

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KULAKLI PULLUKLARIN KULAK–TOPRAK İLİŞKİSİNİN NUMERİK VE
ANALİTİK YÖNTEMLER İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim SAVRUKOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

HAZİRAN 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KULAKLI PULLUKLARIN KULAK–TOPRAK İLİŞKİSİNİN NUMERİK VE
ANALİTİK YÖNTEMLER İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İbrahim SAVRUKOĞLU
(503131506)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Emin SÜNBÜLOĞLU

HAZİRAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503131506 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi İbrahim SAVRUKOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KULAKLI PULLUKLARIN KULAK–TOPRAK İLİŞKİSİNİN NUMERİK VE ANALİTİK YÖNTEMLER İLE MODELLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Emin SÜNBÜLOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cüneyt FETVACI
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 02 Mayıs 2016
Savunma Tarihi : 10 Haziran 2016





Eşime,



ÖNSÖZ

Tez çalışmamın gerçekleşmesi sırasında bilgi birikimi ve desteğiyle her zaman yardımcı olan danışman hocam Sn. Doç. Dr. Emin SÜNBÜLOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışmanın yapılmasında destek olan değerli iş arkadaşlarım Ahmet ŞENGÜL, Umutcan GÜLER ve Bahadır ÖZDEN'e teşekkürlerimi sunarım. Son olarak da aileme ve eşime bana verdikleri desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Mayıs 2016

İbrahim SAVRUKOĞLU
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Toprak İşleme	3
2. TOPRAK YAPISI	5
2.1 Toprağın Fiziksel Parametreleri	6
2.2 Toprağın Dinamik Özellikleri	10
2.3 Toprak Kohezyonu	11
2.4 İç Sürtünme Açısı	11
2.5 Toprak Kesme Gerilmesi	11
2.6 Kritik Hal Toprak Mekaniği	12
2.6.1 Elasto-Plastik toprak modelleri	12
2.6.2 Modifiye Cam Clay (MCC)	14
2.6.3 Yükleme ve geri yükleme durumlarında normal konsolidasyon eğrisi	14
2.6.4 Akma durumu	16
3. TOPRAK-TAKIM ETKİLEŞİMİNDE KULLANILAN ANALİTİK VE NUMERİK YÖNTEMLER	17
3.1 Analitik Yöntemler	17
3.1.1 Limit denge metodu	17
3.1.2 Evrensel toprak işleme eşitliği	18
3.1.3 Üç boyutlu statik modeller	19
3.1.3.1 Payne modeli	19
3.1.3.2 O'callaghan-Farrelly modeli	20
3.1.3.3 Hettiaratchi-Reece modeli	21
3.1.3.4 Godwin-Spor modeli	22
3.1.3.5 Mckyes-Ali modeli	24
3.1.3.6 Grisso ve diğerleri modeli	25
3.1.4 Dinamik modeller	25
3.1.5 Analitik modellerin eksiklikleri	28
3.2 Numerik Yöntemler	28
3.2.1 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi (CFD)	30
3.2.2 Ayırık elemanlar yöntemi (DEM)	32
3.2.3 Sonlu elemanlar metodu (FEM)	34

4. TOPRAK-TAKIM ETKİLEŞİMİNİN ANALİTİK YÖNTEMLER İLE HESAPLANMASI.....	37
4.1 Çeki Kuvvetine Etki Eden Toprak Mekanik Özellikleri	37
4.2 İlerleme Hızının ve İş Derinliğinin Çeki Kuvvetine Etkisi	40
4.3 Kulaklı Pulluk Geometrik Özellikleri ve Kulağa Etki Eden Kuvvetler	41
4.4 Sonuçlar	46
4.4.1 Analitik hesaplama ile pulluk kulağına etki eden çeki kuvvetinin tahmin edilmesi.....	46
4.4.2 ASAE D497.4 (1999) standardına göre kulaklı pulluk çeki kuvveti hesabı	50
5. MALZEME MODELİ VE TOPRAK-TAKIM İLİŞKİSİNİN NUMERİK YÖNTEMLE MODELLENMESİ.....	51
5.1 Modifiye Cam-Clay Modeli	51
5.1.1 Elastisite	51
5.1.2 Akma yüzeyi fonksiyonu.....	52
5.1.3 Plastik akma kuralı	52
5.1.4 Sertleşme-yumuşama çevrimi kuralı	53
5.2 Sonlu Elemanlar Modeli.....	53
5.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulaması	59
5.3.1 Ön işleme.....	60
5.3.2 Simulasyon (Abaqus Standart veya Abaqus Explicit)	61
5.3.3 İşlem sonrası.....	62
5.3.4 Abaqus modelleme özellikleri.....	62
5.3.4.1 Analiz tipi.....	62
5.3.4.2 Yüzey tanımlanması	62
5.3.4.3 Temas (Contact) modellemesi.....	63
5.3.4.4 Mekanik yüzey etkileşim modelleri	63
5.4 Toprak-Takım Etkileşimin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi	66
5.4.1 Malzeme modeli	66
5.4.2 Model geometrisi.....	67
5.4.2.1 Pulluk kulağı geometrisi.....	68
5.4.2.2 Toprak geometrisi	79
5.5 Çözüm Ağı, Başlangıç ve Sınır Koşulları	79
5.5.1 Çözüm ağı.....	79
5.5.2 Sınır koşulları	80
5.5.3 Sonuçlar.....	83
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
6.1 Toprak-Kulaklı Pulluk İlişkisinde Pulluk Hızının Etkisinin Analitik ve Numerik Yöntemler ile Karşılaştırılması	88
6.2 Toprak-Kulaklı Pulluk İlişkisinde İş Derinliği Etkisinin Analitik ve Numerik Yöntemlerle ile Karşılaştırılması.....	89
KAYNAKLAR.....	91
EKLER	95
ÖZGEÇMİŞ.....	107

KISALTMALAR

ASAE	: American Society of Agricultural Engineers
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CAE	: Computer Aided Engineering
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CSL	: Critical State Line
DEM	: Discrete Element Method
FEM	: Finite Element Method
LDM	: Limit Denge Metodu
MCC	: Modified Cam-Clay



SEMBOLLER

V	: Hacim
W	: Ağırlık
V_s	: Toprak İçerisindeki Katı Parçacıkların Hacmi
W_s	: Toprak İçerisindeki Katı Parçacıkların Ağırlığı
V_w	: Toprak İçerisindeki Suyun Hacmi
W_w	: Toprak İçerisindeki Suyun Ağırlığı
V_a	: Toprak İçerisindeki Hava Hacmi
e	: Toprak Boşluk Oranı
n	: Toprak Porozitesi
S	: Toprak Doygunluğu
w	: Toprak Nem İçeriği
γ	: Toprak Yoğunluğu
γ_s	: Toprak İçerisindeki Katı Parçacıkların Yoğunluğu
γ_w	: Toprak İçerisindeki Suyun Yoğunluğu
γ_d	: Kuru Toprak Yoğunluğu
D_r	: Bağıl Yoğunluk
C	:Toprak Kohezyonu
τ	: Kesme Gerilmesi
p'	: Ortalama Efektif Gerilme
q	: Deviatorik Kesme Gerilmesi
v	: Özgül Hacim
a	: Adhezyon
δ	: Toprak-Metal Sürtünme Açısı
σ_n	: Normal Gerilme
P	: Toplam Takım Kuvveti
g	: Yerçekimi İvmesi
W	:Toplam Takım Genişliği
N_γ, N_c, N_q	:Topraktaki sürtünme dayanımına, toprak geometrisi ve takım–toprak dayanım özelliklerine bağlı faktörler
$\emptyset$	:Toprağın İç Sürtünme Açısı
H	:Takıma Etkiyen Çeki Kuvveti Bileşeni
E	:Elastiklik Modülü
μ	:Poisson Oranı
ψ	:Dilatasyon Açısı
ε	:Birim Şekil Değişim
ε_{el}	:Elastik Birim Şekil Değişimi
ε_{pl}	:Plastik Birim Şekil Değişimi
D	:Malzeme Matrisi
u	:Yerdeğiştirme
N	:Eleman Şekil Fonksiyonu
d_p	:Uç Demiri Burun Derinliği

w_p	:Uç Demiri Burun Genişliği
v	:İlerleme Hızı
α_p	:Uç Demiri Burun Noktasındaki Kama Açısı
α_s	:Uç Demiri Kaldırma Açısı
w_s	:Uç Demiri Genişliği
β	:Uç Demiri Keskin Kenar Açısı
θ	:Ortalama Kulak Açısı
m	:Bozulma Mesafesi Oranı
d_s	:Kesme Derinliği
l	:Etki Uzunluğu
B	:Eleman Birim Şekil Değişimi-Yerdeğiştirme Matrisi
φ	:Devirme Açısı
$f(\sigma)$	:Akma Foksiyonu
q_e	:Nodal Yerdeğiştirme
K_e	:Eleman Rijitlik Matrisi
δU	:Birim Şekil Değişimi Enerjisi
δW	:Dışsal Etkiyen Kuvvetlerin Yaptığı İş
k ve β_e	:Malzeme Sabitleri
I_1	:Gerilme Tensörünün İlk Enveriyantı
J_2	:Gerilme Deviatorik Tensörünün İkinci Enveriyantı
V_e	:Eleman Hacmi
F_e^p	:Hayali Plastik Kuvvet
F_e	:Elemana Uygulanan Dış KuvvetVektörü
δ_{qe}^T	:Keyfi Virtüel Artım
C_p	:Yakınsama Parametresi
N_{Ca}	:Toprak-metal adhezyon faktörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Toprak tipine göre toprak iç sürtünme açıları, toprak kohezyonu, toprak-metal sürtünme açıları ve toprak adezyon değerleri.	39
Çizelge 4.2 : ASAE Standartlarına göre (1983) farklı toprak tiplerinde kulaklı pulluk özgül çeki kuvveti değerleri.....	40
Çizelge 4.3 : ASAE D497.4 standardı çeki kuvveti hesaplama değerleri.	41
Çizelge 4.4 : Analitik hesaplamada kullanılan toprak, kulaklı pulluk parametreleri.	47
Çizelge 5.1 : Çalışmada kullanılan toprak parametreleri.....	59
Çizelge 5.2 : Sonlu elemanlar modeli kullanılan parametreler.....	67
Çizelge 5.3 : Farklı pulluk geometrilerine ait değerler (Vilde A.,2008).	71
Çizelge 5.4 : Model kulak tasarımları parametrik tasarım çıkış eğrileri.	75
Çizelge 5.5 : Kulaklı pulluk hız – zaman değerleri.	81
Çizelge 5.6 : Çözdürülen toprak–kulaklı pulluk model parametreleri.	82
Çizelge 5.7 : Farklı senaryolardaki çözümlerden elde edilen toprak sürme yönündeki çeki kuvvetleri.	83



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Toprak kompozisyonu (a) ve toprak bileşenleri (b) (Helwany, 2007).	6
Şekil 2.2 : Mohr-Coulomb teorisi grafik gösterimi.	12
Şekil 2.3 : Druker-Prager modeli.	13
Şekil 2.4 : İzotropik basma halinde toprağın davranışı.	15
Şekil 2.5 : Modifiye Cam- Clay modelinin akma durumu.	16
Şekil 3.1 : Payne modelinde toprağın bozunma alanları.	19
Şekil 3.2 : O’Callaghan- Farrelly modelindeki toprağın bozunma bölgeleri.	20
Şekil 3.3 : Hettiaratchi-Reece Modelindeki bozunma bölgeleri.	21
Şekil 3.4 : Godwin ve Spoor üç boyutlu toprak-takım modeli.	23
Şekil 3.5 : Mckyes ve Ali yönteminde üç boyutlu kesme modeli.	24
Şekil 3.6 : Grisso ve diğ. Modeli.	25
Şekil 3.7 : Swick – Perumpral Modeli.	27
Şekil 3.8 : Zeng-Yao Modeli.	27
Şekil 3.9 : İki parçacık arasındaki kuvvet dengesi.	32
Şekil 4.1 : Mohr Gerilme Dairesi.	38
Şekil 4.2 : Mohr dairesi ile kohezyon (a) ve iç sürtünme açısı (b).	38
Şekil 4.3 : Eğik kama şeklindeki uç demiri açıları.	41
Şekil 4.4 : Kulaklı pulluğa etki eden kuvvetler.	42
Şekil 4.5 : Bozulma mesafesi oranını gösteren bazı değerler.	44
Şekil 4.6 : Toprak bozulmasının statik denge analizi.	45
Şekil 4.7 : Toplam çeki kuvvetinin, iş derinliği ile değişimi.	48
Şekil 4.8 : Farklı hızlarda çeki kuvvetinin iş derinliğine göre değişimi.	48
Şekil 4.9 : Toplam çeki kuvvetinin, hız ile değişimi.	49
Şekil 4.10 : Farklı iş derinliklerinde çeki kuvvetinin hıza göre değişimi.	49
Şekil 4.11 : ASAE D497.4 standartına göre iş derinliğinin pulluğa etki eden toplam çeki kuvvetine etkisi (mor çizgi) ve alt, üst limitleri (yeşil).	50
Şekil 4.12 : ASAE D497.4 standartına göre operasyonel hızın pulluğa etki eden toplam çeki kuvvetine etkisi (mor çizgi) ve alt, üst limitleri (yeşil).	50
Şekil 5.1 : Elastik, plastik gerilme–birim şekil değişimi ilişkisi.	54
Şekil 5.2 : İlintisiz akış kurallı Drucker–Prager malzeme kuralı (Armin, 2014).	57
Şekil 5.3 : Toprak-takım ilişkisi modellenmesinin detayları (Armin, 2014).	58
Şekil 5.4 : Abaqus adımları.	61
Şekil 5.5 : Pulluk aktif parçaları.	68
Şekil 5.6 : Pulluk kulak geometrisi ve açıların gösterimi.	69
Şekil 5.7 : Kulaklı pulluk parçaları (Vilde A.,2008).	70
Şekil 5.8 : Kulak geometrisi açısal parametreleri (Vilde A.,2008).	72
Şekil 5.9 : Şekil çizgileri yardımı ile yüzey oluşturma adımı.	73
Şekil 5.10 : Silindrioid giriş eğrili kulak (Soltani and Taghinezhad, 2012).	74
Şekil 5.11 : İlk tasarım için bulunan çıkış eğrisi.	74
Şekil 5.12 : Giriş ve çıkış eğrileri sonucunda yapılan yüzey modellemesi.	75

Şekil 5.13 : Kulak ön görünüşü ve P0-P6 noktalarının gösterimi (Soltani ve Taghinezhad, 2012).....	76
Şekil 5.14 : Solidworks ‘Denklemler’ modülü kullanılarak pulluk kulağının ön görünüşünün çizilmesi.....	77
Şekil 5.15 : $a=200$, $b=300$ ve $\Delta s=6$ [mm] seçilmesi durumundaki kulak ön görünüşü.....	78
Şekil 5.16 : Parametrik pulluk kulağı tasarım programı.....	78
Şekil 5.17 : Toprak modeli.	79
Şekil 5.18 : Modelin çözüm ağı (mesh).....	80
Şekil 5.19 : Toprak gövdesi sınır koşulları.....	80
Şekil 5.20 : Kulaklı pulluk hız-zaman grafiği.....	81
Şekil 5.21 : Toprak-kulaklı pulluk sonlu elemanlar modeli.	82
Şekil 5.22 : Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan pulluk çeki kuvvetinin iş derinliği ile değişimi.....	83
Şekil 5.23 : Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan çeki kuvvetinin toprak sürme hızı ile değişimi.....	84
Şekil 5.24 : Farklı kesme açısına sahip kulak geometrilerinin toprağı çevirmesi.	84
Şekil 6.1 : Çeki kuvvetinin farklı hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılabildiği Matlab Gui programı.....	88
Şekil 6.2 : Farklı yöntemler ile hesaplanan çeki kuvvetinin hıza göre değişiminin karşılaştırılması.....	89
Şekil 6.3 : Farklı yöntemler ile hesaplanan toplam çeki kuvvetinin iş derinliğine göre değişiminin karşılaştırılması.	90
Şekil A.1 : Senaryo 1 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).	96
Şekil A.2 : Senaryo 2 ($V=1$ [m/sn], $ds=175$ [mm] , $\beta=40^\circ$).	96
Şekil A.3 : Senaryo 3 ($V=1$ [m/sn], $ds=200$ [mm] , $\beta=40^\circ$).	96
Şekil A.4 : Senaryo 4 ($V=1$ [m/sn], $ds=225$ [mm] , $\beta=40^\circ$).	97
Şekil A.5 : Senaryo 5 ($V=1$ [m/sn], $ds=250$ [mm] , $\beta=40^\circ$).	97
Şekil A.6 : Senaryo 6 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=32.5^\circ$).	97
Şekil A.7 : Senaryo 7 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=35^\circ$).	98
Şekil A.8 : Senaryo 8 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=37.5^\circ$).	98
Şekil A.9 : Senaryo 10 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=42.5^\circ$).	98
Şekil A.10 : Senaryo 12 ($V=1,5$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).	99
Şekil A.11 : Senaryo 13 ($V=2$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).	99
Şekil A.12 : Senaryo 14 ($V=2,5$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).	99
Şekil A.13 : Senaryo 15 ($V=3$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).	100

KULAKLI PULLUKLARIN KULAK–TOPRAK İLİŞKİSİNİN NUMERİK VE ANALİTİK YÖNTEMLER İLE MODELLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada tarımsal üretimin vazgeçilmez bir süreci olan kulaklı pulluk ile toprak işleme faaliyetinde çeki kuvveti gereksiniminin farklı yöntemler ile hesaplanması amaçlanmıştır. Toprak-takım etkileşimi, enerji tüketiminde önemli rol oynamaktadır. Bu sebepten takıma gelen kuvvetin hassas bir şekilde tahmin edilmesi, daha az çeki kuvvetine ihtiyaç duyan farklı takım geometrilerinin optimize edilmesi için gereklidir. Toprak parametreleri, takım parametreleri ve operasyonel parametreler toprak-takım etkileşiminde enerji tüketimini etkileyen en önemli üç unsurdur. Tüm bu parametrelerin toprak işleme faaliyetindeki etkileri birçok araştırmaya konu olması ile birlikte, bu çalışmada kulaklı pullukların toprak ile etkileşiminde, sabit toprak parametrelerinde ve sabit kulak geometrisinde, traktör hızı ve iş derinliği gibi operasyonel etkiler araştırılmıştır. Diğer taraftan ASAE D497.4 standardına göre çeki kuvveti, analitik hesaplamalar sonucu elde edilmiş çeki kuvveti ve sonlu elemanlar metodu ile numerik hesaplanan çeki kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır.

Toprak takım etkileşiminin matematik modeli farklı araştırmacıların farklı yaklaşımlarına göre açıklanmıştır. Toprak içerisindeki takım hareketinde toprak kütlesinin bozunma örüntüsü konusunda araştırmacıların farklı teorileri olmuştur. Farklı bozunma örüntüsü teorileri ve gerilme birim şekil değişimi ilişkisinde farklı bünyesel denklemler kullanılmış olup bu çalışmada açıklanmıştır. Toprak-takım etkileşiminin modellenmesinde önceleri yapılan çalışmalarda basit şekilli bir toprak işleme takımının çeki kuvveti gereksinimini belirlemek için tahmini çeki kuvveti modelleri oluştururken, son yıllardaki araştırmacılar kulaklı pulluğa gelen kuvvetleri modellemeye çalışmışlar ve çeki kuvvetine etki eden parametreleri ortaya koymuşlardır. Kulaklı pulluklardaki çeki kuvveti gereksiniminin deneysel doğrulanması yapılmış analitik hesabına göre belirli geometrideki pulluk kulağı üzerinde analitik çalışmalar yapılmış ve operasyonel etkiler araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda iş derinliğinin çeki kuvvetine etkisinin doğrusal ve toprak işleme hızının çeki kuvvetine etkisinin ikinci dereceden olduğu tespit edilmiştir.

Kulaklı pulluğun toprak ile etkileşiminin modellenmesinde üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Şekil değiştirebilen toprak kütlesi, çalışmada ayrıntılı olarak açıklanan, elasto-plastik Drucker-Prager malzeme modeli olarak tanımlanmış olup toprak-takım etkileşimini modellemek için temas elemanları kullanılmıştır. Toprak-kulaklı pulluk etkileşimi farklı operasyonel parametrelerde ve farklı takım geometrilerinde uygulanmış olup hem çeki kuvveti hem de toprağın çevrilmesi açısından değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözülen farklı durumların sonuçlarına göre toprak işleme hızı değişiminin çeki kuvvetine etkisinin ikinci dereceden ve iş derinliğinin çeki kuvvetine etkisi doğru şeklinde ifade edilebilir.

Toprak işleme faaliyetinde toprak-kulaklı pulluk etkileşimi analitik, numerik (sonlu elemanlar metodu) ve ampirik (ASAE D497.4) yöntemleri ile aynı koşullarda ayrı ayrı çözülmüş ve sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre analitik yöntem ile elde edilmiş sonuç ile ABAQUS programı yarımdıyla elde edilen numerik çözüm büyük ölçüde tutarlık sağlamıştır. Yine bu karşılaştırmaya göre 0,5-3 [m/sn] hız ve 0.125-0,20 [m] iş derinliğinde elde edilen sonuçlar arasındaki farkın azami %20 olduğu görülmüştür. Araştırmacıların analitik hesap üzerinde yaptığı deneysel doğrulama sonuçlarından yola çıkılarak sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonucun toprak işleme takımı tasarımında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca ASAE D497.4 standardına göre ampirik formülle yapılan hesaplama ve yine aynı hesaplamada verilen sapma dikkate alındığında hem analitik çözüm hem de numerik çözüme göre elde edilen sonuçların standartta verilen sonuç aralığına uyduğu görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında ayrıca pulluk kulağının üç boyutlu tasarımında parametrik tasarım yapılmıştır. Bu tasarım yöntemi ile fiziksel anlamı olan sekiz parametre ile farklı pulluk kulağı tasarımı yapabilmek mümkün hale gelmiştir. Sonuç olarak pulluk kulağının parametrik tasarımı kabiliyeti ve sonlu elemanlar yönteminin toprak-takım ilişkisinde kullanılabilir olması ile birlikte kulak geometrik parametrelerinin, çeki kuvveti ve toprağın çevrilmesi açısından optimizasyonu mümkün hale gelmiştir.

NUMERICAL AND ANALYTICAL MODELLING OF SOIL- MOULDBOARD INTERACTION ON MOULDBOARD PLOUGHS

SUMMARY

The main objective of this research is to predict of the draught forces acting on a mouldboard with different methods such as analytical, numerical and empirical in the tillage process. The primary motivation for this study is preparing a substructure for optimization of mouldboard design in terms of draught forces. Tillage is an irreplaceable action on soil to prepare favorable conditions for plant growth. Tillage requires large amount of energy and time, and can be a costly operation for the farmers. That's why; the prediction of draught forces acting on a mouldboard sensitively is more significant for the optimization of the tillage tool geometry. Soil parameters, tool parameters and operational parameters are the most effective factors that affect energy consumption. Although many studies have been reported on the effects of those parameters on tillage energy, tillage speed and working depth influences on soil-tool interaction were investigated in this study. The thesis started with a literature review in the field of soil mechanics and soil interaction to study about previous research works. Then a new procedure for simulating the soil-mouldboard interaction by the analytical methods, empirical methods and FE method was presented. The draught forces prediction by using ASAE D497.4 standarts were compared with the draught forces that had been found by analytical and numerical calculations.

The mathematical modelling of soil-tool interaction was explained according to different researces and their approaches. The researchers emphasize the knowledge of soil failure patterns due to tillage tools moving inside the soil. Different theories of failure and different constitutive models of the soil stress-strain relationship have been suggested to approach an feasible model for this process. Whereas simple tools were used to modelling of soil-tool interaction mechanics for prediction of draught force, recent researchers studied on analytical modelling of soil-mouldboard interaction and they presented the parameters affecting ploughing operations. The researches which were focused on analytical solution of soil-mouldboard interaction, had verified by laboratory experiments. A model was used to predict the draught force acting on a

plough body from a knowledge of the critical physical properties of the soil in which it is working, together with plough speed and the defining geometric parameters of the plough. Being taken these studies as a basis, operational conditions' effects were investigated. According to these investigations; It was shown that the draught force can be expressed as a function of ploughing speed and depth which have a second order relationship with draught force.

In this thesis, one of the under-researched subject is finite element (FE) investigation of soil-blade interaction. A 3-dimensional nonlinear finite element method was used for the modelling of the soil-tool interaction. The soil is considered as an elastic-plastic material. The FE procedure combines the non-associated Drucker-Prager constitutive law with a compacting strain based separation criterion to describe the behavior of soil while being cut by the mouldboard plough. Several separation and sliding surfaces were defined and utilized in the analysis. The elements on these surfaces were bonded to each other by special use of contact elements. During motion of the mouldboard through soil, the bonding along the separation surfaces was allowed to break resulting in separation of the soil elements in front of the tool. The sliding surfaces allowed the soil to slide upward and sideways of the tool. A method of calculating the draft force that essentially eliminates the effects of 'discrete' disjoining particular nodes was proposed and tested for convergence. Interaction of the soil-mouldboard was evaluated operational conditions both working depth and the tillage speed on draught forces. Results showed that draught force increased with a second order polynomial function with tillage speed; Moreover, these forces increased linearly with working depth. Additionally; the inversion of the soil could be shown during the FE simulation.

To verify correctness of the FE model developed and the procedures used, the FE results are first compared with analytical results available for mouldboard ploughs from classical soil mechanics theories and then all the results are compared with the ASAE standards. According to this comparison; the numerical solution executed by ABAQUS, showed pretty much consistency. The maximum error rate, considering tillage velocity between 0,5 [m/sn] to 3 [m/sn] and the working depth between 0,125 [m] to 0,20 [m], was found 20%. Because the results obtained from analytical calculations matched up with the results which were found by FEM method, It may be concluded that the FEM method could be used for designing the tillage tools. Moreover; considering the limits obtained from ASAE D497.4 standards, it was shown

that, the other results (analytical and numerical) stayed within the standard's limits. On the other hand; 3 dimensional parametric mouldboard design method was applied within the scope of the thesis. With this type of design method; the mouldboard design could be executable with eight parameter that have physically meanings.

This study combined the use of an analytical literature review, finite element mathematical and computer modeling, empirical calculations and detailed analysis of numerical results. Taking everything into consideration; FEM can be used to understand the effect of real and more complex mouldboard designs and operational conditions on tillage forces, energy requirements, and quality of soil inversion. Furthermore; the optimization of mouldboards became possible with the using of parametric mouldboard design method.



1. GİRİŞ

Toprak işleme, tarımsal üretim süreçlerinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Bu adımda enerji ve zaman tüketimi diğer süreçlere göre bir hayli fazladır. Toprak karakteristiğinin toprak işleme öncesi ve sonrası bilinmesi gereklidir. Toprak işleme takımı karakteristiği ve farklı operasyonel koşullarda takım-toprak etkileşimi araştırılması gereken en önemli konulardır.

Toprak işleme makinaları tasarımında öncelikle göz önünde bulundurulması gereken parametreler; enerji tüketimi ve çeki kuvvetidir. Farklı toprak bozulma yaklaşımlarının iyi bilinmesi gereklidir. 20. Yüzyıl boyunca toprak- takım ilişkisinin modellenmesinde Terzaghi (1943) ile başlayan farklı teoriler ortaya çıkmıştır. Bu gelişmeler ışığında mühendislikte bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasıyla 20. Yüzyılın ikinci döneminde büyük bir ivme kazanmıştır. 1940'lı yıllarda toprak-takım ilişkisinin modellenmesinde deneysel ve analitik yöntemler kullanılırken, 1950'den sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar yönteminin geliştirilmesiyle Yong ve Hanna (1977), bu yöntemi toprak-takım ilişkisinin modellenmesinde ilk defa kullanmışlardır. Son yıllarda ise bu çalışma baz alınarak birçok bilimsel araştırma yayınlanmıştır.

Toprak işleme makinaları toprağa kuvvet uygulamak suretiyle toprağın bozunması, çevrilmesi veya karıştırılması gibi işlemlerde kullanılmaktadır. Bu işlem toprakta verimliliğin artırılması ve tarımsal üretim faaliyetlerinin yapılmasında vazgeçilmez bir adımdır.

Toprağa uygulanan kuvvetler; çekme, basma, kesme, ve plastik akma şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Akma ve toprağın bozunma koşulları birçok mühendislik malzemesine göre kompleks bir yapıdadır. Çünkü toprak davranışı, sıvı veya katı davranışı arasında değişkenlik göstermektedir. Kesme kuvveti ile toprak tıpkı gevrek malzemeler gibi kırılabilir. Fakat bazı durumlarda net olarak plastik akma veya kalıcı deformasyon şeklinde karşımıza çıkmayabilir. Toprakta plastik akma ve toprağın kesilmesi, toprak kesme gerilmesi ile hesaplanır. Toprağın kesilmesi için

gerekli kuvvet miktarı, toprak koşullarına, toprak işleme takımı özelliklerine ve operasyonel parametrelere göre değişkenlik gösterebilir.

Kesme derinliği, kesme genişliği, takım geometrisi, takım dizilişi ve toprak işleme makinası hızı; işlem için gerekli enerjiyi ve gereken çeki kuvvetini etkilemektedir. Bu parametreler de farklı toprak işleme makinalarında ve farklı toprak yapılarında değişkenlik göstermektedir (Kepner, 1972). Toprak dokusu, toprak nem içeriği, toprak sıkışabilirliği, takım geometrisi, takım operasyonel derinliği ve takım ilerleme hızı işlem için gereken enerjiyi belirlemektedir. Bu parametrelerin ihtiyaç duyulan enerji ve çeki kuvveti üzerindeki etkilerini araştıran birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar farklı uygulamalar için farklı kısıtlara sahiptir. (Nichols, 1931; Payne, 1956; Nikiforov ve Bredun 1965; McKyes ve Ali 1978; Koolen ve Kuipers, 1983).

Takım–toprak modelinin oluşturulmasında birçok yöntem olmasına (Reece, 1965; Godwin ve Spoor, 1977; Swick ve Perumpral, 1988; Chi ve Kushwaha, 1991) rağmen, araştırmacılar halen mevcut modellerdeki eksiklikleri giderebilmek için yeni çalışmalar yürütmektedirler. Bu methodların herbiri ya çok karmaşıktır ya da sonucu etkileyen bazı temel noktaları ihmal etmektedirler. Örneğin; toprak–takım ilişkisinin modellenmesinde analitik yöntemler gerçek toprak sürme uygulamaları gibi dinamik süreçlerde etkisiz kalmaktadırlar. Ampirik yöntemler ise deney sistemlerinin yüksek maliyetli olması nedeniyle çok kullanışlı değildirler. Öte yandan ampirik yöntemler gerekli deneysel enstrümanların taşınma kısıtları nedeniyle her zaman ve her yer de kullanılabilir değildir. Diğer taraftan sonlu elemanlar metodu bilgisayar bilimi ve matematiğin gelişmesiyle bu konuda oldukça kullanışlı bir method olmuştur. Bu yöntem elemanlar arası yapısal ilişkileri baz almaktadır. Elemanlar arasındaki bu fiziksel ilişkiler üç eksenli deneysel testler ile elde edilmektedir. Laboratuvar testlerinde toprak bozulması gerçekte olan toprak işleme durumunu göstermemektedir. Bu yüzden çeki kuvveti ve gerekli enerjinin hesaplanmasında kullanılmak üzere yeni modellerin geliştirilmesi gereklidir (Ashrafi Zadeh, 2006). Toprak yapısının homojen olmaması nedeniyle tarım alanında toprak mekaniğinin kullanılması oldukça karmaşıktır.

Bu çalışmada sırasıyla toprak yapısı, fiziksel ve mekanik özellikleri, pulluk kulağı geometrisi, toprak–takım ilişkisinin modellenmesinde kullanılan analitik yöntemler, numerik yöntemler, belirlenen bir kulak geometrisi üzerinde sonlu elemanlar

yöntemini ve analitik yöntemini kullanarak gerekli çeki kuvvetinin hesaplanması ve son olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Toprak işleme, uygulanan tüm zirai süreçte enerji ve zaman tüketimi anlamında ön sıralardadır. Toprak işleme sürecinde kullanılan en önemli makinalardan birisi ise pulluklardır. Toprak işleme makinalarında toprak üzerinde istenilen işin en verimli şekilde yapılabilmesi için toprak işleme takımlarının toprağın fiziksel ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak tasarlanması gereklidir. Analitik, deneysel ve numerik yöntemler kullanılarak toprağın takımla olan ilişkisi matematiksel olarak modellenebilir. Fakat her yöntemin kendine göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Bu sebeple tezde kulaklı pullukların toprak ile etkileşimde olan kulak yapısının sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yöntemlerle hesaplanıp karşılaştırılması hedeflenmiştir. Böylece toprak işleme makinalarında tasarım aşamasındaki süreç kısaltacaktır. Bunun yanında katma değeri yüksek ve daha verimli makineler üretilecektir.

1.2 Toprak İşleme

Bitkisel üretimin ilk aşaması olan toprak işleme; enerji kullanılarak bitki istekleri doğrultusunda toprak parçacıklarının yerinin değiştirilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Toprak işleme adımı toprağa ilgili bir alet kullanarak kesme, kabartma, devirme, karıştırma, parçalama, ufalama-savurma ve sıkıştırma sıkıştırma işlemleri uygulanmaktadır. Toprak işleme adımının öncelikli amaçları aşağıda listelenmiştir.

- Bitki gelişimi için toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirmek
- Önceki üretimden kalan organik artıkları (anız, çiftlik gübresi) toprağa karıştırılması
- Yabancı otların temizlenmesi
- Tarımsal üretimde kullanılacak bitkilere uygun tohum yatağı hazırlanması
- Erozyonun kontrolü
- Tarlanın sulamaya hazırlanması

Pulluklar ise toprak işleme sürecinde kullanılan ve toprağın kabartılması, karıştırılması, devrilmesi ve kesilmesi gibi işlemlerde kullanılan en yaygın aletlerdir.



2. TOPRAK YAPISI

Toprak; su, katı parçacıklar ve havadan oluşan bir yapıya sahiptir. Mekanik özellikleri daha çok katı parçacıkların büyüklüğüne ve içersindeki boşluklara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Katı parçacıklar, kayaçların kimyasal ya da fiziksel yolla bozunmasıyla meydana gelmektedir. Bu sebeple kayaçların yapısı ve nasıl oluştuklarının anlaşılması çok önemlidir. Kayaçlar bir ya da daha çok mineralden oluşmaktadır. Toprak yapısındaki katı parçacıkların karakteristiğini de içerisinde hangi mineralleri barındırdığına göre değişmektedir. Doğada katı halde bulunan inorganik elementler mineral olarak adlandırılmaktadır. Dört bin'den daha fazla mineral keşfedilmiş olup toprak yapısında sadece on tanesi bulunmaktadır. Toprak yapısında oksijen (O₂), silisyum, alüminyum, demir, kalsiyum, sodyum, potasyum, magnezyum, titanyum ve hidrojen bulunmaktadır. İçerisinde oksijen ve silisyum bulunan mineraller, toprak yapısının büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Toprak yapısındaki diğer ilginç mineral ise su eklendiğinde hacminin on beş katına çıkabilen kildir.

Kayaçların fiziksel bozunması; iklim değişiklikleri örneğin ani soğuma-çözünme veya rüzgar, su erozyonları nedeniyle oluşabilir. Kimyasal bozunma ise yağmur suyuyla birlikte meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ile meydana gelir. Katı parçacıkların büyüklüğü ve toprak yapısındaki dağılımı bozunma şekline ve kayaçların hareketine bağlıdır.

Toprak yapısı, içeriğinde yoğun bulunan parça büyüklüklerine göre şu şekilde kategorilere ayrılabilir;

- Çakıl (4.75 [mm]- 76.2 [mm])
- Kum (0.075 [mm]- 4.75 [mm])
- Silt (Alüvyon , çok ince kum) (0. 075 [mm] ve daha küçüğü)
- Kil (0. 075 [mm] ve daha küçüğü)

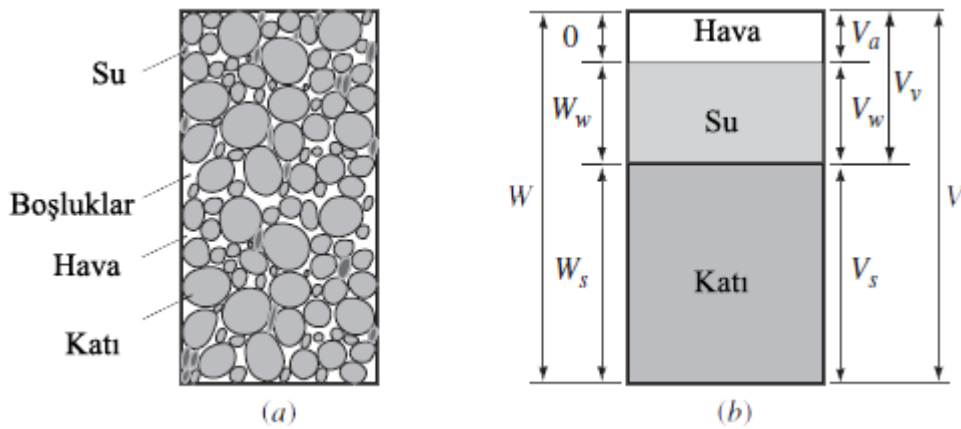
Çakıllar bilindiği gibi küçük kaya parçalarıdır. Kumlar ise seramik ve cam hammaddesi olan feldispat ve kuvars madeninin çok küçük parçacıklı halidir. Silt, mikroskobik düzeyde kum'un daha ince taneli kuvarsdan oluşan halidir. Kil ise yine mikroskobik düzeyde pul görünümlü kil, mika veya diğer madenlerden oluşan şeklidir.

Toprak, çökeltme şekline göre de sınıflandırılabilir. Toprak, sadece yerçekimi ile orijinal kayaç civarında çöktiyse kalıntı toprak adı verilir. Eğer toprak, orijinal kayaçlardan uzak bir yerden rüzgar veya su ile taşınmış ise taşınmış toprak adı verilir.

Toprak, kohesif ve kohezyonsuz olmak üzere iki önemli kategoriye ayrılabilir. Kohezyonsuz topraklar yani çakıllı, kumlu, siltli topraklar su olduğunda bile birbirine asla yapışmazlar. Diğer taraftan kohesif topraklar (killi toprak), su ile birlikte birbirlerine tutunarak plastik özellikli bir malzemeye dönüşebilir. Örneğin killi çamurdan yapılan gereçler, kilsiz toprak ile asla yapılamaz (Helwany, 2007).

2.1 Toprağın Fiziksel Parametreleri

Toprak, sıvı, katı ve gazdan oluşmaktadır. Katı parçaları parçalanmış kayaçlar, sıvıyı genellikle su ve gaz kısmını ise genellikle hava oluşturmaktadır. Şekil 2.1a'da görüldüğü üzere katı parçacıklar arasında kalan boşlukları hava ve su doldurmaktadır. Şekilde toplam hacim V , toplam ağırlık ise W ile temsil edilmektedir. Toprak numunesini üç komponente ayırdığımızda (Şekil 2.1b), katı parçacıkların toplam hacmi V_s , ağırlığı ise W_s ; toprak numunesi içindeki suyun hacmi V_w , ağırlığı ise W_w olsun. Diğer taraftan hava hacmi ise V_a olsun. Hava ağırlığı sıfıra yakın olduğu için sıfır kabul edilebilir.



Şekil 2.1 : Toprak kompozisyonu (a) ve toprak bileşenleri (b) (Helwany, 2007).

Diğer yandan, boşluk hacmi V_v , V_a and V_w 'nin toplamı olacaktır. Yani;

$$V = V_v + V_s = V_a + V_w + V_s \quad (2.1)$$

$$W = W_w + W_s \quad (2.2)$$

Boşluk oranı 'e' ise boşluk hacminin, katı hacmine oranı olarak verilebilir.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.3)$$

Porozite 'n' ise boşluk hacminin, toplam hacime oranıdır.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.4)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{V/V}{V/V - V_v/V} = \frac{n}{1-n} \quad (2.5)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2.6)$$

Böylece doygunluk derecesini de şu şekilde tanımlayabiliriz.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.7)$$

Toprak tamamen doygun olduğunda, yapıdaki boşlukların tamamı su ile doludur. Yani $V_v = V_w$ ($S=1$) durumu meydana gelecektir. Diğer taraftan toprak tamamen kuru ise $V_w = 0$ yani $S=0$ olacaktır.

Nem içeriği veya su içeriği su ağırlığının katı ağırlığına oranı olarak ifade edilebilir.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.8)$$

Toprak numunesinin su içeriği, katı parçaların ve eklenen suyun tartılmasıyla kolayca elde edilebilir. Toplam ağırlığın 'W' olduğu düşünülürse kurutulan numunenin ağırlığı ' W_s ' yani katı toprağın ağırlığını verecektir. Suyun ağırlığı ise;

$$W_w = W - W_s \quad (2.9)$$

olarak bulunacaktır. Diğer taraftan, bir diğer önemli parametre ise özgül ağırlıktır.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s/V_s}{\gamma_w} \quad (2.10)$$

Burada γ_s ;katı parçacıkların birim ağırlığı, γ_w ; ise suyun birim ağırlığını ($\gamma_w = 9,81 \text{ kN}/\text{m}^3$) ifade etmektedir. Özgül ağırlık; katı parçacıkların birim ağırlığının, suyun birim ağırlığına oranıdır. Genelde killi topraklar için bu değer 2,65 ile 2,75 arasında değişkenlik göstermektedir. Toprak numunesinin özgül ağırlığı da şu şekilde ifade edilebilir.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.11)$$

Kuru birim ağırlığı ise ;

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V} \quad (2.12)$$

(2.9), (2.11) ve (2.12) numaralı denklemleri birleştirdiğimizde;

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s + \omega W_s}{V} = \frac{W_s(1 + \omega)}{V} = \gamma_d(1 + \omega) \quad (2.13)$$

Veya;

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} \quad (2.14)$$

Şekil 2.1b'deki katı hacmi 1 ($V_s = 1$) olarak düşündüğümüzde;

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{1} \quad ; \quad V_v = e \quad (2.15)$$

Böylece;

$$V = V_s + V_v = 1 + e \quad (2.16)$$

(2.10) numaralı denkleme $V_s = 1$ eklediğimizde;

$$G_s = \frac{W_s}{\gamma_w} = \frac{W_s/V_s}{\gamma_w} = \frac{W_s/1}{\gamma_w} \quad \text{ve} \quad W_s = \gamma_w G_s \quad (2.17)$$

(2.17) denklemini (2.8) numaralı denklemde yerine koyduğumuzda;

$$W_s = \omega W_s = \omega \gamma_w G_s \quad (2.18)$$

Ve en son olarak (2.16), (2.17) ve (2.18) denklemini (2.11) ve (2.12) denkleminde yerine koyduğumuzda;

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{\gamma_w G_s + \omega \gamma_w G_s}{1 + e} = \frac{\gamma_w G_s(1 + \omega)}{1 + e} \quad (2.19)$$

Ve;

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_w G_s}{1+e} \quad (2.20)$$

Diğer ilginç ilişki (2.19) denkleminde elde edilebilir.

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{W_w/\gamma_w}{V_v} = \frac{w\gamma_w G_s/\gamma_w}{e} = \frac{wG_s}{e} \quad ; \quad eS = wG_s \quad (2.21)$$

(2.21) denklemi doymuş topraklardaki boşluk oranının belirlenmesinde çok kullanışlı bir denklemdir. Doymuş topraklarda $S = 1$ 'dir. Ve G_s kumda 2.65 kilde ise 2.75 alınabilir. Nem içeriği ise basit laboratuvar testleri ile bulunabilir.

Tamamen doymuş topraklarda; $e = wG_s$, $G_s = e/w$ 'dır. Denklem 2.19'a bu eşitliği eklediğimizde;

$$\gamma_{doy} = \frac{\gamma_w G_s (1+e)}{1+e} = \frac{\gamma_w [G_s + wG_s/e]}{1+e} = \frac{\gamma_w (G_s + e)}{1+e} \quad (2.22)$$

Sıkıştırılabilirlik ve toprak granüllerinin dayanımı bağıl yoğunlukla (D_r) ilişkilidir. Toprak granüllerinin sıkışması ile ilgili bir büyüklüktür. Boşluk oranı 'e' olan uniform bir kum tabakası düşünelim. Maksimum ve minimum boşluk oranlarını bildiğimizde yoğunluğunu bulabiliriz. Dolayısıyla iki farklı kum deneyi (ASTM 2004: Test Designation D-4253) yaptığımızda bu değerleri belirleyebiliriz. İlk test ile mümkün olan maksimum kuru birim ağırlığı ($\gamma_{D_{maks}}$) bulmak için bilinen bir hacimde titreşimli bir makinede kuru kum numunesini mümkün olduğunca sıkıştırılmaktadır. Diğer test ile de mümkün olan minimum birim ağırlık ($\gamma_{D_{min}}$) bulunacaktır. Bu değeri de boş bir kaba kum örneğini mümkün olduğunca yavaş bir şekilde döküp, hacmini belirleyerek elde edilebilir. Dolayısıyla bağıl yoğunluk;

$$D_r = \frac{e_{maks} - e}{e_{maks} - e_{min}} \quad (2.23)$$

olarak bulunacaktır.

Bu denklem; yapıdaki boşluk oranı hakkında bize bilgi verir. Boşluk oranı 'e' , ' e_{min} 'e eşit olduğunda $D_r = 1$ olacaktır. Boşluk oranı 'e' , ' e_{maks} 'a eşit olduğunda ise $D_r = 0$ olacaktır. Kuru birim ağırlık boşluk oranı ile alakalıdır.

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \quad (2.24)$$

Böylece;

$$\gamma_{D-\text{maks}} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e_{\text{min}}} \quad \text{ve} \quad \gamma_{D-\text{min}} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e_{\text{maks}}} \quad (2.25)$$

2.2 Toprağın Dinamik Özellikleri

Toprağın dinamik özellikleri, toprak hareketine göre belirlenmektedir. Bir toprak parçası düz bir yüzeyde hareket etmeye başladığında toprak parçacıkları ve toprak ile metal yüzeyler arasında sürtünme kuvvetleri etkileri ortaya çıkar. Bununla birlikte toprak parçacıklarının iyice sıkışması ile beraber dayanımı da artacaktır.

Farklı kesme hızlarında ve toprağın farklı değerlerindeki ivmeli hareketlerinde kesme dayanımı değişiklik göstermektedir. Yapılan araştırmalara göre kumsal topraklarda toprak kesme dayanımı çok değişiklik göstermemesine rağmen farklı tip topraklarda operasyon hızına ve hızdaki değişimlere göre toprak dayanımı değişkenlik göstermektedir. Genellikle yüksek takım hızlarında yüksek çeki kuvvetleri ortaya çıkmaktadır.

Pulluk çeki kuvvetini etkileye üç farklı mekanizma vardır. Bunlar;

- Toprağın ataletsel etkileri
- Toprak dayanım değişim hızındaki farklılıkların etkisi
- Dalga yayılım etkisidir (Zhang ve Kushwaha ,1999).

Takım ilerleme hızı bazı limitleri aştığında pulluk çeki kuvveti tersine azalır. Bunun sebebi takım hızının, toprak üzerindeki gerilme yayınma hızını geçmesidir. Teorik olarak; takımın hemen önündeki plastik şekil değiştiren bölgenin hemen kaybolmasıdır. Bu araştırmaya göre optimum bir takım ilerleme hızında minimum çeki kuvveti elde edilebilir (Azyamova 1963; Katsygin 1969; Vetrov ve Stanevski 1972).

Toprağın dinamik özellikleri, toprağın hareketine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Harekete bağlı değişen özellikler; toprak sürtünme açısı, kohezyon ve toprak dayanımı olarak bölümlere ayrılabilir.

Toprak dinamik özelliklerinin ölçülmesi oldukça zor bir problemdir. Farklı topraklarda yapılan aynı deneyler de farklı sonuçlar verecektir. Bu sebeple genellikle toprak dinamik parametreleri sabit kabul edilip çalışmalar yapılmaktadır.

2.3 Toprak Kohezyonu

Toprak kohezyonu (C), birim alandaki toprak parçacıkları arasındaki çekim (yapışma isteği) olarak tanımlanabilir. Birimi [Pa]'dır. Toprak dayanımından bağımsız bir büyüklüktür. Daha önce belirtildiği üzere toprak dokusu ve su içeriği kohezyon'u etkileyen parametrelerdir. Kil ve silt tanecikleri arasındaki elektrostatik bağlar, su içeriği ve doku ile birlikte toprak kohezyonunu daha da artırır. Bu sebeple eğer toprak yapısında kil veya silt yok ise toprak kohesif değildir. Toprak mekaniğinde, kum kohesif olmayan toprak olarak sınıflandırılır. Diğer taraftan daha ince taneli kil içeriği olan toprak da daha kohesiftir (Armin, 2014).

2.4 İç Sürtünme Açısı

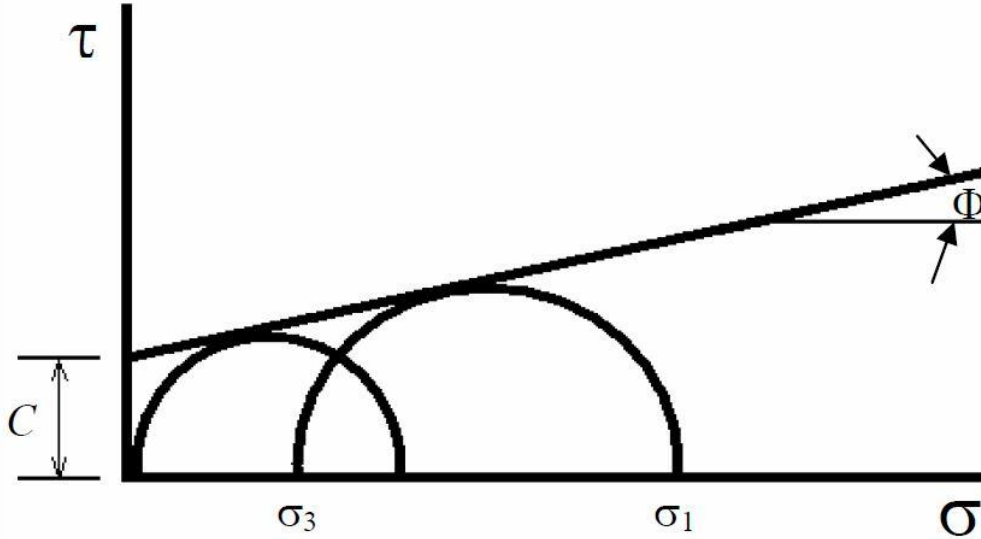
Sürtünme açısı (ϕ) toprak iç yapısındaki parçacıkların birbirli ile meydana gelen sürtünmelerini gösteren bir büyüklüktür. Toprak işleme prosesinde enerji, parçacıklar arasındaki kohesif bağların koparılması ve bu parçacıkların birbiri üzerinden yuvarlanması ya da kayması ile harcanır (Armin, 2014). Toprak kohezyonunda olduğu gibi iç sürtünme açısı toprağın su içeriğinden ve dokusundan etkilenmektedir. Kaba taneli topraklarda yüksek sürtünme açısı gözlenmektedir. Bu nedenle kumsal topraklar iç sürtünme açısının killi topraklara göre yüksek olması sebebiyle sürtünmeli topraklar olarak adlandırılır. Nemli ve ince taneli topraklardan kaba taneli ve kuru topraklara doğru artmakla beraber 25^0 ile 45^0 arasında değişkenlik göstermektedir.

2.5 Toprak Kesme Gerilmesi

Toprak dayanımı, toprağın uygulanan kuvvete direncini gösteren büyüklüktür. Toprak dayanımı; toprağın dokusu, su içeriği, hacimsel yoğunluğu'na göre değişkenlik göstermektedir. Toprak hacmindeki artış, hacimsel yoğunluğu azaltacağından dolayı, toprağın dayanımı azalacaktır. Toprak işleme esnasında toprağın bozulması; kesme, çekme ve basma gerilmeleri sayesinde olmaktadır (Galecki, 2012). Toprağın yırtılma bölgesinde kesme gerilmesinin etkisi basma ve çekme gerilmelerine göre çok daha fazladır. Uzun yıllar bu konuda çalışmalar sürdürülürken Mohr-Coulomb kriteri olarak adlandırılan bu mekanizma Coulomb tarafından bulunmuştur.

$$\tau_{maks} = C + \sigma_n \tan \phi \quad (2.26)$$

Bu kriter; toprak kohezyonunu (C) ve içsel sürtünme açısını (ϕ) saptayabilmek için üç eksenli kesme testi kullanılarak uygulanır. Silindirik toprak parçası numunesinin üç eksenli durum göz önünde bulundurularak çizilen Mohr daireleri ile, toprak yırtılma çizgisi (Mohr dairesine teğettir.), toprak kohezyonu (C) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) bulunabilir. Şekil 2.2’de toprak kohezyonu ve iç sürtünme açısı gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Mohr-Coulomb teorisi grafik gösterimi.

2.6 Kritik Hal Toprak Mekaniği

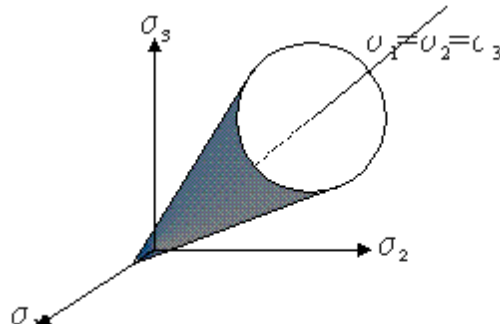
Sabit hacimde ve sabit kesme ve normal efektif gerilme durumunda meydana gelen yüksek kesme deformasyonları toprağın kritik hali olarak tanımlanır (Schofield ve Wroth,1968). Toprak kesme deneylerinde oluşan kritik hal bölgeleri ise kritik hal çizgisi (CSL) olarak tanımlanır. Deviatorik gerilme, ortalama normal efektif gerilme ve topraktaki boşluk oranına göre üç boyutlu olarak çizilebilir. CSL, başlangıç boşluk oranına ve başlangıç ortalama normal efektif gerilmeye ve gerilme yönlenmesine göre sonuçlanır. Kritik hal konseptini varsayan tüm elasto-plastik modeller akma yörüngesini hem izotropik hem de anizotropik modeller için iyi bir şekilde tanımlarlar. Bu modeller Mohr- Coulomb bozunma kriterini baz almazlar.

2.6.1 Elasto-Plastik toprak modelleri

Deformasyon ve toprak kütlelerinin bozunması analizleri için bünye denklemlerine ihtiyaç vardır. Toprağın gerilme–birim şekil değişimi ilişkisinin hem elastik bölgede hem de plastik bölgede iyi şekilde anlaşılması gereklidir. Genellikle toprağın elastik

bölge davranışı ve plastik bölge davranışı ayrı ayrı incelenmektedir. Kesme gerilmesi ve normal gerilme uzayında akma yörüngeleri belirlenebilir (Wood, 1990). Eğer topraktaki gerilme durumu akma bölgesinin altında ise elastik deformasyon, topraktaki gerilme durumu akma bölgesinin üzerinde ise plastik deformasyon yani kalıcı deformasyon meydana gelmektedir. Elasto-plastik toprak malzeme modelleri deformasyonun kalıcı olup olmadığına toprağın yükte veya yüksüz durumdaki gerilme–birim şekil değişimi davranışına göre karar vermemize yardımcı olur.

Toprağın bünyesel davranışı elasto-plastik teorisi yapısına göre etkin bir şekilde modellenebilir. Nonlineerlik, tersinmezlik, basınç bağımlılığı, kesme sonucu sıkışma ve gevşeme, volumetrik sertleşme ve yumuşama toprak mekaniğinin ana konularıdır. Plastisite teorisi yer bilimi problemlerine basit bir şekilde adapte edilebilir. Elasto-plastik yapıda basınç bağımlılığı akma yüzeyindeki deviatorik kesitini baskı ile artması varsayımıyla modellenebilir. Bu konik akma yüzeyleri, Drucker ve Prager (1952) tarafından ortaya atılmıştır. Fakat bu klasik akma teorisi izotropik basmalarda inelastik birim şekil değişimlerinin tahmini konusunda yeterli değildir (Callari ve diğ., 1998). Ayrıca toprağın genişleyen davranışı konusunda da hatalı sonuçlar çıkarmaktadır. Bu engellerin üstesinden gelebilmek için konik akma yüzeyi, hidrostatik eksen boyunca bir kep ile kapatılmıştır. Toprağın genişleme davranışı Cam-clay modeli ile geliştirilmiştir. Bu model akma yüzeylerini ve malzemenin sınır koşullarını ayırt etmektedir. Konik yüzey, kritik yüzey olarak tanımlanır ve volümetrik birim şekil değişiminin olmadığı durumu gösterir.



Şekil 2.3 : Drucker-Prager modeli.

Killi topraklar için birçok elasto-plastik model (Wroth ve Houlsby, 1985; Gens ve Potts, 1988) olmasına rağmen modifiye cam-clay (Roscoe ve Burland, 1968) modelinde akma eğrisi diğerlerinden farklıdır. Yarı statik ve monotonik yükleme

koşullarında bu model oldukça hassas sonuçlar vermektedir (Wroth, 1975; Wood, 1990).

2.6.2 Modifiye Cam Clay (MCC)

Orijinal Cam-Clay modelinden sonra, Roscoe ve Burland (1968) modifiye cam-clay modelini geliştirmişlerdir. MCC, izotropik kil toprak numunelerinin asimetric (üç eksenli) kesme deneyleri sonucunda bulunmuştur. Bu model toprağın gerilme-birim şekil değişimi davranışını gerçeğe yakın bir şekilde göstermektedir. Basınç bağımlı topraklarda, kesme sonucunda sıkışma ve gevşeme durumundaki toprak gerilmelerini tahmin edebilmektedir. MCC modeli toprağın kritik hal mekaniğinde oldukça kullanışlıdır. Kritik hal mekaniğinde toprak numunesi, ortalama efektif gerilme, deviatorik (kesme) gerilmesi, özgül hacim gibi üç parametreye bağlıdır. Aşağıdaki 2.27 ve 2.28 denklemlerine göre deviatorik gerilme ile ortalama gerilme arasındaki ilişki kurulabilir.

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad (2.27)$$

$$q = \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} [(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2] \right\}} \quad (2.28)$$

Özgül hacim ise aşağıdaki 2.29 denkleminde göre hesaplanabilir.

$$v = 1 + e \quad (2.29)$$

2.6.3 Yükleme ve geri yükleme durumlarında normal konsolidasyon eğrisi

MCC, Şekil 2.4 de görüldüğü gibi yumuşak toprak numunesinde özgül hacim ve $\ln p'$ arasındaki normal konsolidasyon çizgisine ve boşalma (şişme) çizgilerine bağlıdır. Bu ilişki yumuşak toprak numunesinin izotropik gerilme koşullarında ($\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$) yavaşça sıkıştırılmasıyla mükemmel süzülme koşullarında olduğu varsayılmıştır. Şişme çizgileri yükleme – boşalma çizgileri olarak da adlandırılabilir.

MCC' nin yükleme (normal konsolidasyon) ve boşalma (şişme) davranışı Şekil 2.4' te gösterilmiştir. Toprak elemanı p'_b , $v - \ln p'_b$ grafiğinde izotropik gerilmesiyle yüklendiğinde doğal konsolidasyon çizgisi üzerinde a'dan b'ye doğru hareket eder. Eğer numune özgül hacim – ortalama gerilme davranışında yükü boşaltırsa $\overline{bc}$ şişme doğrusu üzerinden c noktasına gelir. Eğer numune p'_d ile yeniden yüklenirse önce p'_b 'ye kadar önceki şişme eğrisini takip ederek b noktasına gelecek, eğer gerilme

p'_b 'yi aşarsa tekrar doğal konsolidasyon çizgisi üzerinden hareketine devam edecek, d noktasında gerilme kaldırılırsa gerilme değeri yeni şişme eğrisinden p'_a 'ya ulaşacaktır. Daha sonraki yeniden yükleme durumunda $\overline{de}$ eğrisi yeni şişme eğrisi olacaktır.

Normal konsolidasyon eğrisi Şekil 2.4 de gösterilmiş olup denklem 2.30 ile açıklanabilir.

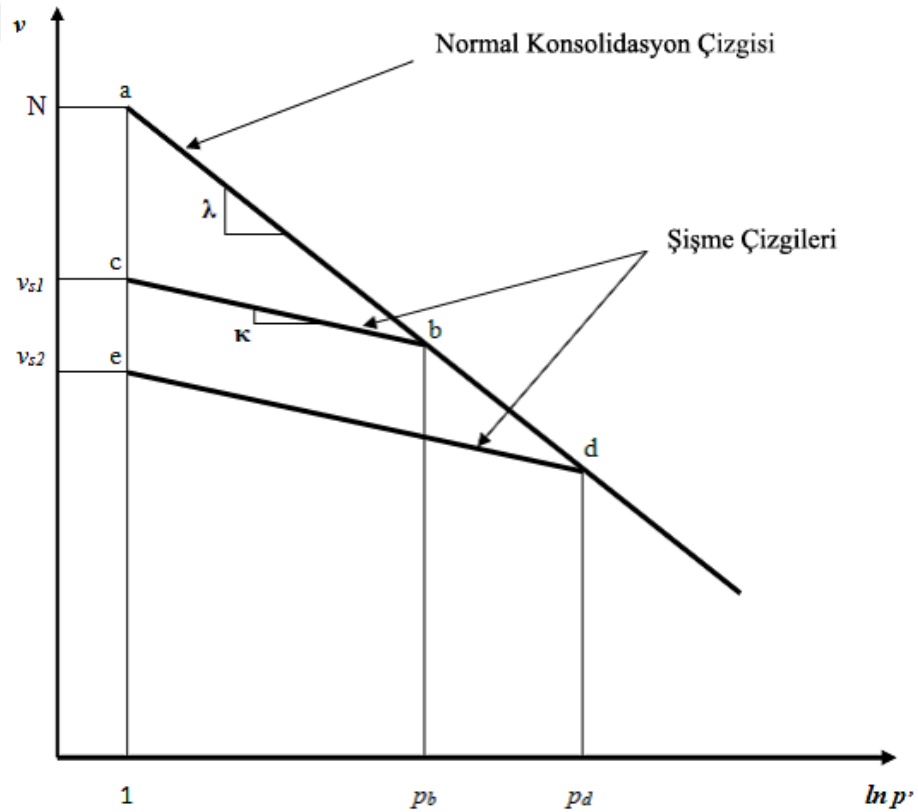
$$v = N - \lambda \ln p' \quad (2.30)$$

Şişme eğrilerinde ise bu eğri aşağıdaki formu almaktadır.

$$v = v_s - \kappa \ln p' \quad (2.31)$$

λ , κ ve N kullanılan toprağın karakteristik özellikleridir.

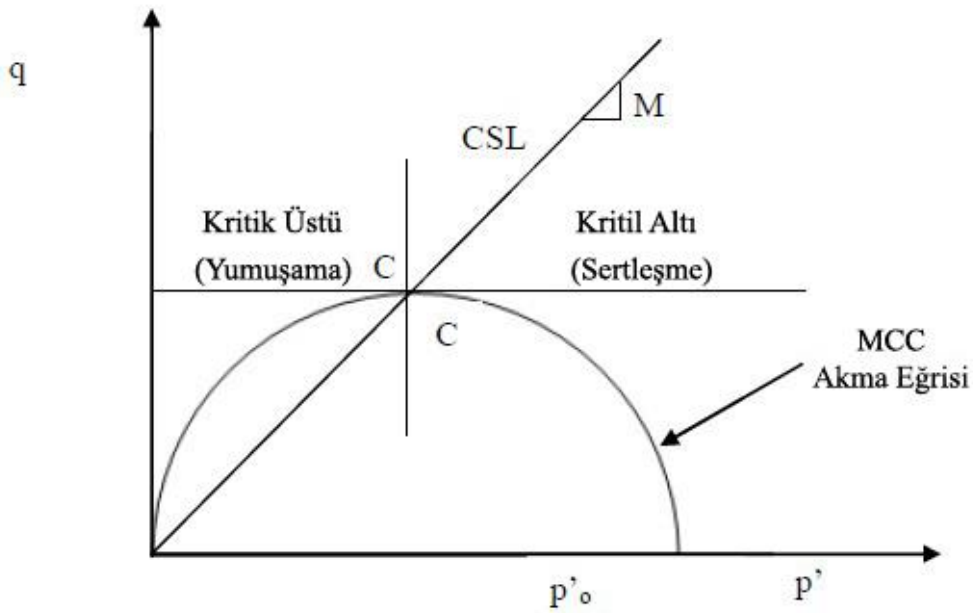
Şekil 2.4 te gösterildiği gibi v_s , her şişme eğrisine göre ve toprağın geçmişine göre değişkenlik göstermektedir. Eğer toprağın ilk hali, doğal hali ise konsolidasyonlu, yükleme boşaldıysa aşırı konsolidasyonlu olarak adlandırılır. Genelde toprak doğada doğal konsolidasyon halinde bulunmaz ve durumu stabil değildir.



Şekil 2.4 : İzotropik basma halinde toprağın davranışı.

2.6.4 Akma durumu

Modifiye Cam-Clay modelinde akma, Şekil 2.5'te olduğu gibi eliptik eğri şeklindedir. Akma yüzeyi ön konsolidasyon basıncı p'_0 (toprağın o zamana kadarki gördüğü en yüksek gerilme değeri) olarak tanımlanmıştır. M ise, $p' - q$ uzayında kritik hal eğrisidir. C noktası akma eğrisinin yatay teğetidir. Bu noktada plastik volumetrik şekil değişimi yoktur ve akma yüzeyi durağandır. Eğri üzerindeki C' ye benzer noktalar kritik hal noktalarıdır. Toprak elemanı eğer C' nin sağ tarafında (ıslak veya yarı kritik durum) akma gösterirse plastik volumetrik hacim değişimi pozitif olacak ve sertleşme görülecektir. Eğer C' nin sol tarafında akma (kuru ya da kritik üstü taraf) gösterirse plastik volumetrik şekil değişimi negatif olacak ve toprakta yumuşama görülecektir.



Şekil 2.5 : Modifiye Cam- Clay modelinin akma durumu.

3. TOPRAK–TAKIM ETKİLEŞİMİNDE KULLANILAN ANALİTİK VE NUMERİK YÖNTEMLER

3.1 Analitik Yöntemler

Toprak işleme, toprak kaldırma, toprak kesme gibi işlemler kısaca toprağın yerdeğiştirmesi olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte toprağın mekanik bozunması sırasında toprak kütleli olarak yer değıştirir ve geometrik yapısı eski haline göre bozulur. Etkili ve verimli toprak işleme takımlarının tasarımı kuvvet tahmini, toprak bozunmasının analizi ve istenilen gücü sağılayan aletler ile başlar.

Analitik yaklaşım toprak ve toprak işleme takımı arasındaki etkileşimi tahmin edebilen ilk metodlardan birisidir. Bu yaklaşım toprak işleme alanında elli yıldır araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır (Ashrafizadeh ve Kushwaha, 2003). Bu yaklaşımlar halen kullanılmakta olup gelişime açıktır. Ayrıca bazı deneysel ve numerik yöntemler de kullanılmaktadır. Limit denge analizi bu yöntemler arasında en önemli metodlardan birisidir.

3.1.1 Limit denge metodu

Bu yaklaşıma göre takım önündeki toprak, rijit olduğı varsayılan birkaç parçaya ayrılmaktadır (Shen ve Kushwaha 1998). Limit denge metodu (LDM), parçaların kuvvet dengelerini analiz etmektedir. LDM metodundaki bazı varsayımlar:

- Rijit kabul edilen toprak parçası potansiyel kırılma yüzeyinde ya da toprak iç yüzeyinde parçalanabilir.
- Toprak içerisindeki yırtılma örüntüsünü bulmak için araştırmacılar tarafından potansiyel yırtılma yüzeylerinden oluşan bazı örüntü kabulleri kullanılmaktadır. Bu kabuller bilinmeyen parametreler içermektedir. Bu parametreleri belirlemek için, toprak işleme takımına minimum etki eden kritik kırılma yüzeyleri optimizasyonu yapılmıştır.
- Yırtılma yüzeyindeki etkiyen kuvvetler aşağıdaki gibi Mohr-Coulomb ile belirlenebilir.

$$\tau = C + \sigma_n \tan \emptyset \quad (3.1)$$

τ_{max} :Maksimum kesme gerilmesi N/m^2

C :Kohezyon N/m^2

σ_n :Normal gerilme N/m^2

$\emptyset$:Toprak iç sürtünme açısı

Toprak ve metal yüzey arasındaki etkileşim aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\tau = a + \sigma_n \tan \delta \quad (3.2)$$

a :Toprak metal adhezyon faktörü, N/m^2

δ :Toprak-metal sürtünme açısı

LDM metodunda, toprak yüzey kırılma şekilleri deneyler tarafından belirlenmiştir. Bu kırılma çeşitleri deneyden deneye de farklılık gösterebilir. Ayrıca eşitlikler; topraktaki sadece yatay ve dikey yönlerdeki kuvvetler şeklinde iki boyutlu olarak ya da üç boyutlu olarak yazılabilir.

3.1.2 Evrensel toprak işleme eşitliği

Reece (1965)'in toprak işleme mekaniği; 1943'te Terzaghi tarafından bulunmuş yüzeydeki topraktaki taşıma kapasitesine birçok açıdan benzerdir. Terzaghi'nin teorisine göre, aşağıdaki denklemde bir alet ile toprağın kesilmesi için gerekli kuvveti bulunabilir.

$$P = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q) w \quad (3.3)$$

P : Toplam takım kuvveti [N/m^2]

γ :Toplam toprak yoğunluğu [N/m^3]

g :Yerçekimi ivmesi [m/s^2]

d :Toprak yüzeyinin altındaki toplam iş derinliği [m]

C :Toprak kohezyonu [N/m^2]

q :Toprak yüzeyindeki dikey etkiyen ek yük [N/m^2]

w :Takım genişliği [m]

N_γ, N_c, N_q :Topraktaki sürtünme dayanımına, toprak geometrisi ve takım-toprak dayanım özelliklerine bağlı faktörler

Bu denklem analitik yaklaşımın en temel halidir ve bazı araştırmacılar tarafından kullanılmıştır (Reece 1965 ve Hittiaratchi ve Reece 1966, 1967, ve 1974). Bu denklem iki boyutlu toprak bozunmaları içindir.

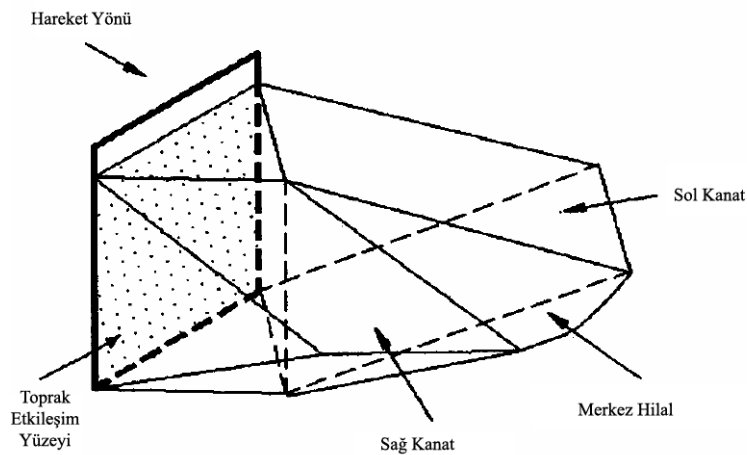
İki boyutlu durumlarda örneğin bir bıçakla farklı derinliklerde toprağın kesilmesi durumunda geçerli sonuçlar vermektedir. Bıçağın oldukça ince ve toprak hacminin yeterince büyük olması gereklidir (Payne, 1956).

3.1.3 Üç boyutlu statik modeller

Payne (1956), O'callaghan-Farrelly (1964), Hittiaratchi-Reece (1967), Godwin-Spoor (1977), Mckyes-Ali (1977), ve Perumpral ve diğerleri (1983) toprak-takım ilişkisinin modellenmesinde statik üç boyutlu analitik yöntemleri kullanan araştırmacılarıdır. Fakat tüm bu çalışmalarda takım hızı etkisi ihmal edilmiştir.

3.1.3.1 Payne modeli

Toprak işleme takımı üzerindeki toprağın yukarı yönlü hareketini gözlemleyerek Şekil 3.1'de görüldüğü gibi toprağın bozunma alanlarını belirlemeye çalışmıştır. Bu çalışmada genişlik/derinlik oranı 1'den küçük toprak işleme takımı kullanılmıştır.



Şekil 3.1 : Payne modelinde toprağın bozunma alanları.

Sonuç kuvvetinin yatay ve dikey yöndeki bileşenlerini hesaplama denklemi:

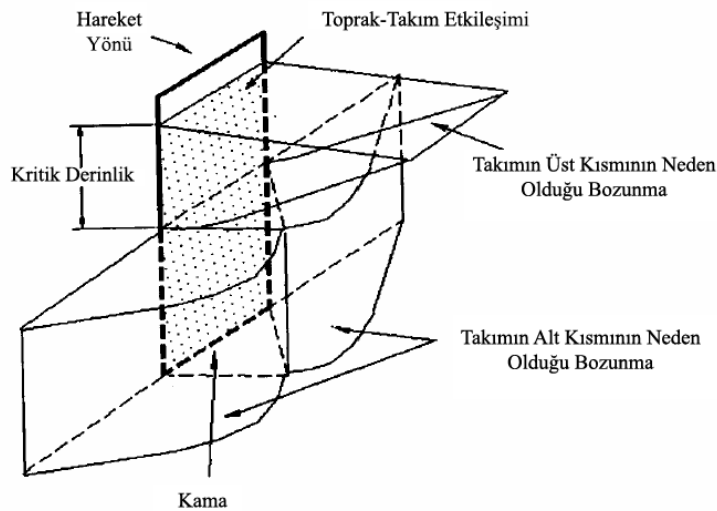
$$H = B_c \cos \tau + B_R \sin(\theta + \tau) + T \cos \theta_m + 2[S_c \cos \beta \cos \lambda + S_R \cos \theta \sin(a + \lambda)] \quad (3.4)$$

$$V = B_c \sin \tau - 2(S_c \sin \beta \cos \lambda + S_R \sin \theta) + D_R \sin \delta - T \sin \theta_m + D_A + W \quad (3.5)$$

- B_c :Merkez kamanın alt yüzeyindeki kohezif kuvvet, [N]
- $\emptyset$:Toprağın içsürtünme açısı
- τ :Alt yüzeyin yatayda yırtılarak tırmanığı yüzeyin açısı
- B_R : Alt kamaya etki eden normal ve sürtünme kuvvetleri, [N]
- T :Önde kesme için istenilen kuvvet, [N]
- θ_m :T kuvvetinin yatayla yaptığı açı,
- S_c :Bir kenar boyunca etkiyen kohezif kuvvet, [N]
- a : S_R 'kuvvetinin yataydaki izdüşümü ve normal ile yaptığı açı
- β : S_c 'nin yatay düzlem ile arasındaki açı,
- λ :Kamanın bir kenarının hareket yönünün açısı,
- S_R :Kamaya etkieden normal ve sürtünme kuvvetlerinin bileşkesi, [N]
- θ :Yatay ve S_R arasındaki açı
- D_A :Takım- toprak temas yüzeyindeki adhezyon kuvveti, [N]
- W :Kamadaki toprağın ağırlığı, kgf

3.1.3.2 O'callaghan-Farrelly modeli

Payne modeli ve deneysel sonuçları baz alarak O'callaghan-Farrelly (1964) şekil 3.2'deki modeli geliştirmiştir.



Şekil 3.2 : O'Callaghan- Farrelly modelindeki toprağın bozunma bölgeleri.

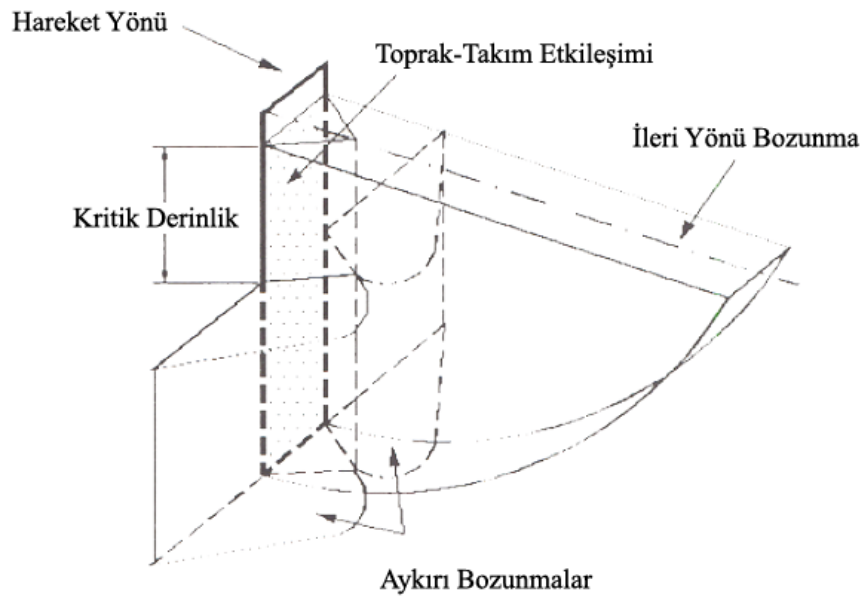
Bu modelde bazı varsayımlar yapılmaktadır :

- Kritik derinliğin takım genişliğinin 0.6 katına eşit olduğu kabul edilmektedir.
- Bozunma yüzeyi, iki boyutlu durumda tanımlandığından daha yukarıdadır.
- İki taraf ayrılma hilali ihmal edilmiştir
- Takım düz yüzey olarak kabul edilir.
- Kaldırma açısı 90^0 olarak kabul edilir.
- Kaldırılan kama şeklindeki toprak parçasının kütlesi ihmal edilir.
- Adhezyon ve toprak-takım arasındaki sürtünme kuvvetleri hesaba katılmaz

Yüzeysel ve derin toprak işleme için iki ayrı denklem geliştirilmiştir. Shen ve Kushwaha'ya göre, bu eşitlikler çok sert bir toprak olmaması durumunda yaklaşık sonuçlar vermektedir.

3.1.3.3 Hettiaratchi-Reece modeli

O'Callaghan- Farrelly modelinden üç yıl sonra Hettirachi ve Reece (1967), bu modele bazı açılardan benzeyen farklı bir model geliştirmişlerdir. Kritik derinliğin altında takım ve aykırı iki bozunma bölgesi olduğu varsayılmıştır. Bu modelde takım-toprak ön bozunma kuvvetlerinin hesaplanmasında iki boyutlu denklemler kullanılmıştır. Merkezden uzaktaki enine bozunmalar için de üç boyutlu denklemler kullanılmıştır.



Şekil 3.3 : Hettiaratchi-Reece Modelindeki bozunma bölgeleri.

Aşağıdaki eşitlikler bir önceki modelle (O’Callaghan- Farrelly) aynı yolu kullanmışlardır. Fakat bu modelde kama içerisindeki toprak kütlesi göz önüne alınmıştır.

$$P_f = (\gamma Z^2 N_\gamma + C Z N_c + C_a Z N_a + Q Z N_q) w \quad (3.6)$$

$$P_s = [\gamma \left(d + \frac{q}{\gamma} \right)^2 w N_{sy} + c w d N_{sc}] K_a \quad (3.7)$$

$$H = P_f \sin(a + \delta) + P_s \sin a + C_a Z \cos a \quad (3.8)$$

$$V = P_f \cos(a + \delta) + P_s \cos a + C_a Z \quad (3.9)$$

P_f :İleri yöndeki bozunma kuvveti, N

P_s :Yanal yüzeylerdeki bozunma kuvveti, N

H :Takıma etki eden çeki kuvveti bileşeni, N

V :Takıma gelen kaldırma kuvveti, N

Z :Kesici aletin veya kesicinin derinliği, m

C :Kohezyon, N/m²

w :Kesici aletin veya kesicinin genişliği, m

D :Kesici aletin veya kesicinin etkin derinliği, m

Q :Aşırı yük basıncı, N/m²

a :Yataydaki eğim açısı

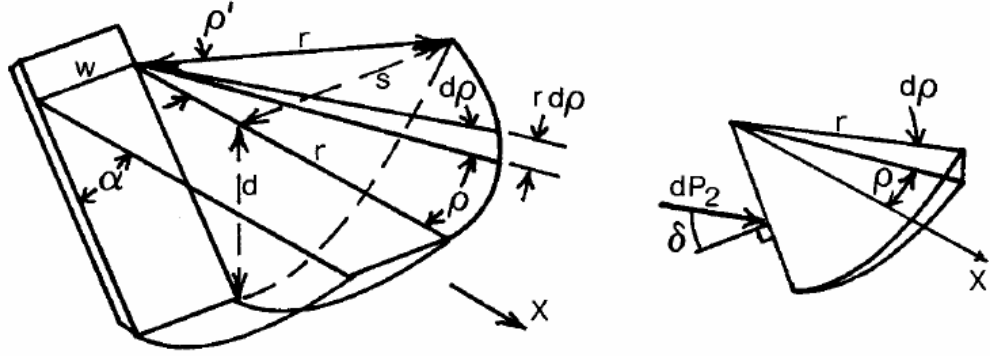
N_γ, N_c, N_q :Topraktaki sürtünme dayanımına, toprak geometrisi ve takım - toprak dayanım özelliklerine bağlı faktörler

Grisso ve Perumpral (1983)’e göre bu model aletin dik hali için bulunan kuvvet değerleri fazladır, fakat eğimli takımlarda daha düşük değerler hesaplamaktadır.

3.1.3.4 Godwin-Spor modeli

Godwin ve Spor (1977) takım tarafından hareket ettirilen toprak hacmini tahmin edebilmek için Şekil 3.4’ te gösterildiği gibi dairesel bir bozunma hilali önerdi. Hettiaratchi ve Reece metodundan olduğu gibi N faktörleri kullanılarak iki boyutlu bir hesaplama yapılmıştır. Sonuç olarak aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$p^1 = \cos^{-1}\left(\left(\frac{d}{r}\right) \cot \alpha\right) \quad (3.10)$$



Şekil 3.4 : Godwin ve Spoor üç boyutlu toprak-takım modeli.

$$H = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + C_a d N_{ca} + q d N_q) + (w + s) \sin(\alpha + \delta) + C_a d w \cot \alpha \quad (3.11)$$

$$s = r \sin p^1 = r \left(1 - \left(\frac{d \cot \alpha}{r}\right)^2\right)^{1/2} \quad (3.12)$$

H :Toplam takım çeki kuvveti, N

γ :Toplam toprak yoğunluğu, N/m³

g : Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²)

d :Toprak yüzeyinin altın toplam çalışma derinliği, m

C :Toprak kohezyonu, N/m²

C_a :Toprak-metal adhezyon, N/m²

q :Toprak yüzeyine dik etki eden aşırı yük basıncı, N/m²

w :Takım genişliği, m

N_γ, N_c, N_q :Topraktaki sürtünme dayanımına, toprak geometrisi ve takım - toprak dayanım özelliklerine bağlı faktörler

s :Her yanal hilalin nihai genişliği, m

α :Kaldırma açısı

δ :Toprak-metal sürtünme açısı

r :Yanal yüzeylerden kesici takım koparma mesafesi, m

N_{ca} :Toprak-metal adhesyonuna bağlı faktör,

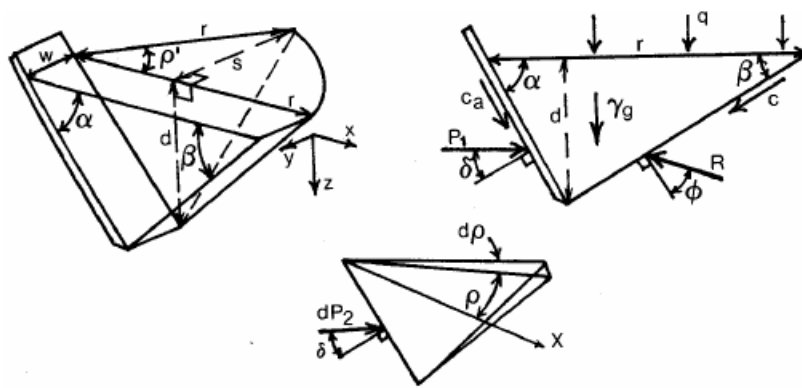
Ve ρ' aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\rho' = \cos - 1[(d / r) \cot \alpha] \quad (3.13)$$

Payne ve Tanner (1956)'e göre böyle bir modelde (d/w) oranının ve toprak dayanımının değişmesiyle 'r' değerinin değişmesi problemi vardır. Bu sorunu çözmek için araştırmacılar toprak işleme takımlarıyla kumsal topraklarda bazı testler yapmış olup kaldırma açısı (α), 'd/w' (narinlik) oranı, ve toprak çeşidine göre 'r' ve 's' değerlerini bulmaya çalışmışlardır. Takım açısıyla 'r/d' oranı arasındaki ilişkiyi gösteren bir grafik tanımlamışlardır. Fakat parçalanma mesafesi (r) halen bulunması zor bir değerdir (Shen ve Kushwaha ,1998).

3.1.3.5 Mckyes-Ali modeli

Mckyes ve Ali (1977) deneysel veri kullanmadan ince toprak işleme takımları için bir analitik model geliştirmişlerdir. Godwin ve Spor modeline bozunma bölgeleri oldukça benzerdir.



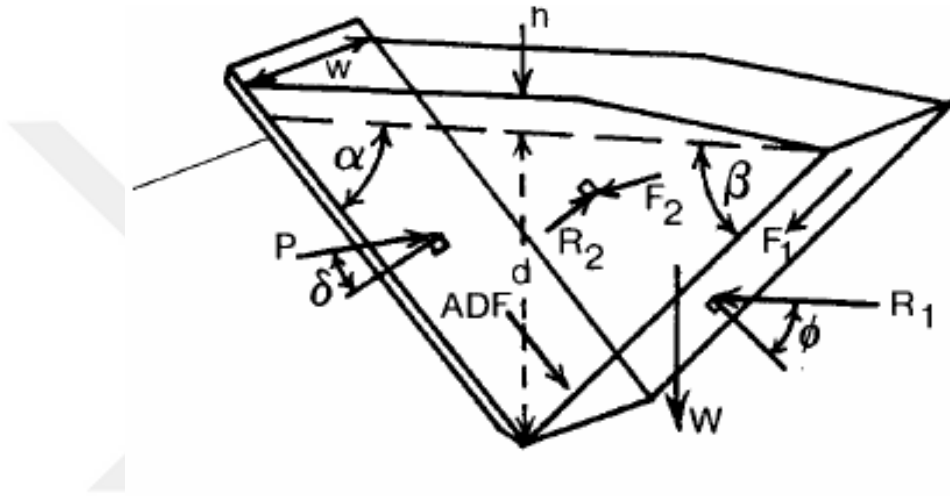
Şekil 3.5 : Mckyes ve Ali yönteminde üç boyutlu kesme modeli.

Bu model Godwin-Spor modeline göre daha basittir. Çünkü kopma mesafesinin bulunmasına gerek yoktur, N faktörleri bu modelde yeniden değerlendirilmiştir ve takım daraldığında N faktörlerinin arttığı bir teknik kullanılmıştır. Ek olarak $w = \infty$ olarak, araştırmacılar N faktörlerini, iki boyutlu durum için kullanılan N faktörleriyle karşılaştırmıştır. Düzgün kesici takım kullanımında sonuçların çok yakın olduğunun tespiti yapılmış, ancak $\alpha > 90^\circ - \phi$ koşulunda 2D toprak kesme durumu için kaba kesici takım için kullanıldığı kopma açısı ve N faktörlerinin daha yüksek olduğu

belirlenmiştir. Mckyes (1985) bazı eğim ve kopma açıları için ayrı çalışmalar yapmıştır.

3.1.3.6 Grisso ve diğerleri modeli

Godwin - Spoor ve Mckyes - Ali modellerindeki gibi bozunma bölgesinin değerlendirilmesine benzer bir şekle sahip olup, Grisso ve diğerleri. (1980) ve Perumpral ve diğerleri (1983), Şekil 3.6'da gösterildiği gibi merkez kamanın yan yüzeylerine etki eden kuvvetler eklemiştir.



Şekil 3.6 : Grisso ve diğ. Modeli.

Yanal iki kamanın ağırlığı ihmal edilmiş olup, merkez kamanın yan düzlemleri kayma düzlemi olarak varsayılmıştır. Bu nedenle, bu modelde bozunma bölgesi sadece merkez kamadan oluşmaktadır. Mckyes Ali modelinde olduğu gibi alt kayma yüzeyi düz olarak varsayılmıştır. Takım önündeki toprağın yukarı yönlü hareket ettiği varsayılır. Önceki iki modelde olduğu gibi N_c ve N_{ca} aynı değerdedir. Fakat N_y değeri, Mckyes ve Ali modelindeki yarısından daha küçüktür.

3.1.4 Dinamik modeller

Toprak işleme takımlarında ileriye yönlü artan hız, iki önemli etkiden dolayı kesme kuvvetlerinin dinamik etkileri çok önemli hale gelmektedir. Birincisi; takımın ileri yönündeki hareketinde toprak kütlelerinin devamlı ivme gereksinimidir. İkincisi ise yüksek kesme hızlarındaki toprak dayanımının değişmesidir. Deneyimler göstermektedir ki sürtünmeli topraklarda yani kumsal topraklarda toprak dayanımı kesme oranıyla değişkenlik göstermemektedir. Bu tarz topraklarda takım hızı

arttığında ataletsel kuvvetler en önemli faktördür. Öte yandan, killi topraklarda kesme hızını artırarak kesme dayanımında önemli değişiklikler olabilir, yüksek hızlarda toprak yapısındaki iç kuvvetler etkilidir. Aşağıdaki toprak kesilmesi için genel bir denklem oluşturulmuştur. N_a , farklı hızlardaki toprak ivmesi etkisiyle değişen toprak dayanımının, sabit toprak dayanımıyla karşılaştıran ek bir faktördür,

$$P = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + a d N_{ca} + q d N_q + \gamma v^2 d N_a) w \quad (3.14)$$

$$N_a = \frac{\tan \beta + \cot(\beta + \theta)}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi) (1 + \tan \beta \cot \alpha)} \quad (3.15)$$

γ :Toplam toprak yoğunluğu, N/m^3

g :Yerçekimi ivmesi, $9,81 m/s^2$

d :Toprak yüzeyinin altında toplam çalışma derinliği, m

c :Toprak kohezyonu, N/m^2

a :Toprak-metal adhezyonu, N/m^2

q :Toprak yüzeyine dik etki eden aşırı yük basıncı, N/m^2

w :Takım Genişliği, m

N_γ, N_c, N_q :Topraktaki sürtünme dayanımına, toprak geometrisi ve takım - toprak dayanım özelliklerine bağlı faktörler

N_{ca} :Toprak - metal adhesyon faktörü

α :Kaldırma açısı

δ :Toprak-metal sürtünme açısı

$\emptyset$:Toprağın iç sürtünme açısı

β :Toprak kama açısı

Mckyes - Ali modelini baz alan, iki dinamik model geliştirilmiştir :

1. Model : Swick - Perumpral (1988)

2. Model : Zeng - Yao (1992)

Şekil 3.7’de gösterilen Swick – Perumpral Modelinde yan hilallerin hesaplandığı bazı varsayımlar yapılmıştır.

$$P_x = P_g \sin \alpha + (P_{SH} + P_A) \cos \beta + P_f \cos \alpha + P_c \quad (3.17)$$

Bu elemanlar sırası ile ;kesici uç boyunca etki eden toprağın basma kuvveti, yan kenar kesme kuvveti, ivmeden dolayı toprak oluşan atalet kuvvetleri, alt yüzeyin kesme kuvveti ve kesme takımı yüzeyine etkiyen sürtünme kuvvetleridir.

3.1.5 Analitik modellerin eksiklikleri

Analitik modellerin yakın sonuçlar vermesine rağmen, hala bazı eksiklikleri vardır.

- LDM kullanan analizlerde toprak bozunma profili varsayımı yapılması gereklidir. Bu nedenle her araştırmacı farklı profiller kullanmıştır. Bu da sonuçları etkilemektedir.
- Analitik yaklaşımda toprağın farklı katmanlarında aynı mekanik özellikler olduğu kabul edilmiştir. Fakat bu gerçek tarım alanlarında çok da gerçekçi değildir.
- Bağımsız değişken takım hızlarında, toprak bozunma örüntüsü tanımlanması gerçek duruma göre farklıdır.
- Çoğu basitleştirmeler sonucunda hesaplama hataları meydana gelebilmektedir.

3.2 Numerik Yöntemler

Toprak–takım ilişkisinin modellenmesinde ve toprağın kesilme mekanizmasının anlaşılmasında numerik metodlar oldukça yararlıdır. Karmakar ve Kushwaha (2006) toprağın kesilmesinin modellenmesinde üç farklı numerik yöntemden bahsetmişleridir. Bunlar; sonlu elemanlar metodu (FEM), ayrık elemanlar metodu (DEM) ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD)'dir. Ayrık elemanlar metodu, gelecek vaadeden yüksek doğrulukta sonuç verebilen takım-toprak ilişkisini modelleyebilmektedir (Shmulevich, 2010). Fakat, toprak boşluk oranının kontrol edilmesi ve parçacıkların şekli için model parametrelerinin belirlenmesi, buna benzer olarak kırılmanın modellenmesi , yığınların formasyonları ve geometrik şekilleri, kalıntı önemli değişiklikler DEM metodunun gerçek mühendislik problemleri konusundaki kısıtlarıdır. (Abo Al-Kheer ve diğerleri, 2011b). Hesaplamalı akışkanlar mekaniği de takım – toprak ilişkisinin modellenmesinde kullanılan bir diğer yöntemdir (Karmakar and Kushwaha, 2006). CFD yöntemi kullanılarak toprağın dinamik davranışı simülasyonu, çeki kuvvetinin ve gereken enerjinin azaltılması için farklı

takım geometrilerinin farklı hızlarında optimizasyonu yapılabilmektedir. Bu modellemeyi ise farklı toprak visko-plastik parametrelerinde yapabilmektedir. Diğer taraftan; sonlu elemanlar yöntemi, toprak işleme takımı tasarımlarında ve toprak–takım ilişkisinin modellenmesinde sıklıkla kullanılmıştır. FEM, toprak sıkılaşması (pekleşmesi), takıma etkiyen kuvvetler, topraktaki gerilme dağılımları ve toprak bozunma dokusu konusundaki çalışmalara oldukça uygundur. Fakat; sonlu elemanlar metodunda devamlılık varsayımlarında, toprakta çatlak ilerlemesi bulunamamaktadır (Jafari et al., 2006). Deneysel olarak ölçülmesi zor olan parametreler FEM yöntemi ile daha kolay bir şekilde elde edilebilmektedir. Yong ve Hanna (1977) iki boyutlu toprak kesme bıçağını sonlu elemanlar ile modellemiş daha sonra ise Liu Yan, HouZhi-Min (1985) ve Chi, Kushwaha (1987, 1989) üç boyutlu durumlar için sonlu elemanlar metodunu uygulamışlardır. Diğer taraftan sonlu elemanlar metodu toprak kesme durumundaki plastik deformasyonları da modelleyebilmektedir.

Toprak işleme tarım makinalarının performansı büyük oranda toprak mekaniğine bağlıdır. Toprak işleme durumunda toprağın bozunma dokusu mekanik davranışları belirlemede önemli etmenlerden biridir. Yapılan çalışmalarda toprağın altı farklı bozunma dokusu olduğu belirlenmiştir. Bunlar; patlama, gevrek, talaş formunda, eğilme, akma ve eğilerek akma ‘dır (Elijah ve Weber, 1971; Rajaram ve Gee-Clough, 1988; Rajaram ve Erbach, 1996; Tagar et al., 2014). Patlama bozunması genelde kuru topraklarda takım önündeki toprak kütlesi ezildiğinde meydana gelmektedir (Rajaram, 1990). Gevrek bozunma ise nemli topraklarda çekme çatlak ilerlemesi nedeniyle meydana gelmektedir (Chandler, 1984; Hatibu, 1987). Talaş formunda toprak bozunması plastik şekil değişiminde suya doymamış topraklarda ve metallere talaş kaldırıldığı zamanki şekle benzer olarak meydana gelmektedir (Rajaram ve Erbach, 1996; Rajaram ve Gee-Clough, 1988). Akış tipi bozunma suya doymuş toprak koşullarında toprağın salt yerdeğiştirmesinin olduğu durumlarda meydana gelmektedir (Rajaram ve Erbach, 1996). Eğilme bozunmasında, akma bozunmasına benzetmekle birlikte dikey yönde daha fazla birim şekil değişimi gözlenmektedir (Elijah ve Weber, 1971). Eğilerek akma bozunması, toprağın yapışma noktası etrafında olmaktadır. Ayrıca elemanların birim şekil değişimi olmaması yönüyle akış tipi bozunmaya benzetilmektedir.

3.2.1 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi (CFD)

CFD yönteminin kullanığı en önemli denklemlerden bir tanesi süreklilik denklemleridir. Kütlenin korunumuna göre; V kontrol hacminin S yüzeyinden birim zamanda çıkan net kütle miktarı, V kontrol hacmindeki kütle miktarının birim zamandaki değışimine eşittir.

Newton'un ikinci yasasına göre de dış kuvvetler toplamı , momentumun birim zamandaki değışimine eşittir. Viskoz kuvvetler, basınç ve yerçekimi kuvvetleri dış kuvvetlerdir. Sistem küçük diferansiyel akış elemanlarına bölündüğünde eleman yüzeylerine gelen kuvvetler bulunabilir. Diferansiyel akış elemanına etkiyen kuvvetler kartezyen koordinatlarda gösterilebilir. Her bir eleman yüzeyine etkiyen kuvvetler kesme ve normal bileşenlerine bölünerek gösterilebilir. Newtoniyen akışkanlar için viskoz kuvvetlerin bünye denklemleri yeniden yazılıp Newton'un ikinci yasası uygulandığında üç farklı denklem elde edilir. Bu denklemler Navier-Stokes denklemleri olarak bilinir. Sıkıştırılabilir akışlar için bu denklemler;

$$\rho \frac{D_u}{Dt} = \rho g_x - \frac{dp}{dx} + \frac{d}{dx} \left[\mu \left(2 \frac{du}{dx} - \frac{2}{3} \left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) \right) \right] + \frac{d}{dy} \left[\mu \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \right] + \frac{d}{dz} \left[\mu \left(\frac{dw}{dx} + \frac{du}{dz} \right) \right] \quad (3.18)$$

$$\rho \frac{D_v}{Dt} = \rho g_y - \frac{dp}{dy} + \frac{d}{dy} \left[\mu \left(2 \frac{dv}{dy} - \frac{2}{3} \left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) \right) \right] + \frac{d}{dy} \left[\mu \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \right] + \frac{d}{dz} \left[\mu \left(\frac{dw}{dx} + \frac{du}{dz} \right) \right] \quad (3.19)$$

$$\rho \frac{D_w}{Dt} = \rho g_z - \frac{dp}{dz} + \frac{d}{dz} \left[\mu \left(2 \frac{dw}{dz} - \frac{2}{3} \left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) \right) \right] + \frac{d}{dy} \left[\mu \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \right] + \frac{d}{dz} \left[\mu \left(\frac{dw}{dx} + \frac{du}{dz} \right) \right] \quad (3.20)$$

Süreklilik denklemleri ve Navier–Stokes eşitlikleri CFD yönteminin temelini oluşturmaktadır. ‘P’, ‘u’, ‘v’ ve ‘w’ bilinmeyenler olup nonlineer, ikinci dereceden ve parçalı diferansiyel denklemler olmak üzere farklı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

CFD ile toprak takım modellenmesinde dikdörtgen prizmanın içerisinde takım geometrisinin çıkarılmasıyla elde edilen çözüm ağında hesaplama yapılır.

Navier- Stokes denklemleri herhangi bir akış hesaplaması için uygundur. Kontrol hacmindeki kütle korunumu ve süreklilik denklemleri göz önünde bulundurulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (3.21)$$

ρ : Akışkan yoğunluğu, kg/m^3

U_i : Akışkanın çizgisel hızı, m/s

x_i : Akışkan elemanın yer değişmesi, m

t : Zaman, s

Toprak, sabit yoğunlukta sıkıştırılmaz olarak kabul edildiğinde bu denklem aşağıdaki hale dönüştürülebilir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (3.22)$$

Akışkan elemanın ivmelenmesi, Newton'un ikinci yasasına uygulandığında aşağıdaki momentum eşitliği elde edilir.

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.23)$$

g : Yerçekimi ivmesi, m/s^2

p : Hidrostatik basınç, Pa

τ_{ij} : Kesme gerilme tensörü, Pa

Malzemenin genel denklemi zamana ve yerdeğiştirmeye bağlı olarak aşağıdaki şekilde olur.

$$\frac{DU}{Dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + U_j \frac{\partial U}{\partial x_j} \quad (3.24)$$

Yukarıdaki eşitlikte akış elemanın ivmesi; yerçekiminden kaynaklanan kuvvet, hidrostatik basınç ve viskoz gerilme toplamına eşittir. Bu şekilde, toprak işleme takımının hızı, ivmesi, takım yüzeyine etkiyen toprak basıncı ve toprak bozunması konularında kullanılabilir.

Bingham malzeme modeli için türetilen aşağıdaki bünye denklemleri momentum eşitliğinde kesme gerilme tensörünü vermektedir.

$$\tau_{ij} = \tau_y + \mu \dot{\gamma} \quad ; \quad |\tau_{ij}| > \tau_y \quad (3.25)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad ; \quad |\tau_{ij}| \leq \tau_y \quad (3.26)$$

τ_{ij} : Kesme Dayanımı, Pa

$\dot{\gamma}$: Kesme hızı, $[1/s]$

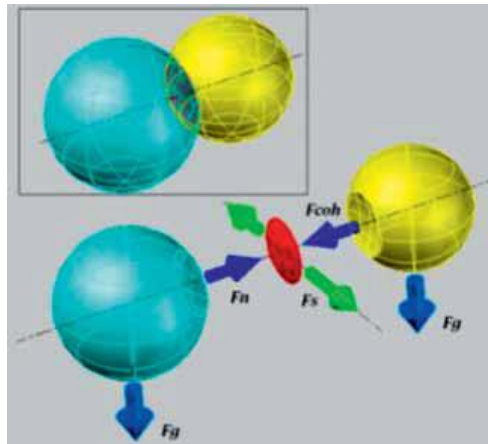
τ_y : Akma Dayanımı, Pa

μ : Viskozite, $Pa.s$

Toprak işleme sırasında takımın yarattığı basınç, toprak akma dayanımını geçmeden toprakta herhangi bir bozunma olmaz. Bu nedenle; eşik akma dayanımını geçtikten sonraki toprağın kesilmesi durumunda toprağın viskoplastik akması gerçekleşir. Bu işlemin nümerik hesaplanması, sonlu hacimler metodunda olduğu gibi ayrıştırma, grid üretimi, akışkan özelliklerine göre denklemlerin çözülmesi adımlarıyla gerçekleşmektedir.

3.2.2 Ayrık elemanlar yöntemi (DEM)

Cundall ve Strack (1979)'ın bulduğu bu yöntem ile farklı geometrik şekilli örneğin dairesel şekilli taneciklerden yararlanarak modelleme yapmayı sağlayan bir sayısal çözümleme yöntemidir. Bu yöntemde parçacıkların birbirleri ile etkileşimi, dış kuvvetlerin dengesi sağlanana kadar ki geçiş (transient) problemdir. Her zaman adımında temas yüzeylerindeki kuvvet dengeleri ve parçacıklar üzerindeki gerilmelerin yerdeğiştirmeleri bir dizi hesaplamalar sonucunda bulunarak parçacık konumları bulunmaktadır. Her zaman adımında parçacıkların hız ve ivmeleri sabit kabul edilmektedir. Toprak-takım ilişkisinin DEM ile modellenmesinde toprak-toprak ve toprak-takım olmak üzere iki farklı temas çeşidi kullanılmaktadır. İki çeşidin de hesaplama şekli aynıdır. Sadece toprak parçacıklarının arzu edilen değerlerine göre regresyon denklemleri farklılık gösterir. Elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν), kohezyon (C), adhezyon (c_a), içsel sürtünme kuvveti (ϕ), ve metal-toprak yüzeyi sürtünme kuvveti (δ) önemli parametrelerdir. Normal kuvvetler, kesme kuvvetleri, yerçekimi, kohezyon ve sürtünme kuvvetleri Şekil 3.9' da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : İki parçacık arasındaki kuvvet dengesi.

Normal yöndeki kuvvet aşağıdaki denklemle hesaplanabilir.

$$F_n = k_n \cdot \Delta U_n + \eta_n (\Delta U_n / \Delta t) \quad (3.27)$$

Bu denklemde; k_n normal yay sabiti, ΔU_n ise normal örtüşme varyasyonunu, η_n viskoz sönümlemeyi, Δt ise de adım zaman değişimini göstermektedir.

Yay sabitini bulmak için, elastik özellikleri ve boyutsal değerleri içine alan aşağıdaki denklem türetilir.

$$k_n = \frac{E_{ab} \cdot A_{int}}{D_{eq}} \cdot \left[\frac{1 + \alpha_k}{\beta_k \cdot (1 + \theta) + \gamma_k \cdot (1 - \alpha_k)} \right] \quad (3.28)$$

E_{ab} , temas halindeki iki parçacığın eşdeğer elastiklik modülünü, A_{int} , temas alanını, D_{eq} , iki nesne arası eşdeğer mesafeyi göstermektedir. Denklemin diğer tarafındaki poisson oranını ile alakalı olan kısım da ise α_k , yükleme rotası katsayısını, β_k , gevşeme faktörünü ve γ_k , ise etkileşim oranını temsil etmektedir.

Temas yüzeyine teğet kuvvetler de aşağıdaki denklemle hesaplanabilir.

$$F_s = k_s \cdot \Delta U_s + \eta_s (\Delta U_s / \Delta t) \quad (3.29)$$

Yukarıdaki denklemde k_s , kesme yay sabiti, ΔU_s , teğet örtüşme varyasyonu, η_s ise teğet yöndeki viskoz sönümü ifade eder. k_s 'nin k_n 'e göre ifadesi şöyledir.

$$k_s = k_n \left(\frac{1 - \alpha_k \theta}{1 + \theta} \right) \quad (3.30)$$

Teğet yöndeki viskoz sönüm oranı da;

$$\eta = \beta \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{m_a m_b}{m_a + m_b}} \quad (3.31)$$

β , viskoz sönüm katsayısı olup, m_a ve m_b ise temas halinde bulunan iki nesnenin kütleleridir.

Toprak Cauchy birim şekil değişiminin üzerinde örtüşme artarsa, parçaları birbirine tutunduran kohezyon kuvveti etki etmektedir. Mikro düzeyde sürtünme ve kohezyon aşağıdaki güç ilişkisinin enterpolasyonu ile bulunabilir.

$$\phi_c = \frac{c(\tan \phi \mu)^{k_4}}{k_3} \quad (3.32)$$

C, laboratuvar deneylerinde bulunan iki nesne arasındaki kohezyondur. $\phi\mu$, ise mikro sürtünme kuvveti olup k3 ve k4 porozite ve parçacık büyüklüğüne bağlı olarak değişen malzeme katsayılarıdır.

3.2.3 Sonlu elemanlar metodu (FEM)

Sonlu elemanlar methodu, kompleks elastisite ve yapısal analiz problemlerinin çözülmesinde kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözülen herhangi toprak bozunma problemi uygulanan kuvvet ve topraktaki sonuç birim şekil değiştirmeleri arasındaki bünyesel ilişkiyi kullanır. Lineer ve lineer olmayan modellerde gerilme ve birim şekil değişimi arasındaki ilişki farklıdır. Plastisite teorisine göre toprak sadece elastik, sadece plastik ya da hem elastik hem de plastik özellikler gösterebilir. Ayrıca toprak davranışı dinamik olarak zamana göre değişkenlik göstermektedir. Toprak–takım ilişkisi üzerine bol miktarda araştırma yapılmıştır. Yong ve Hanna (1977) bir bıçak ile toprak kesme olayını FEM ile modellemişlerdir. Takım genişliği doğrultusunda birim şekil değişimini ihmal edip, sadece düzlemsel birim şekil değişimi durumunu iki boyutlu şekilde modellemişlerdir. Bu çalışmada killi toprakta bıçak ile sürekli toprak kesme olayı simule edilmiş olup, mümkün olan toprak bozunma bölgeleri, toprak kesme gerilmesinin üzerinde gerilmeye maruz kalan bölgeler de gözlemlenmiştir. Toprağın deformasyon alanları, teğet ve normal kuvvetleri, bıçağın maruz kaldığı basınç hesaplanmıştır.

Kushwaha ve Shen (1995)’de toprak-takım ilişkisini dinamik olarak iki boyutta modellemiş olup, takıma etki eden çeki kuvvetini ve dikey yönlü kuvvetleri hesaplamışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bu çalışma, deneysel testlerle karşılaştırılmış olup, sonuçlar oldukça yakın çıkmıştır. Bu nedenle, herhangi farklı geometrideki toprak işleme takım ile toprak ilişkisi sonlu elemanlar yöntemiyle modellenenilmektedir.

Yine aynı şekilde Rosa ve Wulfsohn (1999) tarafından sonlu elemanlar metodu ile toprak işleme takımı – toprak ilişkisi yüksek hızlarda (0.5–10 m/s) modellenmiş olup, düz ve üçgen kenarlı iki farklı takımda çözümlenmiştir. Çözüm için bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar;

- Sabit derinlik ve sabit hız,
- Üç boyutta bozunma,

- Toprak işleme takımı rijit,
- Toprak- takım etkileşim yüzeyi yüzeyi tamamen pürüzsüz,
- İzotropik ve homojen toprak yapısı,
- Parçalı kütle etkisi (lumped mass system), yerçekimi etkisi, toprak ataleti ve pekleşme etkisi ihmal,

Hesaplanan çeki kuvveti 2.8 [m/s] hızda ölçülen değerle %1 az çıkmasına rağmen, 8.4 [m/s] hızda %25 daha az çıkmıştır. Deney sonuçlarına göre üçgen kenarlı takıma etkiyen kuvvet düz yüzeyli takıma etkiyen kuvvetten daha azdır. Ayrıca yoğrulmuş toprak numunesi viskoz akışkan gibi davranmıştır.

Chi ve Kushwaha (1991) da sonlu elemanlar metodu ile lineer olmayan üç boyutlu toprak–takım ilişkisi çalışması yapmışlardır. Bu çalışmanı en önemli faydalarından biri takım üzerindeki aşınma ve sürtünme etkisinin toplam çeki kuvvetine etkisinin anlaşılmasıdır. Deneyler ile bu çalışma doğrulanmıştır. Çeki kuvvetleri farklı talaş açılılarıyla hesaplanmıştır. Deneysel ve teorik hesaplamalar sonucunda 45⁰'nin altındaki kaldırma açısı azalması ile çeki kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Deneysel verilerle karşılaştırıldığında; 45⁰'nin altındaki hesaplamalarda yaklaşık %0.8 hata olurken, 90⁰'lik kaldırma açısında %10.5 hata olmuştur. Ayrıca iş derinliği arttıkça takıma etkiyen kuvvetin arttığı gözlemlenmiştir.

Gerçek toprak işleme takımlarıyla ilgili çok fazla çalışma yapılmamış olmasına karşın Mouazen and Nemenyi (1999) homojen olmayan kumsal killi toprakta çizel pulluğu üç boyutlu olarak sonlu elemanlar metodu ile modellemiştir. Toprak modellenmesinde, 8 düğümlü altı yüzlü (8-node brick element) eleman kullanılmış ve elastik-mükemmel plastik malzeme olduğu varsayılmıştır. Drucker-Prager akma kriterine göre malzemenin akacağı varsayılmıştır. Dört farklı geometri sonlu elemanlar metodu ile çözülmüş ve toprak- takım arasındaki sürtünmenin Coulomb kriterine göre olacağı varsayılmıştır. Tüm geometrilerde laboratuvar testlerine göre %11 - %16.8 arasında daha yüksek çeki kuvveti değerleri elde edilmiştir.

Plouffe ve diğerleri (1999) kulaklı pulluğu üç boyutlu olarak sonlu elemanlar metodu ile simule etmiştir. 100 [mm], 150 [mm] ve 200 [mm] iş derinliğinde 0.25 [m/s], 1 [m/s] ve 2 [m/s] olmak üzere 3 farklı hızda çalışma yapmıştır. Pulluk kulağına bağlı üç eksenli dinamometreler , takımı dikey ve yatay yönde hareket ettirecek iki hidrolik

silindir ile yaptığı deneylerde Sainte-Rosalie killi toprağı (53% kil, 27% silt, 20% kum, and 2.97% organik madde) kullanımıştır. Sonuçlara göre toprak sürme yönündeki kuvvetler büyük oranda doğrulanmış olup dikey yönlü kuvvetler önemli ölçüde düşük çıkmıştır. Deneyisel ve numerik sonuçlar iş derinliğinin ve operasyonel hızın artmasıyla dikey yönlü kuvvetin arttığını göstermiştir.



4. TOPRAK-TAKIM ETKİLEŞİMİNİN ANALİTİK YÖNTEMLER İLE HESAPLANMASI

Çeki kuvveti, bir aleti ilerleme yönünde yatay olarak çekmek için gerekli kuvvet olarak tanımlanır. Çeki kuvveti toprak işleme çalışmalarında güç gereksinimini hesaplamak için makine seçiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Çiftlik yöneticileri veya danışmanları yakıt gereksinimini tahmin etmek ve alet-traktör eşleşmesi yapmak için çeki kuvveti veya güç verilerini kullanırlar. Aynı zamanda hem traktörün hem de aletin işletme masrafları doğru çeki kuvveti değerlerinin elde edilmesiyle en aza indirilebilir. Alet seçimindeki bilgi eksikliğinden dolayı çiftçiler, hatalı tarım aleti seçimi yapabilmektedirler. Bu nedenle aletin çeki gereksinimini tahmin etmek traktör-alet eşleşmesinde ve tahmini yakıt tüketiminin belirlenmesinde çok önemlidir.

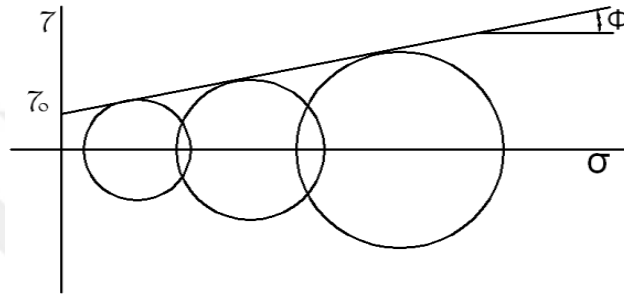
Yapılan birçok çalışmada kulaklı pulluk çeki kuvvetinin toprak özelliklerinin, çalışma parametrelerinin ve kulaklı pulluk geometrik özelliklerinin bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Çeki kuvvetini belirlemede oluşturulacak model, bu toprak,alet karakteristik özelliklerini yansıtmalıdır.

4.1 Çeki Kuvvetine Etki Eden Toprak Mekanik Özellikleri

Toprak deformasyonu esnasında kulaklı pulluk çeki kuvveti toprak kütlesinin göstereceği dirençle azalır veya artar. Bu nedenle toprak mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu özelliklerden bilinmesi gereken en önemli özellikler toprak hacim ağırlığı, toprak kohezyonu, toprak iç sürtünme açısı, toprak-metal sürtünme açısıdır.

Toprak hacim ağırlığı kuru toprağın birim hacminin kütlesi olarak tanımlanır. İdeal toprak hacmi %50 toprak partikülleri ve %50 boşluk içerir. Böyle bir toprağın hacim ağırlığı yaklaşık 1.3 Mg/m³ tür. Sıkışık toprağın hacim ağırlığı ise yaklaşık 2 Mg/m³ veya daha büyüktür. Genelde tarım toprakların hacim ağırlığının 0.9 ile 1.8 Mg/m³ arasında değiştiği belirtilmiştir.

Toprak kohezyonu ve toprak iç sürtünme açısı Mohr-Coulomb teorisi yardımıyla ifade edilebilir. Birçok durumda toprak kitleleri kayma ile değişme gösterdiğinden kayma mukavemetinin bilinmesi önemlidir. Kayma mukavemetine en güzel yaklaşım ise Mohr-Coulomb teorisi yardımıyla olmakta ve burada σ ile arasındaki fonksiyonel ilişki incelenmektedir. Aynı malzeme üzerine bir dizi gerilme uygulandığında ve bu durum Şekil 4.1’ de görüldüğü gibi Mohr daireleri bir dizi şeklinde çizildiğinde, bu dairelere teğet olan doğruya Mohr zarfı adı verilir ve kayma mukavemeti kriteri olarak kullanılır.



Şekil 4.1 : Mohr Gerilme Dairesi.

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (4.1)$$

Burada;

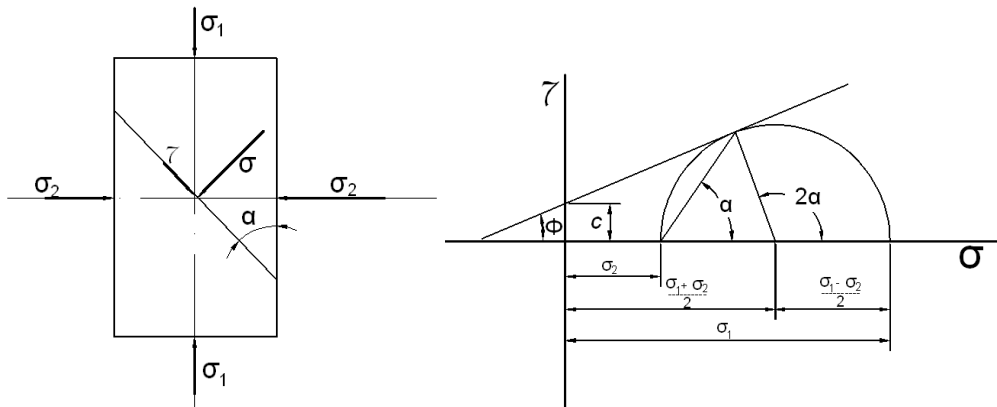
τ :Maksimum kayma gerilmesi, kPa

C :Toprak kohezyon katsayısı, kPa

σ :Kayma yüzeyine dik efektif normal gerilme, kPa

ϕ :Toprak iç sürtünme açısı, °

ϕ ve C değerleri Mohr dairesinde gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Mohr dairesi ile kohezyon (a) ve iç sürtünme açısı (b).

Toprak-metal sürtünme açısı ve adezyon, toprak kohezyonunu ve toprak iç sürtünme açısının belirlendiği gibi Mohr-Coulomb teorisi yardımıyla ifade edilmektedir.

$$\tau = a + \sigma \tan \delta \quad (4.2)$$

Burada

τ :Maksimum kayma gerilmesi, kPa

a :Toprak adhezyon katsayısı, kPa

σ :Kayma yüzeyine dik efektif normal gerilme, kPa

δ :Toprak-metal sürtünme açısı, °

Mohr zarfı direkt kayma testi ile bulunabilir. Toprak-metal sürtünme açısı kullanılan malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, çelikte kumlu tınlı toprağın sürtünme açısı 20-22 derece iken boyalı yüzeyde bu 15° dir. Desbiolles ve diğ. (1997) kumlu-tınlı toprağın kohezyon değerini 8.9 kPa, toprak iç sürtünme açısını 23.3°, adhezyon değerini 0 kPa ve toprak-metal sürtünme açısını çelik için 18.8° olarak belirlemiştir. Benzer Çekilde Mouazen ve Nemenyi (1999) kumlu-tınlı toprağın kohezyon değerini 15.5 kPa, toprak iç sürtünme açısını 31.8°, adhezyon değerini 0 kPa ve toprak-metal sürtünme açısını çelik için 23° olarak belirlemiştir. Çizelge 4.1’de toprak tiplerine göre toprak-metal sürtünme açıları ve toprak adezyonunun tipik değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Toprak tipine göre toprak iç sürtünme açıları, toprak kohezyonu, toprak-metal sürtünme açıları ve toprak adezyon değerleri.

	Kumlu Tınlı Toprak	Tınlı Toprak	Killi tınlı toprak
Kohezyon (kPa)	10	20	30
İç sürtünme açısı (°)	35	20	10
Toprak-metal sürtünme açısı (°)	22	10	6
Adezyon (kPa)	0	0	0

4.2 İlerleme Hızının ve İş Derinliğinin Çeki Kuvvetine Etkisi

Çeki kuvvetinin bir fonksiyonu olarak ilerleme hızı ve iş derinliği, hem tarla şartlarında hem de laboratuvarlarda toprak işleme aletlerini değerlendirmek için önemli bir kriterdir. Bu nedenle yapılan çeki kuvveti denemelerinde farklı ilerleme hızlarının ve iş derinliklerinin çeki kuvvetine olan etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalarda kulaklı pulluk çeki kuvvetinin iş derinliği ile lineer, ilerleme hızı ile de kuadratik bir ilişkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Summers et al., 1986; Harrigan ve Rotz, 1995; Al-Suhaibani ve Al-Janobi, 1997). ASAE Standartları 1983’de ilerleme hızına bağlı olarak kulaklı pulluk özgül çeki kuvveti değerleri ve ASAE standartları 1999’da farklı toprak tipleri için kulaklı pulluk çeki kuvvetini belirlemek için eşitlikler verilmiştir.

Çizelge 4.2 : ASAE Standartlarına göre (1983) farklı toprak tiplerinde kulaklı pulluk özgül çeki kuvveti değerleri.

Toprak Tipi	Özgül çeki kuvveti, N/cm ²
Siltli Killi	$4.8 + 0.024v^2$
Tınlı	$3 + 0.02v^2$
Kumlu Siltli	$3 + 0.032v^2$
Kumlu Tınlı	$2.8 + 0.013v^2$
Kumlu	$2 + 0.013v^2$

$$D = Fi[A + B(v) + C(v^2)]WT \quad (4.3)$$

Burada,

D :Çeki kuvveti, N

Fi :Çalışılan toprak tipine bağlı olarak değişen boyutsuz değer

i :İnce topraklar için 1, orta topraklar için 2 ve kaba taneli topraklar için 3

A, B, C : Kulaklı pulluk parametreleri (Çizelge halinde bu değerler ASAE Standartları 1999’da verilmiştir).

V :İlerleme hızı, km/h

W :Alet iş genişliği, m

T :Alet iş derinliği, cm

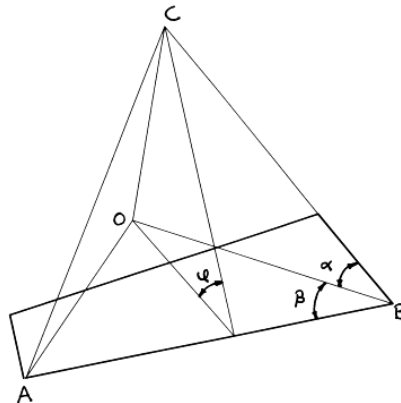
Çizelge 4.3 : ASAE D497.4 standardı çeki kuvveti hesaplama değerleri.

Takım	Birim	Makina Parametreleri			Birim	Toprak Parametreleri			Tolerans
		A	B	C		F ₁	F ₂	F ₃	
Kulaklı Pulluk	m	652	0.00	5.1	Boyutsuz	1	0.7	0.45	±%40

Bu eşitlikler pratik ve tahmini bir çeki kuvveti değeri verebilir. Fakat daha hassas bir çeki kuvveti değeri belirlemek için ayrıntılara girmek gerekmektedir. Bunun için de çeki kuvvetine etki eden toprak özellikleri ve takım geometrik özelliklerin ayrıntılı olarak belirlenmesi gereklidir.

4.3 Kulaklı Pulluk Geometrik Özellikleri ve Kulağa Etki Eden Kuvvetler

Kulaklı pulluk; temelde toprağı parçalamak, kesmek ve döndürmek için tasarlanmış bir toprak işleme aleti olup tasarımında bu parametreler dikkate alınmaktadır. Kulaklı pullukta çalışma yüzeyi iki ana parçadan oluşur. Bunlar uç demiri ve kulaktır. Uç demiri silindirik veya düz bir yüzeye sahip olabilir. Kulak ise genelde silindroid bir yüzeye sahip karmaşık geometrili bir yüzeydir. Toprak işleme prosesinde genelde bu iki parçanın geometrik yapısı kulaklı pulluğun iş kalitesini ve enerji tüketimini belirler. Uç demirinin görevi toprak şeridini yatay düzlem üzerinden keserek topraktan ayırıp kulağa doğru kaldırmaktır. Uç demiri üç temel açıya sahip olan bir uzay kama oluşturur (Şekil 4.3).

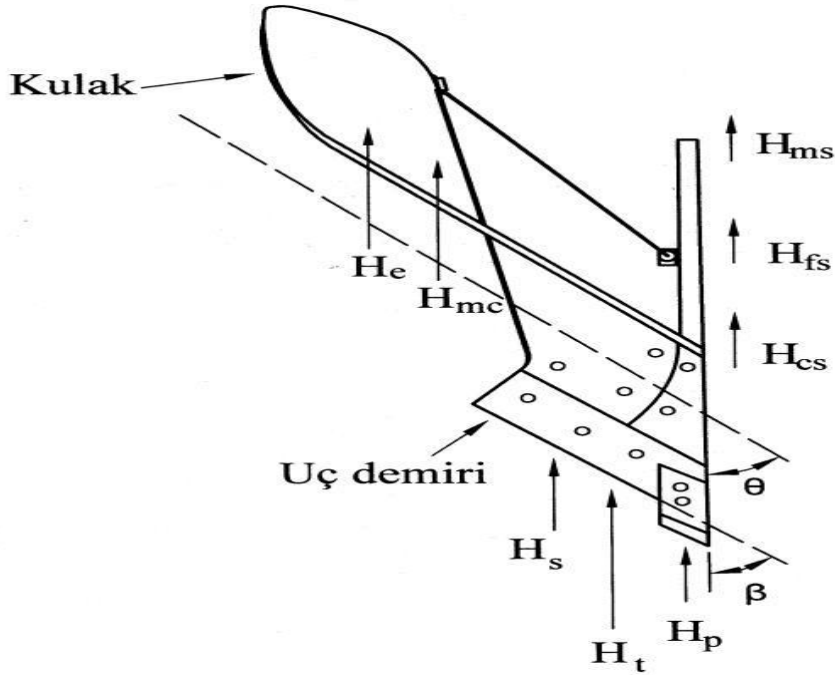


Şekil 4.3 : Eğik kama şeklindeki uç demiri açıları.

Bu açılar; α , uç demiri kaldırma açısı olarak adlandırılır ve yüzeyi toprağı yukarı kaldıracak şekildedir. β , uç demiri keskin kenar açısıdır ve kesme açısı olarak adlandırılır. ϕ , uç demiri keskin kenarına dik olan açıdır ve devirme açısı olarak adlandırılır. α , β ve ϕ açıları birbiriyle orantılıdır ve aralarındaki ilişki eşitlikte gösterilmiştir.

$$\tan \alpha = \tan \beta \sin \phi \quad (4.4)$$

Uç demiri açıları kulak tipine ve kullanım amacına göre değişir. Toprak işleme aletlerinin oluşturduğu çeki kuvvetini tahmin etmek için birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarda en basit bir toprak işleyici organdan kulaklı pulluğa kadar toprak işleme aletlerinin toprağı olan etkileri ve üzerlerine etki eden kuvvetler tespit edilmeye çalışılmıştır. Stafford (1984), Gee-Clough ve diğ. (1994), Wheeler ve Godwin (1996) ve Desbiolles ve diğ. (1997) yaptıkları çalışmalarda basit şekilli bir toprak işleme aletinin çeki kuvveti gereksinimini belirlemek için tahmini çeki kuvveti modelleri oluştururlarken, Qiong ve diğerleri. (1986), Saunders et al. (2000), Rucins ve Vilde (2005) ve Godwin ve O'Dogherty (2007) kulaklı pulluğı gelen kuvvetleri modellemeye çalışmışlar ve çeki kuvvetine etki eden parametreleri ortaya koymuşlardır. Şekil 4.4'de bir kulaklı pulluk üzerine gelen kuvvetler gösterilmiş ve çeki kuvvetinin belirlenmesi için gerekli eşitlikler verilmiştir.



Şekil 4.4 : Kulaklı pulluğı etki eden kuvvetler.

$$H_p = [(\gamma d_p^2 N_y + c d_p N_c) \left(w_p + 0.55 d_p \left(m - \frac{m-1}{3} \right) \right) + (\gamma N_a d_p / g) (w_p + 0.33 d_p)] \sin(a_p + \delta) \quad (4.5)$$

$$H_p = [(\gamma d_p^2 N_y + c d_p N_c) \left(w_p + 0.55 d_p \left(m - \frac{m-1}{3} \right) \right) + (\gamma N_a d_p / g) (w_p + 0.33 d_p)] \sin(a_p + \delta) \quad (4.6)$$

$$H_s = [(\gamma d_s^2 N_y + c d_s N_c + \gamma v^2 N_a d_s / g) w_s \sin(a_p + \delta) \sin \beta \quad (4.7)$$

$$H_{mc} = (\gamma / g) (w_p d_p + w_s d_s) v^2 (1 - (1 - \sin \theta \tan \delta) \cos \theta) \quad (4.8)$$

$$H_e = 2\gamma (w_p d_p + w_s d_s) d_s \quad (4.9)$$

$$H_{cs} = [(\gamma d_s^2 N_y + c d_s N_c + \gamma v^2 N_a d_s / g) w_s \sin(a_p + \delta) \cos \beta \tan \delta \quad (4.10)$$

$$H_{ms} = (\gamma / g) (w_p d_p + w_s d_s) v^2 \sin Q (1 - \sin \theta \tan \delta) \tan \delta \quad (4.11)$$

$$H_{fs} = 0.95 \gamma (w_p d_p + w_s d_s) \tan \delta \tan \delta_s \quad (4.12)$$

$$H_t = H_p + H_s + H_{mc} + H_e + H_{cs} + H_{ms} + H_{fs} \quad (4.13)$$

Burada;

H_t :Toplam çeki kuvveti, kN

H_p :Burun noktasında meydana gelen çeki kuvveti,kN

H_s :Uç demirinde meydana gelen çeki kuvveti, kN

H_{mc} :Kulakta meydana gelen çeki kuvveti, kN

H_e :Kulakta potansiyel enerjiden dolayı meydana gelen çeki kuvveti, kN

H_{cs} :Uç demiri ile çizi duvarında lateral kuvvetin etkisiyle sürtünmeden dolayı meydana gelen çeki kuvveti, kN

H_{ms} :Kulak ile çizi duvarında lateral kuvvetin etkisiyle sürtünmeden dolayı meydana gelen çeki kuvveti, kN

H_{fs} :Toprağın kulak üzerinde lateral hareketinden dolayı kulakta sürtünme kuvveti bileşenlerinin meydana getirdiği çeki kuvveti, kN

γ :Toprak hacim ağırlığı, $[kN/m^3]$

d_p :Uç demiri burun derinliği, m

C :Kohezyon, $[kN/m^2]$

w_p :Uç demiri burun genişliği, m

v :İlerleme hızı, m/s

g :Yerçekimi ivmesi, m/s^2

α_p :Uç demiri burun noktasındaki kama açısı, $^\circ$

α_s :Uç demiri kaldırma açısı, $^\circ$

δ :Toprak-metal sürtünme açısı, $^\circ$

δ_s :Toprak-toprak sürtünme açısı, $^\circ$

w_s :Uç demiri genişliği, m

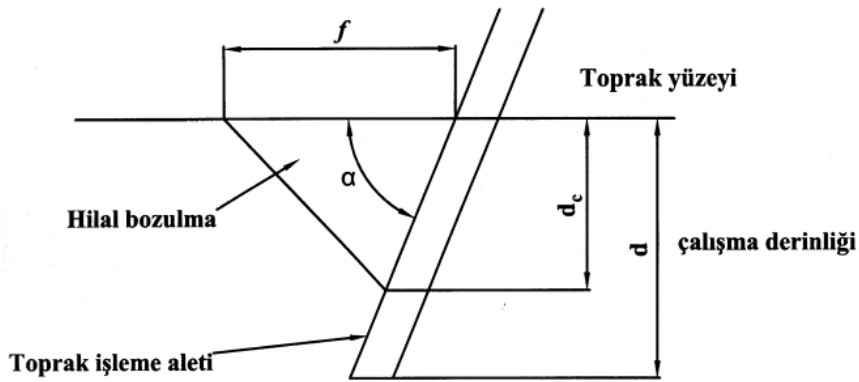
β :Uç demiri keskin kenar açısı, $^\circ$

θ :Ortalama kulak açısı, $^\circ$

m :Bozulma mesafesi oranı

N_γ, N_c, N_a :Toprak iç sürtünme açısı (ϕ) ve kaldırma açısına (α) bağlı olarak değişen boyutsuz faktörler.

“m” bozulma mesafe oranı çeki kuvvetini tahmin etmek için geliştirilen eşitliklerde kullanılmaktadır. Bir toprak işleme takımının toprak mekaniği açısından değerlendirilmesinde önem taşımaktadır. m değeri hilal şekli bozulma bölgelerinde hilal yarıçapının (f) kritik derinliğe (dc) oranıdır ($m = f/dc$) (Godwin ve Spoor, 1977; Kirişçi ve ark., 2000). Bu oran şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Bozulma mesafesi oranını gösteren bazı değerler.

$$F = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q) w \quad (4.14)$$

F ; toplam direnç kuvveti,

q ; toprak yüzeyine dik gelen basınç,

w ; alet iş genişliğidir.

[illegible]

Bu kuvvetlerin statik denge eşitlikleri yazılırsa,

$$\sum f_y = -F \cos(a + \delta) + c_a L_t \sin a - R \cos(\varepsilon + \phi) + c_L f \sin \varepsilon + W + Q = 0 \quad (4.16)$$

$$F = \frac{W+Q+cd[1+\cot\epsilon\cot(\epsilon+\phi)]+c_a d[1-\cot\alpha\cot(\epsilon+\phi)]}{\cos(\alpha+\phi)+\sin(\alpha+\epsilon)\cot(\epsilon+\phi)} \quad (4.17)$$
$$N_Y = \frac{\cot a + \cot \varepsilon}{2[\cos(a+\delta) + \sin(a+\delta)\cot(\varepsilon+\phi)]} \quad (4.18)$$

$$N_c = \frac{1 + \cot \varepsilon \cot(\varepsilon + \varnothing)}{[\cos(a + \delta) + \sin(a + \delta) \cot(\varepsilon + \varnothing)]} \quad (4.19)$$

$$N_q = \frac{\cot a + \cot \varepsilon}{[\cos(a+\delta) + \sin(a+\delta)\cot(\varepsilon+\phi)]} \quad (4.20)$$

45

Reece'in temel toprak hareket eşitliğine ek olarak McKyes (1985) toprak işleme aletinin yüksek ilerleme hızından dolayı meydana gelen dinamik kuvveti de dikkate almıştır. Bu durumda F değeri;

$$F = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q + \gamma v^2 d N_a) w \quad (4.21)$$

N_a değeri ise;

$$N_a = \frac{\tan \varepsilon + \cot(\varepsilon + \phi)}{[\cos(a + \delta) + \sin(a + \delta) \cot(\varepsilon + \phi)][1 + \tan \varepsilon \cot a]} \quad (4.22)$$

4.4 Sonuçlar

Pulluk kulağı-toprak etkileşiminde önceki bölümlerde açıklanan analitik hesap yöntemlerine göre operasyonel hız ve iş derinliği hariç diğer tüm parametreler sabit kabul edilerek hem operasyonel hızın hem de iş derinliğinin değişimine göre çeki kuvveti gereksinimi ayrı ayrı hesaplanmış olup “operasyonel hız-çeki kuvveti gereksinimi” ve “iş derinliği-çeki kuvveti gereksinimi” grafikleri aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.4.1 Analitik hesaplama ile pulluk kulağına etki eden çeki kuvvetinin tahmin edilmesi

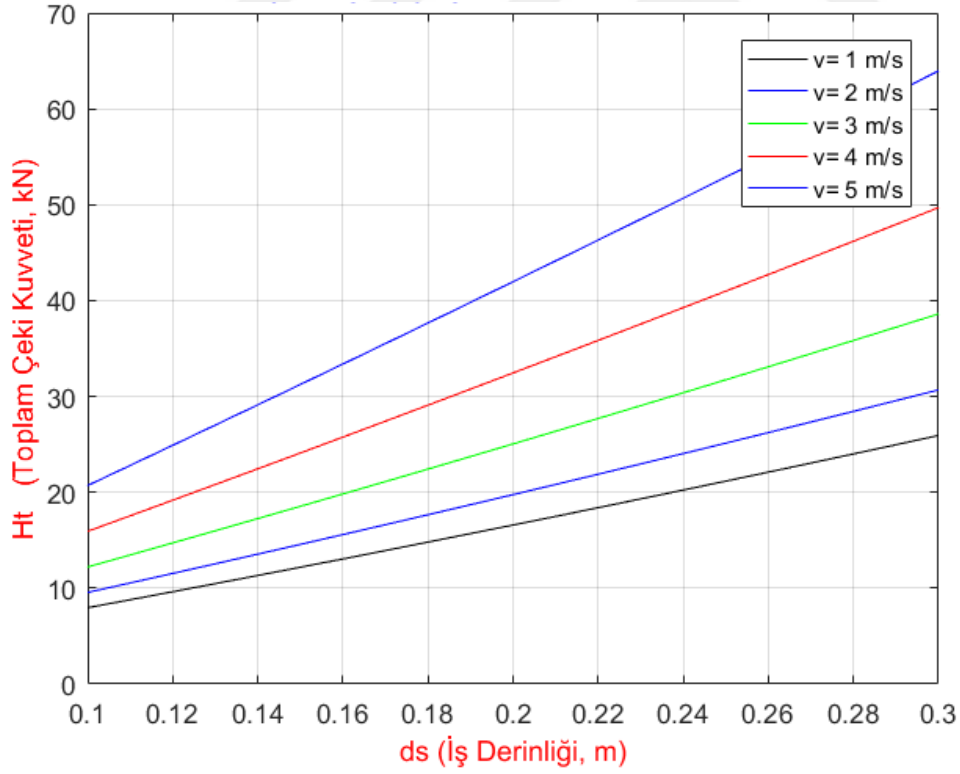
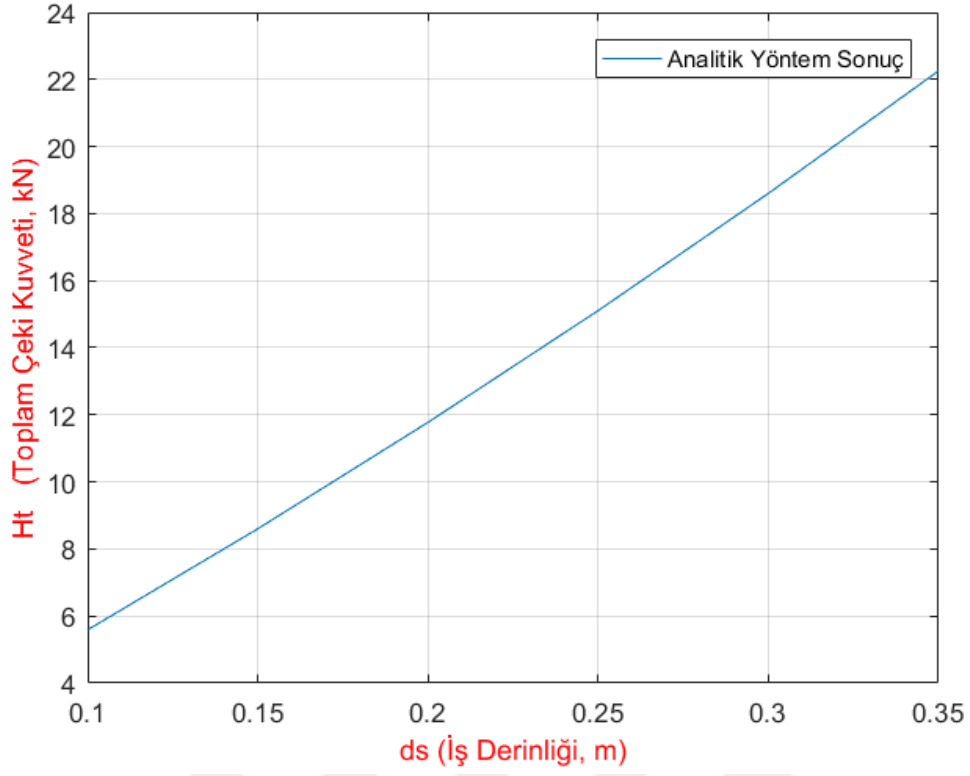
Yukarıdaki denklemler referans alınarak farklı operasyonel şartlar (toprak sürme yönündeki hız ve iş derinliği) ve farklı kulak geometrileri için hesaplamalar yapılmış olup bu hesaplamalara ait MATLAB kodları EK B’de verilmiştir. Toplam çeki kuvveti-iş derinliği, toplam çeki kuvveti-pulluk çizgisel hızı, grafikleri Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 10’da verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan sabit değerler ise Çizelge 4.4’te verilmiştir. Pulluk kulağına etkiyen kuvvetlerin analitik olarak hesaplanması ve bu hesaplamalar sonucunda bulunan çeki kuvvetleri bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak açıklanan sonlu elemanlar yöntemiyle bulunan sonuçlarla ve ASAE D497.4 (1999) standardında verilen amprik formüle ve katsayılara göre bulunan sonuçlar ile karşılaştırılacaktır.

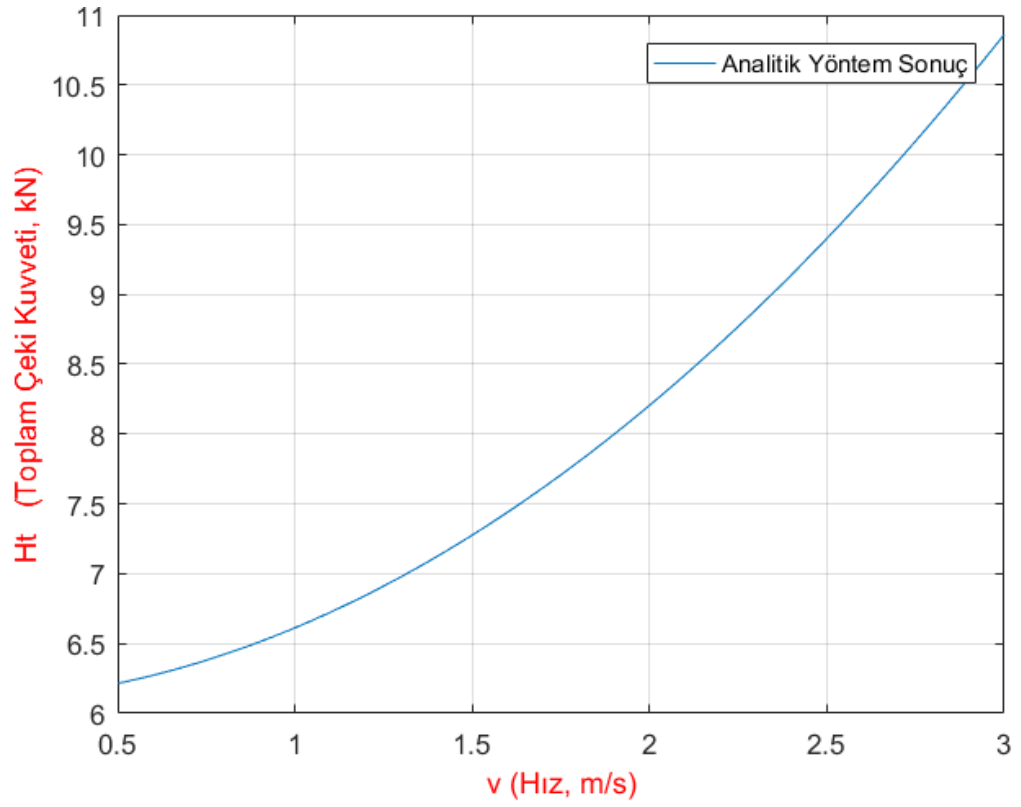
Analitik yöntem ile hesaplanan sonuçlardan şu çıkarımlar yapılabilmektedir.

- Toplam çeki kuvveti, pulluk çizgisel hızı ile ikinci dereceden artmaktadır.
- Toplam çeki kuvveti, pulluğun çalıştığı iş derinliği ile doğrusal artmaktadır.

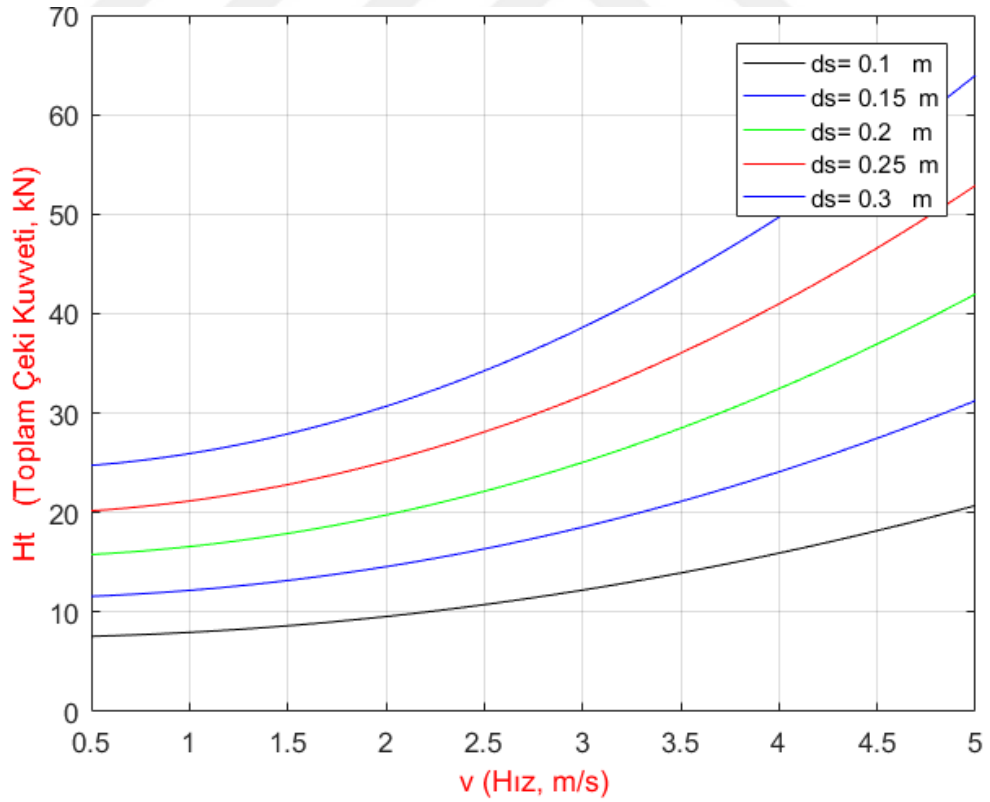
Çizelge 4.4 : Analitik hesaplamada kullanılan toprak, kulaklı pulluk parametreleri.

Parametre	Değer
γ : Toprak hacim ağırlığı, kN/m^3	16
dp : Uç demiri burun derinliği, m	0.008
C : Kohezyon, kN/m^3	30
wp : Uç demiri burun genişliği, m	0.06
v : ilerleme hızı, m/s	1
g : Yerçekimi ivmesi, m/s^2	9.81
αp : Uç demiri burun noktasındaki kama açısı, $^\circ$	16
αs : Uç demiri kaldırma açısı, $^\circ$	55
δ : Toprak-metal sürtünme açısı, $^\circ$	30.25
$\emptyset$: Toprak-toprak sürtünme açısı, $^\circ$	44
ws : Uç demiri genişliği, m	0.42
β : Uç demiri keskin kenar açısı, $^\circ$	40
θ : Ortalama kulak açısı, $^\circ$	55
m : Bozulma mesafesi oranı	1
ds : Kesme Derinliği	0.1
l : Kulağın Etki Uzunluğu	0.9
ϕ	42
ε	15
α	15





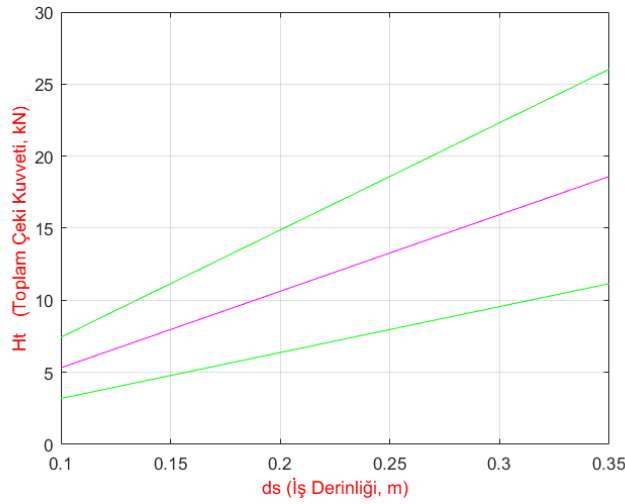
Şekil 4.9 : Toplam çeki kuvvetinin, hız ile değişimi.



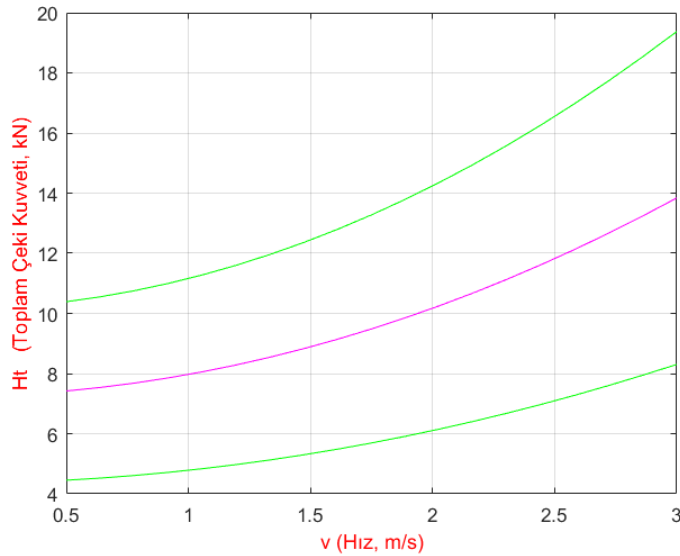
Şekil 4.10 : Farklı iş derinliklerinde çeki kuvvetinin hıza göre değişimi.

4.4.2 ASAE D497.4 (1999) standardına göre kulaklı pulluk çeki kuvveti hesabı

Amerikan Ziraat Mühendisleri Birliği ASAE Standartlarına göre yapılan hesaplama sonuçlarına bağlı çeki kuvveti-hız, çeki kuvveti-iş derinliği grafikleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir. Hesaplama kullanılan amprik formülde %40 mertebelerinde hata, yine aynı standartta ön görülmüştür. Toprak-kulaklı pulluk etkileşiminin gerçek durumunda onlarca parametre etkimesine rağmen bu amprik formül sadece dört parametreye göre hesaplama yapmaktadır. Bu sebepten bu hesaplama sadece analitik ve numerik yöntemler ile hesaplanmış çeki kuvvetlerinin mertebe yönünden karşılaştırması için kullanılmıştır.



Şekil 4.11 : ASAE D497.4 standartına göre iş derinliğinin pulluğa etki eden toplam çeki kuvvetine etkisi (mor çizgi) ve alt, üst limitleri (yeşil).



Şekil 4.12 : ASAE D497.4 standartına göre hızın pulluğa etki eden toplam çeki kuvvetine etkisi (mor çizgi) ve alt, üst limitleri (yeşil).

5. MALZEME MODELİ VE TOPRAK-TAKIM İLİŞKİSİNİN NUMERİK YÖNTEMLE MODELLENMESİ

Bu bölümde toprak–takım ilişkisinin bünyesel modelinin oluşturulması üzerinde durulacaktır. Modifiye Cam-Clay modelindeki gerilme artışı ile birim şekil değişimi arasındaki ilişki anlatılacak olup sonlu elamanlar metodu ile eleman rijitlik matrisi bulunacaktır. Ayrıca numerik çözümler ve lineer olmayan sonlu eleman denklemlerinin yakınsaması anlatılacaktır.

5.1 Modifiye Cam-Clay Modeli

Modifiye Cam-Clay modeli pekleşme etkili bir elasto-plastik modelidir ve toprağın lineer olmayan davranışında plastisite sonucu sertleşmeyi modelleyebilmektedir. Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere kritik hal toprak mekaniğini baz almaktadır. Sabit hacim, sabit kesme ve normal efektif gerilmelerde meydana gelen büyük kesme deformasyonları toprağın kritik halidir. Bu modelin geliştirilmesinin amacı artan gerilme ve birim şekil değişimi arasında net bir ilişki kurmaktır. Ortalama ve deviatorik gerilme artışıyla meydana gelen hacimsel ve kesme birim şekil değişimi artışları elastik ve plastik olmak üzere iki şekilde incelenmektedir.

$$d\epsilon_v = d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^p \quad (5.1)$$

$$d\epsilon_s = d\epsilon_s^e + d\epsilon_s^p \quad (5.2)$$

Elastisite, akma yüzeyi, plastik akma kuralı ve sertleşme-yumuşama çevrimi kuralları toprak gibi elasto-plastik malzemeler için dikkate alınması gereken genel olaylar

5.1.1 Elastisite

Hooke'un elastik yasasına göre, gerilme artışı, birim şekil değişimi ile orantılı olarak artar (Denklem 5.4).

$$\begin{Bmatrix} d_q \\ d_{p'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 3G & 0 \\ 0 & K' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_s^e \\ d\epsilon_v^e \end{Bmatrix} \quad (5.3)$$

Bulk modülü sabit değildir ve ortalama gerilmeye, özgül hacime ve şişme eğrisine (swelling line) bağlı olarak değişir (Denklem 5.4).

$$K = \frac{vp'}{\kappa} \quad (5.4)$$

Modifiye Cam-Clay formülasyonunda kesme modülüne ve poisson oranına ayrıca ihtiyaç vardır. Sabit bir 'G' altında μ , denklem 5.5' e göre hesaplanmaktadır.

$$\mu = \frac{3K-2G}{2G+6K} \quad (5.5)$$

Benzer şekilde μ sabit olduğunda ise G aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır.

$$G = \frac{3(1-2\mu)}{2(1+\mu)} \cdot K \quad (5.6)$$

5.1.2 Akma yüzeyi fonksiyonu

Denklem 5.7 tipik akma fonksiyonunu göstermektedir.

$$f(\sigma, q_*) = 0 \quad (5.7)$$

Akma yüzeyi altındaki gerilme durumu elastiktir. Gerilme durumu akma yüzeyi fonksiyonunun üzerine çıktığında plastik akma başlar. MCC'nin akma fonksiyonu aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$f = \frac{q^2}{p'^2} + M^2 \left(1 - \frac{p'_0}{p'} \right) = 0 \quad (5.8)$$

p'_0 akma yüzeyinin büyüklüğü belirler ve yeniden yükleme-boşalma çizgisine farklılık gösterir. Toprağın sertleşme kabiliyetini gösterir.

5.1.3 Plastik akma kuralı

Elastik birim şekil değişimi artışı yönü genelde gerilme artışı yönüyle çakışmaktadır. Plastik şekil değişim yönü ise sıklıkla gerilme artış yönüyle eş eksenli değildir. Ayrıca elastik birim şekil değişiminde olduğu gibi büyüklüğü kolayca belirlenemez. Bu sebeple akma yüzeyine ulaştıktan sonraki plastik birim şekil değişiminin yönünü ve bağlı büyüklüğünü belirlemek için akma kuralı kullanılır. Plastik akma kuralı potansiyel fonksiyonu kullanarak türetilir. Eğer potansiyel fonksiyon, akma fonksiyonu olarak kabul edilirse buna ilişkili akma kuralı adı verilir. Eğer potansiyel fonksiyon akma fonksiyonundan farklı ise de buna ilişkili olayın akma kuralı

denmektedir. MCC’de ilişkili akma kuralı kullanılmaktadır. Denklem 5.9 ve denklem 5.10 kesme ve volümetrik plastik birim şekil değişimini tanımlamaktadır.

$$d\varepsilon_s^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial q} \quad (5.9)$$

$$d\varepsilon_v^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial p'} \quad (5.10)$$

5.1.4 Sertleşme-yumuşama çevrimi kuralı

Toprak kesildiğinde ilk akma yüzeyine gelene kadar elastik davranır. Daha sonra akma yüzeyi genişlemeye ve büzölmeye başlar. Bunun sonucunda ise sertleşme ve yumuşama davranışı meydana gelir. Akma yüzeyinin şeklinde ve büyüklüğünde meydana gelen değişimler sertleşme-yumuşama dönüşümü kuralıyla kontrol edilebilir. Modifiye Cam-Clay modelinde sertleşme ve yumuşama izotropiktir ve plastik hacimsel şekil değişimi ile alakalı olan p'_0 parametresiyle kontrol edilir. Hacimsel sertleşme kuralı aşağıdaki denklemle açıklanabilir.

$$d\varepsilon_v^p = \frac{(\lambda - \kappa) dp'_0}{(1 + e_0)p'_0} \quad (5.11)$$

MCC için volümetrik ve kesme birim şekil değişimi aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$d\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left(\frac{dp'}{p'} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right) \quad (5.12)$$

$$d\varepsilon_s^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left(\frac{dp'}{p'} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right) \frac{2\eta}{M^2 + \eta^2} \quad (5.13)$$

$$\eta = \frac{q}{p'} \quad (5.14)$$

5.2 Sonlu Elemanlar Modeli

Bu bölümde sonlu elemanlar formülasyonu ve plastisite tabanlı toprak yapısı bünyesel denklemleri kısaca açıklanacaktır. Daha sonra sonlu elemanlar çözüm ağı oluşturma ve toprak takım ilişkisi üzerinde durulacaktır. Sonlu elemanlar yöntemi ile toprak kesilmesi ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

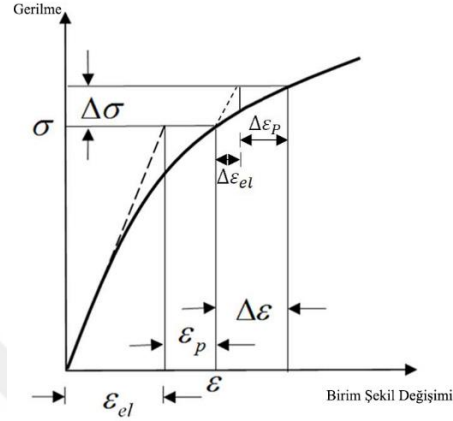
Birim şekil değiştirme vektörü (Birim şekil değiştirme tensörünün altı bileşeni ile oluşur.) elasto plastik malzemeler için aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_p \quad (5.15)$$

ε , ε_{el} , ε_p şekil 4.1 de olduğu gibi toplam, elastik ve plastik birim şekil değişimi vektörlerini ifade etmektedir. Gerilme vektörü σ ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\sigma = D. \varepsilon_{el} = D. (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (5.16)$$

D : Malzeme matrisi (Tek boyutlu durumlarda, E young modülü)



Şekil 5.1 : Elastik, plastik gerilme–birim şekil değişimi ilişkisi.

Malzemenin elastik-plastik cevabı aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{el} + \Delta \varepsilon_p \quad (5.17)$$

$$\Delta \sigma = D. (\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_p) \quad (5.18)$$

Malzemenin plastik davranışı akma fonksiyonuna bağlıdır ($f(\sigma) < 0$ ise elastik $f(\sigma) = 0$ ise plastik). Plastik akma kuralı ise;

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (5.19)$$

$\Delta \lambda$, plastik birim şekil değişimi artışı skaler büyüklüğünü ve $Q(\sigma)$ da plastik potansiyel fonksiyonu ifade etmektedir. Denkle 5.19 'a göre $\Delta \varepsilon_p$ vektörü yüzey normalindedir.

$Q(\sigma)$ =sabit,

Eleman yerdeğiştirmesi u , ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$u_e = N. q_e \quad (5.20)$$

N, eleman şekil fonksinu matrisi, q_e serbestik derecesi ile ilgili vektör (q_e = nodal yerdeğiştirme)

Sanal artımlı yerdeğiştirme ise aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\delta u_e = N \cdot \delta q_e \quad (5.21)$$

Eleman birim şekil değişimini nodal yerdeğiştirme ile ifadesi ise;

$$\varepsilon = B \cdot q_e \quad (5.22)$$

B :Eleman birim şekil değişimi – yerdeğiştirme matrisi

Sanal artımlı birim şekil değişimi şu şekilde ifade edilebilir.

$$\delta \varepsilon = B \cdot \delta q_e \quad (5.23)$$

Sonlu elemanlar formulasyonu virtüel işler prensibi uygulanarak türetilebilir. Kısaca toplam iç enerjideki virtüel değişim δU (birim şekil değişimi enerjisi), dışsal etkiyen kuvvetlerin yaptığı işe, δW eşittir.

$$\delta U = \delta W \quad (5.24)$$

İçsel yapılan iş δU , şu şekilde ifade edilir.

$$\delta U = \int_{V_e} \delta \varepsilon^T \sigma dV \quad (5.25)$$

V_e , eleman hacmini ifade etmektedir. 5.16 denklemini 5.25 denklemini birleştirildiğinde;

$$\delta U = \delta q_e^T \int_{V_e} B^T D (B q_e - \varepsilon_p) dV = \delta q_e^T \left[\left(\int_{V_e} B^T D B dV \right) q_e - \int_{V_e} B^T D \varepsilon_p dV \right] = \delta q_e^T [K_e q_e - F_e^p] \quad (5.26)$$

K_e eleman rijitlik matrisi, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$K_e = \int_{V_e} B^T D B dV \quad (5.27)$$

F_e^p ise hayali plastik kuvveti ifade eder.

$$F_e^p = \int_{V_e} B^T D \varepsilon_p dV \quad (5.28)$$

İnelastik şekil değişimleri sonucunda hem K_e , hem de F_e^p , q_e vektörüne bağlıdır.

Diğer taraftan dışsal kuvvet, F_e 'nin yaptığı virtüel iş aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\delta W = \delta q_e^T \cdot F_e \quad (5.29)$$

F_e , elemana uygulanan dış kuvvet vektörüdür. 5.24 denklemini ile 5.26 ve 5.29 denklemini birleştirdiğimizde;

$$\delta q_e^T (K_e q_e - F_e^p - F_e) = 0 \quad (5.30)$$

Keyfi virtüel artım δq_e^T için;

$$K_e(q_e) \cdot q_e - F_e^p(q_e) = F_e \quad (5.31)$$

$K_e(q_e)$ ve $F_e^p(q_e)$, K_e ve F_e^p matrislerinin q_e ye bağlı olduğunu göstermektedir. Denklem 5.31 eleman denge denklemini göstermektedir. Tüm elemanların denge denklemlerini tek bir modelde toplarsak;

$$K(q) \cdot q - F^p(q) = F \quad (5.32)$$

$K(q)$ ve F^p tüm model (q ve F serbestlik derecesi vektörleri) için malzeme rijitlik matrisini ve plastik kuvvet vektörünü ifade etmektedir. Basitçe bu denklemler q ya bağlı nonlineerdirler. Denklem 5.32 her artımlı adımda iteratif olarak çözülmektedir.

$$q_{k+1} = K^{-1}(q_k)(F + F^p(q_k)), \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (5.33)$$

q_0 , iterasyonun bir önceki adımından bulunmaktadır ve $|q_{k+1} - q_k| < C_p$ olana kadar devam etmektedir. (C_p , yakınsama parametresi)

Plastik potansiyel fonksiyonu, akma fonksiyonu ile aynı ise plastik akış kuralı ilintili olarak adlandırılır. Plastik şekil değişimi artımları akma yüzeyi normalindedir. Diğer taraftan, ilintisiz akış kuralında plastik birim şekil değişiminin artım yönü plastik potansiyel yüzeyi normalindedir. Drucker-Prager akma fonksiyonu basınç bağımlıdır. Bu da modeli geoteknik malzemeler için uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bu fonksiyon aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$f(\sigma) = \beta_e I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (5.34)$$

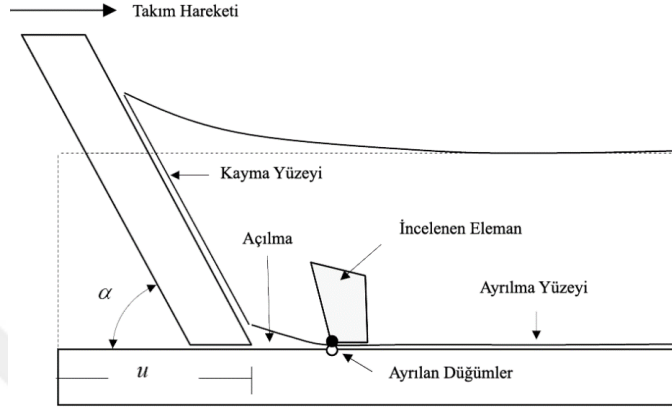
k ve β_e malzeme sabitleri, I_1 gerilme tensörünün ilk enveriyantı ($I_1 = 3\sigma_m$, σ_m ortalama hidrostatik basınçtır.) ve J_2 ise de gerilme deviatorik tensörünün ikinci enveriyantıdır. $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ile ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (5.35)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2] \quad (5.36)$$

Toprak sabitleri k ve β 'yı C (toprak kohezyonu) ve ϕ (iç sürtünme açısı) şeklinde ifade ettiğimizde;

modellenmesi özellikle en zor olan kısımdır. Ayrıca kaymanın modellenmesi temas elemanları (contact elements) ile olmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için ayrılma yüzeyleri, birbirleri ile temas elemanları ile bağlı iki yüzey olarak modellenmektedir (başlangıçta düğümler bu iki yüzeyin temas noktasındadır). Şekil 5.3 toprak-takım modelini şematik olarak göstermektedir. Takım toprağa giriş yaptığında temas elemanları ilişik düğümlerde devre dışı kalır ve aniden ayrılır.



Şekil 5.3 : Toprak-takım ilişkisi modellenmesinin detayları (Armin, 2014).

Akma kriterinin elemanların ayrılması ile hiçbir ilgisi yoktur. Elemanların ayrılması ayrıca (fakat gerilme mutlaka akma yüzeyinde olmalıdır) tanımlanmalıdır. Sonlu elemanlar yönteminde ayrılma durumu sadece düğümlerde tanımlanabilmektedir ve ayrılma süreci, başlangıç düğüm noktalarının ayrılması nedeniyle gerilme rahatlamalarına sebep olması nedeniyle ayrık (discrete) olarak nitelendirilir. Örneğin ilk ayrılmanın hemen öncesindeki gerilme durumu T_1 ile ifade edilsin, ilk ayrılmadan hemen sonraki gerilme azalacak ve elastik bölgeye geri gelecektir (Şekil 5.2). Bu bölgedeki en yüksek gerilme durumu B_1 , aynı şekilde ayrılmanın gerçekleştiği diğer düğüm olacaktır. Daha sonra etkiyen yük (takımın yerdeğiştirmesi) bir sonraki ayrılacak düğümde gerilme artışı meydana getirmektedir. Bu gerilme durumu akma yüzeyine ilk ulaşır ve ikinci ayrılma durumunun meydana geleceği T_2 noktasına kadar takip eder. Ayrılma sonrasında gerilme durumu B_2' ye iner.

Dış yüklerin arttığı topeak modelinin numerik analizi Şekil 5.2 de gösterildiği gibi toprağın bünyesel denklemlerine göre yapılmaktadır. Başlangıçta akma kriterine kadar elastik deformasyon meydana gelirken T noktalarının olduğu doğru boyunca akma gerçekleşir. Akma yüzeyi boyunca plastik deformasyon meydana gelir.

Bu tezde yapılacak çalışmalarda kullanılacak toprak modelinin özellikleri aşağıda Çizelge 5.1’de verilmiştir. Toprağın elasto-plastik davranışı; kohezyon, iç sürtünme açısı, dilatasyon açısı, elastiklik modülü, yoğunluk ve poisson oranı ile ifade edilmiştir.

Çizelge 5.1 : Çalışmada kullanılan toprak parametreleri.

Özellik	Toprak
C-Kohezyon	20 kPa
ϕ -Toprak iç sürtünme açısı	44 ⁰
ψ -Dilatasyon açısı	0 ⁰
E-Elastiklik modülü	7.5 MPa
μ -Poisson oranı	0.33
γ -Yoğunluk	1600 kg/m^3

5.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulaması

Toprak-takım etkileşim problemlerinde mevcut sonlu eleman metodu yöntemleri ile en yakın sonuca ulaşmak için 2002 yılında Aboelnour tarafından çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda bulunan sonlu eleman programları dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır.

- Abaqus
- Ansys
- Dyna
- ve açık kaynak kodlu TOCHNOG.

Toprak- takım ilişkisinde Abaqus programının en uygun program olma nedenleri :

- Eleman çeşitliliği (1D,2D,3D)
- Büyük miktarlarda yerdeğiştirme ve birim şekil değişimlerine uygun güncellenmiş Langrange çalışma alanı kullanan eleman formülasyonu .
- Geleneksel malzeme modellerinin yanı sıra toprak, kil, beton, plastik ve kauçuk malzeme modelleri bulunmaktadır. Ayrıca değiştirilmiş Cam-Clay toprak modeli kütüphanede bulunmaktadır.
- Kullanıcı tanımlı altprogramlar (UMAT) ile farklı malzeme modellerine izin vermektedir. Bu özellik ANSYS’ te yoktur.

- Yüzey-yüzey teması (surface to surface contact) ile sürtünmeli kayma özelliği vardır.
- Üç cilt teorik kullanım klavuzu, iki cilt örnek problemleri bulunan kapsamlı dökümantasyon.

Tüm bunlar göz önüne alındığında topra –takım ilişkisinin numerik modellenmesinde Abaqus programı kullanılmıştır..

Abaqus'te sonlu elemanlar analizi için üç farklı aşama bulunmaktadır. Bunlar;

- Ön işleme (preprocessing)
- Simulasyon (Simulation)
- İşlem Sonrası (Post- Processing)

5.3.1 Ön işleme

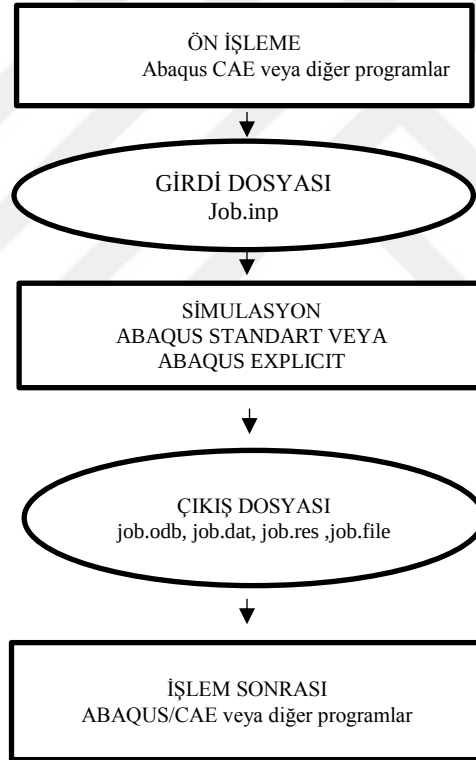
Bu aşamada fiziksel problem modeli Abaqus giriş dosyası oluşturmak için tanımlanmıştır. Model genellikle Abaqus/CAE veya başka bir program kullanılarak oluşturulur. Bu çalışmada Solidworks ile modellenen geometri Abaqus'ye aktararak problemin fiziksel modeli Abaqus/CAE kullanılarak oluşturulmuştur. Abaqus/CAE model geometrisi oluşturma ve mesh yapısında oldukça esnek bir kullanıcı kontrolü sağlar. Sonlu eleman analizi gerçekleştirmek için makul bir sonlu mesh yapısı üretmek yeterlidir. Oluşturulan modelin aşağıdaki karakteristik özelliklerde olması gerekmektedir.

- Köşeler ve komşu bölgeler birbirleri ile eşleştirilir.
- Geometrik parçalar ya kapalı bir yüzey ya da katı bir bölge oluşturmalıdır.
- Komşu bölgeler arasında çakışma olmamalıdır.

Mantıklı bir çözüm elde etmek için bazı kısıtlar ve sınır koşulları ile bazı yükleme koşulları gerekli düğümler üzerinde belirlenmelidir. Sınır ve yükleme koşulları yerdeğiştirme ve / veya kuvvet durumları belirlenmelidir.

5.3.2 Simulasyon (Abaqus Standart veya Abaqus Explicit)

Normal şartlarda arka planda çalışan simülasyon aşaması, Abaqus/Standart veya Abaqus/Explicit'te oluşturulan numerik modeli çözmektedir. Ön işlemci tarafından üretilen girdi dosyasıyla her bir elemanın rijitlik matrisleri oluşturulmaktadır. Eleman rijit matrisleri eşzamanlı denklemler oluşturmak üzere bir araya getirilir. Abaqus/Standart bu lineer olmayan denge denklemlerini çözmek için Newton–Raphson yöntemini kullanmaktadır. MCC problemleri malzeme geçmişine bağlı cevap vermektedir. Bu nedenle çözümde genellikle, artım serileri ve her artımdaki denge göz önüne alınmaktadır. Malzeme modeli malzemenin geçmişine bağlı olduğu için artışlar çok küçük miktarlarda olmalıdır. Artım değeri hesaplama verimliliği açısından önem arz etmektedir. Çok büyük artımlarda daha büyük iterasyonlar gereklidir.



Şekil 5.4 : Abaqus adımları.

Yüksek artım (increment) değerleri, modelin ilk durumunda denge olmadığı için çözüm doğruluğunu artırabilmektedir. Bu sebeple artım değerinde algoritmik bir sınırlama uygulanmaktadır. Abaqus/Standart, artım büyüklüklerini lineer olmayan problemlerde otomatik olarak ayarlamaktadır. Lineer olmayan statik problemler modelin geometrik doğasından, burkulmadan veya malzeme yumuşamasından kaynaklı instabil olabilirler. Abaqus/Standart instabil yarı statik problemleri stabil hale

getirmek için hacim-oranlı sönüm modeli otomatik olarak ekler. Başarılı bir çalışma ardından çözücü ile ilgili tüm bilgileri içeren bir çıktı dosyası oluşur.

5.3.3 İşlem sonrası

Simulasyon tamamlandıktan sonra sonuçlar değerlendirilir ve yer değiştirme, gerilme ve diğer temel değişkenler hesaplanır. Değerlendirme Abaqus/CAE görselleştirme modülü kullanılarak interaktif olarak yapılmıştır.

5.3.4 Abaqus modelleme özellikleri

Abaqus programı gelişmiş analizler için özel olarak tasarlanmış bir sonlu elemanlar çözüm programıdır. Sorunlar çok çeşitli modelleme araçları ile ele alınabilir. Bu bölümde toprak-takım etkileşimi analizi için gerekli özellikleri vurgulanmıştır.

5.3.4.1 Analiz tipi

Abaqus/Standart, zamana bağlı veya frekans tanım kümesinde analiz yapabilmektedir. Statik gerilme-deplasman analizi, atalet etkilerinin ihmal edildiği, zamana bağlı malzeme etkilerinin (sürünme, şişme, viskoelastiklik) ihmal edildiği tüm analizlerde kullanılmaktadır. Denge problemleri doğrusal veya doğrusal olmayan sonuçlar verebilmektedir. Doğrusal olmayan etkileri görmek için de ABAQUS programı kullanılmaktadır.

5.3.4.2 Yüzey tanımlanması

Model oluşturulması için gerekli yüzeyler, simülasyonun başında tanımlanmalıdır. Yüzey tanımları iki gövde arasında temas ilişkilerini kapsar. Abaqus temas yüzeylerinde üç sınıflandırma mevcuttur.

- Eleman esaslı yüzey
- Düğüm esaslı yüzey
- Analitik rijit yüzey

Toprak-kesici takım etkileşiminin analizi için pulluk kulağı analitik rijit (analytical rigid surface) yüzeyi olarak simule edilir. Toprak yüzeyi ise problemin hızlı yakınsaması için eleman esaslı (element based surface) yüzey olarak simule edilir. Hareketin tanıtılacağı takım üzerindeki bir noktaya referans nokta atanır. Bu özellik takıma etkiyen etki kuvvetlerinin hesaplanabilmesine izin vermektedir.

5.3.4.3 Temas (Contact) modellemesi

Abaqus temas ve etkileşim problemleri yüzeyler kullanılarak veya temas öğeleri kullanılarak olmak üzere iki farklı metod ile çözümlenebilir. Çoğu temas problemleri; rijit yüzey ile deforme olabilen parça arasında olduğu gibi yüzey esaslı temas kullanılarak modellenmektedir. İki ya da üç boyutlu olabilen yapı küçük kaymalarla (kayma eleman uzunluğunun yarısını geçmemek kaydıyla) veya sonlu kayma (iki yüzey temas haline olduğu sürece kayma mesafesinde herhangi kısıtlama yoktur.) ile hareket edebilir. Temas simülasyonlarının tanımlanmasında Abaqus programında kullanılabilir üç metod bulunmaktadır.

- Potansiyel temas yüzeylerinin belirlenmesi
- Temas çiftlerinin belirlenmesi
- Yüzeyin temas ettiği mekanik davranışının tanımlanması

Abaqus birbiri ile temas halinde bulunan iki yüzey (kontak çifti) tanımlamaktadır. Bu yüzeylerin sıralaması önemlidir. Çünkü hangi yüzeyin hangi davranışı sergileyeceği önemlidir. Kontak yüzeylerinde ilk yüzeydeki köle (slave) olarak tanımlanan her bir düğüm için Abaqus, ikinci yüzeydeki en yakın noktayı (master) bulmaya çalışmaktadır. Master yüzey, köle yüzey üzerinden geçmektedir. Etkileşim bundan sonra master nokta ile köle düğümü üzerinden hesaplanmaktadır.

5.3.4.4 Mekanik yüzey etkileşim modelleri

Abaqus/Standart' daki bazı mekanik yüzey etkileşim modelleri şunlardır.

Sürtünme modeli

Yüzeyler temas halinde bulunduğunda normal kuvvetlerin arayüzeyde birbirlerine aktarıldığı gibi kesme kuvvetleri de aktarılmaktadır. Bu sebeple yüzeylerin birbirleri üzerindeki kayma direncini oluşturan sürtünme kuvvetlerinin hesabının yapılması gerekmektedir. Coulomb sürtünmesi temas etkileşimini tanımlamak için sıklıkla kullanılan bir sürtünme modelidir. Bu model temas yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısını kullanmaktadır. Bu modelde arayüzeydeki sınır sürtünme kayma gerilmesine ulaşana kadar malzeme kaymamaktadır.

Sonlu kayma (Bağlı yüzey hareketleri)

Sonlu büyüklüğün ayrılması, kayması ve yüzeylerin rastgele dönmeleri ortaya çıkabilmektedir. Abaqus'te sonlu kayma rijit temas kabiliyeti, temas çifti (Contact

pairs) seçeneği ile otomatik olarak üretilmektedir. Sonlu kaymalı temas modelinde köle (slave) düğüm noktaları ve efendi (master) yüzeyin hangi bölgelerinin temasa gireceğinin çözümden önce hesaplanması gereklidir. Çözümün her aşamasında meydana gelebilecek temas farklılıkları çözümden önce hesaplanır. Bu işlem özellikle iki parça arasındaki temas ve doğrusal olmayan etkiler arttıkça çözüm süresini de arttırır.

Yumuşatılmış temas

Temas basıncı, yüzeyler arası oluşan açıklığın bir üstel fonksiyonudur. Özellikle toprak-takım etkileşiminde analiz esnasında meydana gelebilecek yakınsama sorununu önlemek için “Yüzey Davranışı” özelliği kullanılmaktadır.

Element tipi

Uygun eleman türünü seçmek doğru simülasyon ve analiz için en önemli adımlardan biridir. Eleman seçimi aşağıdaki önemli faktörlere dayanmaktadır.

- Analiz tipi : Statik veya dinamik
- Malzeme davranışı : Doğrusal veya doğrusal olmayan
- Temas etkileşim durumu : Temas olup, olmadığı
- Parçanın kalınlığı
- Eleman distorsiyonlarında beklenen boyut
- Analizden beklenen sonuçlar
- Analiz Boyutu 2D veya 3D durumu

Bu faktörler göz önüne alınarak uygun eleman seçimleri yapılmalıdır.

Eleman ailesi

Farklı eleman aileleri arasındaki temel fark geometrileridir. Farklı eleman aileleri aşağıda listelenmiştir.

- Sürekli katı elemanlar
- Kabuk elemanlar
- Kiriş elemanlar
- Rijit elemanlar
- Membran elemanlar

- Sonsuz elemanlar
- Bağlayıcı elemanlar
- Kafes elemanları

Katı veya sürekli elemanlar, lineer analizlerde ve karmaşık doğrusal olmayan temas, plastisite ve büyük deformasyonlar içeren analizelerde kullanılmaktadır. Bu sebeple toprak-takım analizinde kullanılacaktır.

Düğüm sayısı ve interpolasyon derecesi

Yer değiştirmeler ve/veya diğer serbestlik dereceleri elemanların düğüm noktalarında hesaplanır. Eleman yer değiştirmeleri düğüm yerdeğiştirmelerinin interpolasyonu ile elde edilir. İnterpolasyon derecesi genellikle elemanda kullanılan düğüm sayısına göre belirlenmektedir. Sadece kendi köşelerinde düğümleri olan elemanlar lineer interpolasyon kullanırlar ve genellikle birinci dereceden elemanlar olarak adlandırılırlar. Her iki tarafında da düğümleri olan elemanlar ise kuadritik fonksiyonlar kullanırlar ve bunlara kuadritik eleman ya da ikinci dereceden eleman denmektedir. Birinci dereceden elemanlar temas yüzeylerinin olduğu ve ciddi eleman distorsiyonlarının beklendiği analizlerde çok kullanışlıdır.

Element entegrasyonu

Eleman rijitlik matrisinin oluşturulmasında eleman tam modda (full mode) ya da azaltılmış modda (reduced mode) integre edilebilir. Azaltılmış eleman entegrasyonu kullanıldığında, entegrasyon her eleman düğümü için uygulanmayacaktır. Azaltılmış entegrasyon, özellikle üç boyutlu modellerde hesaplama süresini azaltmaktadır. Buna ek olarak, azaltılmış entegrasyon genellikle plastisite ve sürünme problemleri gibi doğrusal olmayan problemler için tavsiye edilmektedir.

Eleman boyutu

Abaqus eleman kütüphanesi, geniş eleman boyutu yelpazesine sahiptir. Yapılan analizde rijit pulluk kulağı ve toprak farklı elemanlar olarak modellenmiştir. Rijit parça için R3D4 kuadritik, rigid bilinear eleman (4-düğüm ve her düğüm için 3 serbestlik derecesi) ve toprak için de C3D8R (8-düğüm lineer tuğla, azaltılmış entegrasyon, kum saati kontrolü) kullanılmıştır.

Koşullar

Aşağıda belirtilen başlangıç ve sınır koşulları sonlu elemanlar modeline uygulanmıştır.

- **Başlangıç Koşulları:** Sıfırdan farklı bir çok başlangıç değeri tanımlanabilmektedir. Toprağın ilk boşluk oranı ve başlangıç gerilme durumu MCC (Modified Cam-Clay) modelinde tanımlanabilmektedir..
- **Sınır Şartları** : Elemanların yerdeğiştirme, dönme gibi hareketlerinin kısıtlandığı adımdır. Toprak-takım ilişkisinin modellenmesinde toprak kütlelerinin yanal yüzeyleri ve alt yüzeyi altı serbestlik derecesine göre de sabitlenirken, pulluk kulağına sadece bir yönde yer değiştirme uygulanmış olup diğer tüm serbestlik derecelerine göre kısıtlanmıştır.

Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Analizin doğrusal olup olmadığını belirleyen Abaqus adımıdır. Doğrusallık malzeme özelliğinin ve/veya geometrik özelliğın bir sonucudur. Malzemenin doğrusal olmaması bünye denklemleri ile alakalı olup model entegrasyonunda göz önüne alınırken, geometrinin doğrusal olmaması çözüm adımında “NLGEOM” parametresi ile hesaba katılmaktadır. Toprak-takım etkileşiminde olduğu gibi büyük deformasyonlarda malzemenin doğrusal olmadığı varsayılır.

Matris depolama ve çözüm şeması

Abaqus programı genellikle doğrusal olmayan problemleri Newton yöntemi ile, doğrusal problemleri de rijitlik metodu ile çözmektedir. İki yöntem içinde rijitlik matrisi gereklidir. Coulomb sürtünmesi ve temas etkileşimi olduğunda bu matris simetrik değildir.

5.4 Toprak-Takım Etkileşimin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi

5.4.1 Malzeme modeli

Toprak-kulaklı pulluk etkileşimindeki toprağın mekanik davranışı farklı akma kriterlerine göre modellenmiş olup bu çalışmada genişletilmiş Drucker-Prager sürekli ortam elasto plastik model kullanılmıştır. Modelin doğrusal matematiksel açıklaması kısaca aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$F = t - p \tan \phi - C \quad (5.39)$$

F [kPa] akma fonksiyonunu, t [kPa] deviatorik gerilmeyi, p [kPa] normal gerilmeyi, ϕ iç sürtünme açısını ve C [kPa] malzeme kohezyonunu ifade etmektedir. Normal ve deviatorik gerilme aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5.40)$$

$$t = \frac{1}{2}q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (5.41)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (5.42)$$

$$r^3 = -(\sigma_1 - \sigma_3)^3 = -q^3 \quad (5.43)$$

Burada ‘K’ çekme akma gerilmesinin, basma akma gerilmesine üç eksenli teste göre oranıdır ($0.778 \leq K \leq$) (Ibrahmi,2015). $K = 1$ olursa $t = q$ olacak ve akma yüzeyi asal gerilme düzleminde Von Mises dairesi içerisinde kalacaktır. Burada q, eşdeğer Mises gerilmesidir. $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$ üç eksenli gerilme halinde basma gerilmelerini, r ’de deviatorik gerilmenin üçüncü enveriyantını ifade eder.

Yapılan çalışmada kumlu-tınlı toprak özellikleri kullanılmış olup fiziksel parametreleri aşağıdaki Çizelge 5.1’de verilmiştir. Toprak mekanik özellikleri (Elastiklik modülü, ve Poisson oranı) üç eksenli basma deneyi sonucunda elde edilmektedir. Toprak–takım ilişkisi parametreleri (toprak-metal sürtünme açısı, kohezyon, iç sürtünme açısı) laboratuvar deneyleri (kesme kutusu deneyi) sonucunda bulunabilmektedir. Çalışmada kullanılan değerler Cranfield Üniversitesinde yapılmış deneyler sonucunda yazılan makaleden elde edilmiştir (Ibrahmi,2015).

Ayrıca Abaqus’ te yapılan simulasyonda elasto-plastik malzeme modeli olan Drucker–Prager modeli kullanılmıştır. Eleman kopması ve silinmesini modellemek için Abaqus’ün hasar modülü kullanılmıştır.

Çizelge 5.2 : Sonlu elemanlar modeli kullanılan parametreler.

Özellik	Toprak
c-Kohezyon	4.082 kPa
ϕ -Toprak iç sürtünme açısı	44°
ψ -Dilatasyon açısı	0°
E-Elastiklik modülü	7.5 MPa
μ -Poisson oranı	0.3
ρ -Yoğunluk	$1600 \frac{kg}{m^3}$
δ -Toprak Metal Sürtünme Açısı	30.25°
K-Gerilme Oranı	1
ε_{maks} -Maksimum bozunma birim şekil değişimi	0.8
σ_{akma} -Toprağın akma dayanımı	0.16

5.4.2 Model geometrisi

Toprak–kulaklı pulluk etkileşimi sonlu elemanlar yöntemi ile modellemek toprak ve kulak olmak üzere iki adet üç boyutlu model kullanılmıştır.

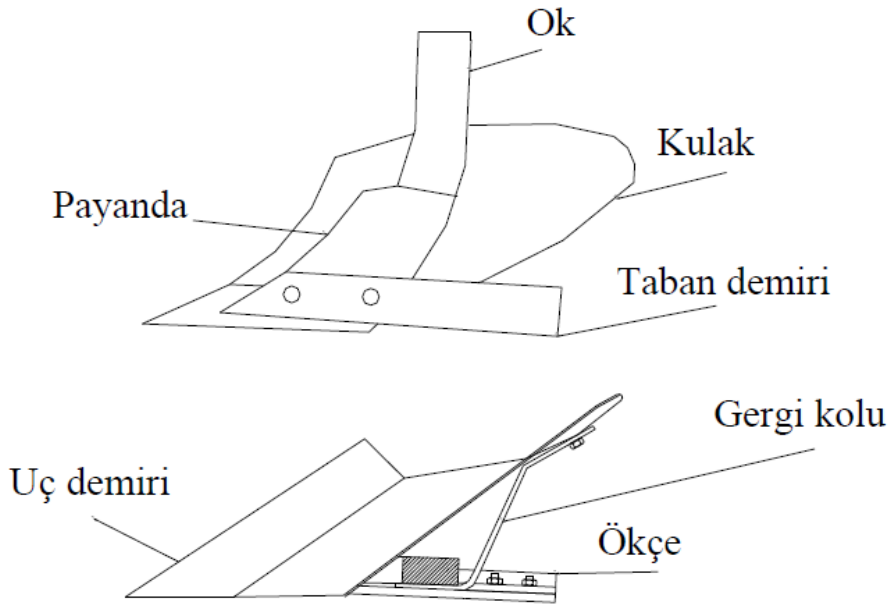
- Toprak

- Pulluk kulağı

Aşağıda bu geometriler ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

5.4.2.1 Pulluk kulağı geometrisi

Kulak, pulluğun aktif yüzeyinin en önemli kısmıdır. Kulağın geometrik şekli, uç demiri ile birlikte meydana getirdiği aktif yüzeyin şeklini belirler. Pulluklar Avrupa ve Amerika tipi olmak üzere iki çeşittir. Avrupa ve Amerika kökenli pullukların kulak tipleri arasında α , β , γ açıları yönünden önemli farklar mevcuttur. Avrupa pulluklarındaki kulak şekilleri dört esas tip altında toplanmıştır. Bunlar, 1). Silindirik kulak tipi, 2). Kültürform kulak tipi, 3). Yarı bükük kulak tipi, 4). Bükük kulak tipidir (Karagöz ve Keçecioğlu, 2000). Bu çalışmada yarı bükük kulağın bilgisayar destekli parametrik tasarımı yapılmış olup sonlu elemanlar metodu ile toprak-kulak etkileşimi yapılacaktır.



Şekil 5.5 : Pulluk aktif parçaları.

Bilindiği üzere, pulluk tasarım ve imalatı ampirik metodlar ve deneylere dayanarak yapılmaktadır. Tez kapsamında, kulak tasarımındaki fiziksel parametrelerin belirlenmesi ve tarım arazisinin toprak özelliklerine dayanarak yapılan pulluk yüzey tasarımları öncelikli hedeflerdir. Literatürde bazı bilgisayar destekli kulak yüzey tasarımı metodları geliştirilmiştir. Ravonison ve Destain (1994) mevcut bir kulak kübik yüzeylerinin Bezier formunu ve gerçek ve teorik yüzeyin yaklaşımının verimini

bir algoritmaya dayanarak matematiksel ifadeyle geliştirmişlerdir. Referans noktaların X,Y,Z bileşenlerini tanımlayarak kontrol sistemi kullanmışlardır

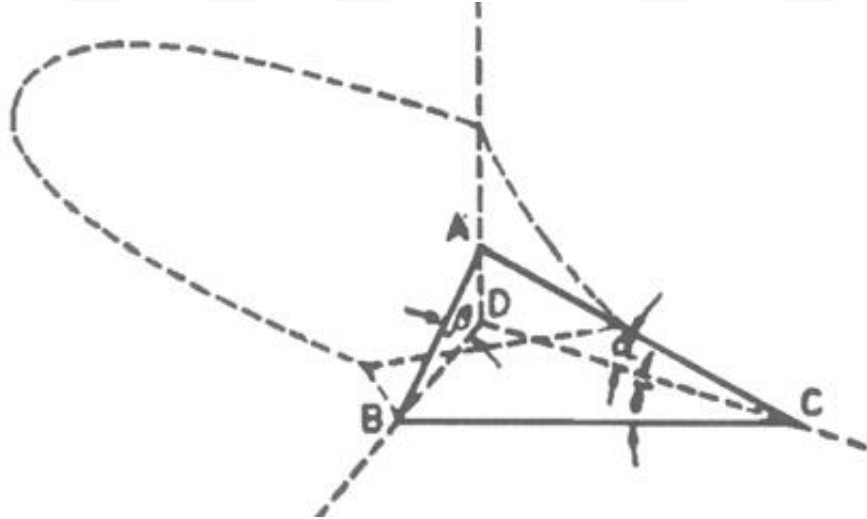
Kulaklı pullukların gövde tipinde bulunan yüzey parametreleri iki tip halinde yapılmaktadır. Bunlar ;

- Avrupa Tipi
- Amerika Tipi

Goriyachkin, pulluğun gövdesini bir çeşitkenar üçgene benzeterek incelemiştir (1960). Ele alınan üçgen aktif yüzeylerin oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yüzeyi oluşturan parametreler;

- α
- β
- γ

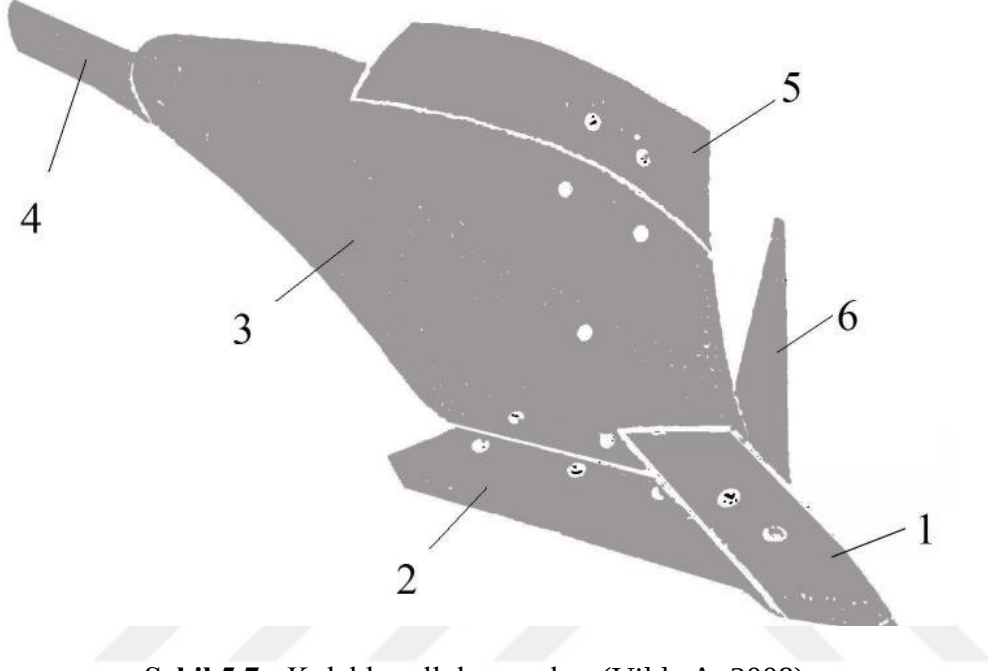
Yukarıda belirtilen parametrelerden α tasarımı yapılan pulluğun kesme açısını, β toprağı devirme açısı, γ ise hareket halinde bulunan pulluk geometrisinde toprağı yan tarafa atma açısıdır.



şekil 5.6 : Pulluk kulak geometrisi ve açılarının gösterimi.

şekil 5.6'da gösterildiğı üzere üç koordinatın ABC üçgeni tarafından yan olarak kesilmesiyle meydana gelen bu üç yüzeyli kama, her tipteki aktif yüzeyin oluşmasında temel teşkil etmektedir.

Pulluk gövdesinin aktif yüzeylerinin meydana gelişi, üçgen biçiminde olan bir kamanın A, B, C ve D köşelerinin açınımı ile açıklanabilir. Bu pramitin α açısı aşağıdan yukarıya doğru yavaş yavaş büyütüldüğü taktirde BC doğrusu bir eğri hale gelir. Bu eğri ne kadar dikleşirse α açısı da, aşağıdan yukarı doğru o oranda büyür, eğrinin yarıçapı ise küçülür.



Şekil 5.7 : Kulaklı pulluk parçaları (Vilde A.,2008).

1. Kama
2. Uç demiri
3. Kulak
4. Kulak uzantısı
5. Ön gövdecik
6. Bıçak

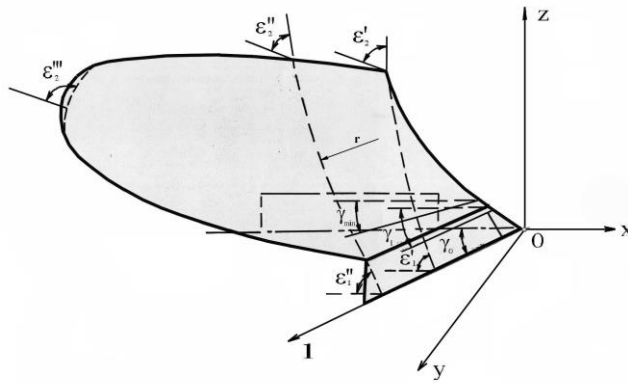
Letonya Tarım Makinaları Araştırma Enstitüsünün, 2008 yılında yayınladığı “ Bazı Pulluk Gövdeleri Parametreleri” isimli makalesinde araştırılan beş farklı pulluğa ait kulak geometrisi parametrelerinden yola çıkılarak kulak yüzey geometrisinin parametrik tasarlanması amaçlanmıştır. Bu amaç dahilinde yapılan çalışmalarda sekiz farklı parametreye bağlı tasarımlar meydana getirilebilmektedir. Aşağıdaki Çizelge 5.3’te beş farklı pulluğa ait parametreler verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Farklı pulluk geometrilerine ait değerler (Vilde A.,2008).

Parametre	Ölçü Birimi	İlk Tasarım	İkinci Tasarım	Üçüncü Tasarım	Dördüncü Tasarım	Beşinci Tasarım
γ_0	Derece	42	37	31	38	43
γ_{25}	Derece	42	36.5	29	37	44
γ_{50}	Derece	42	36	29	36	45
γ_{75}	Derece	41	35	27	39	45
γ_{100}	Derece	41	35	26	40	45
γ_{125}	Derece	42	36	29	41	45
γ_{150}	Derece	42	36.5	30	45	45
γ_{175}	Derece	42.5	37	30	48	45
γ_{200}	Derece	43.5	37.5	31	48	45
γ_{225}	Derece	44.5	38	32	40	45
γ_{250}	Derece	45.5	38	34	40	45
γ_{275}	Derece	46.5	38	38	40	45
γ_{300}	Derece	48	38	41	40	45
γ_{325}	Derece	49	39	43	39	45
γ_{350}	Derece	50.5	42	44	38	46
γ_{375}	Derece	52.5	43	45	38	48
γ_{400}	Derece	54.5	47	46	40	48
γ_{425}	Derece	56.5	47	-	43	48
γ_{450}	Derece	57	46	-	41	58
γ_{475}	Derece	-	46	-	-	57
γ_{500}	Derece	-	47	-	-	58
γp_0	Derece	41	48	76	69	-
γp_{25}	Derece	43	54	76	69	-
γp_{50}	Derece	43	56	76	69	-
γp_{75}	Derece	47	52	68	69	-
γp_{100}	Derece	65	43	47	-	-
γp_{125}	Derece	65	-	-	-	-
γp_{150}	Derece	51	-	-	-	-
γp_{175}	Derece	42	-	-	-	-
$\Delta\gamma$	Derece	15	10	15	5	15
$\Delta\gamma'$	Derece	1	2	5	2	0
$\Delta\gamma''$	Derece	16	12	20	7	15
γt_{250}	Derece	45	-	-	-	-
γt_{275}	Derece	48	-	-	-	-
γt_{300}	Derece	48	-	-	-	-
γt_{325}	Derece	48	-	-	-	-
γt_{350}	Derece	50	-	-	-	-
γt_{375}	Derece	50	-	-	-	-
γt_{400}	Derece	43	54	-	-	-
γt_{425}	Derece	46	54	-	-	-
γt_{450}	Derece	46	55	-	50	-
γt_{475}	Derece	57	58	-	48	-
γt_{500}	Derece	58	66	-	46	-
γt_{525}	Derece	58	90	-	38	-
γt_{550}	Derece	58	-	-	38	-

Çizelge 5.3 (devam) : Farklı pulluk geometrilerine ait değerler (Vilde A.,2008).

Parametre	Ölçü Birimi	İlk Tasarım	İkinci Tasarım	Üçüncü Tasarım	Dördüncü Tasarım	Beşinci Tasarım
$\gamma t575$	Derece	58	-	-	38	
$\gamma t600$	Derece	-	-	-	38	
$\gamma e275$	Derece	43	-	-	29	
$\gamma e300$	Derece	44	-	-	30	
$\gamma e325$	Derece	45	-	-	29	
$\gamma e350$	Derece	46	-	-	28	
$\gamma e375$	Derece	46	-	-	26	
$\gamma e400$	Derece	46	42	-	17	
$\gamma e425$	Derece	45.5	45	-	10	
$\gamma e450$	Derece	45	46	-	-	
$h\gamma_{min}$	mm	75	75	75	50	0
ε_1'	Derece	33	30	36	30	26
ε_1''	Derece	33	25	33	28	32
ε_{1p}'	Derece	36	29	14	30	-
α_{1p}	Derece	25	24	19	18	20
ε_2'	Derece	56	75	50	77	66
ε_2''	Derece	99	82	64	90	87
ε_2'''	Derece	112	120	131	130	114
$\Delta\varepsilon'$	Derece	32	45	14	47	40
$\Delta\varepsilon''$	Derece	66	57	31	60	55
$\Delta\varepsilon'''$	Derece	79	90	95	100	88
α	mm	25	25	20	21	35
b_s	mm	416	424	340	320	350
b	cm	35	35	35	30	30
h	mm	470	508	424	444	500
h_t	mm	620	610	424	500	-
r	mm	520	438	410	455	275
l_x	mm	850	1130	1226	1280	880
b_y	mm	520	626	566	620	660
l_{ex}	mm	960	1290	-	1450	-
b_{ey}	mm	670	840	-	696	-



Şekil 5.8 : Kulak geometrisi açılal parametreleri (Vilde A.,2008).

Çizelge 5.3'deki bilgiler daha önce bahsedilen kulak geometrilerine aittir. Burada;

γ_p ; Pulluk kulağının eğim açısını,

$\Delta\gamma = \gamma_{top} - \gamma_0$, $\Delta\gamma' = \gamma_0 - \gamma_{min}$, $\Delta\gamma'' = \gamma_{top} - \gamma_{min}$; açılar arasındaki farkları,

h_{min} ; Minimum eğim açısının olduğu noktanın yerden yüksekliğini,

γ_t ; Ön gövdecik eğim açılarını,

$\Delta\varepsilon' = \varepsilon_2' - \varepsilon_1'$, $\Delta\varepsilon_1'' = \varepsilon_2'' - \varepsilon_1''$, $\Delta\varepsilon_2''' = \varepsilon_2''' - \varepsilon_1'$, ; açılar arasındaki farkları,

α_{1p} ; Uç demirinin dikey boyuna düzlem ile yaptığı açı,

h_t ; Ön gövdecik dahil kulağın toplam yerden uzunluğunu,

l_{ex} ; Kulak uzantısı dahil toplam kulak yüzeyi uzunluğunu,

b_y ; Kulak uzantısı dahil toplam kulak derinliğini,

b ; Alt yüzeydeki çalışma derinliğini,

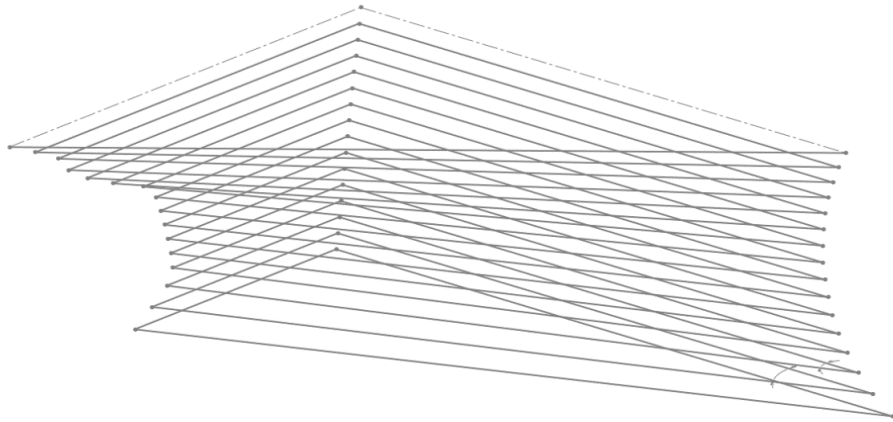
b_s ; Uç demiri çalışma derinliğini,

r ; Kulak eğrilik yarıçapını,

h , Kulak yerden yüksekliğini,

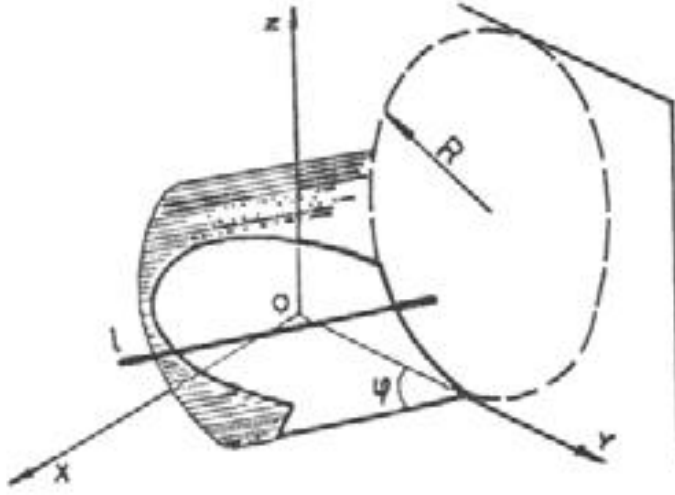
l_x , Pulluğun hareket yönü izdüşümündeki kulak uzunluğunu belirtmektedir.

Yukarıda belirtilen örnek kulak geometrileri SOLIDWORKS programı ile modellenmiş olup, kulak yüzeyi geometrisi oluşturmak için parametrik tasarım yöntemleri kullanılmıştır.



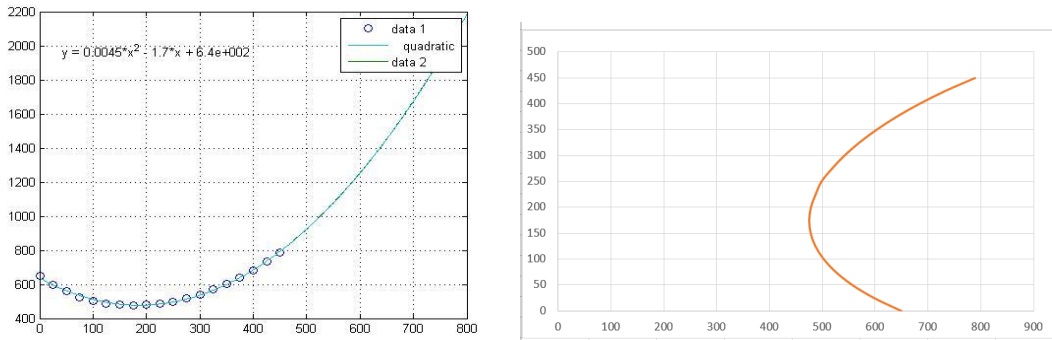
Şekil 5.9 : Şekil çizgileri yardımı ile yüzey oluşturma adımı.

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi oluşturulan kamaların uç noktalarının birleştirilmesi ile iki adet eğri meydana gelmektedir. Kulağın toprak ile temas eden eğrisine giriş eğrisi, toprağın kulak yüzeyini terk ettiği eğriye ise çıkış eğrisi ismi verilmiş olup bu noktalardan eğri oluşturmak için MATLAB’da program yazılmıştır. Yapılan çalışmalar giriş eğrisinin dairesel formda silindrioid bir şekle sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 5.10 : Silindrioid giriş eğrili kulak (Soltani and Taghinezhad, 2012).

Çizelge 5.3’ deki kulak geometrileri şekil çizgileri yardımı ile oluşturulmuş olup Şekil 5.6’daki 'D' noktası orjin kabul edilip çıkış eğrisinin 25’er [mm] aralıklarla x-z koordinatları çıkartılmıştır. Belirlenen bu noktalara yine x-z düzleminde ikinci dereceden polinom eğri uydurulması uygun görülmüştür. Yapılan çalışmalarda polinomum ikinci dereceden olması x’in 0-h aralığında yeterli olmuştur. Kulak geometrisi örnekleri için bulunan çıkış eğrileri aşağıdaki Çizelge 5.4 te listelenmiştir.

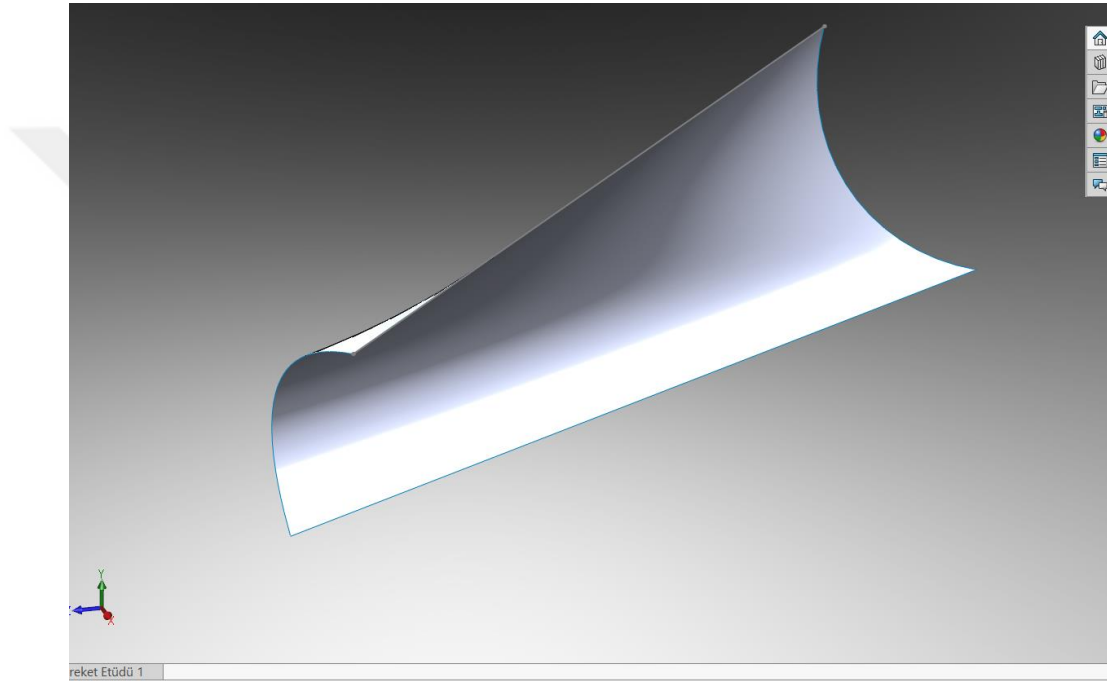


Şekil 5.11 : İlk tasarım için bulunan çıkış eğrisi.

Çizelge 5.4 : Model kulak tasarımları parametrik tasarım çıkış eğrileri.

Model	Çıkış Eğrisi Denklem
İlk Tasarım	$0.0045x^2 - 1.7x + 640$
İkinci Tasarım	$0.0024x^2 - 1.2x + 600$
Üçüncü Tasarım	$0.005x^2 - 1.2x + 560$
Dördüncü Tasarım	$0.0046x^2 - 1.7x + 640$
Beşinci Tasarım	$0.0042x^2 - 2x + 780$

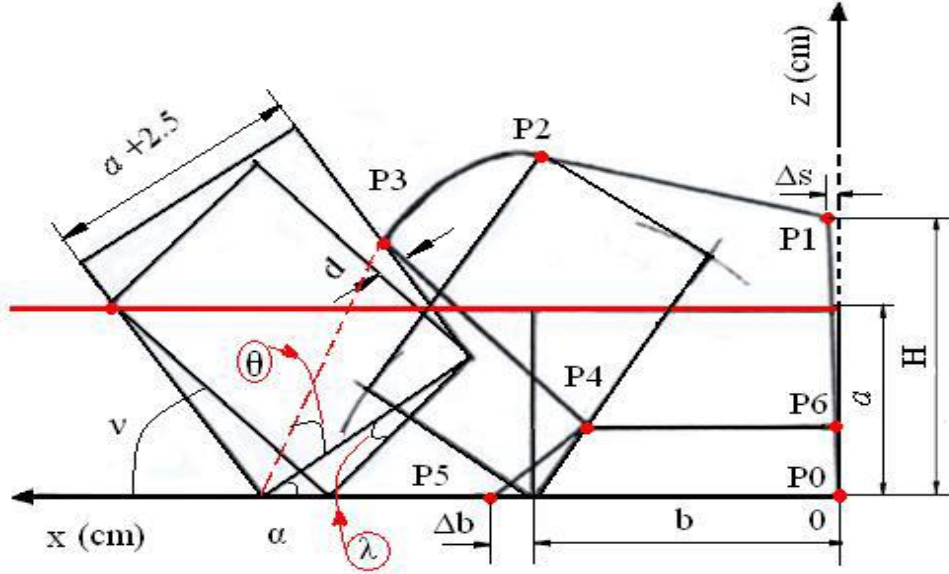
Bu bilgileri ışığında kulak yüzeyi giriş eğrisi (çember yay denklemi), çıkış eğrisi (ikinci dereceden polinom), kulak yüksekliği ve taban kesme açısı parametreleri ile kulak yüzeyi oluşturulabilmektedir.



Şekil 5.12 : Giriş ve çıkış eğrileri sonucunda yapılan yüzey modellemesi .

Pulluk ön görünüşünün parametrik çizilmesi

Pulluğun ön görünümünün parametrik tasarımı için Şekil 5.13'deki P6–P0 noktalarının koordinatlarının tanımlanması ve bu noktaların kurallı bir şekilde birleştirilmesi gereklidir. Ayrıntısı aşağıda verilen ikinci dereceden bir denklem yoluyla P2-P3 bulunmaktadır. P0'ın koordinatları ise (0,0) olduğu varsayılmaktadır. P1 ve P2 aşağıdaki denklemlerle bulunmaktadır. Bu denklemler Solidworks ortamında denklemler komutu kullanılarak tanıtılmış ve Solidworks'ün otomatik olarak denklemleri hesaplayarak çizim yapması istenmiştir. Ayrıca farklı parametrelere ait kulak tasarım sürecini hızlandırmak için makro yapılarak bir arayüz oluşturulmuştur. Aşağıda hem denklemler hem de Solidworks makroyla yapılan işlemler gösterilmektedir.



Şekil 5.13 : Kulak ön görünüşü ve P0-P6 noktalarının gösterimi (Soltani ve Taghinezhad, 2012).

Ön görünüşteki a,b ve Δs değişken olarak belirlenmiş ve bu değişkenlere bağlı olarak diğer noktalar aşağıdaki denklemler doğrultusunda hesaplanmıştır.

$$Z_1 = H \quad (5.39)$$

$$X_2 = b \quad (5.40)$$

$$Z_2 = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5.41)$$

P_3 'ün koordinatlarının belirlenmesinde sinüs teoremi kullanılarak bulunmakadır.

$$\vartheta = \sin^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) \quad (5.42)$$

$$a = \sin^{-1}\left(a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \vartheta\right) / (a + 25)\right) \quad (5.43)$$

$$\lambda = \frac{\pi}{2} - a - \vartheta \quad (5.44)$$

$$Z_a = a \cdot \cos(\vartheta) \quad (5.45)$$

$$Z_b = \frac{b}{2} \sin(\lambda + \vartheta) \quad (5.46)$$

$$Z_3 = Z_a + Z_b \quad (5.47)$$

$$C = a \cdot \frac{\sin(\lambda)}{\sin(a)} \quad (5.48)$$

$$Q = \tan^{-1}\left(\frac{b}{2 \cdot (a+25)}\right) \quad (5.49)$$

$$L = \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + (a + 25)^2} \quad (5.50)$$

$$C_1 = L \cdot \cos(\beta) \quad (5.51)$$

$$X_3 = 150 - (a + b + C - C_1) \quad (5.52)$$

$$Z_4 = S \cdot \sin(\delta_2) \quad (5.53)$$

$$m = \tan(v) \quad (5.54)$$

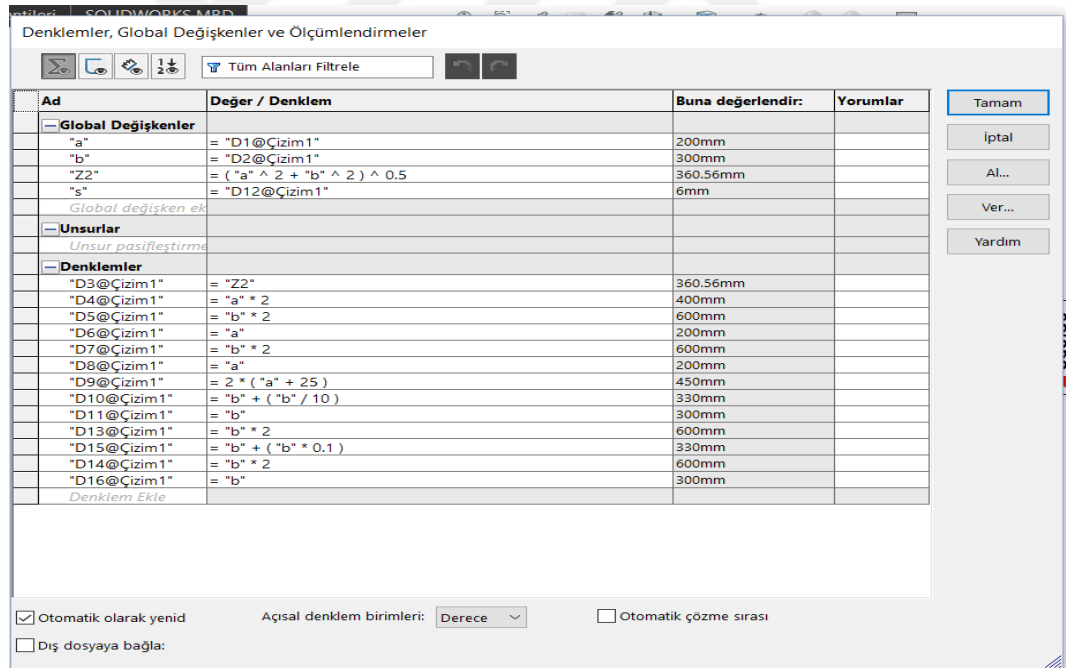
$$Z = Z_3 + m(X - X_3) \quad (5.55)$$

$$X_4 = \frac{(Z_4 - Z_3)}{m} + m \cdot X_3 \quad (5.56)$$

$$X_5 = b + \Delta b \quad (5.57)$$

$$Z_6 = S \cdot \sin(\delta_2) \quad (5.58)$$

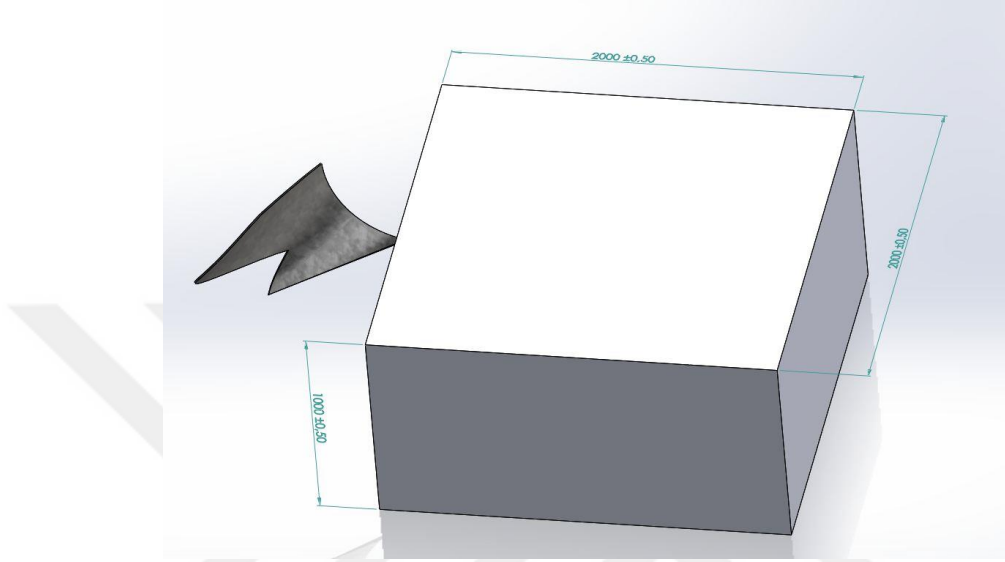
Bu denklemler Şekil 5.13 te olduğu gibi Solidworks ‘Denklemler’ modülüne tanıtılarak kulak ön görünüm çizimi tamamlanmaktadır.



Şekil 5.14 : Solidworks ‘Denklemler’ modülü kullanılarak pulluk kulağının ön görünüşünün çizilmesi.

5.4.2.2 Toprak geometrisi

Toprak, 2015 yılında yayılan “Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement” isimli makalede kullanılan geometrik özelliklerde dikdörtgen prizma şeklinde modellenmiştir. Şekil 5.17’ de toprak modeli ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 5.17 : Toprak modeli.

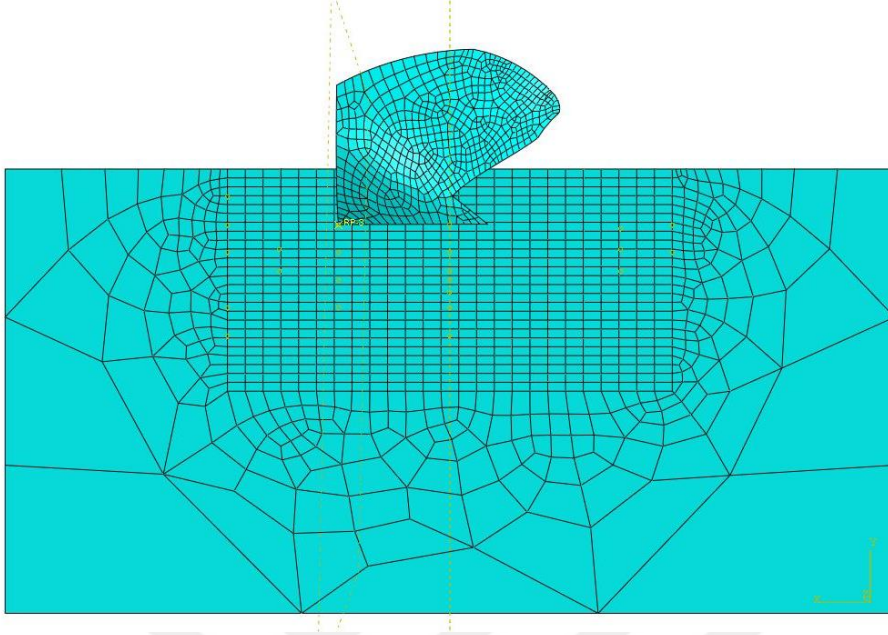
5.5 Çözüm Ağı, Başlangıç ve Sınır Koşulları

5.5.1 Çözüm ağı

Rijit kulaklı pulluk yüzeyi elemanları ikinci dereceden (quadratic), rijit iki doğrulu (bilinear) R3D4; dört düğümlü ve üç serbestlik dereceli eleman olarak modellenmiştir. Toprak gövdesi ise sekiz düğümlü doğrusal tuğla eleman (C3D8R), indirgenmiş integral (reduced integration), süpürme çözüm ağı (sweep mesh), kum saati kontrolü (hourglass control) kullanılarak modellenmiştir.

Toprak gövdesi iki farklı bölüme ayrılmıştır. Çözüm süresini sonuçları etkilemeyecek ölçüde azaltmak için Şekil 5.18’ de görüldüğü gibi kulaklı pulluk ile ilk temas eden toprak kısmına daha ince çözüm ağı üretilmiş kalan kısımlarına ise daha kaba çözüm ağı üretilmiştir. Çözüm ağı eleman büyüklüğü ve düğüm sayısı etkisi 2013 yılında yayınlanan “Finite element simulation of moldboard-soil interaction” isimli makaleden referans alınarak çözüm süresinin optimum olacağı şekilde belirlenmiştir. Buna göre toprak toplam 51205 altıyüzlü (C3D8R) eleman ve 53704 düğüm, kulaklı

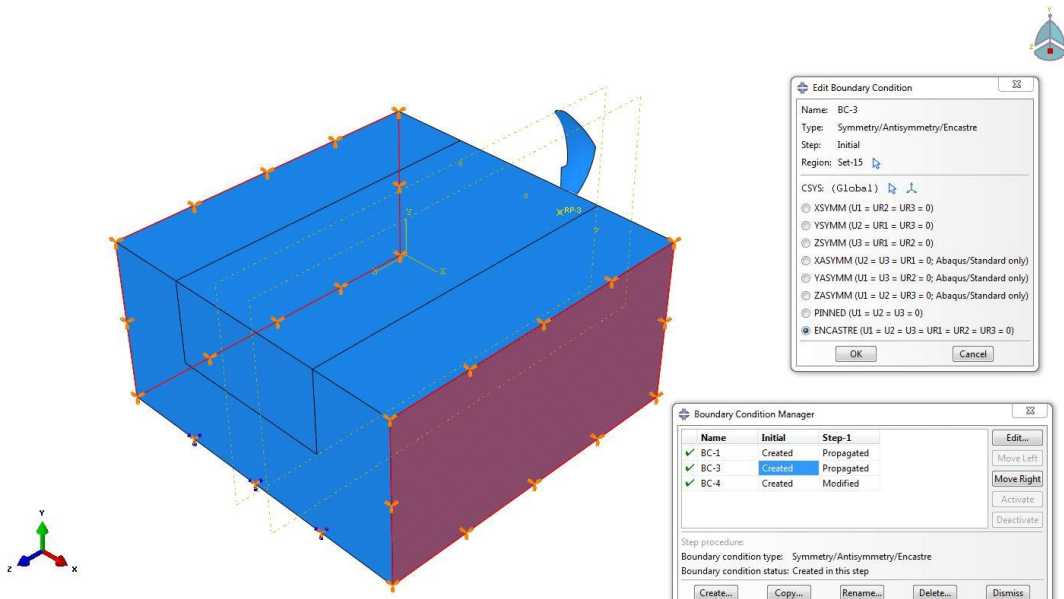
pulluk ise 541 doğrusal dörtgen (R3D4) eleman ve 607 düğüm sayısı ile oluşturulmuştur.



Şekil 5.18 : Modelin çözüm ağı (mesh).

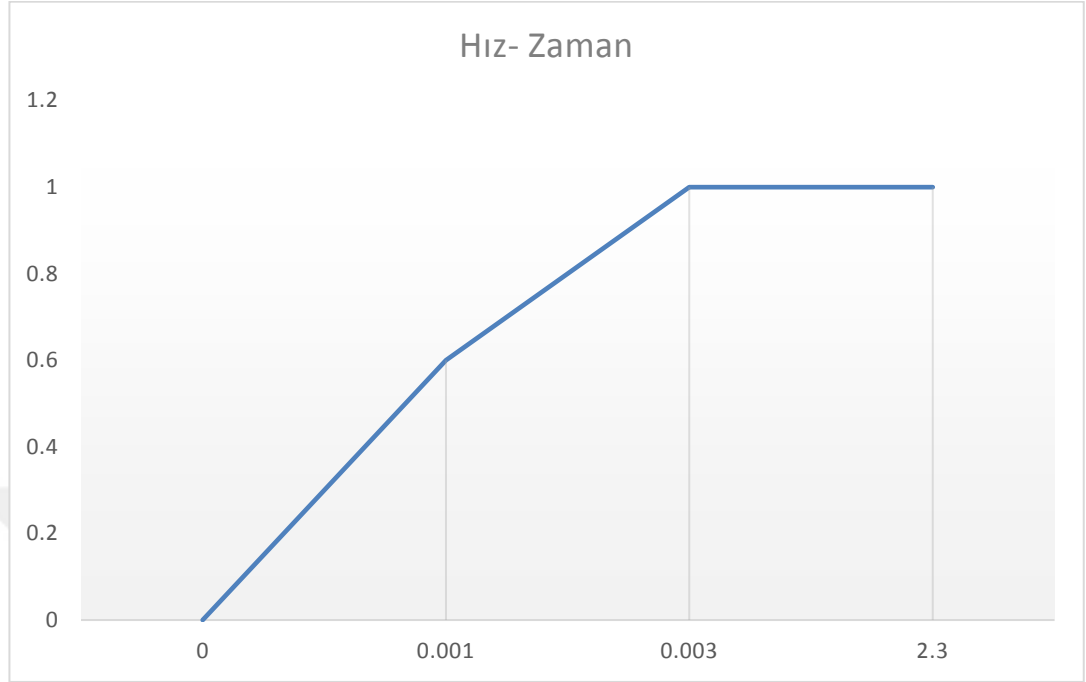
5.5.2 Sınır koşulları

Toprak gövdesinin alt ve yanal yüzeyleri aşağıdaki Şekil 5.19’da olduğu gibi altı serbestlik derecesine göre mesnetlenmiş toprak gövdesinin diğer yüzeyleri ve düğümlerine herhangi bir sınır koşulu etkitilmemiştir. Rijit kulaklı pulluğa ise ‘z’ yönünde ilerlemesi hariç diğer hareketleri kısıtlanmıştır.



Şekil 5.19 : Toprak gövdesi sınır koşulları.

Hesaplama da herhangi bir ıraksama probleminden kaçınmak için kulaklı pulluk hızı Şekil 5.20 ve Çizelge 5.5’teki grafiğe göre belirlenmiştir.



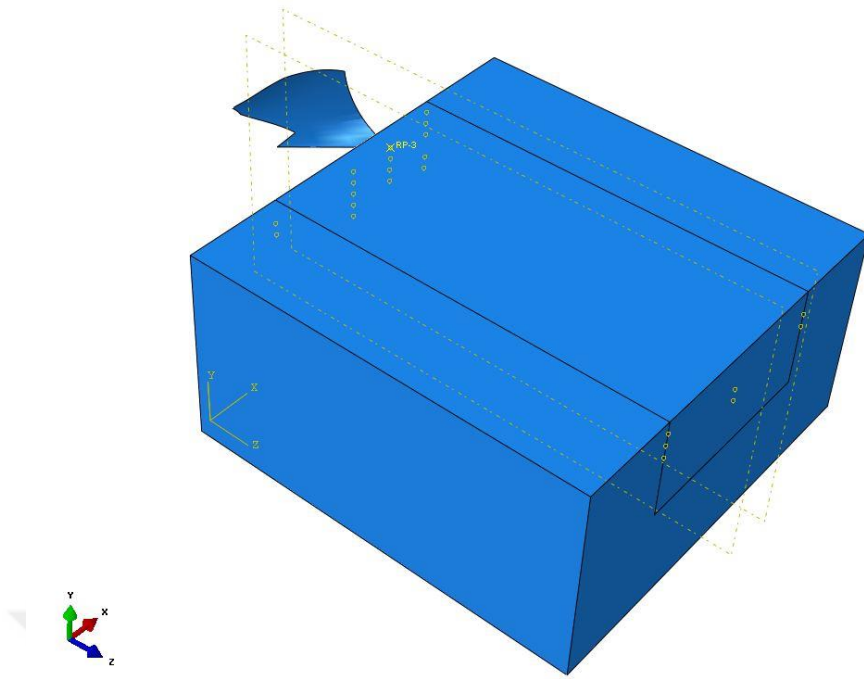
Şekil 5.20 : Kulaklı pulluk hız-zaman grafiği.

Çizelge 5.5 : Kulaklı pulluk hız – zaman değerleri.

Hız	Zaman
0	0
0.001	0.6
0.003	1
2.3	1

Abaqus/Explicit’de problemi çözmek için iki adım göz önüne alınmaktadır. Başlangıç adımında sınır koşulları uygulanır ve toplamda 2.5 [sn.]’lik ikinci adımda ise dinamik çözüm uygulanır.

Toprak–kulaklı pulluk etkileşiminde ise yüzey–yüzey temas (surface to surface contact) ilişkisi kullanılmış olup pulluk aktif yüzeyi efendi (master), toprak düğüm kümesi ise köle (slave) olarak seçilmiştir. Bunlara ek olarak teğetsel davranış penaltı temas algoritması kullanılarak $\mu = 0.58$ sürtünme katsayısı ile toprak-takım etkileşimi modellenmiştir. Çözüm sonucunda takıma etkiyen toplam çeki kuvveti- zaman grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 5.21’ de gösterilen model, pulluk hızı, pulluk kesme açısı ve iş derinliği açısından farklı seneryolarda çözdürülüp, bu parametrelerin pulluğa etkiyen toplam çeki kuvvetine etkileri araştırılmıştır.



Şekil 5.21 : Toprak-kulaklı pulluk sonlu elemanlar modeli.

Çizelge 5.6’ da bu senaryolarda uygulanan çözümler ve parametreleri listelenmiş olup Senaryo 1, Senaryo 2 ... şeklinde isimlendirilmiştir.

Çizelge 5.6 : Çözdürülen toprak–kulaklı pulluk model parametreleri.

Senaryolar	Pulluk Hızı [m/sn]	İş Derinliği [mm]	Kulak Kesme Açısı [$^{\circ}$]
Senaryo 1	1	150	40
Senaryo 2	1	175	40
Senaryo 3	1	200	40
Senaryo 4	1	225	40
Senaryo 5	1	250	40
Senaryo 6	1	150	32.5
Senaryo 7	1	150	35
Senaryo 8	1	150	37.5
Senaryo 9	1	150	40
Senaryo 10	1	150	42.5
Senaryo 11	1	150	40
Senaryo 12	1.5	150	40
Senaryo 13	2	150	40
Senaryo 14	2.5	150	40
Senaryo 15	3	150	40

Senaryo 1 = Senaryo 9 = Senaryo 11 olduğu için toplamda 13 adet model elde edilmiş ve çözümler oluşturulmuştur.

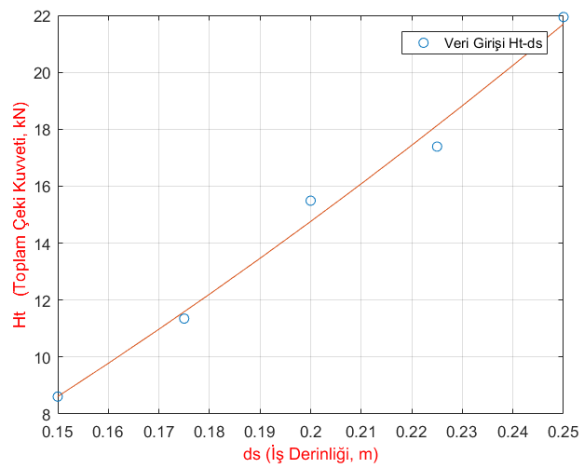
5.5.3 Sonuçlar

EK A'da verilen sonlu elemanlar yöntemi ile numerik çözümü yapılan farklı senaryolarda toprak işleme yönünde elde edilen ortalama çeki kuvvetleri aşağıdaki Çizelge 5.7 de listelenmiştir.

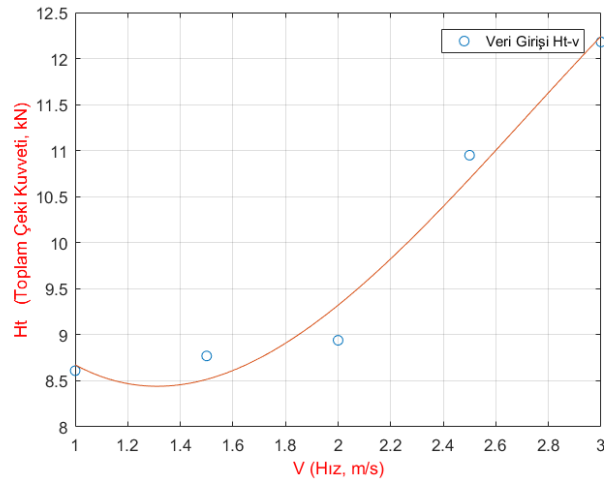
Çizelge 5.7 : Farklı senaryolardaki çözümlerden elde edilen toprak sürme yönündeki çeki kuvvetleri.

Senaryolar	Ortalama Çeki Kuvveti [kN]
Senaryo 1	8,61
Senaryo 2	11,35
Senaryo 3	15,49
Senaryo 4	17,39
Senaryo 5	21,94
Senaryo 6	19,03
Senaryo 7	15,02
Senaryo 8	12,68
Senaryo 9	8,61
Senaryo 10	9,50
Senaryo 11	8,61
Senaryo 12	8,54
Senaryo 13	8,94
Senaryo 14	10,95
Senaryo 15	12,18

Yukarıdaki çizelge ve grafiklerden elde edilen sonuçlara göre toprak sürme yönündeki çeki kuvvetinin, aynı pulluk kulağı geometrisine göre farklı operasyonel durumları aşağıdaki Şekil 5.22 ve 5.23'de karşılaştırılmıştır. Buna göre toprak sürme hızının çeki kuvvetiyle değişimi ikinci dereceden olmasına karşın, iş derinliğine göre değişimi doğrusal olmaktadır.

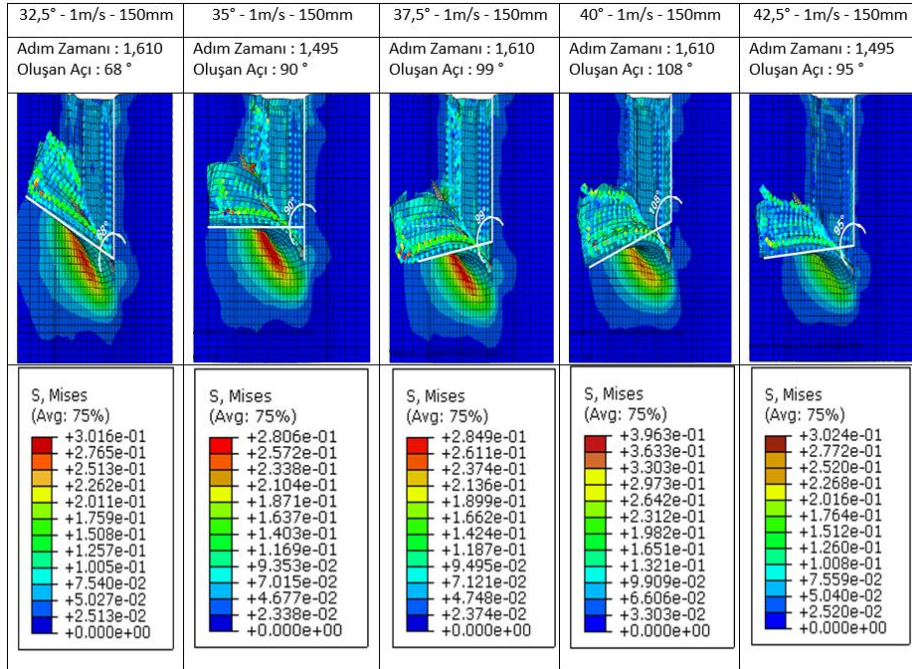


Şekil 5.22 : Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan çeki kuvvetinin iş derinliği ile değişimi.



Şekil 5.23 : Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan çeki kuvvetinin toprak sürme hızı ile değişimi.

Öte yandan pulluk kulağı tasarımında dikakte alınması gereken bir diğer nokta ise toprağın çevrilmesidir. Pulluklar toprağı parçalar çevirerek devirir, gevşetir anız ve yabancı otları toprağı gömer. Bu sebeple yapılan tasarımın hem düşük çeki kuvvetine sahip olması hem de toprağı istenilen düzeyde çevirebilme kabiliyetine sahip olması gereklidir. Aşağıda Şekil 5.24’de birbirlerine yakın adım zamanlarında farklı kesme açılarındaki toprağın durumu şematize edilmiştir.



Şekil 5.24 : Farklı kesme açısına sahip kulak geometrilerinin toprağı çevirmesi durumu.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanan çeki kuvvetleri iş derinliği arttıkça doğrusal bir artış gösterirken, traktör hızındaki değişimin ikinci dereceden fonksiyonu ile arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı senaryolardaki çeki kuvvetleri ve Şekil 5.24'te aynı çözüm zamanında toprağın çevrilmesi ile ilgili verilen görsel dikkate alındığında 40^0 kesme açısına sahip kulak geometrisinin diğer geometrilere göre daha uygun bir tasarım olduğu sonucuna varılmıştır.





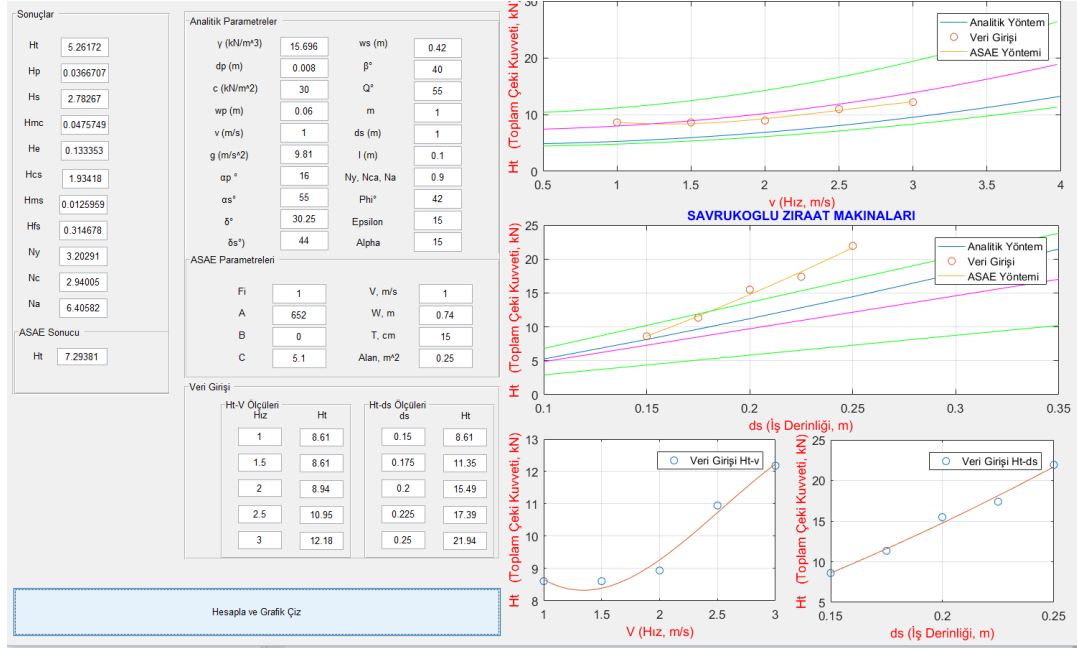
6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tezin asıl amacı; toprak-kulak etkileşiminde çeki kuvvetinin, literatürde bulunan çalışmalarda doğrulanan yöntemler ve sonuçları ile, toprak-kulaklı pulluk etkileşiminin sonlu elemanlar yöntemi çözümü sonuçlarının karşılaştırılarak doğrulanmasıdır. Böylece tasarlanan farklı geometrilerdeki toprak işleme takımı gereken çeki kuvveti sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilebilecektir. Tasarım verimliliği artacak, tasarım süresi azalacak ve tarımsal faaliyetlerde çok fazla zaman ve enerji tüketen toprak işleme sürecinde verimlilik sağlanacaktır. Bununla birlikte tez çerçevesinde parametrik pulluk kulağı yöntemi kullanılmış olup SolidWorks ve Visual Studio programları yardımı ile bir makro oluşturularak pulluk kulağı parametrik tasarım programı oluşturulmuştur. Böylece kulak geometrisine ait sekiz farklı parametreyle tasarım yapılabilmekte ve pulluk kulağının çeki kuvvetine göre optimizasyonu için başlangıç adım olmaktadır.

Tez kapsamında toprağın fiziksel yapısı ve mekanik özelliklerini etkileyen önemli parametreler açıklanmıştır. Literatürdeki toprak-takım etkileşimi ile ilgili statik, dinamik modeller incelenmiştir. Deneysel doğrulaması yapılmış bir analitik toprak-kulak etkileşimi çeki kuvveti hesabı incelenmiş ve ayrıntıları verilmiştir. Toprak-takım etkileşiminin modellenmesinde sonlu elemanlar metodundan bahsedilmiş ve toprak literatürde bulunan toprak modelleri tanıtılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde ilintisiz Drucker-Prager bünyesel denklemi kullanılmıştır. Toprağın kesilmesi simülasyonu için toprak davranışında birim şekil değişimine bağlı ayrılma kriteri kullanılmıştır. Temas elemanları kullanılarak toprağın kulak yüzeyi üzerindeki davranışı modellenmiştir.

Analitik yöntem, amprik yöntem ve numerik yöntem sonuçların daha kolay bir yol ile karşılaştırılması için Matlab GUI yardımıyla .exe uzantılı arayüz oluşturulmuştur. Şekil 6.1 de oluşturulan programın ekran görüntüsü verilmiştir. Programda analitik hesaplama, ASAE standardına göre hesaplama ve veri girişi modülü ile girilen parametrelere göre hesaplama yapılabilmekte ve otomatik olarak üç farklı sonuç için $H_t - d_s$ ve $H_t - V$ grafikleri çizilmektedir. Böylelikle arayüz kullanılabilir,

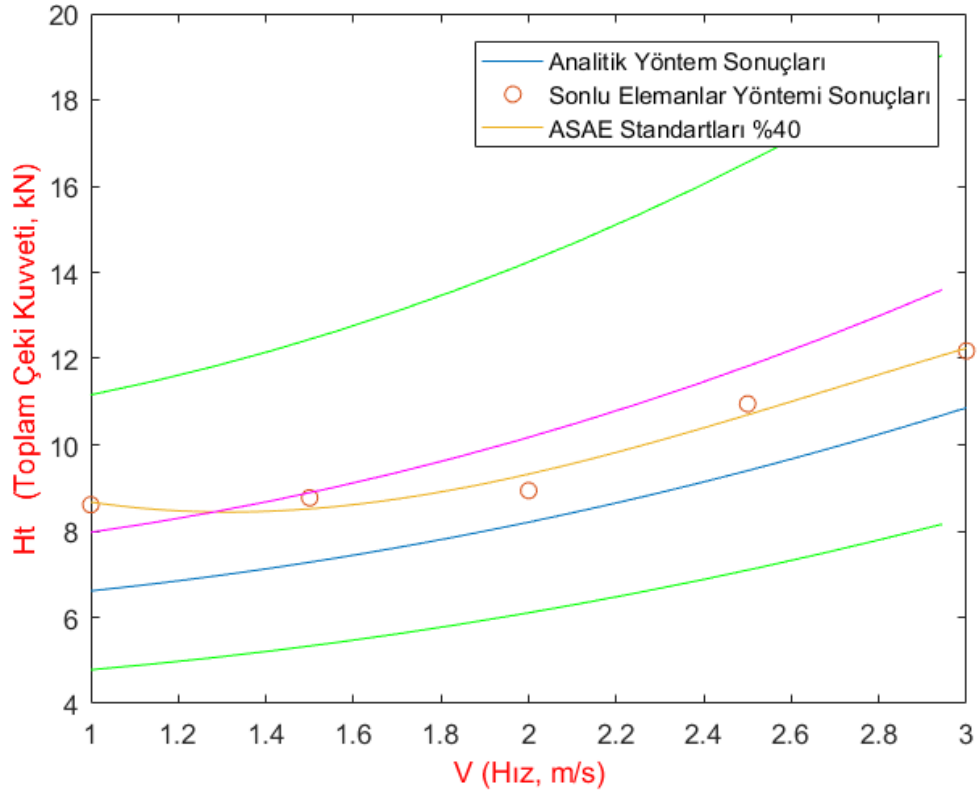
değiştirilebilen kolay bir hale gelmektedir. Veri girişi modülü ile birlikte ise deneysel sonuç, FEM sonucu gibi diğer veriler girilerek hesaplanan sonuçlar ile kolayca karşılaştırılabilmektedir. MATLAB Program kodları ve program EK E’ de verilmiştir.



Şekil 6.1 : Çeki kuvvetinin farklı hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılabildiği MATLAB GUI programı

6.1 Toprak-Kulaklı Pulluk İlişkisinde Pulluk Hızının Etkisinin Analitik ve Numerik Yöntemler ile Karşılaştırılması

Aynı toprak ve kulak parametreleri ile farklı yöntemler ile elde edilmiş toprak sürme hızındaki değişimin, toprak sürme yönündeki pulluğa etkileyen çeki kuvvetlerinin karşılaştırılması aşağıdaki Şekil 6.2’deki grafikte ayrıntılı olarak verilmiştir. Grafikte pembe renkli eğri ASAE standardına göre bulunmuş sonuçları, yeşil renk ise bu sonucun alt ve üst limitlerini göstermektedir. Mavi renkli eğri ise analitik yolla hesaplanmış çeki kuvveti eğrisidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile bulunmuş farklı hızlardaki çeki kuvvetleri, diğer sonuçlar ile karşılaştırıldığında diğerlerinde olduğu gibi traktör hızının ikinci dereceden fonksiyonu olduğu görülmektedir. Standartta göre hesaplanan çeki kuvvetleri ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş çeki kuvvetleri arasındaki hatta oranı % 0-7.8 olurken, analitik hesaplama karşılaştırıldığında hata oranı % 7.2-17.6 arasında olmaktadır. Bu sonuçlara göre numerik yöntem ile bulunan değerlerin kulaklı pulluk tasarımında güvenlik katsayısı ile birlikte kullanılabilir olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

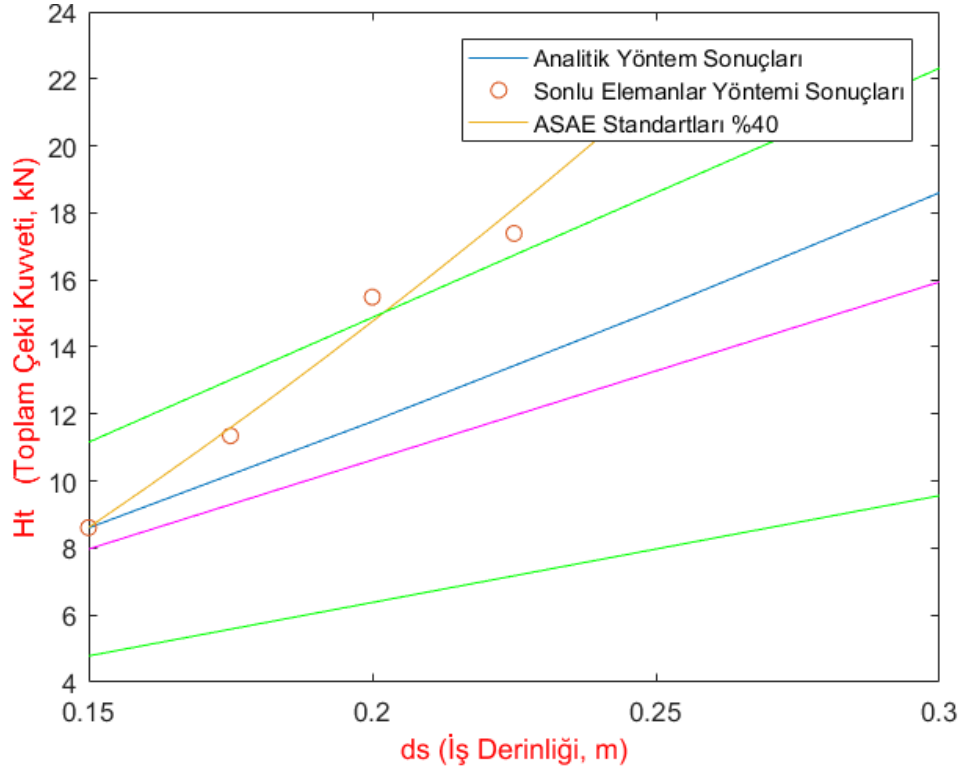


Şekil 6.2 : Farklı yöntemler ile hesaplanan çeki kuvvetinin hıza göre değişiminin karşılaştırılması

6.2 Toprak-Kulaklı Pulluk İlişkisinde İş Derinliği Etkisinin Analitik ve Numerik Yöntemlerle ile Karşılaştırılması

Aynı toprak ve kulak parametreleri ile farklı yöntemler ile elde edilmiş toprak sürme derinliğindeki değişimin, toprak sürme yönündeki pulluğa etkiyen çeki kuvvetlerinin karşılaştırılması aşağıdaki Şekil 6.3'deki grafikte ayrıntılı olarak verilmiştir. Grafikte pembe renkli eğri ASAE standardına göre bulunmuş sonuçları, yeşil renk ise bu sonucun alt ve üst limitlerini göstermektedir. Mavi renkli eğri ise analitik yolla hesaplanmış çeki kuvveti eğrisidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile bulunmuş farklı iş derinliğindeki çeki kuvvetleri, diğer sonuçlar ile karşılaştırıldığında diğerlerinde olduğu gibi iş derinliği ile lineer arttığı görülmektedir. Standartta göre hesaplanan çeki kuvvetleri ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş çeki kuvvetleri arasındaki hatta oranı 0.15-0.25 [m] iş derinliği aralığında, % 5.8-40 olurken, analitik hesapla karşılaştırıldığında hata oranı % 0-30 arasında olmaktadır. Fakat arasındaki hatta oranı 0.15-0.20 [m] iş derinliği aralığında, hata hem analitik hem de standart çözümü için çok daha az olmaktadır. Bu sonuçlara göre numerik yöntem ile bulunan değerlerin kulaklı

pulluk tasarımımda 0.15-0.2 [m] iş derinliği aralığında güvenlik katsayısı ile birlikte kullanılabilir olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 6.3 : Farklı yöntemler ile hesaplanan toplam çeki kuvvetinin iş derinliğine göre değişiminin karşılaştırılması.

KAYNAKLAR

- ABAQUS Analysis User's Manual Ver. 6.10** (2010). Dassault Systems Inc., Providence, RI, USA.
- Abo Al-Kheer, A., Aoues, Y., Eid M. & El-Hami, A.** (2011). Integrating the concepts of optimization and reliability in the design of agricultural machines, *Physics , INSA de Rouen*.
- Armin, A.** (2014). *Mechanics of soil-blade interaction* (Doktora tezi). University of Saskatchewan, Department of Mechanical Engineering, Saskatoon, Canada.
- Ashrafizadeh, S.R. & Kushwaha, R.L.** (2003). Soil failure model in front of a tillage tool action a review, *CSAE/SCGR 2003 Meeting Montréal*, Québec.
- Ashrafizadeh, S.R.** (2006). *Modeling of energy requirements by a narrow tillage tool*. (Doktora Tezi) University of Saskatchewan, Department of Mechanical Engineering, Saskatoon, Canada..
- ASTM. 2004e.** (2004). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*. In 2004 Annual book of ASTM standards. D 4253, Sect. 4, Vol. 04.08. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, Pa.
- Boydaş, M. G. & Uygan F.** (2010). Kulaklı Pullukta Çeki Kuvvetine Etki Eden Faktörler, 26. *Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi*, Hatay
- Brown, O.** (2012). Finite element analysis of blade-formation interactions in excavation (Yüksek Lisans Tezi), Missouri University of Science and Technology.
- Azyamova, E.N.** (1963). Studies of dynamics of deformation of soil. *Trudy (TSNIIMESKH) Minsk* 1:131-139. (Çeviri W.R. Gill tarafından, National Tillage Machinery Laboratory, USDA-ARS, Auburn, AL).
- Callari, C. & Auricchio, F. , Sacco, E.** (1998), A Finite-strain Cam-clay Model in the Framework of Multiplicative Elasto-plasticity, *International Journal of Plasticity*, Vol. 14(12), pp. 1155-1187.
- Chi, L. & Kushwaha, R. L.** (1990). A non-linear 3-D finite element analysis of soil failure with tillage tools. *J. Terrramech.* 27 (4), 343–366.
- Chi, L. & Kushwaha, R. L.** (1991). Three-dimensional, finite element interaction between the soil and simple tillage tool. *Transaction of the ASAE.* 34 (1991): 361-365.
- Drucker, D.C. & Prager, W.** (1952). Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 10: 157-165.
- Duncan, J.M. & Chang, C.Y.** (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soil, *J. SoilMech. Found. Div., ASCE* 96 (SM5), 1629–1653.

- Gens, A. & Potts, D. M.** (1988). Critical State Models in Computational Geomechanics, *Engineering Computations*, Vol. 5(3), pp. 178-197.
- Godwin, R.J. & Spoor, G.,** (1977). Soil failure with narrow tines, *J. Agric. Eng. Res.* 22 (4), 213–228.
- Godwin, R.J., O'Dogherty, M.J., Saunders, C. & Balafoutis, A.T.** (2007). A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed, *Biosystems Engineering*, Volume 97, Issue 1, pp. 117-129.
- Grisso, R.D., Yasin, M., Rocher, M.F.,** (1996). Tillage implement forces operating in silty clay loam. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 19 (6), 1977–1982.
- Helwany, Sam.** (2007). *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications. Properties of Soil*, New York: Wiley.
- Hettaratchi, D.R.P.,** (1993). Modeling soil machine interaction, *Proceedings of the 11th International Conference of the ISTVS*, Lake Tahoe Nevada, USA, September 27–30.
- Ibrahmi, A., ve diğ.,** (2015). Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. *Comput. Electron. Agric.*
- Jafari, R. & Tavakoli, H.T., Minaee, S., Raoufat, M.H.,** (2006, September). Large deformation modeling in soil tillage tool interaction using advanced 3D nonlinear finite element approach. In: Madureira, A.M. (Eds.), *Proc. 6th WSEAS Int. Conf. on Simulation, Modeling and Optimization* (p. 6). *World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)*.
- Karagöz, Y., Keçecioglu G.,** (2000). Pulluk silindirik kulağının bilgisayar destekli tasarımı, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 6 (2-3), 161-175
- Karmakar, S., Kushwaha, R.L.,** (2006). Dynamic modeling of soil–tool interaction: an overview from a fluid flow perspective. *J. Terrramech.* 43 (4), 411–425.
- Karmakar, S.** (2008). Modeling of soil-tool interaction in tillage. Transworld research network, India,
- Katsygin, V.V.** (1964). Relation of draft of agricultural machines to operation speeds. *Voprosy Sel'skohozyaistvennoi Mekhaniki*, Section 2, 96-119, Vol. XII. (Translated by W.R. Gill, National Tillage Machinery Laboratory, USDA-ARS, Auburn, AL).
- Kepner, R. A. & Bainer, R., Barger, E.L.** (1972). Principles of farm machinery Westport, CT. *The Avi publishing Co.*
- Koolen, A.J. & Kuipers, H.** (1983). Agricultural soil mechanics. Berlin, Germany. *Library of Congress Cataloging in Publication Data*.
- Kushwaha, R.L., Shen, J.,** (1995). Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool. *Trans. ASEA* 38, 1315–1319.
- Li, M., Chen, D., Zhang, S., Tong, J.,** (2013). Biomimetic design of a stubble-cutting disc using finite element analysis. *J. Bionic Eng.* 10, 118–127.

- Mahmoud Soltani & Javad Taghinezhad**, (2012) Computer Aided Design of moldboard plough surface. *Journal of Agricultural Technology* 8(5): 1545-1553.
- McKyes, E. & Ali, O.S.**, (1977). The cutting of soil by narrow blades. *J. Terramech.* 14 (2), 43–58.
- Mouazen, A.M. & Nemenyi, M.**, (1999). Tillage tool design by the finite element method. Part 1. FEM of soil plastic behavior. *J. Agric. Eng. Res.* 72, 37–51.
- Nikiforov, P.E. & M.I. Bredun**. (1965). The sliding friction of soil on metal and plastic surfaces. Moscow, Russia: Nukai.
- O’Callaghan, J.R. & Farrelly, K. M.** (1964). Cleavage of soil by tined implements. *Journal of agricultural research*, 9:259-270.
- Payne, P. C. J.** (1956). The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *Journal of agricultural engineering research*, 1:23-50.
- Perumpral, J. V., Grisso, R. D. and Desai, C. S.** (1983), A Soil-Tool Model Based on Limit Equilibrium Analysis, Transactions of the ASAE, Vol. 26(4), *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, MI, USA, pp. 991-995.
- Ravonison, N. M. & Destain M.**, (1994). Parametric cubic equations for modelling mouldboard plough surfaces, *Soil and Tillage Research* 31(4):363–373
- Reece, A.R.** (1965). The fundamental equation of earth-moving mechanics. *Proceedings of the IMechE*, 179: 16-22
- Roscoe, K. H. & Burland, J. B.** (1968), “On the Generalized Stress-strain Behavior of Wet Clay,” In Engineering Plasticity, eds. Heyman, J. and Leckie, F. A, Cambridge, England, *Cambridge University Press*, pp. 535-609.
- Rucins, A. & Arvids, V.**, (2006). Impact of the share inclination angle on the plough body draft resistance. *Zemdirbyste/Agriculture* 93, 166–179.
- Shen, J. & Kushwaha, R. L.** (1995). Investigation of an algorithm for non-linear and dynamic problems in soil-machine systems. *Computers and Electronics in Agric.* 13: 51-66.
- Schofield, A.N. & Wroth C.P.** (1968), Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, London.
- Swick, W.C. & Perumpral.** (1988). A model for predicting soil-tool interaction. *Journal of Terramechanics* 25(1): 43-56.
- Tagar, A.A., J. Changying, J. Adamowski, J. Malard, C. S. Qi a, D. Qishuo and N.A. Abbasi.** (2015) “Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions”. *Soil & Tillage Research* 145(2015), 157-170, 2015.
- Terzaghi, K.** (1959). Theoretical soil mechanics. J. Wiley & Sons Inc., N.Y
- Wood, D. M.** (1990), Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, England.

- Wroth, C. P. & Houlsby, G. T.** (1985), “Soil Mechanics-property Characterization and Analyzes Procedures,” *In Proceedings of the 11th International Conference SMFE, Vol. 1*, San Francisco, pp. 1-55.
- Vilde, Arvids.** (2008). “The share-moldboard parameters of some plough bodies” ,Engineering for Rural Development - International Scientific Con, p141.
- Yong, R.N. & Hannaj, A.W.,** (1977). Finite element analysis of plane soil cutting. *J. Terrramech.* 14(3), 103–125.
- Zhang, Z.X. & R.L. Kushwaha.** (1999). Operating speed effect on the advancing soil failure zone in tillage operation. *Canadian Agricultural Engineering* 41(2): 87-92.



EKLER

EK A: Abaqus Programı ile Çözdürülen Farklı Senaryoların Çeki Kuvveti-Zaman Grafikleri

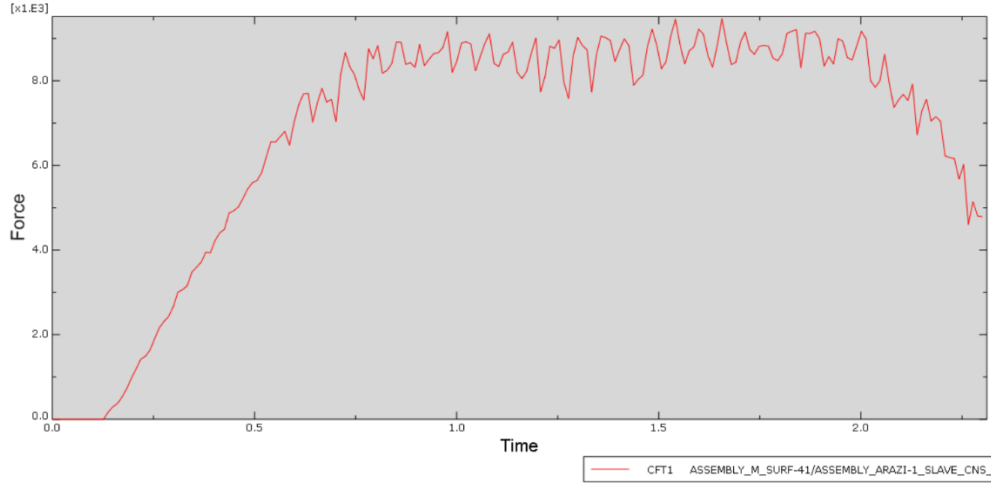
EK B: Kulaklı Pulluk Analitik Çeki Kuvveti Hesabı MATLAB Kodları

EK C: Kulaklı Pulluk ASAE D497.4 Standardına göre Çeki Kuvveti Hesabı MATLAB Kodları

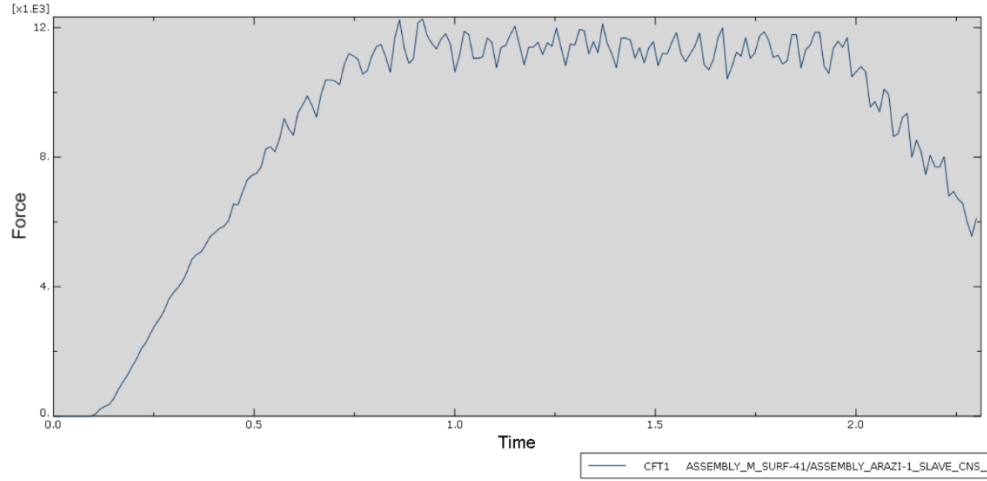
EK D: Kulaklı Pulluk Parametrik Tasarım Visual Studio Programlama Kodları (CD İçerisinde)

EK E: Farklı Yöntemler Ile Bulunmuş Çeki Kuvvetlerinin Karşılaştırılması MATLAB Programı (CD İçerisinde)

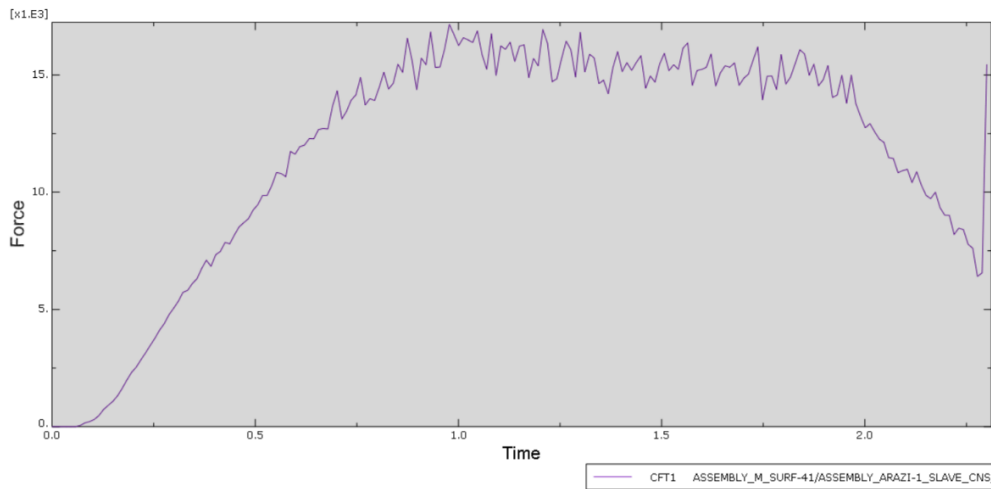
EK A: Abaqus Programı ile Çözdürülen Farklı Senaryoların Çeki Kuvveti-Zaman Grafikleri



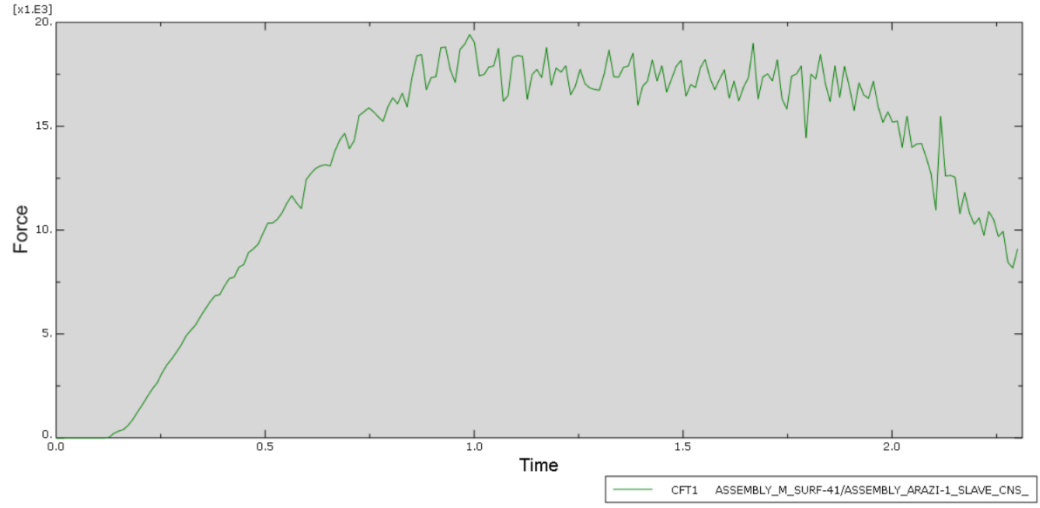
Şekil A.1 : Senaryo 1 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).



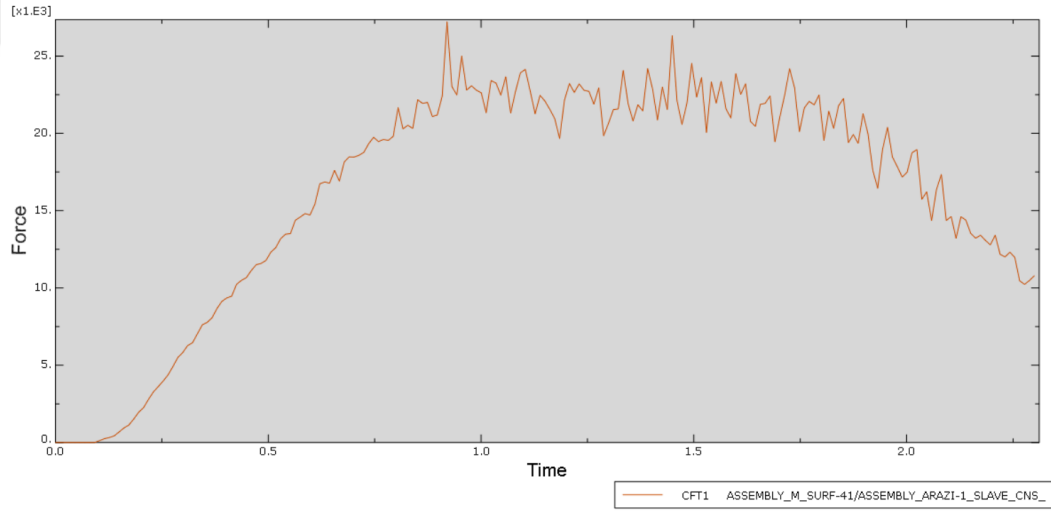
Şekil A.2 : Senaryo 2 ($V=1$ [m/sn], $ds=175$ [mm] , $\beta=40^\circ$).



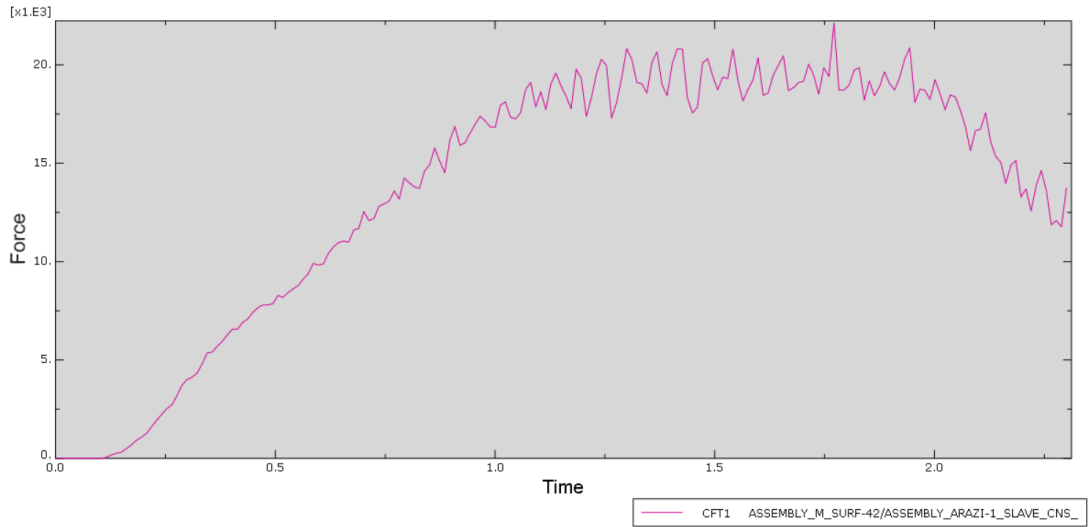
Şekil A.3 : Senaryo 3 ($V=1$ [m/sn], $ds=200$ [mm] , $\beta=40^\circ$).



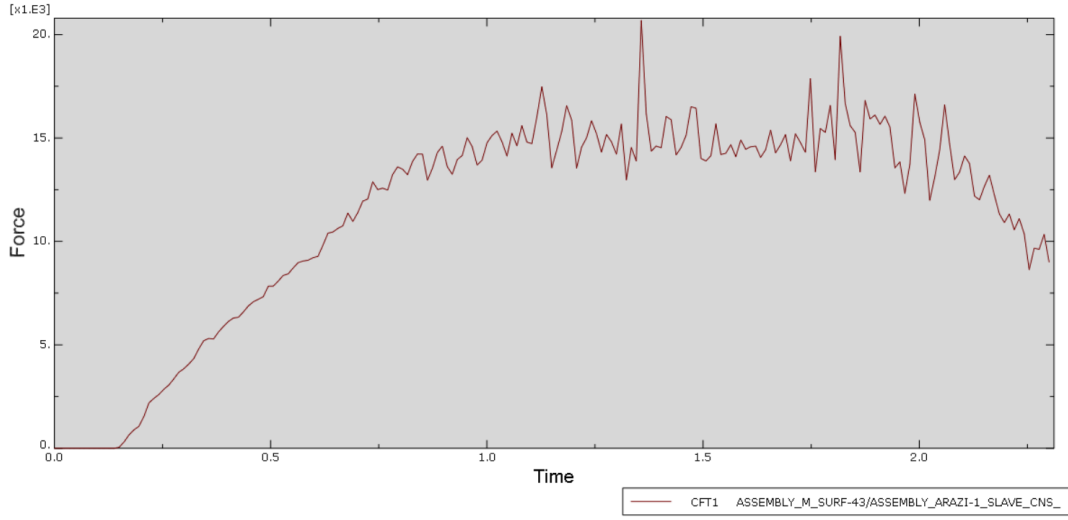
Şekil A.4 : Senaryo 4 ($V=1$ [m/sn], $ds=225$ [mm] , $\beta=40^\circ$).



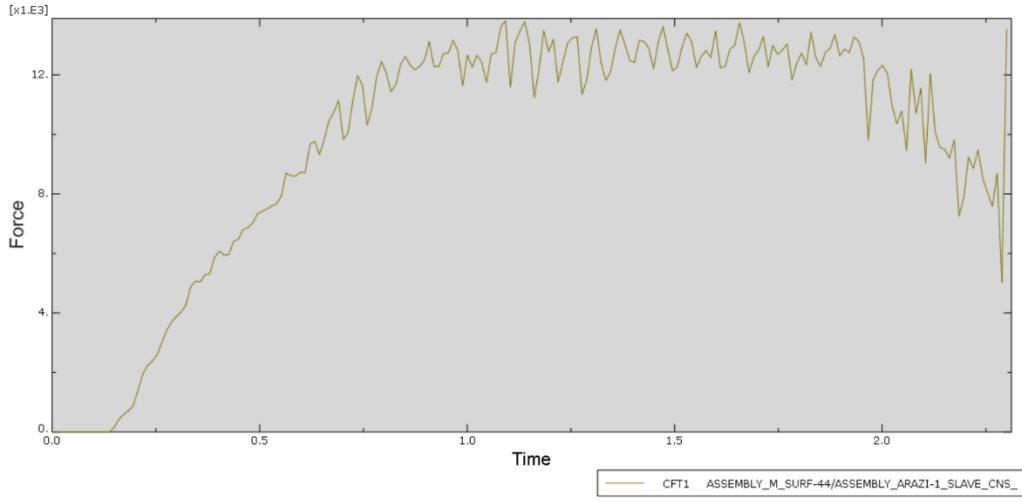
Şekil A.5 : Senaryo 5 ($V=1$ [m/sn], $ds=250$ [mm] , $\beta=40^\circ$).



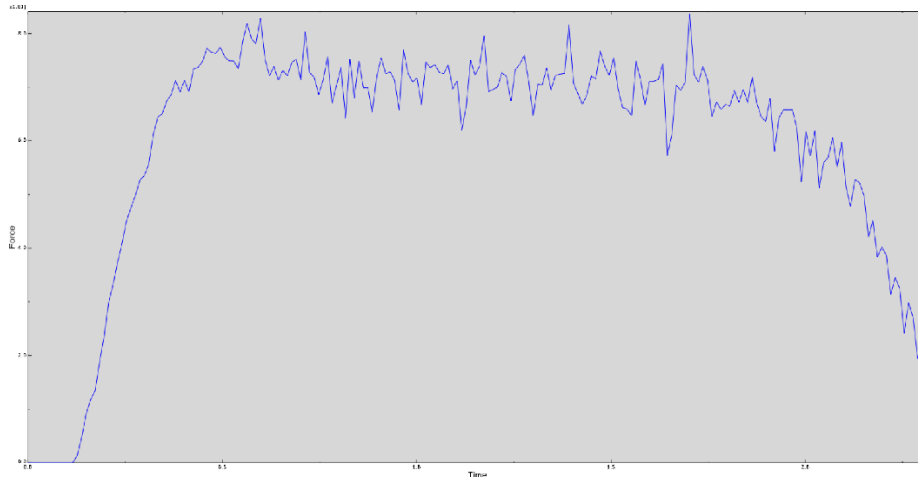
Şekil A.6 : Senaryo 6 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=32.5^\circ$).



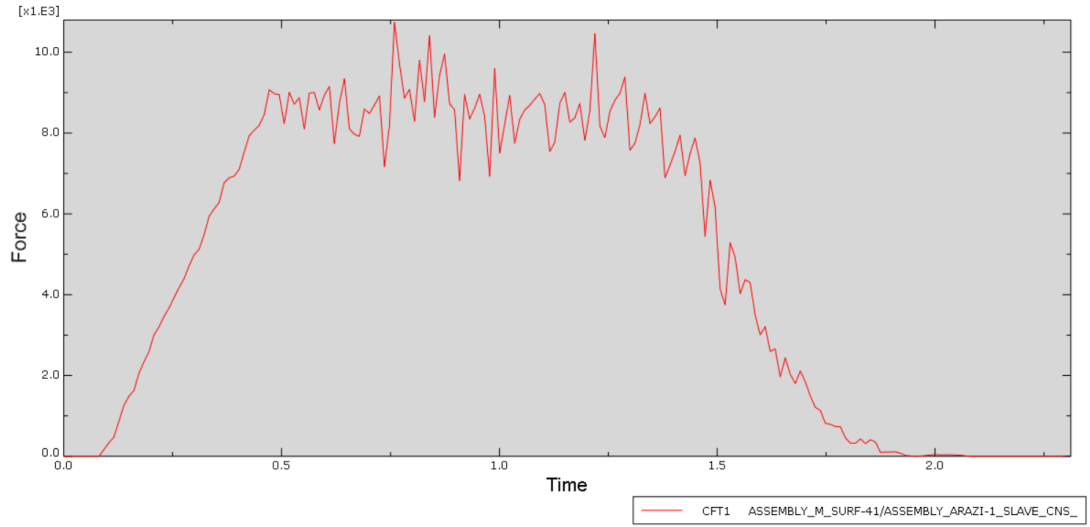
Şekil A.7 : Senaryo 7 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=35^\circ$).



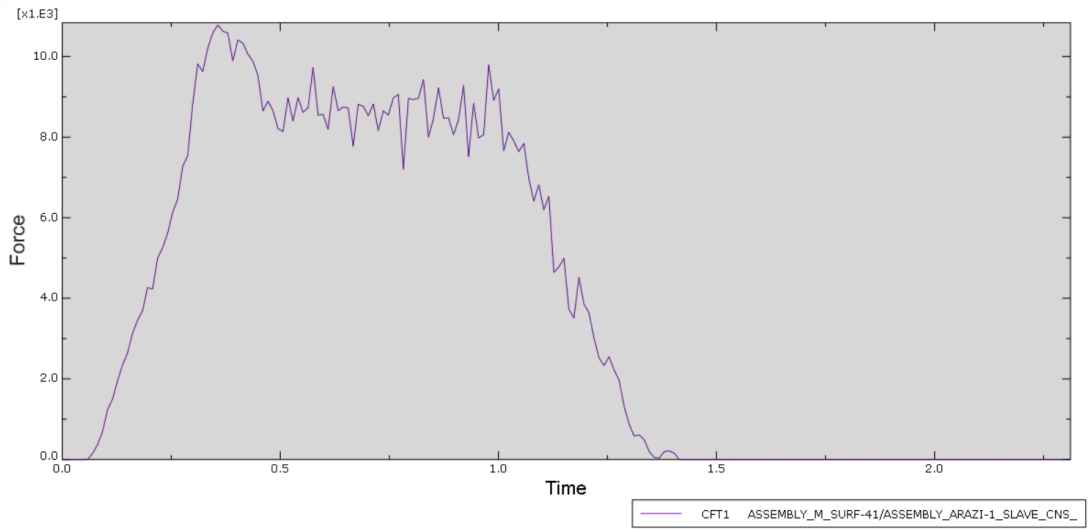
Şekil A.8 : Senaryo 8 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=37,5^\circ$).



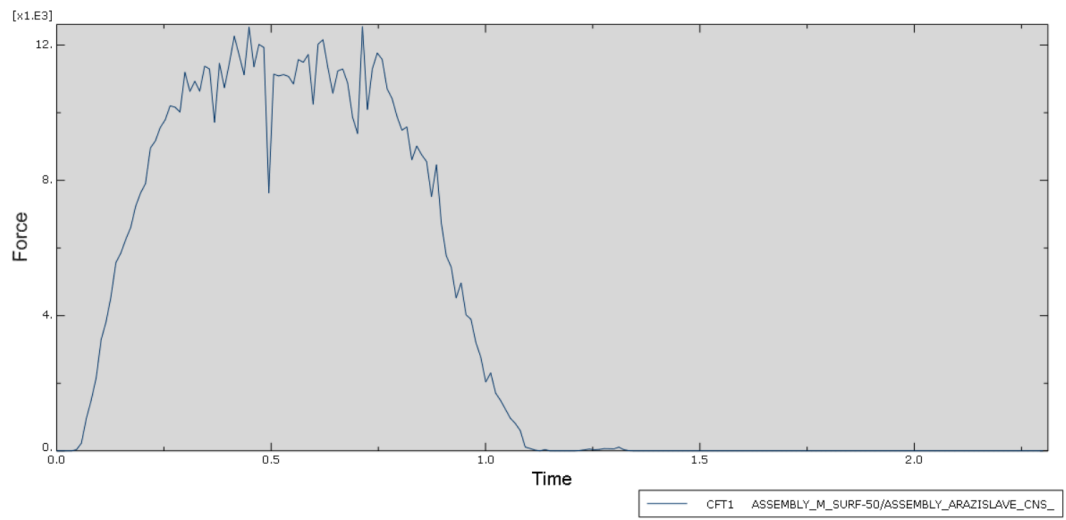
Şekil A.9 : Senaryo 10 ($V=1$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=42,5^\circ$).



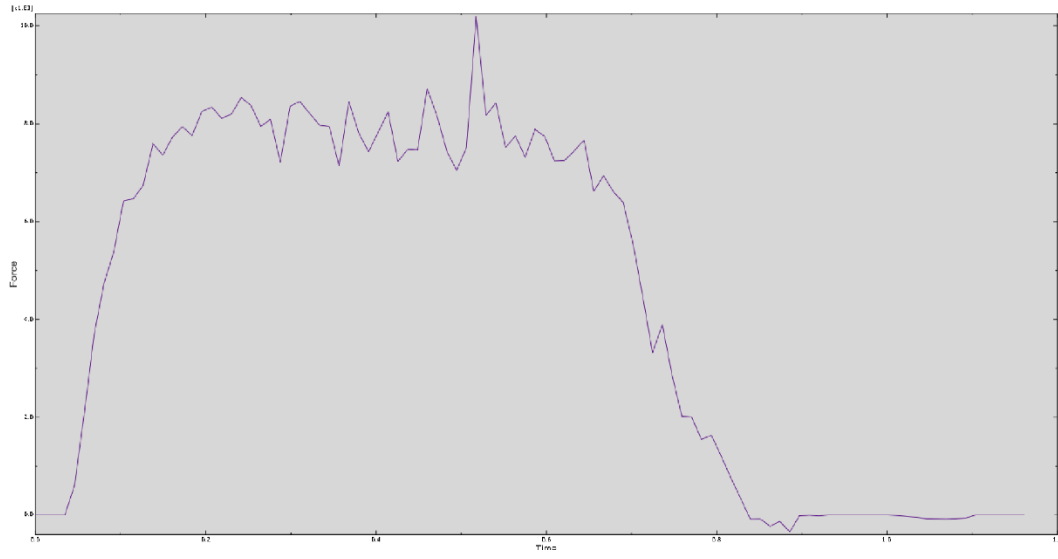
Şekil A.10 : Senaryo 12 ($V=1,5$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).



Şekil A.11 : Senaryo 13 ($V=2$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).



Şekil A.12 : Senaryo 14 ($V=2,5$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).



Şekil A.13 : Senaryo 15 ($V=3$ [m/sn], $ds=150$ [mm] , $\beta=40^\circ$).

EK B1: Kulaklı Pulluk Analitik Çeki Kuvveti Hesabı H_t -d_s MATLAB Kodları

```
function [ Ht ] = analitikds( analitikds )
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
Lamda=15.696      %?=Toprak hacim ağırlığı, kN/m3
dp=0.008          %dp= Uç demiri burun derinliği, m
c=30              %c= Kohezyon, kN/m2
wp=0.06           %wp= Uç demiri burun genişliği, m
v=1               %v= ilerleme hızı, m/s
g=9.81            %g= Yerçekimi ivmesi, m/s2
ap=16             %p= Uç demiri burun noktasındaki kama açısı, °
as=55             %s= Uç demiri kaldırma açısı, °
Gama=30.25        %?= Toprak-metal sürtünme açısı, °
Gamas=44          %s= Toprak-toprak sürtünme açısı, °
ws=0.42           %ws= Uç demiri genişliği, m
Beta=40           %?= Uç demiri keskin kenar açısı, °
Q=55              %?= Ortalama kulak açısı, °
m=1               %m= Bozulma mesafesi oranı
Olcunumarasi=1    %Ny, Nca, Na =Ölçü Numaraları
ds=[0.1:0.05:0.35] %ds= Kesme Derinliği
l=0.9             %l= Kulağın Etki Uzunluğu
Kesmeacisi=30     %?=Kesme Direnci Açısı
Epsilon=15
Alpha=15

Ny=(cot(Alpha*3.14/180)+cot(Epsilon*3.14/180))/(2*(cos((Alpha+Gama)*3.14/180)+sin((Alpha+Gama)*3.14/180)*cot((Epsilon+Kesmeacisi)*3.14/180)))

Nc=(1+cot(Epsilon*3.14/180)*cot((Epsilon+Kesmeacisi)*3.14/180))/(cos((Alpha+Gama)*3.14/180)+sin((Alpha+Gama)*3.14/180)*cot((Epsilon+Kesmeacisi)*3.14/180))

Nq=(cot(Alpha*3.14/180)+cot(Epsilon*3.14/180))/(cos((Alpha+Gama)*3.14/180)+sin((Alpha+Gama)*3.14/180)*cot((Epsilon+Kesmeacisi)*3.14/180))

Hp=((Lamda*dp^2*Ny+c*dp*Nc)*(wp+0.55*dp*(m-(m-1)/3)))+(Lamda*v^2*Nq*dp/g)*(wp+0.33*dp))*sin((ap+Gama)*3.14/180)
%Hp= Burun noktasında meydana gelen çeki kuvveti, kN

Hs=(Lamda*ds.^2*Ny+c*ds*Nc+Lamda*v^2*Nq*ds/g)*ws*sin((as+Gama)*3.14/180)*sin(Beta*3.14/180)
%Hs= Uç demirinde meydana gelen çeki kuvveti, kN

Hmc=(Lamda/g)*(wp*dp+ws*ds)*v^2*(1-(1-sin(Q*3.14/180)*tan(Gama*3.14/180))*cos(Q*3.14/180))
%Hmc= Kulakta meydana gelen çeki kuvveti, kN
He=2*Lamda*(wp*dp*ds+ws*ds.^2)
%He= Kulakta potansiyel enerjiden dolayı meydana gelen çeki kuvveti, kN

Hcs=(Lamda*ds.^2*Ny+c*ds*Nc+Lamda*v^2*Nq*ds/g)*ws*sin((as+Gama)*3.14/180)*cos(Beta*3.14/180)*tan(Gama*3.14/180)
%Hcs= Uç demiri ile çizgi duvarında lateral kuvvetin etkisiyle sürtünmeden dolayı meydana gelen çeki kuvveti, kN

Hms=(Lamda/g)*(wp*dp+ws*ds)*v^2*sin(Q*2.14/180)*(1-sin(Q*3.14/180)*tan(Gama*3.14/180))*tan(Gama*3.14/180)
```

```

%Hms= Kulak ile çizi duvarında lateral kuvvetin etkisiyle
sürtünmeden dolayı meydana gelen çeki kuvveti, kN

Hfs=l*Lamda*(wp*dp+ws*ds)*tan(Kesmeacisi*3.14/180)*tan(Gama*3.14/180
)
%Hfs=Toprağın kulak üzerinde lateral hareketinden dolayı kulakta
sürtünme kuvveti bileşenlerinin meydana getirdiği çeki kuvveti, kN

Ht=Hp+Hs+Hmc+He+Hcs+Hms+Hfs
%Ht= Toplam çeki kuvveti, kN

plot(ds,Ht)
grid
xlabel('ds (İş Derinliği, m)','Color','r')
ylabel('Ht (Toplam Çeki Kuvveti, kN)','Color','r')
title(' ... ','Color','b')
legend('Analitik Yöntem Sonuç')
end

```

EK B2: Kulaklı Pulluk Analitik Çeki Kuvveti Hesabı H_t -V MATLAB Kodları

```
function [ Ht ] = analitikv( analitikv )
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
Lamda=15.696      %?=Toprak hacim ağırlığı, kN/m3
dp=0.008          %dp= Uç demiri burun derinliği, m
c=40              %c= Kohezyon, kN/m2
wp=0.06           %wp= Uç demiri burun genişliği, m
v=0.5:0.005:3     %v= ilerleme hızı, m/s
g=9.81            %g= Yerçekimi ivmesi, m/s2
ap=16             %?p= Uç demiri burun noktasındaki kama açısı, °
as=55             %?s= Uç demiri kaldırma açısı, °
Gama=30.25        %?= Toprak-metal sürtünme açısı, °
Gamas=44          %?s= Toprak-toprak sürtünme açısı, °
ws=0.42           %ws= Uç demiri genişliği, m
Beta=40           %?= Uç demiri keskin kenar açısı, °
Q=55              %?= Ortalama kulak açısı, °
m=1               %m= Bozulma mesafesi oranı
Olcunumarasi=1
ds=0.1            %ds= Kesme Derinliği
l=0.9             %l= Kulağın Etki Uzunluğu
Kesmeacisi=42     %?=Kesme Direnci Açısı
Epsilon=15
Alpha=15
Ny=(cot(Alpha*3.14/180)+cot(Epsilon*3.14/180))/(2*(cos((Alpha+Gama)*3.14/180)+sin((Alpha+Gama)*3.14/180)*cot((Epsilon+Kesmeacisi)*3.14/180)))
Nc=(1+cot(Epsilon*3.14/180)*cot((Epsilon+Kesmeacisi)*3.14/180))/(cos((Alpha+Gama)*3.14/180)+sin((Alpha+Gama)*3.14/180)*cot((Epsilon+Kesmeacisi)*3.14/180))
Nq=(cot(Alpha*3.14/180)+cot(Epsilon*3.14/180))/(cos((Alpha+Gama)*3.14/180)+sin((Alpha+Gama)*3.14/180)*cot((Epsilon+Kesmeacisi)*3.14/180))

Hp=((Lamda*dp^2*Ny+c*dp*Nc)*(wp+0.55*dp*(m-(m-1)/3)))+(Lamda*v.^2*Nq*dp/g)*(wp+0.33*dp))*sin((ap+Gama)*3.14/180)
%Hp= Burun noktasında meydana gelen çeki kuvveti, kN

Hs=(Lamda*ds.^2*Ny+c*ds*Nc+Lamda*v.^2*Nq*ds/g)*ws*sin((as+Gama)*3.14/180)*sin(Beta*3.14/180)
%Hs= Uç demirinde meydana gelen çeki kuvveti, kN

Hmc=(Lamda/g)*(wp*dp+ws*ds)*v.^2*(1-(1-sin(Q*3.14/180)*tan(Gama*3.14/180))*cos(Q*3.14/180))
%Hmc= Kulakta meydana gelen çeki kuvveti, kN

He=2*Lamda*(wp*dp*ds+ws*ds.^2)
%He= Kulakta potansiyel enerjiden dolayı meydana gelen çeki kuvveti, kN

Hcs=(Lamda*ds.^2*Ny+c*ds*Nc+Lamda*v.^2*Nq*ds/g)*ws*sin((as+Gama)*3.14/180)*cos(Beta*3.14/180)*tan(Gama*3.14/180)
%Hcs= Uç demiri ile çizgi duvarında lateral kuvvetin etkisiyle sürtünmeden dolayı meydana gelen çeki kuvveti, kN

Hms=(Lamda/g)*(wp*dp+ws*ds)*v.^2*sin(Q*2.14/180)*(1-sin(Q*3.14/180)*tan(Gama*3.14/180))*tan(Gama*3.14/180)
%Hms= Kulak ile çizgi duvarında lateral kuvvetin etkisiyle sürtünmeden dolayı meydana gelen çeki kuvveti, kN
```

```

Hfs=1*Lamda*(wp*dp+ws*ds)*tan(Kesmeacisi*3.14/180)*tan(Gama*3.14/180
)
%Hfs=Toprağın kulak üzerinde lateral hareketinden dolayı kulakta
sürtünme kuvveti bileşenlerinin meydana getirdiği çeki kuvveti, kN

Ht=Hp+Hs+Hmc+He+Hcs+Hms+Hfs
%Ht= Toplam çeki kuvveti, kN
plot(v,Ht)
grid
xlabel('v (Hız, m/s)', 'Color', 'r')
ylabel('Ht (Toplam Çeki Kuvveti, kN)', 'Color', 'r')
title(' ... ', 'Color', 'b')
legend('Analitik Yöntem Sonuç')
end

```

EK C1: Kulaklı Pulluk ASAE D497.4 Standardına göre Çeki Kuvveti Hesabı, H_t - d_s MATLAB Kodları

```
function [ D ] = asaels( asaels )
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
F=1;      %Çalışılan toprak tipine bağlı olarak değişen boyutsuz değer
A=652;    %Kulaklı pulluk parametreleri
B=0;      %Kulaklı pulluk parametreleri
C=5.1;    %Kulaklı pulluk parametreleri
S=(1)*3.6; %Hız,km/h
W=0.74;   %Alet iş genişliği,m
T=10:2.5:35; %Alet iş derinliği,cm
ds=(10:2.5:35)/100;
D=(F*(A+B*(S)+C*(S)^2)*W*T)/1000 ; %Çeki Kuvveti, kN
plot(ds,D, 'Color', 'm')
grid
xlabel('ds (İş Derinliği, m)', 'Color', 'r')
ylabel('Ht (Toplam Çeki Kuvveti, kN)', 'Color', 'r')
title(' ... ', 'Color', 'b')
hold on
F=1;      %Çalışılan toprak tipine bağlı olarak değişen boyutsuz değer
A=652;    %Kulaklı pulluk parametreleri
B=0;      %Kulaklı pulluk parametreleri
C=5.1;    %Kulaklı pulluk parametreleri
S=(1)*3.6; %Hız,km/h
W=0.74;   %Alet iş genişliği,m
T=10:2.5:35; %Alet iş derinliği,cm
ds=(10:2.5:35)/100;
D=((F*(A+B*(S)+C*(S)^2)*W*T)/1000)*0.4+((F*(A+B*(S)+C*(S)^2)*W*T)/1000) ; %Çeki Kuvveti, kN
plot(ds,D, 'Color', 'g')
hold on
F=1;      %Çalışılan toprak tipine bağlı olarak değişen boyutsuz değer
A=652;    %Kulaklı pulluk parametreleri
B=0;      %Kulaklı pulluk parametreleri
C=5.1;    %Kulaklı pulluk parametreleri
S=(1)*3.6; %Hız,km/h
W=0.74;   %Alet iş genişliği,m
T=10:2.5:35; %Alet iş derinliği,cm
ds=(10:2.5:35)/100;
D=((F*(A+B*(S)+C*(S)^2)*W*T)/1000)-((F*(A+B*(S)+C*(S)^2)*W*T)/1000)*0.4 ; %Çeki Kuvveti, kN
plot(ds,D, 'Color', 'g')
end
```

EK C2: Kulaklı Pulluk ASAE D497.4 Standardına göre Çeki Kuvveti Hesabı, H_t-V MATLAB Kodları

```
function [ D ] = asaelv( asaelv )
%UNTITLED5 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
F=1; %Çalışılan toprak tipine bağlı olarak değişen boyutsuz değer
A=652; %Kulaklı pulluk parametreleri
B=0; %Kulaklı pulluk parametreleri
C=5.1; %Kulaklı pulluk parametreleri
S=0.5*3.6:0.5:3*3.6; %Hız, km/h
W=0.74; %Alet iş genişliği, m
T=15; %Alet iş derinliği, cm
v=S/3.6;
D=(F*(A+B*(S)+C*(S).^2)*W*T)/1000 ; %Çeki Kuvveti, kN
plot(v,D, 'Color', 'm')
grid
xlabel('v (Hız, m/s)', 'Color', 'r')
ylabel('Ht (Toplam Çeki Kuvveti, kN)', 'Color', 'r')
title(' ... ', 'Color', 'b')
hold on
F=1; %Çalışılan toprak tipine bağlı olarak değişen boyutsuz değer
A=652; %Kulaklı pulluk parametreleri
B=0; %Kulaklı pulluk parametreleri
C=5.1; %Kulaklı pulluk parametreleri
S=0.5*3.6:0.5:3*3.6; %Hız, km/h
W=0.74; %Alet iş genişliği, m
T=15; %Alet iş derinliği, cm
v=S/3.6;
D=((F*(A+B*(S)+C*(S).^2)*W*T)/1000)*0.4+((F*(A+B*(S)+C*(S).^2)*W*T)/1000) ; %Çeki Kuvveti, kN
plot(v,D, 'Color', 'g')
hold on
F=1; %Çalışılan toprak tipine bağlı olarak değişen boyutsuz değer
A=652; %Kulaklı pulluk parametreleri
B=0; %Kulaklı pulluk parametreleri
C=5.1; %Kulaklı pulluk parametreleri
S=0.5*3.6:0.5:3*3.6; %Hız, km/h
W=0.74; %Alet iş genişliği, m
T=15; %Alet iş derinliği, cm
v=S/3.6;
D=((F*(A+B*(S)+C*(S).^2)*W*T)/1000)-((F*(A+B*(S)+C*(S).^2)*W*T)/1000)*0.4 ; %Çeki Kuvveti, kN
plot(v,D, 'Color', 'g')
end
```

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : İbrahim SAVRUKOĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri : 15.08.1990 / Afyonkarahisar
E-posta : ibrahimsavrukoglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü
- **Lisans(2. Anadal)**: 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012 yılında 6. MEB Robotik yarışmasında birinci oldu.
- 2013-2014 yılları arasında DATUM Ltd. Şti.'de Ar-Ge mühendisi olarak çalıştı.
- 2014 yılından itibaren halen SAVRUKOĞLU Ziraat Makinaları San. Ltd. Şti.'de Ar-Ge müdürü olarak çalışmalarını sürdürmektedir.