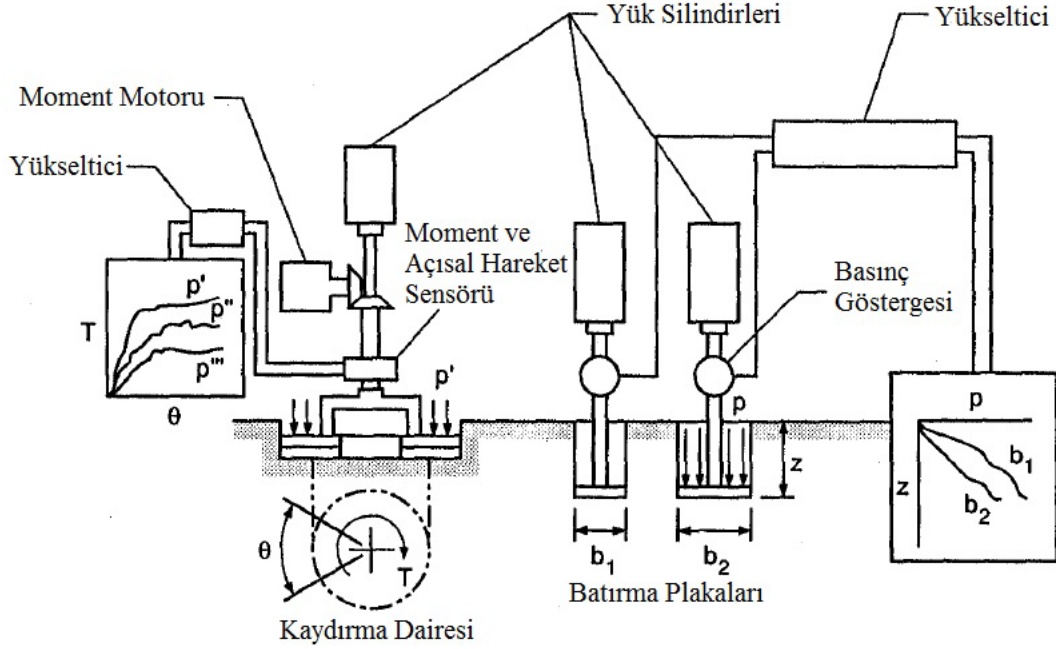


Şekil 2.11 : Üç eksenli test düzeneği (Oravec, 2009).

2.2.5 Bevameter yöntemi

Toprağın gerilme-şekil değiştirme karakteristiğini belirlemek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bevameter (Bekker-Value-Meter) yöntemi hem düşey doğrultuda hem de yatay doğrultuda gerilme-şekil değiştirme karakteristiğini verebilen tek yöntemdir (Bekker, 1956). Bekker tarafından bulunan yöntem 1950'li yıllarda bulunmuştur. Bevameter cihazının bir şeması Şekil 2.12' de gösterilmiştir. Bevameter cihazı temelde iki test yapmaktadır. Bunlardan ilki kuvvet-batırma (basınç-batma testi de denebilir) testidir. Bu testte dikdörtgen şekilli bir levha toprak yüzeyine bastırılarak batması sağlanır. Genellikle batma hızı sabit tutulmaktadır. Test sırasında uygulanan kuvvet ile batma miktarı ölçülür. Bu testte düşey doğrultudaki gerilme-şekil değiştirme karakteristiği belirlenir. Bunun yanında Bevameter cihazı dairesel kaydırma testide uygulayarak yataydaki gerilme-şekil değiştirme karakteristiğini belirler. Dairesel kaydırma testinde, bir kaydırma dairesi üzerine önceden bilinen bir yük uygulanır. Düşey yük ile beraber daire döndürülerek, toprak

yüzeyinde, yatayda kayma gerilmeleri oluşturulur. Kaydırma dairesine uygulanan moment ve kaydırma dairesinin açisal yer değışimi ölçölerek, kayma gerilmesi-kayma yer değıştirmesi ilişkisi elde edilir ve bu sayede toprak parametreleri bulunabilir.



Şekil 2.12 : Bevameter cihazının şeması (Oravec, 2009).

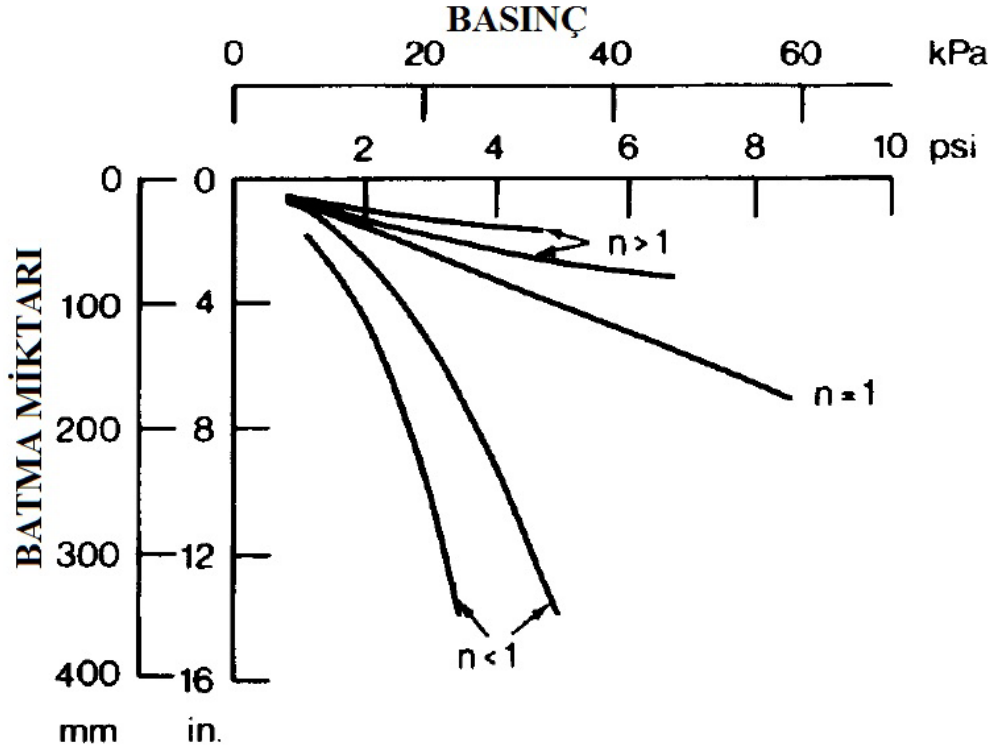
Araç lastiğinin toprakla ilişkisini anlamının en iyi yolu ise, kaydırma dairesinin üzerini lastik bir malzeme ile kaplayarak testi yapmaktır. Bu lastiğin özellikleri, test edilecek aracın lastiğin özelliklerine yakın seçilerek en uygun parametrelerin elde edilmesi sağlanır.

Bevameter cihazı ile basınç-batma testi sonucunda alınan değerler Şekil 2.13' de gösterildiği gibi basınç-batma grafiklerine dönüştürölür. Bu eğriler ise daha sonra detaylandırılacak olan Bekker' in Denk. 2.10 ifadesi ile karakterize edilebilir (Bekker, 1956).

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (2.10)$$

Denklemdaki p basıncı, b ise temas yüzeyindeki minimum genişliğı vermektedir. Temas yüzeyi genişliğı dikdörtgen ise b dikdörtgenin genişliğı; dairesel ise dairenin yarıçapı olmaktadır. Bekker' e göre, homojen topraklarda dikdörtgen şeklindeki temas yüzeyinin uzunluğı ve genişliğı arasındaki oran 7' den büyük ise dikdörtgenin genişliğinin toprak parametreleri k_c ve k_ϕ ye etkisi yoktur. Olası homojen olmayan

toprakları söz konusu olduğundan, arazide kullanılacak olan plakanın genişliğinin 10 cm' den az olmaması gerekmektedir.



Şekil 2.13 : Birkaç homojen toprağın basınç-batma grafiği (Wong, 2001).

Yapılan testler sonucunda, test sırasında kullanılan dikdörtgen şekilli levhanın ölçüleri arasındaki oran 7' den fazla olduğu takdirde, dikdörtgen levhanın genişliği ile aynı yarıçapa sahip dairesel levha kullanıldığında, k_c , k_ϕ ve n arasında çok az bir fark oluşmaktadır. Bu nedenle testlerde daha çok dairesel levhalar kullanılır. Bunun nedeni, dairesel levha ile aynı temas yüzeyi basıncını oluşturmak için daha az kuvvete gerek olmasıdır (Bekker, 1960).

Bevamer yöntemi ile k_c , k_ϕ ve n parametrelerinin elde edilebilmesi için en az 2 test yapılmalıdır. İki testte kullanılan plakanın boyutları farklı alınarak basınç-batma grafiği çizilirse Şekil 2.13' de gösterilen grafiğe benzer iki adet grafik elde edilir. Bu grafikler Denk. 2.10 ile karakterize edilir ise aşağıdaki gibi yazılabilir (Bekker, 1956).

$$p_1 = \left(\frac{k_c}{b_1} + k_\phi \right) z^n$$

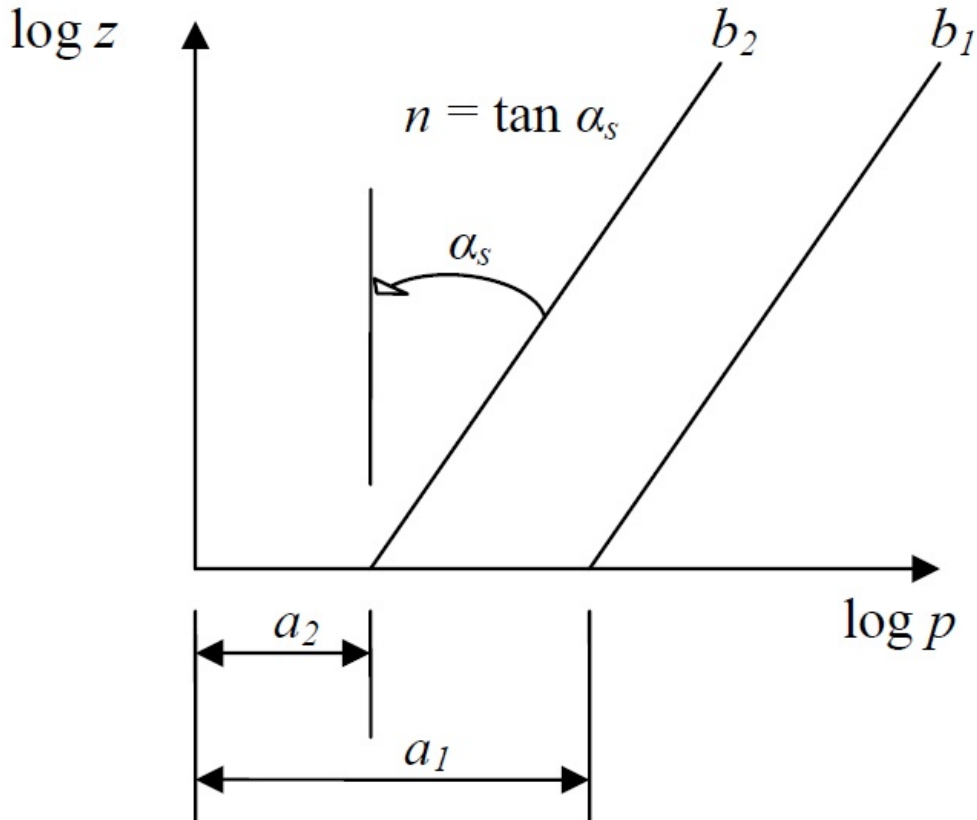
$$p_2 = \left(\frac{k_c}{b_2} + k_\phi \right) z^n$$
(2.11)

Yukarıdaki denklem logaritmik ölçekte düzenlenerek Denk. 2.12 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \log p_1 &= \log \left(\frac{k_c}{b_1} + k_\phi \right) + n \log z \\ \log p_2 &= \log \left(\frac{k_c}{b_2} + k_\phi \right) + n \log z \end{aligned} \quad (2.12)$$

Logaritmik ölçekte yeniden yazılan basınç batma ilişkisi denklemleri birbirine paralel iki adet düz çizgi şeklinde grafik oluşturur (Şekil 2.14). Batma miktarını karakterize eden bir üs olan n , oluşan iki grafiğin eğimine eşittir. Ayrıca batma miktarının bir olması durumunda ($z=1$), Denk. 2.13 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} (p_1)_{z=1} &= \frac{k_c}{b_1} + k_\phi = a_1 \\ (p_2)_{z=1} &= \frac{k_c}{b_2} + k_\phi = a_2 \end{aligned} \quad (2.13)$$



Şekil 2.14 : Bekker' in batma parametreleri elde etmek için kullandığı yöntemin bir şeması. a_1 ve a_2 , $z=1$ batmasındaki basıncı ifade etmektedir (Oravec, 2009).

Batma üssü olan n , Şekil 2.14’ de de görüldüğü gibi grafiğin eğimi olan $\tan \alpha_s$ ’ e eşit olmaktadır. Batma üssü toprağın sertliğinin bir göstergesidir. Batma üssü n , 1’ den küçük ise toprak gevşek toprak olarak değerlendirilir (Wong, 2001). Gevşek toprak arka arkaya yüke maruz kaldığında sertliğini kaybeden bir topraktır. Batma üssünün 1’ den büyük olduğu topraklarda güçlü topraklardır. Arka arkaya yüke maruz kaldıklarında daha çok sıkışarak sertliğini artırabilirler. k_c ve $k_\emptyset$ ise aşağıdaki gibi bulunur (Wong, 2001):

$$\begin{aligned} k_\emptyset &= \frac{a_2 b_2 - a_1 b_1}{(b_2 - b_1)} \\ k_c &= \frac{(a_1 - a_2) b_1 b_2}{(b_2 - b_1)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Çizelge 2.1’ de Bevameter yöntemi ile farklı topraklarda yapılan testlerin sonucunda elde edilen toprak parametreleri gösterilmektedir. Çizelgedeki arazi tiplerine bakıldığında bazılarının yöresel isimler aldığı görülmektedir. Bunun nedeni, benzer tipte olsalar dahi bazı toprakların yöreden yöreye farklı özellik göstermesidir.

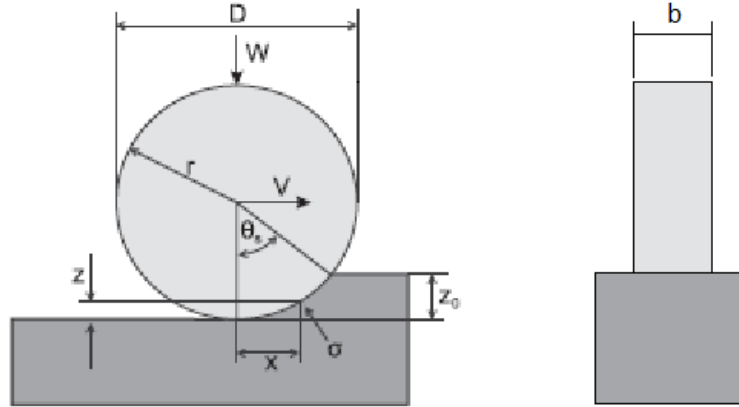
Toprak çoğunlukla homojen olmayan bir malzeme olduğundan, logaritmik ölçekte çıkarılan iki basınç-batma grafiği (Şekil 2.14) genelde birbirine paralel çıkmaz. Bu durumda batma üssü olan n , iki grafikten hesaplan iki değer ortalaması olarak alınır. Logaritmik ölçekte çıkarılan düz çizgiler, toprağın homojen olmaması nedeniyle basitçe çıkarılamaz. Testi yapan araştırmacı, tecrübesi ve bilgisi ile test verisine en uygun olan grafiği yaratmak zorundadır İki araştırmacı aynı toprağı aynı verileri kullanarak birbirinden farklı sonuçlar bulabilir.

Çizelge 2.1 : Bevameter yöntemi ile bulunan Bekker toprak parametreleri (Wong, 2001).

Terrain	Moisture Content %	n	k_c		k_ϕ		c		ϕ
			ln/in. ⁿ⁺¹	kN/m ⁿ⁺¹	ln/in. ⁿ⁺²	kN/m ⁿ⁺²	ln/in. ²	kPa	deg
Dry sand (Land Locomotion Lab, LLL)	0	1,1	0,1	0,99	3,9	1528,43	0,15	1,04	28°
Sandy loam	15	0,7	2,3	5,27	16,8	1515,04	0,25	1,72	29°
(LLL)	22	0,2	7	2,56	3	43,12	0,2	1,38	38°
Sandy loam	11	0,9	11	52,53	6	1127,97	0,7	4,83	20°
Michigan (Strong, Buchele)	23	0,4	15	11,42	27	808,96	1,4	9,65	35°
Sandy loam	26	0,3	5,3	2,79	6,8	141,11	2	13,79	22°
(Hanamoto)	32	0,5	0,7	0,77	1,2	51,91	0,75	5,17	11°
Clayey soil	38	0,5	12	13,19	16	692,15	0,6	4,14	13°
(Thailand)	55	0,7	7	16,03	14	1262,53	0,3	2,07	10°
Heavy clay	25	0,13	45	12,7	140	1555,95	10	68,95	34°
(Waterways Experiment Stn., WES)	40	0,11	7	1,84	10	103,27	3	20,69	6°
Lean clay	22	0,2	45	16,43	120	1724,69	10	68,95	20°
(WES)	32	0,15	5	1,52	10	119,61	2	13,79	11°
LETE sand (Wong)		0,79	32	102	42,2	5301	0,19	1,3	31,1°
Upland sandy loam (Wong)	51	1,1	7,5	74,6	5,3	2080	0,48	3,3	33,7°
Rubicon Sandy loam (Wong)	43	0,66	3,5	6,9	9,7	752	0,54	3,7	29,8°
North Gower Clayey loam (Wong)	46	0,73	16,3	41,6	24,5	2471	0,88	6,1	26,6°
Greenville loam (Wong)	24	1,01	0,01	0,06	20,9	5880	0,45	3,1	29,8°
Snow (U.S.)		1,60	0,07	4,37	0,08	196,72	0,15	1,03	19,7°
Snow (Harrison)		1,60	0,04	2,49	0,1	245,9	0,09	0,62	23,2°
Snow (Sweden)		1,44	0,30	10,55	0,05	66,08	0,87	6	20,7°

2.3 Toprakta Basınç-Batma İlişkisi

Lastik ile toprak etkileşim yüzeyindeki normal gerilme dağılımının şeklini ve büyüklüğünü batma miktarına göre tanımlayan ilişkiye, basınç-batma ilişkisi denir. Toprak mekaniğinde önemli bir rol oynayan basınç-batma ilişkisi, batma miktarı ve direnç eşitliklerinin kurulmasına temel oluşturmaktadır. Ayrıca batma miktarı ve direnç, topraktan alınabilecek net çekiş kuvvetini de etkilediğinden toprak mekaniğinin en temel ögesi olarak görülebilir. Basınç batma ilişkisinin kurulabilmesi için, toprağın fiziksel özelliklerinin ve toprakla tekerleğin temas yüzeyi geometrisinin bilinmesi önemlidir. Şekil 2.15 toprak ile lastiğin temas yüzeyinin geometrisini göstermektedir. Şekilde D lastik çapı, W lastik üzerindeki normal kuvvet, l ve b lastik-toprak temas yüzeyinin uzunluğu ve genişliği, z maksimum basıncın olduğu noktada topraktaki batma miktarı ve z_0 toplam lastik batmasını göstermektedir.



Şekil 2.15 : Lastik ile toprağın etkileşim yüzeyinin geometrisi ve semboller.

Tanecikli bir malzeme olan toprak, üzerinde yük yokken katı gibi rijit davranır fakat yüklendiğinde sıvı gibi akıcı olma özelliğine sahip olur. Bu nedenle, gerilme şekil değiştirme ilişkisi kolayca ifade edilemez. Lastik gibi toprakla etkileşim yüzeyindeki yük dağılımı düzensiz olan durumlarda hesaplama yapmak ayrıca zorluk oluşturmaktadır. Bu problemin karmaşıklığı nedeniyle sadece deneysel ya da yarı deneysel modeller bu problemin çözülmesinde kullanılabilmektedir. Ayrıca modellerin oluşturulmasında en basit varsayımlar kullanılmıştır. Bunlardan en az hassas olanı batma miktarı ile basınç arasında lineer ilişki olduğunu farz eden modeldir. Bu model toprağı tamamen elastik materyal kabul eder.

$$p = kz \quad (2.15)$$

En basit yaklaşımın üzerine ilk geliştirilen basınç-batma modeli, Bernstein tarafından 1913 yılında geliştirilmiştir (Bernstein, 1913). Bernstein' in asıl çalışma alanı tarım mühendisliği iken, deneysel olarak düz bir dikdörtgen plakanın toprağa batırılması sırasında toprağın plakaya uyguladığı normal basıncın grafiğine eğri uydurma yöntemi ile bir yaklaşım geliştirmiştir. Bernstein, düz bir plakanın toprak içine belirli bir mesafe batırılabilmesi için gerekli basıncı bir kuvvet fonksiyonu olarak ifade etmiştir.

$$\sigma = kz^{0,5} \quad (2.16)$$

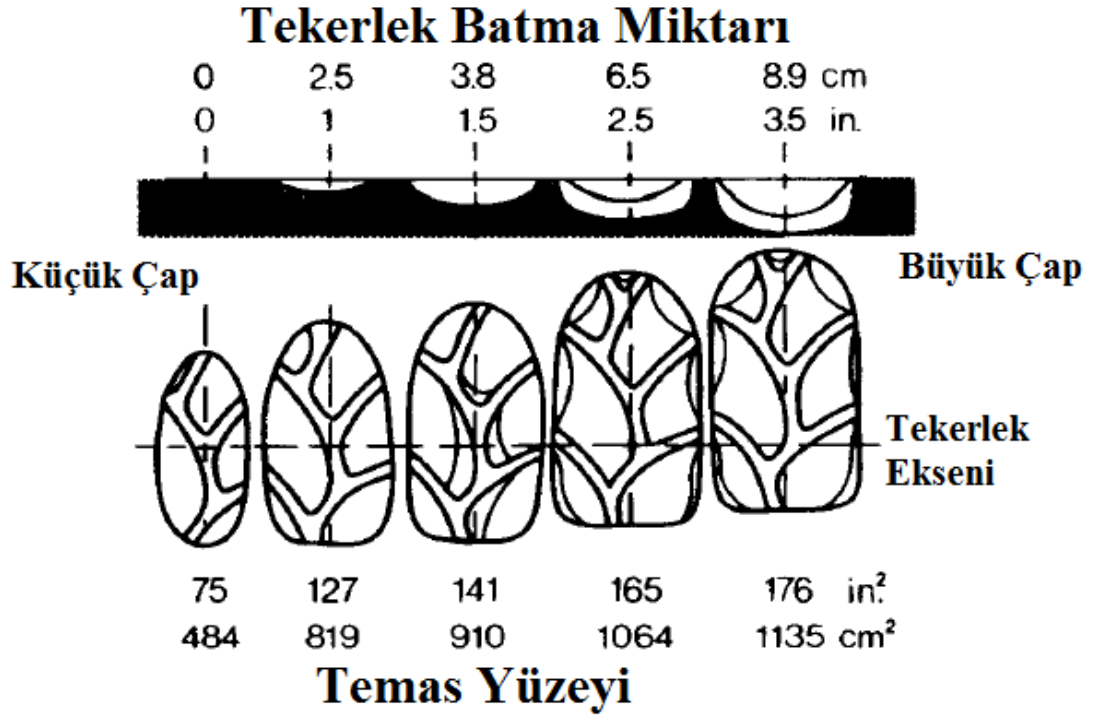
Bu eşitlikte σ normal basınç ve k batma modülüdür. Bernstein' den sonra, Goriatchkin tarafından bu model geliştirilerek Bernstein tarafından 0,5 olarak kabul edilen batma üssünün toprağın cinsine bağlı olduğu kabulü ile;

$$\sigma = kz^n \quad (2.17)$$

olarak değiştirilmiştir. Bu eşitlik Bernstein-Goriatchkin eşitliği olarak adlandırılmıştır. Bu eşitlikte k ve n eğri uydurma sabitleri olup, deneysel gözlemlerle elde edilmektedir.

Basınç ile batma arasındaki ilişkiyi bir aracın lastiği için ele alan ilk kişi Bekker olmuştur (Bekker, 1956). Silindirik bir gövdenin toprak içine batması olayı modelleme açısından oldukça çok problem çıkarmaktadır. Bekker bu modeli daha basit hale getirebilmek için; toprak ile lastiğin temas yüzeyinin düz, dikdörtgen bir levha olarak düşünülebileceğini varsaymıştır. Bu varsayımı yaparken tekerleğin yeteri kadar büyük olması koşulunu öne sürmüştür. Bunun nedeni toprak ile lastiğin temas yüzeyindeki eğimli şekil, tekerlek çapı büyüdükçe ve batma miktarı görece olarak fazla iken, neredeyse düz bir şekil almaktadır. Bu nedenle bu koşulu sağlayan durumlarda, toprak ile lastiğin temas yüzeyi dikdörtgen şekilli düz bir levha gibi düşünülebilir. Fakat tekerlek çapı küçüldükçe bu varsayımla kurulan modelin hassasiyeti de azalmaktadır (Wong, 2001). Bu durum Şekil 2.16' da gösterilmiştir.

Şekil 2.16' da görüldüğü gibi, topraktaki batma miktarı arttıkça basma yüzeyi elips şeklinden dikdörtgen şekline doğru değişmektedir. Lastik çapının artması ise, basma yüzeyinin büyüklüğüne oranla basma yüzeyinin köşelerindeki eğimli bölgenin daha küçük kalmasına dolayısı ile dikdörtgen şekline daha yakın olarak hassasiyetin artmasını sağlamaktadır.



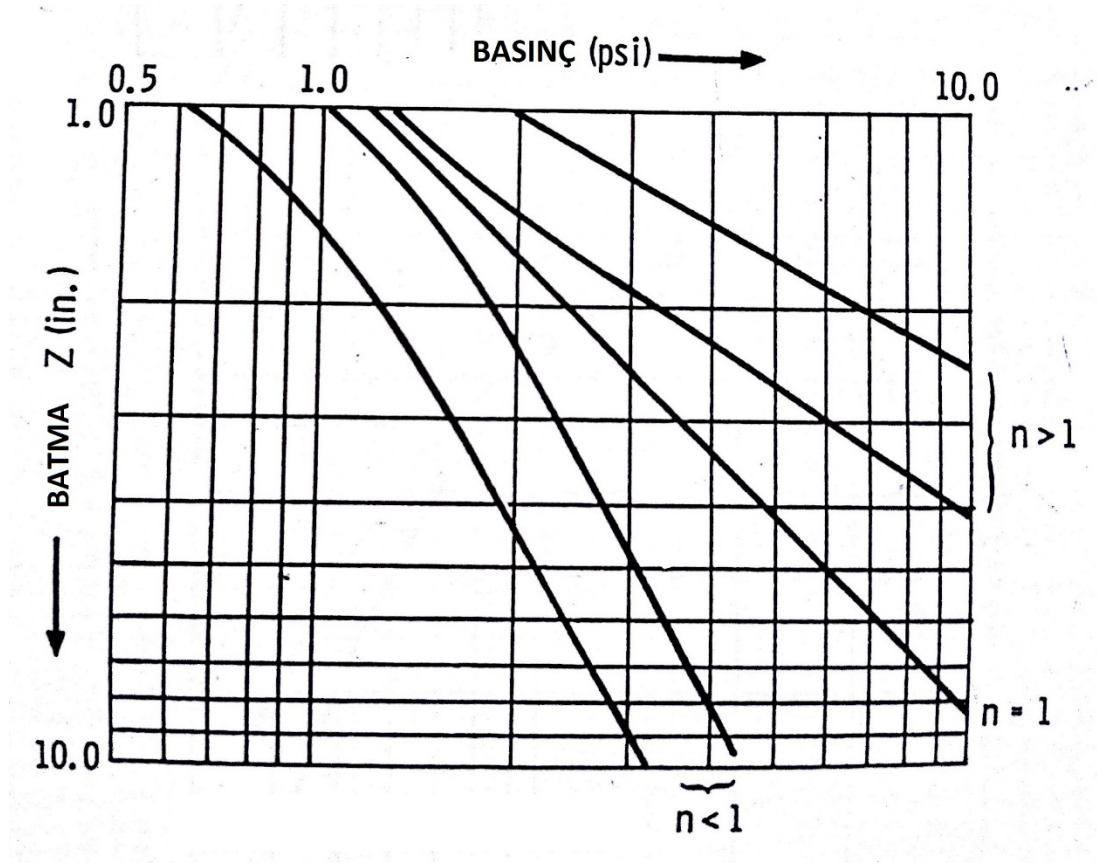
Şekil 2.16 : Tekerlek çapının temas yüzeyine etkisi (Wong, 2001).

Bekker tekerlek ile toprak temas yüzeyini düz bir dikdörtgen levha olarak kabul ederek, tekerlek genişliğini de hesaba katarak Bernstein-Goriatchkin modelini geliştirmiştir. Tekerlek genişliğini hesaba katmak için Bernstein-Goriatchkin modelindeki k parametresini iki farklı parametreye ayırmıştır. Bunlar, k_c (kohezyon modülü) ve k_ϕ (sürtünme modülü)' dir. Bekker, topraktaki normal basınç ile batma arasındaki ilişkiyi de aşağıdaki şekilde kurmuştur.

$$\sigma = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (2.18)$$

Kohezyon modülü, toprak tanelerinin arasındaki kohezyon kuvvetleri nedeniyle toprağın sahip olduğu taşıma kapasitesi faktörünü ifade eder. Sürtünme modülü ise; toprak tanelerinin birbirleri arasındaki sürtünme özellikleri nedeniyle toprağın sertliğini ifade etmektedir.

Normal yük-batma testlerinden elde edilen grafikler, toprağın homojenliği ve sertliği hakkında bilgi verirler. Bunun yanında toprağın sıkıştırılabilirliğinin bir göstergesidirler.



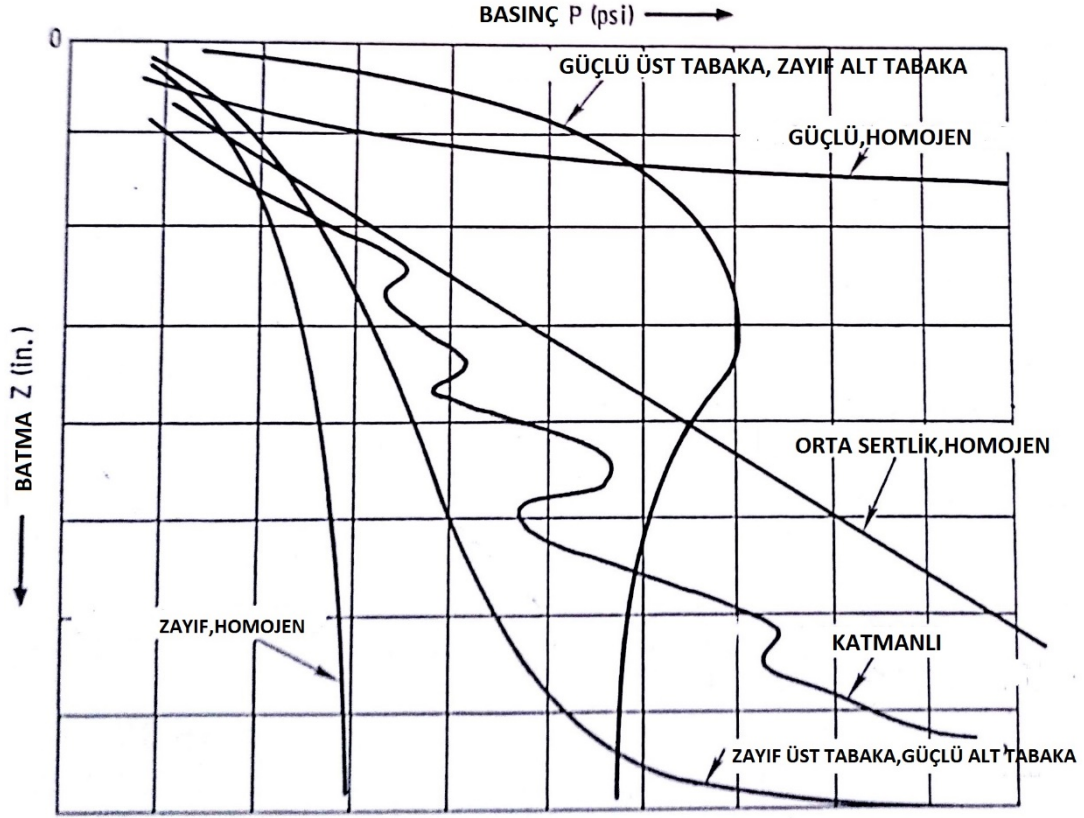
Şekil 2.17 : Logaritmik skalada, çeşitli homojen topraklarda aynı plaka ile yapılan basınç-batma testi sonuçları (Bekker, 1969).

Sıkıştırılabilen topraklarda ($n < 1$) basınç, batma ile yumuşak bir artış gösterirken; sıkışamayan daha sert topraklarda ($n > 1$) basınç, batma ile çok hızlı bir artış gösterir (Bekker, 1960). Birçok arazide toprak homojen özellik göstermediğinden, basınç-batma grafiği Şekil 2.17’de görüldüğü gibi çıkmamaktadır. Homojen olmayan topraklarda aynı plaka ile yapılan testlerden elde edilen sonuçların bir grafiği Şekil 2.18’ de gösterilmektedir.

Homojen olmayan toprakların gösterdiği basınç-batma karakteristiği nedeniyle, Bevameter ile yapılan testlerde en az iki farklı plaka kullanılır. Daha hassas sonuç vermesi açısından bazı durumlarda üç plaka da kullanılabilir. Sadece homojen kuru kum ile yapılan testlerde tek plaka yeterli olabilmektedir.

Denk. 2.18 kullanılarak batma miktarının basınç ile ilişkisi çıkarılırsa Denk. 2.19 elde edilir.

$$z = \left[\frac{p}{\frac{k_c}{b} + k_\phi} \right]^{1/n} \quad (2.19)$$



Şekil 2.18 : Farklı tipteki toprakların aynı plaka ile basınç-batma testi sonuçları (Bekker, 1969).

Denk. 2.19 incelendiğinde; aynı temas yüzeyi basıncına sahip iki tekerlek düşünüldüğünde, geniş temas yüzeyine sahip tekerlek dar temas yüzeyli olana göre daha çok batmaktadır. Bu ilginç özellik hem teorik olarak görülebilmekte, hem de sahada yapılan testlerden çıkan sonuçlarda görülebilmektedir. Geniş basma yüzeyli tekerleğin daha çok batmasının nedeni; teorik bir yaklaşımla, toprağın sıkışabilme özelliğine bağlanabilir. Geniş temas yüzeyine sahip toprak, daha büyük bir hacmi sıkıştırmaya çalışacaktır. Toprak taneleri arasındaki boşluklar düşünüldüğünde, ne kadar büyük hacimde toprak var ise o kadar tanecikler arası boşluk var denebilir. Fakat bu teoriye ters düşen bir düşünce de tanecikler arası sürtünmenin varlığıdır. Daha çok toprak hacmi, birbiriyle sürtünen tanecik sayısını da arttıracaktır. Sürtünen tanecik sayısının artması, deformasyona karşı olan direncin de artmasını sağlayacaktır. Birbirine ters düşen bu iki teori nedeniyle geniş basma yüzeyine sahip tekerleğin neden daha çok battığı tam olarak açıklanamamaktadır. Örnek olarak, aynı toprak koşullarında yapılan iki testte $k_c=30$, $k_\phi=1$ ve $n=1$ alınarak 10 in genişliğinde paletlere sahip bir araç, temas yüzeyi basıncı 10 psi olacak şekilde test edildiğinde 2,5 in batma göstermektedir. Tasarımcılar için fazla görülen batma değerini azaltmak

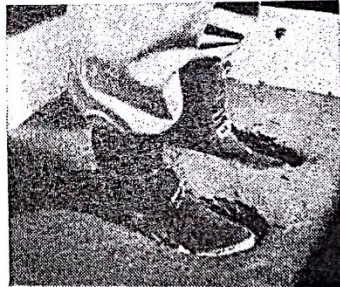
için tasarım değişikliğine gidilerek palet genişliği 30 in yapılır ve temas yüzeyi basıncı 7,5 psi olduğu kabul edilir ise, batma miktarında azalma beklenirken artma meydana gelmektedir.

$$z_{10} = \frac{10}{30/10 + 1} = 2,5 \text{ in}$$

$$z_{30} = \frac{7,5}{30/30 + 1} = 3,75 \text{ in}$$

Eğer $n=1/2$ olan daha yumuşak toprak ile test yapılır ise, aradaki fark daha da çoğalacaktır. Bu örnekten görüldüğü üzere basınç-batma ilişkisi basit bir ilke ile belirlenememektedir.

Toprak parametrelerinin atmosfer şartlarından da etkilenmesi, basınç-batma ilişkisinin daha da karmaşık bir hale getirmektedir. Topraktaki nem miktarının artması toprağı yumuşattığı gibi, soğuk havalarda donan nem toprağın sertleşmesine de yol açabilmektedir. şekil 2.19' da kumlu balçıktan oluşan bir topraktaki nem miktarının, toprak parametrelerine ve toprağın davranışına etkisi gösterilmektedir.



A	B	C
Nem Yüzdesi 22%	Nem Yüzdesi 20%	Nem Yüzdesi 19%
ϕ _____ 36°	ϕ _____ 38°	ϕ _____ 36°
c _____ 0.25	c _____ 0.53	c _____ 0.60
$k \phi$ _____ 2.2	$k \phi$ _____ 7.0	$k \phi$ _____ 9.0
$k c$ _____ 2.5	$k c$ _____ 16	$k c$ _____ 20
n _____ 0.18	n _____ 0.17	n _____ 0.16

şekil 2.19 : Nem yüzdesinin toprağın parametrelerinde ve davranışında etkisi (Bekker, 1960).

Görüldüğü üzere toprağın nem yüzdesindeki ufak bir artış, toprağın parametrelerinde oldukça fazla değişmeye yol açmaktadır. Toprağın davranışının bu derece değişmesi nedeniyle, toprağın kayda değer bir deformasyona uğramadan taşıyabileceği

maksimum yükü ifade eden taşıma kapasitesi özelliği incelenmiştir. Taşıma kapasitesi, inşaat mühendisliği alanında yapılan çalışmalarda daha çok rol oynamaktadır. Tekerlek ile toprak etkileşiminde çoğunlukla toprağın aşınma kapasitesi aşılmaktadır. Fakat inşaat mühendisleri daha çok statik ve büyük yüklerle çalıştığından toprağın bu özelliği ile daha ilgilidirler.

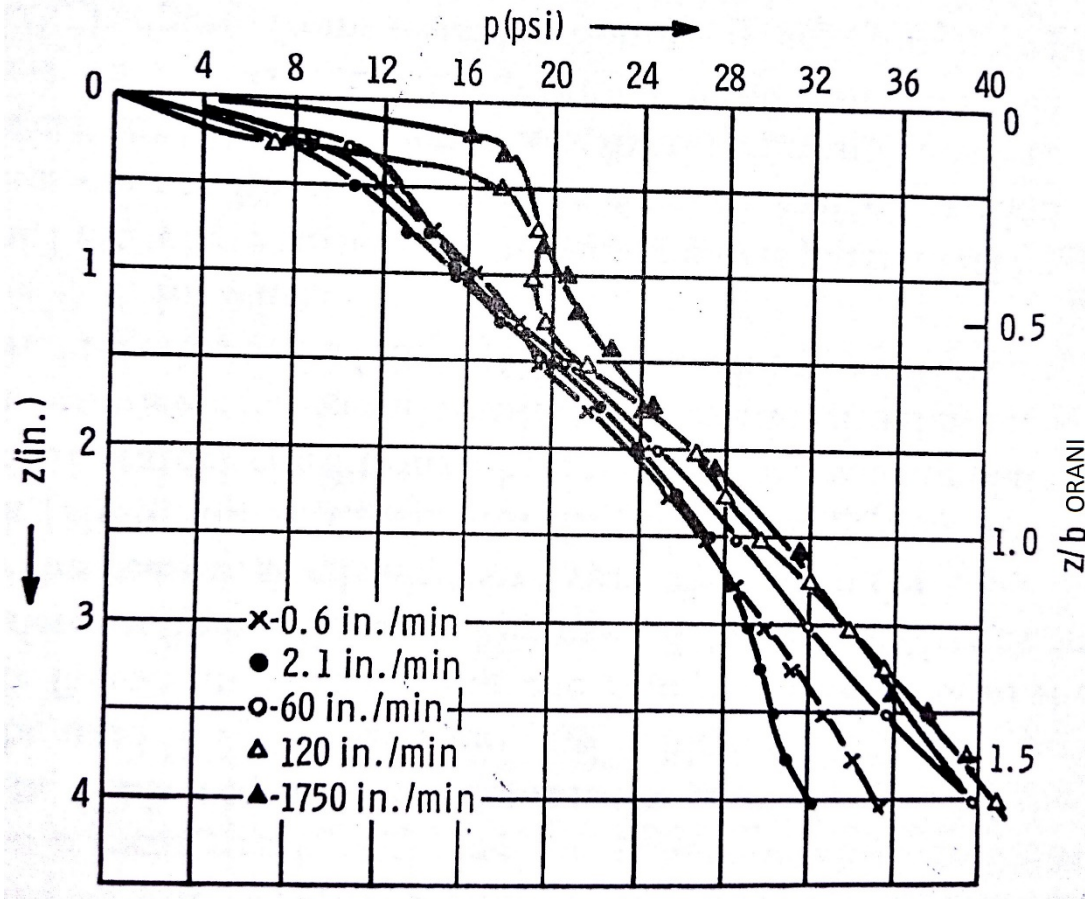
2.3.1 Deformasyon hızının batmaya etkisi

Çok yumuşak topraklar düşünüldüğünde, hareket direncinin çok fazla olması nedeniyle araç hızı oldukça yavaştır. Bu nedenle deformasyon hızının etkisi çok azdır ve ihmal edilir. Ancak sert topraklarda ulaşılabilecek yüksek hızlara çıkıldığında ise, deformasyon hızı basınç-batma ilişkisini az bir oranda etkilemeye başlar.

Sert bir arazide yapılan testlerde, deformasyon hızı 25 cm/sn olduğunda bevameter cihazının oluşturduğu basınç-batma grafiklerinde ihmal edilebilecek bir değişiklik olmuştur. Deformasyon hızlarının 75 cm/sn civarına çıkarılmasıyla ancak pratikte etkili olan değişiklikler ölçülebilmektedir. Farklı deformasyon hızları ile oluşan basınç-batma grafikleri Şekil 2.20' de gösterilmektedir.

Şekil 2.20' deki grafikten görüldüğü üzere düşük basınçlarda (batmanın ilk başlangıcı) deformasyon hızı oldukça etkili olmaktadır. Fakat düşük batma değerlerinde bu şekil bir etkinin olması pratikte önemli olmamaktadır. Bunun nedeni, tekerlek-toprak etkileşiminde batma değerleri yüksektir. Ayrıca basınç arttıkça deformasyon hızının batmaya etkisi azalmaktadır (Bekker, 1956).

Islak ve doymuş topraklarda deformasyon hızı, viskoz ve hidrodinamik etkilerden dolayı farklı olabilir. Fakat bu konuda yapılan testlerde kesin sonuca ulaşmak mümkün değildir. Deformasyon hızı 5 cm/sn ile 12,5 cm/sn olan testlerde basınç-batma ilişkisinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. Bu nedenle deformasyon hızı etkisi, pratikte tüm toprak türlerinde ihmal edilmektedir. Yumuşak toprakta hızlar yavaş olduğu için bu etkiden söz edilmez, sert toprak türlerinde de etkisi çok fazla değildir. Ayrıca bu etki ihmal edilse dahi hesaplarda emniyetli tarafta kalınır. Bunun nedeni, deformasyon hızı arttıkça toprağın sertleşmesi ve daha az batma meydana getirmesindendir. Bu etki ihmal edildiğinde, batma normalde olacaktan daha fazla olur. Buda hesaplarda emniyet faktörü oluşturur.



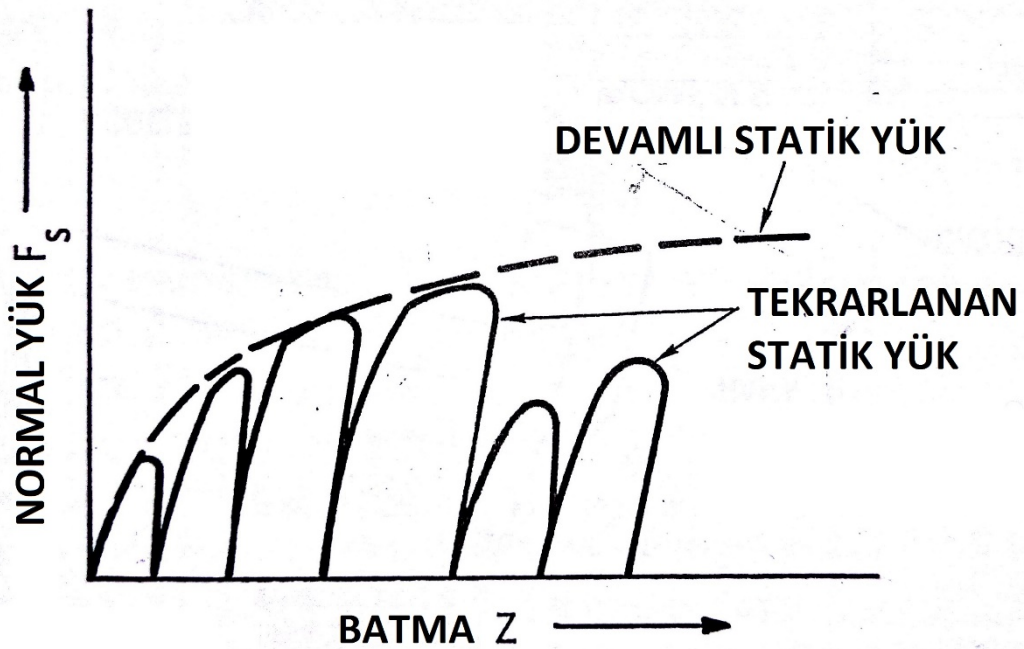
Şekil 2.20 : Basınç-Batma ilişkisinin deformasyon hızı ve basınç ile değişimi (Bekker, 1969).

2.3.2 Tekrarlanan basınç durumunda toprağın davranışı

Tekerlekli araçların arazi ile etkileşiminde ön aksın ve arka aksın aynı noktadan geçmesi nedeniyle tekrarlanan basınç durumu ortaya çıkar. Bu etkinin toprak üzerindeki etkisini anlamak için toprak parametrelerinin ölçülmesinde kullanılan bevameter cihazı, tekrarlanan basınç oluşturacak şekilde geliştirilerek farklı deformasyon hızları ile toprağa tekrarlanan basınç uygular. Test sonuçlarından elde edilen veriler doğrultusunda çizilen basınç-batma grafiği Şekil 2.21' de gösterilmiştir.

Şekil 2.21' deki grafikte kesikli çizgi ile belirtilen eğri, bevameter cihazı ile yapılan klasik devamlı yükleme testinin sonucunu göstermektedir. Kesiksiz olarak gösterilen eğriler ise, tekrarlanan yükün etkisini göstermektedir. Grafikten anlaşıldığı üzere tekrarlanan basınç durumunda, ikincil yüklemelerde, devamlı statik yük sınırına ulaşmadan dahi batma oluşmaktadır. Bunun anlamı, tekrarlanan statik yük durumunda, uygulanan her kuvvet için devamlı statik yük grafiği oluşturulabilir (Bekker, 1956). Ancak bunun için tek şart, uygulanan yük plastik akış eşiğini

geçmek zorundadır. Plastik akış eşiğini geçmeyen yüklerde, grafikte gösterilen son iki yükleme durumu ortaya çıkar.



Şekil 2.21 : Tekrarlanan statik yükleme durumunda toprağın davranışı (Bekker, 1969).

2.3.3 Rijit lastik-toprak etkileşiminde basınç-batma ilişkisi

Toprak tekerleğin etkileşimini ilk çalışan araştırmacılar, tarım araçlarının hareketini incelemekteydi. Bu etkileşimin incelendiği ilk yıllarda tarım araçlarında pnömatis (havalı) lastik bulunmamaktaydı. Bu nedenle, araştırmacıların çalışmaları rijit tekerleğin yumuşak bir hacimdeki hareketi üzerine oluşmuştur. Toprağı z_0 kadar derinliğe batırırken, aynı zamanda temas yüzey boyunca toprağı z_0 kadar sıkıştırmış olur. Bu yaklaşım ile Bekker' in basınç batma ifadesini de kullanarak toprağı sıkıştırmak için birim alanda yapılan işi ifade edersek (Bekker, 1960):

$$L = \int_0^{z_0} p dz = \int_0^{z_0} \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n dz = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \frac{z_0^{n+1}}{n+1} \quad (2.20)$$

Toprağın düşey yönde hareket eden bir tekerleğin çevresi ile sıkıştırıldığını düşünürsek; birim alanda yapılan iş L , tekerlek merkezinden etkiyen çekiş kuvvetine karşı koyan yuvarlanma direnci R_c ' ye eşit olur. Yuvarlanma direnci toprak için sıkışma direnci olarak da adlandırılır. Tekerleğin yuvarlandığı mesafe l ve lastik

genişliği b ise; çekiş kuvvetinin yaptığı iş $R_c l$, toprak sıkışmasının yaptığı iş ise Lbl olur.

$$R_c l = Lbl \quad (2.21)$$

Sıkışma direnci ise;

$$R_c = Lb \quad (2.22)$$

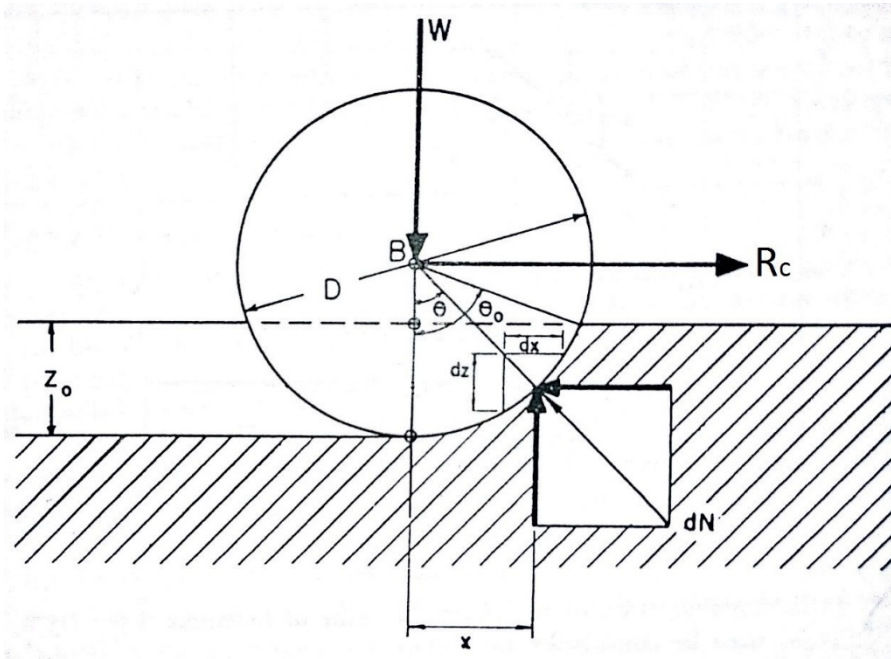
$$R_c = b \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \frac{z_0^{n+1}}{n+1} \quad (2.23)$$

olur.

Tekerlek üzerinde W kuvveti ile z_0 derinliğe batmaya zorlanırken, R_c sıkışma direnci kuvvetine maruz kalır. N toprak tarafından tekerleğe uygulanan reaksiyon kuvveti olsun ve yuvarlanmaya direnç gösteren dN kuvvetlerinden oluşsun. Şekil 2.22’de gösterilen şemadan kuvvet dengeleri kurulur ise:

$$R_c - \int_0^{\theta_0} dN \sin \theta = 0 \quad (2.24)$$

$$-W + \int_0^{\theta_0} dN \cos \theta = 0 \quad (2.25)$$



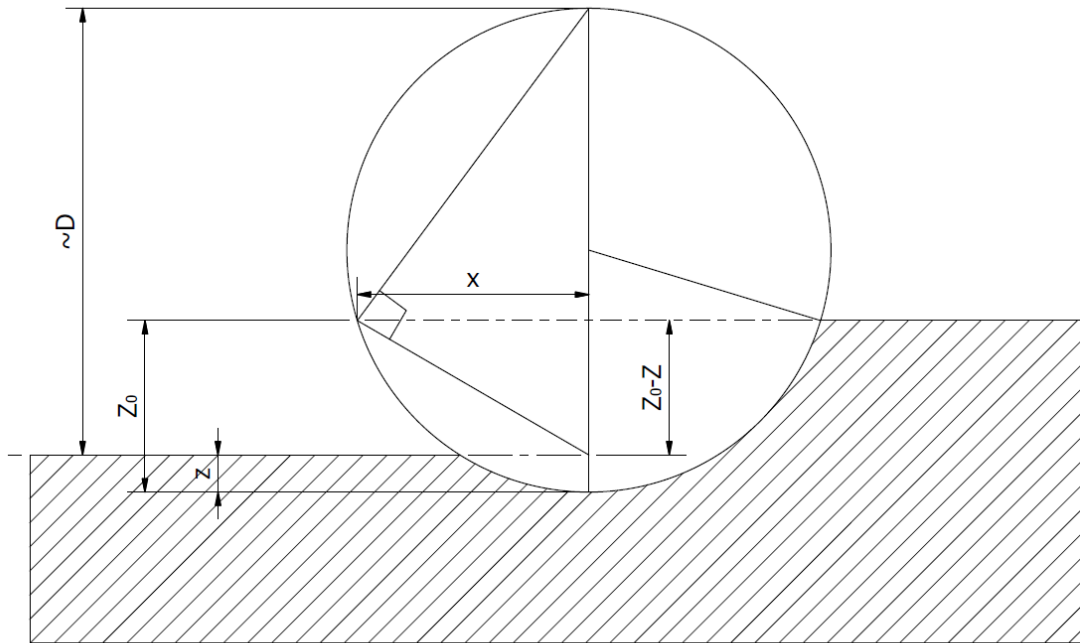
Şekil 2.22 : Toprak ile etkileşimde tekerleğe etki eden kuvvetler (Bekker, 1956).

$$\begin{aligned} dN \cos \theta &= -p b dx \\ dN \sin \theta &= p b dz \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$dN \sin \theta = p b dz$$

$$R_c = \int_0^{z_0} p b dz \quad (2.27)$$

$$W = - \int_0^{z_0} p b dx \quad (2.28)$$

$$W = -b \int_0^{z_0} \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n dx \quad (2.29)$$


Şekil 2.23’ de gösterilen temas yüzeyinde z , lastiğin temas yüzeyindeki deformasyonudur. Lastiğin çapına göre küçük bir değerdir (Wong, 2001). Tekerleğin toprak ile temasa başladığı noktanın tekerleğin merkezine uzaklığı x ve topraktan

ayrıldıktan sonraki toprak yüzeyi ile tekerleğin en üst noktası arasındaki fark yaklaşık olarak D kabul edilirse (z ihmal edilebilecek kadar küçüktür) basit bir Öklid bağıntısı ile x :

$$x^2 = [D - (z_0 - z)](z_0 - z) \quad (2.30)$$

şeklinde ifade edilir. Çok derin olmayan batmalarda denklem yeniden düzenlenirse Denk. 2.31 elde edilir.

$$x^2 = D(z_0 - z) \quad (2.31)$$

$$x = \sqrt{D(z_0 - z)} \quad (2.32)$$

$$2x dx = D dz$$

Denk. 2.31 ve Denk. 2.32, Denk 2.29 ' da kullanılırsa Denk. 2.33 elde edilir.

$$W = -b \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \int_0^{z_0} \frac{z^n \sqrt{D}}{2\sqrt{z_0 - z}} dz \quad (2.33)$$

$z_0 - z = t^2$ dönüşümü yaparsak ve $dz=2t dt$ olarak denklemde kullanırsak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$W = -b \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \sqrt{D} \int_0^{\sqrt{z_0}} (z_0 - t^2)^n dt \quad (2.34)$$

$(z_0 - t^2)^n$ ifadesi seri açılır ve sadece ilk iki terimi kullanılırsa W , batma miktarı z_0 cinsinden ifade edilir. Denk. 2.35 kullanılarak batma miktarı z_0 , Denk. 2.36' da gösterildiği üzere elde edilir.

$$W = \frac{b \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \sqrt{z_0 D}}{3} z_0^n (3 - n) \quad (2.35)$$

$$z_0 = \left[\frac{3W}{b(3 - n) \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \sqrt{D}} \right]^{(2/(2n+1))} \quad (2.36)$$

Aynı şekilde Denk. 2.27 ifadesi de düzenlenirse yuvarlanma direnci R_c , Denk. 2.39' da gösterildiği gibi yazılabilir.

$$R_c = b \int_0^{z_0} \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n dz \quad (2.37)$$

$$R_c = b \left[\left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \frac{z_0^{n+1}}{n+1} \right] \quad (2.38)$$

$$R_c = \frac{1}{(3-n)^{(2n+2)/(2n+1)}(n+1)b^{1/(2n+1)}\left(k_c/b + k_\phi\right)^{1/(2n+1)}\left[\frac{3W}{\sqrt{D}}\right]^{(2n+2)/(2n+1)}} \quad (2.39)$$

$(z_0-t^2)^n$ ifadesinin seri açılımında ilk iki terim kullanıldığından $n=3$ olduğunda direnç sonsuza gider. Ayrıca denklemin en hassas olduğu nokta $n=1,3$ noktasıdır. Seri açılımda daha çok terim kullanılırsa sonuç daha hassas olmaktadır.

Sıkışma direnci, tekerleğin hareketine karşı koyan yuvarlanma direnci görevi görür. Eğer denklemler incelenirse, arazi taşıtı tasarımında sıkışma direncini azaltmak isteyen bir tasarımcı için lastiğin çapını artırmak, genişliğini artırmaktan daha etkilidir. Bunun nedeni lastik çapı D , denkleme lastik genişliği b' ye göre daha yüksek bir üs ile girmektedir.

Bekker' in oluşturduğu denklemler, geometrik varsayımlara oldukça bağımlı olduğundan orta dereceli batma değerlerinde ($z_0 < D/6$) kabul edilebilir hassaslıkta sonuç vermektedir. Lastik ne kadar büyük ve batma ne kadar az ise sonuçlar o kadar hassastır. Ayrıca daha önce de bahsedildiği gibi temas yüzeyi, lastik çapı küçüldükçe görece dikdörtgen şeklini kaybettiği için hassaslık bozulmaktadır. Bu nedenle çapı 50 cm'den az olan tekerleklerde kullanılması uygun değildir (Wong, 2001).

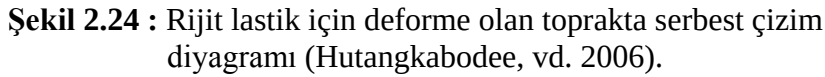
Basıncın batma derinliği ile olan ilişkisi Bekker'in yöntemi kullanılarak analitik düzenlenirse, radyal basınç değerleri elde edilebilir. Radyal basınçlar ileride anlatılacak olan topraktan alınacak çekişin hesaplanmasında kullanılacaktır. Şekil 2.24'de rijit bir lastiğin temas yüzeyi şematik olarak gösterilmiştir. Temas yüzeyi iki bölgeye ayrılarak basınç hesabı yapılmaktadır. Temas yüzeyinin ikiye ayrıldığı nokta, θ_m açısı ile ifade edilir. Bu nokta, V hızı ile hareket eden bir lastiğin temas yüzeyinde maksimum basıncın olduğu noktadır. Yapılan deneyler neticesinde hareket eden bir lastiğin temas yüzeyinde maksimum basınç, en alt noktanın biraz önünde bulunmaktadır. Bu açı nedeniyle hareket direnci meydana gelmektedir.

θ_1 ve θ_2 açıları ile belirtilen noktalar lastiğin toprağa giriş açısı ve çıkış açısıdır. Giriş açısı, lastikteki batma daha önceden hesaplanabildiği için batma miktarına bağlı olarak Denk.2.40 kullanılarak bulunabilir (Hutangkabodee, vd. 2006).

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{Z}{r}\right) \quad (2.40)$$

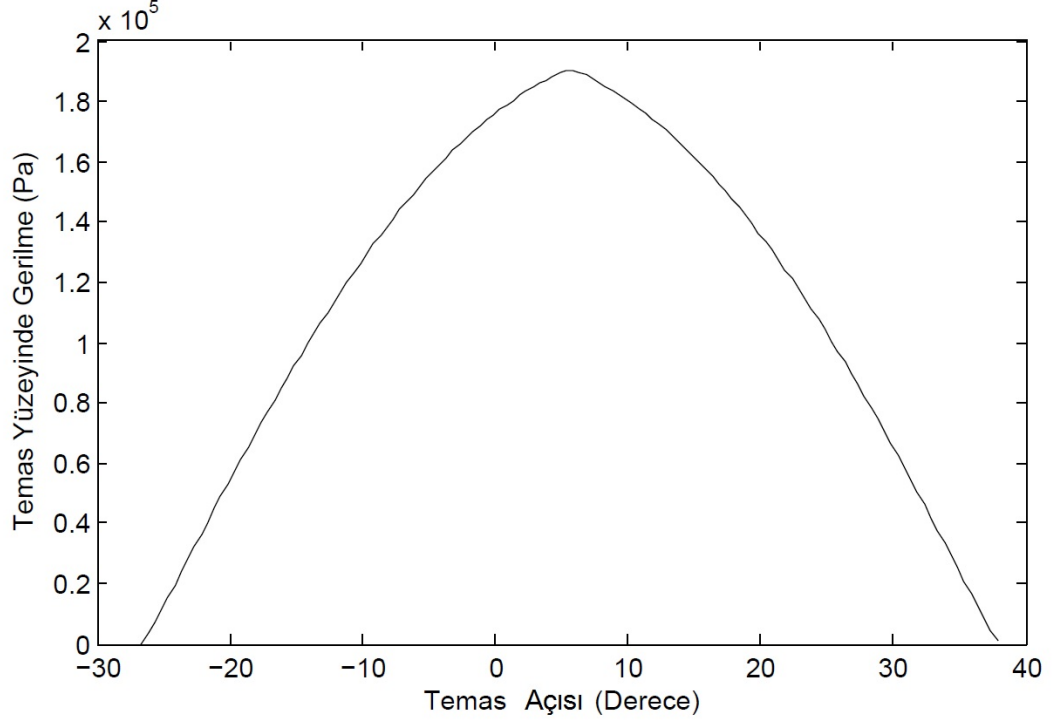
Tekerleğin topraktan çıkış hızı ise, tekerlek batma oranı K kullanılarak yaklaşık olarak bulunur.

(2.41)


$$\theta_m = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (2.42)$$
$$z(\theta) = r(\cos\theta - \cos\theta_1) \quad (2.43)$$
$$\sigma(\theta) = \begin{cases} \sigma_1(\theta), \theta_m < \theta < \theta_1 \\ \sigma_2(\theta), \theta_2 < \theta < \theta_m \end{cases} \quad (2.44)$$

(2.45)

$$\sigma_2(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \left\{ r \left[\cos \left(\theta_1 - \frac{(\theta - \theta_2)}{(\theta_m - \theta_2)} (\theta_1 - \theta_m) \right) - \cos \theta_1 \right] \right\}^n \quad (2.46)$$

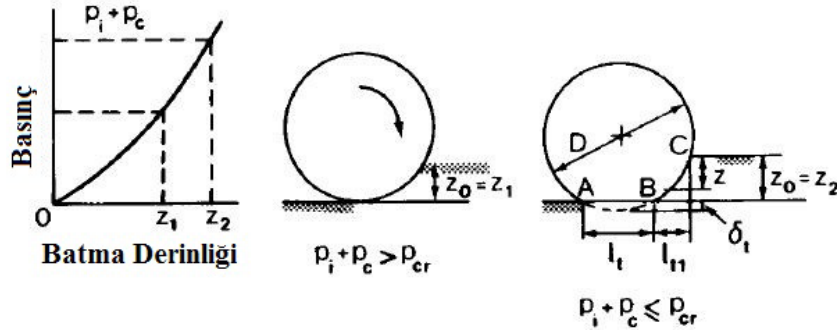


Şekil 2.25 : Rijit lastikte temas yüzeyinde temas açısına bağlı gerilme dağılımı.

Şekil 2.25’de Denk. 2.45 ve 2.46 ile hesaplanan örnek bir gerilme dağılımı gösterilmektedir. Maksimum basınç grafikte de görüldüğü üzere temas yüzeyinin en alt noktası olan 0’de değil, tekerleğin biraz daha önünde oluşmaktadır. Topraktan alınan çekiş kuvveti lastik ile toprak temas yüzeyinde oluşur ve normal basınca bağlıdır. Bu denklemler ilerde anlatılacak olan çekiş kuvvetinin bulunması için kullanılacaktır.

2.3.4 Elastik lastik-toprak etkileşiminde basınç-batma ilişkisi

Lastik toprak etkileşiminde önemli olan bir nokta da, lastiğin pnömatik olması durumunda ve lastiğin şişirme basıncının yetersiz kalması durumunda, lastik-toprak temas yüzeyindeki bir bölgenin deforme olarak düz bir hale gelmesidir. Buna lastiğin elastik davranışı denebilir. Ancak lastiğin belli bir bölümü deformasyona uğrayarak düzleşse bile kalan kısmı rijit lastik gibi davranarak yük taşımaya devam eder (bkz. Şekil 2.26). Bu durumda hesaplamalarda daha karmaşık yaklaşımlara gitmek gerekir.



Şekil 2.26 : Pnömatik lastiğin rijit ve elastik çalışma durumunda davranışı (Wong, 2001).

Şekil 2.26’da gösterildiği üzere lastiğin A-B bölümü deformasyona uğrayarak düzleşmiştir. Bunun yanında B-C bölümü dairesel formunu koruyarak rijit lastik gibi düşünülebilmektedir. Lastiğin A-B bölümünün deforme olması, bu bölgede toprağın p_g basıncını sağlayacak kadar güçlü olduğunu gösterir. Bu basın p_i şişirme basıncı ile p_c lastik karkasının gerginliğinden dolayı oluşan basıncın toplamıdır. Karkas gerginliği basıncı p_c ; lastiğin yapısal özelliklerine, et kalınlığına, lastik dişlerine bağlı bir parametredir. Lastiğin rijit kalması için, $p_i + p_c$ basıncının, lastiğin en alt noktasında toprağın taşıyabileceği maksimum p_g basıncından büyük olması gerekmektedir. Bu durumda lastik dairesel formunu korur. Aksi takdirde lastik deforme olarak bu yüzeyde toprağın uyguladığı basınç $p_i + p_c$ olana kadar deforme olarak temas yüzeyini artırır (Wong, 2001).

Deforme olabilen bir malzeme olan toprak üzerinde lastiğin davranışını belirlemek gerekir. Lastik üzerindeki yüke ve şişirme basıncına göre elastik ve ya rijit davranabilir. Lastiğin davranışını belirlemek için önceden bahsedildiği gibi lastiğin rijit olması durumunda; lastiğin en alt noktasında, toprağın taşıyabileceği maksimum basıncı hesaplamak gerekir. Bu basınç Bekker’in basınç-batma ilişkisi denkleminde bulunabilir:

$$p_g = \left[\frac{k_c}{b} + k_\phi \right] z_0^n \quad (2.47)$$

Bu ifade, daha önce rijit lastikte batma miktarı ifadesi olan Denk. 2.36 ile birleştirilirse:

$$p_{g,kr} = \left[\frac{k_c}{b} + k_\phi \right]^{1/(2n+1)} \left[\frac{3W}{(3-n)b\sqrt{D}} \right]^{2n/(2n+1)} \quad (2.48)$$

Elde edilen Denk. 2.48 ifadesi kritik basınç olarak da adlandırılır. Lastiğin elastik davranışında temas yüzeyindeki basınç, l_t uzunluğu boyunca sabit olup $p_i + p_c$ basıncına eşittir. Bu basınç bilindiğine göre Bekker'in basınç-batma ilişkisi de kullanılarak topraktaki batma miktarı aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$p_g = \left[k_c/b + k_\phi \right] z_0^n$$

$$z_0 = \left(\frac{p_i + p_c}{k_c/b + k_\phi} \right)^{1/n} \quad (2.49)$$

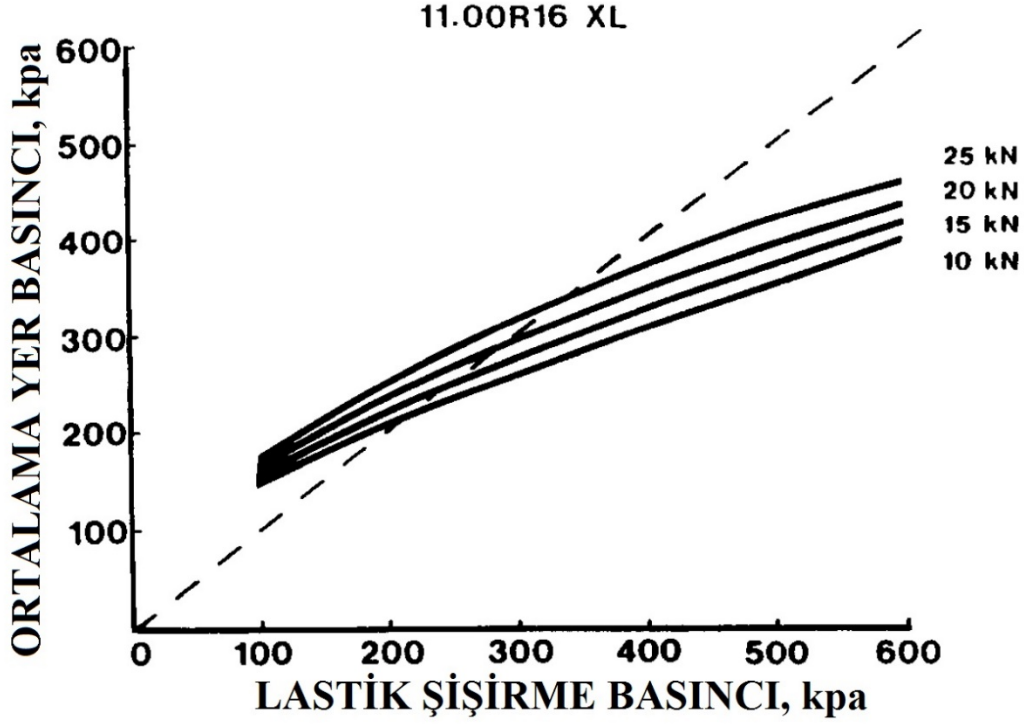
Hareket direnci için de Denk. 2.49, Denk 2.38 içinde kullanılırsa Denk. 2.50 elde edilir.

$$R_c = \frac{b(p_i + p_c)^{n+1/n}}{(n+1) \left(k_c/b + k_\phi \right)^{1/n}} \quad (2.50)$$

Lastik karkasının, gerginliğinden dolayı sahip olduğu basınç p_c , ayrı olarak elde etmesi zor bir değerdir. Bunun nedeni, lastiğin üzerindeki yük ve şişirme basıncı ile değişmesidir. Bu nedenle Bekker, alternatif olarak lastik ortalama yer basıncı p_{gr} ifadesini kullanmıştır (Bekker, 1960). Ortalama yer basıncı, belirli bir lastik için üzerinde taşıdığı yüke ve şişirme basıncına bağlı olarak elde edilen bir basınçtır ve ancak her lastik için test yapılarak bulunabilir. Genel olarak ortalama yer basıncı, lastik üreticileri tarafından genelleştirilmiş deformasyon grafiklerinden elde edilebilir. Michelin 11.00R16 XL için hazırlanmış deformasyon grafiği Şekil 2.27' de gösterilmektedir. Ortalama yer basıncı ile Denk. 2.49 ve Denk. 2.50 düzenlenirse Denk. 2.51 ve Denk. 2.52 elde edilir.

$$z_0 = \left(\frac{p_{gr}}{k_c/b + k_\phi} \right)^{1/n} \quad (2.51)$$

$$R_c = \frac{b p_{gr}^{n+1/n}}{(n+1) \left(k_c/b + k_\phi \right)^{1/n}} \quad (2.52)$$



Şekil 2.27 : Ortalama yer basıncının şişirme basıncı ve düşey yük ile değişimi (Wong, 2001).

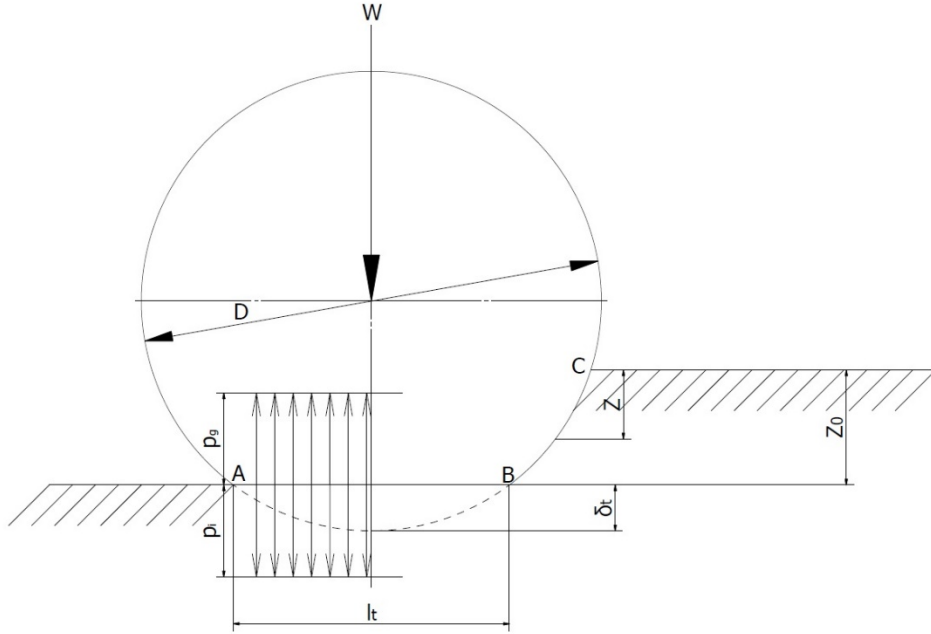
Lastiğin elastik davranışını modelleyerek, toprak üzerindeki davranışını hesaplamak için öncelikle düşey yük eşitliğinin oluşturulması gerekmektedir. Şekil 2.28’de görüldüğü üzere tekerleğe etkiyen W , lastiğin deforme olan düz A-B bölgesinde p_{gr} ortalama yer basıncı ile desteklenirken lastiğin eğimli B-C bölgesinde değişken basınç ile desteklenir. Lastiğin B-C bölgesi deforme olmadığından bu bölgede taşınan yük, rijit lastik yaklaşımı ile hesaplanabilir. Buradaki en önemli parametre deformasyon miktarı olan δ_t ’dir. Deformasyon miktarı, lastiğin düz olan l_t uzunluğunu etkilediğinden, yükün ne kadarının elastik bölümde, ne kadarının rijit bölümde taşındığının da bir göstergesi olmaktadır. Lastiğin A-B bölgesinin uzunluğunun, deformasyon miktarı değişimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$l_t = 2\sqrt{D\delta_t - \delta_t^2} \quad (2.53)$$

Elastik lastiğin performansını modellerken dikkat edilecek bir husus da Bekker’in basınç batma ilişkisinde kullanılan b lastik genişliğidir. Rijit lastikte b , temas yüzeyindeki en dar uzunluk olduğu için kullanılmaktaydı. Fakat elastik lastik düşünüldüğünde, belirli şartlar sağlandığında, A-B bölgesi uzunluğu l_t , lastik

genişliğinden daha küçük olabilir. Bu durumda lastik genişliği b yerine l_t kullanılmalıdır.

$$z_0 = \left(\frac{p_{gr}}{k_c/l_t + k_\phi} \right)^{1/n} \quad (2.54)$$



Şekil 2.28 : Yumuşak yüzeyde hareket eden pnömötik lastik.

Elastik lastiğin B-C bölgesinde taşınan düşey yükün hesaplanması için Denk. 2.33'ün değiştirilmiş bir versiyonu kullanılabilir (Wong, 2001).

$$W_{cu} = - \int_0^{z_0} p b dx = - b \left(\frac{k_c}{l_t} + k_\phi \right) \int_0^{z_0} \frac{z^n \sqrt{D}}{2 \sqrt{z_0 + \delta_t - z}} dz \quad (2.55)$$

$z_0 + \delta_t - z = t^2$ dönüşümü yapılır ve $dz = -2t dt$ yazılırsa;

$$W_{cu} = b \left(\frac{k_c}{l_t} + k_\phi \right) \sqrt{D} \int_{\sqrt{\delta_t}}^{\sqrt{z_0 + \delta_t}} (z_0 + \delta_t - t^2)^n dt \quad (2.56)$$

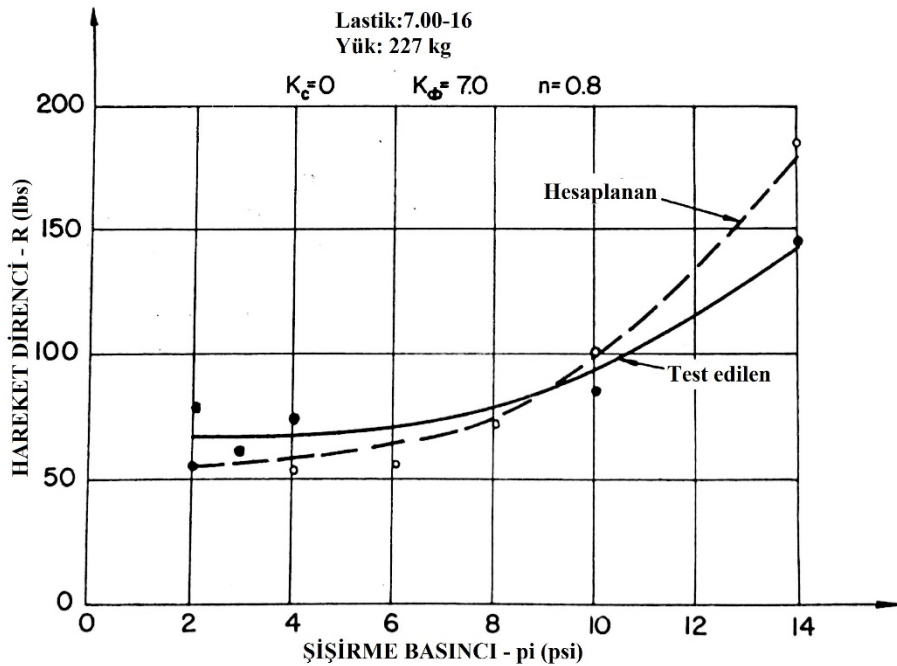
$(z_0 + \delta_t - t^2)^n$ ifadesi seri açılarak ilk iki terimi kullanılırsa:

$$W_{cu} = b \left(\frac{k_c}{l_t} + k_\phi \right) \sqrt{D} (z_0 + \delta_t)^{n-1} X \frac{[(3-n)(z_0 + \delta_t)^{3/2} - (3-n)\delta_t^{3/2} - 3z_0\sqrt{\delta_t}]}{3} \quad (2.57)$$

Lastiğin deforme olan kısmı ile deforme olmayan kısmının taşıdığı yükleri birleştirirsek elastik lastik için düşey yük eşitliği Denk. 2.58'de gösterildiği gibi yazılabilir.

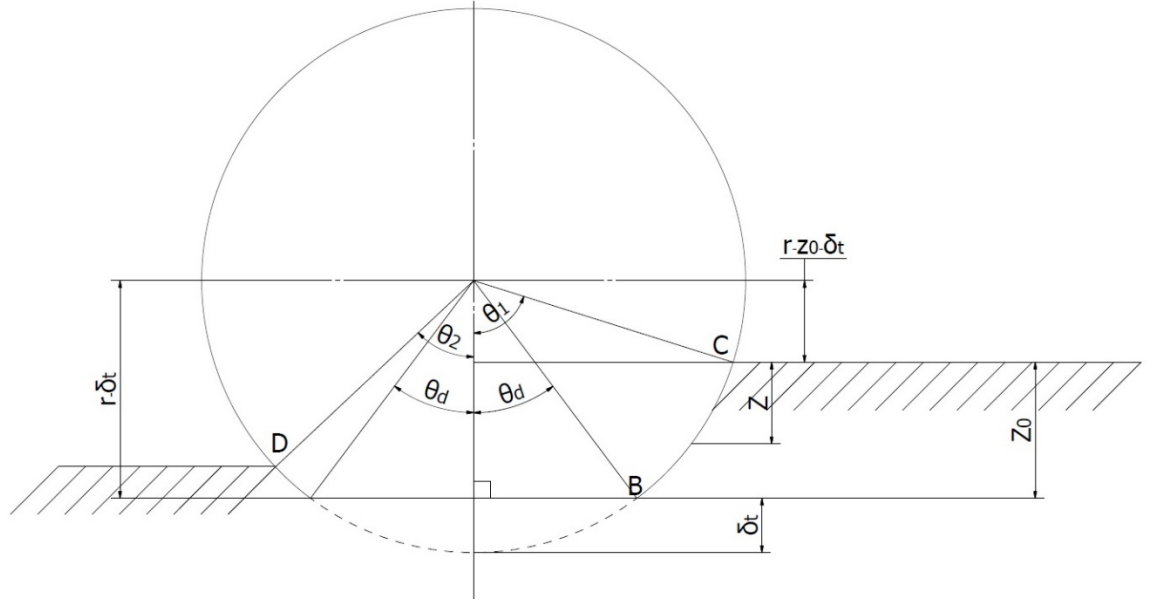
$$W = bp_{gr}l_t + W_{cu} \quad (2.58)$$

Tekerleğe gelen direnç kuvvetini, temas yüzeyi boyunca toprağı z_0 derinliğe batırmak için harcanan iş olarak tanımlamıştık. Tekerleği elastik olarak modellediğimizde, p_i ve p_c basınçlarının toplamı toprağın taşıyabileceği p_g basıncından az olduğunda lastik deformasyona uğrayarak temas yüzeyini artırır. Bunun sonucunda, temas yüzeyinde rijit lastiğe oranla daha az basıncın oluşmasına yol açar. Bu davranışın avantajı ise temas yüzeyinde daha az basınç olduğundan, tekerlekteki batma daha az olur. Batmanın daha az olması, toprağı sıkıştırmak için yapılan işi azaltacağından hareket direncinin daha az olması anlamına gelir. Bazı arazi araçlarının normal asfalttan araziye geçerken lastik basınçlarını düşürmeleri bu yüzdendir (Bekker, 1960). Lastik basıncını azaltmak $p_i + p_c$ basıncını azaltarak temas yüzeyinin daha çok genişlemesine neden olur. Buda daha düşük basınçlı temas yüzeyi ve daha az batma demektir. Şekil 2.29'da lastik şişirme basıncına bağlı hareket direnci grafiğı gösterilmektedir. Grafikte de görüleceğı üzere lastik basıncının artması, asfalt yolda yuvarlanma direncini azaltırken toprakta tam tersi artırmaktadır (Bekker, 1960).



Şekil 2.29 : Hareket direncinin lastik şişirme basıncı ile değişimi (Bekker, 1960).

Bekker'in basınç-batma ilişkisi kullanılarak hesaplanan batma değeri ve deformasyon değeri ile radyal gerilme, temas yüzeyinde θ açısına bağlı olarak bulunabilir.



Şekil 2.30 : Elastik lastik ile toprağın temas yüzeyi açıları.

Temas yüzeyi geometrisi kullanılarak deforme olan bölge ve tekerleğin toprak ile etkileşime girdiği açı ve topraktan ayrıldığı açı hesaplanır.

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{z_0 + \delta_t}{r}\right) \quad (2.59)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{K(z_0 + \delta_t)}{r}\right) \quad (2.60)$$

$$\theta_d = \cos^{-1}\left(1 - \frac{\delta_t}{r}\right) \quad (2.61)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (2.62)$$

Denklemden θ_m açısı daha önce rijit lastik için açıklanan maksimum radyal basıncın olduğu noktanın açısıdır. Bu noktalar, daha sonra anlatılacak olan topraktan alınabilecek çekiş kuvvetinin hesaplanması için kullanılacaktır. Temas yüzeyi açılarına bağlı olarak radyal gerilmenin temas yüzeyi açısına göre değişimi, daha önce rijit lastik için çıkarılan denklemlere benzerdir. Ancak elastik lastikte Şekil 2.30'da gösterilen temas yüzeyinde AB bölgesindeki basınç, ortalama yer basıncına eşit olduğundan denklemlerdeki sınırlar farklıdır.

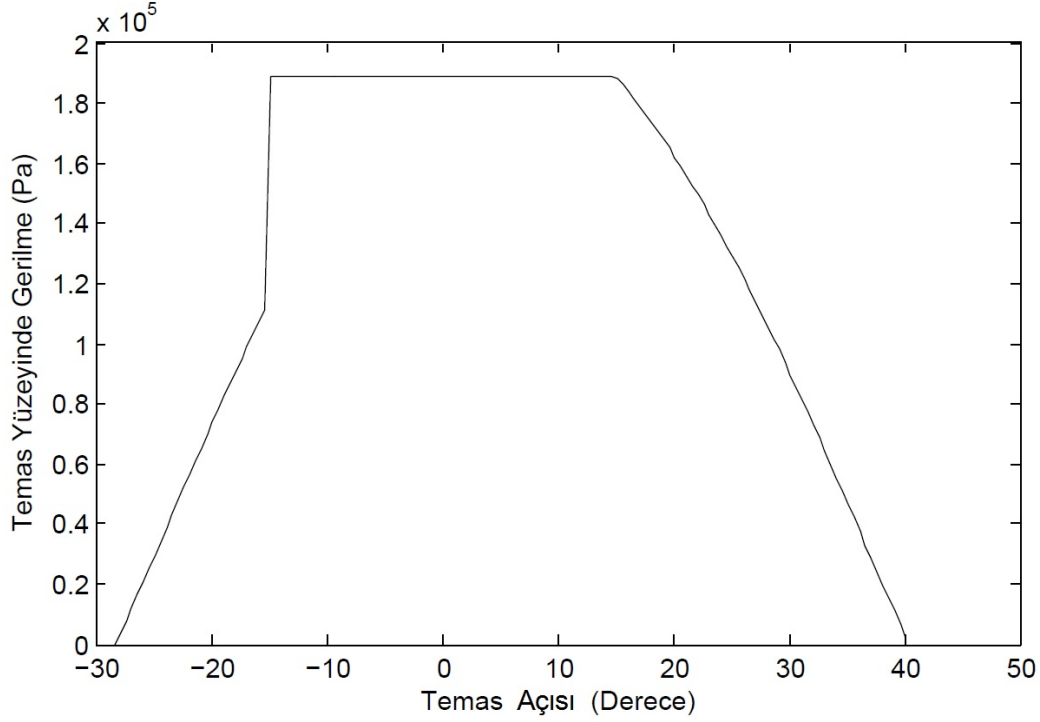
$$\sigma(\theta) = \begin{cases} \sigma_1(\theta), & \theta_d < \theta < \theta_1 \\ \sigma_2(\theta), & -\theta_d < \theta < \theta_d \\ \sigma_3(\theta), & \theta_2 < \theta < -\theta_d \end{cases} \quad (2.63)$$

$$\sigma_1(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right) [r(\cos\theta - \cos\theta_1)]^n \quad (2.64)$$

$$\sigma_2(\theta) = p_{gr} \quad (2.65)$$

$$\sigma_3(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \left\{ r \left[\cos \left(\theta_1 - \frac{(\theta - \theta_2)}{(\theta_m - \theta_2)} (\theta_1 - \theta_m) \right) - \cos \theta_1 \right] \right\}^n \quad (2.66)$$

AB bölgesi ortalama yer basıncına eşit olduğundan, bu bölgede temas yüzeyi basıncı sabittir. BC ve AD bölgeleri, rijit lastik lastikle aynı şekilde hesaplanabilir.



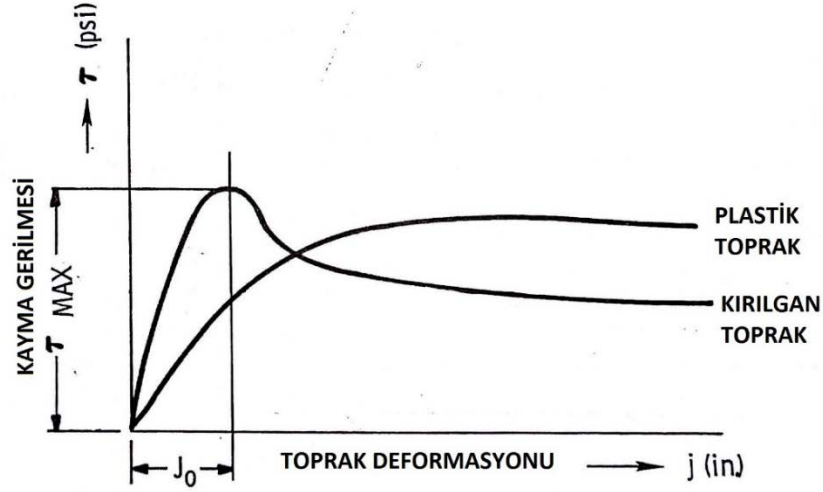
Şekil 2.31 : Elastik lastikte temas yüzeyindeki gerilme dağılımı.

Şekil 2.31’de elastik bir lastikte, Denk. 2.64, 2.65 ve 2.66 kullanılarak temas yüzeyinde hesaplanan gerilme dağılımı gösterilmektedir. Grafikte de görüldüğü üzere lastiğin deforme olan bölgesinde sabit olmaktadır. Lastiğin ön bölgesinde ise, rijit lastikteki benzer bir gerilme dağılımı görülmektedir.

2.4 Toprakta Kayma Gerilmesi-Deformasyon İlişkisi

Toprak mekaniğinde, Coulomb kriterine göre iki tür toprak vardır. Bunlar kırılğan toprak ve plastik topraktır. Kırılğan toprak, isminden de anlaşılacağı gibi bir kırılma direncine sahiptir. Üzerindeki düşey yüke bağlı olarak belirli bir kayma gerilmesine kadar deformasyon miktarı ile artan kayma direnci oluşturur. Maksimum kayma gerilmesine varıldığında ise toprağın kırılması meydana gelir ve kayma direnci bir miktar düşer ve sabit kayma direnci ile deformasyon artmaya devam eder. Bu plastik

akış durumudur. Plastik toprakta ise bir kırılma noktası yoktur. Toprak deformasyon ile artan kayma direnci gösterir. Fakat deformasyon arttıkça, bir noktadan sonra kayma direnci sabit kalmaya başlar.

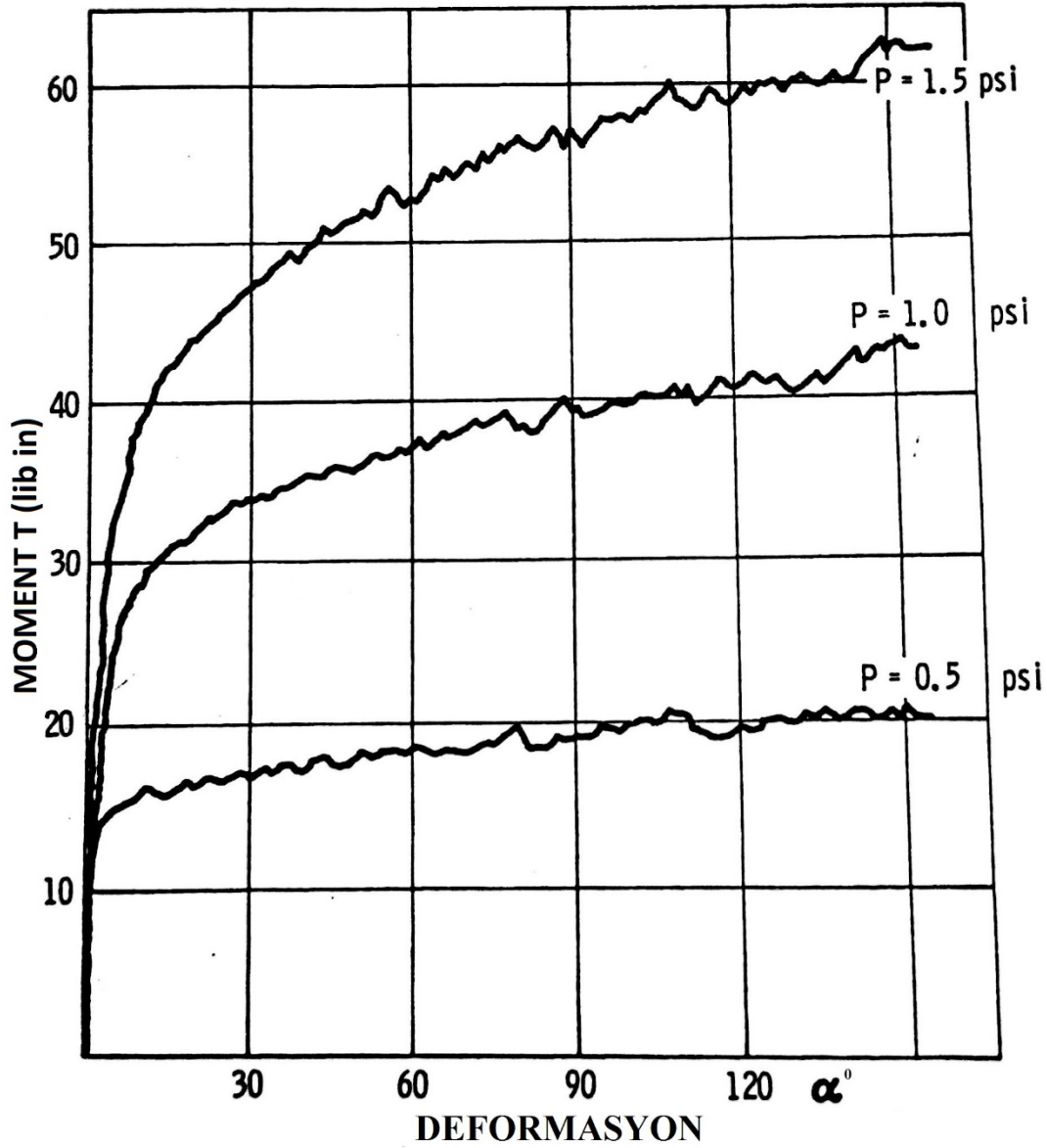


Şekil 2.32 : Kırılğan toprak ve plastik toprağın karakteristiği (Bekker, 1969).

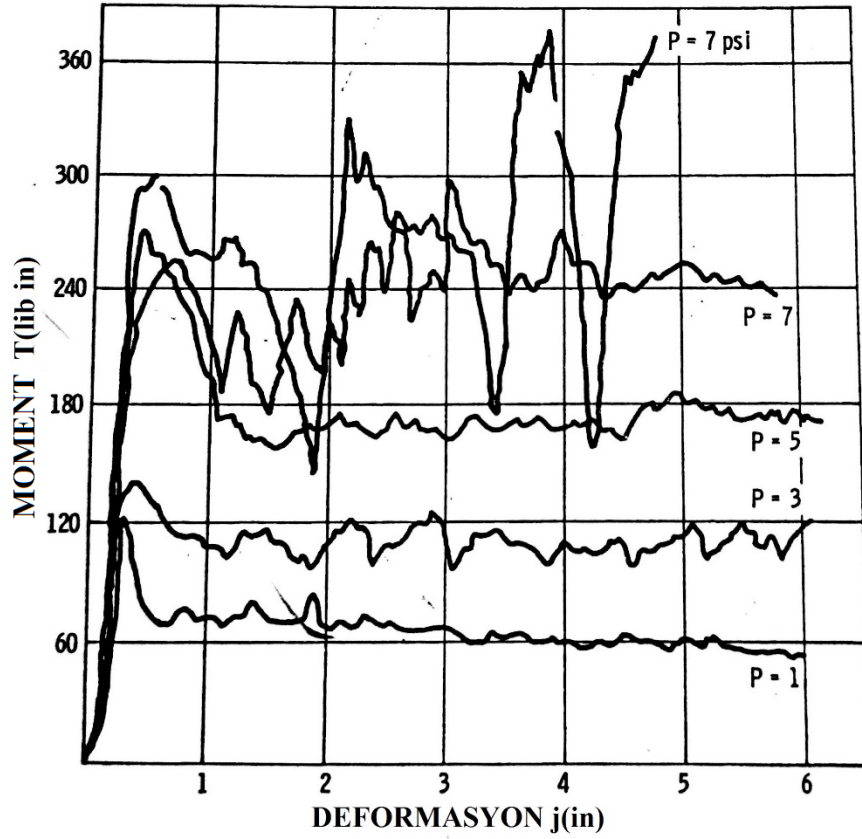
Toprağın bu iki karakteristiği için çizilen örnekte (Şekil 2.32) görüldüğü üzere kayma direnci belli bir deformasyon miktarına gelindiğinde yatay eksene paralel olmaktadır. Fakat gerçekte yapılan testlerde bu her zaman bu şekilde olmamaktadır. Bazı durumlarda kayma direnci deformasyon ile artmaya devam eder. Bunun nedeni, testin yapıldığı normal yükün toprağın taşıma kapasitesinden fazla olmasıdır. Taşıma kapasitesinin üzerinde yükler uygulandığında test plakası toprakta batmaya devam eder. Batma derinliği arttıkça kaydırma plakasına gelen yük artacağından, grafikte deformasyonla sürekli artan bir grafik görülür. Buna bir örnek Şekil 2.33'de görülmektedir.

Kırılğan topraklarda farklı düşey yüklerle yapılan testlerde keşfedilen bir davranış da; düşey yük arttıkça, kırılğan toprağın kırılma noktasını gösteren maksimum kayma direncinin bulunduğu tepe noktası belirginliğini yitirmektedir. Yeterince büyük düşey yük uygulandığında ise kırılğan toprak, plastik toprak ile aynı kayma gerilmesi-deformasyon grafiği karakteristiği göstermektedir. Bunun nedeni ancak varsayım ile tahmin edilebilir. Düşük düşey yüklerde, toprağın taşıma kapasitesinin altında iken toprak orijinal kırılğan yapısını göstermektedir. Taşıma kapasitesinin altında düşey yük ile beraber kayma gerilmesine maruz bırakılınca, toprak taşıma kapasitesi aşıldığından kırılma olayı meydana gelir (Bekker, 1956). Bu grafik de, belirli bir deformasyonda oluştuğundan maksimum nokta belirgin olur. Fakat düşey

yük kayma gerilmesi uygulanmadan önce toprak taşıma kapasitesinin üzerinde ise, toprak kayma gerilmesine maruz bırakılmadan dahi çoktan kırılmış ve plastik davranış göstermeye başlamış olur. Bu noktada uygulanan kayma gerilmesi ile deformasyon başladığında, grafikte tepe noktası belirgin olmaz. Çünkü toprak grafik çizdirilmeye başlamadan önce kırılma noktasını yaşamış olur. Bu yapının bir örneği Şekil 2.34'te gösterilmiştir.



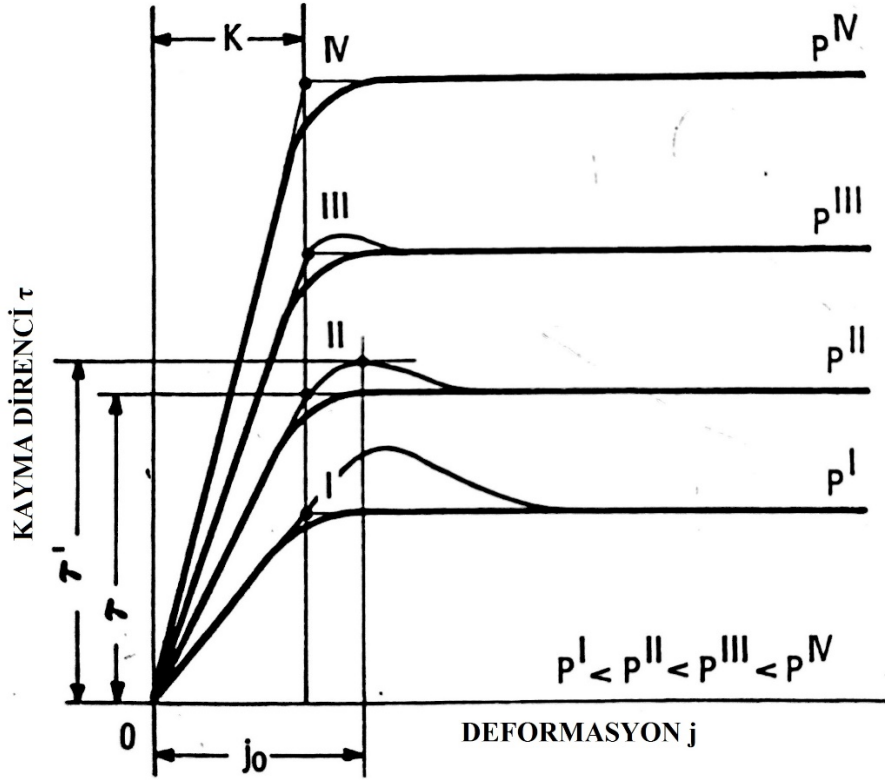
Şekil 2.33 : Plastik bir toprak ile yapılan moment-kayma açısı testinin sonucu (Bekker, 1969).



Şekil 2.34 : Kırılğan bir toprak ile yapılan moment-deformasyon testi sonucu (Bekker, 1969).

Şekil 2.34' te gösterilen grafik, Şekil 2.35'de gösterildiği gibi idealleştirilebilir. İdealleştirilen grafikte görüldüğü üzere, toprak üzerindeki düşey yük arttıkça maksimum noktası kaybolmuştur. Kırılğan toprağın maksimum noktası eğer sabit kayma direnci noktasından çok büyük değil ise tepe noktasının ihmal edilerek grafiğin yumuşatılması hesaplamalarda kolaylık yaratmaktadır. Hesaplamalarda kolaylık yaratmasının yanında, tepe noktasının görüldüğü deformasyon değeri neredeyse her toprak için çok küçüktür. Toprakta meydana gelen deformasyonu araç için düşünecek olursak, toprak ile lastik etkileşim yüzeyindeki sınır tabakada toprak, lastiğin dönme hızı ve lastiğin yatayda yaptığı hıza bağlı olarak deformasyona uğrar. Sınır tabakadaki bu hız farkı, tekerleğin kayması ile ifade edilebilir. Dolayısıyla topraktan alınabilecek maksimum kayma direnci (araç yönünden çekiş kuvvetine eşit olur) kayma yüzdesinin bir fonksiyonu olacaktır. Bu nedenle çok küçük kayma yüzdesi değerlerinde bu tepe noktası oluşmaktadır. Fakat tekerlekli taşıtlar genellikle yüksek kayma yüzdesi değerlerinde çalışırlar. Bu nedenle bu tepe noktasının hesaplarda kullanılmasına gerek yoktur. Ancak, eğer tepe noktası, sabit kayma direnci noktasının çok üzerinde ise ve toprak direnci, düşük kayma yüzdesi

değerlerinde bile aracı hareket ettirebilecek kadar fazla ise, tepe noktasının yumuşatılması istenmez (Bekker, 1956).



Şekil 2.35 : İdealleştirilmiş gerilme-deformasyon grafiği (Bekker, 1969).

Toprakta kayma gerilmesi ile deformasyonun ilişkisini tanımlamaya yarayan c ve ϕ parametreleri, teorik olarak bir test teçhizatı ile kayma gerilmesi ölçümünde alınan sonuç ile tekerlek-toprak etkileşiminde topraktan alınabilecek çekiş kuvveti için aynı anlamı ifade eder. Fakat pratikte test aleti, tekerlek ile toprak etkileşim yüzeyini; boyut, düşey yük ve gerilim dağılımı açısından mümkün olduğu kadar taklit etmelidir.

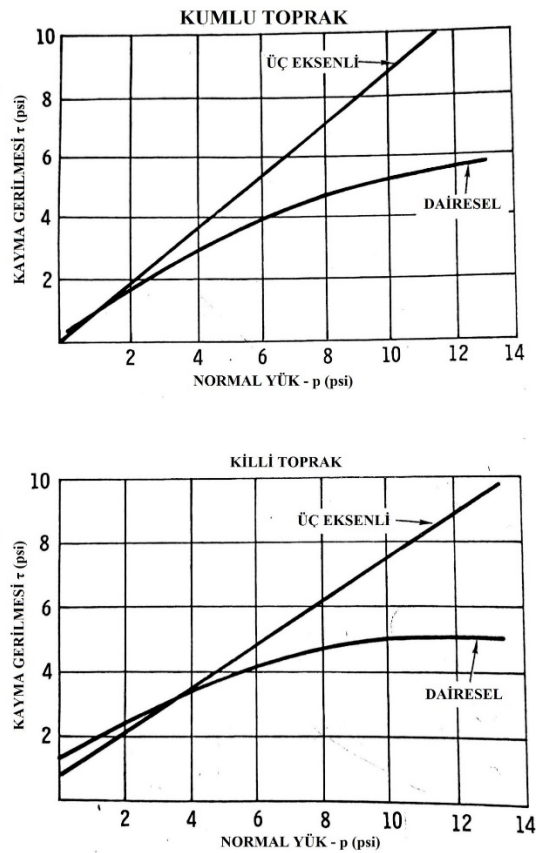
2.4.1 Toprak-tekerlek etkileşiminde parametre ölçüm yönteminin etkisi

Toprak kayma direncini ve Coulomb denklemine göre gerilim dairelerini çizdirmek için birçok test aleti ve yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan inşaat sektöründe en çok kullanılanlar, kaydırma kutusu yöntemi ve üç eksenli test yöntemidir. Fakat inşaat sektöründeki toprak deformasyon karakteristiği ile toprak-tekerlek etkileşimindeki deformasyon karakteristiği bir değildir. Bu nedenle ölçüm yöntemleri de farklı olmalıdır.

Toprak ile tekerlek etkileşim yüzeyini en iyi taklit eden en iyi kayma direnci test yöntemleri, dikdörtgen ya da dairesel plaka kaydırma yöntemleridir. Bu yöntemlerde kullanılan düşey yükler bir araçta oluşabilecek düşey yüklerin aynısıdır. Tekerleklerin kaymasını taklit etmek içinde bir tekerleğin kayma miktarına göre deformasyon değeri bu plakalarda da aynı tutularak testler yapılmaktadır.

Üç eksenli test metodu ile dairesel plaka kaydırma yöntemi, Coulomb kriterine göre çizilmiş grafikler ile karşılaştırıldığında, ideal en küçük ve en büyük gerilmeyi veren üç eksenli test yöntemi ile oluşturulan Mohr daireleri ile çizdirilen grafik düz bir çizgi oluşturmuştur. Fakat dairesel kaydırma yöntemi ile oluşturulan grafik eğri biçimini almıştır (bkz Şekil 2.36). Eğimli grafik, toprak-tekerlek etkileşimine daha uygundur (Bekker, 1956).

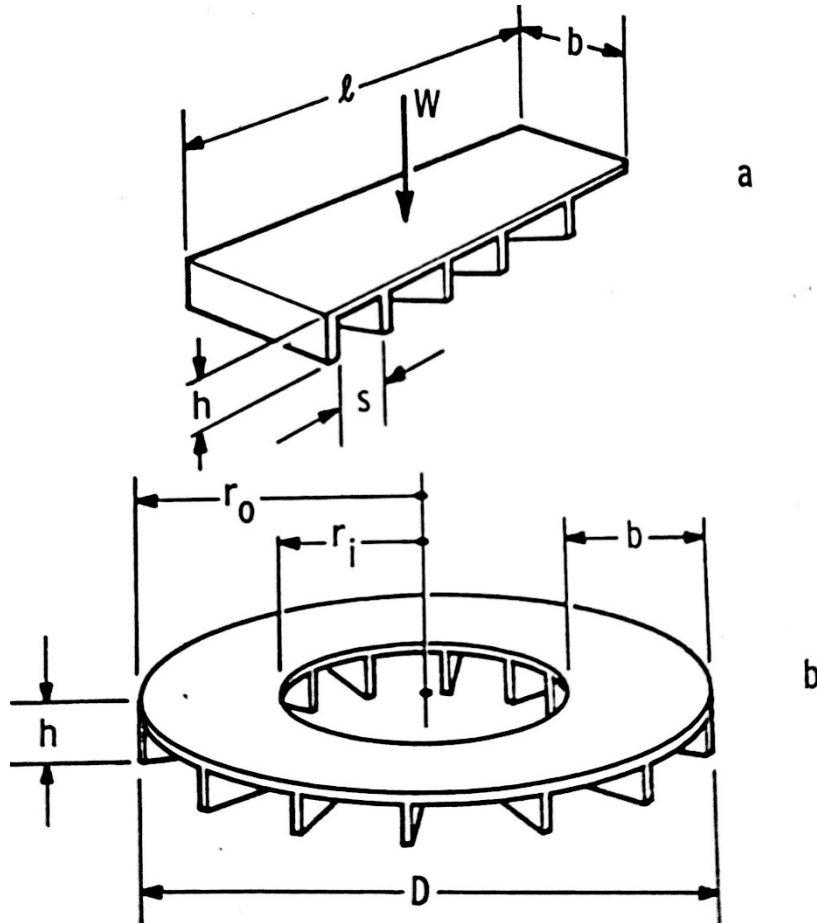
Bekker'in geliştirdiği Bevameter yönteminde de dairesel kaydırma plakası kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalarda, Bevameter tekniğinin oldukça tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 2.36 : Yapay olarak hazırlanmış iki toprak tipi ile oluşturulan Coulomb çizgileri (Bekker, 1969).

2.4.2 Toprak-tekerlek etkileşiminde kaydırma plakası şeklinin etkisi

Toprak tekerlek etkileşiminde kayma olayı yatay düzlemde meydana gelse de tekerlek üzerindeki dikey yarıklar ve dişlerin de test aleti tarafından taklit edilmesi gerekmektedir. Tekerlek dişlerinin taklit edilmesi durumunda, sonradan tekerlek dişinden gelen ek çekiş için ayrı hesap yapmaya gerek duymadan doğrudan toplam çekiş hesaplanmış olur. Tekerlek tırnağının etkisini hesaplamak için birçok çalışma yapılsa da; sahada yapılan testlerden elde edilen verilere göre, kohezyon karakteristiği çok yüksek toprakta, yüksek batma gücüne ve uzun diş yüksekliğine sahip tekerlek kullanılmıyor ise, tekerlek dişi yüzünden oluşan ek çekiş kuvveti çok az olmaktadır (Bekker, 1956).



Şekil 2.37 : Kaydırma plakaları: Dikdörtgen plaka (a) dairesel plaka (b) (Bekker, 1969).

Dairesel kaydırma plakalarında boyutlar iki yönden sınırlıdır. Alt sınırı oluşturan parametre toprağın içeriğidir. Toprak içeriğindeki topakların, yüzeydeki dalgalı yapının ve organik içeriklerin etkisi küçük çapa sahip plakalar ile ölçülemez. Bu özelliklerin ölçülebilmesi için, belirli bir minimum çapa sahip plaka kullanılmalıdır.

Üst sınırı ise düşey yük oluşturmaktadır. Toprağın test edileceği düşey yüke bağlı olarak temas yüzeyinde basınç oluşur. Plakanın boyutlarını büyütme bu basıncın azalmasına neden olacağından, istenen basıncı geçmemek için belirli bir maksimum çapa sahip plaka kullanılabilir (Bekker, 1956).

Dairesel plakaların kullanılmasının bir nedeni de, daha sonra bahsedilecek olan sürüklenme direncinden muaf olmasıdır. Sürüklenme direnci kısaca toprak üzerinde kaydırılan bir plakanın önünde biriken toprağın plakaya ek yük uygulamasıdır. Dairesel formdaki plakaya bağlı dişler toprağı dışa doğru sürekli ittiğinden dişler önünde toprak birikmez. Fakat dikdörtgen plakalarda sürüklenme direnci görünür ve bunu düzeltmek için plakanın kaydırılacağı uzunluktaki toprak yüzeyinin bir kısmı kazılarak birikecek olan toprağın burayı doldurarak düz bir yüzey yaratması sağlanır.

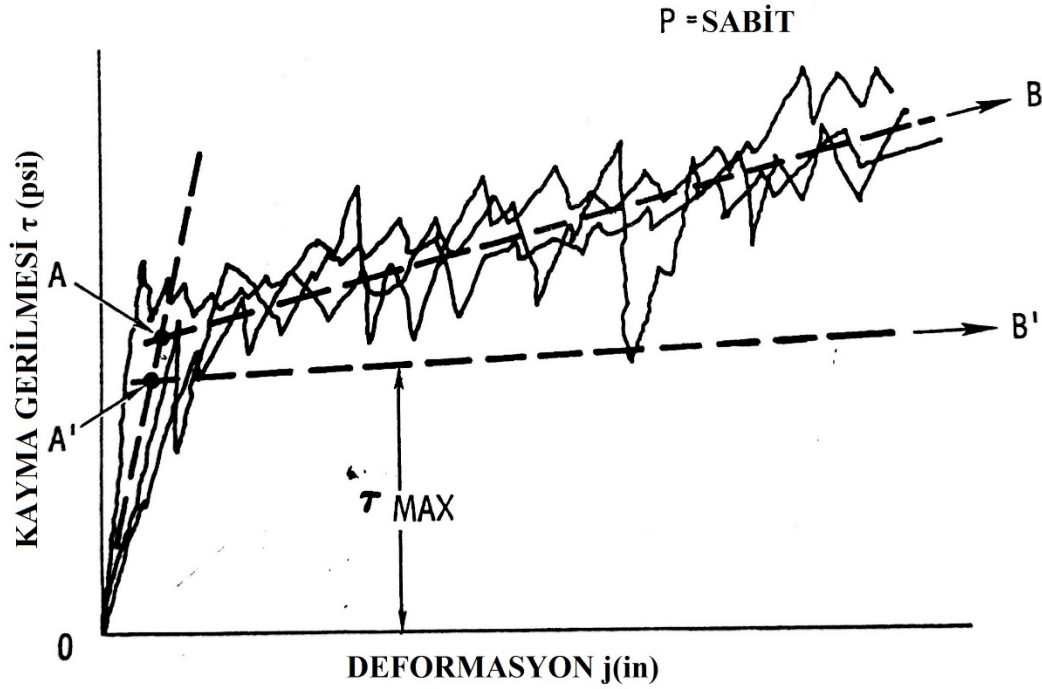
Toprak-tekerlek etkileşimi için en çok kullanılan kaydırma plakası dairesele kaydırma plakası olmasına rağmen, çok sert toprakları laboratuvar ortamında test etmek için dikdörtgen plakalar kullanılmaktadır.

2.4.3 Toprak-tekerlek etkileşiminde eğri uydurma yönteminin etkisi

Toprak sertliğini ifade eden c ve ϕ parametrelerini elde etmek için kayma gerilmesi-deformasyon eğrileri üzerinden eğri uydurma yöntemleri kullanılır. Eğri uydurma yöntemi, daha önce açıklanan basınç-batma ilişkisi grafiklerinde de uygulanmaktadır. Ancak basınç ile batma derinliği testlerinde elde edilen veriler, interpolasyon için gerekli noktaları doğrudan verdiğinden uygulama daha basit ve daha doğru olmaktadır. Kayma gerilmesi ile deformasyon ilişkisinde ise kayma gerilmesi deformasyona bağlı olarak değişmekte ve test farklı düşey yüklerde yapılmaktadır. Test verilerinden ancak maksimum kayma gerilmesinin, toprağın ortalama akma noktalarındaki değeri (τ_{max}) elde edilebilmektedir. Coulomb gerilim eğrisinin çizilebilmesi için ek bir eğriye ihtiyaç vardır ve bu eğri, kayma gerilmesinin maksimum değerinin altında nasıl davranış gösterdiğini ifade etmek için kullanılacaktır. Bu sayede, kayma gerilmesinin belirli bir deformasyonda ne değer aldığı ifade edilebilir.

Toprağın deformasyon ile değişim eğrisi oldukça değişken bir eğridir. Bunun nedeni toprağın homojen olmayışı olarak gösterilebilir. Şekil 2.38’de böyle bir grafik gösterilmektedir. Grafiğin bu şekilde değişken olması düzeltilemeyeceğinden, grafik üzerinden yaklaşım yapılması gerekir. Kayma gerilmesi deformasyon grafiği

yaklaşık olarak iki adet düz çizgi üzerine oturtulabilir. Bunlar OA ve AB çizgileri olmaktadır.



Şekil 2.38 : Düzensiz bir Bevameter çiziminden interpolasyon ile kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisinin belirlenmesi (Bekker, 1969).

Toprağın akmaya başladığı nokta A olarak düşünülebilir. Bu nokta c ve ϕ parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Fakat bu nokta tam olarak doğru değildir. Test sırasında kullanılan cihaza toprak tarafından uygulanan kaldırma kuvveti test sonuçlarını etkilediğinden, bu da göz önünde bulundurularak oluşturulan çizgi A'B' şeklinde yatay eksene paralel olan daha aşağı bir seviyeye çekilmelidir. Yeni oluşan A' noktası daha doğru bir akma noktasıdır. Coulomb çizgilerinin daha ölçülü çizilebilmesi için, testlerin farklı düşey yüklerde de tekrarlanarak incelenmesi daha doğrudur. Yapılacak testlerin sayısı toprağın homojenlik yüzdesine bağlıdır. Testler tekrarlandıkça AB çizgisi daha dar bir aralıkta oynar. Laboratuvar deneylerinde en az 10 test yapılarak AB çizgisi dar bir alanda belirlenmektedir.

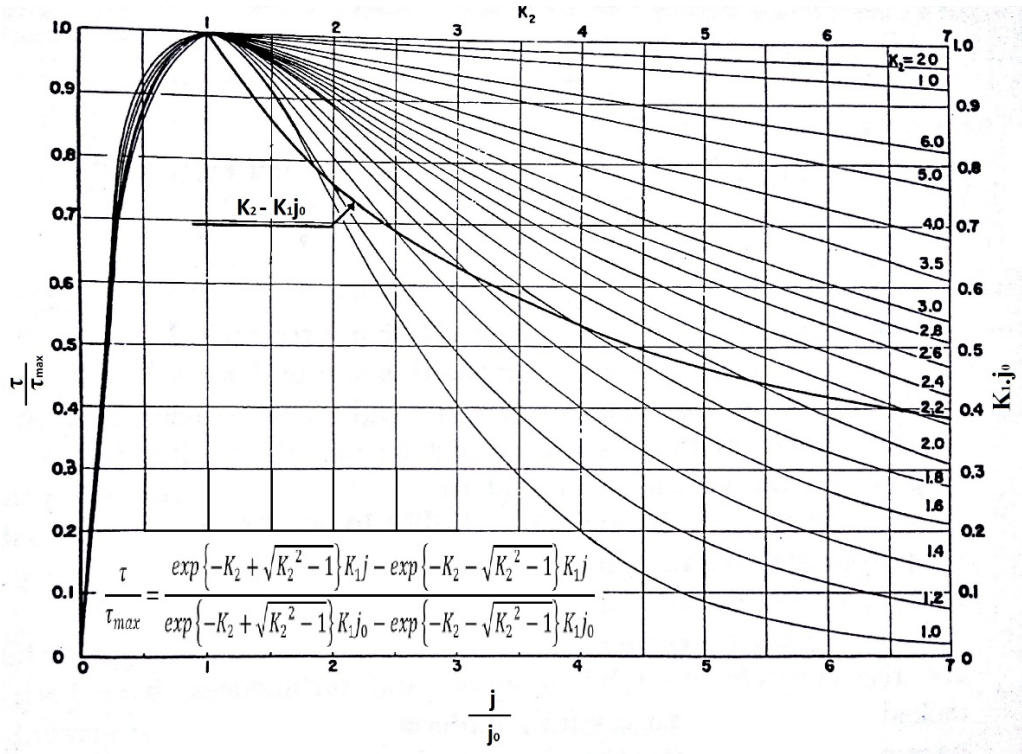
2.4.3.1 Kırılğan toprakta eğri uydurma

Kırılğan bir toprağın kayma gerilmesinin deformasyona bağlı denklemi, Bekker tarafından oluşturulmuştur (Denk. 2.67). Boyutsuz olarak oluşturulan denklemde K_1

ve K_2 kayma yüzdesi katsayıları deneysel kayma eğrilerine dayanmaktadır (Bekker, 1960).

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{\exp\left\{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}\right\} K_1 j - \exp\left\{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}\right\} K_1 j}{\exp\left\{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}\right\} K_1 j_0 - \exp\left\{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}\right\} K_1 j_0} \quad (2.67)$$

Denklemden j_0 deformasyon değeri τ_{max} kayma gerilmesinin görüldüğü deformasyondur. Deformasyonun parametresi olan j , araç tekerleklerinin kayma yüzdesi ile ifade edilirse; i , kayma yüzdesi ve x , temas yüzeyinin başlangıcından kayma direncinin başladığı noktaya kadar olan uzaklık olmak üzere $j=ix$ eşitliği kurulabilir.



Şekil 2.39 : Kayma katsayılarının bulunması için kullanılan hizalama çizelgesi (Bekker, 1960). (Notasyon tez ile uyumlu olması için değiştirilmiştir.)

Boyutsuz kayma gerilmesi fonksiyonu, grafiksel olarak Weiss (1962) tarafından çözülmüş ve hizalama çizelgesi oluşturulmuştur (Şekil 2.39).

Hizalama çizelgesinde K_1 ve K_2 katsayılarının bulunması için öncelikle deformasyona bağlı bir kayma gerilmesi eğrisine ihtiyaç vardır. Bu eğrinin, homojen olmayan toprak nedeniyle eğri uyurma işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Eğrinin oluşturulmasının ardından eğriden okunan değerler, boyutsuz değerler olan τ/τ_{max} ve j/j_0 oranlarına dönüştürülür. Bu dönüşüm ile bir eğri çizdirilir ve bu eğri

hizalama çizelgesi üzerine konarak çizelgedeki diğer eğrilerle eşleştirilmeye çalışılır. Hizalama çizelgesinde uyumun yakalandığı eğri K_2 değerini vermiş olur. Hizalama çizelgesindeki K_2-K_{1j0} eğrisi de kullanılarak K_2 eğrisi ile kesiştiği nokta ile K_1 bulunur (Bekker, 1960).

K_1 ve K_2 katsayılarının doğruluğu, kullanılan eğri uydurma yönteminin doğruluğu ile orantılıdır. Bu nedenle yüksek K_2 değerlerinde hassas sonuçlara varmak çok zordur. Ayrıca daha kırılğan toprak tipinin kayma gerilmesi-deformasyon grafiğindeki maksimum noktasının yuvarlatılması ve plastik toprak gibi modellenmesi, hesap zorluğu ve eğri uydurma açısından daha verimli olmaktadır.

2.4.3.2 Plastik toprakta eğri uydurma

Plastik davranışı gösteren toprakta, Şekil 2.32’de gösterildiği gibi kayma gerilmesi deformasyon ile yumuşak bir şekilde artış gösterir. Maksimum kayma gerilmesi gösterilen bir tepe noktası yoktur. Bu tip topraklarda, kırılğan topraktaki K_1 ve K_2 gibi iki adet katsayı yerine bir adet K_w katsayısı yeterli olmaktadır. Plastik toprak için geliştirilmiş kayma gerilmesi formülü Denk. 2.68’de gösterilmektedir.

$$\tau = (c + p \tan \phi) \left(1 - e^{-j/K_w} \right) \quad (2.68)$$

Denklemdaki tek K_w parametresi, kayma gerilmesi-deformasyon grafiğinde sabit gerilme bölgesi ve eğik şekilli bölgeye teğet olan iki çizginin kesiştiği yerin düşey eksene uzaklığı olarak kabul edilir (Şekil 2.35). Janosi Hanamoto (1961) tarafından bulunan bu yöntemde K_w , bir toprakta maksimum kayma gerilmesinin oluşması için toprakta meydana gelmesi gereken kayma yer değiştirmesi miktarı olarak tanımlanmıştır.

Kırılğan topraklarda iki kayma katsayılı yöntem için katsayıların hassas bir şekilde bulunması, bilgisayar temelli yöntemler olmadan çok zordur. Bunun yanında pratik olarak düşünüldüğünde, tekerlekli araçlar gibi yüksek kayma yüzdeleri söz konusu olduğunda tepe noktasının hesaba katılması sonuç açısından bir farklılık yaratmamaktadır. Bunun nedeni kırılğan topraklarda tepe noktasının çok düşük kayma yüzdelерinde görülmesidir. Bu nedenle pratik kolaylık doğurduğu için, Janosi ve Hanamoto’nun tek kayma katsayılı yöntemi tekerlekli araçların toprak ile etkileşiminde yeterli bir yöntem olmaktadır.

2.4.4 Toprak tipine göre kayma-deformasyon ilişkisinin karakterize edilmesi

Yapılan araştırmalara göre, toprak iki farklı davranış gösteren kategoriye ayrılır. Bunlar kırılğan toprak ve plastik topraktır. Kırılğan toprak, belirli bir kırılma direncine sahiptir. Toprağa uygulanan kayma gerilmesi bu kırılma değerini aştığında kırılma değerinden daha küçük ve sabit bir kayma direnci göstererek deformasyonuna devam eder. Plastik toprakta ise bir kırılma noktası yoktur. Deformasyon ile belirli bir noktaya kadar artan kayma direnci gösterir. Plastik toprakta da belirli bir değerden sonra kayma direnci sabit kalarak deformasyon devam eder. Bu kategoriler toprağın kendi başına davranışını ifade eder. Ancak Dünya üzerindeki arazilerde, toprak ile beraber organik yapılarda bulunur. Bunlar toprakta yaşayan bitki örtüsü olabilir ya da, bataklık türü bir arazideki yosunlar olabilir. Bu şartlar altında arazide yapılan testler sonucunda, toprak üç kategoride incelenmektedir (Wong, 2001).

2.4.4.1 Yumuşak geçişli kayma-deformasyon karakteristiğine sahip toprak

Bu tür topraklar, tipik plastik toprak özelliği gösterirler. Kayma gerilmesinin deformasyon ile sabit kaldığı noktaya kadar yumuşak bir eğri çizerek artan kayma gerilmesi karakteristiği sergilerler. Bu tür topraklara gevşek kum ve doymuş kil örnek verilebilir. Bu tür bir toprağın ölçülen kayma gerilmesi-deformasyon grafiği ile bu grafiğe eğri uydurularak oluşturulan grafik Şekil 2.40' da gösterilmektedir.

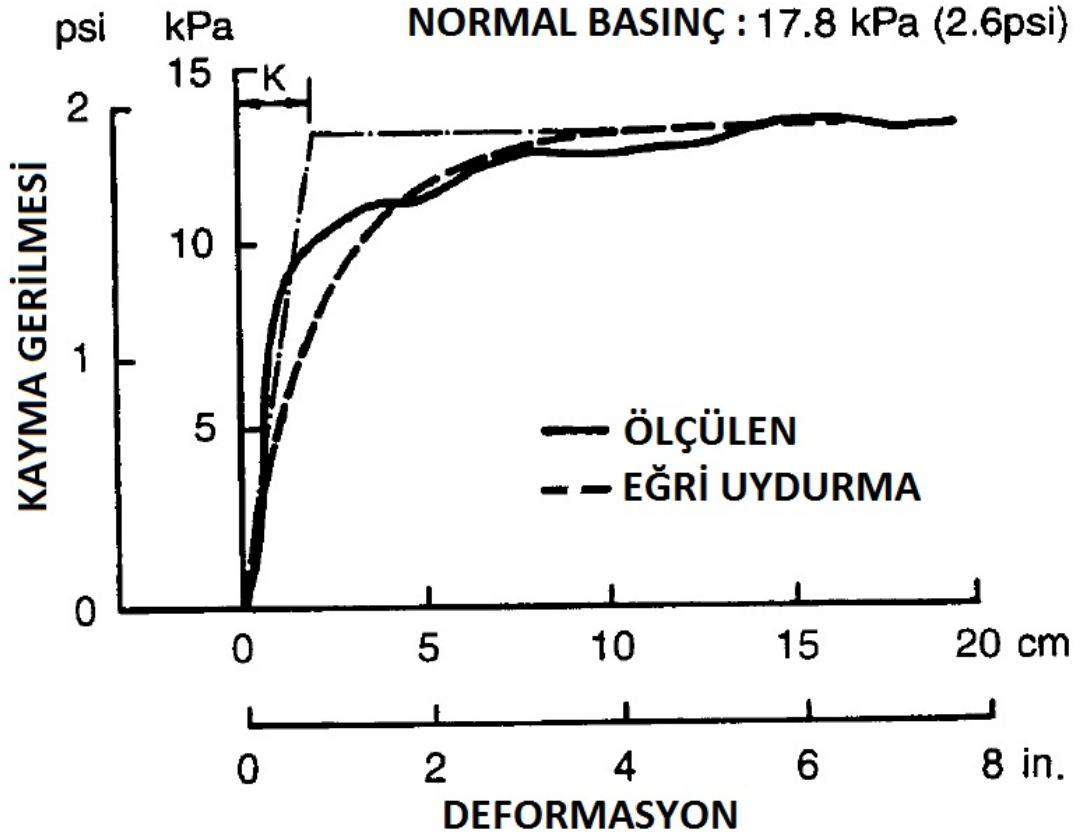
Janosi ve Hanamoto (1961) tarafından oluşturulan üstel fonksiyon Denk. 2.29'da gösterilmiştir.

$$\tau = (c + p \tan \phi) \left(1 - e^{-j/K_w} \right) \quad (2.69)$$

Denklemden j deformasyonu temsil ederken K_w deformasyon modülü olarak adlandırılır. Deformasyon modülü, Şekil 2.40'da gösterilen grafiğin yatay eksene paralel olduğu sabit kayma gerilmesi bölgesine teğet olan çizgi ile deformasyon ile kayma gerilmesinin arttığı bölgeye teğet olan çizginin kesiştiği yerin düşey eksene olan uzaklığıdır. Fiziksel olarak tanımlamak gerekirse, topraktan maksimum kayma direncinin alındığı minimum deformasyon miktarı, deformasyon modülünü verir.

Pratikte, arazide yapılan testlerden elde edilen kayma gerilmesi-deformasyon grafikleri oldukça değişkendir. Bu nedenle, K_w deformasyon modülünün, eğri uydurma hatasını en aza indirecek şekilde optimum değerinin bulunması için ağırlıklı

en küçük kareler yöntemi kullanılır. Bu yöntem ile K_w parametresinin ifadesi Denk. 2.70'de gösterilmiştir.



Şekil 2.40 : Yumuşak geçişli toprakta kayma gerilmesi-deformasyon grafiği (Wong, 2001).

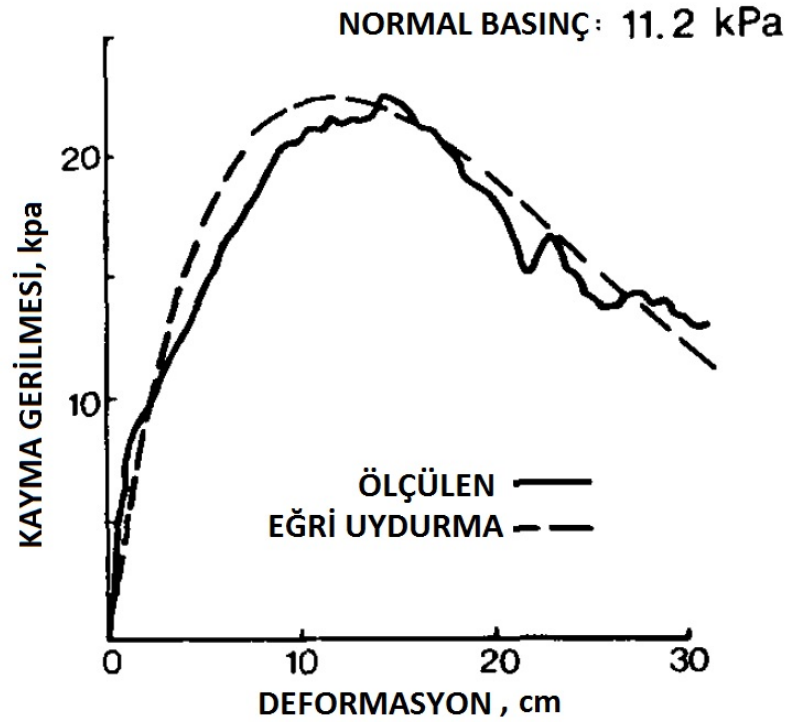
$$K_w = - \frac{\sum (1 - \tau/\tau_{max})^2 j^2}{\sum (1 - \tau/\tau_{max})^2 j [\ln(1 - \tau/\tau_{max})]} \quad (2.70)$$

Denklemden τ_{max} maksimum kayma gerilmesi, τ ölçülen kayma gerilmesi ve j bu kayma gerilmesindeki deformasyon miktarıdır. Arazide yapılan testlere dayanarak, sıkı kum için $K_w = 1$ cm ve gevşek kum için 2,5 cm civarında alınabilir (Wong, 2001). Maksimum sıkışma durumundaki kil içinse $K_w = 0,6$ cm değerini alır.

2.4.4.2 Bitki örtülü topraklar

Bitki örtüsüne sahip topraklar katmanlı topraklardır. Üst katmanda toprakta yaşayan bitki örtüsü, lifli bir yapı oluşturması nedeniyle toprağa sertlik kazandırır. Bu tür topraklarda kayma gerilmesi deformasyon ile bir tepe noktasına kadar hızlı bir şekilde artar. Bu tepe noktasında üst katman kırılır. Üst katmanın altında bulunan ölü

bitki atıklarından oluşan katman (turba) çok daha az kayma direncine sahip olduğundan, grafikte hızlı bir kayma direnci düşmesi görülür.



Şekil 2.41 : Bitki örtülü toprakta görülen kayma gerilmesi deformasyon ilişkisi (Wong, 2001).

Bu tür topraklar için eğri uydurma fonksiyonu Denk. 2.71’de gösterilmiştir.

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{j}{K_w} \right) \exp \left(1 - \frac{j}{K_w} \right) \quad (2.71)$$

Maksimum kayma gerilmesinin oluşturduğu deformasyon miktarı K_w parametresini vermektedir. Çoğu durumda kayma gerilmesi-deformasyon grafiğindeki tepe noktası keskin olduğundan, K_w grafikten elde edilebilmektedir. Fakat bazı değişken grafiklerde bu mümkün olmamaktadır. Bu nedenle ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ile oluşturulan Denk. 2.72 kullanılmalıdır.

$$\left(\frac{\tau}{\tau_{max}} \right)^2 \left[\ln \left(\frac{\tau}{\tau_{max}} \right) - \left(1 + \ln \left(\frac{j}{K_w} \right) - \frac{j}{K_w} \right) \right] (K_w - j) = 0 \quad (2.72)$$

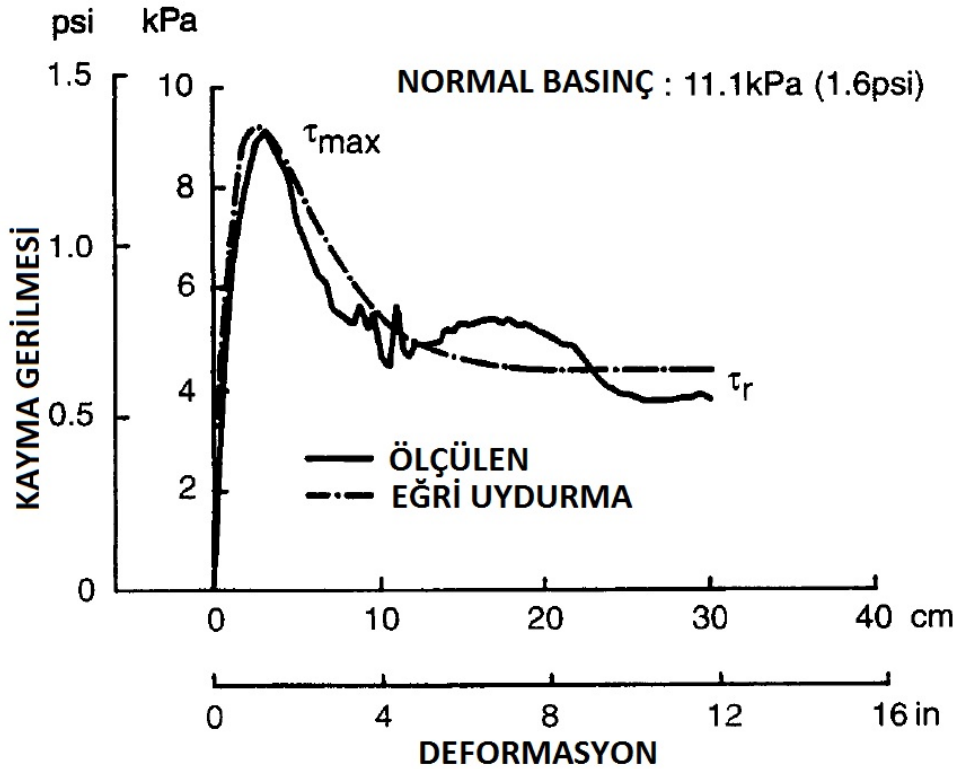
Yapılan testler ve bilgisayar tabanlı olarak Denk. 2.72’ nin çözülmesi ile birçok organik arazide K_w , 14,4 ile 16,4 cm arasında değişmektedir (Wong, 2001).

2.4.4.3 Kırılma noktasına sahip topraklar

Sıkıştırılmış kum, alüvyon ve balçıklı topraklar bu kategoride yer almaktadır. Bu tür toprakların kayma gerilmesi deformasyon grafiğine bakıldığında (Şekil 2.42), kayma gerilmesi deformasyon ile artarak maksimum kayma gerilmesine ulaşır. Maksimum kayma gerilmesinden sonra artan deformasyon ile kayma gerilmesi maksimum kayma gerilmesinden daha az olan bir değere iner ve daha sonra deformasyon ile değişmeyen bir kayma gerilmesi karakteristiği gösterir. Bu tip karakteristik gösteren toprak için kayma gerilmesi denklemi (Denk. 2.73) Wong tarafından çıkarılmıştır.

$$\tau = \tau_{max} K_r \left\{ 1 + \left[\frac{1}{K_r} \left(1 - \frac{1}{e} \right) - 1 \right] \exp \left(1 - \frac{j}{K_w} \right) \right\} \left[1 - \exp \left(-\frac{j}{K_w} \right) \right] \quad (2.73)$$

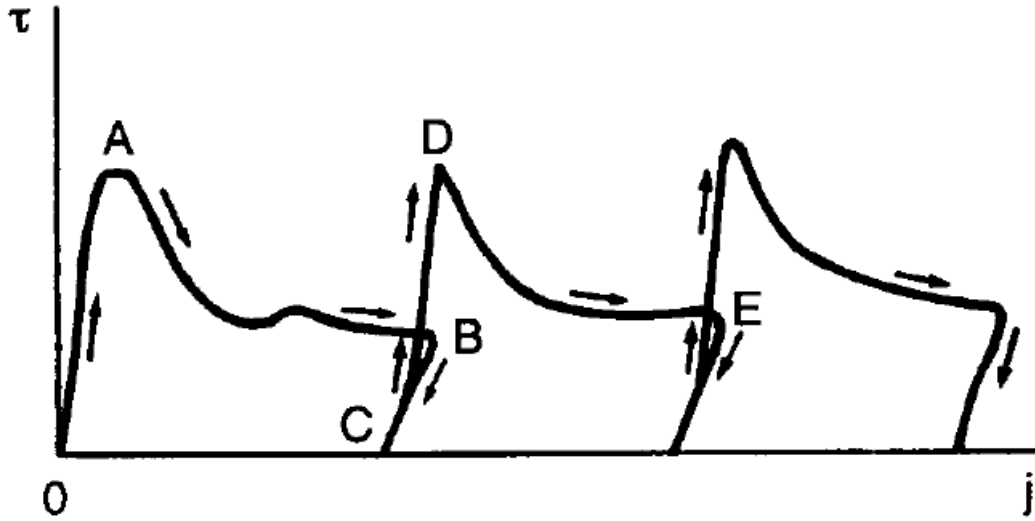
Denklemde K_r , sabit kayma gerilmesi bölgesindeki kayma gerilmesi τ_r 'nin maksimum kayma gerilmesi τ_{max} 'a oranıdır. K_w ise, maksimum kayma gerilmesinin olduğu deformasyon miktarını vermektedir. Diğer toprak türlerinde olduğu gibi bu parametreler grafikten elde edilebilir fakat çok değişken olan grafiklerde bu parametreler ancak ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ile bulunabilmektedir. Yapılan testlerden çıkarılan istatistiklere göre K_w , 2,7 ile 7,1 cm arasında değişen bir değer almaktadır. Bunun yanında K_r , 0,38 ile 0,72 arasında değer almaktadır (Wong, 2001).



Şekil 2.42 : Kırılma noktasına sahip topraklarda kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisi (Wong, 2001).

2.4.5 Toprağın tekrarlanan kayma gerilmesi durumunda davranışı

Bir arazi aracı düşünülürken, aracın ön aksı toprağın üzerinden geçtikten sonra arka aksıda aynı noktadan geçecektir. Bu durumda toprağın bu noktası arka arkaya iki kez kayma gerilmesine maruz bırakılacaktır. Bu nedenle toprakta bu davranışın incelenmesi, tekerlek ile toprağın etkileşimi açısından önem oluşturmaktadır. Sürtünmeli bir topraktan oluşan arazide yapışan tekrarlı kayma gerilmesi davranışının test sonucu Şekil 2.43’de verilmiştir. Grafiğe bakıldığında, B noktasında kayma gerilmesi yatay eksene inmiştir (C noktası). Bu kayma gerilmesinin olmadığı, yani ön aksın temasının bittiği anlamına gelmektedir. Daha sonra arka aks gelmiştir ve temas tekrar başlayarak kayma gerilmesi D noktasına çıkmıştır.



Şekil 2.43 : Kuru kumun tekrarlayan kayma gerilmesi altında davranışı (Bekker, 1969).

Grafiğin şekline bakıldığında, ilk temasa başlayan ön aksın yarattığı kayma gerilmesi deformasyon etkisi ile (ABC) arka aksın yarattığı kayma gerilmesi deformasyon etkisi (CDE) birbirinin aynısıdır. Grafiğe göre toprak üzerindeki normal yükün artıp sonra sıfıra inmesi döngüsünden sonra, toprak yeniden yüklendiğinde kayma gerilmesi birden maksimum değerine ulaşmamaktadır. Kayma gerilmesinin oluşması için tekrardan belirli bir deformasyona ihtiyaç vardır. Bir aracın toprağın belirli bir noktasından geçişi düşünülürken ise bu noktada deformasyon yaklaşık iki katına çıkmış olur. Arka aksı tek başına düşündüğümüzde ise ön akstan farklı bir davranış göstermediği görülmüş olur (Bekker, 1969).

2.4.6 Toprak-tekerlek etkileşiminde çekiş kuvveti

Tekerlek ile toprak temas yüzeyinde oluşturulan kuvvet tekerleğin, dolayısıyla aracın çekiş kuvvetini oluşturur. Toprağın taşıyabileceği çekiş kuvveti, toprağın kayma gerilmesi özellikleri dikkate alınarak bulunabilir. Toprak ile tekerlek temas yüzeyindeki kayma gerilmesi daha önce Janosi ve Hanamoto (1961) tarafından çıkarılmıştır (Denk. 2.74).

$$\tau = \tau_{max} \left(1 - e^{-\frac{j}{K_w}} \right) \quad (2.74)$$

Denklemden K_w , kayma yer değiştirmesi modülü olarak adlandırılabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi K_w , maksimum kayma gerilmesinin oluşması için gerekli kayma yer değiştirmesidir. Toprakta meydana gelen maksimum kayma gerilmesi ise daha önce Mohr-Coulomb gerilim daireleri ile açıklanmıştır ve Denk. 2.75 ile ifade edilebilir.

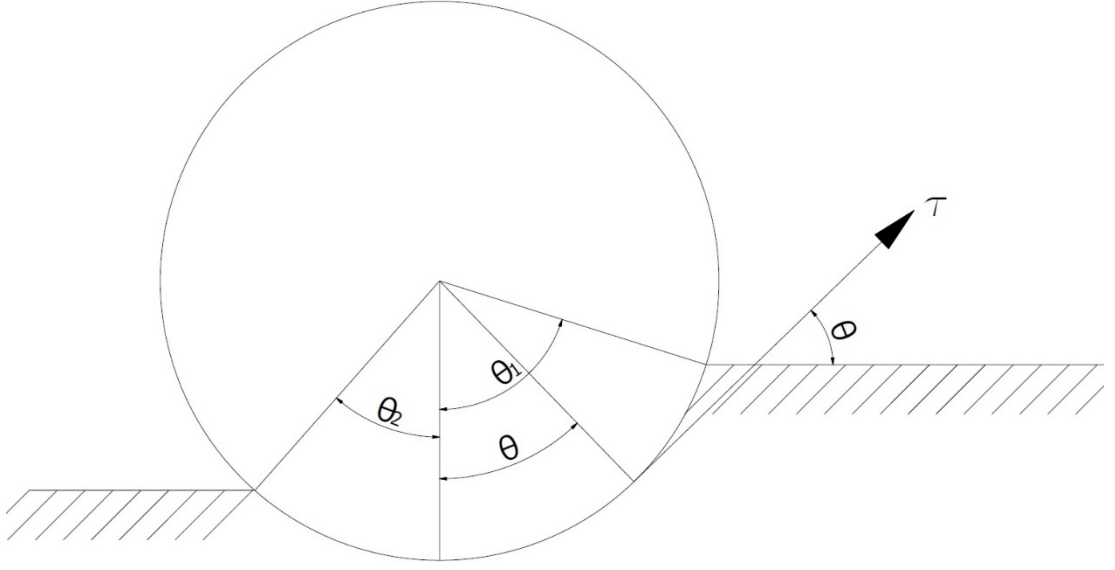
$$\tau_{max} = c + \sigma \tan \phi \quad (2.75)$$

Bu iki denklem birleştirildiğinde toprak ile tekerlek etkileşim yüzeyi için kayma gerilmesi ifadesi çıkarılmış olur.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \left(1 - e^{-\frac{j}{K_w}} \right) \quad (2.76)$$

Bevamer tekniğinde kullanılan sabit temas yüzeyi basıncına sahip plakaların aksine, toprak ile tekerleğin etkileşim yüzeyi daire şeklindedir ve etkileşim yüzeyi boyunca gerilme değişkendir. Değişken gerilmeler, toprakta basınç-batma ilişkisi bölümünde ele alınmıştır ve tekerleğin toprak ile temas yüzeyinde temas açısına bağlı gerilme ifadeleri çıkarılmıştır.

Şekil 2.44’ de tekerlek-toprak temas yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmesi gösterilmiştir. Kayma gerilmesi temas yüzeyine teğet olacağından, gerilme hem yatay ekseninde hem düşey ekseninde olmaktadır. Bu nedenle çekiş kuvveti için kayma gerilmesinin yataydaki değeri kullanılır. Kayma gerilmeleri nedeniyle oluşacak toplam çekiş kuvveti, Denk. 2.76’nın, θ_1 ve θ_2 temas yüzeyi sınırları içerisinde integrali alınarak bulunabilir (Wong, 2001).



Şekil 2.44 : Toprak-tekerlek temas yüzeyinde çekiş kuvvetinin oluşumu.

$$F = rb \int_{\theta_2}^{\theta_1} \tau(\theta) \cos \theta d\theta \quad (2.77)$$

F topraktan alınabilecek çekiş kuvveti olmak üzere denklem yeniden düzenlenirse Denk. 2.78 ile gösterilen tekerleğin toprak üzerindeki çekişini tanımlayan denklem elde edilmiş olur.

$$F = rb \int_{\theta_2}^{\theta_1} \left[c + \sigma(\theta) \tan \phi (1 - e^{\frac{j(\theta)}{K}}) \right] \cos \theta d\theta \quad (2.78)$$

Denklemde j kayma yer değiştirmesi, toprak ile tekerlek etkileşimi için tekerlek kayma yüzdesi i 'nin bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Kayma yer değiştirmesi bir sonraki bölümde anlatılacaktır.

Topraktan alınabilecek net çekiş kuvvetini hesaplamak için ise hareket direnci hesaba katılmalıdır. Hareket direnci Denk 2.77' ye eklenirse, net çekiş kuvveti Denk. 2.79' da gösterildiği gibi bulunabilir.

$$DP = rb \left[\int_{\theta_2}^{\theta_1} \tau(\theta) \cos \theta d\theta - \int_{\theta_2}^{\theta_1} p(\theta) \sin \theta d\theta \right] \quad (2.79)$$

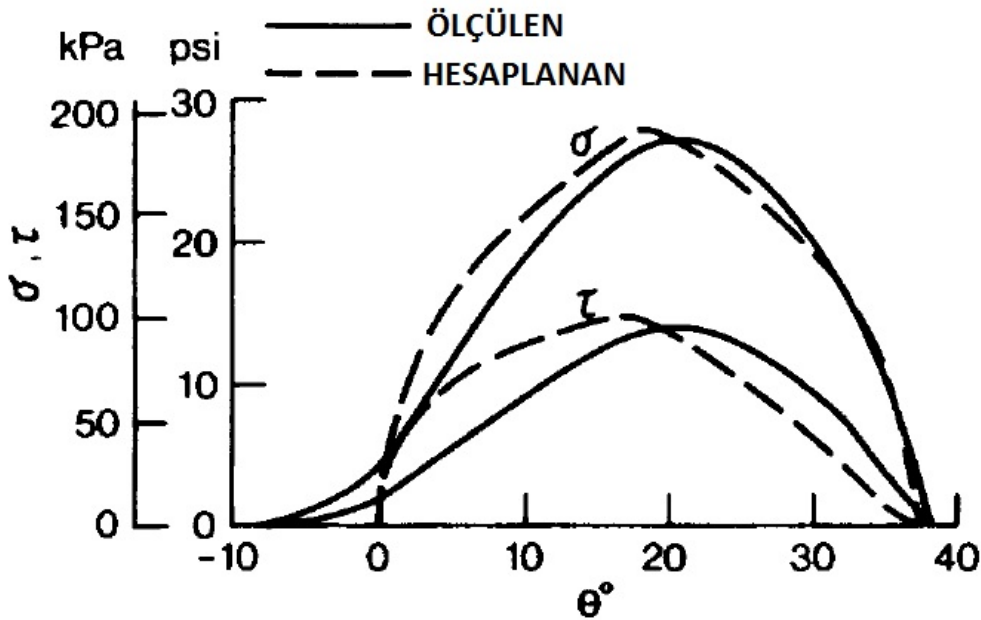
Net kuvvet, toprak mekaniği alanında DP (Drawbar pull) harfi ile tanımlanır. Bunun nedeni, toprak mekaniği alanında yapılan ilk çalışmalar tarım alanında olduğundan ve traktörün çeki miline bağlı bıçaklar nedeniyle çeki miline (Drawbar) etkiyen kuvvet net kuvvete eşit olduğundan, net kuvvet Drawbar pull (DP) olarak tanımlanmaktadır. Denklemdaki ikinci terim, daha önce bulunan hareket direncinin

temas açısına bağlı ifadesidir. Hareket direnci bu şekilde hesaplanabildiği gibi daha önce batma derinliği z ile hesaplanan Denk. 2.38 ifadesi de kullanılabilir. Tekerleğe etkiyen moment ise sadece kayma gerilmesinden etkilenir (Wong, 2010).

$$M = r^2 b \int_{\theta_2}^{\theta_1} \tau(\theta) d\theta \quad (2.80)$$

Tekerleğin toprak ile temas açısı düşey eksene bağlıdır. Tekerlek önündeki açılar pozitif değer alırken, tekerleğin arka bölümüne geçildiğinde açı negatif olarak denklemde kullanılır. Temas yüzeyi açısı θ arttıkça kayma yer değiştirmesi artacaktır.

Şekil 2.45’de kayma gerilmesinin ve normal gerilmenin temas açısıyla değişimi gösterilmiştir.



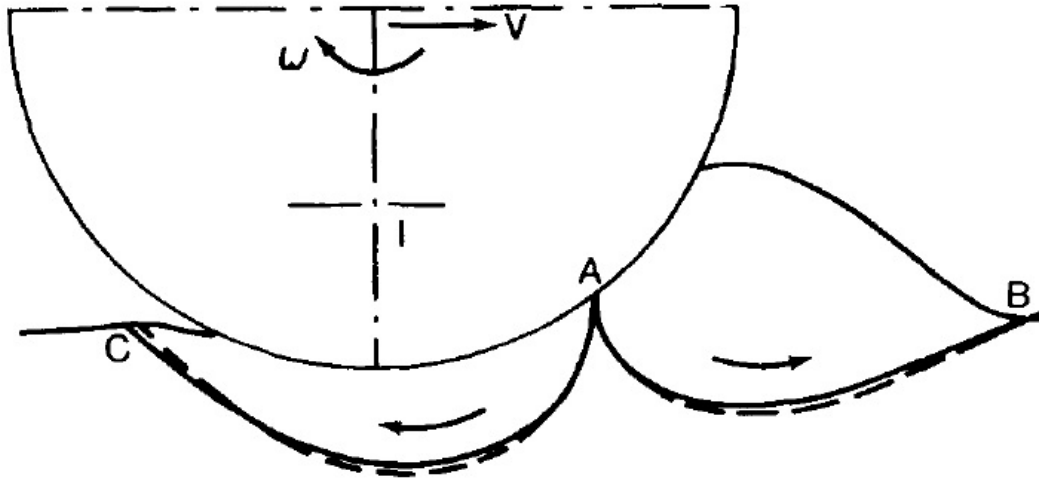
Şekil 2.45 : Kayma gerilmesinin ve normal gerilmenin temas açısı ile değişimi (Wong, 2001).

Kayma gerilmesi aynı zamanda normal gerilmenin de fonksiyonu olduğundan, temas açısına göre kayma gerilmesinin değişimi normal gerilme değişimine benzer olmaktadır. İki gerilme de tekerleğin en alt noktasının biraz önünde maksimum değerlerine ulaşmışlardır.

2.4.7 Toprak-tekerlek etkileşiminde kayma yer değiştirmesi

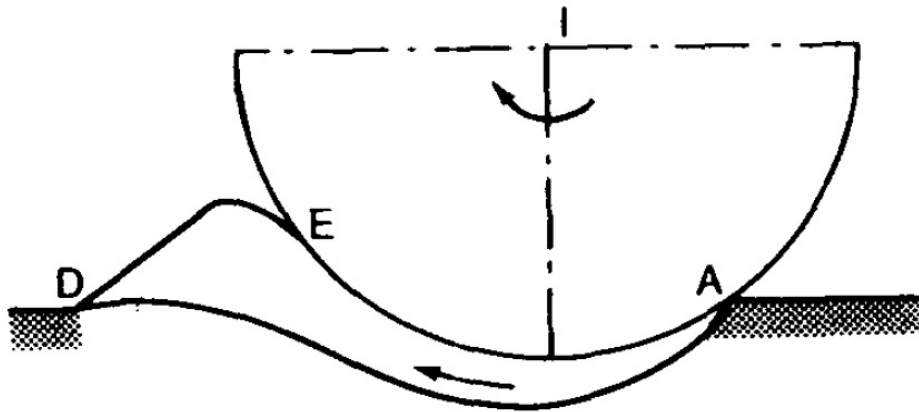
Toprak ile tekerleğin etkileşim yüzeyindeki kayma yer değişmesi, tekerleğin dairesel şekli nedeniyle karmaşık bir hal almaktadır. Buna ek olarak tekerlek kendi ekseni

etrafında dönmesinin yanında, yatay ekseninde de hareket etmektedir. Dolayısıyla hem yatay ekseninde ilerleyen hem de kendi etrafında dönen tekerlek için kayma yer değiştirmesi, tekerleğin dönme hızının yatay eksenindeki bağıl hızına bağlı olmaktadır. Bağıl hızlar nedeniyle toprağın akış çizgileri temas yüzeyinde iki bölge oluştururlar (Wong, 2001).



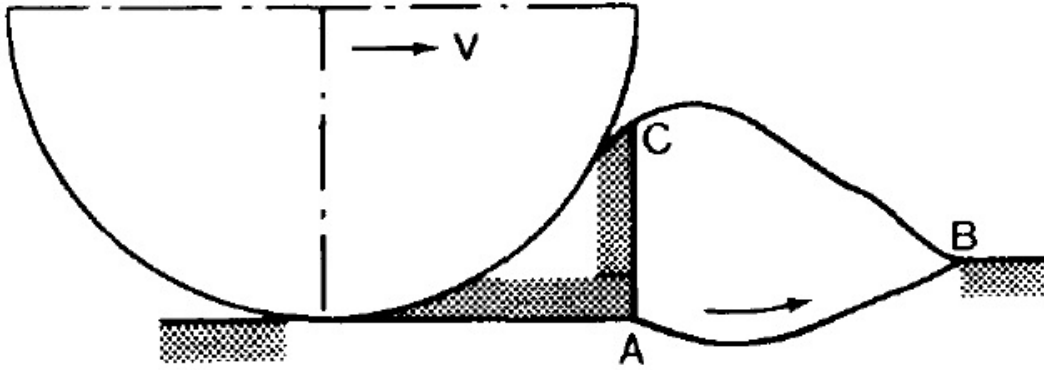
Şekil 2.46 : Toprağın tekerlek ile temas yüzeyinde meydana gelen akış bölgeleri (Wong, 2001).

Şekil 2.46'da görüldüğü gibi toprak önce V hızında tekerlek tarafından itilerek ilk akış bölgesini oluşturur. Daha sonra kayan tekerlek toprağı hareket yönünün tersine iterek ikinci akış bölgesini oluşturur. Akış bölgelerinin şekli, tekerleğin kayma yüzdesi ile değişir. Örnek olarak kayma yüzdesi %100 olan tekerlekte öne doğru itilen toprağın akış çizgisi oluşmaz. Tam tersi fren yaparak tekerleğini kilitleyen araçta toprağın sadece önünde akış çizgisi oluşur.



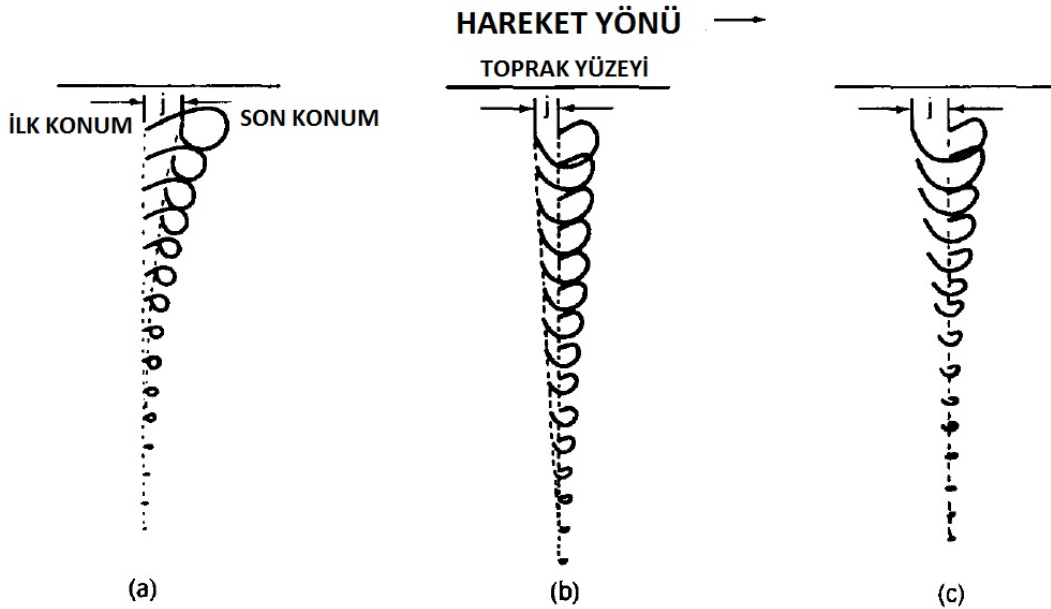
Şekil 2.47 : Kayma yüzdesi %100 olduğunda toprak akış çizgileri (Wong, 2001).

Tahrik edilen tekerleğin toprak ile etkileşiminde, temas yüzeyindeki bir toprak tanesinin son konumu ilk konumunun gerisinde olur.



Şekil 2.48 : Frenlenerek kilitlenmiş tekerleğin altındaki toprakta akış çizgileri (Wong, 2001).

Fren yapan ya da bir çekici tarafından çekilen tekerlek ile toprağın etkileşiminde, temas yüzeyindeki bir toprak tanesinin son konumu ilk konumunun gerisinde olur. Toprak tanelerinin son konumuyla ilk konumu arasındaki fark, kayma yer değiştirmesi olarak adlandırılır. Bir toprak hacmi son konumuna göre ne kadar çok hareket ederse, bu toprak hacmi o kadar kayma gerilmesi dolayısıyla çekiş kuvveti yaratır.



Şekil 2.49 : Kıl tanelerinin akış çizgileri. (a) Çekilen tekerlek, (b) tahrik edilen tekerlek %37 kayma, (c) tahrik edilen tekerlek %63 kayma.

Tekerleğin kayması nedeniyle meydana gelen kayma yer değiştirmesi j ile ifade edilir. Tekerleğin kayması, aracın gerçek hızı ile tekerleğin gerçek hızı arasındaki fark olarak açıklanabilir. Tekerleğin kayması, tekerleğin ileri hareketinden daha hızlı dönmesi sonucu oluşur. Tekerleğin dairesel temas yüzeyi nedeniyle tekerleğin kayma hızı, temas yüzeyi açısına bağlı olarak değişir. Şekil 2.50’de kayma hızının temas yüzeyindeki hareketi gösterilmiştir. Kayma hızının ifade eden V_j , tekerlek-toprak etkileşim yüzeyine teğettir (Matthew, 2012).

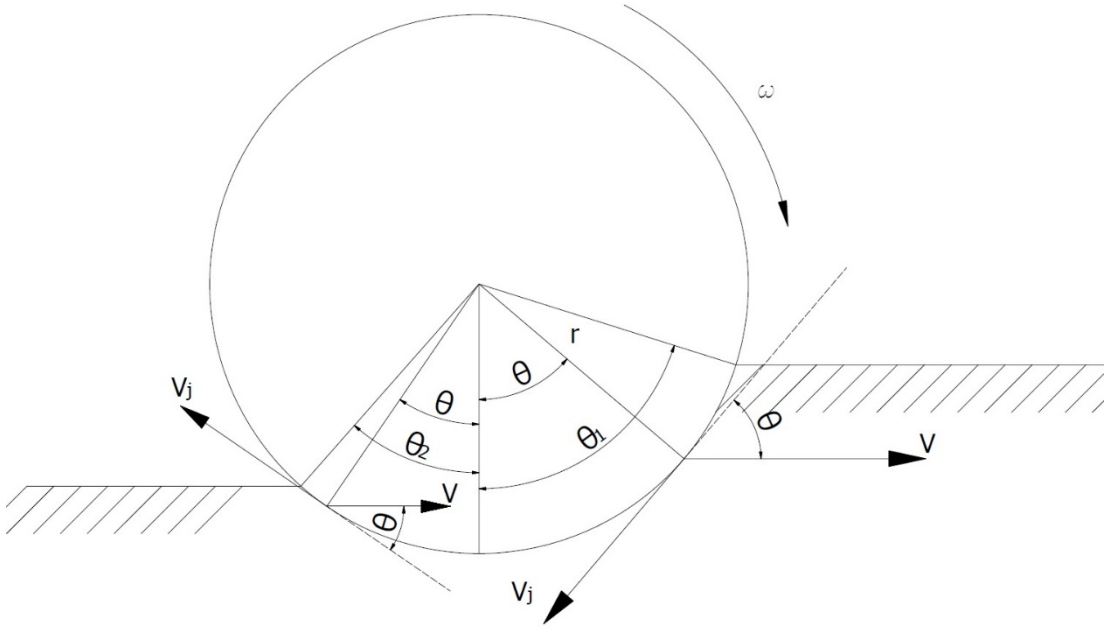
$$V_j = r\omega - V\cos\theta \quad (2.81)$$

$$i = \frac{r\omega - V}{r\omega} \quad (2.82)$$

$$V = r\omega(1 - i) \quad (2.83)$$

$$V_j = r\omega(1 - (1 - i)\cos\theta) \quad (2.84)$$

Denk. 2.84, kayma hızının temas açısına bağlı fonksiyonudur. Denklemden yer alan i , kayma yüzdesidir.



Şekil 2.50 : Kayma hızının temas yüzeyindeki hareketi.

Denklemden V , tekerleğin yataydaki gerçek hızıdır ve araç hızını temsil etmektedir. Temas yüzeyindeki kaymadan dolayı meydana gelen yer değiştirme miktarı j , kayma hızının keyfi bir zaman aralığında integralinin alınması ile Denk. 2.85’de gösterildiği gibi hesaplanabilir (Bekker, 1969).

$$j = r \int_0^t \omega(1 - (1 - i)\cos\theta)dt \quad (2.85)$$

Tekerleğin açısal hızı ω , temas yüzeyi açısı cinsinden Denk. 2.86’da gösterildiği gibi yazılır.

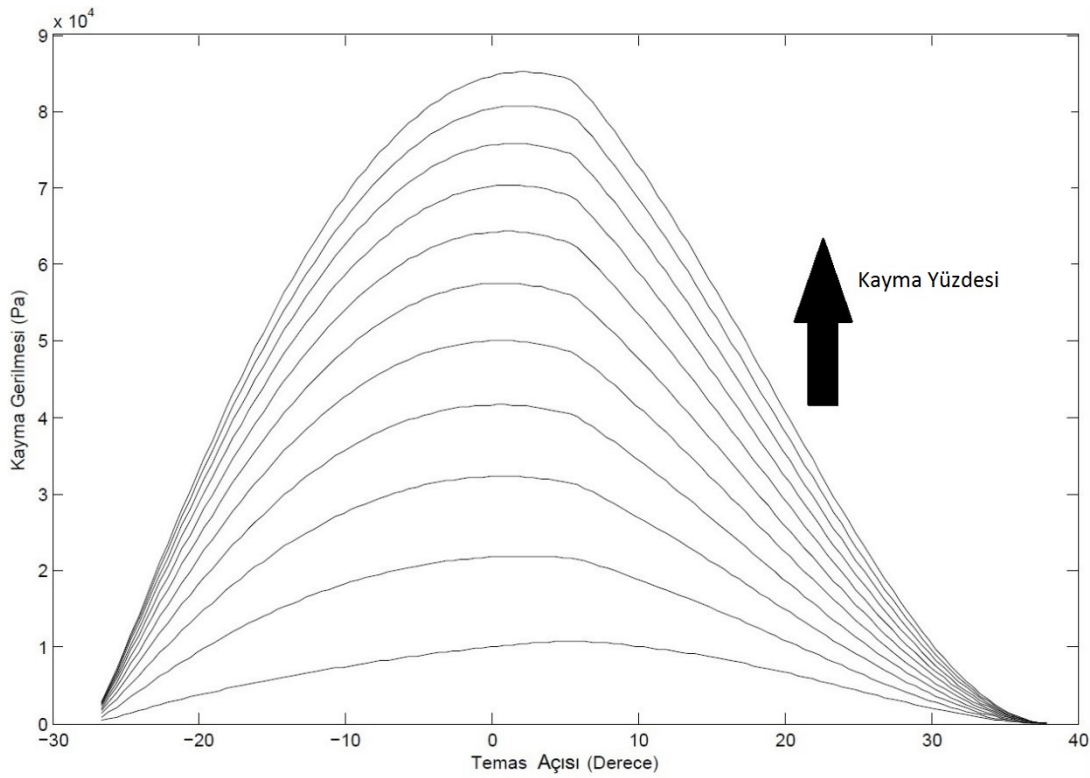
$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.86)$$

Açısal hızın temas yüzeyi açısı ile dönüşümü Denk. 2.85’de yerine konursa kayma yer değiştirmesi temas açısı cinsinden yazılabilir.

$$j = r \int_{\theta}^{\theta_1} (1 - (1 - i)\cos\theta)d\theta \quad (2.87)$$

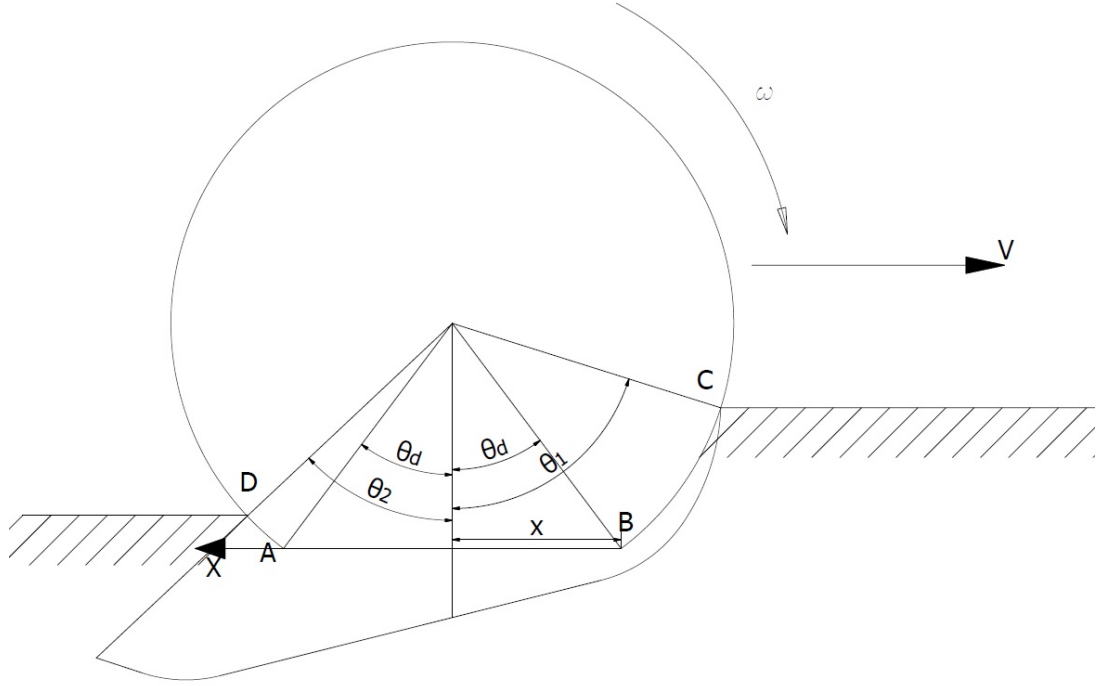
$$j(\theta) = r[\theta_1 - \theta - (1 - i)(\sin\theta_1 - \sin\theta)] \quad (2.88)$$

Şuana kadar anlatılan kayma yer değiştirmesi denklemi, rijit davranışlı lastik için geçerli olmaktadır. Kayma yer değiştirmesi dolayısıyla kayma gerilmesini en çok etkileyen faktör, kayma yüzdesidir. Şekil 2.51’de, artan kayma yüzdesi ile temas yüzeyindeki kayma gerilmesi dağılımının değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.51 : Kayma yüzdesi ile rijit lastikte temas yüzeyindeki kayma gerilmesinin değişimi.

Elastik lastik için durum biraz daha farklıdır. Kayma yer değıştirmesi denklemi için lastiğin deforme olan düzleşmiş bölgesi için ayrı bir denklem formu kullanmak gerekir. Bunun nedeni, deforme olan bölge düz olduğu için dairesel temas yüzeyi için çıkarılan denklem burada kullanılamaz.



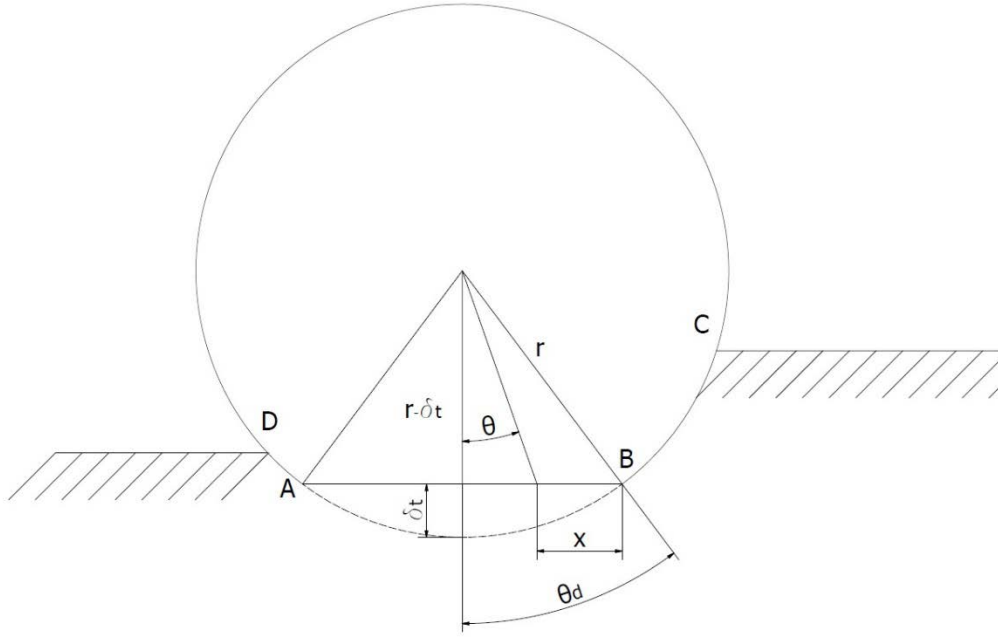
Şekil 2.52 : Elastik lastik davranışında kayma yer değıştirmesi.

Şekil 2.52’de elastik davranıştaki bir lastikte kayma yer değıştirmesi bölgeleri gösterilmiştir. Temas yüzeyini AD ve BC bölgelerinde meydana gelen kayma yer değıştirmesi rijit lastik metodu ile hesaplanabilir. Ancak AB bölgesinde kayma hızı, deforme olan bölgenin düz olması nedeniyle sabit olur. Sabit kayma hızı nedeniyle AB bölgesinde kayma yer değıştirmesi tekerleğin kayma yüzdesine ve x uzunluğuna bağlıdır. Bu uzunluk daha önce dairesel lastikte temas açısı ile aynı göreve sahiptir ve hesap yapılacak noktanın deformasyonun başladığı yerden uzaklığını ifade etmektedir. Deforme olan bölgede kayma hızı sabit olduğundan, bu bölgedeki kayma yer değıştirmesi x uzunluğu ile orantılı bir şekilde artan karakteristik gösterir (Wong, 2001).

$$j_{AB} = ix \quad (2.89)$$

Denk. 2.89, AB bölgesindeki kayma yer değıştirmesini ifade eder. Görüldüğü gibi bu bölgedeki kayma yer değıştirmesi doğrusal bir fonksiyondur. Temas yüzeyi bütün

denklemlerde θ temas açısı ile ifade edildiğinden, x uzunluğu da temas açısı ile ifade edilmelidir.



Şekil 2.53 : Deforme olan bölgede x uzunluğunun temas açısı cinsinden ifadesi.

Şekil 2.53’de gösterilen açılardan yararlanılarak bilinen bir θ açısı için x uzunluğunun ifadesi aşağıdaki gibi kurulabilir.

$$x = (r - \delta_t)(\tan\theta_d - \tan\theta) \quad (2.90)$$

Elastik lastikte kayma yer değiştirmesini hesaplamak için, temas yüzeyini üç bölgeye ayırmıştık. Kayma yer değiştirmesinin, temas yüzeyi boyunca ilerledikçe arttığını daha önce belirtmiştik. Bu nedenle kayma yer değiştirmesi her bölgede bir önceki kayma yer değiştirmesinin üzerine eklenerek bulunabilir. Bir önceki bölgede elde edilen son kayma yer değiştirmesi, diğer bölgede hesaplanan kayma yer değiştirmesinin üzerine eklenerek o bölgedeki kayma yer değiştirmesi bulunmuş olur.

$$\theta_d \leq \theta \leq \theta_1 \quad (2.91)$$

$$j_{BC}(\theta) = r[\theta_1 - \theta - (1 - i)(\sin\theta_1 - \sin\theta)]$$

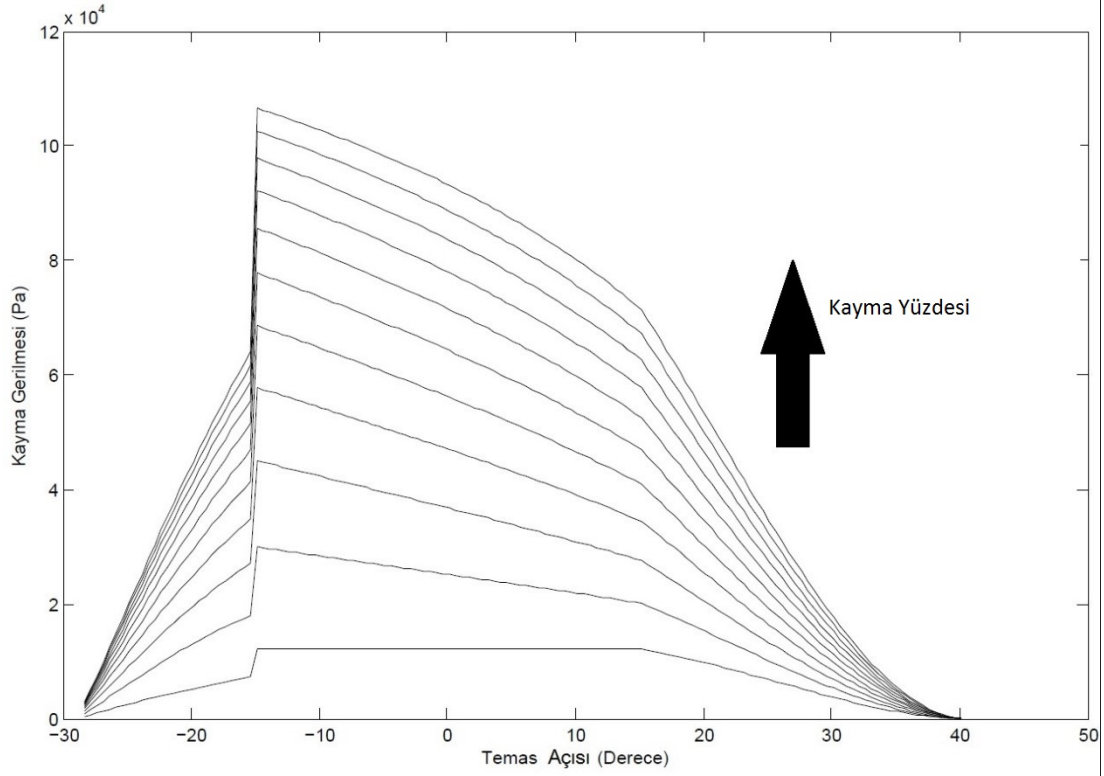
$$-\theta_d \leq \theta < \theta_d \quad (2.92)$$

$$j_{AB}(\theta) = j_{BC}(\theta_d) + i(R - \delta_t)(\tan\theta_d - \tan\theta)$$

$$\theta_2 \leq \theta < -\theta_d \quad (2.93)$$

$$j_{AD}(\theta) = j_{AB}(-\theta_d) + r[-\theta_d - \theta - (1 - i)(\sin(-\theta_d) - \sin\theta)]$$

Şekil 2.54’de elastik lastik temas yüzeyindeki kayma gerilmesi dağılımının, kayma yüzdesi ile değişiminin bir örneği gösterilmektedir. Grafikte de görüldüğü üzere grafik 3 bölgeden oluşmaktadır ve deforme olan bölgede kayma gerilmesi neredeyse lineer olarak artmaktadır. Tekerleğin ön tarafı olan (grafikğin en sağ tarafı) rijit lastikteki benzer bir davranış göstermiştir.



Şekil 2.54 : Kayma yüzdesi ile elastik lastikte temas yüzeyi boyunca kayma gerilmesi değişimi.

2.5 NRMM İle Araç Performansının Modellenmesi

NATO tarafından geliştirilen bilgisayar tabanlı NRMM modeli, temelde denklemler ve algoritma takımlarından oluşan ve bir aracın arazide denge durumundaki hareketlilik performansının belirlenmesine yarayan bilgisayar programıdır. NRMM modelinin birincil performans belirleme yöntemi aracın maksimum hızıdır (Ahlvin, 1992).

NRMM modeli, temelde üç ana yazılım modülünden oluşur. Bunlar; taşıt dinamiği modülü, engel geçiş performansı modülü ve ana tahmin modülüdür. Ana tahmin modülü de alt modüllere ayrılır. Bunlar; yol üstü modülü ve yol dışı modülüdür. İsimlerinden de anlaşılacağı üzere yol üstü modülü asfalt gibi sert yüzey üzerinde hesap yaparken, yol dışı modülü toprak gibi gevşek malzemeden oluşan yüzey

üzerinde hesap yapar. Buradan da anlaşılacağı üzere NRMM hem asfalt yol hem toprak yol için kullanılabilen bir performans modelidir. Ana modüllerden biri olan taşıt dinamiği modeli de, adından anlaşılacağı üzere taşıt dinamiği hesaplarını yapan modüldür. Bu modülde taşıtın süspansiyon davranışı, dönme yarı çapı özelliklerine göre dönme kabiliyeti, lastiklerin davranışı, motor ve aktarma organlarına göre taşıt çekiş denklemleri gibi taşıt ile ilgili hesaplar yapılır. Üçüncü ana modül olan engel geçiş performansı modülünde ise, çeşitli engeller yaratılarak taşıtın bu engellerden geçişi ile ilgili denklemler bulunur. Engeller çok çeşitli olabilmektedir. Tümsek çukur gibi engeller isteğe göre bu modül ile yaratılabilir (Taheri vd. 2014).

Aracın arazi üzerindeki performansının hesaplanması için bir senaryo modülü kullanılır. Senaryo modülü, hem arazi özelliklerini hem de araç ile ilgili özellikleri barındırır. Örnek vermek gerekirse senaryo modülünde toprak ile ilgili etkili olan hava koşulları ve arazideki kaçınılması gereken bitki örtüsü ; araç için ise şoförün reaksiyon süresi gibi parametreler bulunur. Toprak ile ilgili parametrelerin ve bitki örtüsü özelliğinin bulunduğu diğer bir yan modül de arazi modülüdür. Tüm bu modüller bir algoritma akışı ile bir aracın arazideki hareket kabiliyetinin belirlenmesinde rol oynar (Ahlin, 1992).

NRMM modeli, bir aracın arazideki performansını sadece maksimum hız olarak vermez. Örnek vermek gerekirse bir arazide ağaçlar bulunuyor ise bu ağaçların arasından aracın geçip geçemeyeceğini, ağaçların arasından geçemiyor ise ağaca çarpmadan durabileceği maksimum hızı şoförün tepkisini de hesaba katarak belirleyebilir.

NRMM modeli tamamen deneysel bir hesaplama yazılımıdır. Bütün denklemler deneysel katsayılarla dayanır. NRMM modelinin kullandığı toprak ile ilgili deneysel parametreler, daha önce anlatılan konik penetrasyon cihazı ile belirlenir. Konik penetrasyon cihazı ile elde edilen boyutsuz koni indeksi deneysel algoritmalarda kullanılarak maksimum araç hızı belirlenir. Ayrıca koni indeksi, engel geçme performansı modülünde de kullanılır. Bilinen bir araç ile birçok toprak çeşidi ile yapılan testler sonucunda bir aracın bilinen bir engeli aşabilmesi için toprağın sahip olması gereken koni indeksi belirlenir. Böylece, bilinmeyen bir arazide koni indeksi ölçümü basit bir şekilde yapıldığında engeli aşp aşamayacağı belirlenebilir (Bekker, 1956).

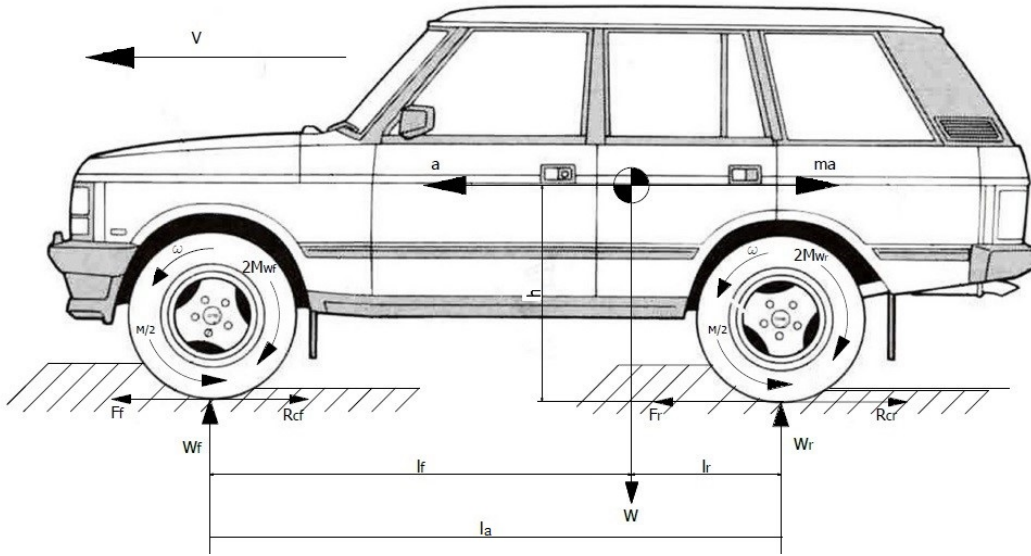
NRMM gibi deneysel modellerin kullanılabilmesi için, bilinen bir aracın çeşitli arazi koşullarında test edilmiş olması gerekmektedir. Çünkü; NRMM' nin kullandığı araç parametreleri, gerçekten var olan bir araç ile yapılan testler ile belirlenir. Deneysel veriler teorik bir alt yapıya sahip olmadığından var olmayan bir araç için bu girdileri önceden bilmek imkânsızdır. Bu nedenle, bir arazi aracının tasarımı sırasında bu modeli kullanarak tasarım optimizasyonuna gidilmesi mümkün olmaz. Buna bağlı olarak NRMM modelini oluşturan NATO, beraberinde toprak ve araç verilerinden oluşan bir arşiv oluşturmuştur (Ahlvén, 1992).

3. TEORİK ARAÇ PERFORMANSININ MODELLENMESİ İÇİN YÖNTEM

Toprak ile tekerlek etkileşiminde, şimdiye kadar tekerleğin bilinen kayma yüzdesi değerlerinde topraktan alınabilecek çekiş kuvveti ve direnç kuvvetleri hesaplandı. Ancak araç bir bütün olarak düşünüldüğünde, (motor, şanzıman, diferansiyel) tekerleğin kayma yüzdesi i sürekli değişkendir. Bu nedenle topraktan gelen çekiş kuvveti de sürekli değişken olacaktır. Bu sürekli değişim bir aracın performans karakteristiğini etkileyecektir.

Toprak çekiş kuvvetine etki eden en önemli parametre, kayma yüzdesidir. Bu nedenle bir aracın hızlanma karakteristiğini hesaplamak için, değişken kayma yüzdesinin sürekli hesaplanması gerekir. Tekerleğin kayması, aracın gerçek hızı ile tekerlek hızından dolayı aracın sahip olması gereken teorik hızı arasındaki farktan dolayı oluşur. Aracın hızı da topraktan gelen çekiş kuvvetinden dolayı oluşan ivmeye bağlı olduğundan, kayma yüzdesini bilmeden aracın hızını hesaplamak imkânsız olur. Bu nedenle bir aracın zamana bağlı hızlanma grafiğini çıkartmak için bu tezde zaman, dt uzunluğunda küçük zaman aralıklarına bölünmüştür. Zaman aralıklarına bölmedeki amaç, değişken kayma yüzdesi ve dolayısıyla değişken çekiş kuvvetini hesaplamaktır. Aracın başlangıç hızı ve kayma yüzdesi “0” olarak kabul edilir. Bu yöntem ile birinci zaman aralığında ilk hız ve kayma yüzdesi “0” olduğundan toprak çekişi bu değerlerle bulunur. Toprak çekişi bilindiğine göre aracın ilk ivmelenmesi de bulunmuş olur. Kayma yüzdesi için de tekerlek etrafındaki net moment hesaplanabildiğinden, aracın döner kütlelerinin toplam eylemsizliği kullanılarak tekerleğin açısal ivmesi hesaplanmış olur. Böylece, hem aracın hem de tekerleğin hızlanma ivmeleri bulunmuş olur. Bu aşamada zaman aralıklarının uzunluğu dt kullanılarak, ivmeler bilindiğinden araç hızı ve tekerlek dönme hızı hesaplanabilir. Hesaplanan hızlar ile bir zaman aralığının sonundaki kayma yüzdesi hesaplanmış olur. Bu kayma yüzdesi bir sonraki zaman aralığında kullanılarak toprak çekiş kuvveti hesaplanabilir. Ayrıca toprak çekiş kuvveti ve toprakta batma miktarı düşey yüke de bağlı olduğundan, oluşan araç ivmesi kullanılarak yük transferi fonksiyonu yazılır ve arka tekerlekteki ivmelenmeden dolayı oluşan ek düşey yük hesaba

katılabilir. Şekil 3.1’de toprak üzerindeki bir arazi aracına etki eden kuvvetler gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Toprak üzerindeki bir araca etki eden kuvvetler.

Ağırlık merkezinin yeri nedeniyle ön aks ve arka aksta farklı düşey yükler oluşur. Farklı düşey yükler farklı batma derinliğine yol açacağından topraktan alınabilecek çekiş kuvveti farklı olur. Şekil 3.1’de ön akstan alınabilecek çekiş kuvveti F_f , arka akstan alınabilecek çekiş kuvveti de F_r olarak gösterilmektedir. Ters yönde gösterilen R_{cf} ve R_{cr} kuvvetleri de ön aksta meydana gelen hareket direnci ve arka aksta meydana gelen hareket direncidir. Tekerlek etrafındaki net moment ise, ön aks için M_{tf} , arka aks için M_{tr} olarak gösterilmektedir.

Çekiş kuvvetinin hesaplanması için öncelikle tekerleklerdeki düşey yüklerin hesaplanması gerekir. Tekerleklerdeki düşey yükler, aracın hızlanma ivmesinden etkileneceğinden, ivmenin bir fonksiyonu olarak yazılır.

$$W_r = \frac{Wl_f + mah}{2 * l_a} \quad (3.1)$$

$$W_f = (W - 2 * W_r)/2 \quad (3.2)$$

Düşey yükler ivmeden dolayı oluşacak yük transferi de dikkate alınarak Denk. 3.1 ve 3.2 ‘deki gibi oluşturulur. Araç ivmesi a , daha önce anlatılan dt zaman aralıklarının her birinde hesaplanıp bir sonraki zaman aralığında kullanılacaktır. Başlangıç değeri “0” alınarak ilk zaman aralığında hesaplara başlanır. Düşey yüklerin hesaplanmasının ardından lastiklerin çalışma modunun (elastik veya rijit) belirlemesi

gerekir. Çalışma modunun belirlenmesi için Denk. 2.48 kullanılarak kritik basınç ön ve arka lastik için hesaplanır.

$$p_{gf,kr} = \left[k_c/b + k_\phi \right]^{1/(2n+1)} \left[\frac{3W_f}{(3-n)b\sqrt{D}} \right]^{2n/(2n+1)} \quad (3.3)$$

$$p_{gr,kr} = \left[k_c/b + k_\phi \right]^{1/(2n+1)} \left[\frac{3W_r}{(3-n)b\sqrt{D}} \right]^{2n/(2n+1)} \quad (3.4)$$

Lastik üreticileri tarafından sağlanan ortalama yer basıncı grafiği kullanılarak bilinen p_i şişirme basıncı ve hesaplanan düşey yükler ile ortalama yer basıncı bulunur. Lastiğin ortalama yer basıncı hesaplanan kritik basınçtan fazla ise, lastik rijit davranacaktır. Eğer ortalama yer basıncı kritik basınçtan küçük çıkar ise, lastik deforme olarak temas yüzeyinde ortalama yer basıncı olana kadar temas yüzeyini genişletir. Lastiğin rijit davranması durumunda tekerleğin batma miktarı ve bu batma miktarındaki hareket direnci aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$z_0 = \left[\frac{3W}{b(3-n) \left(k_c/b + k_\phi \right) \sqrt{D}} \right]^{(2/(2n+1))} \quad (3.5)$$

$$R_c = \frac{1}{(3-n)^{(2n+2)/(2n+1)}(n+1)b^{1/(2n+1)} \left(k_c/b + k_\phi \right)^{1/(2n+1)} \left[\frac{3W}{\sqrt{D}} \right]^{(2n+2)/(2n+1)}} \quad (3.6)$$

Lastiğin elastik davranması durumunda, lastiğin deformasyon miktarının hesaplanması gerekir. Lastiğin deformasyona uğradığında düşey yükün bir kısmı deforme olarak düzleşen bölgede, diğer kısmı ise rijit davranış gösteren deforme olmamış bölgelerde taşınır. Düşey yük toplamı aşağıdaki gibi yazılır.

$$W = bp_{gr}l_t + W_{cu} \quad (3.7)$$

Denklemdaki ilk terim deforme olan bölgede taşınan yükür. Bu bölgede temas yüzeyi basıncı ortalama yer basıncı p_{gr} 'ye eşittir. Rijit bölgede taşınan yük ise deformasyon miktarı olan δ_t 'ye bağlı bir fonksiyon ile bulunur.

$$W_{cu} = b \left(\frac{k_c}{l_t} + k_\phi \right) \sqrt{D} (z_0 + \delta_t)^{n-1} X \frac{\left[(3-n)(z_0 + \delta_t)^{3/2} - (3-n)\delta_t^{3/2} - 3z_0\sqrt{\delta_t} \right]}{3} \quad (3.8)$$

Deformasyon miktarının bulunması için iterasyon yöntemi kullanılır. Sıfırdan başlayarak artan deformasyon değerleri için Denk. 3.7 ile hesaplanır. Toplam düşey yük daha önce araç ağırlığı ve ağırlık merkezi kullanılarak bulunduğundan, iterasyon

ile hesaplanan Denk. 3.7'den elde edilen sonuç ile daha önce hesaplanan düşey yük arasındaki fark %1 olana kadar iterasyona devam edilerek deformasyon miktarı bulunmuş olur. Elastik davranıştaki lastik için batma ve hareket dirençleri de aşağıdaki gibi bulunur.

$$z_0 = \left(\frac{p_{gr}}{k_c/b + k_\phi} \right)^{1/n} \quad (3.9)$$

$$R_c = \frac{bp_{gr}^{n+1/n}}{(n+1)(k_c/b + k_\phi)^{1/n}} \quad (3.10)$$

Batma miktarı hesaplandığına göre, lastiğin toprağa giriş ve çıkış açıları θ_1 ve θ_2 hesaplanabilir. Giriş ve çıkış açıları lastiğin toprak ile etkileşimde olduğu temas yüzeyini belirler. Temas yüzeyinde elde edilebilecek çekiş kuvveti Denk. 3.11'de gösterildiği gibi normal gerilmenin bir fonksiyonudur.

$$\tau(\theta) = c + \sigma(\theta) \tan \phi \left(1 - e^{\frac{j(\theta)}{K_w}} \right) \quad (3.11)$$

Normal gerilme, lastiğin dairesel şekli nedeniyle radyal olarak ifade edilmelidir. Temas yüzeyindeki maksimum radyal gerilme, lastiğin yataydaki hareketi nedeniyle lastiğin en alt noktasından bir miktar önde oluşmaktadır. Bu nokta, daha önce anlatılan temas yüzeyindeki iki farklı akış bölgesinin kesişim noktasıdır. Maksimum normal gerilme noktasının önünde ve arkasında oluşan iki farklı bölge için normal gerilmenin temas açısıyla değişimi Denk. 3.12 ve Denk. 3.13 ile bulunur.

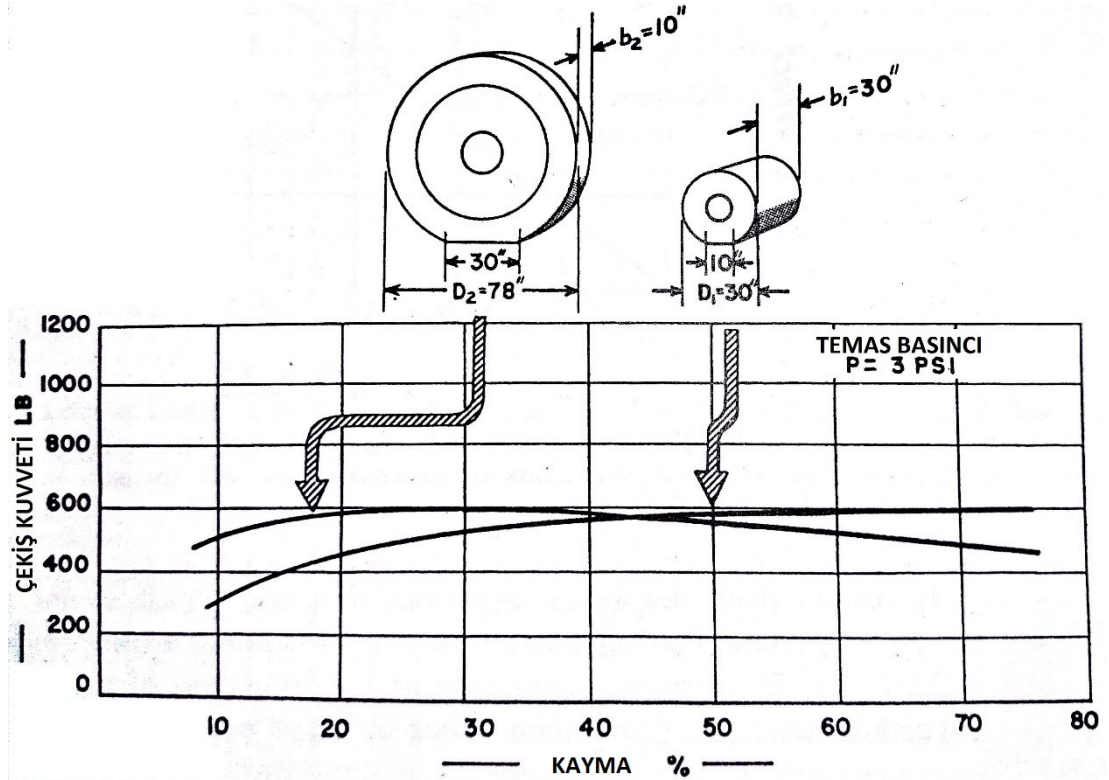
$$\sigma_1(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) [r(\cos \theta - \cos \theta_1)]^n \quad (3.12)$$

$$\sigma_2(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \left\{ r \left[\cos \left(\theta_1 - \frac{(\theta - \theta_2)}{(\theta_m - \theta_2)} (\theta_1 - \theta_m) \right) - \cos \theta_1 \right] \right\}^n \quad (3.13)$$

Elastik lastik için normal gerilme, temas yüzeyindeki üç bölgede hesaplanır. Elastik lastiğin deforme olan bölgesinde basınç, lastiğin ortalama yer basıncına eşit ve sabit olur.

Topraktan alınabilecek çekiş kuvveti en çok tekerleğin kayma yüzdesinden etkilenir. Tekerleğin kayma yüzdesi, toprak ile lastiğin temas yüzeyindeki toprağın yer değiştirme miktarına etki eder. Toprak ne kadar çok yer değiştirmeye zorlanırsa o kadar çok kayma gerilmesi oluşturur. Tekerlek, toprak ile temasa başladığı noktadan

ayrıldığı noktaya kadar yataydaki hareketi ve kendi etrafında dönmesi nedeniyle toprağı hem ileri yönde hem de radyal yönde yer değiştirmeye zorlar. Bu nedenle lastik toprakta ne kadar derinde olursa o kadar çekiş kuvveti yaratır denebilir. Fakat tekerleğin toprakta derinlere gitmesi hareket direncini de arttıracığından, derine batmak bir noktadan sonra dezavantaj olur. Lastiğin toprakta derine batması, lastiğin genişliğinden ve çapından da etkilenir. Lastiğin geniş ama küçük çaplı olması toprakta batmanın az olmasına ve temas yüzeyinin küçük olmasına neden olur. Hareket direnci az olur fakat bununla beraber çekiş kuvveti de küçük olur. Büyük çaplı ve dar lastik düşünüldüğünde lastik daha çok batar fakat bununla beraber büyük çap nedeniyle temas yüzeyi büyür. Temas yüzeyinin büyük olması, çekiş kuvvetinin daha fazla olması demektir. İki tür tekerleğin kayma yüzdesine göre aynı toprakta sahip oldukları çekiş kuvveti Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Temas yüzeyinin toprak çekiş kuvvetine etkisi (Bekker, 1960).

Büyük çaplı lastikte temas yüzeyi büyük olduğundan düşük kayma yüzdelерinde küçük çaplı ve dar lastikten daha çok çekiş kuvveti üretir. Yüksek kayma yüzdelерinde ise geniş lastik nedeniyle çekiş kuvveti, büyük çaplı lastiğe göre daha fazla olur. Fakat grafik sadece çekiş kuvvetini göstermektedir. Hareket direnci küçük

çaplı lastikte büyüğe oranla daha fazla olduğundan net çekiş düşünülürse büyük çaplı lastik daha avantajlı olur.

Temas yüzeyindeki normal gerilme dağılımının hesaplanmasının ardından, kayma yüzdesine (i) bağlı kayma yer değiştirmesi dağılımının hesaplanması gerekir. Araç modeli düşünüldüğünde, durağan hareketten hızlanacak araç için ilk kayma yüzdesi “0” olarak alınır. Kayma yüzdesi daha önce bahsedilen her dt zaman aralığında hesaplanacak ve bir sonraki zaman aralığında kullanılacaktır. Yani bir zaman aralığı için kayma yüzdesi denklemde hem girdi hem de çıktı olmaktadır. Kayma yüzdesi ve temas açısına bağlı kayma yer değiştirmesi rijit lastik için Denk. 3.14 yardımı ile bulunur.

$$j(\theta) = r[\theta_1 - \theta - (1 - i)(\sin\theta_1 - \sin\theta)] \quad (3.14)$$

Rijit lastik için temas yüzeyi sürekli dairesel olduğundan, kayma yer değiştirmesi tek denklem ile bulunabilmektedir. Ancak lastiğin elastik davranış göstermesi durumunda temas yüzeyi üç bölge şeklinde incelenir. Bu üç bölgeden ikisi lastiğin rijit davrandığı ön ve arka bölge iken, üçüncü bölge lastiğin deformasyona uğrayarak düzleştiği bölgedir. Bu bölgede dairesel temas yüzeyi bulunmadığından, kayma yer değiştirmesi temas yüzeyi uzunluğu ile orantılı bir şekilde artan karakteristik gösterir (Denk. 3.15).

$$j_{AB} = j_{BC} + ix \quad (3.15)$$

Denk. 3.15’ de j_{AB} lastiğin deforme olan bölgesini, j_{BC} ise deforme olmadan önce rijit davranan lastiğin ön bölgesini ifade etmektedir. Kayma yer değiştirmesi temas yüzeyi boyunca arttığından, her bölgede hesaplanan kayma yer değiştirmesi bir önceki bölgenin son değerine eklenerek temas yüzeyi boyunca oluşan kayma yer değiştirmesi dağılımı bulunur.

Toprak çekiş kuvveti için gerekli bütün parametreler hesaplandığına göre, kayma gerilmesi dağılımının temas yüzeyi boyunca entegre edilmesi ile topraktan alınabilecek çekiş kuvveti hesaplanabilir.

$$F = rb \left[\int_{\theta_2}^{\theta_1} \tau(\theta) \cos\theta d\theta \right] \quad (3.16)$$

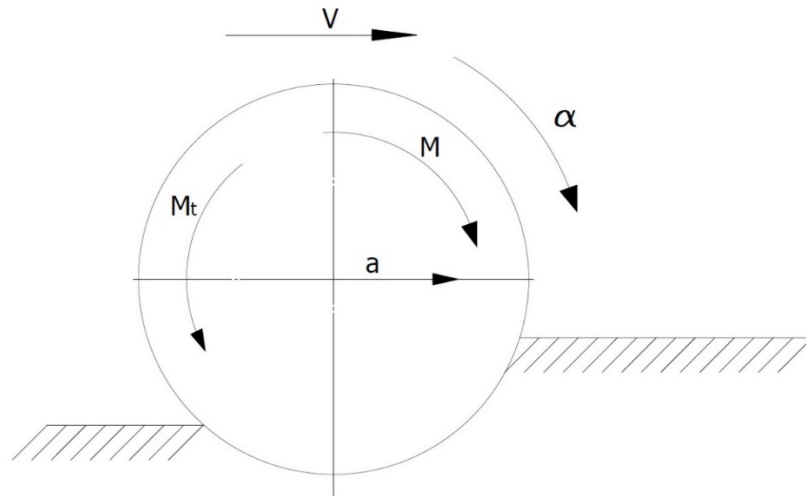
Aracın bütünü olarak düşünüldüğünde ön aks ve arka aks farklı düşey yükler nedeniyle farklı çekiş kuvveti üreteceklerdir. Bu farklı kuvvetlere ön aks için F_f , arka

aks için F_r dersek ve aynı şekilde hareket dirençleri de farklı olacağından dirençlere de ön aks için R_{cf} , arka aks için R_{cr} dersek topraktan alınabilecek net çekiş Denk. 3.17’de gösterilen şekilde olur.

$$DP = F_f + F_r - R_{cf} - R_{cr} \quad (3.17)$$

Toprak ile tekerleğin etkileşiminde hesapladığımız çekiş kuvveti, belirli bir kayma yüzdesi için maksimum çekiştir. Bu çekiş kuvveti tekerlek ekseninde bir moment yaratır ve bu moment motor tarafından tekerleklere gönderilen momentin tersi yönündedir. Kısacası tekerleğin toprağa ilettiği moment nedeniyle toprakta bir çekiş kuvveti oluşur ve bu çekiş aracı hareket ettirir. Çekiş kuvveti nedeniyle oluşan moment, motor tarafından tekerleklere gönderilen momentten fazla ise topraktan maksimum çekiş alınamaz. Bu durumda aracı hareket ettiren çekiş kuvveti motor momentini, şanzıman ve diferansiyel oranları ve tekerlek çapı kullanılarak hesaplanır. Tam tersi motordan tekerleklere gelen moment, toprağın maksimum çekiş kuvveti nedeniyle tekerlek üzerinde oluşan momentten fazla ise, araç maksimum toprak çekiş kuvveti ile hızlanır. Motordan gelen momentin tamamı çekiş kuvveti olarak harcanmadığından, fazlalık olan motor momentini lastiğin dönme hızının artmasına dolayısıyla tekerleklerin kaymasına yol açar. Tekerlek ekseninde kayma gerilmesi nedeniyle meydana gelebilecek maksimum moment Denk. 3.18 yardımı ile bulunur. Ön aks ve arka aks için ayrı moment değerleri oluşacağından bu momentlere M_{tf} ve M_{tr} diyerek ayırabiliriz.

$$M_t = r^2 b \int_{\theta_2}^{\theta_1} \tau(\theta) d\theta \quad (3.18)$$



Şekil 3.3 : Tekerlek ekseninde oluşan momentler.

Tekerlek ekseninde oluşan momentlerin gösterildiği bir şema Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Tekerlek etrafındaki net moment 4x4 bir araç için tüm tekerleklerle etki edeceğinden, hesabı dört tekerlekteki toplam net moment olarak yapmak daha uygun olur. Böylece dört tekerlek için net moment hesaplanmış ve kayma yüzdesi dört tekerlek için bulunmuş olur.

$$TN = M - M_{tf} - M_{tr} \quad (3.19)$$

$$M = M_m i_t i_d \quad (3.20)$$

Yukarıdaki denklemlerde de görüldüğü gibi M momenti, aktarma organlarında yükseltile motor momentidir. Net çekiş kuvveti ve net teker momenti hesaplandığına göre aracın hızlanma ve kayma yüzdesi denklemleri çıkarılabilir.

$$a = DP/m \quad (3.21)$$

Denk. 3.21' de araç için hızlanma ivmesi olan a ifadesi gösterilmiştir. Net çekiş kuvveti ve kütle bilindiğinden basit eylemsizlik hesabı ile hızlanma ivmesi ve yavaşlama ivmesi bu denklem ile bulunabilir.

Aracın ilk hızı ve patinaj yüzdesi “0” olduğundan, yüksek hareket direncinin olduğu batma değerlerinde çekiş kuvveti hareket direncini yenemeyerek net çekiş kuvvetinin negatif çıkmasına yol açabilir. Bu nedenle daha önce bahsedilen dt zaman aralıklarından ilkinde hareket edemeyebilir. Dolayısıyla araç ilk kalkışına %100 kayma ile başlar. Böyle bir durumda DP negatif olmaktadır ve Denk 3.21 ile gösterilen ivme hesabında aracın ilk ivmesinin negatif olmaması için hız “0” iken DP 'nin negatif olması durumunda aracın hareket etmediğini belirten $DP < 0, V = 0: a = 0$ koşulu algoritmaya eklenmiştir. Her dt zaman aralığında bulunan ivme, bir sonraki çevrimde yük transferi nedeniyle düşey yüklerin belirlenmesinde kullanılır (bkz. Denk. 3.1 ve 3.2).

Tekerleklerin kayma yüzdesini bulmak için dört tekerlekteki toplam net moment Denk. 3.19 yardımı ile hesaplanır. Küçük dt zaman aralıklarında hesap yapıldığından tekerleklerdeki açısal ivmeyi hesaplarsak, dt zaman aralığı sonunda tekerleğin dönme hızı bulunmuş olur. Daha önce araç ivmelenmesi de bulunduğu için aynı şekilde dt zaman aralığı sonundaki araç hızı bulunabilir. Bu iki hız yardımı ile kayma yüzdesi bulunabilir. Ancak açısal ivmenin bulunması için, aracın döner kütlelerinin eylemsizliğinin bilinmesi gereklidir. Her bir dönen parçanın döner kütle eylemsizliği

bulunması zor olduğundan deneysel yollarla çıkarılan bir ifade ile döner kütleler araç kütlesine indirgenmiştir (Wong, 2001).

$$MF = 1,04 + 0,0025N_{tf}^2 \quad (3.22)$$

$$N_{tf} = i_t i_d \quad (3.23)$$

Denk. 3.22 ile ifade edilen MF (mass factor) döner kütlenin araç kütlesi cinsinden oranıdır ve bu oran toplam çevrim oranı N_{tf} 'nin bir fonksiyonudur. Bu iki denklem ile, döner kütlenin araç ivmesine etkisi aşağıdaki gibi yazılır.

$$F = (1 + MF).m.a \quad (3.24)$$

Tekerleğin kayma hızını bulmak için, açısal ivmenin dolayısıyla döner kütle eylemsizliğinin bulunması gerekir. Döner kütlenin araç kütlesine indirgenmiş hali kullanılarak döner kütle eylemsizliği bulunabilir. T herhangi bir döner kütleye uygulanan moment ise, Denk. 3.25 bu momentin döner kütle ile ilişkisini vermektedir.

$$T = I.\alpha = F.r = MF.m.a.r \quad (3.25)$$

$$a = \alpha * r \quad (3.26)$$

$$T = I * \alpha = MF * m * \alpha * r^2 \quad (3.27)$$

$$I = MF * m * r^2 \quad (3.28)$$

$$I = MF * m * (0,5 * D)^2 \quad (3.29)$$

Denk. 3.29 ile döner kütle eylemsizliği, araç kütlesine indirgenmiş döner kütle oranı cinsinden bulunmuş olur. Böylece tekerleklerdeki açısal ivme Denk. 3.30 ile hesaplanabilir.

$$\alpha = \frac{TN}{I} \quad (3.30)$$

Tekerleklerin kaymasına neden olacak TN fazlalık momentinin olmadığını kabul etsek dahi, tekerleklerde halen açısal ivme söz konusudur. Bunun nedeni, aracın hızlanmasıdır. Bu nedenle tekerlekteki açısal ivme iki farklı nedenden oluşur. Birincisi araç ivmesinden dolayı tekerleklerle yansıyan açısal ivme α_1 , diğeri ise fazlalık moment nedeniyle tekerleğin kaymasına yol açan açısal ivme α_2 'dir. Bu nedenle toplam açısal ivme;

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (3.31)$$

şeklinde yazılır.

$$\alpha_1 = a/r \quad (3.32)$$

$$\alpha_2 = \frac{TN}{I} \quad (3.33)$$

Tekerlek açısal ivmesi ve araç hızlanma ivmesi bilindiğine göre, tekerlek hızından dolayı aracın sahip olması gereken teorik hız V_t ve aracın gerçek hızı V ifadeleri yazılabilir.

$$dV = a \cdot dt \quad (3.34)$$

$$dV_t = \alpha \cdot dt \cdot r \quad (3.35)$$

Denk. 3.34 ve 3.35 her dt zaman aralığında araç gerçek hızında ve teorik hızında meydana gelen değişimi ifade etmektedir.

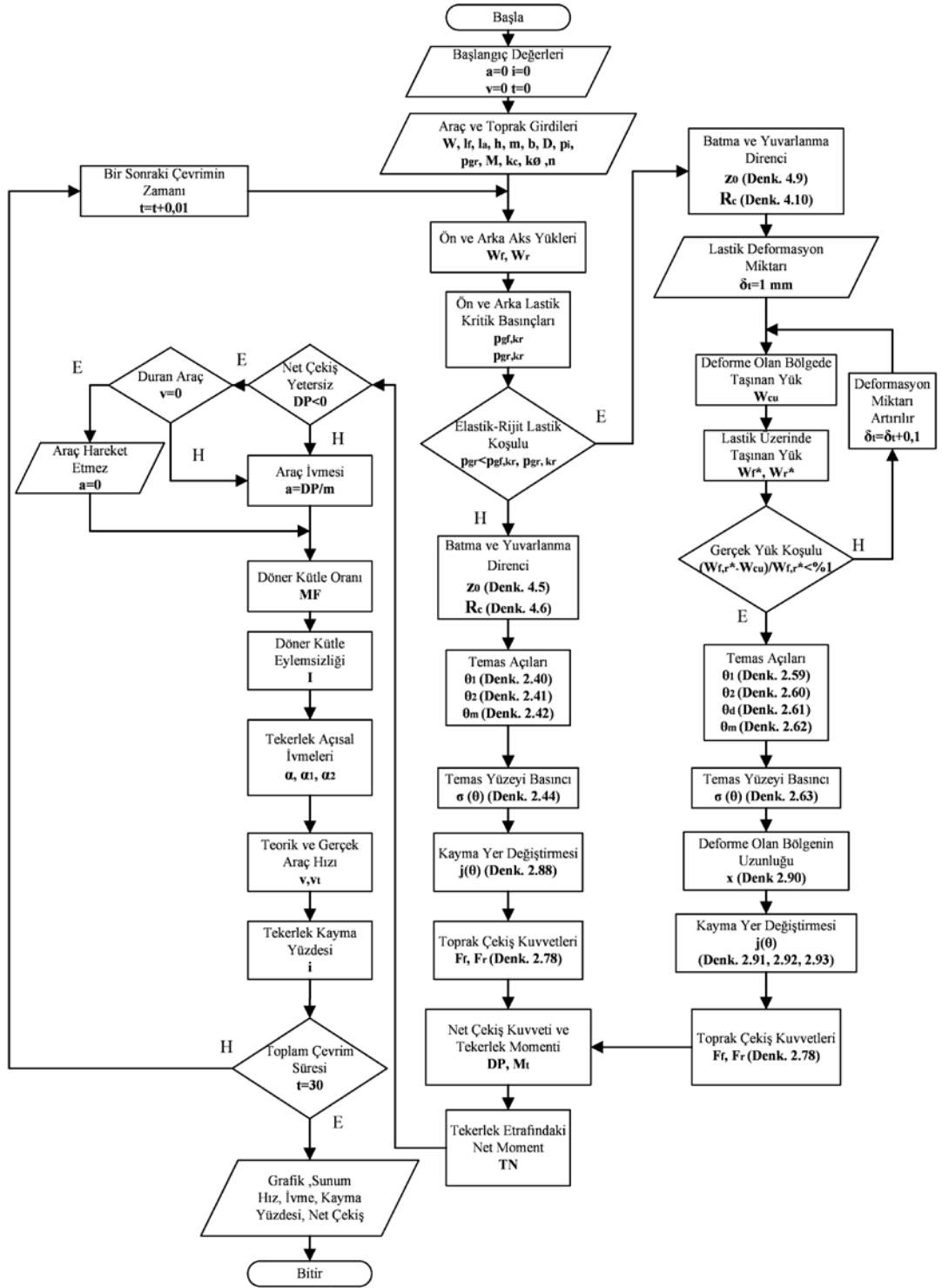
$$V(n+1) = V(n) + dV(n) \quad (3.36)$$

$$V_t(n+1) = V_t(n) + dV_t(n) \quad (3.37)$$

Denk. 3.36 ve 3.37 ifadelerinde geçen n çevrim basamağını göstermektedir. Her dt zaman aralığı bir çevrim basamağını oluşturmaktadır. Bu şekilde her çevrim basamağında bir sonraki basamakta kullanılacak hızlar bulunmuş olur. Teorik hız ve gerçek hız arasındaki fark kullanılarak tekerleklerin kayma yüzdesi hesaplanabilir.

$$i = \frac{V_t - V}{V_t} \quad (3.38)$$

Her çevrim basamağında hesaplanan kayma yüzdesi, bir sonraki çevrim basamağında kayma yer değiştirmesi ve dolayısıyla kayma gerilmesinin hesaplanmasında kullanılır. Şekil 3.4'de algoritma akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : Araç modeli algoritma akış diyagramı.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

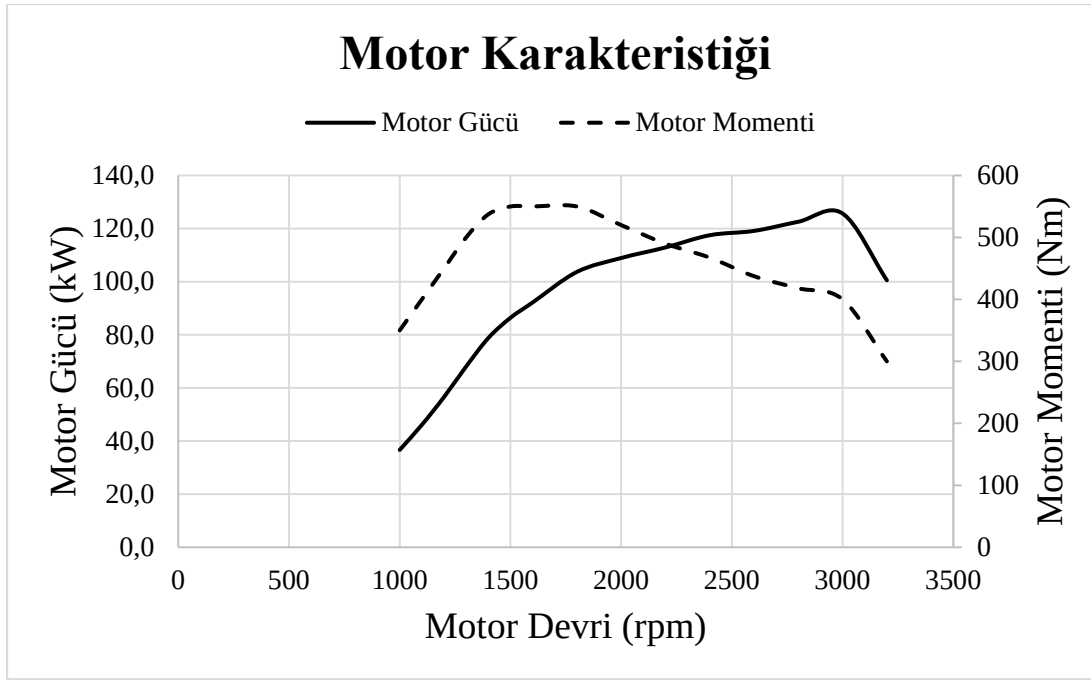
Bu bölüme kadar toprak ile bir araç lastiğinin etkileşiminin yarı deneysel olarak ifadesi anlatılmıştır. Toprak ile etkileşimde olan lastiğin kayma yüzdesine bağlı olarak taşıyabileceği net çekiş kuvveti (DP) aracın performansını etkileyeceğinden, arazi taşıtı tasarımcılarının net çekiş kuvvetini artırmak için araç tasarımında dikkat etmeleri gereken tasarım parametrelerinin neler olduğu bu model yardımı ile bulunabilir.

Bu tezde, bir arazi taşının performansının belirli bir toprak üzerinde belirlenebilmesi için araç parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Aracın toprak-tekerlek etkileşimini etkileyen en önemli özelliği kütlesidir. Bunun yanında ağırlık merkezi, kullanılan lastiklerin çapı ve genişliği de önemli özelliklerdir. Lastiğin etkileşimde bulunduğu arazi üzerinde hangi çalışma durumunda (rijit veya elastik) olduğunun belirlenebilmesi için de, lastik şişirme basıncına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tezde performans eğrileri çıkarılacak aracın referans özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Performans eğrileri çıkarılacak aracın özellikleri.

Özellik	Değer
Araç Kütlesi (kg)	5200
Aks Açıklığı (m)	3,05
Ağırlık Merkezinin Ön Aksa Uzaklığı (m)	1,74
Ağırlık Merkezinin Yerden Yüksekliği (m)	1,1
Maksimum Motor Gücü (kW)	125 kW@3000 rpm
Maksimum Motor Momenti (Nm)	550 Nm@1800 rpm
Lastik Çapı (m)	0,98
Lastik Genişliği (m)	0,27
Lastik Şişirme Basıncı (kPa)	250
Şanzıman Vites Oranları	4,033; 1,81; 1,41; 1; 0,71; 0,61
Diferansiyel Oranı	5,86

Performans eğrileri çıkarılacak araç, maksimum gücün sağlandığı devirde vites değiştirerek hızlanmaktadır. Referans alınan aracın motor karakteristiği eğrileri Şekil 4.1’ de gösterilmektedir.



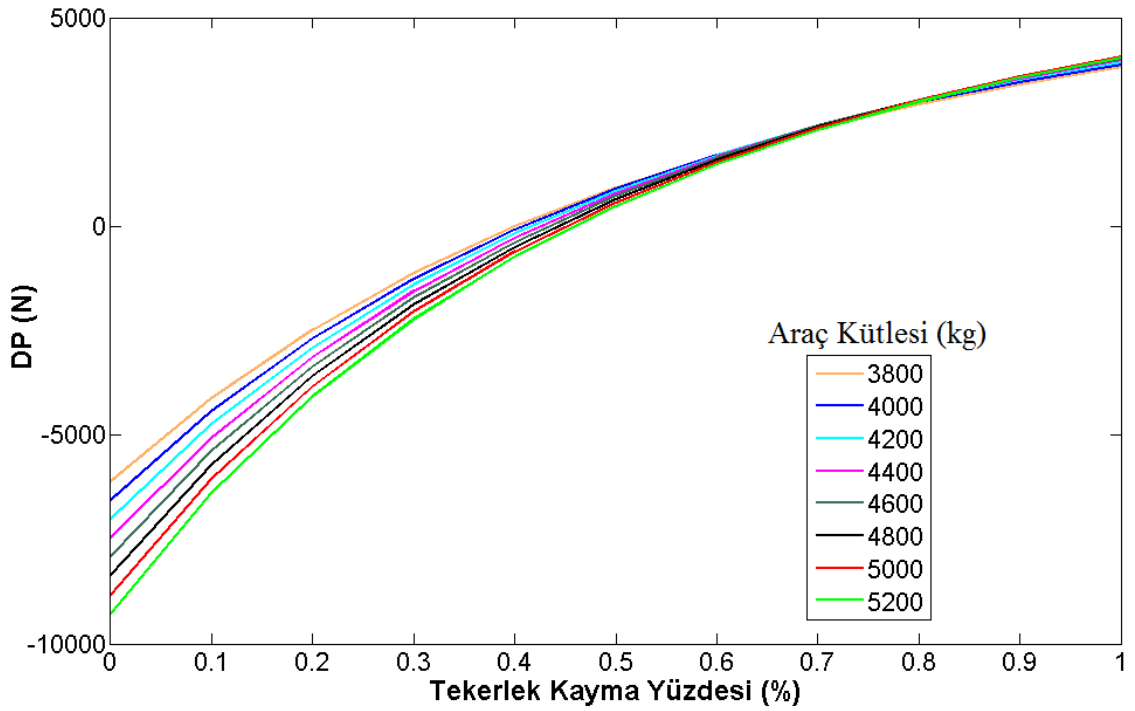
Şekil 4.1 : Performans eğrileri çıkarılacak aracın motor karakteristiği eğrileri.

Toprak ile tekerlek etkileşiminde net çekiş kuvvetini etkileyen araç özelliklerinin başında, aracın ağırlığı gelmektedir. Araç ağırlığı, aracın toprakta batma miktarını etkileyerek hem yuvarlanma direncini artırırken hem de temas yüzeyini artırdığından çekiş kuvvetini artırabilir. Bununla beraber toprak tipine göre de araç ağırlığının etkisi farklı olabilir. Örnek olarak tanecikler arası sürtünme özelliği ağır basan sıkıştırılmış kum ile kohezyon özelliği ağır basan killi toprak, araç ağırlığından farklı şekilde etkilenecektir. Bu iki farklı toprak türünün fiziksel özellikleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Karşılaştırılan iki farklı toprağın fiziksel özellikleri.

Arazi	n	k_c	k_ϕ	c	ϕ
		kN/m^{n+1}	kN/m^{n+2}	kPa	deg
Killi Toprak	0,5	13,19	692,15	4,14	13°
Sıkıştırılmış Kum	0,47	50,936	250,668	0,689	33,3

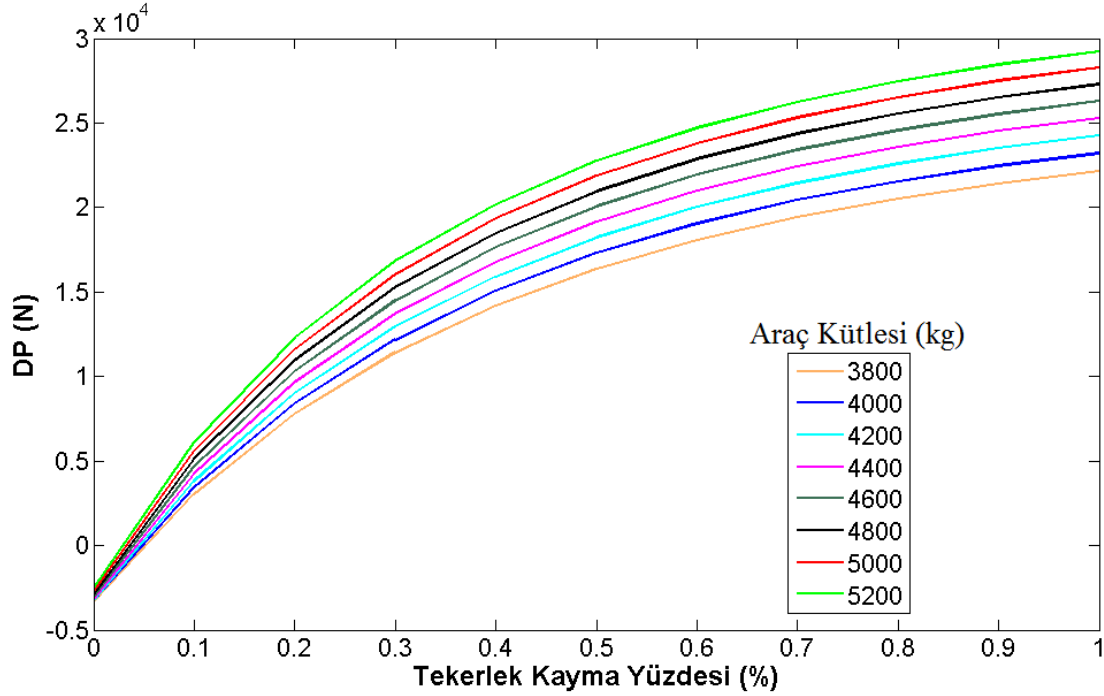
Sıkıştırılmış kum kohezyon kuvvetinden yoksun olduğundan görünür kohezyon c oldukça düşüktür. Bununla beraber iç sürtünme açısı killi toprağın oldukça üstündedir. Bu iki farklı toprak ile yapılan hesaplamalar sonucunda araç kütlesinin net çekiş kuvvetine etkisi Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve araç kütlesi ile değişimi.

Çıkan sonuçlara göre, killi toprakta düşük kayma yüzdelğinde net çekiş kuvveti negatif olmaktadır. Bunun nedeni, toprak tarafından tekerleklere uygulanan yuvarlanma direnci, düşük kayma yüzdelğinde topraktan elde edilen çekişten fazla olmaktadır. Bu nedenle net çekiş kuvveti, belirli bir kayma yüzdesine kadar pozitif olamaz. Düşük araç ağırlıklarında tekerlek toprakta daha az batacağından daha az bir yuvarlanma direnci oluşur. Bunun sonucu olarak düşük kayma yüzdelğinde, araç ağırlığı az iken net çekiş kuvveti daha az negatif taraftadır. Araç ağırlığı arttıkça, düşük kayma yüzdelğinde yuvarlanma direnci ağır basarak net çekiş kuvvetinin daha fazla negatif tarafa düşmesine neden olur. Fakat kayma yüzdesi arttıkça yuvarlanma direnci yenilir ve net çekiş kuvveti pozitif olur. Net çekiş kuvveti pozitif olduktan sonra, kayma yüzdesi arttıkça araç ağırlığının net çekişe etkisi azalmaktadır. Bunun nedeni, araç ağırlığının bir pozitif bir negatif etkisinin olmasıdır. Araç ağırlığı arttıkça lastik toprakta daha çok batacağından, yuvarlanma direnci çok olacaktır. Fakat kayma yüzdesi arttıkça, daha az batan lastiklere oranla daha çok kayma gerilmesi oluşturur. Bu nedenle kayma yüzdesi fazla iken aracın ağır olması, daha çok kayma gerilmesinin oluşmasını sağlar. Araç ağırlığının kayma yüzdesi arttıkça etkisi azalacağından ve hemen hemen aynı çekiş kuvvetini üreteceğinden, killi toprakta hafif araç daha uygun olmaktadır. Ancak lastik şişirme basıncı azaltılır ve

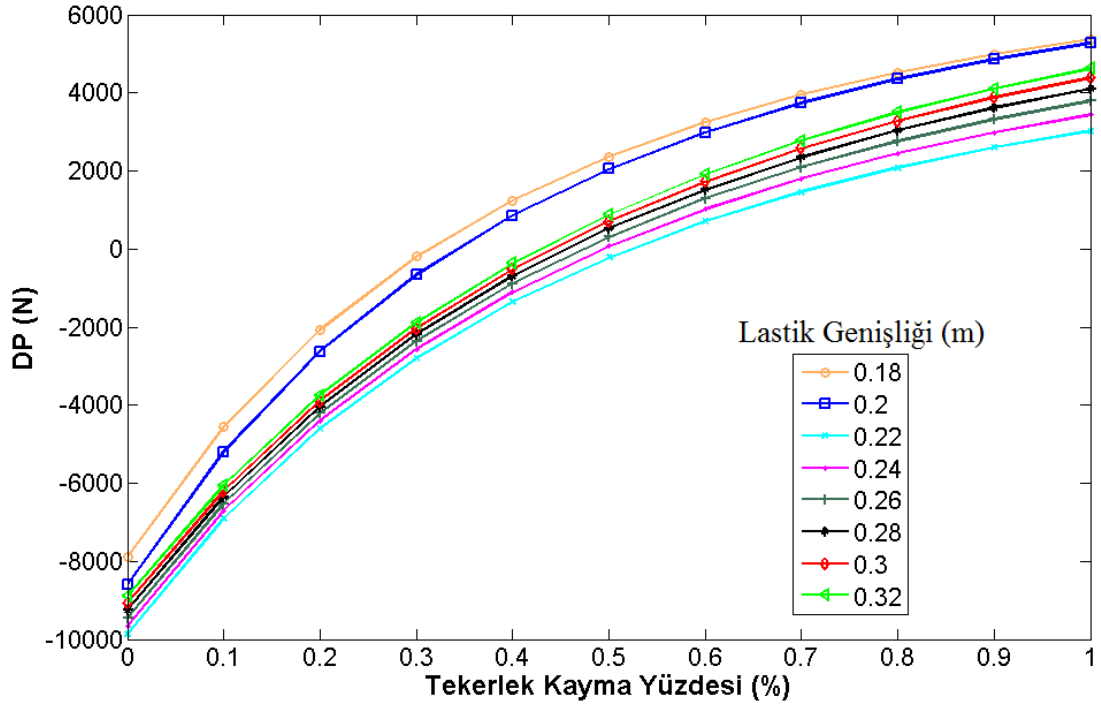
lastiklerin deforme olması sağlanır ise, düşük kayma yüzdelerinde yaklaşık aynı net çekiş kuvveti olmasına rağmen yüksek kayma gerilmelerinde daha fazla net çekiş kuvveti elde edilebilir.



Şekil 4.3 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve araç kütlesi ile değişimi.

Sıkıştırılmış kuma baktığımızda ise, negatif çekiş kuvveti killi toprağa göre daha azdır. Ayrıca kayma yüzdesine bağlı olarak elde edilebilecek net çekiş kuvveti değerleri de killi toprağın üzerindedir. Çünkü sıkışmış kumda yuvarlanma direnci killi topraktaki ile neredeyse aynı olsa da; kayma yüzdesi ile kayma gerilmesinin artışı sıkı kumda daha fazladır. Şekil 4.3'de gösterilen grafikte, araç ağırlığının etkisi pozitif olmaktadır. Araç ne kadar ağır ise, o kadar çok net çekiş kuvveti elde edilmiştir. Aracın bu iki topraktaki batma miktarlarını karşılaştırdığımız zaman, referans ağırlığı ile yapılan hesaplarda araç killi toprakta kuma göre daha az batmıştır. Fakat buna rağmen, yuvarlanma dirençleri hemen hemen eşit ve net çekiş kuvveti kumda daha fazladır.

Toprak ile tekerlek etkileşiminde net çekiş kuvvetini etkileyen diğer bir parametre de, lastiğin genişliğidir. Lastiğin genişliği, temas yüzeyini ve dolayısı ile temas yüzeyi basıncını ve batma miktarını etkilediğinden, net çekiş kuvveti üzerinde etkisi büyüktür. Şekil 4.4 ve 4.5'de iki farklı toprak türü olan killi toprak ve sıkı kumda lastiğin genişliğinin etkisi gösterilmektedir.

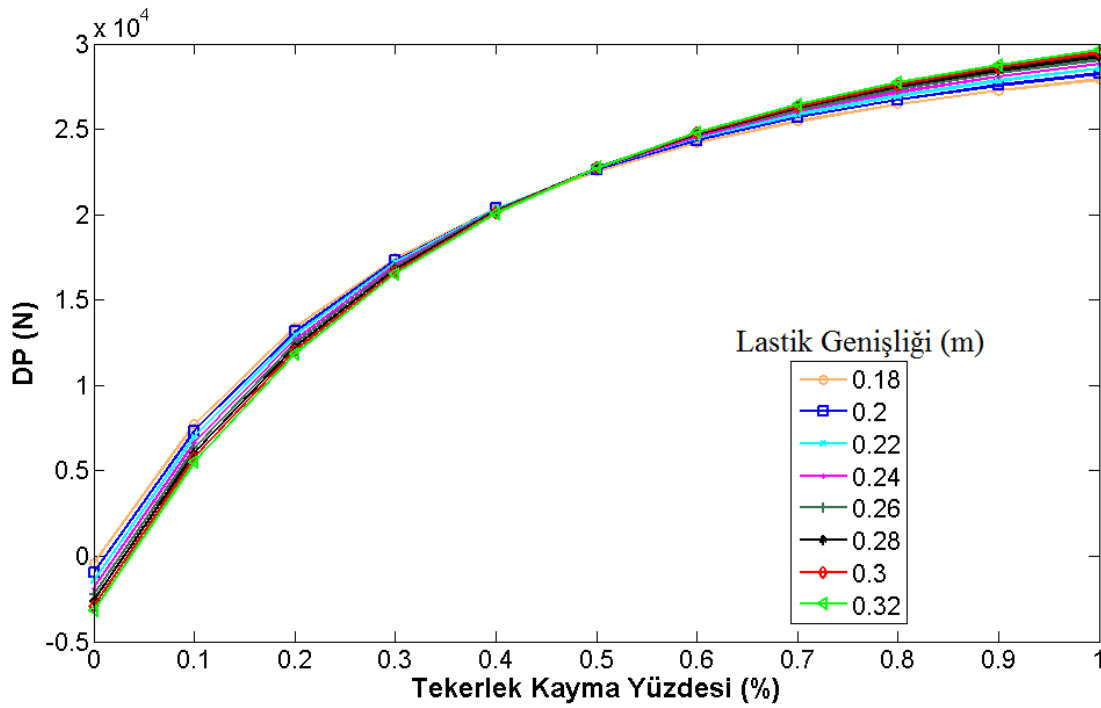


Şekil 4.4 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve lastik genişliği ile değişimi.

Şekil 4.4'de görüldüğü üzere, lastik genişliği 0,18 m ve 0,2 m iken net çekiş kuvveti en fazladır. Fakat bununla beraber lastik genişliği 0,32 m iken oluşan net çekiş kuvveti, lastik genişliği 0,22 m olduğu zamankinden daha fazladır. Bunun nedeni, lastik genişliği 0,18 m ve 0,2 m iken lastik elastik davranış göstererek deforme olmaktadır. Ayrıca lastik ne kadar dar ise o kadar deforme olacağından, net çekiş kuvveti elastik çalışma durumunda lastik ne kadar dar ise o kadar fazla olur. Lastik genişliği 0,32 m ile 0,22 mm arasında iken lastik rijit davranış göstermiştir. Rijit davranan lastikte lastiğin genişliğinin fazla olması, temas yüzeyi basıncını ve dolayısıyla batma miktarını azaltır. Bunun sonucu olarak yuvarlanma direnci daha az olur. Ayrıca geniş lastikte kayma gerilmesinin olduğu temas yüzeyi alanı daha fazla olduğundan, çekiş kuvveti de fazla olur. Sonuç olarak, killi toprakta hareket edecek bir araç için lastikler dar iken yuvarlanma direnci az olur ve lastik havası da fazla değilse net çekiş en iyi durumdadır. Fakat lastik havası fazla ise, lastiğin geniş olması net çekiş kuvvetini artıracaktır.

Şekil 4.5' de gösterilen, sıkı kumda elde edilen sonuçlara göre sıkı kum, killi toprağa göre daha fazla net çekiş üretmiştir. Bunun nedeni daha önce anlatıldığı gibi sıkı kumda kayma gerilmesinin kayma yüzdesi ile artışının fazla olmasındandır. Lastik genişliğinin etkisi ise sıkı kumda çok fazla etkili değildir. Ayrıca sıkı kumda ve

düşük kayma yüzdelğinde, killi topraktakine benzer şekilde lastik genişliği az iken net çekiş kuvveti daha fazla çıkmaktadır. Fakat belirli bir kayma yüzdesinin üzerine çıkıldığı zaman lastik genişliği fazla olan lastik daha fazla net çekiş oluşturmuştur. Bunun nedeni, kayma gerilmesinin kayma yer değiştirmesi ile artışının, temas yüzeyinin fazla olması nedeniyle geniş lastikte daha çok olmasıdır. Bu nedenle sıkı kumda kuvvet ihtiyacı çok ise, geniş lastik kullanmak daha iyi olmaktadır. Kuvvet ihtiyacı fazla değil ise, dar lastik ile geniş lastik arasında kayda değer bir fark olmadığı anlaşılmaktadır.

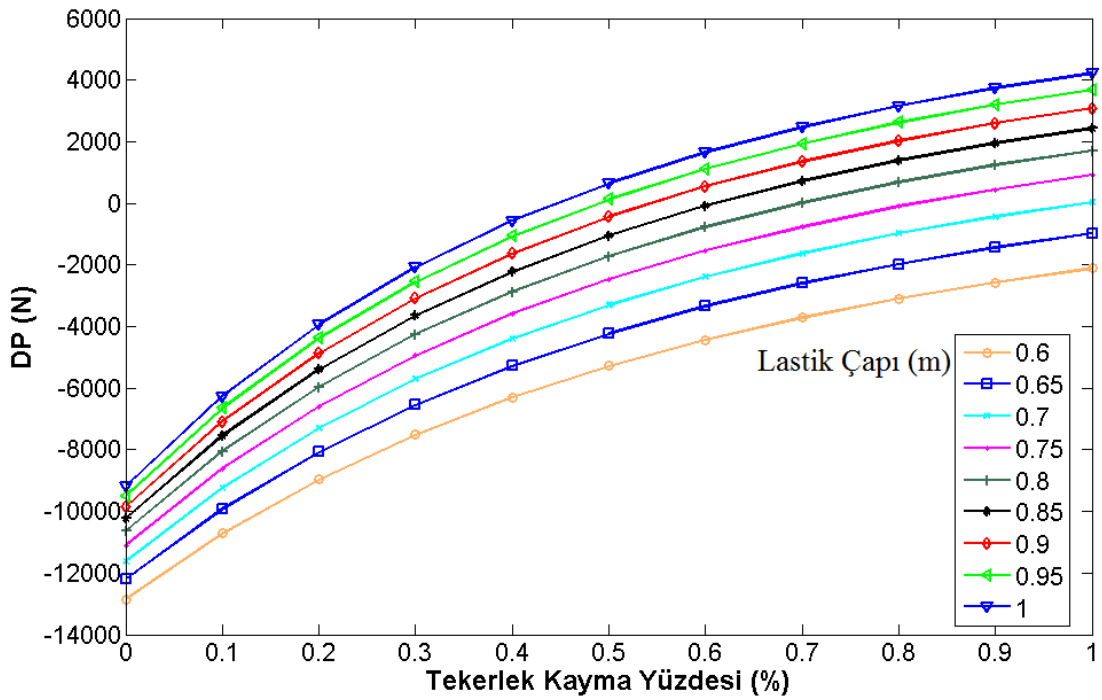


Şekil 4.5 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve lastik genişliği ile değişimi.

Lastik genişliğinin net çekiş kuvvetini etkilemesi gibi, lastik çapının da çekiş kuvveti üzerinde etkisi vardır. Lastik çapı toprak ile lastiğin temas açılarını, temas yüzeyinin büyüklüğünü ve dolayısıyla batma miktarını etkiler. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de, iki farklı toprak türü için hesaplanan net çekiş kuvvetinin lastik çapı ile değişimi gösterilmektedir.

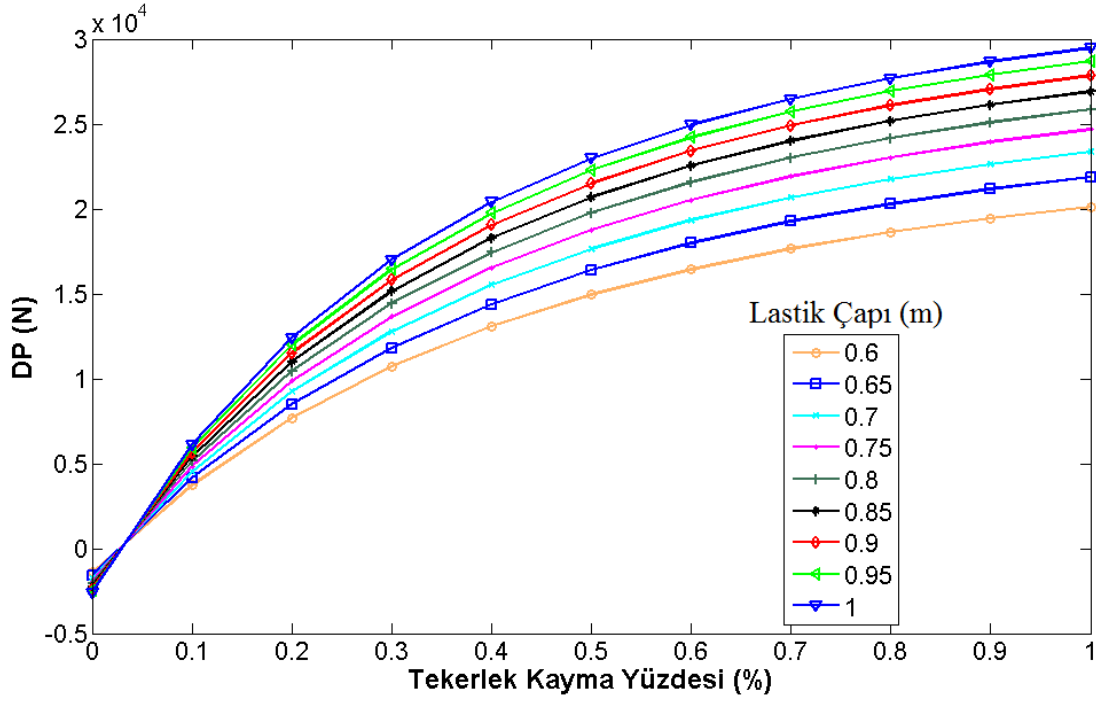
Şekil 4.6’da gösterilen grafik doğrultusunda, killi toprakta lastik çapı büyüdükçe net çekiş kuvvetinin arttığı görülebilir. Büyük çaplı bir lastikte, topraktaki batma miktarının artışı ile temas yüzeyinin artması, küçük çaplı lastiğe göre daha fazladır. Bu nedenle, büyük çaplı lastikte temas yüzeyi basıncı daha küçük olur ve dolayısı ile batma miktarı da daha azdır. Batma miktarının az olması da sıkıştırılmaya zorlanacak

toprak miktarını azalttığından, yuvarlanma direncinin küçük olması demektir. Bu nedenle de büyük çaplı lastikte ilk olarak yuvarlanma direnci düşük olduğundan, net çekiş kuvveti daha fazladır. İkinci olarak, temas yüzeyinin fazla olması temas yüzeyi boyunca hareket ettirilen toprak miktarını arttırdığından, kayma yer değiştirmesinin artmasına neden olur. Bununla beraber büyük çaplı lastikte temas yüzeyi de fazla olduğundan, elde edilebilecek çekiş kuvveti küçük lastiğe oranla daha fazla olmaktadır. Sonuç olarak; killi toprakta hem yuvarlanma direncinin azlığı hem de çekiş kuvvetini fazla olması nedeniyle, büyük çaplı lastik daha uygun olmaktadır.



Şekil 4.6 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve lastik çapı ile değişimi.

Sıkı kum ile yapılan testlerde de killi topraktakine benzer sonuçlar bulunmuştur. Daha önce sıkı kum için hesaplanan net çekiş kuvvetlerinde de olduğu gibi net çekiş kuvveti, killi topraktakine göre daha önce anlatılan nedenlerden dolayı daha çok çıkmıştır. Ayrıca yine killi topraktakine benzer bir şekilde, lastik çapı arttıkça net çekiş kuvveti de artmıştır. Sıkı kumda düşük kayma yüzdelерinde, lastik çapının etkisinin çok az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni de sıkı kum için batma miktarının lastik çapından fazla etkilenmemesidir. Sonuç olarak, killi topraktakine benzer bir şekilde lastik çapının büyük olması sıkı kum içinde uygundur.

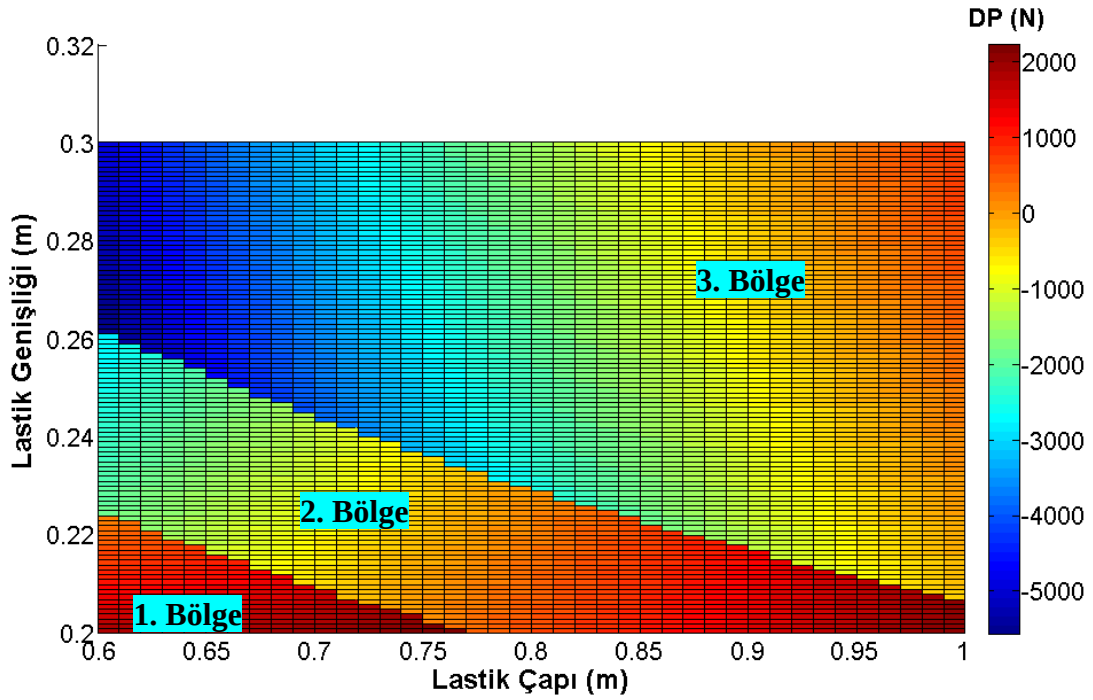


Şekil 4.7 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) tekerlek kayma yüzdesi ve lastik çapı ile değişimi.

Lastik genişliği ve lastik çapı birlikte lastiğin elastik veya rijit davranıp davranmayacağını etkiler. Bu kapsamda hem lastik genişliğine hem de lastik çapına bağlı net çekiş kuvvetleri hesaplanırsa, uygun lastik genişliği ve lastik çapının seçimi için daha anlaşılır bir veri elde edilmiş olur. Ayrıca ön aks ve arka aksa düşen yükler, aracın ağırlık merkezi nedeniyle farklılık gösterebilir. Bu durum ön ile arka tekerleklerin farklı davranmasına yol açar. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da iki farklı toprak için net çekiş kuvveti, kayma yüzdesinin %50 olduğu kabulü ile hem lastik çapına hem de lastik genişliğine bağlı olarak gösterilmektedir.

Net çekiş kuvveti grafiği, killi toprakta Şekil 4.8'de görüldüğü üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Grafiğin üç bölgeden oluşması ise ön ve arka tekerleklerin birbirinden farklı çalışma durumlarında olmalarıdır. Bu kapsamda Şekil 4.8'de birinci bölgede hem ön lastikler hem de arka lastikler elastik çalışma durumundadır. Bu nedenle, birinci bölgede net çekiş kuvvetleri en çoktur. İkinci bölgede ise, referans aracın ağırlık merkezi nedeniyle arka lastikler elastik çalışma durumunda fakat ön lastikler rijit durumda çalışmaktadır. Elastik lastik ve rijit lastik için kullanılan denklemler birbirinden farklı girdilere sahip olduğundan bölgeler arasında geçişte süreklilik olmamaktadır. Elastik lastik ile rijit lastiğin daha önce anlatıldığı üzere lastik genişliğinin artmasına karşı olan tepkisi farklıdır. Elastik lastikte dar lastik iyi sonuç

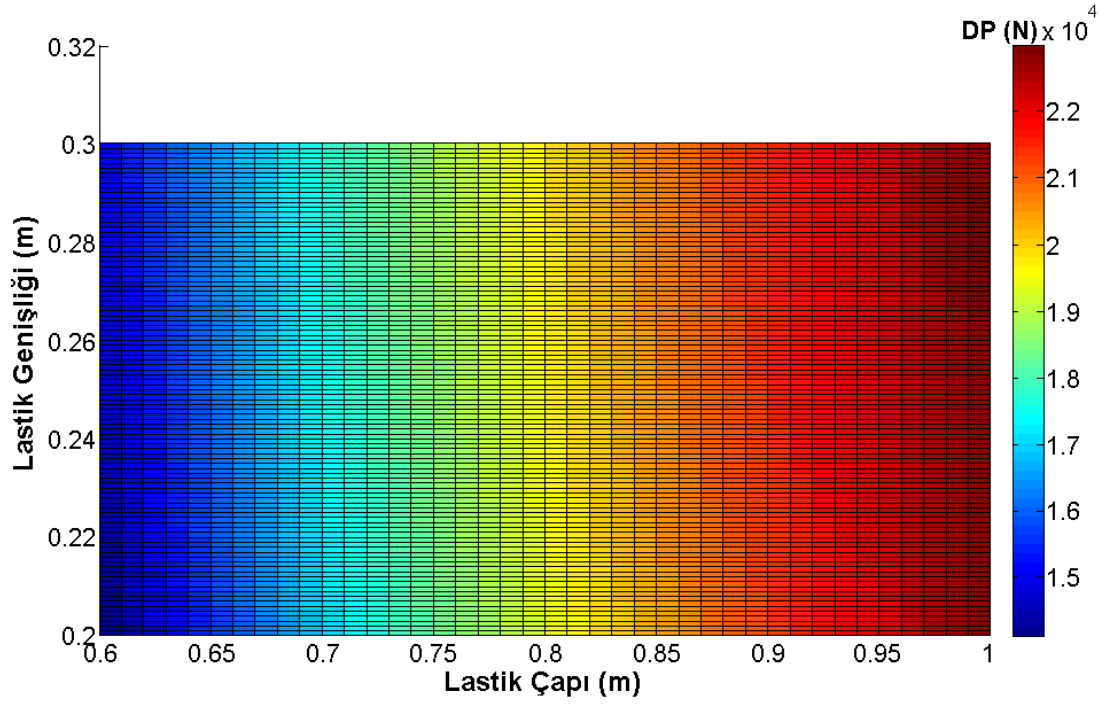
verirken, rijit lastikte geniş lastik iyi sonuç vermektedir. Bu nedenle, ikinci bölgede lastik genişliği ile ilgili yorum yapmak zordur. Fakat lastik çapının etkisine bakarsak, lastik çapı arttıkça net çekiş kuvveti artmaktadır. Üçüncü bölgeye baktığımızda ise, hem ön lastik hem de arka lastik rijit çalışma durumundadır. Bu nedenle grafikten de anlaşılacağı üzere lastik genişliği arttıkça, çekiş kuvveti artmaktadır. Lastik çapı da aynı şekilde ne kadar çok ise, net çekiş kuvveti o kadar çok olmaktadır.



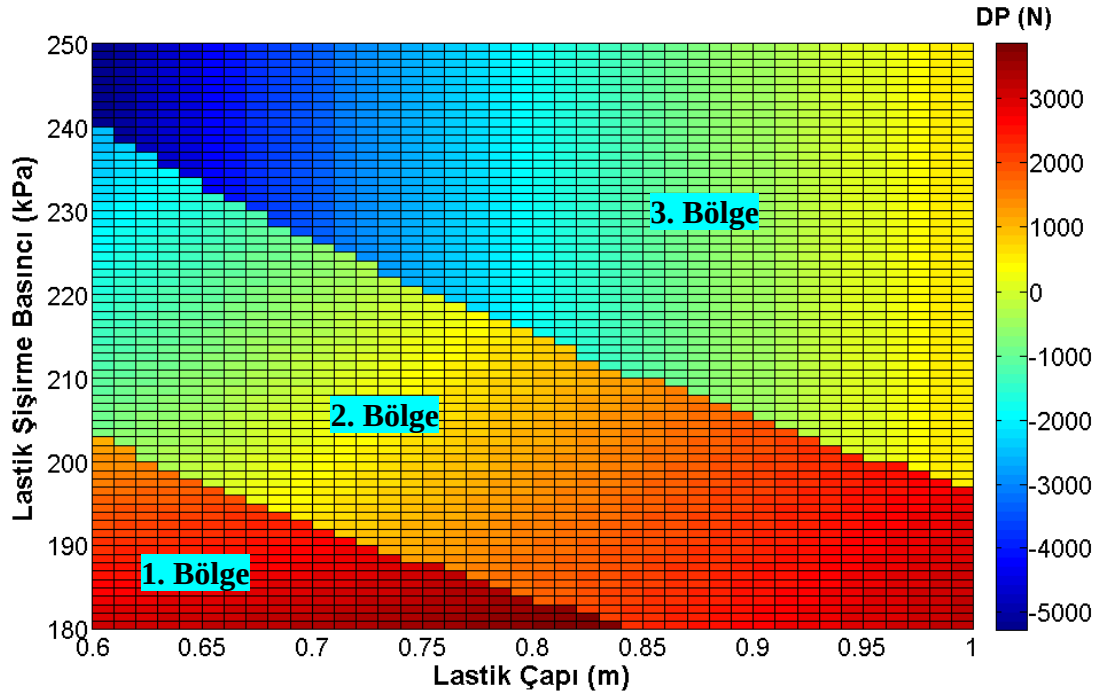
Şekil 4.8 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) lastik çapı ve lastik genişliği ile değişimi. Kayma %50.

Sıkı kum için çıkarılan net çekiş kuvveti sonuçlarında görüldüğü üzere, killi topraktaki gibi bölgeler bulunmamaktadır. Bunun nedeni de, belirtilen her lastik çapı ve genişliğinde lastikler rijit durumda çalışmaktadır. Daha öncede anlatıldığı gibi, sıkı kum için lastik genişliğinin kayda değer bir etkisi yoktur. Detaylı incelenirse; geniş lastik dar lastiğe göre biraz fazla net çekiş kuvveti sağlamıştır. Lastik çapının etkisini incelersek; lastik çapı arttıkça, net çekiş kuvvetinin arttığı görülmektedir.

Lastiğin elastik veya rijit çalışma durumunu etkileyen diğer bir etken de, lastiğin şişirme basıncıdır. Daha önce toprakta basınç-batma ilişkisi anlatılırken üzerinde durulan ortalama yer basıncı, lastik şişirme basıncından etkilenir. Lastik şişirme basıncının lastik çapı ile beraber etkisini gösteren net çekiş kuvveti grafiği, kayma yüzdesinin %50 olduğu kabulü ile iki farklı toprak için Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterilmektedir.



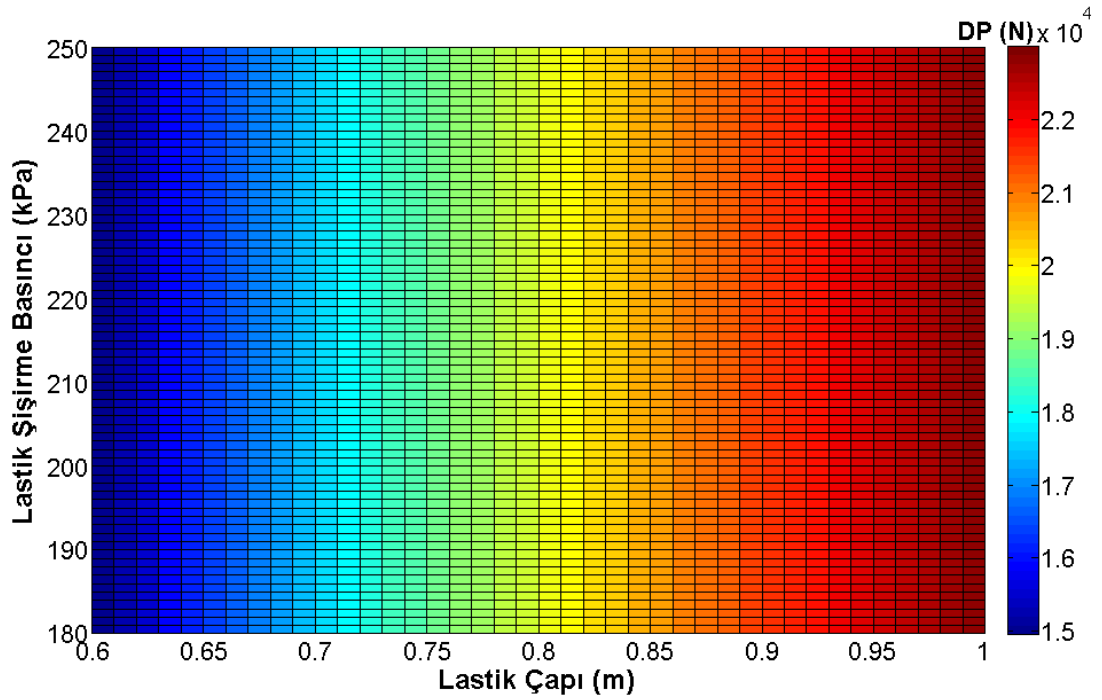
Şekil 4.9 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) lastik çapı ve lastik genişliği ile değişimi. Kayma %50.



Şekil 4.10 : Killi toprak için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) lastik çapı ve lastik şişirme basıncı ile değişimi. Kayma %50.

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere net çekiş kuvveti üç bölgeden oluşmaktadır. Bunun nedeni daha önce anlatıldığı gibi, ön lastikler ile arka lastikler farklı çalışma durumlarında olduklarında ikinci bölgeyi oluşturmalarıdır. Birinci bölgede ön

lastikler ve arka lastikler elastik çalışma durumundadır. Üçüncü bölgede ise, hepsi rijit çalışma durumundadırlar. Grafikte de görüldüğü üzere lastik şişirme basıncının azaltılması lastiklerin elastik çalışma durumuna geçmelerine sebep olarak net çekiş kuvvetinde artışa sebep olur. Fakat şişirme basınçlarının hepsinde; rijit çalışma durumunda olan bir lastik için, şişirme basıncını değiştirmek net çekiş kuvvetini etkilemez. Lastik çapının etkisine baktığımızda ise, her iki çalışma durumunda da lastik çapının artışı net çekiş kuvvetinde artma sağlamaktadır. Fakat grafikte de görüldüğü üzere, yüksek şişirme basınçlarında (üçüncü bölge) referans araç neredeyse hiç pozitif çekiş kuvveti yaratamamıştır. Bu nedenle, bazı arazi araçlarında araziye girilmeden önce lastik havasını azaltmak gibi yöntemlere başvurularak aracın çekiş performansı artırılmaya çalışılır.

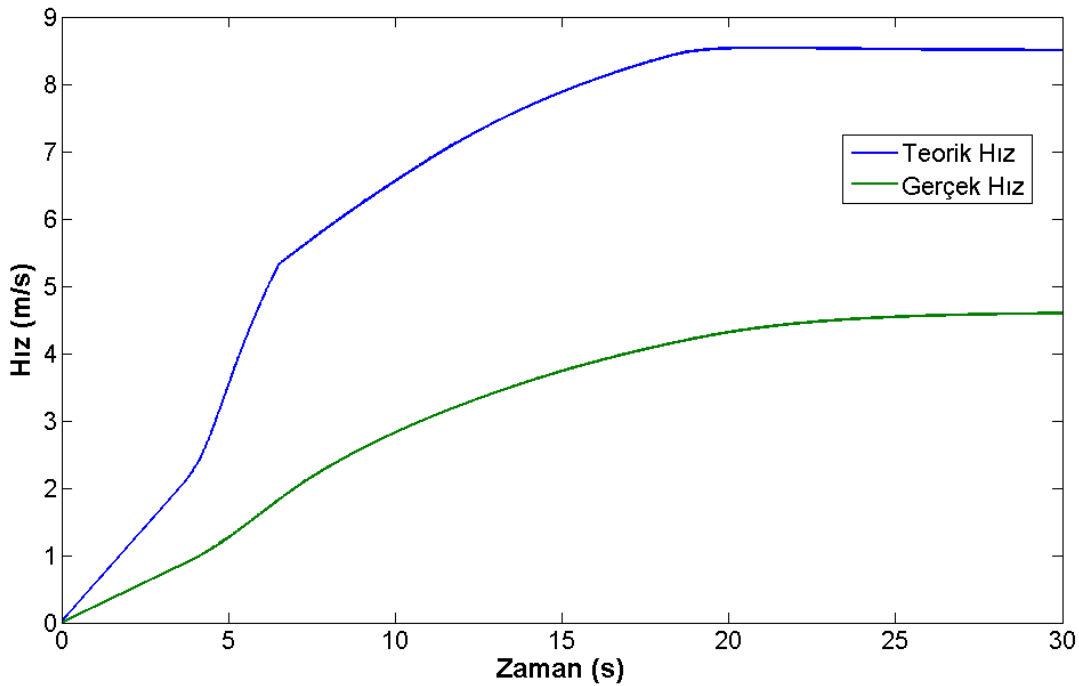


Şekil 4.11 : Sıkı kum için elde edilen net çekiş kuvvetinin (DP) lastik çapı ve lastik şişirme basıncı ile değişimi. Kayma %50.

Sıkı kum için çıkarılan sonuçlara bakarsak, daha önce Şekil 4.9’da gösterilen grafiğe benzer şekilde tek bölgeden oluşan bir grafik elde edilmiştir. Bunun nedeni, hem ön hem de arka lastiklerin rijit çalışma durumunda olmasıdır. Rijit çalışma durumunda şişirme basıncı farkının bir etkisi olmadığından daha önce bahsedilmiştir. Bu durum Şekil 4.11’de görülmektedir. Lastik çapı da killi topraktakine benzer bir şekilde pozitif bir etki yaratmıştır.

Sıkı kum için lastiğin elastik davranış göstermemesinin nedeni, sıkı kumda batma miktarı arttıkça basınç artışının az olmasıdır. Bu durum kritik basıncın çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Kritik basıncın çok küçük olması nedeniyle, sıkı kumda lastik daha çok batar fakat; sıkı kumda kayma gerilmesi killi toprağa göre daha çok olduğundan, net çekiş kuvveti killi toprakla karşılaştırıldığında çok yüksektir.

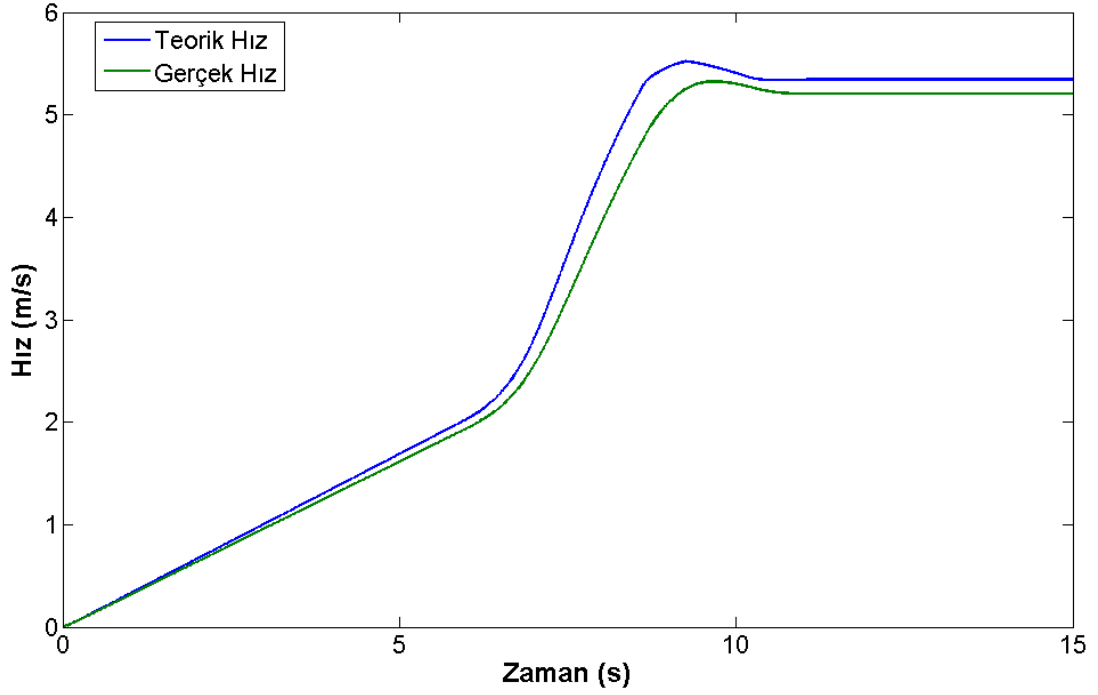
Topraktan elde edilebilecek çekiş kuvveti, tekerlek kayma yüzdesinin bir fonksiyonudur. Sıkı kum ve killi toprak için yapılan hesaplamalarda, sıkı kumun yüksek kayma yüzdesinde killi toprağa göre çok daha fazla net çekiş kuvveti elde ettiği yapılan hesaplamalarda belirlenmiştir. Fakat bu iki toprak arasındaki net çekiş kuvveti farkı araçta bu kadar etkili olmayabilir. Bunun nedeni, aracın motorundan elde edilen momenttir. Tekerlek kayma yüzdesinin çok yukarılara çıkarak yüksek çekiş kuvveti elde edilebilmesi için, motorunda bu kuvveti karşılayabilmesi gereklidir. Eğer motor bu kuvveti karşılayamaz ise iki toprak arasında performans olarak çok büyük farklar çıkmayacaktır. Şekil 4.12 ve 4.13'te, Çizelge 4.2'de özellikleri verilen iki farklı toprak türü üzerinde, özellikleri Çizelge 4.1'de verilen referans aracının hızlanma grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 4.12 : Killi toprak üzerinde hareket eden referans aracın hız değişimi.

Grafikte gösterilen teorik hız, aracın tekerleklerinin dönme hızından dolayı sahip olması gereken hızdır (%0 kayma olması durumu). Tekerlek kayma küzdesi '0' olan

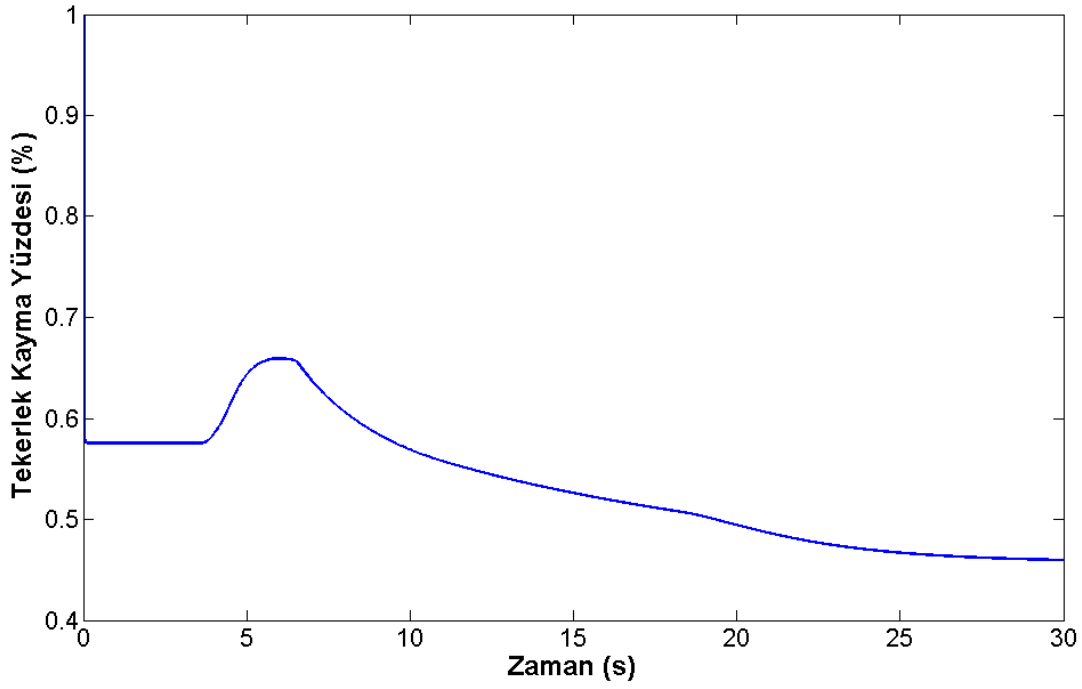
bir araçta, iki hızda birbirine eşit olur fakat grafikten de anlaşıldığı üzere, tekerlekler sürekli kayma göstermektedir. Belirli bir zaman sonra topraktan gelen çekiş, yuvarlanma direnci ve motordan tekerleklerle gelen moment dengeye gelerek araç sabit hızla seyretmeye devam eder. Bu sırada da tekerlekler sürekli kayma durumundadır. Sonuç olarak, killi toprakta araç yaklaşık 30 s sonra yaklaşık 4,5 m/s hıza ulaşarak sabit kalmıştır.



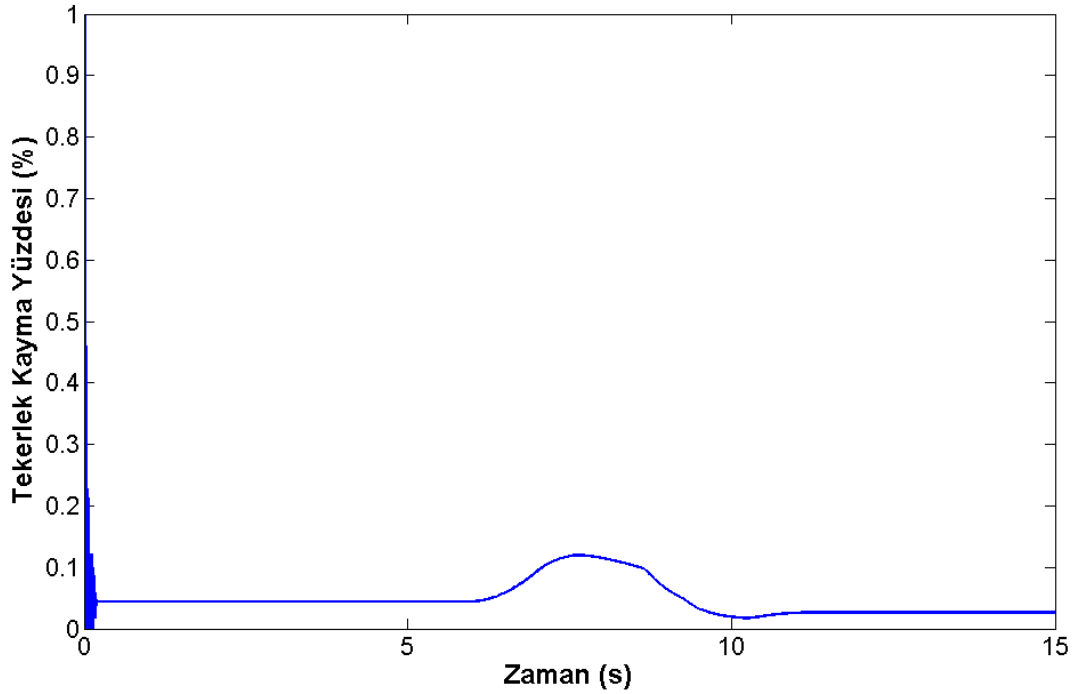
Şekil 4.13 : Sıkı kum üzerinde hareket eden referans aracın hız değişimi.

Aynı araç sıkı kum üzerinde hareket ettirildiğinde araç, Şekil 4.13'te görüldüğü üzere yaklaşık 10 s sonra sabit hıza ulaşmış ve son hızı yaklaşık 5,2 m/s olmuştur. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilen grafikler arasındaki en büyük fark, sabit hıza ulaşma süreleridir. Sıkı kum için kayma gerilmesinin, kayma yüzdesi ile değişiminin daha fazla olduğu ve bu nedenle daha çok kayma gerilmesi elde edildiği daha önce belirtilmişti. Bu nedenle teorik hız ile gerçek hız arasındaki hız farkı, hızlanma süresince killi topraktakine göre daha azdır. Son durumda da son hızlardan anlaşılabileceği üzere, killi toprakta tekerlek kayma yüzdesi sıkı kuma göre daha fazla olmaktadır. Son hızların birbirlerine bu kadar yakın olmasının nedeni ise, yuvarlanma direncinin iki toprak için hemen hemen aynı olmasındandır. Motordan gelen moment, toprağın tekerlek üzerinde oluşturduğu momenti yenerek tekerleğe açısal hız kazandırmaya yeterli olmadığından araç iki toprakta da birbirine yakın hızda hareket edebilmiştir. Aradaki fark ise, killi toprakta aracın tekerleklerinin

kayma yüzdesinin daha fazla olmasıdır. Tekerlek kayma yüzdeleri Şekil 4.14 ve 4.15'te, killi toprak ve sıkı kum için gösterilmiştir.

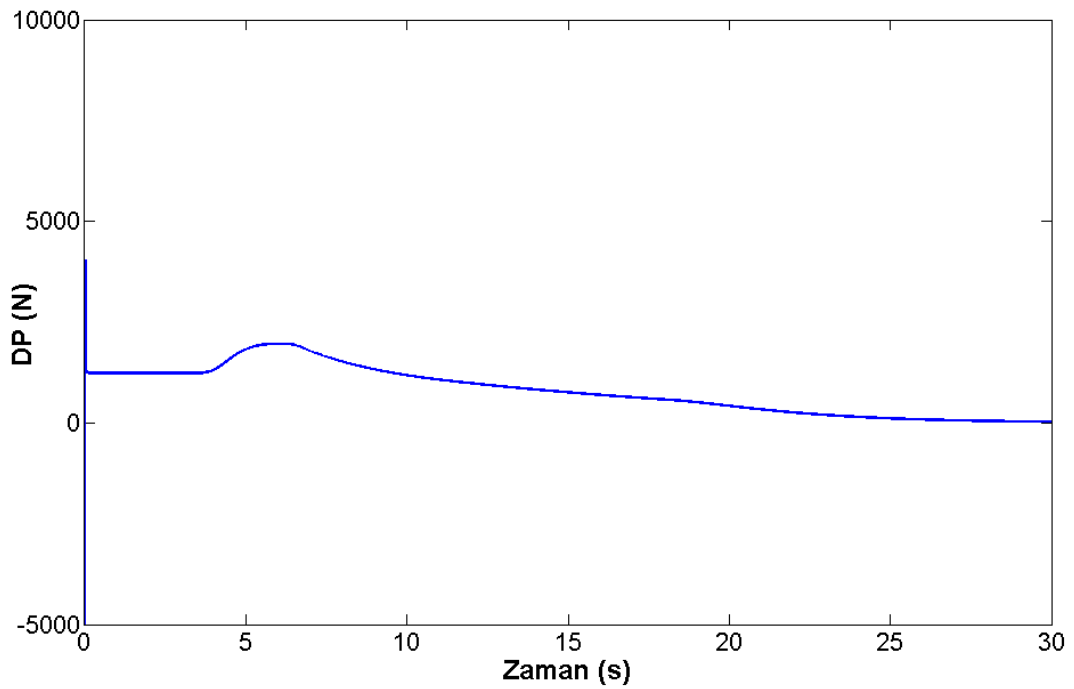


Şekil 4.14 : Killi toprak üzerinde hareket eden referans aracın tekerlek kayma yüzdesi değişimi.

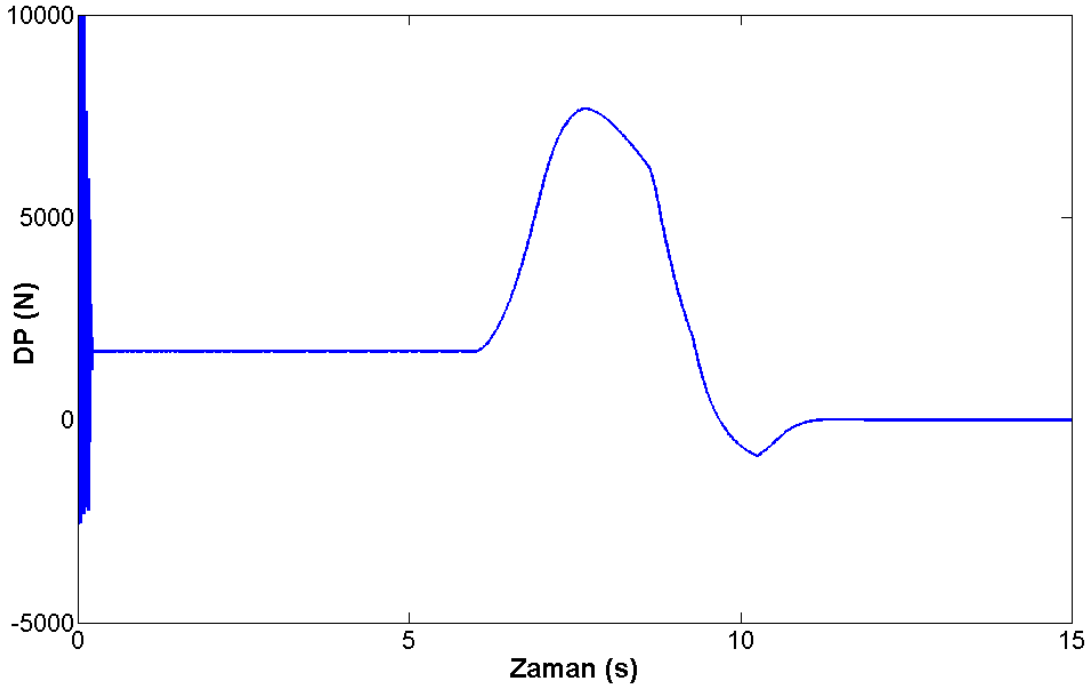


Şekil 4.15 : Sıkı kum üzerinde hareket eden referans aracın tekerlek kayma yüzdesi değişimi.

Şekil 4.14 ve 4.15'te gösterilen iki grafikte de görüldüğü üzere, kayma yüzdesi bir tepe noktası göstermiştir. Bu tepe noktası, motor momentinin farklı devirlerde farklı moment göstermesinden kaynaklanmaktadır. Grafiklerde tepe noktalarının oluştuğu sıralarda, tekerleklerin sahip oldukları dönme hızına bağlı olarak motor momenti yükselerek tepe noktasına ulaşmıştır. Bunun sonucu olarak; toprağın taşıyabileceğinden fazla moment oluştuğu için, tekerlekler daha çok kaymaya başlamışlardır. Kayma yüzdesinin artmasının ardından daha fazla kayma gerilmesi oluştuğu için, araç hızlanarak kayma yüzdesinin tekrar düşmesine neden olmuştur. İki grafiğe baktığımızda, daha önce belirtildiği üzere sıkı kumda denge durumunda daha az kayma yüzdesi görülürken; killi toprakta kayma yüzdesi oldukça fazla olmaktadır. Kayma yüzdesinde bu kadar fark olmasına rağmen, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilen her iki toprak için çıkarılan net çekiş kuvveti grafiklerine bakılırsa, denge durumunda her iki toprakta da neredeyse eşit net çekiş kuvveti olduğu görülür. İki grafik arasındaki fark, dengeye gelme süreleridir. Bunun nedeni daha önce belirtildiği gibi, sıkı kumda kayma yüzdesi ile kayma gerilmesinin artışının daha fazla olmasıdır.

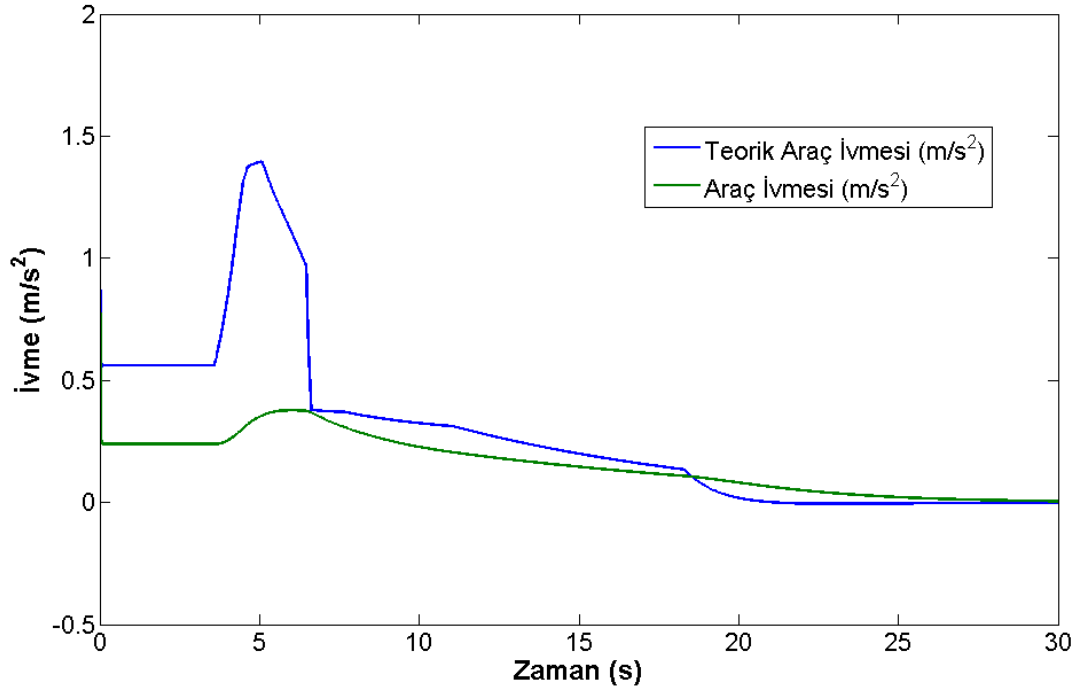


Şekil 4.16 : Killi toprak üzerinde hareket eden referans aracın net çekiş kuvveti değişimi.

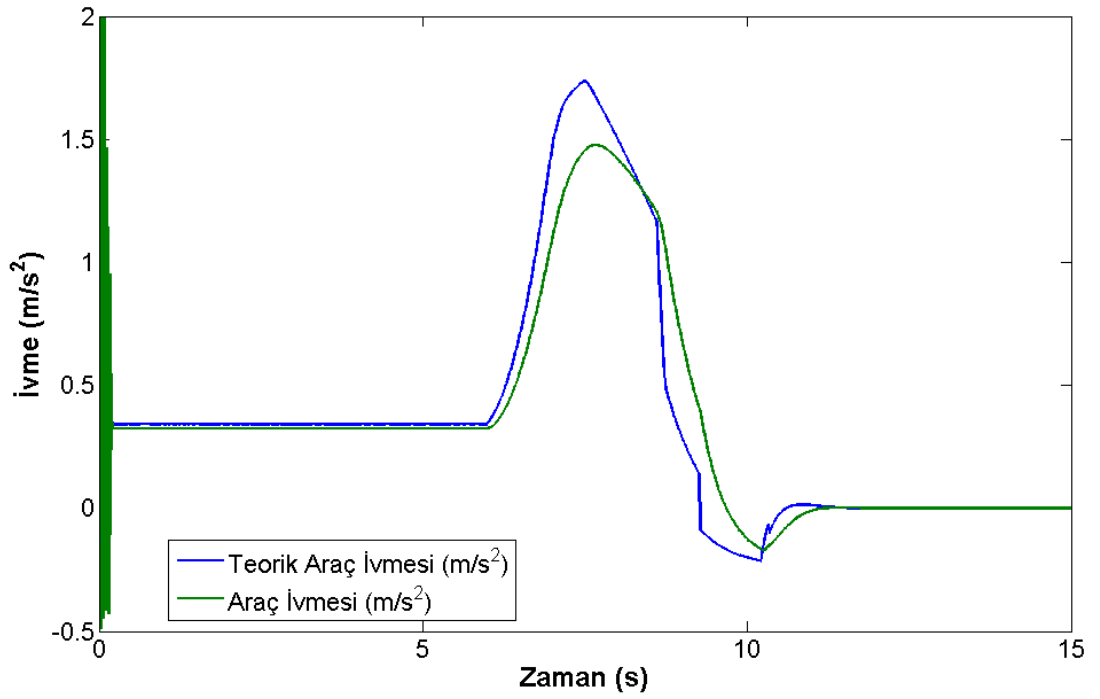


Şekil 4.17 : Sıkı kum üzerinde hareket eden referans aracın net çekiş kuvveti değişimi.

Sıkı kumda kayma yüzdesiyle kayma gerilmesinin daha fazla olduğunu, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da gösterilen ivme grafiklerinden de görmek mümkündür. Teorik araç ivmesi her iki toprakta da birbirine yakındır. Fakat teorik araç ivmesi ile gerçek araç ivmesi arasındaki fark killi toprakta çok fazla iken, sıkı kumda azdır. Bunun nedeni, killi toprakta tekerleğin kayma yüzdesi artışı ile kayma gerilmesi artışı az olduğundan araç ivmesindeki artışın fazla olmamasıdır. Sıkı kumda ise bunun tam tersi şekilde, kayma yüzdesi artışı ile kayma gerilmesi artışı fazladır. Bu nedenle araç ivmesi daha fazla çıkar. Killi toprakta maksimum hıza ulaşma süresi bu nedenle sıkı kuma göre daha uzundur. Şekil 4.18 ve 4.19’da, bazı bölgelerde araç ivmesi teorik araç ivmesinden fazla olmaktadır. Bu durum, tekerleklere gelen momentin değişmesi nedeniyle (azalması), gerçek araç ivmesi ve teorik araç ivmesinin azalması durumlarında oluşur. Araç ivmesi daha yavaş bir şekilde azaldığından belirli bir zaman aralığında araç ivmesi, teorik araç ivmesinden fazla olmaktadır. Tekerlekler kütlece daha hafif olduklarından, moment değişiminden doğan ivme azalması tekerleklerde daha hızlı olur.



Şekil 4.18 : Killi toprak üzerinde hareket eden referans aracın gerçek ve teorik ivmelenmesi.



Şekil 4.19 : Sıkı kum üzerinde hareket eden referans aracın gerçek ve teorik ivmelenmesi.

5. SONUÇLAR VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Bu tezde; toprak ile tekerleklerin etkileşimi, yarı deneysel bir yöntem ile modellenmiş ve bir arazi aracının arazi üzerindeki performansına etki eden araç özellikleri irdelenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlara göre, araç ağırlığının hangi arazi tipi olursa olsun pozitif bir etkisinin olduğu görülmüştür. Araç ağırlığı her ne kadar yuvarlanma direncini artırsa da, kayma gerilmesindeki artış yuvarlanma direncinden çok olduğundan net çekişte artış görülmüştür. Bir arazi aracının gücünü toprağa ileten elemanları tekerlekler olduğu için; net çekişi en çok etkileyen özellikler lastik çapı, genişliği ve lastik şişirme basıncı olmuştur. Lastik çapı da araç kütlesi gibi ne her iki arazide de pozitif etki yaratmıştır. Lastik çapı arttıkça yuvarlanma direncinin azalması, net çekişte ciddi bir artışa neden olmuştur. Lastik genişliğinin ise sıkı kumda kayda değer bir etkisinin olmadığı, fakat killi toprakta lastik havası fazla olduğunda pozitif bir etki yarattığı tespit edilmiştir. Lastik havası az olduğunda ve lastik elastik çalışma durumuna geçerek deforme olduğunda ise, lastiğin dar olmasının pozitif etki yarattığı görülmektedir. Arazi araçlarının lastiklerine de bakıldığında, lastikler çok geniş değildir. Bunun nedeni; dar fakat havası az olan lastiklerin, geniş ama havası çok olan lastiklere oranla daha çok kayma gerilmesi yaratmasıdır. Elde edilen bu bilgiler ile arazi araçlarının tasarımında nelerin arazi çekişini artırabileceği, nelerin etkisinin olmadığı tespit edilmektedir. Son olarak; birbirinden farklı özellikteki iki arazi üzerinde, referans bir aracın performans grafikleri çıkarılmış ve iki arazi tipinin aracın performansını nasıl etkilediği, maksimum hız ve bu hıza ne kadar zamanda çıkabildiği tespit edilmiştir. Tekerleklerin kayma yüzdesi grafikleri de elde edilmiştir. Kayma yüzdesi grafikleri daha sonra yakıt tüketiminin hesaplanmasında kullanılabilir.

Kullanılan yarı deneysel model bazı varsayımlara dayanmaktadır. Bu varsayımlardan ilki, tekerlek ile toprak etkileşim yüzeyinin dikdörtgen şeklinde olması varsayımdır. Gerçekte temas yüzeyi, köşeleri yuvarlak bir dikdörtgen ve bazen de elips şeklinde olabilir. Bu nedenle bu modelin gerçeğe yakın sonuç vermesi için, aracın lastiklerinin 50 cm' den daha az olmaması gereklidir. Çap ne kadar büyük olursa temas yüzeyi o kadar dikdörtgene yaklaşacağından, küçük çaplarda hassaslık kaybolur. Modelin bu

eksikliğini gidermek için, mühendisler küçük çaplı lastiklerde de geçerli olabilecek bir model üzerinde çalışmaktadırlar. Yapılan varsayımlardan biri de toprağın homojen kabul edilmesidir. Fakat Dünya üzerindeki arazilere bakıldığında toprak birçok bileşenden oluşur ve katman katmandır. Bu nedenle, modelin hassasiyeti toprağın homojenliğine bağlıdır. Homojen olmayan toprağın modellenmesi oldukça zor bir konudur. Bu sorunu çözmek için, sonsuz tanecik modeli ile her toprak tanesinin modellendiği yöntemler üzerinde çalışan mühendisler bulunmaktadır. Kullanılan model yarı deneysel olduğundan birçok noktada deneylere dayanmaktadır. Deneylerden bağımsız olan bir toprak modeli elde etmek için mühendisler, toprağın sonlu elemanlar yöntemi ile modellendiği bir takım yöntemler üzerinde çalışmaktadırlar. Bu sayede, toprak ile tekerlek etkileşiminde sadece araç tarafı değil, toprak tarafında da oluşan etkiler belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Ahlvin, Richard B.** (1992). *NATO reference mobility model edition II user's guide*. Mississippi: Waterways Experiment Station, Corps of Engineers.
- Bekker, M.G.** (1956). *Theory of land locomotion: the mechanics of vehicle mobility*. USA: University of Michigan Press.
- Bekker, M.G.** (1960). *Off-the-road locomotion: research and development in terremechanics*. USA: University of Michigan Press.
- Bekker, M.G.** (1969). *Introduction to terrain-vehicle systems*. USA: University of Michigan Press.
- Bernstein, R.** (1913). *Probleme zur experimentellen motorpflugmechanik*. Der Motorwagen, 16.
- Boussinesq J.** (1885). *Application des potentiels a l'etude de l'equilibre et du mouvement des solides elastiques*. Paris: Gauthier-Villars,
- Das, B.M.** (2002). *Principles of geotechnical engineering*. United States: Brooks/Cole Thomson Learning.
- Fatherree, B.H.** (2006). *The history of geotechnical engineering at the Waterways Experiment Station 1932-2000*. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Goetz R., Gerhart G., Laughery S.** (1990). *Bekker's terramechanics model for off-road vehicle research*. Warren, Michigan USA: US Army TARDEC.
- Grahn, M.** (1991). *Prediction of sinkage and rolling resistance for off-the-road vehicles considering penetration velocity*. Journal of Terramechanics 1991; 28(4):339±47.
- Haueisen, B.** (2003). *Mobility analysis of small, lightweight robotic vehicles*. Unpublished manuscript.
- Hutangkabodee, S., Zweiri, Y.H., Seneviratne, L.D. ve Althoefer K.** (2006). *Soil parameter identification for wheel-terrain interaction dynamics and traversability prediction*. London, UK: King's College.

- Iagnemma, K., Brooks, C. and Dubowsky, S.** (2003). *Visual, tactile, and vibration-based terrain analysis for planetary rovers*. Cambridge, Massachusetts; USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Irani, R.A., Bauer, R.J., Warkentin, A.** (2011). *A dynamic terramechanic model for small lightweight vehicles with rigid wheels and grousers operating in sandy soil*. Halifax, Canada: Mechanical Engineering Department, Dalhousie University.
- Janosi, Z. and Hanamoto, B.** (1961). *The analytical determination of drawbar-pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils*. Turin, Italy: Proceedings of the First International Conference on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems.
- Lyasko, M.** (2009). *Slip sinkage effect in soil-vehicle mechanics*. Journal of Terramechanics 47 (2010) 21–31.
- Matthew D.G.** (2012). *Estimating terrain parameters with a rigid wheeled rover using neural networks*. Ottawa, Canada: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University.
- Meirion-Griffith, G. N., Nie, C., Spenko, M.** (2013). *Development and experimental validation of an improved pressure-sinkage model for small-wheeled vehicles on dilative, deformable terrain*. Chicago, USA: Mechanical, Materials, and Aerospace Department, Illinois Institute of Technology.
- Meirion-Griffith, G. N., Spenko, M.** (2010). *A new pressure-sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains*. Sapporo, Japan: Asia-Pacific ISTVS Conference and Annual Meeting of Japanese Society for Terramechanics.
- Meirion-Griffith, G. N., Spenko, M.** (2011). *Toward establishing a comprehensive pressure-sinkage model for small diameter wheels on deformable terrains*. Chicago, USA: Mechanical, Materials and Aerospace Engineering Department, Illinois Institute of Technology.
- Meirion-Griffith, G. N., Spenko, M.** (2012). *A pressure-sinkage model for small-diameter wheels on compactive, deformable terrain*. Chicago, USA: Mechanical, Materials, and Aerospace Engineering Department, Illinois Institute of Technology.
- Meirion-Griffith, G. N.** (2012). *Advances in vehicle-terrain interaction modeling for small, rigid wheeled vehicles operating on deformable terrain*. Doktora yeterlik tezi, College of the Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois.
- Oravec, H.N.** (2009). *Understanding mechanical behavior of lunar soils for the study of vehicle mobility*. Doktora yeterlik tezi, Case Western Reserve University, Cleveland, USA.

- Pope, R.G.** (1971). *The effect of wheel speed on rolling resistance*. Journal of Terramechanics 1971; 8(1):51±8.
- Reece, A.R.** (1964). *Problems of soil vehicle mechanics*. Warren, Michigan: U.S. Army Tank-Automotive Center.
- Rula, A.A., Nuttall, C.J.** (1971). *An analysis of ground mobility models (ANAMOB)*. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Schimd, I. C.** (1995). *Interaction of vehicle and terrain results from 10 years research at IKK*. Journal of Terramechanics, Vol. 32 No.1 pp.3-26.
- Sela, A.D., Ehrlich, I.R.** (1971). *Load support capability of flat plates of various shapes in soils*. SAE Paper No. 710178.
- Shamay, S.E.** (1971). *Normal and shear stress distribution under a rigid wheel in dry sand*. Springfield, Virginia; USA: Davidson Laboratory, National Technical Information Service.
- Shmulevich, I., Mussel, U., Wolf, D.** (1998). *The effect of velocity on rigid wheel performance*. Haifa, Israel: A Faculty of Agricultural Engineering, Technion-Israel Institute of Technology.
- Taheri, Sh., Sandu, C., Taheri, S., Pinto, E., Gorsich, D.** (2014). *A technical survey on terramechanics models for tire-terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles*. Blacksburg, Virginia; USA: Department of Mechanical Engineering, Virginia Tech; Michigan; USA: US Army TARDEC.
- Terzaghi, K.** (1954). *Theoretical soil mechanics*. New York: John Wiley and Sons, INC.
- Vasil'ev, A.V., Dokychaeva, E.N., Utkin-Lubovtsov O.L.** (1969). *Effect of tracked tractor design parameters on tractive performance*. Moscow, Russia: Mashinostroenie Publishers.
- Weis, S.J.** (1962). *Preliminary study of snow values related to vehicle performance*. Detroit Arsenal: Land Locomotion Research Laboratory.
- Wills, B.M.D.** (1966). *Horizontal shear in soil vehicle mechanics*. Warren, Michigan: Army Tank-Automotive Center Land Locomotion Laboratory.
- Wisner RD, Luth HJ.** (1973). *Off-road traction prediction for wheeled vehicles*. J Terramechanics, Vol. 10 No.2 pp. 49–61.
- Wong, J.Y.** (2001). *Theory of ground vehicles*. Ottawa, Ontario, Canada: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University.

Wong, J.Y. (2006). *Fundamentals of terramechanics: its applications to the evaluation of planetary rover mobility*. Cleveland, OH: NASA Glenn Research Center.

Wong, J.Y. (2010). *Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behavior, off-road vehicle performance and design*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier LTD.

Wong, J.Y. (2014). *Terramechanics and its applications to the evaluation of terrestrial and extraterrestrial vehicle mobility: theory into practice*. Ottawa, Ontario, Canada: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University.

Classification of Soil. (t.y.). Alındığı tarih: 22.02.2015, adres:
<http://osp.mans.edu.eg/geotechnical/Ch1C>.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Oytun KARADUMAN
Doğum Yeri ve Tarihi : İzmit/KOCAELİ 22.09.1989
E-Posta : oytun71@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İTÜ, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2015, İTÜ, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Lisansüstü Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü' nü bitirdikten sonra Otokar firmasında 2012 yılı Ağustos ayında Proje Mühendisi olarak işe başladı. 10 ay Otokar firmasında çalıştıktan sonra Ankara' da bulunan Roketsan firmasında Sistem Tasarım Mühendisi pozisyonunda işe başladı ve günümüz itibariyle çalışmaya devam etmektedir.