



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**ZİRAİ LASTİKLERDE İF VE VF
TEKNOLOJİLERİNİN PERFORMANS
KARŞILAŞTIRMASI: BASINÇ, YÜK VE
JANT ETKİSİ**

ONUR KARAÇAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR

2024



T.C.

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**ZİRAİ LASTİKLERDE IF VE VF
TEKNOLOJİLERİNİN PERFORMANS
KARŞILAŞTIRMASI: BASINÇ, YÜK VE
JANT ETKİSİ**

ONUR KARAÇAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

DOÇ. DR. SÜLEYMAN KILIÇ

KIRŞEHİR

2024

KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değeriklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. 14/11/2024

Öğrenci
Onur KARAÇAY

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	I
TEŞEKKÜR	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TABLolar DİZİNİ.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IX

1. GİRİŞ.....	1
1.1 Lastik Genel Bilgiler	1
1.2 Zirai Lastikler	6
1.3 Lastiklerde Kord Yapısı	8
1.4 Lastiklerde Boyutsal Özellikler	10
1.5 Lastik Boyutu, Profili ve Yol Şartlarının Araç Performansına Etkisi	12
1.6 Amaç	14
1.7 Çalışmanın Önemi	15
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	17
2.1 Lastik Şişirme Basıncının Toprak Gerilmesi Üzerindeki Etkileri	17
2.2 Tarım Lastiklerinde Şişirme Basıncı ve Lastik Kayması.....	19
2.3 Balastın Tarım Lastikleri Performansına Etkileri.....	23
2.4 Lastik Endüstrisindeki Gelişmeler ve Toprak Sıkışması	27
2.5 Toprak Sıkışmasının Verimli Üretime Etkisi	28
2.6 Farklı Koşullarda Lastiklerin Toprak Sıkışması Üzerindeki Etkileri	29
2.7 Şişirme Basıncı ve Derecelendirme Konisi Eğrisi.....	31
2.8 Zirai Lastiklerde Karkas Sertliği Tahmini.....	32
2.9 Lastik Palet Sistemleri: Toprak Sıkışması ve Çekiş Performansı	33
2.10 Farklı Toprak Tiplerinde Lastik-Toprak Basınç Dayanımı.....	34
2.11 Taban İzi ve Dikey Gerilim Dağılımı Modellenmesi	35
2.12 Tarım Araçlarının Toprak Üzerindeki Gerilme Etkisi	37
2.13 Sert Zeminde Taban İzi Hesaplaması	38
2.14 Tarımsal Trafığın Toprak Gerilmesine Etkisi	39
2.15 Traktör Lastiklerinin Zemin Basıncı Üzerindeki Etkisi.....	40
2.16 Tarım Makineleri ve Toprak Gerilmeleri: Simülasyon Modeli.....	41

2.17 Lastik Yüğü ve Şişirme Basıncının Toprak Gerilmesine Etkisi	43
2.18 Nakliye Lastiklerinde Temas Basınçları	44
2.19 Traktör Kayması: Ekstra Ağırlık ve Lastik Basıncı.....	44
2.20 Analitik Toprak Sıkıştırma Modelleri	45
2.21 Taban İzi Ölçümü: Geleneksel ve Görüntü İşleme Teknikleri	46
3. MATERYAL VE METOT.....	49
3.1. Materyal.....	49
3.1.1 Boyutsal Ölçümlerde Kullanılan Malzeme	49
3.1.2 Taban İzi Ölçümlerinde Kullanılan Malzeme	51
3.2. Metot	52
3.2.1 Lastik Taban İzlerinin Alınması.....	53
3.2.2 Lastik Sehim (Deflection) Değerlerinin Alınması	55
3.2.3 Lastik Taban İzlerinin Ölçülmesi	56
3.2.4 Lastik Taban İzlerinin Görüntü İşleme Teknikleriyle Otomatik Ölçümü	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	59
4.1 Lastik Taban İzlerinin Ölçüm Sonuçları (Geleneksel Yöntem)	59
4.2 Lastik Taban İzlerinin Ölçüm Sonuçları (Görüntü İşleme Algoritması)	62
4.3 Lastik Sehim (Deflection) Ölçüm Sonuçları	64
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ.....	73

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sakin ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim insanının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Doç. Dr. Süleyman KILIÇ'a büyük bir içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmamıza desteğinden dolayı Petlas Lastik San. ve Tic. A.Ő.' ye, deneysel çalışmalarda destek olan Petlas lastik deney Őefi Ekrem TURNA'ya, Petlas ARGE müdürü Erdin ONAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Tanıştığımız günden bugüne hem manevi olarak hem akademik anlamda bana her zaman destek olan, varlıklarından her daim güç aldığım sevgili eşim Doç. Dr. Başak ÇIĞDEM KARAÇAY'a ve canım oğlum Doruk'a teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Kasım, 2024

Onur KARAÇAY

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZİRAİ LASTİKLERDE IF VE VF TEKNOLOJİLERİNİN PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI: BASINÇ, YÜK VE JANT ETKİSİ

ONUR KARAÇAY

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç Dr. Süleyman KILIÇ
Yıl: 2024, Sayfa: 73
Jüri: Dr. Öğr. Üyesi Sercan BASİT
Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM

Bu çalışma, zirai alanda kullanılan gelişmiş esneklik (IF Improved Flexion) ve çok yüksek esneklik (VF Very High Flexion) lastiklerinde, lastiğin zeminde oluşturduğu taban izinin basınç, yük, jant etkisi ile değişimini incelemek amacıyla yapılmıştır. Seçilen iki lastiğin taban izlerinin, lastik yükü, lastik basıncı ve lastik kullanım jantı etkisi altında değişimi incelenmiştir. Gelişmiş esneklik (IF-Improved Flexion), çok yüksek esneklik (VF-Very High Flexion) lastik teknolojisinin daha geniş taban izi, daha yüksek taşıma kapasitesi, yakıt tasarrufu gibi avantajları çalışmalara konu olmuştur.

Yapılan bu çalışmada üç farklı tip jant W18, DW20, DW21 kullanılarak farklı basınç değerlerinde 12psi, 17psi, 23psi, 29psi, 35psi, 4250kg ve 5150kg yük altında lastiklerin taban izi genişlik, taban izi uzunluk değerleri ölçülmüştür. Çalışmanın bir diğer aşamasında ise iki farklı jantın W18, DW21 farklı basınç değerleri 12psi, 17psi, 23psi, 29psi, 35psi altında sehim (deflection) ölçümleri yapılmıştır. Lastiğe uygulanan yük miktarı arttıkça sehim değerinin arttığı tespit edilmiştir. Lastikte basınç miktarında düşme ile taban izinin uzunluk değerinde artış olduğu bulunmuştur. Lastiklerde kullanılan jantın taban izi genişlik değerine sınırlı etkisi olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Gelişmiş esneklik (IF-Improved Flexion), Çok yüksek esneklik (VF-Very High Flexion), Lastik Taban İzi, Basınç, Yük, Jant

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

PERFORMANCE COMPARISON OF IF AND VF TECHNOLOGIES IN AGRICULTURAL TIRES: THE EFFECTS OF PRESSURE, LOAD, AND RIM

ONUR KARACAY

**KIRŞEHİR AHİ EVRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Süleyman KILIÇ
Year: 2024, **Pages:** 73
Juries: Assist. Prof. Dr. Sercan BASİT
Assist. Prof. Dr. Oğuz ERDEM

This study was carried out to examine the change of the tread created by the tire on the ground with pressure, load and rim effect in advanced flexibility (IF Improved Flexion) and very high flexibility (VF Very High Flexion) tires used in the agricultural field. The change of treads of two selected tires under the influence of tire load, tire pressure and tire usage rim was examined. The advantages of advanced flexibility (IF-Improved Flexion) and very high flexibility (VF-Very High Flexion) tire technology such as wider footprint, higher carrying capacity and fuel economy have been the subject of studies.

In this study, the tread width and tread length values of the tires were measured under different pressure values of 12psi, 17psi, 23psi, 29psi, 35psi, 4250kg and 5150kg load using three different types of rims W18, DW20, DW21. In another stage of the study, deflection measurements were made on two different rims W18, DW21 under different pressure values of 12psi, 17psi, 23psi, 29psi, 35psi. It has been determined that the deflection value increases as the amount of load applied to the tire increases. It has been found that there is an increase in the length of the tread as the amount of tire pressure decreases. It has been observed that the rim used in the tires has a limited effect on the tread width value.

Key Words: Improved flexibility (IF-Improved Flexion), Very high flexibility (VF-Very High Flexibility), Tire foot print, Pressure, Load, Rim

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 1.1. Kord tipleri	9
Tablo 1.2. Radyal ve çapraz lastikler için katsayı tablosu	12
Tablo 3.1 Lastik boyutsal ölçümleri	50
Tablo 3.2 Test değişkenleri	53
Tablo 4.1 Zirai lastik jantı parametre değerleri.....	59
Tablo 4.2 600/70 R30 lastiği taban izi ölçüm değerleri.....	60
Tablo 4.3 IF 600/70 R30 lastiği taban izi ölçüm değerleri	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Hevea brasiliensis ağacı.....	2
Şekil 1.2. Radyal lastiğin yapısal bileşenleri.....	4
Şekil 1.3. Lastik topuk demeti ve apeks.....	5
Şekil 1.4. W profil jant şematik gösterimi.....	5
Şekil 1.5. Çapraz ve radyal lastikler.....	6
Şekil 1.6. Lastik teknolojisinde malzemelerin evrim sıralaması.....	8
Şekil 1.7. 3+7x0.22 çelik kord şematik gösterimi.....	10
Şekil 1.8. Zirai lastik şematik gösterimi.....	11
Şekil 1.9. Lastik – yol sürtünme modeli.....	14
Şekil 2.1. Farklı tipte Michelin marka zirai lastikleri.....	17
Şekil 2.2. Lastik gerilme değişiminin kodlanması.....	19
Şekil 2.3. Çekiş kuvvetinin çekiş verimliliği ve lastik kaymasına etkisi.....	21
Şekil 2.4. Çekiş verimliliği ve lastik kayması modeli.....	22
Şekil 2.5. Çekiş verimliliği ve lastik kayması grafik oluşturma modeli.....	23
Şekil 2.6. Farklı lastik tipleri, a-)Bias-Ply ve Radyal.....	23
Şekil 2.7. Çalışmada kullanılan test lastikleri, a-)Bias, b-)Radyal.....	24
Şekil 2.8. Traktörlerde temas alanı ve deformasyon miktarı modeli.....	25
Şekil 2.9. Traktörlerde temas alanı ve deformasyon miktarı grafik oluşturma modeli ..	26
Şekil 2.10. Artan su birikintisi ve toprak hasarı.....	29
Şekil 2.11. Farklı tipte lastiklerin toprak sıkışmasına etkisi.....	30
Şekil 2.12. Traktör palet lastik sistemi.....	34
Şekil 3.1. a) 600/70 R30 b) IF 600/70 R30.....	49
Şekil 3.2. Montajlanmış lastikler.....	49
Şekil 3.3. Boyutsal ölçümlerde kullanılan materyaller.....	50
Şekil 3.4. Lastiklerin boyutsal ölçümleri.....	50
Şekil 3.5. a) Standart lastik b) IF lastik c) VF lastik.....	51
Şekil 3.6. Zirai araç jant tipleri.....	52
Şekil 3.7. U-CAN Statik Test Makinesi.....	53
Şekil 3.8. Test cihazı bağlantı işlemi.....	53
Şekil 3.9. Şişirme basıncı kontrolü.....	54
Şekil 3.10. Lastiklerden taban izi alınması.....	54

Şekil 3.11. Lastiklerde sehim (deflection) değerlerinin alınması	55
Şekil 3.12. Taban izi alınan kağıt.....	56
Şekil 3.13. Lastik taban izi ölçümü.....	57
Şekil 3.14. Algoritmanın akış diagramı	58
Şekil 4.1. W Jant profili.....	59
Şekil 4.2. W18 35psi 600/70 R30 W18 35psi IF 600/70 R30.....	60
Şekil 4.3. a) Kırpma bölgesi seçimi b) Kırpılmış resim	62
Şekil 4.4. a) Kırmızı alan ölçümü b) Siyah-beyaz alan ölçümü.....	63
Şekil 4.5. Farklı yöntemlerle hesaplanan taban izi ölçüm sonuçları.....	64
Şekil 4.6. 600/70 R30 Lastiği Yük-Basınç-Sehim Grafiği (DW21 Jant).....	65
Şekil 4.7. 600/70 R30 Lastiği Yük-Basınç-Sehim Grafiği (W18 Jant).....	65
Şekil 4.8. IF 600/70 R30 Lastiği Yük-Basınç-Sehim Grafiği (DW21 Jant)	66
Şekil 4.9. IF 600/70 R30 Lastiği Yük-Basınç-Sehim Grafiği (W18 Jant)	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
d	: Dış çap (Design Overall Diameter)
h	: Yanak yüksekliği (Design Section Height)
dr	: Jant çapı (Nominal Rim Diameter)
$dmax$: Maksimum dış çap
$dmin$: Minimum dış çap
$hmin$: Minimum yanak yüksekliği
$hmax$: Maksimum yanak yüksekliği
$Fhmin$: Minimum faktör katsayısı
$Fhmax$: Maksimum faktör katsayısı
SN	: Kesit genişliği (Nominal Section Width)
ar	: Yanak boyutu (Nominal aspect ratio)
k	: Faktör katsayısı
a	: Ölçüm jantı genişliği (Measuring Rim Width)
aI	: Teorik jant genişliği (Theoretical Rim Width)
S	: Kesit genişliği (Design Section Width)
$Smin$: Minimum kesit genişliği (Minimum Section Width)
$Fsmin$: Minimum kesit genişliği katsayısı
SG	: Maksimum kesit genişliği (Maksimum Overall Width)
FSG	: Kesit genişliği katsayısı
s	: Kayma oranı (slip ratio)
ω	: Açısal hız
r	: Lastik yarıçapı
Vx	: Gerçek hız
μ	: Sürtünme katsayısı
Fx	: Çekiş kuvveti
Fn	: Normal kuvvet
Ft	: Çekiş kuvveti
Ff	: Yuvarlanma direnci kuvveti
λ	: Boyuna kayma
$Re\omega$: Boyuna hız
v	: Araç hızı
μk	: Kinetik sürtünme katsayısı
μs	: Statik sürtünme katsayısı
dc	: Bozunma katsayısı
Crr	: Yuvarlanma direnci katsayısı
Frr	: Yuvarlanma direnci kuvveti
m	: Lastik başına düşen araç kütlesi
g	: Yerçekimi ivmesi
Ma	: Aks torku
Ft	: Tahrik kuvveti
Ry	: Yuvarlanma direnci
rt	: Dinamik lastik yarıçapı
$W(N)$: Dinamik aks yükü
e	: Lastik ile basınç merkezi arasındaki mesafe

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

K	:	Kayma değeri
Ref	:	Lastik yuvarlanma yarıçapı
Kt	:	Dikey yön dayanım
D	:	Jant çapı
A	:	Lastiğin yaşı
$W(SN)$:	Lastik kesit genişliği
P	:	Lastik basıncı
Kz	:	Dikey sertlik
$W(mm)$:	Taban izi genişlik
OD	:	Lastik dış çapı
PC	:	Lastikle zemin arasındaki temas basıncı
Pi	:	Lastik şişirme basıncı
Pm	:	Temas basıncı
PCs	:	Lastik karkas dayanım basıncı
σm	:	Normal gerilim değeri
σmax	:	Maksimum gerilim değeri
$Pi-max$:	Ölçülen maksimum basınç
ks	:	Orantı katsayısı
ν	:	Poisson oranı
kc	:	Kohezyon modülü
b	:	Taban izinin küçük boyutu
$k\phi$:	Sürtünmeli zemin modülü
n	:	Üssel sabit
z	:	Batma miktarı
pu	:	Boşaltma başlangıcındaki basıncı
ku	:	Boşaltma ve yeniden yükleme sırasındaki arazi sertliği
zu	:	Boşaltma başlangıcındaki en yüksek çökmeyi
$k'\phi$:	Boyutsuz kohezyon değeri
γs	:	Arazinin ağırlık yoğunluğu
σz	:	Dikey gerilme
σr	:	Yatay gerilme
τr	:	Kayma gerilme
C	:	Toprak uyumu
As	:	Lastik taban izi
G	:	Dikey yük
η	:	çekiş verimliliği
k	:	çekiş katsayısı
ρ	:	yuvarlanma direnci katsayısı
W	:	Çekiş yüzeyine dik toplam kuvvet
δ	:	sehim
$C1-C7$:	katsayı
Pg	:	zemin basıncı
b	:	kesit genişliği
ci	:	lastik sertliği sabiti
TS	:	lastik boyutu
RCI	:	Derecelendirme konisi eğrisi
At	:	Toplam temas yüzey alanı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_e	:	Etkin temas yüzey alanı
V_x	:	Gerçek hız
θ_i	:	Normal vektör ile konum vektörü arasındaki açı
b	:	Dairesel plakanın çapı
n^t	:	Basınç çökmesi zemin üssü
ζ	:	Konsantrasyon faktörü
F_w	:	Tekerlek yükü
f	:	Frekans
θ	:	Yük ve konum vektörü arasındaki açı
A_q	:	Süper elips alanı
A	:	Lastik zemin temas alanı
W_A	:	Lastik temas alanı genişliği
L_A	:	Lastik temas alanı uzunluğu
K_s	:	Teorik hız oranı
ν_m	:	Poisson oranı
PI	:	Bolling basıncı
A_o	:	Taban izi alanı
hk	:	Lastiğin kesit yüksekliği
r_s	:	Statik yarıçap
fk_j	:	Nominal yük sehim
H_i	:	Yatay gerilim
R_r	:	Yuvarlanma yarıçapı (Rolling radius)
P_z	:	Tahrik lastiklerinin mesafesi
V_a	:	Hız
ω_e	:	Açısal hız
\dot{I}_{tr}	:	Traktör aktarım oranı
B_{ha}	:	Hektar başına yakıt tüketimi
B_s	:	Lastik genişliği
D_e	:	Lastik çapı

Kısaltmalar

Açıklama

ETRTO	:	Avrupa Lastik ve Jant Teknik Organizasyonu
JATMA	:	Japonya Otomobil Lastik Üreticileri Organizasyonu
TRA	:	Lastik Jant Organizasyonu
EDI	:	Mühendislik Tasarım Bilgileri
IF	:	Gelişmiş Esneklik
VF	:	Çok Yüksek Esneklik
HA	:	Harmoni Arama
MEB	:	Milli Eğitim Bakanlığı
RMSE	:	Ortalama karekök hatası
RCI	:	Derecelendirme Konisi Endeksi
NR	:	Doğal Kauçuk
BR	:	Polibütadien Kauçuk

1. GİRİŞ

1.1. Lastik Genel Bilgiler

Lastik iç yapısında kullanılan bileşenler, lastik performans özelliklerine doğrudan etki etmesi nedeniyle kritik öneme sahiptir. Bunun yanında, toprak ve arazi koşulları, araç tipi ve kullanım amacı doğru lastik seçimi için önemlidir. Lastik teknolojisinde toprak sıkışması, düşük şişirme basıncı ile lastik kullanımı, çekiş ve kayma sırasında verimli çalışma koşulları sağlanabilmesi için doğru tercihler yapılmalıdır.

Lastik, ana hammaddesi kauçuk olan ve yardımcı kimyasallar ile hazırlanmış karışım içerisinde tekstil ve/veya çelik kord ipliklerinin belirli bir düzende yer aldığı kompozit bir yapı sistemidir. Gerçek anlamda lastik üretimi ilk kez 1839 yılında Charles Goodyear tarafından kauçuğun kükürt etkisiyle vulkanizasyon işlemi ile ortaya çıkmıştır (Calzonetti ve Laursen, 2010). Kauçuk sıcaklık etkisi altında kimyasal reaksiyona girmesi ile yapı değişikliğine uğramaktadır. Bu yapı değişikliği ile birlikte kauçuk zincirlerin çapraz bağlanarak geri dönüşümsüz elastik özelliklere sahip duruma gelmesine vulkanizasyon denilmektedir (Coran, 1994). Vulkanizasyon işleminin temeli, polimer molekülleri ile çapraz ağ yapısı oluşumu ve kauçuğun makromolekül yapısını birleştiren kimyasal köprülerdir. Çapraz ağ yapısı, kauçuğun elastik özelliklerinin oluşumuna neden olmaktadır. Kauçuk vulkanizasyonu ile üretilen ürünler lastik imalatı için kullanılmaktadır (Hofmann, 1989).

Araç lastikleri yük taşıyan, güç iletimi sağlayan, aracın zeminle temasını sağlayan, emniyet açısından önemli bir etkiye sahip olan araç aksamlarından biridir. Ayrıca lastiklerin yakıt performansına, sürüş konforuna ve son yıllarda birçok araştırmaya konu olan karbon emisyonuna doğrudan etkisi olduğu bilinmektedir. Lastik içerisinde farklı yapısal bölgeler bulunabilmektedir. Lastiğin kullanım yeri ve amacına göre farklılık göstermekle birlikte lastiğin içerisinde yer alan karkas, topuk ve kuşak yapılarının işlevleri farklıdır.

Lastiğin ana hammaddesi olan doğal kauçuk (NR) ağaçların öz suyundan elde edilmektedir. Sentetik kauçuk ise yağdan üretilmektedir. 1960'lı yıllarda, sentetik kauçuk ile doğal kauçuk üretiminin aynı seviyelerde olduğu bilinmekteydi (Öztürk, 2008). Sentetik kauçuk, tam anlamıyla doğal kauçuğun özelliklerine sahip olmasa da üretim kolaylığı açısından daha avantajlıdır. Doğal kauçuk olan, kauçuk ağacının (Şekil 1.1) *Hevea brasiliensis* anavatanı Brezilya olup Malezya, Endonezya, Sri Lanka vb. ülkelerde kauçuk ağacına çizikler atarak elde edilmektedir.



Şekil 1.1. Hevea brasiliensis ağacı (Nair, 2021).

Bölgedeki ağaçlardan toplanan lateks doğal kauçuğun kaynağıdır. Kauçuğun yüksek elastikiyeti en önemli özellikleri arasındadır (Semegen ve Cheong, 1973). Kauçuk malzemesi lastik, titreşim önleyici kayış, körük, motor takozu, sızdırmazlık elemanları, keçe, oring, conta vb. pek çok ürünün hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Doğal kauçuğa, stiren bütadien ve poli bütadien takviyesi yapıldığında aşınma dayanımı, fiziksel özellikleri ve ısıya karşı direnci iyileşmektedir (VAHAPOĞLU, 2007). Doğal kauçuk, yüksek miktarda kopma ve yorulma dayanımına sahiptir. Suya ve soğuk ortamlara dayanıklıdır. Düşük sıcaklık değerlerinde ise iyi esneme özelliği göstermektedir. Metal malzemeler ile yapışma kabiliyeti yüksektir. Oksijen, ozon ve gün ışığında ise dayanımı düşüktür (Rackaitis ve Graves, 2017).

Kauçuk malzemelerin kullanım yeri ve amacına göre farklı mekanik özellikler göstermesi beklenmektedir. Kauçuk malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri; karışım reçetesine, yardımcı kimyasalların oranlarına, pişirme sistemine, üretim proses parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Lastiği oluşturan bileşenlerden bir diğeri ise karbon karasıdır. Karbon karası ilk olarak 1904 yılında İngiliz bilim insanları tarafından keşfedilmiştir. Karbon karası 1910 yılından günümüze otomobil lastiklerinde kullanılmaktadır. Karbon karası kauçuk endüstrisinde %95 oranında kullanılmaktadır. Koyu siyah renkli, ince taneli, amorf haldeki karbon türleri karbon karası olarak ifade edilmektedir. Kauçuğa mukavemetini veren karbon karasıdır (Şahin, 2022). Petrol türevi olması nedeniyle çevre kirliliğine neden olmaktadır. Kauçuğa siyah rengini veren karbon karasıdır. Lastik endüstrisinde, emisyon oranlarını azaltmak

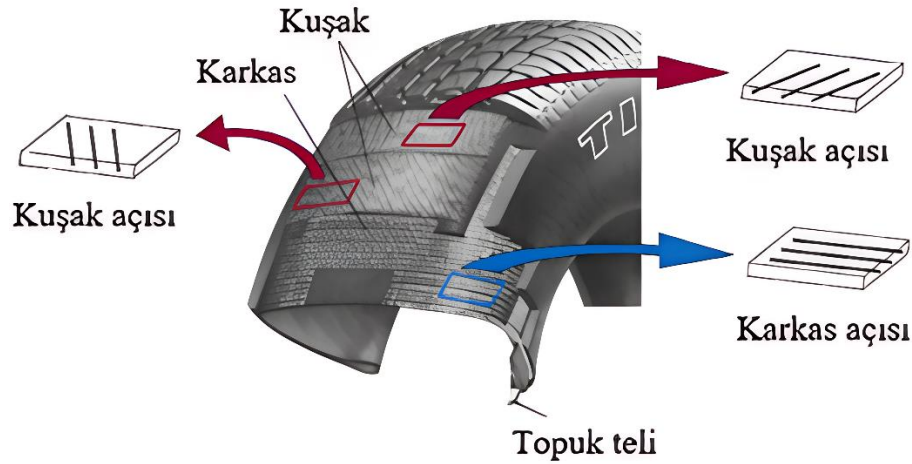
amacıyla lastiğin özelliklerini bozmadan karbon siyahı kullanımı azaltılmaya çalışılmaktadır (Ren ve ark., 2016). Malzemelerin aşınma ve korozyon direncini arttırmak amacıyla güçlendirici dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Lastiğin özelliklerini geliştirmek için kullanılan silika ve sentetik dolgu malzemeleri diğer dolgulara göre daha pahalıdır. Silika kimyasalı, karbon karasından sonra en çok kullanılan lastik güçlendirme malzemesi olup karbon karası kadar küçük tanecik boyutuna ve yüksek yüzey aktivitesine sahiptir. Toplam yüzey alanı arttıkça kopma, aşınma, yırtılma dayanımları artmaktadır. Beyaz veya renkli kauçuk ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır (Sellers ve Toonder, 1965).

Lastik üretiminde vulkanizasyon işlemini gerçekleştiren birçok kimyasal olmasına rağmen en çok bilinen kükürttür. Lastik içerisinde çözünen veya çözünmeyen kükürt kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklarda kauçuk içerisindeki kükürt fazla miktarda çözünmektedir. Çözünen kükürt 100°C'de hızla çözülmeye başlar ve dış yüzeye doğru difüzyona uğramaktadır. Çözünmez kükürt ise 140°C'ye kadar çözülmeye dayanıklıdır. Proses sırasında çözünmez kükürt kullanılarak kükürt kusması engellenmektedir. Çözünmez kükürt, çözünür kükürde göre daha pahalı olması ve uzun süre depolama için uygun olmaması nedeniyle kullanımını sınırlı düzeyde kalmaktadır (Bristow, 1986).

Kauçuk karışımlarında dolgu maddeleri, maliyeti düşürmek, mekanik ve işlenebilirlik özellikleri iyileştirmek için toz halinde, küçük tane boyutlarında ilave edilmektedir. Dolgu maddeleri organik veya inorganik yapıda olabilir. Dolgu maddeleri kauçuk karışımlar için sertliğin ve hacmin artmasına destek olmaktadır. Dolgu maddesinin boyutu, şekli, kauçuk karışımı içerisindeki dağılımı mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir (Erkek ve Erbatur,2008).

Lastik yapısında yükü taşıyan eleman basınçlı havadır. Lastiğin karkas yapısı, basınçlı havanın lastik yapısı içerisinde muhafaza edilmesini sağlar. Lastiğin temel bileşenleri olan tekstil veya çelik kordların katmanlar halinde yerleştirilmesiyle karkas yapı meydana gelir. Karkas yapısında çelik teller, Pet, Naylon-6, Naylon-66 gibi kordlar kullanılmaktadır. Kordlar kullanım amacına göre farklı açılarda tercih edilebilmektedir. Örneğin radyal bir lastik sırt gövdesinde 15° ile 25° açılarla üst üste çapraz olarak kuşaklar yerleştirilebilmektedir. Kuşaklar lastikte mukavemeti artırmakta ve lastiğin zeminle temas eden bölgesinin alanını büyütme yardımcı olmaktadır. Karkası oluşturan çelik veya tekstil kordlar topuk teli etrafında dolanarak yapının topuk ile kenetlenmesi sağlamaktadır. Lastiğin karkas yapısı taşıma kapasitesini, dayanıklılığını ve yük altında

davranışını belirlemektedir. Araç lastiklerinde zemin ile temas eden bölge sırt olarak adlandırılmaktadır. Sırt bölgesi, lastiğin karkas yapısında aşınma, ısınma, yarıma ve kesilme gibi yoldan gelebilecek etkenlere karşı lastiği korumaktadır. Düşük ses üretimi, iyi çekiş, düşük ısı üretimi lastiğin sırt bölgesinden beklenen özelliklerdendir. Bunun yanında, binek otomobil lastiklerin sırt bileşenleri genel olarak stiren bütadien kauçuk (SBR) ve poli bütadien (BR) kauçuktan oluşmaktadır. Kamyon otobüs lastiklerinin sırt bileşenleri ise çoğunlukla karbon karasına benzer doğal kauçuktan elde edilmektedir. (Rodgers ve Abdullahi, 2016). Sırt deseni ve sırtı oluşturan kimyasal karışımın cinsi lastiğin yolda tutunmasını, ıslak zemin davranışını, çekiş kabiliyetini, frenleme mesafesini belirlemede etkili olmaktadır (Pay, 2009). Lastikte sırt deseni üzerindeki bloklar yol şartları etkisiyle birlikte lastiğin yol ile temasından oluşan sesin seviyesinde etkili olmaktadır. Her lastiğin kullanım amacına göre sırt deseni farklı tasarlanmaktadır. Radyal bir lastiğin yapısal bileşenleri Şekil 1.2’de görülmektedir. Örneğin bir otomobil lastiğinde kış lastiği ve yaz lastiği sırt desenleri farklıdır. Lastik sırt deseni üzerindeki kanallar yağmur ve kar sularının tahliye edilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

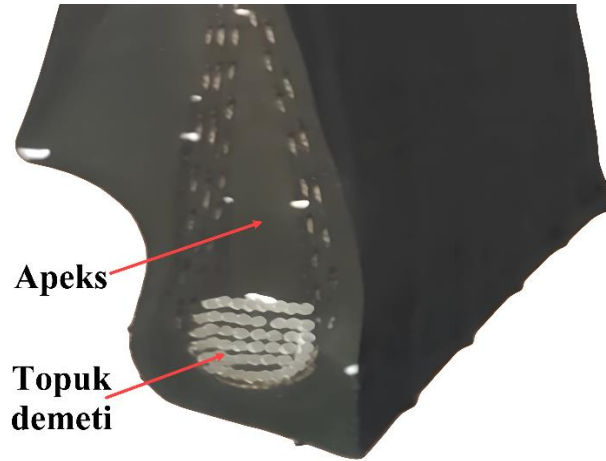


Şekil 1.2. Radyal lastiğin yapısal bileşenleri (Korunović ve ark., 2019)

Lastikte sırt ile topuk bölgesi arasında olan, esneklik sağlayan, lastiğin yük ve hız değerleri, markalaması ve diğer tanıtıcı bilgileri yanak bölgesinde bulunmaktadır. Yanak bölgesi, lastiğin gövdesinin dış ortamdan gelebilecek yatay yönlü kesik, sürtünme vb. olumsuz durumlara karşı korunmasını sağlamaktadır. Lastik üzerindeki yanak bölgesi konumu nedeniyle yüksek düzeyde lekelenmeye, ozon ve güneş ışığına maruz kalması nedeniyle kauçuk bileşiminde yüksek düzeyde antioksidan ve antiozonant kullanılmaktadır. Bunun yanında doğal kauçuk ve poli bütadien yanak bileşiminin diğer ana kimyasal bileşenlerini oluşturmaktadır (Rodgers ve Waddell, 2005). Lastiğin karkas

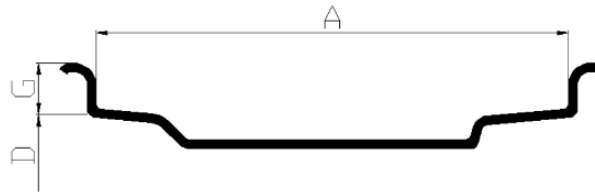
yapısının üzerinde sırt deseni altında kalan katmanlara kuşak adı verilmektedir. Günümüzde kuşak yapısı tüm lastiklerde kullanılmamaktadır. Genel kullanım alanı radyal gövde yapısında olan lastiklerdir. Kuşaklar lastik içerisinde tekstil veya çelik kord yapılarında tercih edilebilmektedir.

Lastiğin jant ile montajlanması ve araçla olan güç aktarma ilişkisi topuk yapısı sayesinde olur. Topuk çelik tellerin karışımıyla (kauçuk) kaplanmasıyla oluşan dairesel yapıdır. Lastikte topuk yapısı motor gücünü yola aktararak aracın hızlanmasını, frenleme gücünü yola aktararak yavaşlamayı ve durdurmayı sağlamaktadır (Pay, 2009). Lastik topuk bölgesinde bulunan bir diğer bölge apeks olarak adlandırılmaktadır. Apeks bileşiği, iç gövde katları ile dışarı doğru kıvrılmış gövde katları arasında bitmektedir. Topuk demeti ve apeks Şekil 1.3’de görülmektedir. Bunun yanında sürüş, kullanım özellikleri apeks yüksekliğinden ve sertliğinden etkilenmektedir (Gent ve Walter, 2006).



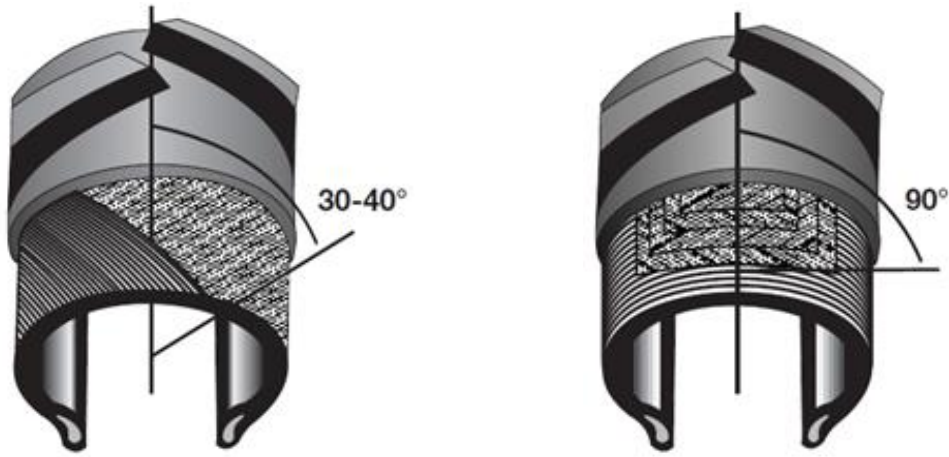
Şekil 1.3. Lastik topuk demeti ve apeks

Araç montajında kullanılacak topuk yapısı, lastiğin kullanım jantı profili ile uyumlu çalışmalıdır. Örneğin Şekil 1.4’de belirtilen W profil (contour) kullanım jantına sahip olan bir araç için jant profili üzerinde belirtilen matematiksel değerlerin topuk tasarımında dikkate alınarak ürün tasarımı yapılmaktadır. Lastiğin kullanım yeri, kullanım amacı, araç tipi, montajlama kolaylığı lastik jant uyumunda önemli hususlardır.



Şekil 1.4. W profil jant şematik gösterimi

Günümüzde lastikler farklı biçimlerde sınıflandırılabilirler. Gövde yapısına göre lastikler, konvansiyonel (çapraz) ve radyal olarak iki gruba ayrılmaktadır. Lastik teknolojisinde ilk olarak konvansiyonel lastikler üretilmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle radyal lastikler tercih sebebi olmuştur. Bir lastiğin konvansiyonel veya radyal yapıda olduğunu kullanan kord bezleri belirlemektedir. Konvansiyonel lastiklerde, kord bezleri 30°- 40° (Şekil 1.5) açılarla üst üste çapraz biçimde sıralanmaktadır. Radyal lastiklerde ise kord bezleri lastiğin dönme eksenine göre 90° açı ile sıralanmaktadır.



Şekil 1.5. Çapraz ve radyal lastikler (Goodyear katalog 2021)

Lastikler hava tutma sistemine göre iç lastikli (tube type) ve iç lastiksiz (tubeless) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İç lastikli lastiklerde hava, lastik içine yerleştirilen ve iç lastik adı verilen kauçuk malzemeden imal edilmiş bir yapı içerisinde muhafaza edilmektedir. İç lastiksiz lastiklerde ise hava, jant ile lastik arasında doldurulmaktadır. Bu nedenle havayı muhafaza etmek için iç yüzeyde kauçuk karışımdan yapılan ince astar bulunmaktadır.

1.2. Zirai Lastikler

Günümüz lastik teknolojisi devamlı bir gelişim halindedir. Zirai alanda kullanılmakta olan araç lastikleri yaygın bir kullanım sahasına sahiptir. Lastik ürünlerinden beklenen uzun kullanım ömürleri, ucuz ve rekabetçi olan maliyetler, doğa dostu, mahsule zarar vermeyen, düşük yakıt tüketimine sahip olan teknolojik ürünler tercih sebebi olmaktadır. Damanauskas ve arkadaşları, gıda üretiminde yüksek verimlilik için tarımsal mekanizmaların gerekliliğini, yakıt kaynaklarının kısıtlı olması nedeniyle

traktör üreticileri ve kullanıcılarının düşük yakıt tüketimi için teşvik edilmelerini tavsiye etmişlerdir (Damanauskas ve ark., 2015). Gelişen teknolojiyle birlikte traktör boyutlarının ve dolayısıyla ağırlıklarının artması ile toprak sıkışma riski meydana gelmektedir. Traktörlerde artan motor gücü ve çekiş kuvveti yeni teknolojiye uygun lastik talebini oluşturmaktadır (J. Arvidsson ve ark., 2011). Son kullanıcı lastikten en iyi şekilde maksimum fayda beklemektedir. Traktörlerin çekiş performansı, araç ve araçlarda kullanılan ekipmanlara, toprağın özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Lastik şişirme basıncı, lastik yükü gibi parametrelerin kontrolü ile iş verimliliği, yakıt tüketimi, düşük kayma oranları sayesinde sera gazı emisyonlarında azalma sağlanabilmektedir (Battiato ve Diserens, 2017). Zirai lastik alanında son dönemde lastiğin taşıma kapasitesi, taban izi, yakıt tasarrufu konularında çalışmalar yapılmaktadır. Shaheb ve arkadaşları sürdürülebilir bitkisel üretimde toprak sıkışmasının etkisi ve yönetimini incelemişlerdir. Toprak sıkışmasının, bitkinin kök yapısını değiştirdiği toprakta oluşan kütle yoğunluğunu, toprak mukavemetini arttırdığı, toprağın gözenekli yapısını azalttığı belirtilmiştir (Shaheb ve ark., 2021). Hızla büyüyen dünya nüfusu tarımsal faaliyetler, sürdürülebilir bitkisel üretim önem arz etmektedir. Günümüz tarım sektörü özellikle ağır tonajlı makinelerin kullanımında lastik, basınç ve jant seçiminin doğru yapılamaması nedeniyle zirai mahsullere zarar veren lastik kullanımı olabilmektedir. Lastik ile zemin arasındaki gerilme dağılımının olumsuz etkilerinden kaçınmak amacıyla kontrol altında olmalıdır.

Zirai alanda toprak yapısı, arazi eğimi, araç yapısı ve kullanım amacına uygun şekilde lastik seçimi yapılmalıdır. Örneğin; 380/85 R34 137A8 lastiği ve VF 380/85 R34 149A8 lastiği aynı araçta kullanılabilen iki farklı lastiktir. Her iki lastiğin aks başına taşıma kapasitesi farklıdır. VF 380/85 R34 149A8 lastiğinin ebat açılımında yer alan 149A8 ibaresi lastiğin 40km/s hızda aks başına 2300 kg taşıyabileceğini ifade etmektedir. Son kullanıcının kullanım amacına uygun şekilde doğru lastiği seçmesi uygulama sırasında lastiğin daha verimli çalışmasını sağlayacaktır. Aynı araçta kullanılabilen iki farklı lastiğin yük/hız indekslerinin farklı olması kullanım basınçlarının da farklı olmasını gerektirmektedir. Dolayısıyla her iki lastiğin zeminde oluşturduğu taban izleri farklı olacaktır.

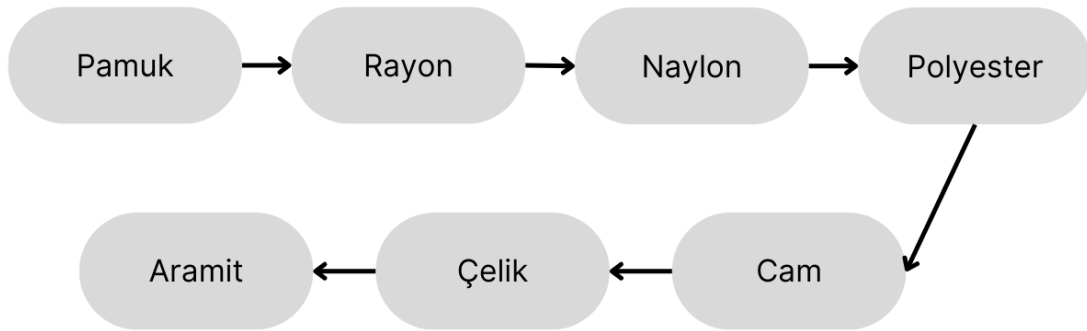
Zirai alanda son dönemde IF/VF lastik teknolojisine sahip ürünlerin sayısı artmaktadır. Damme ve arkadaşları lastik toprak gerilme dağılımında en büyük gelişmenin radyal traktör lastiklerinde daha düşük şişirme basınçlarında lastiklerin piyasaya sürülmesiyle elde edildiğini vurgulamışlardır. Bu durumun ön ve arka lastiklerin

normal gerilim dağılımlarında büyük oranda azalmalara neden olduğu belirtilmiştir. Toprak gerilim dağılımını azaltmada çok düşük şişirme basıncına sahip yeni lastiklerin geliştirilmesi gerekliliği ifade edilmiştir (ten Damme ve ark., 2019). IF/VF lastiklerin kullanım amacı basınç değişimi ile toprak sıkışmasını azaltmak, daha fazla yük taşımak ve lastiğin taban izini artırarak yakıt ve zamandan tasarruf sağlamaktır.

Lastik üretiminden önce lastiğin kullanım amacına uygun şekilde materyal seçimi yapılmalıdır. IF/VF teknolojisine sahip lastiklerde, malzeme seçimi yapılırken esnekliği ve taban izini optimum seviyede sağlayacak, yük kapasitesi standart lastiklere nazaran daha yüksek seviyede olan lastikler tercih edilmelidir.

1.3. Lastiklerde Kord Yapısı

Lastiği oluşturan bileşenlerin içerisinde kord bezleri önemli bir etkiye sahiptir. Lastik sanayisinde yapısal güçlendirici olarak tekstil veya çelik kordlar kullanılmaktadır. Günümüz lastik teknolojisinde genellikle tekstil malzemesi olarak polyester, rayon, çelik, aramit malzemeleri tercih edilmektedir (Barron, 1987). Bu malzemelerin evriminin sıralaması Şekil 1.6'da belirtilmiştir.



Şekil 1.6. Lastik teknolojisinde malzemelerin evrim sıralaması

Lastik mukavemeti için kord malzemesinden beklenen özellikler yüksek yorulma dayanımı, düşük ısı iletimi, boyutsal kararlılık ve kauçuk karışım ile yapışma sağlamasıdır. Yüksek tonajlı araçlarda naylon kord bezlerinin, polyester kordlara göre mükemmel dayanım gösterdikleri tespit edilmiştir (Liu ve ark., 2003). Isı etkisinde kalan lastiklerde genel olarak kordların mekanik özellikleri önemli ölçüde azalmaktadır. Dinamik çalışma şartlarında, naylon 6.6 kordu, naylon 6 korduna göre daha yüksek ısı üretim hızına sahiptirler (Prevorsek ve ark., 1987). Tekstil kordlar lastiğin kontrollü şekilde uzamasına ve lastiğin kullanım sırasında boyutsal özelliklerinin korunmasına

destek olmaktadır. Kord bezleri, lastikte mukavemet, boyutsal kararlılık, yük taşıma kapasitesinde belirleyici bir unsur olması nedeniyle lastik yapısının en önemli materyalidir. Kordların yapısı gereği mekanik özellikleri gerilmeye karşı direnç, boydaki uzama, öz dayanım (modülüs) arasında farklılıklar Tablo 1.1’de belirtilmiştir (Kovac ve Rodgers, 1994).

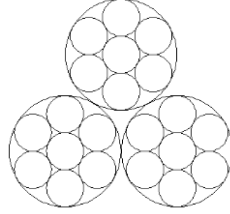
Tablo 1.1. Kord tipleri

Kord Tipi	Gerilmeye Karşı Direnç (g.Den)	Uzama (%)	Modülüs (g.Den)
Rayon	5.0	16	50
Naylon	9.0	19	32
Polyester	6.5	18	65
Cam	9.0	4.8	260
Çelik	3.8	2.5	200
Aramit	20.1	4	350

Lastik iç yapısında tercih edilen kord tipine göre lastikler farklı mekanik özellikler gösterebilir. Örneğin; rayon tipi kordlar sentetik pamuk ipliği olarak bilinmekte ve diğer tekstil kordlara göre nemden daha çok etkilenmektedir. 20° ve %65 bağıl nemde kendi ağırlığının %13’ü kadar su soğurabilmektedir. Rayon mekanik özellikleri sayesinde sıcak havada neredeyse hiç kısalmaz. Naylon ve polyester kordlar rayona göre yüksek kopma mukavemet değeri ile tercih sebebi olmaktadır (Norhausen, 2002). Naylon kordlar ise organik yapıda sürekli bir liftir. Ticari araç lastiklerinde 1947’den günümüze kullanımı devam etmektedir. Naylon liflerin yüksek mukavemeti, kauçuk karışıma mükemmel yapışma, yüksek yorulma dayanımı öne çıkan özellikleri arasındadır (Kovac, 1978). Polyester kordların, yüksek kopma mukavemeti, düşük kısalma özelliği, boyutsal kararlılığı öne çıkan özellikleridir. Kullanım sırasında yüksek sıcaklık altında fazla miktarda ısı üretmektedir. Polyester kordlar, naylon kordlar ile kıyaslandığında yüksek boyutsal kararlılık ve uygun fiyat avantajına sahiptir (Naskar ve ark., 2004). Cam lifinin darbe direncinin zayıf olması yanında yüksek mukavemeti, korozyon direnci, yorulma direnci önemli özellikleri arasındadır. Yapısı gereği gevrek bir malzeme olması nedeniyle lastik içerisinde kullanımı sınırlı düzeyde kalmaktadır (Aytaç, 2007).

Lastik teknolojisinde çelik kordlar, yüksek mukavemet, boyutsal kararlılık, yüksek hızlara uyum sağlama özellikleri nedeniyle tercih sebebi olmaktadır. Üretim aşamasında kauçuk bileşiminin çelik kordla kaplanmasında yaşanan zorluklar nedeniyle, çelik kordlar bakır, çinko alaşımı olan pirinçle kaplanarak prosese uygun hale getirilmektedir. Kaplama prosesi sürecinde kalınlık ayarı iyi yapılmadığı durumlarda yapışma gücünün azalmasına neden olmaktadır. Pirinç kaplama lastik ile çelik kord

arasında bağlanmayı sağlamaktadır. Radyal otomobil lastiklerinin gövde ve kuşak katlarında genel olarak çelik kordlar kullanılmaktadır (Aytaç, 2007). Çelik kord, çelik tellerin bir arada bükülmesi ile meydana gelmektedir. İki veya daha fazla tel birbirleri üzerinde sarılı bulunur. Çelik kordların yazımında tel adeti, tel çapı, demet sayısı şeklinde ifade edilmektedir. Örneğin; 3+7x0.22 (Şekil 1.7) bir çelik kord şekil yazımında 7 tane 0.22 çapında 3 demet telin birbiri üzerinde sarılarak oluşumunu ifade etmektedir (Mehmet, 2005).



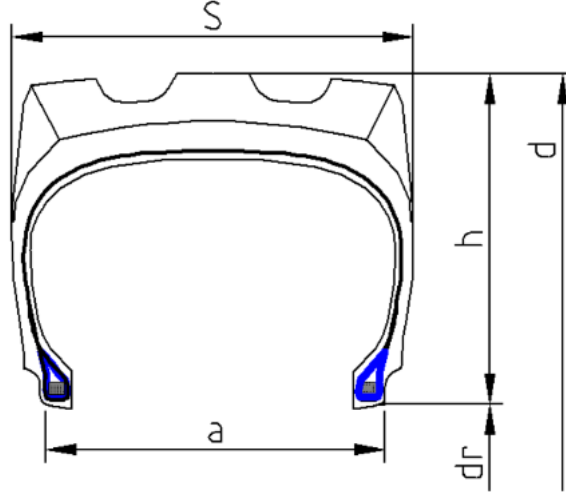
Şekil 1.7. 3+7x0.22 çelik kord şematik gösterimi

Aramit kordu, ticari adı kevlar olarak da bilinmektedir. Yüksek çekme modülü, sentetik elyaflardan %5-10 kat daha yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle havacılık, denizcilik, otomobil sanayisinde yapısal kompozit malzeme olarak kullanılmaktadır (Jassal ve Ghosh, 2002).

1.4. Lastiklerde Boyutsal Özellikler

Üretimi yapılacak lastiklerin uluslararası geçerliliğinin olması için bazı standartları karşılaması gerekmektedir. Lastik otoriteleri tarafından Avrupa Lastik ve Jant Teknik Organizasyonu (ETRTO-The European Tyre and Rim Technical Organisation), Lastik Jant Organizasyonu (TRA-Tire Rim Organisation), Japonya Otomobil Lastik Üreticileri Organizasyonunun (JATMA-Japan Automobile Tire Manufacturer's Organisation) kitapları yayınlanmaktadır. Yayınlanan bu kitaplarda tüm ürün gruplarında yer alan lastikler için (otomobil lastikleri, zirai lastikler, iş makinesi lastikleri vb.) teknik bilgiler yer almaktadır (Pay, 2009).

Zirai lastiklerin geometrik özellikleri belirli formüller esas alınarak hesaplanmaktadır. Lastik ve lastiğe uygun jant için uluslararası kabul edilmiş standart kitaplarda belirlenen değerler esas alınmaktadır. Lastik yapısında bölgelerin kısaltılmış isimleri (geometrik özellikler) Şekil 1.8'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır.



Şekil 1.8. Zirai lastik şematik gösterimi

Lastiğin dış çapı d (design overall diameter) ölçüsü hesaplanırken Eşitlik 1.1 (EDI-2020 S.14) formülü kullanılmaktadır. Eşitlikte h : yanak yüksekliği (design section height), dr : jant çapı (nominal rim diameter) ifade etmektedir.

$$d = 2h + dr \quad (1.1)$$

Lastik minimum ve maksimum dış çap değerleri için Eşitlik (1.2), Eşitlik (1.3) formülasyonları kullanılmaktadır (EDI-2020 S.14/EDI-2023 AG.5). Formülasyonlarda, d_{max} : maksimum dış çap, d_{min} : minimum dış çap, h_{max} : maksimum yanak yüksekliği, h_{min} : minimum yanak yüksekliğini ifade etmektedir.

$$d_{max} = 2h_{max} + dr \quad (1.2)$$

$$d_{min} = 2h_{min} + dr \quad (1.3)$$

Lastik yanak yüksekliği h (design section height) hesaplanırken Eşitlik 1.4 formülasyonu kullanılır (EDI-2020 S.14). Formülde kullanılan SN değeri için lastik ebat açılımında yer alan değer kullanılır. Örneğin; 420/85 R30 lastiği için SN: 420 alınır (EDI-2020 S.11). Eşitlikte SN: kesit genişliği (nominal section width), ar : yanak boyutu (nominal aspect ratio) ifade etmektedir.

$$h = SN \times ar / 100 \quad (1.4)$$

Lastik kesit genişliği s (design section width) ölçüsü, lastik minimum kesit genişliği s_{min} (section width) ölçüsü ve lastik maksimum kesit genişliği SG (overall width) ölçüleri için farklı eşitlikler ile Tablo 1.2’de yer alan katsayılar kullanılarak Eşitlik

1.5 denklemleri ile hesaplama yapılır. Formülasyonlarda, k: faktör katsayısı, a: ölçüm jantı genişliği (measuring rim width), a1: teorik jant genişliği (theoretical rim width), F_{smin}: minimum kesit genişliği katsayısı, FSG: kesit genişliği katsayısını ifade etmektedir.

$$s = SN + k(a - a1)$$

$$s_{min} = s \times F_{smin} \quad (1.5)$$

$$SG = s \times FSG$$

Tablo 1.2. Radyal ve Çapraz Lastikler İçin Katsayı Tablosu (EDI-2020)

Faktör		Çapraz	Radyal
k	(Formül 2)	0.40	0.40
FSG	(Formül 3)	1.08	1.05
F _{hmin}	(Formül 7)	0.97	0.97
F _{hG}	(Formül 8)	1.07	1.04
F _{Smin}	(Formül 9)	0.96	0.96

1.5. Lastik Boyutu, Profili ve Yol Şartlarının Araç Performansına Etkisi

Araç kullanımı sırasında araç performansına etki eden birçok parametre mevcuttur. Kullanılan araçtan maksimum performans elde edebilmek için lastik ve yol şartlarının optimizasyonu önemlidir. Zirai araçların kullanımı sırasında toprak yapısı aracın çekiş performansına doğrudan etki eder. Battiato ve arkadaşları (Battiato ve Diserens, 2017), farklı toprak yapılarında traktör çekiş performansı simülasyonunu incelemişlerdir. Traktörlerin çekiş performansını simüle eden çeşitli modellerin mevcut olduğu ancak deneysel doğrulamanın eksik olduğunu vurgulamışlardır. Simülasyon modelinde kayma, lastik yükü, lastik boyutu ve basıncın bir fonksiyonu olarak çekiş çubuğu çekişi, çekiş katsayısı, çekiş verimliliği, hareket direnci parametreleri ile ölçümlerin yapıldığı bildirilmiştir. Deneysel modeli doğrulamak için dört farklı tip toprak yapısında çekme testleri uygulandığı ifade edilmiştir. Bunun yanında traktör uygulamalarında lastik basıncı ve traktör ağırlığı değiştirilerek modelleme yapılmıştır. Anız kaplı alanda yapılan ölçümlerde penetrasyon direncinin kabul edilen ortalama değer %11'i geçmediği ifade edilmiştir. Düşey plaka penetrasyon testleri ve yapay plaka kesme deformasyon testleri beş farklı tekrar ile gerçekleştirilmiştir. Zemindeki mekanik parametrelerin Wong montaj prosedürüne göre belirlendiği vurgulanmıştır. Killi toprak zeminde dikey plaka penetrasyon testleri ve yatay plaka kesme deformasyon testleri, traktör geçişinden önce ve sonra hesaplanan K_c, K_φ, n parametrelerinin önemli ölçüde

değiştiğini göstermiştir. Yoğun biçimde sıkıştırılmış olan diğer toprak yapılarında deşiklik olmadığı belirtilmiştir. Traktörün ön ve arka akslar arasında teorik hız oranı K_S olarak ifade edilmektedir. Traktör ön lastiğin açısız hızının arka lastiğin açısız hızına oranı ile K_S değerinin hesaplandığı bildirilmiştir. Ön lastiğin kayması ile arka lastiğin düz bir çizgi üzerinde hareketi arasındaki ilişki Eşitlik 1.6 denklemi ile hesaplanmaktadır. Denklemden, K_S : teorik hız oranı, i : traktörün çekiş gücünü ifade etmektedir.

$$i_{\text{front}} = 1 - \frac{(1-i_{\text{rear}})}{K_S} \quad (1.6)$$

Kaymanın hareket direnci üzerindeki etkisine birçok parametre etki etmektedir. Bu parametrelerden en önemlileri yük aktarma etkisi, gerilim altındaki zemin deformasyon parametreleri, lastik yükü, lastik genişliği ve lastiğin sertliği olduğu belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan model ile lastik sırt bölgesi altındaki eşit olmayan gerilim durumunun açıklanamadığı, IF ve VF teknolojisine sahip lastiklerin çekiş performansının simüle edildiği çalışmalar yapılması gerekliliğini belirtmişlerdir.

Farklı lastik profillerinin taşıt performansına ve yakıt tüketimine etkilerinin incelendiği çalışmada Ertekin ve arkadaşları (Ertekin, 2009), lastik hareketi sırasında yoldan lastiğe karşı bir direnç oluştuğunu bu direncin literatürde yuvarlanma direnci olarak tanımlandığını ifade etmişlerdir. Yuvarlanma direncinin Eşitlik 1.7 formülasyonu ile hesaplandığı bildirmişlerdir. Formülasyonda, F_{rr} : yuvarlanma direnci kuvveti, C_{rr} : yuvarlanma direnci katsayısı, m : lastik yükü, g : yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

$$F_{rr} = C_{rr} \times m \times g \quad (1.7)$$

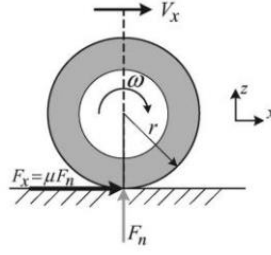
Elmas ve arkadaşları (Elmas ve ark., 2015), lastik hızının kaymaya bağlı olarak yük değeri ve sürtünme katsayısını tespit edilmesine yönelik Burckhardt modelini kullanarak inceleme yapmışlardır. Lastik kayma oranı (slip ratio) hesaplanırken sürüş ve frenleme olmak üzere,

$$s = \frac{\omega \times r - V_x}{\omega \times r}$$

$$s = \frac{V_x - \omega \times r}{V_x} \quad (1.8)$$

Eşitlik 1.8 denklemlerini kullanmışlardır. Denklemlerde, s : kayma oranı, ω : açısız hız, r : lastik yarıçapı, V_x : aracın gerçek hızını ifade etmektedir.

Lastik ile yol arasındaki sürtünme katsayısının lastik tipine, lastik basıncına, yol durumu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterdiği bildirilmiştir.



Şekil 1.9. Lastik – yol sürtünme modeli (Elmas ve ark., 2015)

Lastik ile yol arasındaki sürtünme katsayısı ve kuvvetinin Şekil 1.9 lastik yol sürtünme modelinde görüldüğü gibi Eşitlik 1.9'da yer alan formülasyonlar ile hesaplandığı belirtilmiştir. Denklemlerde, μ : sürtünme katsayısı, F_x : çekiş kuvveti, F_n : normal kuvveti belirtmektedir.

$$\mu = \frac{F_x}{F_n} \quad (1.9)$$

Yapılan çalışmada gerçek hareketli sistemler üzerinde ölçüm işlemlerinin zor ve maliyetli olması nedeniyle deney mekanizması oluşturulduğu belirtilmiştir. Elektrikli araçlarda kayma oranı simülasyon yardımıyla tespit edilmiştir. Modelleme yöntemiyle daha verimli, daha hafif ucuz maliyetli çalışmalar yapılması gerekliliği belirtilmiştir (Elmas ve ark., 2015).

1.6. Amaç

Günümüzde zirai alanda kullanılan araçlar teknolojinin ilerlemesine paralel olarak gelişim halindedir. Tarlada ve asfaltta yüksek hız kapasitesinde, çekiş gücü yüksek, geniş taban izine sahip, standart lastiklere göre daha yüksek yük taşıma kapasitesinde olan lastiklere ihtiyaç duyulmaktadır. Battiato ve arkadaşları, yaptıkları çalışma neticesinde IF/VF lastik teknolojisine sahip lastiklerle donatılmış traktörlerin çekiş performansı üzerine çalışmalar yapılması gerekliliğini vurgulamışlardır (Battiato ve Diserens, 2017). Jjagwe ve arkadaşları yaptıkları çalışmada düşük şişirme basıncı lastik teknolojilerinin, çekiş verimliliği, toprak sıkışması, mahsul verimi üzerindeki etkilerini açıklayan sınırlı miktarda çalışma olduğunu belirtmişlerdir (Jjagwe ve ark., 2023). Dolayısıyla lastik alanında IF/VF lastiklerin önemi her geçen gün artmaktadır. IF/VF teknolojisine sahip lastikler farklı yük ve farklı basınç değerlerinde çalışmaktadırlar.

Lastik üreticileri her lastik için standart kullanım basıncı, lastik kullanım jantı ve yük değerlerini teknik kataloglarda belirtmektedirler. Janulevicius ve ark. traktör lastiklerinde meydana gelen kaymanın tahmin edilmesine yönelik çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmanın IF/VF lastikleri de kapsayacak şekilde genişletilmesinin literatüre katkı sağlayacağını belirtmişlerdir (Janulevičius ve Damanauskas, 2022). Lastik taban izinin basınç ve jant etkisi altında değişimi konusunda araştırmalar kısıtlı düzeyde kalmıştır. Mevcut tez çalışması, IF/VF lastiklerde yük altında jant kullanımı ve basınç değerlerinin standart lastik yapısı ile kıyaslanarak, lastik kullanımında zaman ve yakıt tasarrufu sağlanması, taban izine etkilerinin belirlenmesi yönünde literatüre katkı sağlayacaktır.

1.7. Çalışmanın Önemi

Günümüzde tarımsal faaliyetlerin verimliliği, kullanılan makine ve ekipmanların performansına doğrudan bağlıdır. Tarımda kullanılan traktör ve diğer araçlar, toprak sıkışması, yakıt tüketimi ve mahsul verimi gibi kritik unsurları etkileyebilmektedir. IF (Improved Flexion) ve VF (Very High Flexion) teknolojisine sahip lastikler, özellikle bu alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır. Bu lastik teknolojileri, daha düşük basınç seviyelerinde daha geniş bir taban izi sunarak toprak sıkışmasını azaltmakta, yakıt tüketimini düşürmekte ve traktörlerin çekiş gücünü artırmaktadır. Ayrıca, bu lastiklerin yüksek yük taşıma kapasitesi, ağır tonajlı araçlar için önemli bir performans iyileştirmesi sağlamaktadır.

Bu çalışmanın önemi, IF ve VF teknolojilerine sahip lastiklerin tarımsal araçlarda sağladığı operasyonel ve çevresel faydaların ayrıntılı bir şekilde incelenmesinden gelmektedir. Bu lastiklerin kullanımı, sadece operasyonel verimliliği artırmakla kalmayıp, çevresel etkileri de minimize etmektedir. Örneğin, IF ve VF lastikler daha düşük şişirme basıncında daha geniş bir taban izine sahip olduğundan, toprak yapısını koruyarak tarımsal sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sağlar. Geniş taban izi sayesinde lastikler, toprağın derinlerine fazla baskı yapmaz, bu da toprak sıkışmasını azaltır ve uzun vadede toprağın verimliliğini korur.

Ayrıca, bu teknolojilerin sunduğu yakıt tasarrufu ve zaman kazancı gibi ekonomik avantajlar da önemlidir. IF ve VF lastiklerdeki geniş taban izi, lastiklerin daha fazla yol tutuşu sağlamasına olanak tanır ve bu durum, motorun daha az güç harcayarak daha verimli çalışmasına neden olur. Aynı zamanda, düşük şişirme basıncı ile kayma oranı azalır, motor gücü kaybolmaz ve yakıt tüketimi önemli ölçüde düşer. Daha düşük

yuvarlanma direnci ile lastikler, aracın hareket ederken daha az enerji harcamasını sağlayarak, tarımsal operasyonlarda yakıt tasarrufu sağlar.

Bu teknolojiler, zaman kazancı açısından da avantajlar sunar. IF ve VF lastiklerin yüksek çekiş performansı, traktör gibi tarım araçlarının daha hızlı çalışmasına olanak tanır. Yüksek taşıma kapasitesi sayesinde daha az sefer yapılarak işlerin daha hızlı tamamlanması mümkün olur. Ayrıca, toprak sıkışmasının azalması, tarla işlemlerinin daha kısa sürede yapılmasına ve gelecekte daha az düzeltme ihtiyacı doğmasına neden olarak zaman tasarrufu sağlar.

Bu nedenle, IF ve VF teknolojilerinin tarım sektöründe geniş çaplı kullanım potansiyelini ortaya koyan bu çalışma, tarımsal verimlilik, sürdürülebilirlik ve ekonomik faydalar açısından literatüre değerli bir katkı sunmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Lastik Şişirme Basıncının Toprak Gerilmesi Üzerindeki Etkileri

Damme ve arkadaşları (ten Damme ve ark., 2020), düşük şişirme basıncına sahip lastiklerin toprak gerilmesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Toprak gerilmesi, toprağın belirli bir alanına uygulanan kuvvetin o alana bölünmesiyle elde edilen değeri ifade etmekte ve birim alan başına kuvvet (Pa veya kPa) cinsinden ifade edilmektedir. Çalışmada, benzer boyutlardaki geniş ve düşük şişirme basıncına sahip üç farklı lastik tipinin (AxioBib, CerexBib ve EvoBib) toprak profilindeki ortalama gerilme üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Şekil 2.1). Lastikleri, farklı şişirme basınçları ve tekerlek yükleri altında test etmişlerdir. Ortalama normal gerilme, problar kullanılarak altı farklı konumda ölçülmüştür.



Şekil 2.1. Farklı tipte Michelin marka zirai lastikleri, a-) AxioBib, b-) CerexBib, c-) EvoBib (Michelin, 2024)

Sonuçlar, lastik yapısının toprağa uygulanan gerilme üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını, ancak şişirme basıncının azaltılmasının üst toprak tabakalarında gerilmeyi azalttığını göstermiştir. Alt toprak tabakalarında ise şişirme basıncının etkisinin sınırlı olduğu bulunmuştur. Ön ve arka tekerleklerin merkezinde anlamlı bir fark olmadığı belirtilmiştir. Yalnızca arka tekerleklerin 0,2 m derinlikteki normal gerilme değerlerinde AxioBib lastiği, diğer lastiklere göre %16-20 daha düşük gerilme oluşturmuştur. Bu farkın CerexBib'in düşük şişirme basıncı ile test edilmesinden kaynaklandığı söylenmiştir. EvoBib lastiğinin şişirme basıncının düşürülmesi, özellikle üst toprak

tabakalarında ortalama normal gerilmeyi azalttığı gösterilmiştir. 80 kPa'dan 60 kPa'ya düşürüldüğünde, ön ve arka lastiklerden dolayı oluşan gerilme %22 azalmış, 60 kPa'dan 40 kPa'ya düşürüldüğünde ise arka lastiklerden oluşan gerilmenin %11 azaldığı vurgulanmıştır. EvoBib lastiğinin yükü %20 azaltıldığında ve şişirme basıncı %25 azaltıldığında, ortalama normal gerilme %10-14 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Ancak, bu azalma istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Toprak üzerinde oluşan ortalama normal gerilme Eşitlik 2.1 yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada maksimum iç basınç (P_{i-max}) ve poisson oranının bir fonksiyonu olan orantı katsayısı (k_s) kullanılmaktadır. Maksimum iç basınç, lastiğin toprağa uyguladığı yük altında toprak içinde ölçülen en yüksek basıncı ifade etmektedir.

$$\sigma_m = P_{i-max} k_s \approx \frac{P_{i-max}(1-3\nu)}{(1+\nu)} \quad (2.1)$$

Burada ν , poisson oranıdır ve toprağın mekanik özelliklerinden elde edilmektedir. Poisson oranı (ν), malzemenin enine genişlemesinin boyuna sıkışmaya oranını ifade etmektedir.

Çalışma, düşük şişirme basıncına sahip lastiklerin üst toprak katmanlarında toprak sıkışmasını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Alt toprak katmanlarında ise lastik yükünün daha belirleyici olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, şişirme basıncının kritik bir faktör olduğunu vurgulamaktadır. Özellikle EvoBib lastiği, düşük şişirme basıncında üst toprak katmanlarında gerilmeyi azaltmada en etkili lastik olarak belirlenmiştir. Çalışmanın güçlü yönlerinden biri, farklı şişirme basınçlarının etkisini niceliksel olarak modellemesidir. Ancak, modelin sadece üst toprak katmanlarına odaklanması alt katmanlar üzerindeki etkileri daha az kapsamlı incelemesine neden olmuştur. Gelecekteki yapılacak çalışmalar, alt toprak katmanlarının daha derinlemesine analizini içermesi gerektiği düşünülmektedir. Şekil 2.2'de farklı iç basınçlarda ve sabit poisson oranında bir lastiğin ortalama normal gerilme değişimini bulmak için kullanılacak örnek bir kod sunulmuştur.

% Örnek veriler

$P_{i_max} = [100, 110, 105, 115, 120, 110]$; % Maksimum iç basınç (kPa)

$\nu = 0.3$; % Poisson oranı (örnek değer)


```

% Orantı katsayısının hesaplanması

k_s = (1-3 * nu) / (1 + nu);

% Ortalama normal gerilme hesaplaması

sigma_m = P_i_max * k_s;

%Sonuçları görüntüleme

disp('Ortalama Normal Gerilme (kPa):');

disp(sigma_m);

%Grafik oluşturma

figure;

plot(P_i_max, sigma_m, 'o-');

xlabel('Maksimum İç Basınç (kPa)');

ylabel('Ortalama Normal Gerilme (kPa)');

title('Maksimum İç Basınca Göre Ortalama Normal Gerilme');

grid on;

```

Şekil 2.2. Lastik gerilme değişiminin kodlanması

2.2. Tarım Lastiklerinde Şişirme Basıncı ve Lastik Kayması

Traktör lastiklerinin toprak üzerindeki kayma ve çekiş verimliliğinin nasıl optimize edileceği önemli bir konudur, (Janulevičius ve Damanauskas, 2022) farklı şişirme basınçları altındaki traktör lastiği kaymasını tahmin etmeye yönelik bir denklem geliştirmiştir. Çekiş verimliliği, motor gücünün ne kadarının çekiş gücü olarak toprağa aktarıldığını gösterir. Yüksek çekiş verimliliği, traktörün daha az enerji ile daha verimli çalışmasını sağlar. Lastik kayması, toprağa uygulanan kuvvetin ne kadarının etkin kullanılmadığını gösterir; yüksek kayma oranları verimliliği düşürmekte ve toprak sıkışmasına neden olmaktadır. Düşük basınç daha geniş temas alanı sağlayarak kaymayı azaltırken, çok düşük basınç lastik yapısını bozabilmektedir. Traktörlerde çekiş verimliliği (η_t), çekiş katsayısı (κ), yuvarlanma direnci katsayısı (ρ), ve kayma katsayısına (s) bağlı olarak Eşitlik 2.2 ile hesaplanabilmektedir (Renius, 1999).

$$\eta_t = \frac{\kappa}{\kappa - \rho} (1 - s) \quad (2.2)$$

Çekiş katsayısı denklemi (κ), çekiş kuvveti (F_t) ve traktör ağırlığı (W) ile Eşitlik 2.3 yardımıyla hesaplanmaktadır (Renius, 1999).

$$\kappa = \frac{F_t}{W} \quad (2.3)$$

Yuvarlanma direnci katsayısı (ρ), yuvarlanma direnci kuvveti (F_f) ve traktör ağırlığı (W) ile Eşitlik 2.4 yardımıyla hesaplanmaktadır (Renius, 1999).

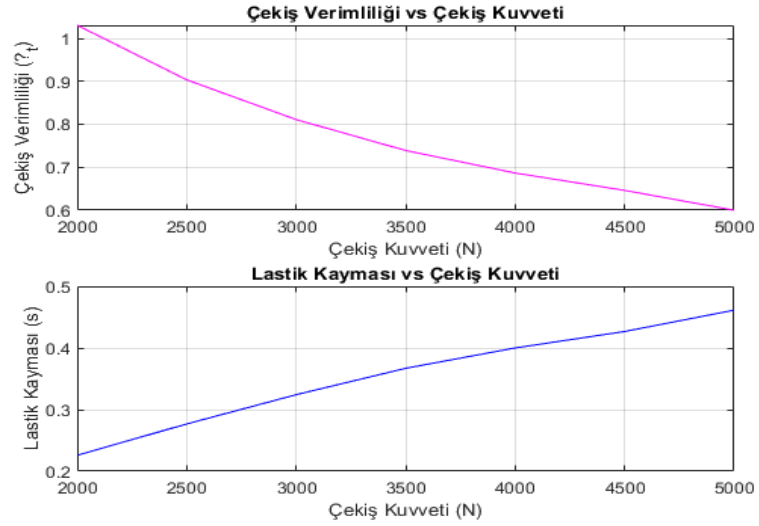
$$\rho = \frac{F_f}{W} \quad (2.4)$$

Lastik kayması katsayı (s) denklemi ise maksimum kayma değeri (s_{lim}), kritik çekiş katsayısı (F_t^{lim}) ve toprak ve lastik özelliklerine bağlı bir katsayı olan (b) yardımıyla Eşitlik 2.5 ile hesaplanmaktadır (Janulevičius ve Damanauskas, 2022).

$$s = s_{lim} \left[1 - \left(1 - \frac{F_t}{F_t^{lim}} \right)^b \right] \quad (2.5)$$

Önerdikleri ampirik denklem, ortalama kayma oranını %5 hata payı ile tahmin etmiştir. Çalışmanın bulguları, farklı şişirme basınçlarının traktör lastik kayması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük şişirme basıncı, lastiğin toprakla daha geniş bir yüzeyde temas etmesine olanak tanıyarak kaymayı azaltmakta ve çekiş verimliliğini artırmaktadır. Ancak, çok düşük basınçlar, lastiğin yapısal bütünlüğünü bozarak deformasyona neden olabilmektedir. İleride yapılacak çalışmalar, daha geniş veri setleri ve farklı toprak koşulları altında bu modelleri geliştirmeyi hedeflemelidir.

Yukarıdaki denklemlerle oluşturulan Şekil 2.3, çekiş kuvvetinin çekiş verimliliği ve lastik kayması üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 2.3. Çekiş kuvvetinin çekiş verimliliği ve lastik kaymasına etkisi

Çekiş kuvveti arttıkça verimlilik artar, ancak kayma da artarsa verimlilik düşer. Bunun yanında artan çekiş kuvvetinin kaymayı artırdığı ve verimliliği düşürdüğü görülmektedir.

Farklı traktör ağırlıkları ve çekiş kuvvetlerinde çekiş verimliliği ve lastik kaymasının etkisi Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te yer alan kod sistemleri ile hesaplanabilmektedir.

```

clc
close all
clear all

% Verilerin ve sabitlerin tanımlanması
W= 4000:1000:8000; % Traktör ağırlıkları (kg) – 4000 kg'dan 8000 kg'a kadar
F_t = 2000:500:5000; % Çekiş kuvvetleri (N) – 2000 N'dan 5000 N'a kadar
F_f = 500; % Yuvarlanma direnci kuvveti (N)
s_lim = 0.4; % Maksimum kayma değeri
F_t_lim = 4000; % Kritik çekiş kuvveti (N)
b = 1.2; Toprak ve lastik özelliklerine bağlı katsayı

% Değişkenlerin önceden tanımlanması

```

```

kappa = zeros (length (W), length (F_t));

rho = zeros (length(W), length (F_t));

s = zeros (length (W) , length (F_t));

eta_t = zeros (length (W), length (F_t));

% Hesaplamalar

for i = 1:length(W)

for j = 1:length(F_t)

kappa(i, j) = F_t(j) / W(i); % Çekiş katsayısının hesaplanması

rho(i, j) = F_f / W(i); % Yuvarlanma direnci katsayısının hesaplanması

s(i, j) = s_lim * (1 - (1 - (F_t(j) / F_t_lim))^b); % Lastik kayması katsayısının hesaplanması

eta_t(i, j) = (kappa(i, j) / (kappa(i, j) - rho(i, j))) * (1 - s(i, j)); % Çekiş verimliliğinin hesaplanması

end

end

```

Şekil 2.4. Çekiş verimliliği ve lastik kayması modeli

```

% Grafik oluşturma

figure;

subplot(2,1,1);

for i = 1:length(W)

plot(F_t, eta_t(i, :), 'DisplayName', ['W = ' num2str(W(i)) ' kg']);

hold on;

end

xlabel('Çekiş Kuvveti (N)');

ylabel('Çekiş Verimliliği (?_t)');

title('Farklı Traktör Ağırlıkları Altında Çekiş Verimliliği');

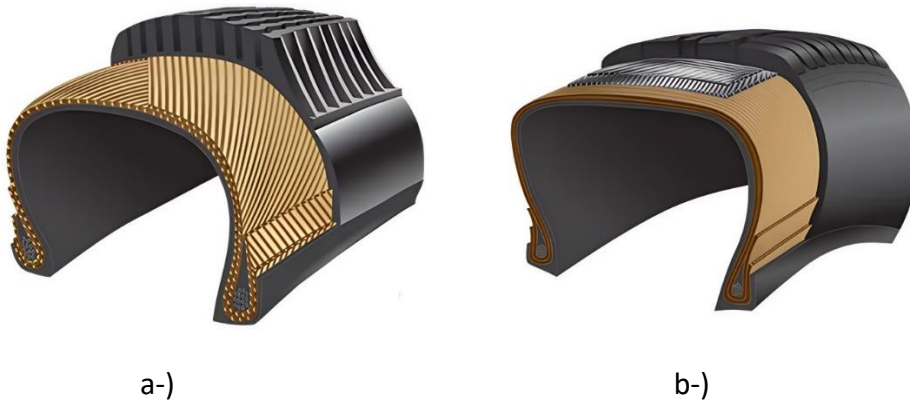
```

```
legend show;  
grid on;  
subplot(2,1,2);  
for i = 1:length(W)  
plot(F_t, s(i, :), 'DisplayName', ['W = ' num2str(W(i)) ' kg']);  
hold on;  
end  
xlabel('Çekiş Kuvveti (N)');  
ylabel('Lastik Kayması (s)');  
title('Farklı Traktör Ağırlıkları Altında Lastik Kayması');  
legend show;  
grid on;
```

Şekil 2.5. Çekiş verimliliği ve lastik kayması grafik oluşturma modeli

2.3. Balastın Tarım Lastikleri Performansına Etkileri

Kumar ve arkadaşları (Kumar ve ark., 2018), farklı balast koşullarındaki çapraz (Bias-Ply) ve radyal lastiklerin performansını incelemiştir. Şekil 2.6'da Bias-Ply ve Radyal lastik şekilleri gösterilmiştir. Balast, traktörün ağırlığını artırmak ve kaymayı azaltmak için kullanılan su veya demir ağırlıklardır. Çalışmada, 13.6–28 ölçülerindeki lastikler farklı balast ve şişirme basıncı (68,9–206,8 kPa) altında test edilmiştir.



Şekil 2.6. Farklı lastik tipleri, a-) Bias-Ply, b-) Radyal (Cokertire 2024)

Çalışmalarında inceledikleri 13.6–28 Bias-Ply ve Radyal lastikleri, (boş, %50 su, %50 demir, %75 su, %75 demir) ve şişirme basınçlarında (68.9 - 206.8 kPa) test etmişlerdir (Şekil 2.7). Yapmış oldukları testlerde, dikey sehim ve temas alanını

değerlendirmişlerdir. Dikey sehim (deflection), lastiğin dikey yönde ne kadar esnediğini ifade etmektedir. Yük ve şişirme basıncı ile değişiklik göstermektedir. Temas Alanı (Contact Area), lastiğin toprak ile temas eden yüzey alanını ifade etmektedir. Bu alan, lastiğin şişirme basıncı ve üzerine uygulanan yük ile değişmektedir.



Şekil 2.7 Çalışmada kullanılan test lastikleri, a-) Bias, b-) Radyal

Radyal lastikler, Bias-Ply lastiklere göre %13 daha fazla temas alanı ve %6,5 daha yüksek sehim göstermiştir. Sonuçlar, düşük şişirme basıncı ve yüksek balast kullanımının lastiğin geniş temas alanı oluşturduğunu ve verimliliği artırdığını ortaya koymuştur. Su balastı, demir balastına göre daha düşük sehim ve temas alanı sunarken, demir balastı yük altında daha iyi performans göstermiştir. Balast türü ve şişirme basıncının optimizasyonu, traktör verimliliğini maksimize etmek için kritik önemdedir.

Farklı traktör ağırlıkları ve şişirme basınçlarında temas alanı ve deformasyon miktarı Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da belirtilen kod sistemi ile bulunabilmektedir.

```
clc
close all
clear all
% Katsayılar [C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7]
C = [1.2, 0.5, 0.8, 0.3, 0.7, 0.4, 0.6]; % Lastik Parametreleri
b = 0.3; % Lastik genişliği (m)
W = 10; % Yük (kN)
```

```

d = 1.2; % Lastik çapı (m)

Pi = 200; % Şişirme basıncı (kPa)

% Komandi Modeli Hesaplamaları

delta = C(1) * W^C(2) / (b^C(5) * d^C(6) * Pi^C(7)) * (C(3) * b + C(4));

A = C(1) * W^C(2) * (b / d)^C(3) * Pi^C(4);

% Sonuçların Görüntülenmesi

fprintf('Deformasyon (?): %.4f m\n', delta);

fprintf('Temas Alanı (A): %.4f m^2\n', A);

% Çeşitli Değerlerle Grafikler Oluşturma

W_values = 4000:1000:8000; % Traktör ağırlıkları (kg)

Pi_values = 100:100:400; % Şişirme basınçları (kPa)

% Değişkenlerin önceden tanımlanması

delta_values = zeros(length(W_values), length(Pi_values));

A_values = zeros(length(W_values), length(Pi_values));

% Hesaplamalar

for i = 1:length(W_values)

    for j = 1:length(Pi_values)

        delta_values(i, j) = C(1) * W_values(i)^C(2) / (b^C(5) * d^C(6) *
Pi_values(j)^C(7)) * (C(3) * b + C(4));

A_values(i, j) = C(1) * W_values(i)^C(2) * (b / d)^C(3) * Pi_values(j)^C(4);

    end

end
end

```

Şekil 2.8. Traktörlerde temas alanı ve deformasyon miktarı modeli

```

% Grafik oluşturma
figure;
subplot(2,1,1);
for i = 1:length(W_values)
plot(Pi_values, delta_values(i, :), 'DisplayName', ['W = ' num2str(W_values(i)) ' kg']);
hold on;
end
xlabel('Şişirme Basıncı (kPa)');
ylabel('Deformasyon (?');
title('Farklı Traktör Ağırlıkları Altında Deformasyon');
legend show;
grid on;
subplot(2,1,2);
for i = 1:length(W_values)
plot(Pi_values, A_values(i, :), 'DisplayName', ['W = ' num2str(W_values(i)) ' kg']);
hold on;
end
xlabel('Şişirme Basıncı (kPa)');
ylabel('Temas Alanı (A)');
title('Farklı Traktör Ağırlıkları Altında Temas Alanı');
legend show;
grid on;

```

Şekil 2.9 Traktörlerde temas alanı ve deformasyon miktarı grafik oluşturma modeli

Komandi modeli kullanılarak yapılan değerlendirmelerde, lastik sehim ve temas alanı denklemleri (Eşitlik 2.6) ile lastik performansı analiz edilmiştir. Komandi modeli (Komandi, 1976), zemin-araç etkileşimlerinin analizinde kullanılan ve normal yük (W), lastik kesit genişliği (b), lastik çapı (d), şişirme basıncı (P_i) gibi değişkenleri dikkate alarak performansı değerlendiren bir modeldir. Bu model, lastiğin toprak ile temas ettiği yüzey alanı (A) ve lastiğin dikey yöndeki deformasyon miktarı (sehim, δ) üzerinden performans analizleri yapmaktadır. Radyal lastiklerin, yüksek ağırlık ve düşük basınç koşullarında daha iyi yük dağılımı sağladığı ve tarımsal uygulamalarda tercih

edilebileceği bulunmuştur. Özellikle lastik üzerinde uygulanan yük ve lastik kesit genişliği arttıkça, radyal lastiklerin daha dengeli bir temas alanı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Düşük şişirme basıncı altında genişleyen temas alanı, toprak sıkışmasını azaltırken, deformasyon miktarını artırarak çekiş gücünü optimize edebilmektedir.

$$\text{Lastik sehim} (\delta) (\%) = \left(\frac{\text{Dikey lastik sehim}}{\text{Karkas yanak yüksekliği}} \right) \times 100$$

$$\text{Lastik sehim} \quad \delta = C1 \times \frac{W^{C2}}{b^{C5} d^{C6} p_i^{C7}} \times (C3 \times b + C4) \quad (2.6)$$

$$\text{Temas alanı} \quad A = C1 \times W^{C2} \times \left(\frac{b}{d} \right)^{C3} + p_i^{C4}$$

Çalışmanın bulguları, balast kullanımının hem çapraz hem de radyal lastiklerin performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ancak demir ve su balastlarının uzun vadeli etkilerinin daha fazla araştırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Çalışma, farklı balast türleri ve lastik tipleri ile elde edilen geniş veri seti sunarak, lastik performansının optimizasyonunda önemli katkılar sağlamaktadır.

2.4. Lastik Endüstrisindeki Gelişmeler ve Toprak Sıkışması

Toprak sıkışması, toprağın fiziksel yapısını bozarak su ve hava geçirgenliğini azaltmaktadır. Damme ve arkadaşları (ten Damme ve ark., 2019), yeni nesil lastiklerin bu durumu nasıl minimize edebileceğini beş nesil lastik (1970-2018) üzerinde araştırmıştır. Çalışmada, 2900 kg ve 4300 kg yükler uygulanmış ve şişirme basıncı 240 ile 60 kPa arasında değiştirilmiştir. FRIDA modeli ile lastik-toprak temas alanı ve gerilme dağılımı hesaplanmış, elde edilen sonuçlar Söhne modeli kullanılarak toprak profilindeki dikey gerilmeler ile karşılaştırılmıştır. FRIDA modeli, lastik-toprak temas alanının şekli ve gerilme dağılımını vermektedir. Poisson oranı, UCCT eğimi ve Young modülünden elde edilmiştir.

Çalışmalarında Poisson oranı, Eggers ve arkadaşlarının (Eggers ve ark., 2006) çalışmasına dayanan bir yöntemle belirlenmiştir. Bu yöntemde, yeniden yükleme bölümünün eğimi (UCCT) ve Young modülü birleştirilmiştir. Yük, gerilme olarak dönüştürülmüş ve log10-dönüşümüne tabi tutulmuştur. Deplasman ise birim deformasyona dönüştürülmüştür (Eşitlik 2.7).

$$v = \frac{1}{4} \left[\frac{d\varepsilon_z}{d\sigma_z} E + \left\{ \left(1 - \frac{d\varepsilon_z}{d\sigma_z} E \right) \left(9 - \frac{d\varepsilon_z}{d\sigma_z} E \right) \right\}^{0.5} - 1 \right] \quad (2.7)$$

Sonuçlar, düşük basınç ve geniş temas alanı ile yeni nesil lastiklerin toprak gerilmesini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Özellikle EvoBib lastiği, en iyi gerilme dağılımını ve düşük toprak sıkışmasını sağlamıştır. FRIDA modeli hesaplamaları, 0,6 m derinlikte bile toprak sıkışmasının azaldığını ortaya koymuştur.

Bu bulgular, lastik tasarımındaki yeniliklerin hem toprak sıkışmasını azaltmada hem de tarımsal sürdürülebilirliğe katkı sağlama potansiyelini ortaya koymaktadır. Geniş temas yüzeyine sahip lastikler, bitki kök gelişimini desteklemektedir. Ancak bu teknolojilerin farklı toprak tipleri ve yük koşullarındaki uzun vadeli etkilerinin daha fazla incelenmesi gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, farklı iklim ve toprak koşullarında daha geniş veri setleri ile bu teknolojilerin etkinliğini artırabilir.

2.5. Toprak Sıkışmasının Verimli Üretime Etkisi

Ağır makinelerin toprağa uyguladığı kuvvet, toprak yapısını bozarak verimliliği ve çevresel kaliteyi olumsuz etkilemektedir. Shaheb ve arkadaşları (Shaheb ve ark., 2021) bu durumu engellemek amacıyla sürdürülebilir tarım için önerilen yöntemleri incelemiştir. Tarım makineleri verimliliği artırırken toprak sıkışmasına neden olabilmekte ve bu durum %50'ye varan verim kayıplarına yol açabilmektedir. Bu olumsuz etkiyi azaltmak için düşük şişirme basınçlı lastik kullanımı, kontrollü trafik tarımı ve derin köklü bitkilerin ekimi gibi stratejiler önerilmektedir. Düşük şişirme basınçlı lastikler, daha geniş temas alanı ile toprak sıkışmasını minimize etmektedir. Dünya nüfusunun hızla artmasına paralel olarak gıda üretiminin de hızla artırılması gerekmektedir. Bunun için geliştirilen yeni nesil tarım makineleri oldukça yaygınlaşmıştır. Yeni nesil tarım makineleri, tarımsal üretimi kolaylaştırırken bir taraftan da toprağa zarar vererek toprak sıkışmasına neden olmaktadır. Toprak sıkışması, toprağın yapısını bozarak bitki kök gelişimini, genel bitki büyümesini ve verimi olumsuz etkilemektedir. %50'ye varan verim kayıplarına neden olabilen toprak sıkışmasını önlemek için düşük şişirme basınçlı lastik kullanımı, kontrollü trafik tarımı ve derin köklü bitkilerin ekimi önerilmektedir (Shaheb ve ark., 2021). Standart ve yüksek şişirme basıncına sahip lastikler, düşük şişirme basıncına sahip lastiklere göre daha fazla toprak sıkışmasına neden olmaktadır. Düşük şişirme basınçlı lastiklerin kullanımı, toprak üzerinde daha geniş bir temas alanı oluşturarak sıkışmayı azaltmaktadır.

Tarım makinelerinin toprak üzerindeki olumsuz etkileri, sürdürülebilir üretim açısından önemli bir engel oluşturmaktadır. Toprak sıkışması, bitki köklerinin gelişimini engelleyerek su ve besin maddelerinin bitkilere ulaşmasını zorlaştırmakta ve sonuç olarak verimlilik kayıplarına yol açmaktadır. Shaheb ve arkadaşları (Shaheb ve ark., 2021) tarafından yapılan çalışmalar, kontrollü trafik tarımı, düşük şişirme basınçlı lastik kullanımı ve derin köklü bitkilerin ekimi gibi yöntemlerin toprak sıkışması riskini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bu stratejiler, özellikle sürdürülebilir tarımın uygulanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada ele alınan yönetim stratejileri, sürdürülebilir üretimi desteklemek ve toprak sıkışmasının uzun vadeli etkilerini minimize etmek için değerli yaklaşımlar sunmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin farklı toprak tiplerinde ve iklim koşullarında nasıl performans gösterdiği konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Ek olarak, bu stratejilerin ekonomik uygulanabilirliği ve çiftçilerin bu yöntemleri benimseme oranları da gelecekteki çalışmaların konusu olmalıdır.



Şekil 2.10. Artan su birikintisi ve toprak hasarı (Shaheb ve ark., 2021)

2.6. Farklı Koşullarda Lastiklerin Toprak Sıkışması Üzerindeki Etkileri

Rodriguez ve arkadaşları (Rodríguez ve ark., 2012), şeker kamışı hasadı ve nakliyesi sırasında kullanılan farklı lastik türlerinin toprak sıkışması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Toprak sıkışmasını belirleyen faktörler arasında lastik temas yüzeyi, şişirme basıncı, lastik sertliği, yük ve toprak koşulları bulunmaktadır. Dört farklı lastik tipi (blok desenli, kaburga desenli, düşük dış profili ve yüksek dış profili), üç farklı şişirme basıncı (207, 276, 345 kPa) ve altı yük seviyesinde (20-60 kN) test edilmiştir (Şekil 2.11). Lastiklerin temas yüzeyi karton üzerinde iz bırakılarak ölçülmüş, dikey sehimleri hidrolik bir sistem ile kaydedilmiştir. Toprakta oluşan dikey gerilimler ise 10, 30, 50 ve 70 cm derinliklerde yerleştirilen sensörler ile takip edilmiştir. Boussinesq denklemi kullanılarak bu gerilimler simüle edilmiştir.



a-)

b-)

c-)

d-)

Şekil 2.11. Farklı tipte lastiklerin toprak sıkışmasına etkisi, a-) blok desenli diş profili, b) kaburga desenli diş profili, c-) düşük diş profili, d-) yüksek diş profilili lastik.

Boussinesq nokta yükü denklemi, bir yüzey noktası üzerinde bulunan **P** büyüklüğündeki bir dikey nokta yükünün, yarı-sonsuz elastik bir yarı-uzayda **z** derinliğinde **r** yatay mesafesindeki herhangi bir noktada oluşturduğu gerilimler Eşitlik 2.8 ile ifade edilmektedir (Boussinesq, 1885a).

Dikey gerilim (σ_z):

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \left(\frac{z^3}{(r^2+z^2)^{5/2}} \right)$$

Yatay gerilim (σ_r):

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi} \left(\frac{3z^3 r}{(r^2+z^2)^{5/2}} \right) \quad (2.8)$$

Kayma Gerilimi (τ_{zr}):

$$\tau_{zr} = \frac{3P}{2\pi} \left(\frac{z^2 r}{(r^2+z^2)^{5/2}} \right)$$

Temas yüzeyi alanı (A_t), McKyes modeli (McKyes, 1985) (McKyes, 1985) ile lastik genişliği (B_s) ve çapına (D_e) bağlı olarak hesaplanmıştır. A tipi (blok desenli) ve B tipi (kaburga desenli) lastikler, düşük temas basıncı ve dikey gerilim oluşturarak toprağa daha az zarar vermektedir. Yük arttıkça temas yüzeyi genişlemekte, basınç arttıkça ise temas alanı küçülmektedir. B tipi lastik, farklı basınç ve yük değişimlerine en duyarlı lastik olarak öne çıkarken, D tipi lastik sert yüzeylerde yüksek temas basıncı üretmiştir. A ve B tipi lastikler ise nakliye sırasında toprak sıkışmasını en aza indirmiştir.

$$A_t = \frac{B_s \times D_e}{k} \quad (2.9)$$

Eşitlikte, k = Yüzey tipi için sabit bir değer olmakla birlikte sert yüzeyler için 4, gevşek topraklar için 2 olarak kullanılmaktadır.

Toprak sıkışmasının ölçüm sonuçları, simülasyon verileri ile %87-92 arasında uyum sağlamış, bu da matematiksel modellerin güvenilirliğini ortaya koymuştur. A ve B tipi lastiklerin düşük temas basıncı ve daha dengeli gerilim dağılımı ile şeker kamışı nakliyesinde daha iyi performans sunduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, A ve B tipi lastikler, düşük şişirme basıncı ve yüksek yük koşullarında toprağa daha az zarar vererek tarımsal uygulamalar için en iyi seçenekler arasında yer almaktadır. Ancak, bu lastiklerin performanslarının farklı toprak koşullarında ve uzun vadeli etkilerinin daha fazla araştırılması gereklidir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu lastiklerin farklı tarım uygulamalarındaki etkinliğini incelemeli ve sürdürülebilir tarım açısından katkılarını değerlendirmelidir.

2.7. Şişirme Basıncı ve Derecelendirme Konisi Eğrisi

Tarım makinelerinin toprağa olan etkilerini ve toprağın bu etkilere tepkisini doğru şekilde değerlendirmek önemlidir. Oh ve arkadaşları (Oh ve ark., 2019) lastik şişirme basıncının derecelendirme koni indeksi (RCI) üzerindeki etkilerini incelemiştir. RCI, makinelerin toprak üzerindeki etkisini ve toprağın dayanım kapasitesini belirleyen bir göstergedir. Çalışmalarında, lastik şişirme basıncı %50-150 arasında değiştirilmiş ve lazer mesafe sensörleri kullanılarak gerçek zamanlı tekerlek batma derinliği ölçülmüştür. Rotary enkoder kullanılarak tekerlek dönüşleri izlenmiş, teorik ve gerçek hareket mesafeleri karşılaştırılarak tekerlek kayması hesaplanmıştır.

RCI değeri, lastik yükü (W), tekerlek kayma oranı (s), tekerlek batma derinliği (z), lastik genişliği (b), çapı (d) ve lastik sehim miktarına (δ) bağlı olarak hesaplanmıştır (Eşitlik 2.10). Şişirme basıncı arttıkça tekerlek batma derinliği ve kayma oranı artmış, ancak optimum basınç seviyesinin ötesinde bu değişimler yavaşlamıştır. Çalışma, lastik şişirme basıncının artmasıyla RCI değerinin arttığını, ancak optimum basınç aralığı (90-120%) dışında bu değişimlerin stabilize olduğunu göstermiştir. RCI hesaplamalarında ortalama tahmin hatası oranı %1,59 bulunmuştur.

$$RCI = 2,6265 \left(\frac{W(1-\frac{\delta}{h})^{3/2}}{bd^{2/5}} \right) \left(\frac{s}{z^3} \right)^{1/3} \quad (2.10)$$

Lastik batma derinliği (z) için arka sensörün lastik dış profiline olan mesafesi (h_r), ön sensörün dış profiline olan ortalama dikey mesafesi (h_f) ve arka sensörler arasındaki dikey mesafe (Δ) yardımıyla Eşitlik 2.11 ile hesaplanmaktadır.

$$z = \frac{h_r - (h_f \pm \Delta)}{2} \quad (2.11)$$

Lastik kayması (s), traktörün gerçek hareket mesafesi (S_a) ve traktörün teorik hareket mesafesi (S_t) denklemi ile Eşitlik 2.12 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$s = 1 - \frac{S_a}{S_t} \quad (2.12)$$

Bu denklemler ve hesaplamalar, toprak ve makine etkileşimlerini daha iyi anlamak ve tarım makinelerinin toprak üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmek için kullanılmaktadır. Doğru RCI tahminleri, toprağın sıkışmasını önlemek ve tarım verimliliğini artırmak için önemlidir. Sonuçlar, şişirme basıncı arttıkça toprak sıkışma riskinin de arttığını, ancak optimum basınç aralığında daha tutarlı ve düşük sapma değerlerinin elde edildiğini göstermiştir. Optimum basınç seviyesinin altındaki düşük şişirme basıncı ise tekerlek sapmasını ve batmayı artırmıştır. Farklı basınç seviyelerinde RCI değerlerinin değişimi, tarım makinelerinin toprak üzerindeki etkisini minimize etmede şişirme basıncının önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışma, lastik şişirme basıncının RCI üzerindeki etkisini ve tarım makinelerinin toprak üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için stratejilerin nasıl geliştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ancak, bu bulguların farklı toprak tipleri ve tarla koşulları altında genişletilmesi gereklidir. Ayrıca, şişirme basıncının optimize edilmesiyle tarımsal üretimde enerji verimliliğini artırma potansiyelinin de araştırılması önerilmektedir.

2.8. Zirai Lastiklerde Karkas Sertliği Tahmini

Tarımsal makinelerin gücü ve ağırlığındaki artış, toprak sıkışmasını artırarak verimi düşürmektedir. Misiewicz ve arkadaşları (Misiewicz ve ark., 2016), zirai lastiklerin karkas sertliğini tahmin etmek için dört farklı yöntemi karşılaştırmıştır.

İncelenen yöntemler: taban izi alanı, lastik yükü ve sehim, basınç haritalama ve üretici spesifikasyonlarıdır.

- i. Taban İzi Alanı Yöntemi: Lastiğin temas alanı mürekkep kullanılarak belirlenir ve ortalama temas basıncı hesaplanır. Bu yöntemle elde edilen temas basıncı değerleri, basınç haritalama yöntemine göre %30-40 daha düşük bulunmuştur.
- ii. Lastik Yükü ve Sehim Yöntemi: Yük arttıkça sehimin artması ve eğimlerin basınç ile doğrusal ilişki göstermesi değerlendirilir.
- iii. Basınç Haritalama Yöntemi: Ticari bir sistem kullanılarak ortalama ve maksimum temas basıncı ölçülür. En doğru sonuçları vermiş ve karkas sertliğini ölçmede etkili olduğu belirlenmiştir.
- iv. Üretici Spesifikasyon Yöntemi: Üreticinin sağladığı verilerden karkas sertliği tahmin edilir. Bu yöntem, basit ve hızlı sonuçlar sunmuş ve $\pm\%20$ oranında diğer yöntemlerle uyum göstermiştir.

Sonuçlar, basınç haritalama sisteminin en doğru tahminleri sağladığını, üretici verilerine dayalı yöntemin ise basit ve hızlı bir alternatif sunduğunu ortaya koymuştur. Ancak, yöntemlerin geniş veri setleri ve farklı lastik tipleriyle test edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, sahada gerçek koşullarda yöntemlerin doğruluğunun değerlendirilmesi önemlidir.

2.9. Lastik Palet Sistemleri: Toprak Sıkışması ve Çekiş Performansı

Arvidsson ve arkadaşları (J Arvidsson ve ark., 2011), tarım traktörlerinde kullanılan kauçuk palet sistemlerinin toprak sıkışması ve çekiş performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Şekil 2.12'de örnek bir lastik palet sistemi verilmiştir. Çalışma, 2009 yılında İsveç'te iki farklı killi toprakta 85 kW gücündeki bir traktörle gerçekleştirilmiştir. Traktör, dört palet birimi ile donatılmış ve tekli ve çiftli tekerlek konfigürasyonları ile karşılaştırılmıştır. 15, 30 ve 50 cm derinliklerde yapılan ölçümlerde, paletler ve çiftli tekerleklerin benzer toprak gerilmesi oluşturduğu, tekli tekerleklerin ise daha yüksek toprak gerilmesine neden olduğu bulunmuştur.



Şekil 2.12. Traktör palet lastik sistemi (china.com, 2024)

Palet sistemleri, daha geniş temas alanı sunarak toprak gerilmesini azaltırken kaymayı da önemli ölçüde azaltmıştır. Çiftli tekerlekler, sıkı topraklarda kayma oranlarını düşürmüş, ancak gevşek topraklarda bu etkinin sınırlı kaldığı görülmüştür. Tekli tekerlekler, tüm derinliklerde daha yüksek gerilme seviyeleri yaratmış ve bu durum toprak sıkışma riskini artırmıştır. Paletlerin ve çiftli tekerleklerin 50 cm derinlikte oluşturduğu gerilme farkı ise minimal olmuştur.

Çalışma sonuçları, kauçuk palet sistemlerinin traktörlerin verimliliğini artırırken toprağa daha az zarar verdiğini ve sıkışmayı minimize ettiğini göstermektedir. Geniş temas yüzeyi ile paletler, toprağa uygulanan baskıyı dağıtarak toprak sıkışma riskini azaltmış, bu da tarımsal sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sağlamıştır.

Ancak, bu sistemlerin farklı toprak türleri ve çalışma koşulları altında performanslarının daha fazla araştırılması gereklidir. Palet sistemlerinin uzun vadeli maliyet ve sürdürülebilirlik etkilerinin değerlendirilmesi, bu teknolojilerin tarımda daha fazla benimsenmesini sağlayabilir.

2.10. Farklı Toprak Tiplerinde Lastik-Toprak Basınç Dayanımı

Toprak sıkışması, ağır makinelerin toprağa uyguladığı baskı sonucu oluşmakta ve bitki kök gelişimini olumsuz etkileyerek su ve besin alımını zorlaştırmaktadır. Yüksek Esneklikli (IF) ve Çok Yüksek Esneklikli (VF) lastikler, düşük zemin basıncı ile toprak sıkışmasını azaltmak ve ağır yükleri desteklemek için geliştirilmiştir. Jjagwe ve arkadaşları (Jjagwe ve ark., 2023), yapay toprak üzerinde farklı geometrik şekillerde (dairesel, dikdörtgen ve kare) plakalar kullanarak basınç-batma ilişkisini incelemiştir.

Gevşek ve yoğun toprak koşullarında yapılan deneylerde basınç-batma verileri Bekker ve Reece modelleri ile analiz edilmiştir.

Bekker modeli, toprağın kohezyon (k_c) ve sürtünme modüllerini (k_ϕ) dikkate alarak basınç-batma ilişkisini tahmin ederken, Reece modeli bu parametrelerin geometrik ölçeklemeye uyumunu incelemektedir. Gevşek toprakta basınç artışı daha lineer bir seyir izlerken, yoğun toprakta üssel bir artış görülmüştür. Her iki model de basınç ve batma derinliklerini başarılı bir şekilde tahmin edebilmiş, Reece modeli plaka-toprak etkileşiminde daha iyi sonuçlar vermiştir.

$$\text{Bekker Modeli} \quad p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n = k_{eq} z^n \quad (2.13)$$

$$\text{Reece Modeli} \quad p = (Ck'_c + \gamma_s b k'_\phi) (z/b)^{n'} \quad (2.14)$$

Denklemlerde kullanılan parametreler şu şekildedir: p basıncı (kPa) ifade ederken, b plakanın küçük boyutunu (metre cinsinden) ve z ise batma derinliğini (metre cinsinden) temsil etmektedir. Toprağın mekanik özelliklerini tanımlayan k_c , toprağın kohezyon modülü olup [kN/m^{n-1}] birimiyle gösterilirken, k_ϕ sürtünme modülünü [kN/m^n] olarak tanımlar. k_{eq} , toprak ve plaka arasındaki eşdeğer parametreyi ifade etmektedir. Toprağın görünür kohezyonu C (kPa cinsinden) ile belirtilir ve toprak ağırlık yoğunluğu ise γ_s [kN/m^3] olarak tanımlanmaktadır. Reece modeline ait parametreler olan k'_c ve k'_ϕ , sırasıyla boyutsuz toprak kohezyon ve sürtünme modüllerini belirtmektedir. Son olarak, n' , Reece'in basınç-batma ilişkisindeki toprak üssünü ifade eden parametredir.

Sonuçlar, plaka geometrisinin ve toprak yoğunluğunun basınç-batma ilişkisi üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Dairesel ve dikdörtgen plakalar, kare plakalara göre daha düşük sıkışma direnci oluşturmuştur. Bu çalışmalar, tarım makinelerinin tasarımında toprak sıkışmasını minimize etmek için yararlı veriler sunmaktadır. Ancak, bu modellerin gerçek tarım alanlarındaki geçerliliğinin test edilmesi gereklidir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, geniş veri setleri ile model tahminlerinin doğruluğunu artırmalı ve uzun vadeli etkilerini değerlendirmelidir.

2.11. Taban İzi ve Dikey Gerilim Dağılımı Modellenmesi

Araçlar toprak üzerinde hareket ettiğinde, toprak yüzeyi lastiklerden kaynaklanan mekanik gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu gerilme, lastik şişirme basıncı, tekerlek

yükü, lastik boyutları ve toprak koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Tarımsal makinelerin toprak üzerindeki etkisini doğru şekilde tahmin edebilmek için lastik-toprak temas alanının ve dikey gerilme dağılımının modellenmesi gereklidir. Keller (Keller, 2005), lastik parametrelerine dayalı olarak temas alanı ve gerilme dağılımını modelleyen bir yaklaşım geliştirmiştir. Model, temas alanını süper elipsle, dikey gerilmenin boylamasına dağılımını kuvvet yasası fonksiyonuyla ve enine dağılımını ise bir azalma fonksiyonuyla açıklamaktadır.

Bu modelde, dikey gerilmeyi hesaplamak için toprak yüzeyine yerleştirilen basınç sensörleri kullanılmış ve elde edilen veriler Boussinesq ve Fröhlich denklemleri ile analiz edilmiştir (Boussinesq, 1885b). Maksimum dikey gerilme, lastik şişirme basıncı (P_{tyre}), tekerlek yükü (F_{wheel}) ve önerilen lastik basıncının logaritması ($P_{recommended}$) ile ilişkilendirilmiş ve şu denklemle açıklanmıştır:

$$\sigma_{max} = 34.4 + 1.13P_{tyre} + 0.72F_{wheel} - 33.4\ln\left(\frac{P_{tyre}}{P_{recommended}}\right) \quad (2.15)$$

Bu denkleme göre, maksimum gerilme lastik basıncı ve tekerlek yükü arttıkça artmakta, önerilen basınca yaklaştığında azalmaktadır.

Temas alanı, Hallonborg tarafından geliştirilen süper elips modeli ile hesaplanmış ve bu modelde temas genişliği (w_A) ve temas uzunluğu (l_A) kullanılarak tahmin edilmiştir (Hallonborg, 1996). Temas alanının merkezi ile kenarı arasındaki dikey gerilme dağılımı ise Eşitlik 2.16 ile modellenmiştir:

$$A = kw_A l_A$$

$$\sigma_y = C \left(\frac{w(x)}{2} - y \right) e^{-\delta \left(\frac{w(x)}{2} - y \right)} \quad (2.16)$$

$$0 \leq y \leq \frac{w(x)}{2}$$

Bu denklem, temas alanındaki gerilme dağılımını tahmin etmek için kullanılmaktadır ve ölçülen gerilme değerleri ile yüksek uyum sağladığı bildirilmiştir.

Model, tarımsal lastiklerin gerilme dağılımını ve toprak sıkışmasını tahmin etmede başarılı olmuş, pratikte erişilebilir verilerle doğru sonuçlar sunmuştur. Ancak, farklı toprak tipleri ve tarla koşullarında bu modelin geçerliliğinin test edilmesi gereklidir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, tarımsal lastiklerin etkilerini daha doğru tahmin edebilmek için bu modelin genişletilmesini ve sahada uygulanabilir hale getirilmesini hedeflemelidir.

2.12. Tarım Araçlarının Toprak Üzerindeki Gerilme Etkisi

Tarım makinelerinin toprak üzerinde uyguladığı basınç, toprak sıkışmasına ve gözenek yapısının bozulmasına yol açmaktadır. Toprağın su ve hava geçirgenliğini sağlayan gözenek sistemi, sıkışma sonucu küçülerek bitki kök gelişimini olumsuz etkilemektedir. Berisso ve arkadaşları (Berisso ve ark., 2013), lastiklerin toprak üzerindeki gerilme etkilerinin gözenek yapısı üzerindeki değişimini incelemiş ve bu çalışmayı killi bir toprakta dört tekerlek geçişiyle gerçekleştirmiştir. Toplam 6100 kg yük taşıyan 80 cm genişliğindeki yem hasat makinesi kullanılmış ve normal ve yatay gerilmeler yük hücreleri ile ölçülmüştür. Gözenek süreklilik indeksi ve hava dolu gözeneklilik derecesi, farklı hava geçirgenliği değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Çalışma sonucunda, lastik izinin merkezinde hava doluluğunun ve hava geçirgenliğinin en düşük seviyede olduğu, lastik izi dışında ise bu değerlerin daha yüksek olduğu bulunmuştur. Lastik izi merkezindeki gözenek yapısının baskı nedeniyle daha sıkı ve bozulmuş olduğu tespit edilmiştir. Kısa kenarlarda ise gözenek sürekliliği bozulmuş ancak hava geçirgenliği korunmuştur. Ortalama normal gerilme, iç basınç (PI) kullanılarak Eşitlik 2.17 yardımıyla hesaplanmıştır (Berli ve ark., 2006).

$$\sigma_m = \frac{PI}{2(1-\nu_m)} \quad (2.17)$$

Poisson oranı (ν_m) 0,3 olarak alındığında, σ_m değeri iç basıncın %40 fazlası olarak bulunmuştur. Hava geçirgenliği (k_a) ise toprak örneğinin yüksekliği (l_s), dinamik hava viskozitesi (η), hava basınç farkı (ΔP), ve kesit alanı (A_s) ile hacimsel akış hızı (φ) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu veriler, lastiklerin toprağa uyguladığı gerilmelerin gözenek yapısını önemli ölçüde değiştirdiğini ve su/hava dolaşımını engellediğini göstermektedir.

$$\sigma_m = \frac{PI}{1,4} \quad (2.18)$$

Bu çalışmalar, tarımsal lastiklerin gözenek süreklilik indeksini azalttığını ve hava geçirgenliğini düşürdüğünü ortaya koymuştur. Lastiğin merkezindeki yüksek baskı, gözeneklerin daha az bağlı hale gelmesine ve hava iletim kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu bulgular, tarım makinelerinin tasarımında ve kullanımında dikkat edilmesi gereken kritik noktaları vurgulamakta ve gözenek yapısının korunmasını hedefleyen stratejilere ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalar,

farklı lastik tipleri ve şişirme basınçlarının uzun vadeli etkilerini araştırarak daha sürdürülebilir tarım uygulamaları için öneriler geliştirebilir.

2.13. Sert Zeminde Taban İzi Hesaplaması

Grechenko (Grechenko, 1995), sert zeminde lastik taban izi alanını hesaplamaya çalışmıştır. Mevcut birçok formül, lastik taban iz alanını hesaplamak için yük deformasyonunu bir parametre olarak içermektedir. Bir kullanıcı, lastik kataloğundan yalnızca kullanım basıncı, kullanım jantı ve lastiğin taşıyabileceği yük miktarı verilerini görebilmektedir.

Grechenko yaptığı çalışmasında, belirli bir düzeltme faktörünün uygulanmasını önererek, mevcut formüllerden ve bir lastik kataloğundan yararlanarak, keyfi yükleme ve şişirme basıncı ile lastik taban iz alanını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu, ortalama temas basıncının doğru bir tahminini sağlamaktadır.

Geliştirilen modelde, lastik iz uzunluğu (l_o), iz genişliği (b_o) ve şekil katsayısı (k) kullanılarak iz alanı (A_o) hesaplanmıştır (Eşitlik 2.19). Şekil katsayısı, k , iz alanının geometrik şeklini tanımlar: $k = \pi$ ise elips, $\pi < k < 4$ ise oval ve $k = 4$ ise dikdörtgen şeklini belirtmektedir. Lastiğin kesit yüksekliği (h_k) ve toplam çapı (d_k) da denklemlerde kullanılan diğer temel parametrelerdir. Nominal yük sehimi, lastiğin belirli bir yük altında gösterdiği deformasyon olup, statik yarıçap (r_s) ve jant çapı (d_r) kullanılarak hesaplanmaktadır. Nominal yük sehimi (f_{kj}), oran (a) sembolleri ile gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
 A_o &= k \frac{l_o}{2} \frac{b_o}{2} \\
 k &= \frac{4A_{om}}{l_o b_o} \\
 h_k &= \frac{d_k - d_r}{2} \\
 a &= \frac{h_k}{b_k} = \frac{d_k - d_r}{2b_k} \\
 f_{kj} &= \frac{d_k - 2r_s}{2} \\
 \frac{f_{kj}}{h_k} &= \frac{d_k - 2r_s}{d_k - d_r}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Bu model, sert zemin koşullarında lastik iz alanını doğru bir şekilde tahmin ederek mühendislerin araç tasarımında ve lastik seçiminde daha iyi veriler elde etmesini sağlamaktadır. Yüzde nominal sehim ve kesit genişliği (b_k) gibi parametrelerin de hesaba katılması, lastik taban izinin farklı basınç-yük kombinasyonlarında daha kesin tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Ancak, farklı zemin koşulları ve yük durumlarına dair deneysel verilerin daha fazla test edilmesi gerekmektedir.

Grecenko'nun önerdiği bu yaklaşım, özellikle sert zemin koşullarında lastik iz alanını doğru bir şekilde hesaplamak için önemli bir model sunmaktadır. Model, lastik iz alanının toprak üzerindeki baskı ve sıkışma potansiyelini değerlendirmek için kullanılabilir. Ancak, ileride yapılacak çalışmalar, bu modelin tarımsal ve değişken zemin koşullarındaki doğruluğunu test ederek lastik seçimlerini ve toprağın korunmasını optimize etmeye yönelik daha kapsamlı veriler sunabilir.

2.14. Tarımsal Trafik'in Toprak Gerilmesine Etkisi

Toprak sıkışması, tarımsal makinelerin toprağa uyguladığı baskı sonucu oluşan fiziksel bozulmadır ve bu durum, toprak gözeneklerinin azalmasına, su ve hava geçirgenliğinin düşmesine neden olarak bitki büyümesini olumsuz etkiler. Keller ve arkadaşları (Keller ve ark., 2007), tarımsal alan trafiğinin toprak üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla bir modelleme çalışması yapmış ve tarımsal makinelerin geçişlerinin oluşturduğu gerilme ve sıkışmayı tahmin eden bir model geliştirmiştir.

Geliştirilen SoilFlex modeli, iki boyutlu bir temas modeli olup, lastik-toprak etkileşimini hesaplamak için kullanılmaktadır. Temas alanı ve temas gerilmesi, lastik yükü, şişirme basıncı ve lastik genişliği gibi parametrelerden elde edilmekte ve normal (dikey) gerilmeler ile kayma (yatay) gerilmeleri ayrı ayrı incelenmektedir. Toprak yoğunluğu ve hacimsel gerilme gibi toprak özellikleri, bu modelin parametrelerine dahil edilmiştir. Çalışmalarında hacimsel gerilme ölçümünde farklı yöntemler kullanmışlardır. Toprak yoğunluğunun ve hacimsel gerilmenin hesaplanması için üç farklı yöntem incelenmiştir: Larsson ve arkadaşları (Larson ve ark., 1980), Bailey ve Johnson (Bailey ve Johnson, 1989), O'Sullivan ve Robertson (O'Sullivan ve Robertson, 1996). Gerilme dağılımı ise Boussinesq (Boussinesq, 1885b) ve (Cerruti, 1893) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

SoilFlex modeli, lastik yüküne bağlı olarak temas alanındaki gerilme dağılımını ve yer değiştirmeyi başarılı bir şekilde tahmin edebilmiştir. Modelin gerçek dünya verileri ile karşılaştırıldığında, gerilme yayılımını ve sıkışma etkisini doğru bir şekilde tahmin

ettiği belirlenmiştir. Çalışma, lastik-toprak temas alanının boyutu ve şeklinin, toprak sıkışmasının derinliğini ve yayılımını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Bu nedenle, optimum lastik şişirme basıncı ve makine geçişlerinin azaltılması, toprağa olan zararı minimuma indirmek için önemlidir.

Bu modelleme çalışmaları, tarımsal faaliyetlerin toprak üzerindeki olumsuz etkilerini değerlendirmek ve minimize etmek için kritik veriler sunmaktadır. Ancak, bu modellerin farklı toprak tipleri ve iklim koşulları altında test edilmesi gereklidir. Gelecek çalışmalar, farklı zemin koşulları ve makine yükleri altında SoilFlex modelinin tahmin doğruluğunu artırmaya odaklanmalıdır. Ayrıca, uzun vadeli saha çalışmaları ile bu modelin tarım makinelerinin tasarım ve kullanım süreçlerinde optimize edilmesi sağlanabilir.

2.15. Traktör Lastiklerinin Zemin Basıncı Üzerindeki Etkisi

Traktör tahrik lastiklerinin toprak üzerindeki arayüz basınçları, toprak sıkışması ve çekiş performansını etkileyen önemli bir parametredir. Thomas ve Kishimoto (Way ve Kishimoto, 2004), 18.4R38 radyal-ply lastik kullanarak, kil ve kumlu topraklarda farklı dinamik yük ve şişirme basıncı kombinasyonlarının arayüz basınçlarını incelemişlerdir. Yapılandırılmış kil toprakta, lastik dış yüzeyindeki basınçlar şişirme basıncından yüksek, lastik sırt altındaki basınçlar ise daha düşük bulunmuştur. Gevşek kumlu ve killi topraklarda ise basınçlar şişirme basıncına yakın veya altında kalmıştır. Farklı zemin türlerinde, lastik taban iz alanı değişiklik göstermiş ve bu durum toprağa uygulanan baskıyı ve sıkışma riskini doğrudan etkilemiştir.

Araştırma, gevşek kumlu toprakta taban iz alanının %10, gevşek killi toprakta ise %4 daha geniş olduğunu ortaya koymuştur. Lastik şişirme basıncı ve yük arttıkça, kil toprakta arayüz basıncı dış yüzeyinde daha yüksek değerlere ulaşmış ve bu da toprağın sıkışma eğilimini artırmıştır. Ancak, gevşek topraklarda benzer yük ve basınç değişikliklerinin arayüz basıncı üzerindeki etkisi daha sınırlı kalmıştır.

Sonuçlar, traktör lastik basıncının ve yük durumunun toprak sıkışması ve çekiş performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şişirme basıncı optimize edilerek, traktörlerin verimliliği artırılabilir ve toprak sıkışması minimize edilebilir. Bununla birlikte, farklı toprak tipleri ve iklim koşullarında yapılan daha geniş kapsamlı çalışmalar, bu bulguların tarımda uygulama doğruluğunu artırabilir. Toprakla etkileşim

mekanizmasının daha iyi anlaşılması, daha verimli ve çevre dostu tarımsal faaliyetlerin planlanmasına katkı sağlayacaktır.

2.16. Tarım Makineleri ve Toprak Gerilmeleri: Simülasyon Modeli

Keller ve arkadaşları (Keller ve ark., 2014), tarım makinelerinin toprak üzerindeki dikey gerilme etkilerini ölçmek ve simüle etmek amacıyla farklı toprak türleri ve yükleme koşulları altında deneyler yapmıştır. Çalışmada, beş farklı toprak tipinde (%13-66 kil içeriği) yapılan tekerlek geçişleri sırasında elde edilen veriler kullanılmış ve sonuçlar klasik elastikiyet teorisine dayanan Boussinesq ve Frohlich çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Boussinesq modeli, yüzeydeki tekil bir normal kuvvetin etkisiyle oluşan dikey gerilme dağılımını, Frohlich ise bu modele "konsantrasyon faktörü" ekleyerek daha geniş bir perspektiften tanımlamıştır.

Boussinesq (Boussinesq, 1885b), bir yüzeye uygulanan tekil bir normal kuvvetin, homojen izotropik bir elastik yarı uzay yüzeyindeki normal gerilme dağılımını tanımlamak amacıyla geliştirdiği modelde, yüzeyde oluşan dikey gerilmeyi (σ_z) şu denklemle açıklamıştır:

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi r^5}$$
$$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \quad (2.20)$$

Burada, σ_z simüle edilen dikey toprak stresini (Pa), P yüzeydeki nokta yükünü (N), z yükün derinliğini (m) ve r ise nokta yükünün etki noktasından istenen konuma olan mesafeyi (m) ifade etmektedir. r değeri, yük noktasının yatay (x , y) ve düşey (z) koordinatlarının karelerinin toplamının karekökü olarak tanımlanmaktadır.

Frohlich (Fröhlich, 1934), bu modele konsantrasyon faktörü (v) ekleyerek, gerilme dağılımını daha geniş bir şekilde tanımlamıştır:

$$\sigma_z = \frac{vP}{2\pi} \frac{z^v}{r^{v+2}} \quad (2.21)$$

Burada, v katsayısı, gerilme dağılımının yoğunluğunu kontrol etmekte ve $v = 3$ olduğunda, denklem Boussinesq'in klasik elastisite teorisine dayanan çözümü ile uyumlu hale gelmektedir. Bu parametre, yüzeye uygulanan yükün derinlik boyunca dağılımını ve gerilme eğrilerinin yayılımını etkilemektedir.

Tarım makinelerinin toprak üzerindeki etkisini değerlendirmek için, lastik-toprak veya palet-toprak temas alanındaki yüklerin her bir küçük elemanı noktasal yükler olarak

ele alınabilir. Bu durumda, toplam gerilme, yüzey yükünün temas alanındaki tüm küçük elemanlarının gerilme değerlerinin toplanması ile hesaplanmaktadır (Söhne, 1953).

Söhne tarafından geliştirilen ve benzer prensipleri kullanan bu yaklaşımda, toplam gerilme (σ_z) şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\sigma_z = \sum_{i=0}^n \frac{v P_i}{2\pi} \frac{z_i^v}{r_i^{v+2}} \quad (2.22)$$

Bu denklemde, P_i her bir küçük noktasal eleman üzerindeki nokta yükünü (N), z_i bu elemanın derinliğini (m), r_i elemanın nokta yükünden istenen konuma olan mesafesini (m) ve v ise konsantrasyon faktörünü temsil etmektedir. Bu formül, gerilmenin derinlik boyunca nasıl değiştiğini ve her bir nokta yükünün farklı derinliklerdeki etkisini özetlemektedir. Dolayısıyla, bu tür modeller, yüzey yükü altında oluşan toprak gerilmelerinin derinliğe bağlı olarak nasıl değiştiğini anlamak ve tarım makinelerinin tasarımında gerilme etkilerini minimize etmek için kullanılmaktadır.

Simülasyonlarda, lastiğin toprakla temas ettiği her bir küçük alan, nokta yükleri olarak ele alınmış ve bu yüklerin toplamı hesaplanarak dikey gerilme tahmin edilmiştir. Boussinesq çözümüne dayalı simülasyonlar ile ölçülen dikey gerilme değerleri %90'ın üzerinde uyum göstermiştir. Bu yüksek uyum, lastik genişliği, yük ve temas alanı parametrelerinin doğru bir şekilde modellenmesini sağlamıştır.

Sonuçlar, üst katmanları zayıf olan elastik-plastik katmanlı topraklarda dikey gerilmelerin homojen topraklara göre daha yüksek olduğunu, ancak bu farkın sınırlı kaldığını ortaya koymuştur. Çalışma, tarım makinelerinin toprak sıkışmasını minimize etmek için lastik-toprak etkileşimlerinin daha iyi modellenmesini ve lastik tasarım parametrelerinin optimize edilmesini önermektedir.

Bu araştırma, zirai lastiklerin toprak üzerindeki etkilerinin simülasyonlarla güvenilir bir şekilde tahmin edilebileceğini ve bu tür modelleme çalışmalarının, tarım makinelerinin tasarımında önemli bir rehber olabileceğini göstermektedir. Ancak, modelin geçerliliğinin farklı toprak tipleri ve daha karmaşık yükleme koşulları altında test edilmesi gerekmektedir. Gelecekte yapılacak saha testleri, bu simülasyonların doğruluğunu artırarak tarım makinelerinin toprak yapısına olan olumsuz etkilerini minimize etmek için kullanılabilir.

2.17. Lastik Yüğü ve Şişirme Basıncının Toprak Gerilmesine Etkisi

Arvidsson ve Keller (Arvidsson ve Keller, 2007), farklı lastik yükleri (11, 15 ve 33 kN) ve şişirme basınçlarının (70, 100 ve 150 kPa) üst ve alt toprak katmanlarındaki gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yapılan deneylerde, 10 cm derinlikte beş gerilme sensörü ve alt toprak gerilmelerini ölçmek için 30, 50 ve 70 cm derinlikteki sensörler kullanılmıştır. Elde edilen veriler, 10 cm derinlikteki maksimum gerilmenin lastik şişirme basıncından %39 daha yüksek olduğunu ve artan lastik yükü ile birlikte gerilmenin arttığını göstermiştir. Alt toprakta ise şişirme basıncının etkisi azalmış, ancak lastik yükü alt toprak gerilmesi üzerinde belirleyici bir faktör olarak öne çıkmıştır.

Dikey gerilmeler (σ_z), Söhne (Sohne, 1958) tarafından geliştirilen ve Boussinesq denklemlerine dayalı olarak formüle edilen model ile hesaplanmıştır. Lastik yükü ve şişirme basıncı, toprak yüzeyine uygulanan basınç dağılımını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Söhne'nin modeli, lastiğin taşıdığı yük ve temas alanı parametrelerini kullanarak, yüzeydeki gerilme dağılımını Eşitlik (2.23) denklemi ile açıklamaktadır:

$$\sigma_z = \sum_{i=0}^n \frac{vP_i}{2\pi Z^2} \cos^{v+2} \theta_i \quad (2.23)$$

Burada, σ_z dikey stres (kPa), P_i her bir noktasal elemanın yükü (kN), Z derinlik (m), θ noktasal yük vektörü ile pozisyon vektörü arasındaki açıdır. Denklem, lastik yükünün ve temas basıncının toprak derinliği boyunca gerilmelerin nasıl değiştiğini hesaplamak için kullanılmaktadır.

Çalışmada, üst toprakta lastik şişirme basıncının gerilme dağılımını etkilediği, ancak alt toprakta bu etkinin azaldığı ve lastik yükünün daha büyük bir rol oynadığı bulunmuştur. Lastik yükü arttıkça, alt toprakta gerilme değerlerinin lastik izinin merkezinden kenarlara doğru doğrusal veya parabolik bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, toprağın sıkışma riskini azaltmak için lastik yükü ve şişirme basıncının dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışma, lastik yükü ve şişirme basıncının tarımsal makinelerin toprak üzerindeki etkilerini doğru bir şekilde anlamak ve minimize etmek açısından büyük önem taşıdığını vurgulamaktadır. Üst toprakta şişirme basıncı belirleyici olurken, alt toprakta yükün etkisi daha kritiktir. Gelecekte yapılacak saha çalışmaları, farklı toprak tipleri ve yükleme koşulları altında bu modellerin geçerliliğini test ederek, uzun vadeli tarımsal verimliliği artırma ve toprak sıkışmasını önleme stratejileri geliştirilmesine yardımcı olabilir.

2.18. Nakliye Lastiklerinde Temas Basınçları

Jun ve arkadaşları, orman nakliyesinde kullanılan lastiklerin dinamik yük ve lastik şişirme basıncının, lastik zemin temas basıncı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sert killi toprak zemin üzerinde 100 kPa, 240 kPa şişirme basınçlarında 23.9 kN, 40 kN dinamik yüklerde ölçümlerin yapıldığı bildirilmiştir. Dinamik yükün ve şişirme basıncının toprak lastik temas basınçları üzerinde etkilerini, lastik sırtına monte edilen basınç dönüştürücü kullanarak incelemişlerdir. Lastik zemin temas açılarının şişirme basıncındaki azalma ve dinamik yükteki artışla birlikte arttığını gözlemişlerdir. Dinamik yük artışıyla birlikte lastik kenarındaki çıkıntılar üzerinde basıncın arttığını bildirilmiştir. Toprak lastik arayüz basınç değerlerinin büyüklüğü ve dağılımlarının, toprak sıkışmasını ve lastiklerin çekiş performans özelliklerini etkilediğini tespit etmişlerdir. Sabit dinamik yük altında şişirme basıncı azaldıkça ön lastikte sert killi zeminde temas açılarının arttığı, sabit şişirme basıncında dinamik yük artışıyla birlikte temas açılarının arttığını ifade etmişlerdir. Bunun yanında sabit dinamik yük altında şişirme basıncının artmasıyla lastiğin çekiş gücü ve çekiş verimliliğinin azaldığını görmüşlerdir. Sabit şişirme basıncı ve artan dinamik yük ile çekiş gücü, çekiş verimliliğinin artış gösterdiğini vurgulamışlardır (Jun ve ark., 2004).

2.19. Traktör Kayması: Ekstra Ağırlık ve Lastik Basıncı

Damanauskas ve arkadaşları, traktör lastiklerinde normal kayma hareketinde ekstra ağırlık ve lastik basıncının yakıt tüketimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Traktör lastiklerinde lastik basıncı ve lastik yükünün toprak işleme operasyonlarında enerji kaybına neden olan kayma faktörünü sınırlamak için önemli etkiye sahip olduğu ve kolaylıkla yönetilebilen parametreler olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanında bu parametrelerin yakıt tüketimi ve toprak işleme süresini büyük ölçüde etkilediği vurgulanmıştır. Traktör lastikleri kayma oranının %7-%15 olduğu durumda lastik basıncı ve ekstra ağırlık değişiminin yakıt tüketimi ve iş verimliliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 82,3 kW dört çeker (4WD-four wheel drive) traktör ile dört gövdeli pulluktan oluşan deneysel araştırma ünitesi ile ölçümlerin yapıldığı ifade edilmiştir. Testlerde traktör lastik kaymasının (slippage) < %15 olduğu, traktör ön denge ağırlığının 0 ile 520 kg arasında değiştiği, lastik şişirme basıncının 240 kPa ile 100 kPa arasında değiştiği ve anızlı balçık bir zeminde gerçekleştiği ifade edilmiştir. Traktörlerde çekme kabiliyetinin, traktörün motor gücü, traktörün kütlesi, lastikle zemin arasındaki temas alanı ve toprak mukavemeti gibi birçok faktöre bağlı olduğu ifade edilmiştir. Zeminin

kuru olması durumunda yapışmanın iyi olacağı ve dolayısıyla daha fazla çekme kuvveti, daha az lastik kayması, daha düşük yuvarlanma direnci (rolling resistance) ile sonuçlanacağını vurgulamışlardır. Zeminin ıslak olma durumunda ise lastik kayma oranının ve yuvarlanma direncinin artışına dolayısıyla daha fazla güç kaybına ve çekiş verimliliğinin azalmasına neden olacağını belirtmişlerdir. Lastiklerde yuvarlanma direncinin, traktörün hızından daha az etkilendiği ancak lastik şişirme basıncı ve dikey yüklerin etkisiyle daha fazla değiştiğini ifade etmişlerdir. Traktör lastiklerinde normal kayma, yüzde kayma ve yuvarlanma yarıçapı (Rolling radius) değerlerinin,

$$s = \frac{\omega R_r - v_a}{\omega R_r} = 1 - \frac{v_a}{\omega R_r}$$

$$s = \left\{ 1 - \frac{v_a - i_{tr}}{\omega_e R_{rd}} \right\} 100, \% \quad (2.24)$$

$$R_{rd} = \frac{P_z}{2\pi z},$$

Eşitlik 2.24 formülasyonları ile hesaplandığını bildirmişlerdir. Formülasyonlarda, s: kayma oranı, ω : açısal hız, R_r : yuvarlanma yarıçapı, v_a : gerçek ilerleme hızı, ω_e : motor şaftının açısal hızı, i_{tr} : traktör şanzıman oranı, R_{rd} : tahrik lastikleri dönme yarıçapı, P_z : tahrik lastiklerinin kat ettiği mesafe, z: tahrik lastiklerinin devir sayısını ifade eder. Bunun yanında, traktörlerde hektar başına yakıt tüketimi (B_{ha}) denkleminin Eşitlik 2.25'e göre hesaplandığı vurgulanmıştır. Eşitlikte, B_{ha} : hektar başına yakıt tüketimi, B_h : saatlik yakıt tüketimi, H: ünitenin çalışma genişliğini ifade etmektedir.

$$B_{ha} = \frac{B_h}{0.36 v_a H}, 1 \text{ ha}^{-1} \quad (2.25)$$

Traktör lastik kaymasının %7-%15 aralığında olması durumunda lastik şişirme basıncının düşürülmesinin, tahrik lastiğinin kaymasını ve yakıt tüketimini azaltırken iş verimliliğini arttırdığını tespit etmişlerdir. Traktöre ekstra ağırlık eklenmesinin ise tahrik lastiğinin kaymasını azalttığı, iş verimliliğini arttırdığı aynı zamanda yakıt tüketimi ve toprağın sıkışma miktarını arttırdığını vurgulamışlardır (Damanauskas ve ark., 2015).

2.20. Analitik Toprak Sıkıştırma Modelleri

Keller ve arkadaşları, analitik toprak sıkıştırma modellerini araştırmışlardır. Toprak sıkışmasının önlenmesine yönelik strateji ve tavsiyelerin çoğunlukla simülasyon modellerine dayanarak yapıldığını ifade etmişlerdir. Üst model sınır koşullarının (lastik-

toprak arayüz temas alanı ve gerilmeler) gerilim yayılımında oldukça etkili olduğunu ancak toprak koşullarının üst model sınır koşulu üzerindeki etkilerine yönelik bilgilerin yetersiz olduğu belirtilmiştir. Zemin sıkıştırma modellerinin yapısını üç kısma ayırmışlardır. Birinci kısımda üst model sınır koşulu, temas alanı ve toprak yüzeyindeki gerilmeler, ikinci kısımda gerilmelerin toprakta yayılması, üçüncü kısımda ise zemindeki gerilim davranışı olarak tanımlanmıştır. Belirtilen üç kısmın analitik toprak sıkıştırma modellerinin hesaplanmasına olanak sağladığını ifade etmişlerdir. İlk olarak zemin yüzeyindeki gerilmeler tanımlanmıştır. İkinci olarak gerilim yayılımının hesaplandığı, son aşamada ise zeminde oluşan deformasyon hesaplanarak, hesaplanan gerilimin kritik bir gerilimle karşılaştırılması ile toprak sıkışmasının meydana gelip gelmediğini değerlendirmişlerdir.

Lastikte oluşan sehimin, lastiğin zemine göre sertliğine bağlı olduğu belirtilmiştir. Zemin mukavemetinin, toprakla lastik arasındaki temas alanının yanı sıra lastik-toprak arayüzündeki gerilmelerin dağılımını ve büyüklüğünü etkilediğini vurgulamışlardır. Toprak yüzeyi ne kadar sert ise lastik-toprak arayüzündeki maksimum gerilimde o ölçüde yüksek olacağını belirtmişlerdir (Keller ve Lamandé, 2010).

2.21. Taban İzi Ölçümü: Geleneksel ve Görüntü İşleme Teknikleri

Lastik sanayisi ürün geliştirme süreçlerinde lastik taban izi ölçümleri performans lastiklerinde düşük yuvarlanma direnci, zirai alanda kullanılan lastiklerde geniş taban izi, sürüş konforu, yol tutuşu gibi parametrelere doğrudan etki etmesi nedeniyle kritik bir süreçtir. Lastik taban izi ölçümlerinde geleneksel yöntem olarak lastiğin belirli bir yük ve şişirme basıncı etkisi altında zeminle temas edebilecek bölgelerinin kırmızı renk ile boyanarak beyaz bir kağıt üzerinde iz elde edilir. Sonrasında özel formüller yardımıyla taban izi alanı hesaplanmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda, geleneksel ölçüm yöntemlerinin zorlukları, görüntü işleme yöntemlerini ise avantajlı olduğu belirtilmiştir. (Wigan, 1992) (Lee ve Taheri, 2017) (Pomoni, 2022). Taban izi ölçümlerinde görüntü işleme yöntemlerinin kullanımı hata riskini azaltarak, doğru ve hızlı analiz yapılmasında olanak sağlayacaktır.

Taban izi ölçümlerinin ayrıca lastiklerde yol tutuşu, lastik sıcaklığı, aşınma direnci, yakıt tüketimi gibi parametrelere doğrudan etkisinin olduğu yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır (Liu ve ark., 2024; Sun ve ark., 2024). Pohl ve arkadaşları, görüntü işleme teknikleri kullanarak taban izi ölçümünde sensör sistemiyle donatılmış lastikleri

araştırmışlardır. Yapılan çalışmada “akıllı lastik” terimi kullanılarak lastik ve yol yüzeyi arasında oluşan temas bölgesinin kritik bir parametre olduğunu ifade etmişlerdir (Pohl ve ark., 1999). Bir diğer çalışmada Taghavifar ve arkadaşları, radyal lastiğin toprak zeminde temas alanı ve temas basıncını görüntü işleme tekniği ile incelemişlerdir. Lastiğin temas basıncının yük ve şişirme basıncı ile doğrusal olarak değişim gösterdiğini belirtmişlerdir (Taghavifar ve Mardani, 2013). Lastik taban genişliklerinin doğru bir şekilde ölçülebilmesi amacıyla Pyo ve arkadaşları, lastik sırtının çekildiği ekstruder hattında kameralar yardımıyla lazer çizgi aydınlatmasını kullanarak görüntü tabanlı otomasyon algoritmasını araştırmışlardır. Ekstruder hattı üzerinde değişiklikler yaparak sistemi otomatik hale getirmişlerdir. Bu durumun, üretim verimliliği sağlarken iş kazaları sayısının azalttığını bildirmişlerdir (Pyo ve Lyou, 2013). Lastik diş derinliğinin doğru ve otomatik olarak belirlenebilmesi için Wang ve arkadaşları, makine öğrenmesi temeline dayanarak bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemle lastik deseni üzerindeki olukların tanımlandığı ve her bir oluk derinlik değerinin 0.2mm’den az bir mutlak hata ile ölçülebildiğini vurgulamışlardır (Wang ve ark., 2019). Aguilar ve arkadaşları, lastik özellikleri ve diş kusurlarının karakterizasyonu için optik test tezgahı optimizasyonunu kullanmışlardır. Bu yöntemin, lastik dinamiğinde yer alan kritik faktörlerin belirlenmesinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir (Castillo Aguilar ve ark., 2017).

Lastik aşınmasını ölçmek amacıyla Huber ve arkadaşları, “TireEye” ifadesini kullanarak temassız ölçüm cihazı geliştirmişlerdir. Kenar algılama görüntü işleme yöntemi (Adaptif Canny) kullanılarak oluşturulan ölçüm cihazının, lastik aşınmasını 1 mm’den az bir doğrulukla ölçülebildiğini bildirmişlerdir (Huber ve ark., 2022). Bhamare ve arkadaşları, lastik diş derinliğinin otomatik olarak ölçülebilmesine olanak sağlayan bir sistem tasarlamışlardır. Görüntü işleme sensörleri yardımıyla kullanılan bu sistemin, verimliliği arttıran ve işçilik maliyetlerini azaltan bir çözüm olduğunu vurgulamışlardır. Bu sistemin ayrıca lastiklerde taban derinliği ölçümünde geleneksel yöntemler yerine kullanılacak bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir (Bhamare ve Khachane, 2019). Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle birlikte görüntü işleme tekniklerinin endüstriyel alan uygulamalarında kullanımı ve etkinliği artış potansiyeline sahiptir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1 Boyutsal Ölçümlerde Kullanılan Malzeme

Bu tez çalışmasında, iki farklı tip lastik yapısına sahip olan Şekil 3.1 a) 600/70 R30 ve b) IF 600/70 R30 lastiklerinin yük, kullanım basıncı, kullanım jantı etkisi altında taban izleri ve sehim değerleri incelenmiştir. Testler sırasında kullanılan lastikler, topuk, sırt, yanak, kord bezi bileşenlerinden oluşan zirai araç lastikleridir.



Şekil 3.1. a) 600/70 R30

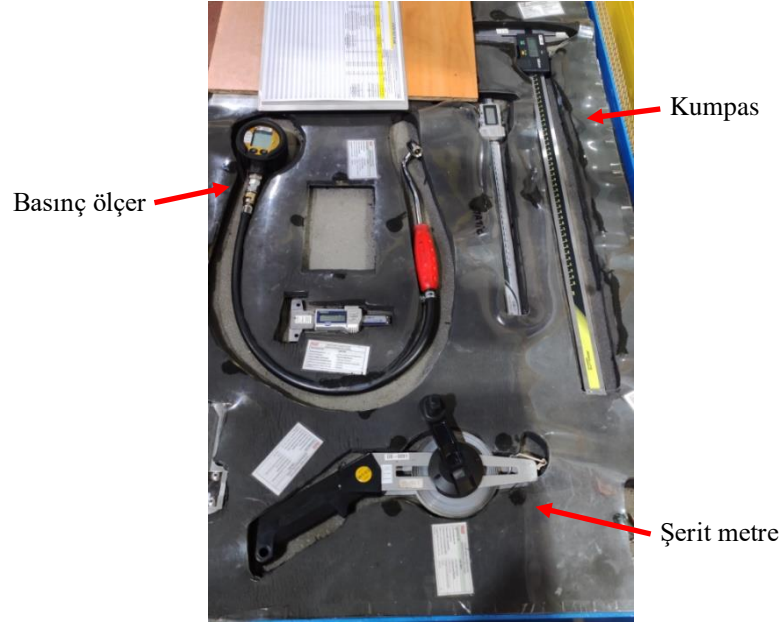
b) IF 600/70 R30

Lastiklerin, Avrupa Lastik ve Jant Teknik Organizasyonu (ETRTO) tarafından belirtilen kullanım jantı ile montajlama Şekil 3.2’de görülmektedir. Montajlama işlemi sonrası standartlara uygun olan şişirme basıncında (35psi) lastikler şişirilerek kumpas ve şerit metre yardımıyla ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.2. Montajlanmış lastikler

Montajlama işlemi tamamlanan her iki lastik, montajlama işlemi sonrası Şekil 3.3’de görülen ekipmanlar yardımıyla boyutsal ölçümleri tamamlanmıştır.



Şekil 3.3. Boyutsal ölçümlerde kullanılan materyaller



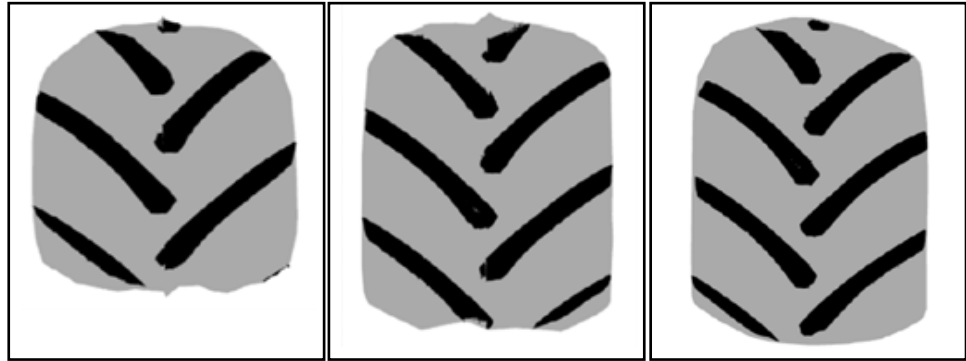
Şekil 3.4. Lastiklerin boyutsal ölçümleri

Lastiklerin Avrupa Lastik ve Jant Teknik Organizasyonu (ETRTO) tarafından belirtilen kullanım jantı, şişirme basıncında ve Şekil 3.4’de görüldüğü gibi boyutsal ölçümleri tamamlanarak uluslararası standartlara uygunluğu kontrol edilmiş, ölçüm değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Lastik boyutsal ölçümleri

Dış çap (OD)						
Lastik ebadı	minimum	dizayn	maksimum	ölçüm	jant	basınç
600/70 R30	1574mm	1602mm	1638mm	1630mm	DW20.00	35psi
IF 600/70 R30	1574mm	1602mm	1636mm	1590mm	DW20.00	35psi
Kesit genişliği (SW)						
Lastik ebadı	minimum	dizayn	maksimum	ölçüm	jant	basınç
600/70 R30	576mm	601mm	631mm	595mm	DW20.00	35psi
IF 600/70 R30	579mm	603mm	633mm	630mm	DW20.00	35psi

Zirai alanda kullanılan IF/VF lastikler, standart lastiklere göre daha fazla yük taşıma kapasitesi, yüksek çekiş gücü, daha geniş taban izine sahip olan lastiklerdir. Bunun yanında, yakıt tüketimi ve esnek yapısı sayesinde kullanıcıya sağladığı avantajlardan dolayı IF/VF lastiklerin kullanımı tercih sebebi olmaktadır. Prazan ve arkadaşları aynı ölçüde, farklı kimyasal yapıda olan üç farklı tip lastiğin (standart, IF, VF) farklı şişirme basınçlarında taban izi ve çekiş özelliklerini incelemişlerdir. Düşük şişirme basıncına sahip olan VF lastiğin, diğer lastiklere göre en uygun çekiş özelliklerine sahip olduğu ve referans olarak kabul edilen IF lastiğine göre %28 daha geniş taban izine (Şekil 3.5) sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Prazan ve ark., 2016).



Şekil 3.5. a) Standart lastik

b) IF lastik

c) VF lastik

3.1.2. Taban İzi Ölçümlerinde Kullanılan Malzeme

Lastiklerde kullanım jantı seçimi, araca ve lastikten beklenen özelliklere uygun olmalıdır. Son kullanıcı hasat işlemi için veya sulama işlemi için farklı özelliklerde lastik kullanılabilir. Günümüz zirai araçlarında yüksek motor gücüne karşılık verebilecek, esnek yapısı ön planda olan lastikler kullanılmaktadır. Karbon salınımı düşük, çevre dostu, yüksek verimliliğe sahip lastik seçimiyle birlikte lastikte kullanılacak jant seçimi de maksimum fayda sağlayacak şekilde doğru yapılmalıdır. Tüm bu etkenler dikkate

alındığında taban izi ölçümlerinde kullanılmak üzere seçilen üç farklı tip jant Şekil 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.6. Zirai araç jant tipleri

3.2. Metot

Test lastiklerinin taban izi ve sehim ölçümü, standartlarda belirtilen jant, basınç ve yük parametre değerleri kullanılarak Tablo 3.2’de belirtilen değişkenlere göre ölçülmüştür.

Tablo 3.2. Test değişkenleri

	Girdi değişkenleri	Çıktı değişkenleri
jant	W18, DW20, DW21	Taban izi ölçümleri (geleneksel yöntem)
basınç (psi)	35, 29, 23, 17, 12	Taban izi ölçümleri (algoritma)
yük (kg)	4250, 5150	Sehim ölçümleri
lastik	600/70 R30, IF 600/70 R30	

3.2.1. Lastik Taban İzlerinin Alınması

Lastik taban izlerinin alınması amacıyla 600/70 R30 ve IF 600/70 R30 lastiklerinin sırasıyla W18.00x30, DW20.00x30 ve DW21.00x30 jantları ile montajlama işlemi yapılmıştır. Montajı yapılan lastikler test cihazına bağlanabilmesi amacıyla vinç yardımıyla kaldırılarak göbek aparatı ile test cihazına çözülebilir bağlantı işlemi yapılmıştır. Taban izi ölçümleri sırasında Tayvan üretimi U-CAN Lastik Test Sistemi statik test makinesi kullanılmıştır. (Şekil 3.7)

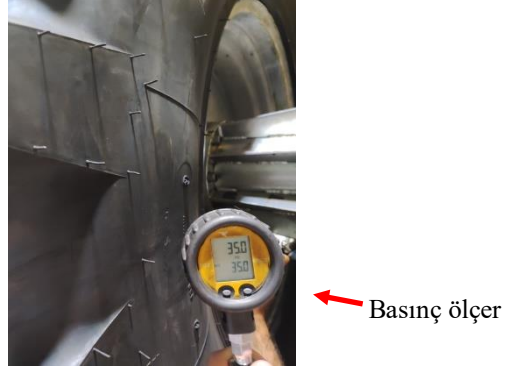


Şekil 3.7. U-CAN Statik Test Makinesi



Şekil 3.8. Test cihazı bağlantı işlemi

Test lastiklerinin statik test makinesine çözülebilir bağlantı sonrasında 850 mm-650 mm ölçülerinde (Şekil 3.8) olan taban izi ölçüm tablası üzerine beyaz kağıt sabitlenmiştir. Ölçümü yapılacak lastiğin basınç ölçer yardımıyla şişirme basıncı (Şekil 3.9) kontrol edilmiştir.



Şekil 3.9. Şişirme basıncı kontrolü

Statik test makinesinde bağlantı işlemi ve şişirme basıncı kontrolü yapılan IF 600/70 R30 lastiğinin, taban izi ölçüm tablası yüzeyine bakan bölgesi taban izi alınabilmesi amacıyla kırmızı boya ile boyanmış, statik test makinesinde lastiğe uygulanacak yük miktarı 5150 kg olarak ayarlanmıştır. Lastiğin W18.00x30 jantı ile 5150 kg yük değerinde, sırasıyla 35 psi, 29 psi, 23 psi, 17 psi, 12 psi şişirme basıncı değerlerinde taban izi ölçüm tablası üzerinde (Şekil 3.10) taban izi alınmıştır. Basınç değeri değişimlerinde lastiğin şişirme basıncı basınç ölçer ile kontrol edilmiştir. Testin ikinci aşamasında ise aynı lastiğin DW20.00x30 jantı ile 5150 kg yük değerinde, sırasıyla 35 psi, 29 psi, 23 psi, 17 psi, 12 psi şişirme basıncı değerlerinde taban izi alınmıştır. Üçüncü aşamada ise IF 600/70 R30 lastiğinin DW21.00x30 jantı ile 5150 kg yük değerinde, sırasıyla 35 psi, 29 psi, 23 psi, 17 psi, 12 psi şişirme basıncı değerlerinde taban izleri alınmıştır.



Şekil 3.10. Lastiklerden taban izi alınması

Statik test makinesinde taban izi alınan IF600/70 R30 lastiği sökölerek yerine 600/70 R30 lastiğinin statik test makinesine çözülebilir bağlantısı yapılmıştır. Basınç ölçer ile şişirme basıncı kontrolü yapılan 600/70 R30 lastiğinin taban izi ölçüm tablasına bakan yüzeyi kırmızı boya ile boyanmıştır. Statik test makinesinde lastiğe uygulanacak yük miktarı 4250kg olarak ayarlanmıştır. Lastiğin W18.00x30 jantı ile 4250 kg yük değerinde, sırasıyla 35 psi, 29 psi, 23 psi, 17 psi, 12 psi şişirme basıncı değerlerinde taban izi alınmıştır. Testin ikinci aşamasında, 600/70 R30 lastiğinin DW20.00x30 jantı ile 4250kg yük değerinde, sırasıyla 35 psi, 29 psi, 23 psi, 17 psi, 12 psi şişirme basıncı değerlerinde taban izi alınmıştır. Testin üçüncü aşamasında lastiğin DW21.00x30 jantı ile 4250 kg yük değerinde, sırasıyla 35 psi, 29 psi, 23 psi, 17 psi, 12 psi şişirme basıncı değerlerinde taban izleri alınmıştır.

3.2.2. Lastik Sehım (Deflection) Değerlerinin Alınması

Statik test makinesine test lastiklerinin montajlanması sonrasında, lastiklerin yük altında sehım (deflection) değerlerinin alınması amacıyla test cihazına ölçüm parametre değerleri tanımlanmıştır. 600/70 R30 lastiğinin DW21.00x30 jantı ile 12 psi, 17 psi, 23 psi, 29 psi ve 35 psi şişirme basıncı değerlerinde, sırasıyla 10 kg, 100 kg, 500 kg, 1000 kg, 2000 kg, 3000 kg, 4250 kg yük değerlerinde sehım (deflection) değerleri (şekil 3.11) alınmıştır. Testin ikinci aşamasında, 600/70 R30 lastiğinin W18.00x30 jantı ile 12 psi, 17 psi, 23 psi, 29 psi, 35 psi şişirme basıncı değerlerinde, sırasıyla 10 kg, 100 kg, 500 kg, 1000 kg, 2000 kg, 3000 kg, 4250 kg yük değerlerinde sehım değerleri alınmıştır.



şekil 3.11. Lastiklerde sehım (deflection) değerlerinin alınması

Statik test makinesine ikinci test lastiğinin IF600/70 R30 montajlanması sonrasında, test cihazına ölçüm parametre değerlerinin tanımlanması yapılmıştır. Lastiğin DW21.00x30 jantı ile 12 psi, 17 psi, 23 psi, 29 psi, 35 psi şişirme basıncı değerlerinde, sırasıyla 10 kg, 100 kg, 500 kg, 1000 kg, 2000 kg, 3000 kg, 4000 kg, 5150 kg yük değerlerinde sehim değerleri alınmıştır. Testin ikinci aşamasında, IF600/70 R30 lastiğinin W18.00x30 jantı ile 12 psi, 17 psi, 23 psi, 29psi, 35psi şişirme basıncı değerlerinde, sırasıyla 10 kg, 100 kg, 500 kg, 1000 kg, 2000 kg, 3000 kg, 4000 kg, 5150 kg yük değerlerinde sehim (deflection) değerleri alınmıştır.

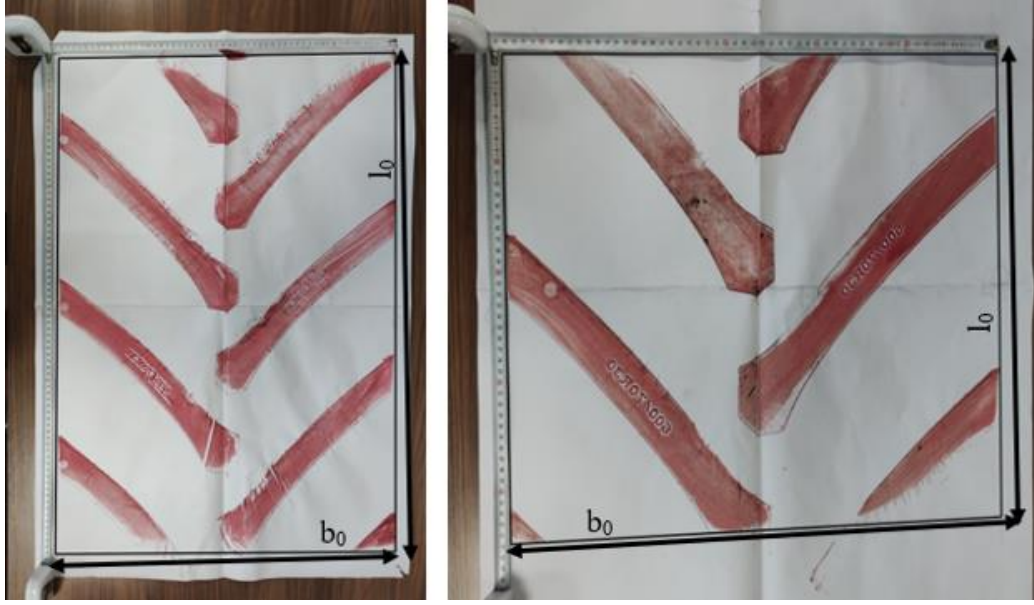
3.2.3 Lastik Taban İzlerinin Ölçülmesi

Test lastiklerinin 600/70 R30 ve IF 600/70 R30 statik test makinesinde taban izlerinin alınmasının ardından lastik taban izleri jant, basınç, yük parametreleri dikkate alınarak sınıflandırılmıştır. Geleneksel taban izi ölçümünde öncelikle lastik jantları, şişirme basıncı ve yük miktarı ayarlanır. Lastiğin zeminle temas edebilecek bölgeleri kırmızıya boyanır. Test cihazı ile lastik hareket ettirilerek zeminde sabitlenen beyaz kağıt üzerinde lastiğin taban izi alınır. Taban izinin ölçülmesi amacıyla taban izi alınan beyaz kağıt (Şekil 3.12) düz bir masa üzerinde sabitlenir.



Şekil 3.12. Taban izi alınan kağıt

Taban izi ölçümleri sırasında, lastik taban izlerinin dikdörtgen yapısı metre yardımıyla siyah kurşun kalem ile çizilerek Şekil 3.13’de görüldüğü gibi taban izi en ve boy ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.13. Lastik taban izi ölçümü

Lastik taban izlerinin alan hesaplaması temel boyutlar (en, boy) Eşitlik 3.1 denklemi yardımıyla tespit edilmiştir (Grečenko, 1995).

$$A_0 = k \frac{l_0}{2} \frac{b_0}{2} \quad (3.1)$$

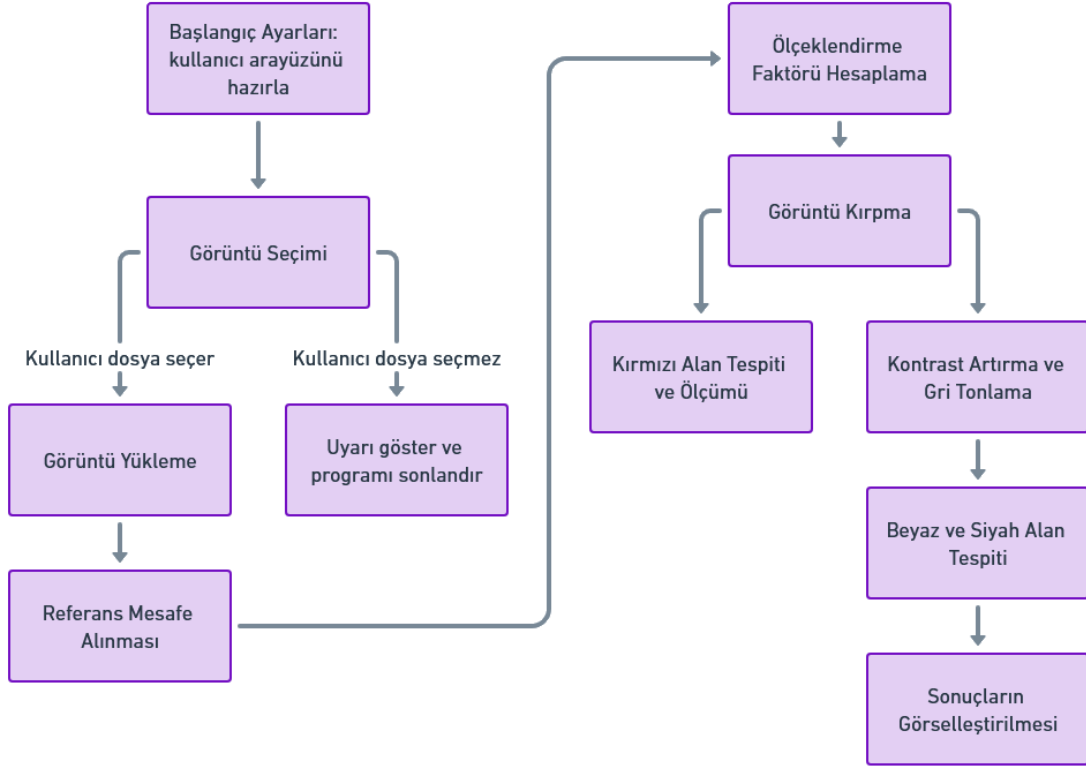
Eşitlikte A_0 : lastik taban izi alanı (cm^2), l_0 : taban izi boy (cm), b_0 : taban izi en (cm), k : taban izi alanı katsayısı (dikdörtgen $k=4$) ifade etmektedir.

3.2.4. Lastik Taban İzlerinin Görüntü İşleme Teknikleriyle Otomatik Ölçümü

Lastik taban izlerinin ölçümünde geleneksel ölçüm yöntemlerine alternatif olarak görüntü işleme teknikleriyle otomatik ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen görüntü işleme sistemi, lastik taban izinin geleneksel ölçüm yöntemine göre daha hızlı ve doğru bir şekilde ölçümüne olanak sağlamaktadır. Görüntü işleme sisteminin taban izini hesaplama işlemi sonrasında ölçeklendirme faktörü yardımıyla, elde edilen değerler gerçek ölçülere dönüştürülmektedir. Öncelikle kullanıcı arayüz üzerinden taban izi görüntü dosyasını seçerek ilgili fotoğrafı algoritmaya yüklemekte ve diyalog penceresine ulaşılmaktadır. Daha sonra kullanıcı görüntü üzerinden referans bir mesafe belirlemek amacıyla iki nokta seçimi yapmaktadır. Bu noktalar arasında piksel mesafe değeri hesaplanarak ölçeklendirme faktörü ile gerçek ölçü değerleri elde edilmektedir.

Kullanıcı görüntüdeki gürültüyü azaltmak için görüntü üzerinden kırpma işlemi yapmaktadır. Kırpma işlemi sonrasında görüntü üzerindeki kırmızı alanlar belirlenmekte ve bu alanların piksel cinsinden değerleri hesaplanmaktadır. Piksel değerleri ölçeklendirme faktörü kullanılarak gerçek ölçü birimine (cm^2) dönüştürülmektedir. Son

aşamada ise görüntünün kontrastı artırılarak renk dönüşümü sağlanmaktadır. Renk dönüşümü ile ortaya çıkan beyaz ve siyah alanlar cm^2 cinsinden hesaplanarak kullanıcıya sunulmaktadır. Görüntü işleme algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.14'te görülmektedir.



Şekil 3.14. Algoritmanın akış diyagramı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Lastik taban izini belirleyen önemli unsurlar lastik basıncı, lastik kullanım jantı, lastiğe etki eden yük miktarıdır. Lastik yapısının ise zemin üzerinde oluşan gerilim ve taban izine etkisinin sınırlı seviyede olduğu, zirai alanda toprak gerilimini azaltmak için lastiklerde düşük şişirme basıncında çalışması gerekliliği yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır (ten Damme ve ark., 2020). Rivero ve ark. Yumuşak toprak koşullarında, lastik üreticisi firmaların tavsiye ettiği şişirme basıncının üzerinde çalışan lastiklerde zeminde batmalar, lastik yuvarlanma direncinde artış meydana geleceğini ve yakıt tüketiminde %30'a varan kayıplar oluşacağını bildirmişlerdir. Bunun yanında Rivero ve arkadaşları, lastiğin aşırı şişirilmesi lastik-toprak temas alanını (taban izi) azaltarak kayma oranını arttıracığını, toprak sıkışması ve yakıt tüketimine olumsuz etkileri olacağını vurgulamışlardır (Rivero ve ark., 2022). Yapılan tez çalışmada iki farklı tip lastiğin 600/70 R30 ve IF 600/70 R30 sabit yük değerleri altında, farklı basınç ve farklı jant tiplerinde taban izi ölçümleri alınmıştır. Testler sırasında kullanılan jantların W18 (Şekil 4.1), DW20, DW21 jant parametre değerleri A, G ve D ölçüleri Tablo 4.1'de görülmektedir.



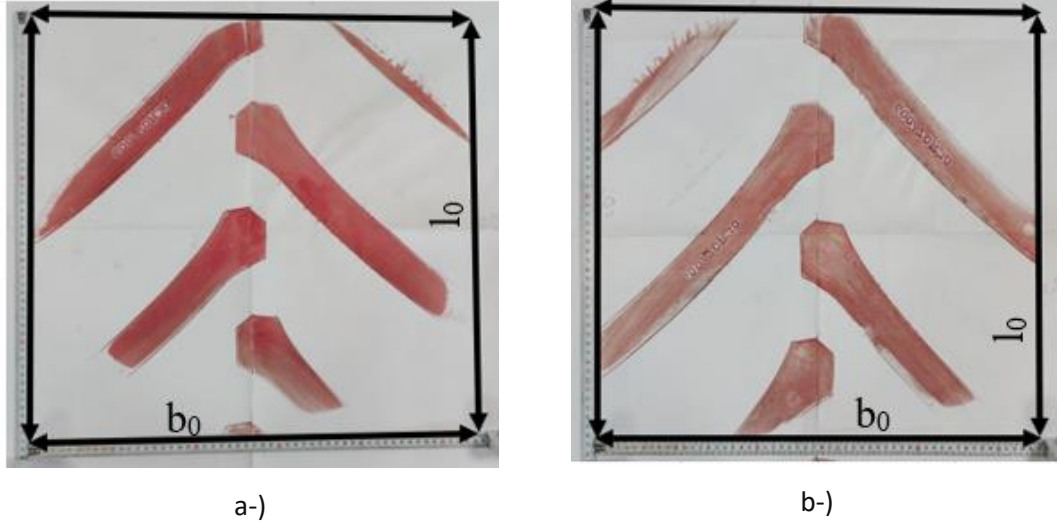
Şekil 4.1. W Jant profili

Tablo 4.1. Zirai lastik jantı parametre değerleri (ETRTO 2023)

Kullanım jantı	A	G	D
W18	457mm	25.5mm	766.8mm
DW20	508mm	29mm	766.8mm
DW21	533.5mm	29mm	766.8mm

4.1. Lastik Taban İzlerinin Ölçüm Sonuçları (Geleneksel Yöntem)

IF ve normal yapıda olan her iki lastiğin W18, DW20, DW21 jantlarında sırasıyla 35 psi (Şekil 4.2), 29 psi, 23 psi, 17 psi, 12psi basınç değerlerinde taban izi ölçümleri alınmıştır. Testler sırasında, 600/70 R30 lastiği 4250 kg yük, IF 600/70 R30 lastiği ise 5150 kg yük değerleri altında ölçümleri tamamlanmıştır. Ölçümlerde lo(boy), bo(en) mm birimi cinsinden ifade edilmiştir.



Şekil 4.2. a-) W18 35psi 600/70 R30, b-) W18 35psi IF 600/70 R30

Lastik taban izi ölçümlerinde, farklı iki yapıya sahip olan lastiklerin sabit yük altında farklı basınç ve farklı jant kullanılması durumunda taban izinde oluşan değişim Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’de incelenmiştir. Normal yapıya sahip lastikte en geniş taban izi 4250 kg yük altında, DW20 jant ve 12 psi basınç değerinde 0.422 m² olarak ölçülmüştür. IF lastik yapısında ise en geniş taban izi 5150 kg yük altında, W18 jant ve 12 psi basınç değerinde 0.426 m² olarak ölçülmüştür. Normal yapıda olan 600/70 R30 lastiğinin 4250 kg yük altında, DW21 jant ve 35 psi basınç şartlarında 0.260m² ile minimum taban izi değeri tespit edilmiştir. IF 600/70 R30 lastiğinde ise 5150 kg yük altında, DW21 jant ve 35 psi basınç değerinde 0.233 m² ile minimum taban izi değeri ölçülmüştür.

Tablo 4.2. 600/70 R30 lastiği taban izi ölçüm değerleri

Basınç(psi)	Boy(mm)	En(mm)	Jant	Yük(kg)	Alan(m ²)
35	520	545	W18	4250	0.283
29	534	551	W18	4250	0.294
23	549	555	W18	4250	0.304
17	635	556	W18	4250	0.353
12	730	562	W18	4250	0.410
35	510	540	DW20	4250	0.275
29	535	546	DW20	4250	0.292
23	566	558	DW20	4250	0.315
17	595	562	DW20	4250	0.334
12	761	555	DW20	4250	0.422
35	487	535	DW21	4250	0.260
29	495	549	DW21	4250	0.271

Basınç(psi)	Boy(mm)	En(mm)	Jant	Yük(kg)	Alan(m ²)
23	550	549	DW21	4250	0.301
17	584	551	DW21	4250	0.321
12	678	553	DW21	4250	0.374

Damme ve ark. yaptıkları çalışmada lastiklerin omuz bölgesinin lastik-toprak temas alanına etkisi olduğunu, taban izinin hem uzunluk hem genişlik değerlerini arttırdığını ve lastik şişirme basıncının daha da azaltılmasına olanak sağlandığını belirtmişlerdir. Toprak üzerinde oluşan gerilimin lastiğin genişliği, uzunluğu ve şişirme basıncıyla ilgili olduğu, lastik yapısı (çapraz veya radyal), lastiğin çelik kuşaklarla takviye edilmesiyle ilgili olmadığını ifade etmişlerdir (ten Damme ve ark., 2019). Bunun yanında Harris ve ark. yaptıkları çalışmada kuru zeminde lastik şişirme basıncının toprakta oluşan temas basıncına sınırlı etkisi olduğu, nemli ve ıslak zeminde ise yüksek temas basınçlarına sebep olarak toprak yapısına zarar verdiğini vurgulamışlardır (Harris, 2017). Zirai lastiklerde modern geniş, düşük basınçlı lastiklerin toprak gerilimi üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada Damme ve ark. taban izi ölçüm çalışmalarında MICHELIN EvoBib 600/70 R30 ebat açılımına sahip lastiğin 80 kPa \approx 12 psi lastik şişirme basıncı altında taban izini 0,41 m² olarak ölçmüşlerdir (ten Damme ve ark., 2020). Test lastiğimiz olan PETLAS 600/70 R30 lastiğinin W18 jant ile 4250 kg yük ve 12 psi lastik şişirme basıncı değerinde ölçülen taban izi 0,41 m² olarak ölçülmüştür.

Taban izi ölçümlerinde normal yapıya sahip olan 600/70 R30 lastiğinin maksimum taban izinin ölçüldüğü DW20 jant, 12 psi basınç, 4250 kg yük altında ölçülen 0.422 m², aynı lastiğin minimum taban izinin ölçüldüğü DW21 jant, 35psi, 4250 kg yük altında ölçülen taban izi 0.260 m² değerine göre % 62.3 oranında daha büyük etki alanına sahiptir. IF yapıya sahip olan lastik IF 600/70 R30 lastiğinde ise maksimum taban izinin ölçüldüğü W18 jant, 12 psi, 5150 kg yük altında ölçülen 0.426 m², aynı lastiğin minimum taban izinin ölçüldüğü DW21 jant, 35 psi, 5150 kg yük altında ölçülen taban izi 0,233 m² değerine göre %82.8 oranında daha büyük etki alanına sahiptir.

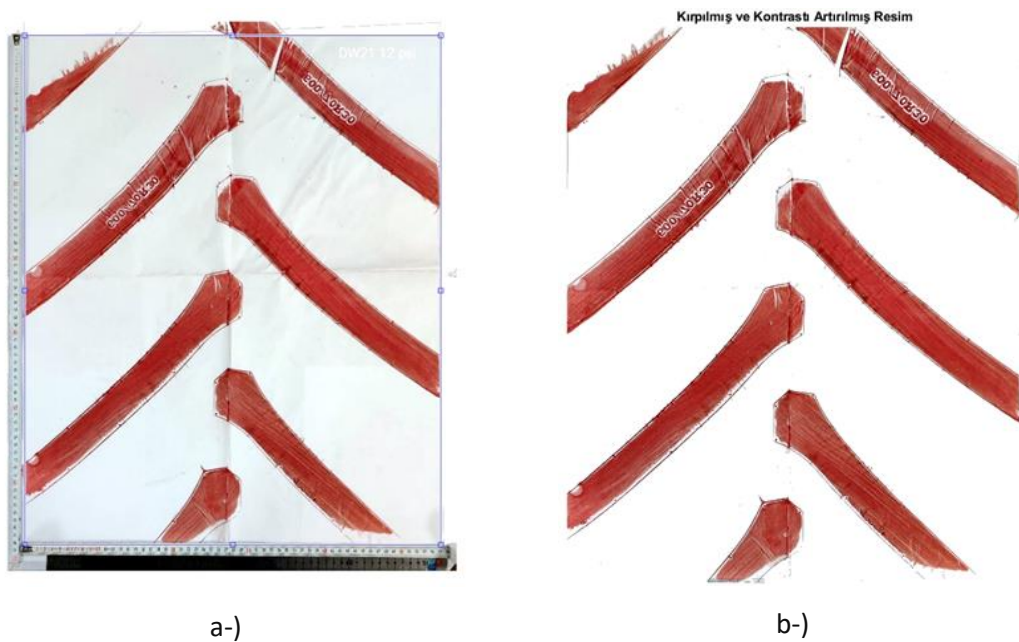
Tablo 4.3. IF 600/70 R30 lastiği taban izi ölçüm değerleri

Basınç(psi)	Boy(mm)	En(mm)	Jant	Yük(kg)	Alan(m ²)
35	463	551	W18	5150	0.255
29	519	549	W18	5150	0.284
23	553	550	W18	5150	0.304
17	688	553	W18	5150	0.380

Basınç(psi)	Boy(mm)	En(mm)	Jant	Yük(kg)	Alan(m ²)
12	778	548	W18	5150	0.426
35	485	538	DW20	5150	0.260
29	530	543	DW20	5150	0.287
23	548	544	DW20	5150	0.298
17	605	541	DW20	5150	0.327
12	763	545	DW20	5150	0.415
35	430	544	DW21	5150	0.233
29	478	547	DW21	5150	0.261
23	549	544	DW21	5150	0.298
17	600	551	DW21	5150	0.330
12	726	549	DW21	5150	0.398

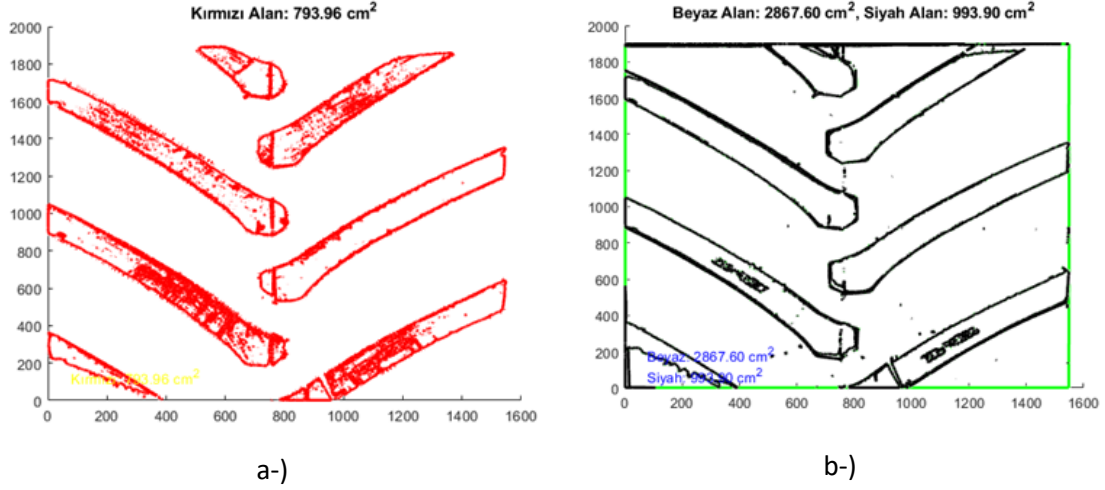
4.2. Lastik Taban İzlerinin Ölçüm Sonuçları (Görüntü İşleme Algoritması)

Test lastikleri, IF ve normal yapıda olan her iki lastiğin taban izleri görüntü işleme algoritması yardımıyla iki farklı yöntem kullanarak tespit edilmiştir. Ölçüm yöntemleri özgün olarak kodlanmıştır ve bu sayede hassas ölçüm yapabilmektedir. Programda her iki yöntemle elde edilen ölçümlere ait fotoğraflar sunulmakta ve ölçümlerin ortalama değerlerini tespit ederek kullanıcıya detaylı bir analiz imkanı vermektedir. Program ilk olarak taban izi fotoğrafındaki gereksiz bölgelerin kırılması kullanıcıdan talep etmektedir. Kırpma işlemi (Şekil 4.3) görüntü üzerindeki gürültü oluşumunu minimize etmekte ve gereksiz hesaplamaların önüne geçmektedir. Bu durum, algoritmanın verimini artırmakla birlikte açık ve anlamlı veriler oluşturmaktadır.



Şekil 4.3. a) Kırpma bölgesi seçimi, b) Kırpılmış resim

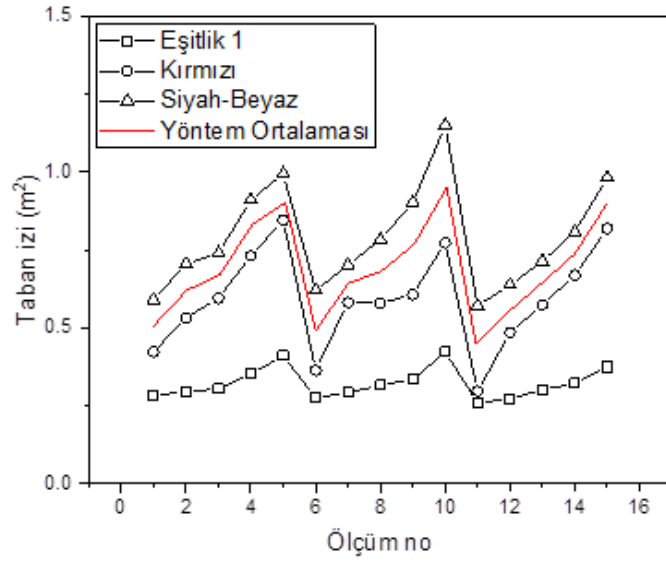
Algoritmada görüntü kırpma işlemi sonrasında kırmızı alan tespiti ve ölçümü (Şekil 4.4), kontrast artırma ve gri tonlama seçeneği ile siyah-beyaz alan ölçümleri yapılır. Kırmızı ile siyah-beyaz alanların ölçüm sonuçları farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılık, algoritmada uygulanan renk filtreleme ve maskeleme metodlarının değişkenlik göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4. a) Kırmızı alan ölçümü, b) Siyah-beyaz alan ölçümü

Kırmızı alanların tespiti için özel bir renk eşiği kullanılmaktadır. Bu renk eşiği değerlerinin ayarlanma şekli, kırmızı alanın büyüklüğüne etki etmektedir. Eşik değerlerinin dar bir aralıkta belirlenmesi bazı piksellerin göz ardı edilmesine sebep olurken, geniş bir aralıkta tercih edilmesi ise kırmızı olmayan piksellerin de kırmızı gibi algılanmasına sebep olabilmektedir. Siyah-beyaz alanların ölçümünde ise görüntü öncelikle gri tonlara çevrilerek beyaz alanları saptamaktadır. Eşik değerleri ve renk tonları ölçülen alan boyutları üzerinde belirleyici etkenlerdir. Gri tonlara çevirme işlemi sonrasında yapılan beyaz eşik değeri, görüntüdeki piksellerin belirli bir renk aralığına göre sınıflandırılmasını sağlamaktadır. Bu süreç, spesifik renk aralıklarını tespiti ve ilgili piksellerin ayrışması için hayati bir öneme sahiptir. Eşik değerlerinin doğru ayarlanması, yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek için kritik bir öneme sahiptir (Pootheri ve ark., 2023).

Eşik değerlerinin çok geniş veya dar belirlenmesi ölçüm hatalarını artırmakta ve ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu nedenle geliştirilen algoritma iki farklı ölçüm yönteminin sonuçlarını kullanıcıya sunarken hataları azaltmak amacıyla iki yöntemden elde edilen sonuçların ortalamasını almaktadır.



Şekil 4.5. Farklı yöntemlerle hesaplanan taban izi ölçüm sonuçları

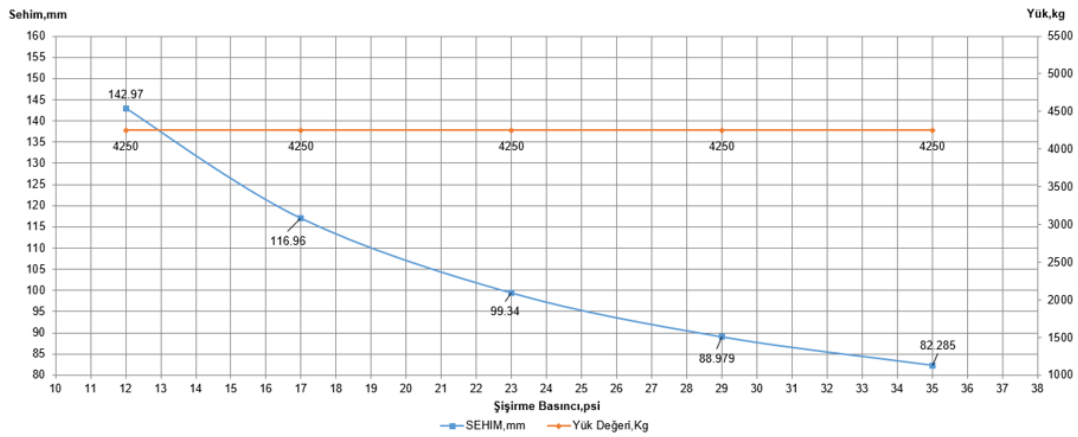
Eşitlik 3.1 ile elde edilen ölçüm değerlerinin hatalı olduğu (Şekil 4.5) görülmektedir. Eşitlik 3.1 incelendiğinde taban izi alanının gerçek sınırlarını tam olarak yansıtmadığı dolayısıyla elde edilen ölçüm değerlerinin gerçek taban izi alanına göre sapmalar gösterecektir.

Görüntü işleme algoritması kullanılarak yapılan ölçümlerde ise taban izinin tam sınırları dijital görüntü üzerinden hassas bir şekilde tespit edilmektedir. Bu yöntem sayesinde taban izinin gerçek sınırları doğru olarak belirlenmekte ve doğru alan hesaplamaları yapılmasına olanak sağlamaktadır. Algoritma, kırmızı ile boyalı bölgelerin sınırlarını piksel olarak analiz ederek taban izinin gerçek alanını geometrik varsayımlardan bağımsız olarak doğru bir şekilde hesaplayabilmektedir. Görüntü işleme tekniklerinin, düzensiz iki boyutlu hassas şekillerin dijital ortamda alanlarının ölçülmesinde uygun bir yöntem olduğu bilinmektedir (Hassabo, 2012). Benzer şekilde yüzey alanı ölçmek için kullanılan yöntemin, Clark formülü, Leng formülü, düzleştirme taraması ve yarı silindir yan alan yöntemleri gibi yöntemlerden daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür (Li ve ark., 2023).

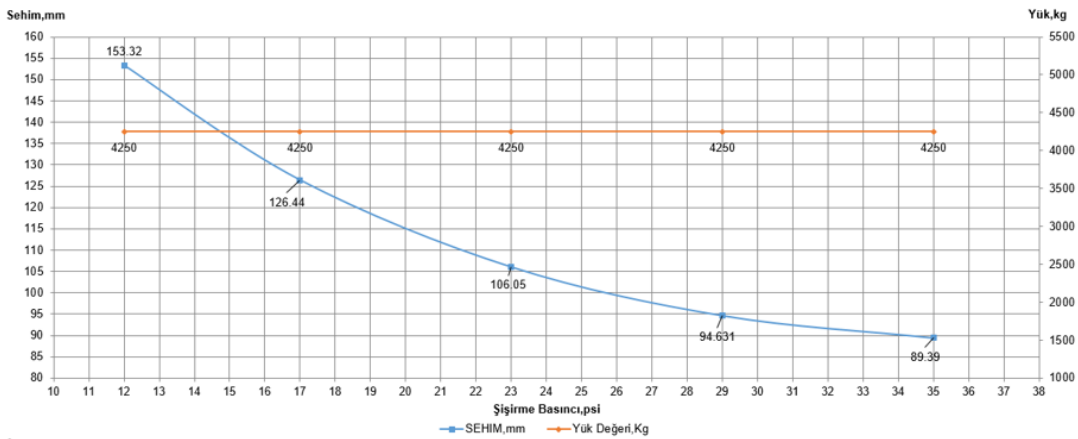
4.3. Lastik Sehimi (Deflection) Ölçüm Sonuçları

Test lastiklerinin 600/70 R30 (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7), IF 600/70 R30 (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9) iki farklı jant yapısında (W18, DW21) basınç ve yük değişimleri ile sehimi (deflection) değerleri ölçülmüştür. Normal yapıya sahip 600/70 R30 lastiğinin W18 ve DW21 jantları ile sırasıyla 35 psi, 29 psi, 23 psi, 17 psi, 12 psi şişirme basıncı

değerlerinde, yük değeri 4250 kg kademeli olarak 10 kg'a kadar indirilerek sehım değerleri elde edilmiştir. Misiewicz ve arkadaşları, lastik şişirme basıncındaki artışla lastik-zemin temas basıncında artış olacağını, lastiğe uygulanan yük miktarındaki artışla birlikte sehım değerinin artacağını vurgulamışlardır (Misiewicz ve ark., 2016). IF lastik yapısında olan IF 600/70 R30 lastiğinde W18 ve DW21 jantları ile sırasıyla 35 psi, 29 psi, 17 psi, 12 psi şişirme basıncı değerlerinde, 5150 kg olan yük değeri kademeli olarak 10 kg'a indirilerek sehım değerleri ölçülmüştür. Normal yapıya sahip lastikte en yüksek sehım değeri W18 jant, 12 psi şişirme basıncı, 4250 kg yük altında 153.32 mm olarak ölçülmüştür.



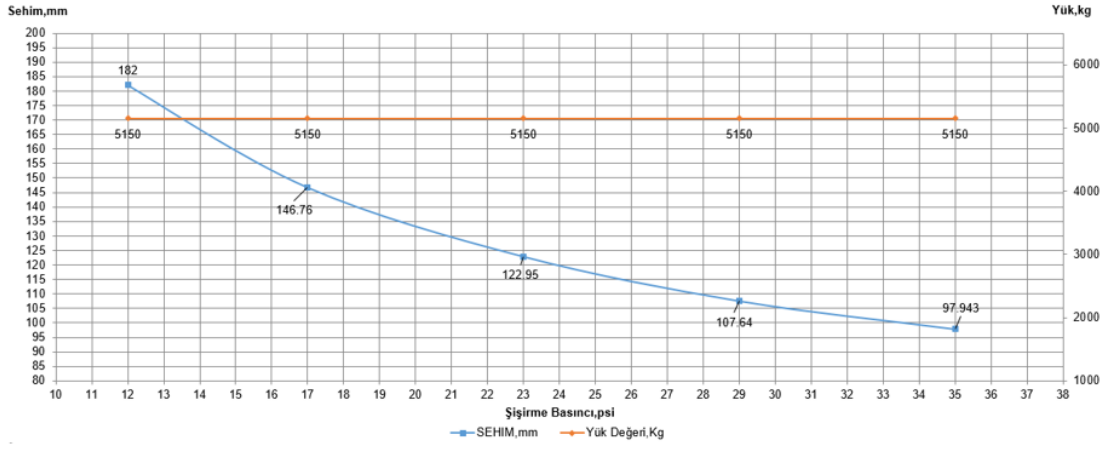
Şekil 4.6. 600/70 R30 Lastiği Yük-Basınç-Sehım Grafiği (DW21 Jant)



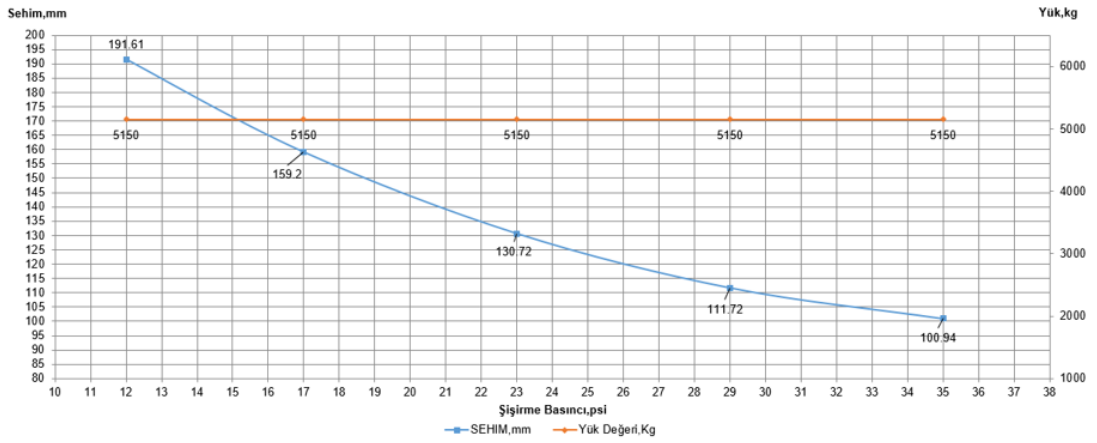
Şekil 4.7. 600/70 R30 Lastiği Yük-Basınç-Sehım Grafiği (W18 Jant)

IF lastik yapısında ise en yüksek sehım değeri W18 jant, 12 psi şişirme basıncı, 5150 kg yük altında 191.61 mm olarak ölçülmüştür. Normal yapıya sahip 600/70 R30 lastiğinde minimum sehım değeri DW21 jant, 23 psi şişirme basıncı, 10 kg yük altında 0.322 mm olarak ölçülürken IF yapıya sahip IF 600/70 R30 lastiğinde minimum sehım

değeri W18 jant, 29 psi şişirme basıncı, 10 kg yük altında 0.456 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. IF 600/70 R30 Lastiği Yük-Basınç-Sehim Grafiği (DW21 Jant)



Şekil 4.9. IF 600/70 R30 Lastiği Yük-Basınç-Sehim Grafiği (W18 Jant)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Zirai alanda kullanılan lastiklerde IF ve VF yapısına sahip olan lastiklerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Normal yapıya sahip olan lastiklere göre IF/VF lastikler daha geniş taban izi, daha uzun ömür, dayanıklılık, yüksek çekiş gücü, yakıt tasarrufu gibi farklı özellikleri nedeniyle zirai uygulamalarda tercih edilmektedirler.

Bu tez çalışmasında, normal yapıya sahip olan lastik ile IF yapısında olan lastikler kullanılarak sabit yük değeri altında farklı jant profilleri, farklı şişirme basıncı değerlerinde taban izlerinde olan değişim incelenmiştir. Çalışmada, lastik şişirme basınç değerleri kademeli olarak düşürülerek taban izi alanı değerleri m² cinsinden ölçülmüştür. Bunun yanında geleneksel yöntemlerle yapılan ölçümlere alternatif olarak geliştirilen taban izi alanı görüntü işleme algoritmasının etkinliği incelenmiştir. Ayrıca her iki lastiğin iki farklı jant tipinde farklı yük ve basınç değerlerinde sehim (deflection) değerleri tespit edilmiştir.

Testler sonucunda, lastik şişirme basıncının azalması ile lastik taban izinin arttığı ve dolayısıyla zeminde oluşan gerilim üzerinde etkili olduğu değerlendirilmiştir. Normal yapıya sahip ve IF yapısında olan her iki lastikte maksimum taban izi alanları en düşük şişirme basıncı olan 12 psi'da ölçülmüştür. Her iki lastikte minimum taban izi alanı ise DW21 jant ile 35 psi şişirme basıncı değerlerinde tespit edilmiştir. Normal yapıda olan lastikte minimum ve maksimum taban izi alanları arasında %62.3 oranında fark ölçülmüştür. IF lastik yapısında ise minimum ve maksimum taban izi alanları arasında % 82.8 oranında farklılık tespit edilmiştir. Çalışmada, taban izi alanı hesaplanırken kırmızı renk ile işaretlenmiş taban izi alanı sınırlarının elle çizilerek, basit geometrik şekillere dayalı olarak hesaplanan ölçümlerin lastiğin gerçek yüzey sınır değerlerini tam olarak yansıtmadığı görülmüştür. Matematiksel denklemlerle yapılan hesaplamalarda düzensiz şekiller ve değişken kenar uzunlukları dikkate alındığında hatalı sonuçlar içermektedir. Geleneksel ölçüm yönteminde taban izlerinin sadece en geniş ve en dar yerlerinden elde edilen ölçümler, dikdörtgen veya yamuk geometrik şekilleri ile modellenir, bu durum ölçümlerde kısıtlılık meydana getirmektedir. Görüntü işleme algoritması ile yapılan ölçümlerde ise taban izinin tam sınırlarını piksel olarak takip ederek, renk alanlarının piksel sayısını ölçerek hassas ve doğru sonuçlar vermektedir. Algoritma, ölçeklendirme faktörü ile piksel sayısını gerçek ölçülere dönüştürerek çalışmaktadır. Ölçüm esnasında kullanıcı girdisi veya ölçüme yönelik subjektif parametrelerin etkisine maruz kalmamaktadır. Görüntü işleme algoritması, taban izi ölçümlerinde doğru ve

tekrarlanabilir ölçümlerken sağlarken, lastik ürün geliştirme, lastik test süreçlerinde subjektif hataları minimum düzeyde tutmaktadır. Yapılan çalışmanın lastik endüstrisinde kalite süreçlerine olumlu katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Özellikle lastik kullanımı sırasında tercih edilen lastik şişirme basıncının taban izi alanında belirleyici bir faktör olduğu, lastikte kullanılan jant türünün de taban izi alanında etkili bir parametre olduğu değerlendirilmiştir. Sehim testlerinde ise lastiğe uygulanan yük değeri arttıkça lastik sehim değerinin arttığı görülmüştür. Her iki lastikte W18 jant, minimum şişirme basıncı değeri olan 12 psi'da ve maksimum yük değerlerinde (4250 kg-5150 kg) en yüksek sehim değerleri elde edilmiştir. Lastiklerin yüksek sehim değerlerinde özürsüz çalışabilmeleri için lastik yanak bölgelerinde esneyebilme (flexion) kabiliyetine sahip olan materyaller tercih edilmelidir.

Çalışmanın sonuçlarında, zirai alan araçlarında IF/VF lastiklerin normal lastik yapısına göre daha geniş taban izi alanına sahip oldukları, taban izi alanında lastik kullanım basıncının önemli bir etken olduğu, lastik seçimiyle birlikte kullanılacak olan jant tipinin de kullanım avantajları sağlayabileceği görülmüştür. Lastik seçimi ve kullanım şartlarının doğru olarak belirlenmesi zaman ve yakıt tasarrufu sağlayacaktır. Bunun yanında, taban izi ölçümlerinde geleneksel ölçüm yöntemlerine alternatif olarak sunulan görüntü işleme algoritması ile daha doğru ve hassas sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Benzer çalışmanın farklı lastik ölçüleri ve jant tiplerinde yapılması, lastiklerde tekstil kuşak yerine çelik kuşak yapısı kullanılarak taban izi alanına etkisini inceleyen çalışmalar yapılması gerekliliği değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Arvidsson, J., & Keller, T. (2007). Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil and Tillage Research*, 96(1-2), 284-291.
- Arvidsson, J., Westlin, H., Keller, T., & Gilbertsson, M. (2011). Rubber track systems for conventional tractors—Effects on soil compaction and traction. *Soil and Tillage Research*, 117, 103-109.
- Arvidsson, J., Westlin, H., Keller, T., & Gilbertsson, M. (2011). Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction. *Soil and Tillage Research*, 117, 103-109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2011.09.004>
- Aytaç, A. (2007). Naylon 6.6/poliester melez kordların tasarımı ve özelliklerinin incelenmesi.
- Bailey, A. C., & Johnson, C. E. (1989). A soil compaction model for cylindrical stress states. *Transactions of the ASAE*, 32(3), 822-0825.
- Barron, E. (1987). Hybrid tire cords containing Kevlar aramid. *Kautschuk und Gummi, Kunststoffe*, 40(2), 130-135.
- Battiato, A., & Diserens, E. (2017). Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: A basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice. *Soil and Tillage Research*, 166, 18-32.
- Berisso, F. E., Schjønning, P., Lamandé, M., Weiskopf, P., Stettler, M., & Keller, T. (2013). Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. *Soil and Tillage Research*, 131, 36-46.
- Berli, M., Eggers, C., Accorsi, M., & Or, D. (2006). Theoretical analysis of fluid inclusions for in situ soil stress and deformation measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1441-1452.
- Bhamare, M. H., & Khachane, A. (2019). Quality Inspection of Tire using Deep Learning based Computer Vision. *Learning*, 6(11).
- Boussinesq, J. (1885a). *Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Gauthier-Villars.
- Boussinesq, J. (1885b). *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques: principalement au calcul des déformations et des pressions que produisent, dans ces solides, des efforts quelconques exercés sur une petite partie de leur surface ou de leur intérieur; mémoire suivi de notes étendues sur divers points de physique mathématique et d'analyse*. Gauthier-Villars.
- Bristow, G. (1986). Reversion resistance of accelerated sulphur systems. *NR technology*, 17, 7-17.
- Calzonetti, J. A., & Laursen, C. J. (2010). Patents of Charles Goodyear: His international contributions to the rubber industry. *Rubber chemistry and technology*, 83(3), 303-321.
- Castillo Aguilar, J. J., Cabrera Carrillo, J. A., Guerra Fernández, A. J., & Postigo Pozo, S. (2017). Optimization of an optical test bench for tire properties measurement and tread defects characterization. *Sensors*, 17(4), 707.
- Cerruti, V. (1893). Sulla deformazione di un corpo elastico isotropo per alcune speciali condizioni ai limiti. *Il Nuovo Cimento (1877-1894)*, 34(1), 115-124.
- china.com. (2024). <https://tr.made-in-china.com>
- Coran, A. Y. (1994). Vulcanization. In *Science and technology of rubber* (pp. 339-385). Elsevier.
- Damanauskas, V., Janulevicius, A., & Pupinis, G. (2015). Influence of extra weight and tire pressure on fuel consumption at normal tractor slippage. *Journal of Agricultural Science*, 7(2), 55-67.
- Eggers, C., Berli, M., Accorsi, M., & Or, D. (2006). Deformation and permeability of aggregated soft earth materials. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B10).
- Elmas, C., Guvenc, U., & Doğan, M. U. (2015). Tire-road friction coefficient estimation and experimental setup design of electric vehicle. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 3, 202-207.

- Erkek, S., & Erbatur, O. (2008). Karbon Siyahı/Yağ Ve Karbon Siyahı/Dolgu Maddesi Oranının Farklı Vulkanizasyon Sistemlerinde Epdm Kauçuğunun Fiziko-Mekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi.
- Ertekin, İ. (2009). Farklı lastik profillerinin taşıt performansına etkileri.
- Fröhlich, O. K. (1934). Druckverteilung im Baugrunde: mit besonderer Berücksichtigung der plastischen Erscheinungen.
- Gent, A. N., & Walter, J. D. (2006). Pneumatic tire.
- Grechenko, A. (1995). Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue values. *Journal of Terramechanics*, 32(6), 325-333.
- Grečenko, A. (1995). Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue values. *Journal of Terramechanics*, 32(6), 325-333. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-4898\(96\)00003-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-4898(96)00003-1)
- Hallonborg, U. (1996). Super ellipse as tyre-ground contact area. *Journal of Terramechanics*, 33(3), 125-132.
- Harris, B. J. (2017). *Increased Deflection Agricultural Radial Tires Following the Tire and Rim Association IF, VF, and IF/CFO Load and Inflation Standards*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Hassabo, A. I. (2012). Semi-automatic area measurement of irregular two dimensional shapes in digital images. *Applied Mechanics and Materials*, 170, 2953-2961.
- Hofmann, W. (1989). Rubber technology handbook. (No Title).
- Huber, S., Preindl, P., & Betz, J. (2022). TireEye: Optical On-board Tire Wear Detection. Annual Conference of the PHM Society,
- Janulevičius, A., & Damauskas, V. (2022). Prediction of tractor drive tire slippage under different inflation pressures. *Journal of Terramechanics*, 101, 23-31.
- Jassal, M., & Ghosh, S. (2002). Aramid fibres-An overview.
- Jjagwe, P., Tekeste, M. Z., Alkhalifa, N., & Way, T. R. (2023). Modeling tire-soil compression resistance on artificial soil using the scaling law of pressure-soil sinkage relationship. *Journal of Terramechanics*, 108, 7-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.02.002>
- Jun, H.-g., Way, T. R., Löfgren, B., Landström, M., Bailey, A. C., Burt, E. C., & McDonald, T. P. (2004). Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire. *Journal of Terramechanics*, 41(4), 209-222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.03.002>
- Keller, T. (2005). A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, 92(1), 85-96.
- Keller, T., Berli, M., Ruiz, S., Lamandé, M., Arvidsson, J., Schjønning, P., & Selvadurai, A. P. (2014). Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research*, 140, 106-117.
- Keller, T., Défossez, P., Weisskopf, P., Arvidsson, J., & Richard, G. (2007). SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research*, 93(2), 391-411.
- Keller, T., & Lamandé, M. (2010). Challenges in the development of analytical soil compaction models. *Soil and Tillage Research*, 111(1), 54-64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.004>
- Komandi, G. (1976). The determination of the deflection, contact area, dimensions, and load carrying capacity for driven pneumatic tires operating on concrete pavement. *Journal of Terramechanics*, 13(1), 15-20.
- Korunović, N., Fragassa, C., Marinković, D., Vitković, N., & Trajanović, M. (2019). Performance evaluation of cord material models applied to structural analysis of tires. *Composite Structures*, 224, 111006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111006>
- Kovac, F. (1978). Tire Technology. Goodyear Tire and Rubber Co.

- Kovac, F., & Rodgers, M. (1994). Tire engineering. In *Science and Technology of Rubber* (pp. 675-718). Elsevier.
- Kumar, S., Pandey, K., Kumar, R., & Kumar, A. A. (2018). Effect of ballasting on performance characteristics of bias and radial ply tyres with zero sinkage. *Measurement*, *121*, 218-224.
- Larson, W., Gupta, S., & Useche, R. (1980). Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Science Society of America Journal*, *44*(3), 450-457.
- Lee, H., & Taheri, S. (2017). Intelligent tires? A review of tire characterization literature. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, *9*(2), 114-135.
- Li, F., Li, X., Huang, H., Xiang, H., Guan, C., & Guan, M. (2023). An Image Processing Method for Measuring the Surface Area of Rapeseed Pods. *Applied Sciences*, *13*(8), 5129.
- Liu, J., Wang, M., & Yin, H. (2024). A Study of the Friction Characteristics of Rubber Thermo-Mechanical Coupling. *Polymers*, *16*(5), 596.
- Liu, Y.-y., Tian, Z.-h., Wan, Z.-m., & Du, X.-w. (2003). Fatigue failure of rubber composite under cyclic loading. *CHINA RUBBER INDUSTRY*, *50*(12), 713-716.
- McKyes, E. (1985). *Soil cutting and tillage*. Elsevier.
- Mehmet, S. (2005). Polimer Teknolojisi. *Gazi Kitapevi, Ankara*.
- Michelin. (2024). *Lastik Teknolojisi*. <https://pro.michelin.com.tr/lastik>
- Misiewicz, P. A., Richards, T. E., Blackburn, K., & Godwin, R. J. (2016). Comparison of methods for estimating the carcass stiffness of agricultural tyres on hard surfaces. *Biosystems Engineering*, *147*, 183-192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.001>
- Nair, K. P. (2021). Rubber (Hevea brasiliensis). *Tree Crops: Harvesting Cash from the World's Important Cash Crops*, 287-332.
- Naskar, A. K., Mukherjee, A., & Mukhopadhyay, R. (2004). Studies on tyre cords: Degradation of polyester due to fatigue. *Polymer Degradation and Stability*, *83*(1), 173-180.
- Norhausen, C. (2002). Rayon: The advanced material for rubber reinforcement. 2002 Technical Meeting of the American Chemical Society, Rubber Division,
- O'Sullivan, M., & Robertson, E. (1996). Critical state parameters from intact samples of two agricultural topsoils. *Soil and Tillage Research*, *39*(3-4), 161-173.
- Oh, J., Nam, J.-S., Kim, S., & Park, Y.-J. (2019). Influence of tire inflation pressure on the estimation of rating cone index using wheel sinkage. *Journal of Terramechanics*, *84*, 13-20.
- Öztürk, E. (2008). *Farklı kauçuk karışımlarının vulkanizasyonuna hızlandırıcıların etkisi* Sakarya Üniversitesi (Turkey)].
- Pay, E. (2009). Taşıt Lastiklerinin Tasarım Ve Üretim Teknolojisi. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.
- Pohl, A., Steindl, R., & Reindl, L. (1999). The "intelligent tire" utilizing passive SAW sensors measurement of tire friction. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, *48*(6), 1041-1046.
- Pomoni, M. (2022). Exploring smart tires as a tool to assist safe driving and monitor tire-road friction. *Vehicles*, *4*(3), 744-765.
- Poothari, S., Ellam, D., Grübl, T., & Liu, Y. (2023). A Two-Stage Automatic Color Thresholding Technique. *Sensors*, *23*(6), 3361.
- Pražan, R., Čedík, J., Gerndtova, I., Neřold, J., & Pexa, M. (2016). Comparison of three sets of drive tractor tyres with respect to traction properties.
- Prevorsek, D., Murthy, S., & Kwon, Y. (1987). Viscoelastic properties of nylon 6 and nylon 66 tire cords: morphological analysis. *Rubber chemistry and technology*, *60*(4), 659-673.
- Pyo, C.-S., & Lyoo, J. (2013). Automation of Tire Tread Extruder Line Using Cameras. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, *19*(3), 262-267.
- Rackaitis, M., & Graves, D. (2017). Rubber. *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*, 1463-1491.
- Ren, X., An, J., Yan, S., Gao, L., Xu, S., Wang, X., & Wei, G. (2016). Assembly of Mn3O4/carbon Black Composite and Its Supercapacitor Application. *International Journal of Electrochemical Science*, *11*(6), 5080-5089. <https://doi.org/https://doi.org/10.20964/2016.06.75>

- Renius, K. (1999). CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Volume III Plant Production Engineering, Chapter 1 Machines for Crop Production, Parts 1.1. 27-1.1. 33 Tractors: Two Axle Tractors.
- Rivero, D., Botta, G. F., Antille, D. L., Ezquerra-Canalejo, A., Bienvenido, F., & Ucgul, M. (2022). Tyre Configuration and Axle Load of Front-Wheel Assist and Four-Wheel Drive Tractors Effects on Soil Compaction and Rolling Resistance under No-Tillage. *Agriculture*, 12(11), 1961.
- Rodgers, B., & Waddell, W. (2005). Tire engineering. In *Science and technology of rubber* (pp. 619-II). Elsevier.
- Rodgers, M., & Abdullahi, A. A. (2016). *Rubber tires*. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier.
- Rodríguez, L. A., Valencia, J. J., & Urbano, J. A. (2012). Soil compaction and tires for harvesting and transporting sugarcane. *Journal of Terramechanics*, 49(3-4), 183-189.
- Sellers, J. W., & Toonder, F. E. (1965). Reinforcing fine particle silicas and silicates. In *Reinforcement of Elastomers* (pp. 405-423). Interscience.
- Semegen, S. T., & Cheong, S. (1973). Natural rubber. *MORTON, M. Rubber technology*, 2, 152-177.
- Shaheb, M. R., Venkatesh, R., & Shearer, S. A. (2021). A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*, 1-23.
- Sohne, W. (1958). Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering*, 39, 290.
- Söhne, W. (1953). Druckverteilung im boden und bodenverformung unter schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik-Konstrukteurhefte*(5).
- Sun, Z., Premarathna, W., Anupam, K., Kasbergen, C., & Erkens, S. M. (2024). A state-of-the-art review on rolling resistance of asphalt pavements and its environmental impact. *Construction and Building Materials*, 411, 133589.
- Şahin, B. (2022). Epdm kauçuk esash hidrofilik kompozitler= Epdm rubber based hydrophilic composites.
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2013). Potential of functional image processing technique for the measurements of contact area and contact pressure of a radial ply tire in a soil bin testing facility. *Measurement*, 46(10), 4038-4044.
- ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaeet, P., Keller, T., Munkholm, L. J., & Lamandé, M. (2019). The contribution of tyre evolution to the reduction of soil compaction risks. *Soil and Tillage Research*, 194, 104283.
- ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaeet, P., Keller, T., Munkholm, L. J., & Lamandé, M. (2020). Construction of modern wide, low-inflation pressure tyres per se does not affect soil stress. *Soil and Tillage Research*, 204, 104708. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104708>
- VAHAPOĞLU, V. (2007). Kauçuk türü malzemeler I. doğal kauçuk. *Celal Bayar University Journal of Science*, 3(1), 57-70.
- Wang, X.-B., Li, A.-J., Ci, Q.-P., Shi, M., Jing, T.-L., & Zhao, W.-Z. (2019). The study on tire tread depth measurement method based on machine vision. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(4), 1687814019837828.
- Way, T. R., & Kishimoto, T. (2004). Interface pressures of a tractor drive tyre on structured and loose soils. *Biosystems Engineering*, 87(3), 375-386.
- Wigan, M. (1992). Image-processing techniques applied to road problems. *Journal of transportation engineering*, 118(1), 62-83.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı:	Onur KARAÇAY
Uyruğu:	T.C
Orcid Numarası:	0000-0002-3650-816X

EĞİTİM BİLGİLERİ	
Lisans	
Üniversite:	Sakarya Üniversitesi
Fakülte:	Mühendislik Fakültesi
Bölümü:	Makine Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2015
Yüksek Lisans	
Üniversite:	Kırşehir Ahi Evran
Enstitü:	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı:	Makine Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2024

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler
<p>Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler</p> <p>Karaçay, O., & Kılıç, S. (2023). Araç lastiklerinde kord-kauçuk kompozit malzemelerin konstrüksiyon yapısı ve lastik davranışına etkisi. <i>International Journal of Engineering Research and Development</i>, 15(1), 256-268.</p> <p>Karaçay, O., & Kılıç, S. (2024). Traktör uygulamalarında kullanılan standart yapı ve IF lastik yapısına sahip lastiklerin taban izlerinin ve sehim değerlerinin kıyaslanması. <i>Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi</i>, 14(2), 111-118.</p> <p>Kılıç, S., & Karaçay, O. (2024). Traktör lastiklerinin taban izlerinin görüntü işleme teknikleriyle otomatik ölçümü: Geleneksel yöntemlere yenilikçi bir alternatif. <i>Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi</i>, 24(06), 1491-1498.</p> <p>Karaçay, O., & Kılıç, S. (2024). The effect of agricultural tire technologies on soil compaction, traction performance, and agricultural productivity <i>Scientific Journal of Mehmet Akif Ersoy University (Yayım sürecinde)</i></p>
<p>Uluslararası Konferans ve Sempozyumlarda Sunulan Bildiriler</p> <p>-</p>
<p>Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan makaleler</p> <p>-</p>
<p>Ulusal Konferans ve Sempozyumlarda Sunulan Bildiriler</p> <p>-</p>