



**MAYIN TEMİZLEMEDE KULLANILAN TİLLER ATAŞMANININ
PARAMETRİK TASARIMI VE NUMERİK MODELLEMESİ**

DOKTORA TEZİ

İbrahim SAVRUKOĞLU

Danışman

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

MAYIN TEMİZLEMEDE KULLANILAN TİLLER ATAŞMANININ
PARAMETRİK TASARIMI VE NUMERİK MODELLEMESİ

İbrahim SAVRUKOĞLU

Danışman

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2023

TEZ ONAY SAYFASI

İbrahim SAVRUKOĞLU tarafından hazırlanan “Mayın Temizlemede Kullanılan Tiller Ataşmanının Parametrik Tasarımı ve Numerik Modellemesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 17 / 02 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Başkan : Prof. Dr. Yeliz PEKBEY
Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Fevzi BEDİR
Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Yusuf KAYALI
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17 / 02 / 2023

İbrahim SAVRUKOĞLU

ÖZET

Doktora Tezi

MAYIN TEMİZLEMEDE KULLANILAN TİLLER ATAŞMANININ PARAMETRİK TASARIMI VE NUMERİK MODELLEMESİ

İbrahim SAVRUKOĞLU

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Dünya üzerinde yüz milyon kilometrekare mayınlı alan olduğu tahmin edilmektedir. Mayınlı arazilerin ekonomiye kazandırılması ve toplumsal etkilerini ortadan kaldırmak için mayın temizleme çalışmaları yapılmaktadır. Son yıllarda mayın temizlemek için uzaktan kumanda edilen makineler kullanılmaya başlanmıştır. Bu makineler ile hem anti-tank hem de anti-personel mayınları oldukça etkili, hızlı ve risksiz bir şekilde temizlenmektedir. Bu makineler zincirlere bağlı tokmaklar ile toprağı döverek, tiller takımı ile toprağı kazarak ya da ağır silindirler ile mayınları infilak ettirerek temizlenmektedirler. Tez kapsamında genellikle ağır çalışma şartlarında kullanılan tiller ataşmanı ile mayın temizleme makinası tasarım parametreleri üzerinde durulmuştur. Uzaktan kumandalı mayın temizleme makineleri genellikle dizel motor tahrikli, hidrostatik aktarım sistemine sahip paletli araçlardır. Operatörün güvenli bir bölgeden makinayı kumanda etmesiyle herhangi bir güvenlik riski taşımamaktadır. Mayın temizleme makineleri mayınları infilak ettirerek temizlenmektedirler. Bu nedenle özellikle mayına en yakın bölge yani ataşman bölgesinin patlama yüklemesine mukavim olması, temizlemenin sürdürülebilir olması açısından çok önemlidir. Tez kapsamında patlama yüklerinin fiziksel davranışları, sonlu elemanlar yöntemi ile Lagrange-Euler yaklaşımlarının incelenmesi ve farklı numerik hesaplama yöntemlerinin deneysel veriler ile karşılaştırması yapılmıştır. Öte yandan tiller takımı davranışının operasyonel parametreler karşısında değişimi ve tiller takımı kinematiği için analitik bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Aynı zamanda tiller takımının toprak ile etkileşimi sonlu

elemanlar yöntemi ile modellenmiş sonuçları analitik hesap sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tiller ataşmanları için genellikle kullanılan silindirik rotorların patlama sonrasında eylemsizlik momentini etkilemeyecek, plastik şekil değişimi ile sonuçlanmayacak et kalınlığı ve çap seçimi için de ayrıca çalışma yapılmış ve ortaya bir seçim diyagramı konmuştur. Bu tezin asıl amacı günümüzde ülkemizde de üretilmeye başlanan mayın temizleme araçları tasarımı için bir metodoloji oluşturmak ve tasarım sürecini kolaylaştırmaktır.

2023, xvii + 128 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mayın Temizleme, Patlama Yüğü, Sonlu Elemanlar Metodu, Yüksek Patlayıcılar

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

PARAMETRIC DESIGN AND NUMERICAL MODELLING OF TILLER ATTACHMENT USED IN DEMINING

İbrahim SAVRUKOĞLU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Kubilay ASLANTAŞ

It is estimated that there are one hundred million square kilometers of mined areas in all over the world. Mine clearance activities are carried out in order to bring the mined lands to the economy and to eliminate their social effects. In recent years, remotely controlled machines have been used for demining. With these machines, both anti-tank and anti-personnel mines are cleared very effectively, quickly and without any risk. These machines clear the soil by forging with hammers attached to chains, digging the soil with a tiller attachment or detonating mines with heavy rollers. Within the scope of the thesis, the design parameters of the tiller attachment and mine clearing machine, which are generally used in heavy working conditions, are emphasized. Remote-controlled demining machines are generally diesel engine driven, tracked vehicles with hydrostatic transmission system. It does not carry any security risk as the operator commands the machine from a safe area. Demining vehicles clear mines by detonating them. For this reason, it is very important that the areas closest to the mine, that is, the attachment area, have to be resistant to blast loading in order to the cleaning is sustainable. Within the scope of the thesis, physical behavior of blast loads, examination of finite element method and Lagrange-Euler approximations and comparison of different numerical calculation methods with experimental data were performed. On the other hand, an analytical calculation method has been developed for the variation of the behavior of the tiller tool against the operational parameters and the kinematics of the tiller tool. At the same time, the interaction of the tiller equipment with the soil was modeled with the finite element

method and the results were compared with the analytical calculation results. A study has been made for the selection of thickness and diameter that will not affect the moment of inertia after explosion and will not result in plastic deformation of the cylindrical rotors, which are generally used for Tiller attachments, and a selection diagram has been presented. The main purpose of this thesis is to create a methodology for the design of mine clearance vehicles, which are started to be produced in our country today, and to facilitate the design process.

2023, xvii + 128 pages

Keywords: Mine Clearance, Blast Load, Finite Element Method, High Explosives

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşim Ece SAVRUKOĞLU, biricik oğlum Bahattin Demir SAVRUKOĞLU ve dünyaya gelişini dört gözle beklediğimiz kızım Nil SAVRUKOĞLU'na özverileri için teşekkür ederim.

İbrahim SAVRUKOĞLU
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
RESİMLER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Kara Mayınları.....	3
2.1.1 Mayınların Etkileri.....	3
2.1.1.1 Mayınların Sosyolojik Etkileri.....	4
2.1.1.2 Mayınların Ekonomik Etkileri.....	4
2.1.2 Anti-tank Mayınları.....	5
2.1.3 Anti-personel Mayınları	7
2.2 Mayın Temizleme Yöntemleri.....	9
2.2.1 Mekanik Olarak Mayın Temizleme Yöntemleri	10
2.2.1.1 Kültivatörler ile Mayın Temizleme.....	11
2.2.1.2 Mayın Bıçağı ile Temizleme	12
2.2.1.3 Zincire Bağlı Tokmaklar ile Döverek Temizleme	13
2.2.1.4 Tiller ile Mayın Temizleme.....	14
2.2.1.5 Mekanik Olarak Mayın Temizlenenin Avantajları	15
2.3 Mayın Temizleme Makinaları Mekaniği	16
2.3.1 Toprak Sınıflandırılması	16
2.3.2 Makinaların Toprak Arazi Üzerindeki Hareket Kabiliyetleri	18
2.3.2.1 Tekerlekli Araçlar için Ortalama Maksimum Basınç (MMP).....	18
2.3.2.2 Toprak Koni Endeksi (CI).....	20
2.3.2.3 Koni Endeksini Sınırı	21
2.3.2.4 Tekerlek İz Derinliği	21
2.3.2.5 Mobilite Endeksi	23
2.3.2.6 Araç Koni Endeksi	23

2.3.3 Tiller Ataşmanı ile Mayın Temizleme	24
2.3.3.1 Helis Sistemi.....	25
2.3.3.2 Kesme Direnci.....	26
2.3.4 Makina Sürüş Sistemi	30
2.3.4.1 Motor Gücü ve Hidrolik Sistem	31
2.4 Patlama Teorisi	38
2.4.1 Patlama Yüğü	39
2.4.1.1 Serbest Hava Ortamındaki Patlama Dalgaları.....	39
2.4.1.2 Patlama Dalgası Yansıması	40
2.4.1.3 Ölçeklendirme Kuralları	41
2.4.1.4 Pozitif Faz Parametreleri	42
2.4.1.5 Numerik Yöntemlerin Doğrulanması ile İlgili Çalışmalar.....	45
2.5 LS-DYNA Kullanarak Patlama Analizi	49
2.5.1 Keyfi Lagrange Euler Yöntemi (ALE)	51
2.5.1.1 Denklemleri ve Adveksiyon (Taşınım) Yöntemi	51
2.5.1.2 Malzeme Modelleri ve Durum Denklemleri	53
2.5.1.3. LS-DYNA'daki İlgili Anahtar Kelimeler ve Gelişmeler.....	54
2.5.2 Conwep Ampirik Yöntemi.....	55
2.5.3 SPH, Enterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği Yöntemi	56
2.5.4 Hibrit Yöntem	57
2.6 Tiller ile Toprağın Kazılmasının LS-DYNA Kullanılarak Modellenmesi	58
2.6.1 Toprak Malzeme Modeli.....	59
2.7 Mayın Temizleme Aracında Kullanılan Zırh Çeliği Modellemesi	60
2.7.1 Malzeme ve Modeli	61
3. MATERYAL ve METOT	63
3.1 Tiller Ataşmanı Moment Gereksinimi Analitik Hesabı.....	63
3.1.1 Tekil Tiller Takımı Hareket Denklemlerinin Türetilmesi.....	65
3.1.2 Tiller Takımı Hareketinde Kritik Zaman Adımlarının Belirlenmesi	65
3.1.3 Birim Takım Tarafından İşlenen Toprak Alanının Belirlenmesi.....	68
3.1.4 Toprak içerisindeki Takım Boyu denkleminin Türetilmesi	69
3.1.5 Birim Zamanda İşlenen Toprak Alanının Belirlenmesi	71
3.1.6 Helis Parametleri ve Takım Parametreleri ile Kütle Dengelenmesi	76
3.2 Serbest Hava Ortamı Patlama Yükleme Numerik Hesaplama ve Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması	78

3.2.1 Test Sistemi.....	78
3.2.2 Test Sisteminin Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi.....	80
3.2.3 Çözüm Ağı Yakınsama Çalışması	84
3.3 Tiller Ataşmanının Toprak Etkileşiminin Numerik Yöntemler ile Modellenmesi	85
3.3.1 Malzeme Tanımlamaları	86
3.3.2 Çözüm Ağının Oluşturulması, Sınır ve Başlangıç Koşulları	86
3.4 Tiller Ataşmanının Mayın Patlaması Yüğü Karşısında Davranışı.....	89
3.4.1 Zırh Çeliği Parametreleri.....	89
3.4.2 Sonlu Elemanlar Modeli	90
4. BULGULAR	93
4.1 Tiller Takımının Sonlu Elemanlar Yöntemi Sonuçları.....	93
4.2 Tiller Ataşmanının Analitik Hesabı Değerlendirilmesi	95
4.3 Tiller Ataşmanının Analitik Hesabı ve Numerik Hesaplamanın Birlikte Değerlendirilmesi.....	99
4.4 Serbest Hava Ortamı Patlama Yüğü Deneysel Doğrulama Sonuçları.....	101
4.5 Tiller Ataşmanının Patlama Yüğü Davranışı.....	112
4.5.1 Silindirik Rotorun Patlama Yüğü Karşısındaki Davranışı	112
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	114
6. KAYNAKLAR.....	120
ÖZGEÇMİŞ.....	124
EKLER	125

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

W_t	Araç ağırlığı kg
k	Araç çeker sayısı katsayısı
n	Araç tekerlek sayısı
b	Yüklü olmayan araç için tekerlek genişliği m
d	Yüklü olmayan araç için tekerlek çapı m
δ	Yük kaynaklı tekerlek deformasyonu
p_i	Tekerlek patlama basıncı psi
W	Tekerlek yükü kN
n	Tek bir paletteki tekerlek sayısı
b	Palet genişliği m
D	Cer dişlisi çapı m
z_1	İlk geçiş batma derinliği m
z_n	n'inci geçiş batma derinliği m
p	Lastik patlama basıncı
a	Çoklu geçiş katsayısı
K_{KP}	Temas basıncı faktörü
K_T	Araç aks yük faktörü
K_G	Tekerlek genişlik faktörü
K_L	Palet tırnağı faktörü
K_{OK}	Tekerlek yük faktörü
K_{CL}	Şasinin toprağa mesafesi faktörü
K_M	Araç spesifik güç faktörü
K_{MJ}	Şanzıman faktörü
w	Ortalama aks yükü kg
k_1	Spesifik kesme direnci
b	Takım bıçağı genişliği
S_t	Kesme tabakası kalınlığı
v_0	Rotorun teğet çizgisel hızı m/s
p_0	Ortam hava basıncı
$p_{so,max}$	Tepe aşırı basınç noktası
td	Pozitif faz süresi
so	Gelen basınç değerleri alt indisi
$p_{so,min}$	Tepe genliği
$t\bar{d}$	Negatif faz süresi
i	Darbe (impals)
r	Yansıyan basınç alt indisi
ρ_s	Şok cephesinin hemen arkasındaki yoğunluk
u_s	Parçacık hızı
ρ_0	Çevredeki bozulmamış havanın yoğunluğu
γ	Çevredeki bozulmamış havanın basıncı
a_0	Ses hızı
p_r	Yansıyan basınç
p_{s0}	Gelen basınç

Simgeler (Devam)

q_s	Dinamik basınç
C_r	Yansıma katsayısı
W	Patlayıcı kütlesi
R	Patlayıcıya olan mesafe
K	Ölçek faktörü
Z	Ölçeklendirilmiş mesafe kavramı
$t_{d,lin}$	Doğrusal pozitif faz süresi
b	Dalga formu parametresi
$t_{d,lin}^-$	Doğrusal negatif faz süresi
i_r^-	Negatif faz darbesi (impals)
α	Yeni dalga formu parametresi, (negatif faz)
m	Kütle
c	Sönümlleme
k	Rijitlik
F	Kuvvet
x	Yer değiştirme
$\dot{x}$	Hız
$\ddot{x}$	İvme
v	Malzemenin hızı
w	Malzeme ile ağ (mesh) arasındaki bağıl hız
ρ	Sıvının yoğunluğu
E	Özgül enerji
σ_{ij}	Gerilme tensörü
p	Basınç
τ	Kayma gerilmesi
V	Spesifik hacim
ρ_0	Havanın başlangıç yoğunluğu
γ	Özgül ısı oranı
$l_{e,maks}$	Maksimum eleman uzunluğu
A_e	Eleman alanı
V_{CJ}	Chapman-Jouguet bağıl hacmi
F_1	Patlayıcının programlanmış yanması
F_2	Beta yanması
l	Elemanın kalınlığı
$\frac{ds}{dt}$	İvme yönündeki birim şekil değişimi oranı
$\dot{\epsilon}_{kk}$	Birim şekil değişimi hızı tensörünün izi
Q_e	Birim kütlesi başına ısı enerjisi
D_e	Silindirik patlayıcı çapı
M_e	Silindirik patlayıcı kütlesi
$p_r(t)$	Friedlander Eşitliğinde t zamandaki yansıyan basınç
$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$	İdeal Gaz Katsayıları
γ	Spesifik ısı oran

Kısaltmalar

ALE	Keyfi Lagrangian Eulerian
AP	Antipersonel mayını
ASAE	Amerikan ziraat mühendisleri birliği
AT	Tanksavar mayın
CI	Koni indeks
CONWEP	Konvansiyonel Silah Programı
İYM	İçten yanmalı motor
KB	Kingery & Bulmash
LBE	Load Blast Enhanced
MMALE	Çoklu Malzemeli ALE
MMP	Ortalama maksimum basınç
NGP	Nominal zemin basıncı
OCU	Operatör Kontrol Ünitesi
OHU	Operatör El Kumandası
SBEDS	ABD Ordusu Mühendisler Birliği
SPH	Enterpolasyonu parçacık hidrodinamiği
TNT	Trinitrotoluen
VCI	Araç koni endeksi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Mayın yükleme şeması (a-b mayınların arazi içerisinde konumları).....	7
Şekil 2.2 M14 Anti-personel mayını (9 daN), (31 gr tetril içeriyor, 56 mm çapında 40 mm derinliğinde) (Rahmani 2006)	8
Şekil 2.3 M16 Anti-personel mayını (16 daN), 521 gr TNT içeriyor, 133 mm çapında 199 mm derinliğinde) (İnt.Kyn.2)	8
Şekil 2.4 Tiller atışmanı ile mekanik olarak mayın temizleme şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.5 Saat yönünde ve ters yönde toprağın kazılması ve kazılan katman geometrisi (Mikulic 2012).....	25
Şekil 2.6 Helisel eğri üzerinde eşit aralıklarla dizilmiş takımların şematik gösterimi...	26
Şekil 2.7 Bir mayın temizleme makinesinin hidrolik şeması	31
Şekil 2.8 Mayın temizleme aracı motor ve soğutma sistemi hava akış şeması.....	34
Şekil 2.9 Elektronik sistem ana şeması	38
Şekil 2.10 İdeal basınç dalgası için basınç-zaman grafiği (Rigby 2014)	40
Şekil 2.11 Hopkinson-Cranz patlama dalgası ölçeklendirmesi (Baker 1973).....	42
Şekil 2.12 UFC-3-340-02'den sonra gelen ve yansıyan pozitif faz patlama dalgası parametreleri (ABD Savunma Bakanlığı 2008). (a) serbest havada TNT'nin küresel yükleri, (b) yüzeydeki yarım küre TNT yükleri (Rigby 2014)	44
Şekil 2.13 Dalga formu parametrelerinin karşılaştırılması, b (Rigby 2014).....	45
Şekil 2.14 Rijit bir yüzeyden 4, 6, 8 ve 10 metre uzaklıktaki yarı sonsuz bir hedef için 0,25 kg PE4 patlayıcı için tahmin edilen ve deneysel basınç-zaman diyagramı (Rigby 2014).....	48
Şekil 2.15 ALE analizlerinde Lagrangian ve Adveksiyon fazları.....	52
Şekil 2.16 Van Leer MUSCL şeması kullanılan değişkenlerin adveksiyonu (Rigby 2014).....	53
Şekil 2.17 Mohr-Coulomb teorisi grafik gösterimi	60
Şekil 3.1 (a) Rotorun boyuna ilerleme yönüne göre saat yönünde dönüşü, (b) rotorun boyuna ilerleme yönüne göre saat yönünün tersine dönüşü	63
Şekil 3.2 Rotor üzerine bağlı tiller takımının en uç noktasının w açısall hızında ve v çizgisel hızında ilerlediği durumda izlediği yol.	64
Şekil 3.3 Rotor üzerindeki tekil tiller takımının zaman adımları	66
Şekil 3.4 Tiller takımı hareketi kesişim noktalarının tayini	67
Şekil 3.5 Rotor üzerine helisel dizilmiş tiller takımlarının şematik gösterimi.....	72
Şekil 3.6 Birbirine açısall olarak en yakın herhangi iki tiller takımı.....	73
Şekil 3.7 Rotor üzerinde nt kadar takım olan tiller atışmanın sıralı takımlar arası $\Delta t_{öteleme}(n)$ miktarı ve toplam aktif uzunluğun grafiksel gösterimi	74

Şekil 3.8 Helis Parametrelerinin toplam aktif takım boyuna etkisi.....	75
Şekil 3.9 (a) Tiller Ataşmanın O,x,y,z eksen takımında dönme eksen ve düzensiz kütleler, (b) xy düzleminde düzensiz kütlelerin yerleşimi	76
Şekil 3.10 (a) Boyd'un test düzeneği ve yerleşim planı (b) ilgili sensörler için plaka üzerinde bulunan noktaların şeması	79
Şekil 3.11 Enterpolasyonlu parçacık hidrodinamiği (SPH) yöntemi ile patlama simülasyonu zaman adımları	80
Şekil 3.12 ALE için patlayıcı ve hava alanının 3B radyal ağ yapısı	82
Şekil 3.13 Kartezyen ve radyal ağ yapısı arasındaki şok yayılımındaki fark.....	83
Şekil 3.14 Hedef plakanın Sınır Koşullarını Tanımlama	83
Şekil 3.15 Toprak takım etkileşiminin numerik hesaplanmasında kullanılan toprak modelinin ağ yapısı.....	87
Şekil 3.16 Toprak modelinin sınır koşullarının gösterimi.....	87
Şekil 3.17 Tekil tiller takımının farklı kesme açıları.....	88
Şekil 3.18 Silindirik tiller rotoru mesh çalışması	91
Şekil 4.1 Tekil tiller takımının LS-DYNA yazılımı ile modelinin şematik gösterimi ...	93
Şekil 4.2 Tekil tiller takımının LS-DYNA ile rotorun M_x moment-zaman diyagramı ($\omega n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $b=50$ mm).....	93
Şekil 4.3 Tiller ataşmanı LS-DYNA yazılımı ile rotorun şematik gösterimi.....	94
Şekil 4.4 Tiller ataşmanı LS-DYNA yazılımı ile rotorun M_x moment-zaman diyagramı ($\omega n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $nt=48$, $ah=200$ mm, $lr=2000$ mm, $b=50$ mm)	95
Şekil 4.5 Birim tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğunun zaman bağlı değişimi ($\omega n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm).....	95
Şekil 4.6 Tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğunun zaman bağlı değişimi ($\omega n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $nt=48$, $ah=200$ mm, $lr=2000$ mm, $b=50$ mm)	96
Şekil 4.7 Tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğuna ilerleme hızının etkisi. 96	
Şekil 4.8 Tiller ataşmanı üzerinde helisel şekilde dizilen takımların helis adımının, aktif uzunluk grafiğinde meydana getirdiği moment düzensizliği grafiği (aktif uzunluk – genlik).....	97
Şekil 4.9 Tiller takımının aktif uzunluğuna işleme derinliğinin etkisi.....	98
Şekil 4.10 Tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğuna açılal hızın etkisi.....	98
Şekil 4.11 Tiller takımının kesme açısının moment gereksinimine etkisi	99
Şekil 4.12 Tekil tiller takımı M_x moment-zaman diyagramı analitik hesap ile numerik sonucun karşılaştırılması ($\omega n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $nt=48$, $ah=200$ mm, $lr=2000$ mm, $b=50$ mm)	100

Şekil 4.13 Tiller ataşmanı Mx moment-zaman diyagramı analitik hesap ile numerik sonucun karşılaştırılması ($\omega n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $nt=48$, $ah=200$ mm, $lr=2000$ mm, $b=50$ mm)	101
Şekil 4.14 CONWEP yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	104
Şekil 4.15 CONWEP yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	104
Şekil 4.16 ALE yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	105
Şekil 4.17 ALE yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	105
Şekil 4.18 Hibrit ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	105
Şekil 4.19 Hibrit ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	106
Şekil 4.20 SPH yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	106
Şekil 4.21 SPH yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	106
Şekil 4.22 Farklı yöntemlerle elde edilen (a) P1 ve (b) P2 noktalarındaki tepe basınç-zaman diyagramı.....	107
Şekil 4.23 CONWEP yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiği durumda P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	108
Şekil 4.24 CONWEP yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiği durumda P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	108
Şekil 4.25 ALE yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	108
Şekil 4.26 ALE yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	109
Şekil 4.27 Hibrit Yöntem ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	109
Şekil 4.28 Hibrit Yöntem ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	109
Şekil 4.29 SPH Yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	110
Şekil 4.30 SPH Yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı	110
Şekil 4.31 Farklı et kalınlıklarındaki ve yarıçaplardaki maksimum efektif birim şekil değişimi	113

Şekil 5.1 Optimum tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğunun zaman bağlı değişimi ($\omega n=370$ rpm, $v=350$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=400$ mm, $nt=48$, $ah=200$ mm, $lr=2000$ mm, $b=50$ mm)	118
Şekil 5.2 2000 mm iş genişliğine sahip mayın temizleme makinası için optimum tiller takımının takım yerleşimi.....	119



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Genel hatlarıyla mayından korunma ve temizleme yöntemleri	10
Çizelge 2.2 Toprak Kategorizasyonu (Mikulic 2012).....	17
Çizelge 2.3 Bitki Örtüsü Kategorizasyonu (Mikulic 2012)	17
Çizelge 2.4 Çoklu geçiş için <i>RI</i> katsayıları (Mikulic 2012).....	21
Çizelge 2.5 Bazı mayın temizleme araçlarının <i>MMP</i> ve <i>NGP</i> değerleri (Mikulic 2012)	24
Çizelge 2.6 Yansıyan darbe basıncının tahmin edilen pozitif faz basınçlarına oranlarını gösteren tablo (Rigby 2014)	49
Çizelge 3.1 Çalışmada kullanılan ALE parametreleri (Schwer, 2016)	81
Çizelge 3.2 ALE, SPH ve hibrit MMALE metotlarının yakınsama analizi için farklı ağ yapıları	84
Çizelge 3.3 Çalışmada kullanılan FHWA parametreleri (Saleh ve Edwards 2011)	86
Çizelge 3.4 Çalışmada kullanılan ARMOX 500T Johson Cook parametreleri (İnt Kyn. 8)	90
Çizelge 3.5 Çalışmada kullanılan ARMOX 500T Johson Cook parametreleri (Niezgoda ve Morka 2009).....	90
Çizelge 3.6 Çalışmada kullanılan TNT parametreleri (Dobratz ve Crawford 1981)	91
Çizelge 4.1 ALE, SPH ve hibrit MMALE metotlarının farklı ağ yapıları ile karşılaştırması	102
Çizelge 4.2 CONWEP, ALE, Hibrit MM-ALE ve SPH yöntemlerinin karşılaştırmalı sonuçları.....	103
Çizelge 4.3 ALE, SPH ve hibrit MMALE metotlarına ait yakınsama çalışması	103
Çizelge 4.4 CONWEP, ALE, hibrit MM-ALE and SPH metotlarının özet seçim kriterleri	111

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 TM-72 Anti-tank mayını (İnt.Kyn.1).....	6
Resim 2.2 Anti-personel mayını (İnt.Kyn.3)	9
Resim 2.3 Kültivatör ile mayın temizleme operasyonu (İnt.Kyn.4)	11
Resim 2.4 Mayın bıçağı ile mayın temizleme (İnt.Kyn.5).....	12
Resim 2.5 Zincire bağlı tokmaklar ile döverek mayın temizleme operasyonu (İnt.Kyn.6)	13
Resim 2.6 Tiller atışmanı ile mayın temizleme operasyonu (İnt.Kyn.7)	14
Resim 2.7 Penetrometre ile toprak koni indeksi ölçümü (Mikulic 2012)	20
Resim 2.8 Tiller çalışma takımı şekli, "kulaklı" kama bıçağı (MV-4) (Mikulic 2012) .	28
Resim 2.9 Tiller ile mayın temizleme makinasının testleri (Mikulic 2012)	28
Resim 2.10 Hidrolik pompa sistemi; 1-Tiller için hidrolik pompa, 2- Sol palet tahriki için hidrolik pompa, 3- Ek ekipmanlar için gerekli olan açık çevrim hidrolik pompa, 4- Çoklayıcı dişli kutusu, 5- Sağ palet tahriki için hidrolik pompa (Mikulic 2012)	32
Resim 2.11 Hidrolik yağ ısı değiştiricisi ve hidrolik tank (Mikulic 2012)	33
Resim 2.12 Paletli yürüyüş takımı; 1- Metal Palet Tırnağı, 2- Palet Zinciri, 3- İstikamet Tekeri, 4- Gerdirme Tertibatı, 5-Yol Tekeri, 6-Destek Tekeri, 7-Yürüyüş hidrolik Motoru ve Cer dişlisi (Mikulic 2012)	34
Resim 2.13 Yüksek toz konsantrasyonlu ortamda çalışan bir mayın temizleme aracı (Mikulic 2012)	35
Resim 2.14 İki aşamalı motor hava filtresi	36
Resim 2.15 Makina kontrolü için kumanda konsolu örneği	37

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde toplam yüz milyon kilometrekare alanda infilak etmemiş çok sayıda anti-personel ve anti-tank mayınları bulunmaktadır. Çok sayıda insan bu sebeple hayatını kaybetmektedir ya da sakat kalmaktadır. Bu mayınların insan yaşamını tehdit etmeyecek şekilde hızlı bir şekilde temizlenmesi, bu arazilerin tarım gibi faydalı ve dünyanın sosyo-ekonomik yaşamına katkı sağlayabilecek hale dönüşmesi anlamına gelmektedir. Geleneksel yöntemler ile bu mayınların etkisiz hale getirilmesi çok uzun yıllar alacağı gibi aynı zaman da tehlikelidir. Bu sebeple; tezde insan hayatını riske atmayacak sürdürülebilir makineler ile bu mayınların temizlenmesini sağlayan makine ataşmanlarının tasarımı üzerinde durulmuştur.

Dünya üzerinde bazı ticari şirketler tez kapsamında incelenen araçlara benzer ürünler üretilip dünyaya pazarlamaktadırlar. Türk Silahlı Kuvvetleri envanterinde de bu araçlardan bulunmaktadır. Yurtdışı menşeli olması ve araç fiyatlarının yüksek olması sebebiyle, bu araçların yerli ve milli imkânlar ile tasarlanıp üretilmesi ülke için de ekonomik anlamda ve teknolojik bağımsızlık anlamında da ayrıca katkı sağlayacaktır. Günümüzde ülkemizde de bu araçlar ile ilgili çalışmalar yürütülmekte ve 2020 yılından itibaren üretilmeye başlanmıştır.

Uzaktan kumanda edilen mayın temizleme araçları saha koşullarına göre farklı ekipmanlar kullanmaktadırlar. Zincirlere bağlı tokmaklar ile toprağı döverek temizleme, tiller ataşmanı ile toprağı işleyerek temizleme ya da ağır silindirler ile mayınlı arazilerden geçerek infilak ettirmek suretiyle temizlemek bu yöntemlerden en çok kullanılanlarıdır. Tez kapsamında ağır arazi şartlarında kullanılan tiller ekipmanı ile mayın temizleme üzerinde durulmuştur. Tiller ekipmanı ile toprak etkileşimi, operasyonel parametreler ve toprak parametreleri göz önüne alınarak modellenmiş analitik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Diğer taraftan sonlu elemanlar metodu kullanılarak toprak ve tiller ekipmanı modellenmiş ve sonuçları analitik hesaplama sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tiller ekipmanı rotor üzerinde helisel dizilime sahip takımların sırayla toprağı kazarak işlediği döner bir ataşmandır. Rotorun bu işlem için ihtiyaç duyduğu momentin hesaplanmasında helis adımı, sarım sayısı, takım sayısı gibi helis parametreleri ve işleme

derinliği, ilerleme hızı, açısal hız, rotor çapı gibi operasyonel parametreler bilinmelidir. Rotor üzerindeki hatalı bir dizilim ekipmanda istenmeyen sarsıntılara ve yorulma dayanımının düşmesine neden olabilmektedir.

Diğer taraftan tiller takımı temizleme işlemleri yaparken patlama yüküne maruz kalmaktadır. Patlama yükünün oluşturduğu şok dalgası, tepe basını, yansıyan basını ve sürenin, patlayıcı cinsine, patlayıcının hedefe olan mesafesine ve patlayıcının konumuna göre tahmin edilebilmesini sağlayan farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar; ampirik, Keyfi Lagrange-Euler yöntemi (ALE), Enterpolasyonlu Parça Hidrodinamiği yöntemi (SPH), ampirik patlama yükünün ALE ortamında hedef üzerine etkimesine olanak veren hibrit yöntemdir. Tez kapsamında her bir yöntem, çözüm süresi, yakınsama ve farklı patlayıcı türleri ve ortamları için kullanım açısından test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda tiller ataşmanının patlama sonucu meydana gelecek şekil değişimleri irdelenerek farklı patlayıcı cinsleri ve patlama senaryolarında hangi numerik yöntemin daha kararlı sonuçlar vereceği ortaya konmuştur.

Toprağı işleyerek mayın temizleyen tiller ataşmanının aynı zamanda patlama yüküne mukavim ve çalışmayı durmaksızın sürdürebileceği bir tasarım sürecinden geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle MMALE hibrit yöntemi ile tasarlanan silindirik tiller ataşmanı serbest hava ortamında patlama yüküne maruz bırakılmış ve minimum et kalınlıkları belirlenmiştir.

Bu tezin ana odak noktası patlama ortamı ve neticesinde yapılarda meydana gelen yüksek hızdaki deformasyonların numerik yöntemler ile hesaplanabilir olduğunu doğrulamak ve numerik yöntemler ile elde edilen bilginin mayın temizleme araçlarında ya da buna benzer askeri araçlarda kullanılabilir olduğunu göstermektir. Öte yandan tezin mayın temizleme makinası tasarımı için bir metodoloji oluşturacağı ve Türkçe bir kaynak oluşturması hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kara Mayınları

MS 1277'de Kubilay Han'ın Moğol istilacılarına karşı ilk kullanımlarından bu yana, kara mayınları günümüzdeki etkisinde açıkça görülen birkaç gelişme aşamasından geçmiştir. Mayınlar, amaçlanan hedefleri ve müteakip yıkıcı etkileri açısından özelleşmiş ve gelişmiştir (Martynenko 2001). Bu uzmanlaşma, kara mayınlarının tanksavar (AT), anti-personel (AP), helikopter önleyici ve rota dışı çeşitleri olarak sınıflandırılmasına yol açmıştır. Değişen savaş alanı senaryolarıyla, mayının tasarımı bu ihtiyaçlara uyacak şekilde ayarlanmış ve bu nedenle kara mayınları, yıkıcı etkilerine göre temel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

- Patlama; baskın yıkıcı kuvvet, hava ve malzeme boyunca yayılan şok dalgasıdır ve yıkıcı aşırı basınç ve itkiye (impals) neden olur.
- Parçalanma; yıkıcı unsurlar, yüksek hızda hedefe doğru itilen parçalardır.
- Biçimlendirilmiş yük; büyük bir hızda hareket eden oluşturulmuş jet, zırhı delip “zırh arkası” etkisine neden olur. Bu şekilli yükün bir varyasyonu, kendi kendini döven parçası yukarıda bahsedilen jetten daha düşük bir hızda hareket eden Misznay Schardin etkisidir.

Parçalanma ve şekilli yük etkisi kısaca terminal balistikte ele alınmıştır. Askeri ve sivil sektörlerdeki çeşitli uygulamalar için biçimlendirilmiş yükler uzun yıllardır araştırılmaktadır. Mevcut araştırmanın odak noktası, tanksavar patlaması mayınlarıdır. Resim 2.1'te gösterilen Rus tanksavar mayını TM-72, AT mayın tasarımının temel özelliklerini göstermektedir.

2.1.1 Mayınların Etkileri

Dünya üzerinde kurulu yaklaşık en az 84 ülkede 100 milyon adet patlamamış mayın bulunmaktadır. Bu sebeple yılda yaklaşık 20 000 günde ise 70 insan mayınlar yüzünden hayatını kaybetmektedir ya da yaralanmaktadır. Dünya üzerinde mayınların kapladığı

alan yaklaşık 10 milyon kilometre kare olmakla birlikte Afganistan, Angola, Bosna-Hersek, Kamboçya, Hırvatistan, Eritre, Irak, Mozambik, Namibya, Somali, Nikaragua ve Sudan dünya üzerindeki mayınların %50'sine sahiptir. Bu mayınların mali değeri ise 33 milyar dolardır. Yenileri eklenmediği takdirde temizlenmeleri şu anki hızda 100 yıl alacaktır (Poteet 2008).

2.1.1.1 Mayınların Sosyolojik Etkileri

Arazi mayınları insanları suçlu, suçsuz ayırt etmeden öldüren kendine has modern zaman mühimmatlarıdır. Mağdurları birbirinden ayırmanın bir yolu yoktur. Bir mayın, bir askerin ayak izini çocuğunkinden ayıramaz. Kısaca; mayınlar kendi kendine çalışan, otonom, kendini tetikleyebilecek kadar şanssız olanları öldüren silahlardır. Ne yazık ki bu şanssız mağdurlar çoğunlukla sivil insanlardır. Kaynaklara göre dünya üzerinde 75'ten fazla ülkede yılda yaklaşık 10-20 bin arasında zayıat olduğu bilinmektedir (Anonim 2007). 2006 yılında yapılan çalışmaya göre bu zayıatların %75'ini sivillerin oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Bu kazaların da %59'unu henüz on beş yaşını aşmamış çocukların oluşturduğu bilinmektedir. Tüm kayıpların sadece %24'ü askeri personele aittir. Mayın temizleme esnasındaki zayıatlar ise tüm vakaların yaklaşık %1'ini oluşturmaktadır (Anonim 2007).

Yıllık vakaların 10-20 bin arasında olduğunu kabul edersek. Kümülatif vakalar 600 bin ile 1,2 milyon arasında olacaktır. Bu da yanlış yere bastığı için ölen ya da yaralanan insanların 15 profesyonel futbol stadyumunu dolduracağı anlamına gelmektedir.

2.1.1.2 Mayınların Ekonomik Etkileri

Mayınların insanlığa etkileri sadece can kaybı ile ölçülememektedir. Uzunlarını kaybeden insanların tıbbi maliyetleri, çalışamadıkları için ailelerinin kayıp gelirler de bir diğer önemli etkidir. Uzunlarını kaybeden mağdurlar için protez maliyetleri 1000-3000 Amerikan doları aralığında olmakla birlikte her iki yılda bir yenilenmesi gerekmektedir. Çocuk mağdurlar için bu süre daha da kısa olacaktır. Her ne kadar protez ile yaşamaya devam edilebilse de bu insanların aktif çalışabilmeleri çok da mümkün değildir. Özellikle

ailelerine bakması gereken mağdurlar için ekonomik sonuçlar çok daha ağırdır (Poteet 2008).

Kara mayınlarının ekonomik maliyeti bireylerle sınırlı değildir. Mayın tarlalarının çoğu durumda tarım için kullanılabilecek parselleri işgal etmesi nedeniyle tüm bölgenin ekonomisi zarar görebilir. Ancak, mayın tarlaları ile ilgili tehlike nedeniyle (hem insan yaşamı hem de değerli hayvanların yaşamı için risk şeklinde), bu araziler kullanılmaz ve gelişmeden kalır. Etkilenen pek çok bölgede, tarım birincil endüstridir. Mayın tarlaları nedeniyle arazi kaybı, doğrudan bölge için potansiyel kâr kaybıyla ilgilidir.

Öte yandan bu mayınlı alanların ülke ve dünya ekonomisine de bir katkısı yoktur. Genellikle bu alanlar verimli topraklara sahip olmasına rağmen mayınlar nedeniyle tarım yapılamamaktadır. Ayrıca bu bölgeler hem ekonomik hem de sosyolojik açıdan gelişmemektedir. Mayın temizleme faaliyetlerine dünyada yılda milyarlarca dolar harcanmaktadır. O denli harcama yapılmasına rağmen, mayın temizleme birim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle bu hızla devam ederse dünyadaki mayınların temizlenmesi en az yüz yıl alacaktır.

2.1.2 Anti-tank Mayınları

İki ana kara mayını kategorisi vardır: anti-tank ve anti-personel mayınları. Anti-tank mayınları genellikle oldukça büyük boyuttadır ve genellikle 30 cm çapına yaklaşır. Araçlar bu tür mayınların birincil hedefleri olduğundan, onları tetiklemek için gereken basınç anti-personel mayınlara göre daha yüksektir. Bu nedenle, mayın temizleme çabalarının çoğu, patlama için gerekli olan daha düşük basınç eşiği nedeniyle daha doğrudan bir tehdit oluşturan anti-personel mayınlara odaklanmaktadır. Bununla birlikte, anti-tank mayınlarının kaldırılması, aynı zamanda araçlar ve tarım ekipmanları için bir tehdit oluşturmaları da önemlidir.

Ana şarj, ince bir dış kasa içinde yer alır ve bir ateşleme sistemi tarafından başlatılır. Yük, yüksek patlayıcıdan, özellikle 1,5 kg ila 13 kg kütleli TNT veya RDX-TNT bileşiminden oluşur. Eski tasarımlarda metal, ahşap ve karton muhafazalar kullanılmış olmasına

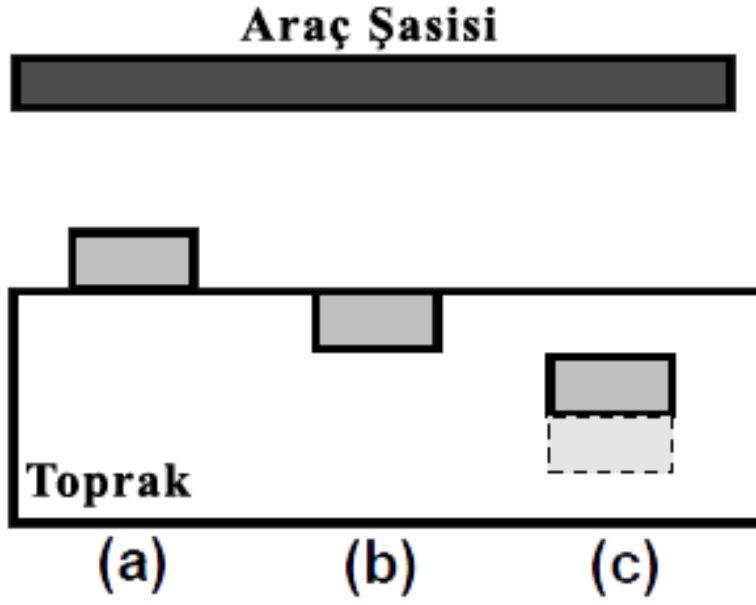
rağmen muhafazalar esas olarak plastikten yapılmıştır. Bu mayınların etrafında genellikle anti personel mayınlar bulunur veya personel tarafından açıklığı önlemek için açıkça yerleştirilmiş kaldırma önleyici cihazlar bulunur. Örneğin Resim 2.1’deki TM-72 mayını 2,5 kg patlayıcı içermektedir.



Resim 2.1 TM-72 Anti-tank mayını (İnt.Kyn.1).

Yükleme derecesi, bir mayının konuşlandırılma şekline bağlı olarak değişir. Şekil 2.1, çeşitli mayın yerleştirme biçimlerini özetlemektedir: mayınlar ya (a) zemin yüzeyine yayılmıştır, (b) zemin seviyesiyle aynı hizada döşenmiştir veya (c) toprağa gömülmüştür (20 mm - 60 mm). Son olarak, iki veya daha fazla mayın aynı yerde istiflenebilir.

Toprak durumunun önemli bir etkisi vardır. Patlayıcı enerjinin bir kısmı toprağa yayılmasına rağmen, araca çarpan toprak materyali yüklemeye önemli ölçüde katkıda bulunur. Yükleme büyüklüğünde gömü derinliği kadar toprak bileşimi de rol oynar. Toprak; hava, su ve katı parçacıklardan oluşur. Toprak, her biri farklı özellikler gösteren aşağıdaki iki kategoriye ayrılabilir.



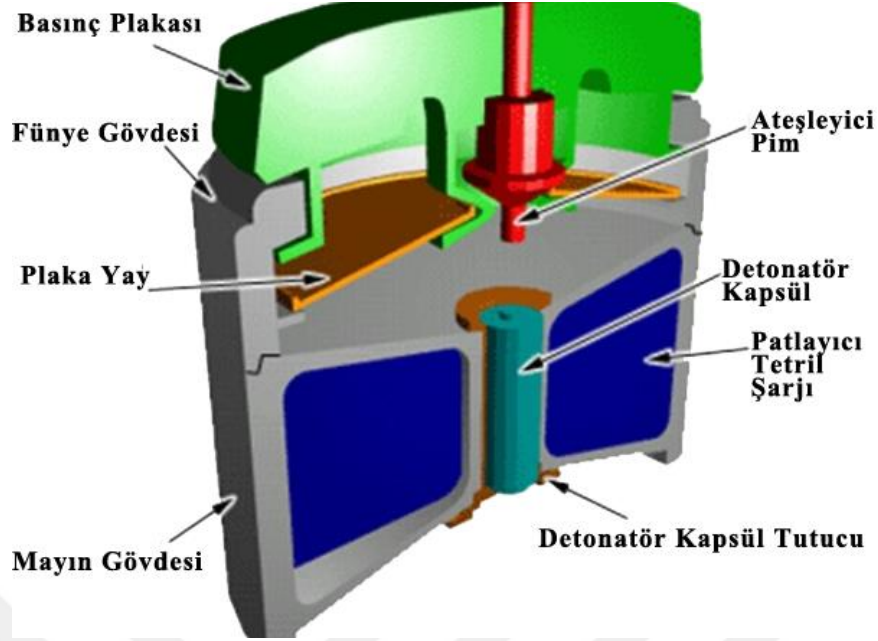
Şekil 2.1 Mayın yükleme şeması (a-b mayınların arazi içerisinde konumları).

- Kohezyonsuz toprak iri taneciklerden oluşur. Kum gibi parçacıklar arasında sürtünme kuvvetleri hakimdir.
- Kohezif toprak, örneğin kil gibi içsel yapısal kuvveti içeren baskın kohezyon kuvvetlerine sahip ince parçacıklardan oluşur.

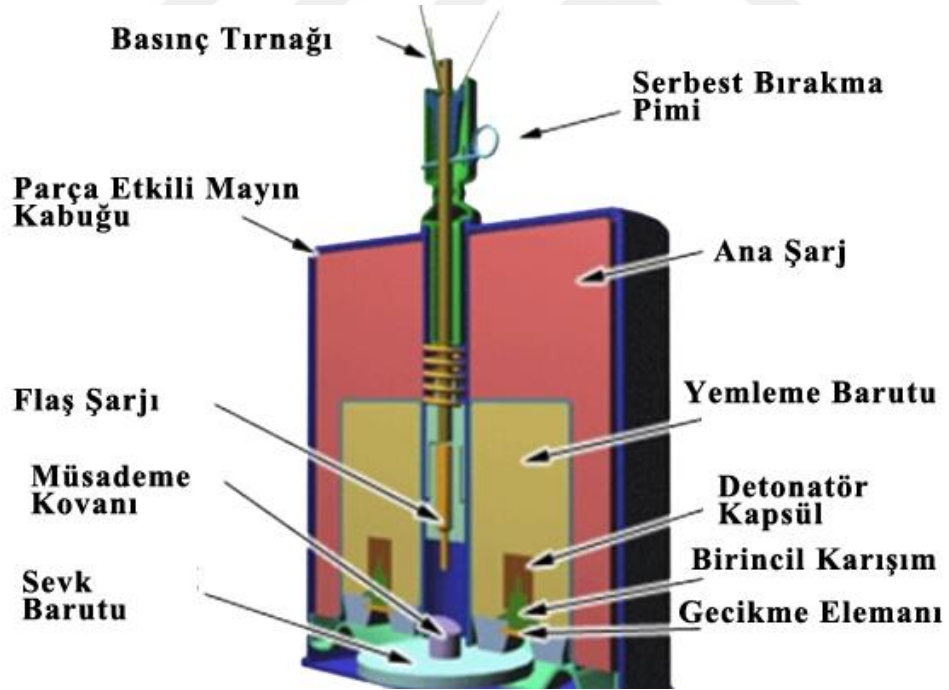
2.1.3 Anti-personel Mayınları

Anti-personel mayınları (Resim 2.2), sıçrayan (bounding) parça tesirli (fragmentation) ve normal (blast) olabilmektedir. 7-16 cm çapındadırlar. Ve yerin yaklaşık 10 cm altına yerleştirilmektedirler. Ortalama 20-200 gr patlayıcı içermektedirler. Çeşitleri aşağıdaki gibidir (Poteet 2008).

- M14 (Blast), (Şekil 2.2)
- M16 (Bounding & Fragmentation) (Şekil 2.3)



Şekil 2.2 M14 Anti-personel mayını (9 daN), (31 gr tetril içeriyor, 56 mm çapında 40 mm derinliğinde) (Rahmani 2006).



Şekil 2.3 M16 Anti-personel mayını (16 daN), 521 gr TNT içeriyor, 133 mm çapında 199 mm derinliğinde) (İnt.Kyn.2).



Resim 2.2 Anti-personel mayını (İnt.Kyn.3).

2.2 Mayın Temizleme Yöntemleri

Mayın temizleme çabalarının iki farklı kategorisi vardır: askeri ve insani yardım. Her iki kategorinin de amacı nihayetinde aynı olsa da (kara mayınlarının kaldırılması), ikisi de kaldırmanın ardındaki motivasyona göre büyük farklılıklar göstermektedir. Örneğin, askeri mayın temizleme, öncelikle bir mayın tarlasından geçme ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle temel amaç, araçların yanı sıra geçmesi gerekebilecek tüm birlikler için güvenli bir yol oluşturmaktır. Yol oluşturma amacına ulaşmak için bir alanın sadece bir kısmının temizlenmesi gerekir. Amaç A noktasından B noktasına gitmek olduğundan, kalan mayın tarlasının kaderi hakkında çok az endişe duyulmaktadır. Çoğu zaman mayınlar toprağa bırakıldığı için siviller askeri mayın temizleme çabasından sonra hala risk altında olabilir.

Buna karşılık, insani mayın temizleme çabalarının amacı, belirli bir alandaki tüm kara mayınlarını ortadan kaldırmak ve böylece daha önce kirlenmiş arazinin kullanılmasını sağlamaktır. Ancak bir alan % 99,6'lık temizlenme standardını karşıladıktan sonra (BM tarafından belirlenen) sivil kullanım için güvenli kabul edilebilir. İnsani mayın temizlemenin bir başka önemli yönü, mayınların nasıl ele alındığı ile ilgilidir. Bir mayının imha edilmesinin kabul edilebilir olduğu askeri mayın temizlemenin aksine, insani mayın

temizliğinde tüm mayınlar uygun şekilde kaldırılmalı ve bertaraf edilmelidir. Bu, tespit konusunu çok daha önemli hale getirir. Ek olarak, daha önce de belirtildiği gibi, insani çabalarla temizlenen arazinin çoğu tarımsal kullanım amaçlıdır. Bu nedenle, bu bölgelerdeki üst toprak koşulları ile ilgili olarak önemli değerlendirmeler yapılmalıdır. Verimli üst toprak, mayın temizleme işlemi sırasında korunmalıdır, bu da mayın içeren kir tabakasını (buldozer ile temizleme gibi) insani mayın temizleme için kullanışsız hale getirir (Mikulic 2012).

Dünya üzerindeki aktif mayınlar aşağıda tasnif edilen yöntemler ile temizlenmeye çalışmaktadır. Korunma ve yerlerini belirleyerek çıkarma haricindeki yöntemler; mayınların yerlerini belirlemeksizin patlamaya karşı mukavim araç ve farklı çalışma prensibine sahip ekipmanları ile arazide mayınları tetikleyecek büyüklükte bir kuvvet uygulayarak infilak etmelerini sağlamaktadırlar. Mayın temizleme için kullanılan yöntemler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Genel hatlarıyla mayından korunma ve temizleme yöntemleri.

Mayın Temizleme Makinaları İle	Detektörler ile	Korunma Ekipmaları
Zincire bağlı tokmaklar ile döverek	Köpekler ile	Kişisel Korunma Ekipmanları
Tiller ile	Proplar ile	Haberleşme
Tırmık, Merdane veya Pulluk ile	Metal	GPS
	Detektörleri	
İmha Ekipmanları İle	Radar Detektörler	
Mayına karşı zırhlı araçlar ile		

2.2.1 Mekanik Olarak Mayın Temizleme Yöntemleri

Yukarıda bahsedildiği gibi, manuel mayın temizlemeye alternatif yöntemlere büyük ihtiyaç vardır. Bugün, bir alt bölümü kara mayınlarını tespit etmek ve kaldırmak için mekanik ekipmanların kullanılmasını içeren bir dizi yöntemler bulunmaktadır (Mikulic 2012). Bu bölümde, niteliklerine, sınırlamalarına ve insani mayın temizlemeye uygulanabilirliğine odaklanarak, mevcut dört yöntemden bahsedilecektir.

2.2.1.1 Kltivatrler ile Mayın Temizleme

Kltivatrler, bir buldozere takılabilen bir tür kara mayını temizleme ekipmanıdır (Resim 2.3). Toprağın tarımsal yeteneklerini korurken gömülü anti-tank mayınlarını ortaya çıkarmak için tasarlanmışlardır. Kltivatrler, mayınları yzeyeye çıkarmak için bir dizi atal kullanır. Testlerde kültivatör teknolojisi, mayınları yaklaşık 0,2 metre derinliğe kadar başarıyla kaldıracıblmıştır. Gevşek toprağa sahip bölgelerde bu derinlik 0,38 metreye kadar artırılabilir. Açığa ıkarılan mayınlar daha sonra onları bir kenara atan ve kolay toplama ve çıkarma sağlayan bir burgudan geçirilmektedirler.



Resim 2.3 Kültivatör ile mayın temizleme operasyonu (İnt.Kyn.4).

Kültivatör teknolojisi çeşitli arazilerde test edilmiştir ve orta derecede bitki örtüsüne sahip alanlarda bile etkili görünmektedir (Poteet 2008). Bununla birlikte, dikkate alınması gereken bazı ciddi sınırlamalar vardır. Birincisi, küçük anti-personel mayınları doğrudan burğu içinden geçebilir ve sahaya yeniden dağtılabılır. Ayrıca, mayınların burgudan geçerken patlaması ihtimali de var. Ekipman bu tür patlamalara dayanıklı olacak şekilde tasarlanırken, tekrarlanan olaylar zamanla hasara neden olabilir. Ek olarak, mayınların patlaması ihtimali, civarda bulunabilecek kişiler için ekstra bir güvenlik riski yaratır.

Dikkate alınması gereken bir diğer önemli husus ağırlıktır. Kültivatör teknolojisini kullanan bazı mevcut prototipler 31 tondan fazla ağırlığa sahiptir (Anonim 1998). Bu, cihazın taşınmasını zorlaştırır. Araç ağırlığının fazla olması aynı zamanda kltivatrn

nemli ve çamurlu araziye arazilerde kullanışlı olmayacağı anlamına gelir, çünkü daha yumuşak zemine batma eğiliminde olacaktır. Bu nedenle bu teknoloji, Güneydoğu Asya'daki sulak alanlar gibi etkilenen pek çok bölgede uygulanamaz.

2.2.1.2 Mayın Bıçağı ile Temizleme

Bir mayın bıçağı, standart bir buldozer bıçağının yerini alacak şekilde tasarlanmış bir dizi kazıcı takımdan oluşmaktadır. Kazıcı dişler topraktan geçirilerek, taş, kaya ve kara mayınları gibi daha büyük nesnelerin bir karışımını çeker. Toplanan malzeme daha sonra bir dizi eleme dişinden geçirilir; ve aracın yan tarafına boşaltılır. Kültivatörde olduğu gibi, ayrılmış kara mayınları daha sonra kaldırılmak üzere buldozerin yan tarafına bırakılır (Poteet 2008). Mayın bıçağı ile mayın temizleme aracı Resim 2.4' te gösterilmiştir. Bu araçlar işleme derinliğini ayarlayarak sahada tarama yapabilmektedirler. Bu nedenle istenilen derinlikteki mayınların çıkarılması için uygundurlar.



Resim 2.4 Mayın bıçağı ile mayın temizleme (İnt.Kyn.5).

Askeri pulluklar veya standart buldozer bıçaklarının kullanılması gibi diğer kaldırma yöntemlerinin aksine, mayın bıçakları yüksek eğitimli operatörler gerektirmez. Mayın bıçağı ile alan temizlenirken özellikle anti-personel mayınları gibi küçük mayınlar makinanın eleğinden geçip tekrar toprak alana bırakılması riski mevcuttur. Aynı risk kültivatörler ile temizleme işleminde de bulunur. Mayınların bu şekilde yeniden sahaya dağıtılmasını önlemek için veya mayın bıçağının anti-personel mayın temizleme aracı

olarak kullanılabilmesi için teknolojik ilerlemelerin yapılması gereklidir. Ele alınması gereken bir diğer konu da anti-personel mayınların eleme dışlarından geçtikten sonra patlaması ihtimalinin yüksek olmasıdır. Mayın bıçağı mayın patlamalarına dayanıklı olacak şekilde tasarlanırken, tekrarlanan patlamalar üniteye hasara neden olabilir. Patlamalar ayrıca yakındaki kişiler için risk oluşturur. Bu nedenle uzaktan kumanda edilebilmeleri gereklidir.

2.2.1.3 Zincire Bağlı Tokmaklar ile Döverek Temizleme

Daha önce anlatılan mayın temizleme teknolojilerinden farklı olarak, makinanın işlevi kara mayınlarını kaldırmak değil, arazide onları yok etmektir. Rotora bağlı ağır zincirler, zemini ezmek için kullanılır (Resim 2.5). Çarpma kuvveti, çoğu anti-personel mayını tetiklemek için yeterli zemin basıncı yaratır. Bu yöntem mayın patlamasına neden olduğundan, ağır zırhlı, uzaktan kumandalı bir araç kullanmak gerekir. Dövmeler çoğu anti-personel kara mayınına karşı etkili olsa da, anti-tank mayınlarının varlığından şüphelenilen bölgelerde kullanılamazlar (bir anti-tank mayının neden olduğu hasar, bağlı araçla birlikte bir ataşman birimini bertaraf için yeterlidir.).



Resim 2.5 Zincire bağlı tokmaklar ile döverek mayın temizleme operasyonu (İnt.Kyn.6).

Ek olarak, zincirlerin hareketi aslında bazı kara mayınlarını önceden temizlenmiş bölgelere fırlatabilir ve bu nedenle ek manuel kontroller gerektirebilir. Bu nedenle, askeri geçiş için kullanılacak bir yolun temizlenmesinde oldukça etkilidir. Bununla birlikte, yöntemin sınırlıları nedeniyle, genel olarak mayın temizleme söz konusu olduğunda farklı alternatiflerin de değerlendirilmesi gereklidir (Poteet 2008).

2.2.1.4 Tiller ile Mayın Temizleme

Bir önceki yönteme benzer şekilde bir rotor üzerine bağlı tiller takımları ile toprağı işleyerek mayınların bertaraf edilmelerini amaçlamaktadır. Bu makineler hem anti-tank hem de anti-personel mayınlarını yok etmek için tasarlanmıştır. Bu nedenle tiller takımı, anti-tank mayınlarından gelen patlamaya minimum hasarla dayanabilen uzaktan kumandalı araçlardır. Çoğu durumda rotorun ters yönde döndürülmesi ile mayınlar ezilmek yerine yüzeye çıkarılabilir. Bu nedenle, kara mayını temizleme çalışmalarında kullanılan tiller ataşmanları, aşağıda gösterildiğı gibi belirli düzende tiller kazıcı dişleri ile donatılmışlardır.



Resim 2.6 Tiller ataşmanı ile mayın temizleme operasyonu (İnt.Kyn.7).

Tiller ataşmanı ile mayınlı arazilerinin temizlenmesi en efektif yöntem olduğu görülse de, anti-personel mayın temizleme için uygulanabilirliklerini değerlendirirken dikkate alınması gereken iki önemli husus vardır. Bunlardan ilki, tüm kara mayınlarının yok edilmesini garanti etmenin bir yolu olmadığı için şimdiye kadar tartışılan tüm teknolojiler için ortaktır (Poteet 2008). Tiller ataşmanı diğer yöntemlere nazaran üzerinde dizili takımların sıklığı nedeniyle anti-personel mayınlarında daha etkili olabilmektedir. Ancak

yine de PFM-1 "kelebek mayını" gibi çok küçük anti-personel mayınların geçme olasılığı vardır (Poteet 2008). İkinci husus, aparatın ağırlığıdır. Bazı mevcut tiller mayın temizleme araçları 56 tonun üzerindedir. Bu da onları nemli arazilerde çok verimsiz hale getirir. Şimdiye kadar tartışılan teknolojiler arasında en güvenilir yöntem olan tiller ataşmanı ile mayın temizleme, askeri uygulamalar için en uygun olanı olarak görünmektedir; hem kayalık hem de bitki örtüsü ile kaplı alanları temizleyebilirler. Aynı zamanda çok çeşitli anti-tank ve anti-personel kara mayınlarını bertaraf edebilirler.

Döner tiller ataşmanına makine (Resim 2.6), zemini ters yönde veya eş yönlü olarak kazabilir. Ters yönlü zemin kazma, "rotorun altındaki" mayınları ezerek parçalamak için kullanılırken, "rotorun önündeki" mayınları atmak veya etkisiz hale getirmek için eş yönlü kazma kullanılır. Toprak kazma sırasında, artan bıçak sayısı zemini daha iyi kavrar ve kazma derinliğini artırabilir. Bıçak sayısında ve yerleşimindeki düzensizlik fazla toprak direncine ve rotorda fazla moment ihtiyacına dolayısıyla verimsizliğe neden olmaktadır. Toprağın kırılarak kazılması, kesme aşaması ve tabaka kaldırma aşamasından oluşur. Birinci aşamanın toplam direnci, bıçak (takım) yoluna teğet olan teğetsel direnç bileşeninden ve rotor eksenine, yani radyal bileşene yönelik dikey direnç bileşeninden oluşur. En büyük direnç, toprak kavramasını terk eden takıma etki eder.

Bu tezin konusu da tiller ataşmanı kullanarak mekanik olarak mayın temizleme makinası ataşmanı tasarımıdır. Hem anti-personel hem de anti-tank mayınlarının temizlenmesinde en etkin yöntem olduğu düşünülen tiller ile mayın temizleme hem askeri hem de insani faaliyetler için mayın temizleme verimliliğinin asgari kayıpla en yüksek olduğu yöntemdir. Bu yöntem ile mayın temizleme mekanik esasları ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır.

2.2.1.5 Mekanik Olarak Mayın Temizlenenin Avantajları

Makine ile mayın temizlemenin avantajları, daha az insanın dâhil olduğu mayın temizleme araçları için güvenlik risklerinin azaltılması, hızlı mayın temizleme yöntemi, yani daha yüksek performans ve yüksek düzeyde mayın temizleme sağlanmasıdır. İş

güvenliği ile ilgili makine teknolojisindeki gelişmeler ve tüm arazi koşullarında en küçük mayın kalıntılarının temizlenmesinde artan verimlilik, mayın temizleme makinesi teknolojisinin gelişmesiyle daha da artmaktadır. Ayrıca yeni mayın temizleme cihazları ve çözümleri test edilmektedir. Bu tür makineler arasında, insani mayın temizlemede temel makina olarak tiller ataşmanına ve zincire bağlı tokmaklara sahip döner ekipmanlı makineler vardır. Genellikle mayın temizleme makinası üreticileri daha basit ve daha ucuz bir çözüm olarak zincire bağlı tokmakları tercih etmekte ve bunlar daha verimli olduğu için daha yüksek kar sağlamaktadır. Fakat anti-tank mayın mayınlarının temizliğindeki eksikliği en büyük dezavantajıdır. Verilere göre, zaman periyodu boyunca mayın temizleme makinelerinin sayısında bir artış görülmektedir (Mikulic 2012).

2.3 Mayın Temizleme Makinaları Mekaniği

Bu bölümde mayın temizleme araçlarının toprak zemin üzerinde hem tekerlekli modeller hem de paletli modeller için hareket kabiliyeti prensiplerinden bahsedilecektir. Diğer taraftan mayın temizleme ekipmanlarının çalışma prensipleri ve operasyonel parametrelerinin etkileri anlatılacaktır.

2.3.1 Toprak Sınıflandırılması

Mayın temizleme işlemleri için makine çalışma koşulları çok önemlidir. Makine tasarımı ve mayın temizleme teknolojisi üzerindeki etkileri nedeniyle toprak özelliklerine ve mayın özelliklerine aşina olmak gerekir. Toprak (zemin) özellikleri, olası zemin koşulları ve fiziksel-mekanik özellikler toprak mekaniği tarafından tanımlanmıştır. Mayın temizleme ekipmanı söz konusu olduğunda (problar, detektörler, makineler) gerçek mayın temizleme koşullarının sınıflandırılması son derece önemlidir. Mayınlar, mayın temizleme ekipmanı ile etkisiz hale getirilebileceği dört toprak kategorisi Çizelge 2.2'de sunulmuştur. Ek olarak, belirli mayın temizleme tekniklerinin kullanılması için toprak yapısı önemlidir. Mayın temizlenecek arazi kayalık düz toprak bir yerde, kayalıklı engebeli arazide ya da düz arazi de olabilir. Mayın temizleme makinası tüm arazi tipleri için uygulanabilir olması esastır.

Manuel ekipmanlar veya mayın temizleme makineleriyle toprağın işlenmesi ile ilgili olarak, toprak kategorizasyonu ve bitki örtüsünün sınıflandırılması Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’ de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Toprak Kategorizasyonu (Mikulic 2012).

Toprak Kategorisi	Toprak Özellikleri	Kullanılan Yöntem
I	Orta ve sert toprak, bitki örtüsü ile kaplı, humuslu, killi ve sıkışmış kum	El ile kullanılan araçlar, proplar,
II	Kayalar ve taşlarla karışık, kirli orta ve düşük bitki örtüsü ile kaplı. Sert kalker, yumuşak ve makine tarafından kolayca parçalanabilir.	Propların kullanılması zordur. Makinaların kullanımına uygundur.
III	Taşlı toprak, düşük bitki örtüsü. Bataklık toprak	Proplar yüzeyde kullanılabilir. Makinaların kullanımına uygundur.
IV	Özel şartlar, çok sert toprak (Diğer kategoriler uygulanabilir değil.)	Proplar kullanılamaz. Makinaların kullanımı da zordur.

Çizelge 2.3 Bitki Örtüsü Kategorizasyonu (Mikulic 2012).

Bitki Örtüsü Kategorisi	Bitki Örtüsü Özellikleri	Bitki Örtüsü Yapısı	Bitki Örtüsü Yükseklikliği ve Bitki Çapı
Düşük	Düşük ya da yüksek yoğunluktaki taze ya da kuru çimenlik alan, nadiren çalılık ve yabani otlu	80% çimenlik, 20% çalı	1m.
Orta	Çimenlik, yabani otlar, tekil çalılar ve tekil ağaçlar, daha kalın bitki örtüsü	50% çimenlik, 50% çalı, 10-15 ağaç	1-2 m. >Ø10cm.
Yüksek	Yüksek yoğunlukta çimen, çalı, tekil ağaçlar, yoğun bitki örtüsü	20% çimenlik, 40% çalı, 40% ağaç altı çalı, >15 ağaç	>2 m. >Ø10cm.
Orman	Yüksek yoğunlukta ormanlık alan	Çok sayıda ağaç	>2 m. >Ø20cm.

2.3.2 Makinaların Toprak Arazi Üzerindeki Hareket Kabiliyetleri

Makinelerin ve araçların mayın temizleme işleminde kullanılması toprağın durumuna bağlıdır. Yumuşak ve nemli topraklarda makineler ve araçlar zor hareket eder. Bu nedenle kullanılacak araçların toprak yapısı üzerinde hareket edecek kabiliyette olmaları elzemdir. Bu sorun tekerlekli araçlarda paletli araçlardan daha belirgindir. Yumuşak zemin üzerindeki araç basıncına göre toprak arazi üzerindeki hareket kabiliyetleri göstergeleri şunlardır:

1. Nominal zemin basıncı (NGP)
2. Ortalama maksimum basınç (MMP)
3. Toprak yükü kapasitesi, toprak koni indeksi (CI)
4. Tekerlek izi derinliği (Z), batma
5. Araç koni endeksi (VCI)

Ortalama maksimum basınç (MMP); toprak arazi üzerindeki hareket kabiliyetleri ilişkin bir çalışmada, toprak üzerinde hareket kabiliyeti tahminine en kolay yaklaşım olarak toprak NGP'si (Nominal Zemin Basıncı) üzerinde genellikle nominal bir araç basıncı kullanılır. Bununla birlikte, toprak üzerindeki nominal basınç, tekerleğin toprak üzerindeki marjinal teğetsel basıncıdır. Bu basınç hareket halindeyken yüklü tekerlek pnömatis deformasyonunun etkisinin ihmal edilmesi veya palet zincirinin deformasyonu nedeniyle, tek başına yeterli bir toprak hareket kabiliyetine uygunluk tahmini sağlamaz.

2.3.2.1 Tekerlekli Araçlar için Ortalama Maksimum Basınç (MMP)

Ortalama maksimum basınç (MMP), aracın tekerlekler aracılığıyla yumuşak zemin üzerindeki referans basıncıdır. Tekerleklerin altındaki toprağa etki eden tepe basınç büyüklüklerinin ortalama değeri olarak tanımlanır. Killi zemin üzerinde araç hareketliliğinin değerlendirilmesi için kısmi bir ampirik model geliştirilmiştir. Daha düşük MMP değeri, daha iyi toprak trafiği ve ortalama hareket hızı sağlayan tekerlek batmasını azaltır, bu da daha iyi araç hareketliliği sağlar. MMP ve CI toprak yükünü birbirine bağlayan araç hareketliliğini yani aracın hareket edip edemeyeceğini tanımlayan

korelasyonu oluşturur. MMP (Denklem 2.1), tasarım faktörünün tabana olan basıncın azaltılması üzerindeki etkisinin analizini ve buna bağlı olarak farklı araçların hareketliliğinin değerlendirilmesini sağlar (Mikulic 2012).

$$MMP = \frac{kW_t}{nb^{0,85}d^{1,15}\sqrt{\delta}} \text{ (kPa)} \quad (2.1)$$

W_t ; Araç ağırlığı (kN)

k ; Araç çeker sayısı katsayısı (Örneğin 2 çeker bir araç için $k=1,83$, 3 çeker bir araç için $k=1,5$, 4 çeker bir araç için $k= 2,05$)

n ; Araç tekerlek sayısı

b ; Yüklü olmayan araç için tekerlek genişliği (m)

d ; Yüklü olmayan araç için tekerlek çapı (m)

δ ; Yük kaynaklı tekerlek deformasyonu (m)

$$\delta = \left(0,365 + \frac{170}{p_i}\right) \frac{W}{1000} \quad (2.2)$$

p_i ; Tekerlek patlama basıncı (kPa)

W ; Tekerlek yükü (kN)

Paletli araçlar için ortalama maksimum basınç (MMP); Makinelerin mayın temizlemede kullanılması toprağın durumuna bağlıdır. Hava koşulları değiştiğinde (yağmur, çamur) toprak yük kapasitesi (toprak mukavemeti) de değişir. Toprak nemli olduğunda ve makine çok ağır olduğunda hareket etmeyecek veya mayın temizleme yapmayacaktır. Toprak üzerinde daha az basınç oluşturan olan makineler, daha fazla toprak üzerinde hareket kabiliyeti sağlamaktadır (Mikulic 2012).

$$MMP = \frac{1,26W_t}{2nb\sqrt{Dt}} \text{ (kPa)} \quad (2.3)$$

W_t ; Araç ağırlığı (kN)

n ; Tek bir paletteki tekerlek sayısı

b ; Palet genişliği (m)

D ; Cer dişlisi çapı (m)

t ; Palet adımı (hatve) (m)

L , Yere temas eden palet uzunluğu (m)

Paletli Araçlar için Nominal Zemin Basıncı (NGP) şu şekilde bulunur (Mikulic 2012);

$$NGP = \frac{W_t}{2Lb} (kPa). \quad (2.4)$$

2.3.2.2 Toprak Koni Endeksi (CI)

Toprak koni endeksi CI , Resim 2.7’de gösterildiği gibi penetrometre ile ölçülen bir toprak yük kapasitesi göstergesidir. Penetrometre konisinin belirli tipteki toprağa nüfuz etme direnci ölçülür. 15 cm derinlikte koni penetrasyon ölçümünün standartlaştırılmış değeri (ASAE EP542 1999), koni indeksi (CI) olarak adlandırılır.



Resim 2.7 Penetrometre ile toprak koni indeksi ölçümü (Mikulic 2012).

Örneğin, çok yumuşak toprak yükünün toprak koni indeksi CI ; 300 kPa, orta sert toprak 300–500 kPa ve çok sert toprak 500 kPa’dan fazladır (Mikulic 2012).

Bazı toprak yükü kapasitesi, koni indeksi CI (Mikulic 2012):

0–21, Pratik olarak yük taşıma kapasitesi çok az olan toprak zemin

40–62, Bir insanın gömülmeden yürüyebilmesinin çok zor olduğu zemin

103–165, Çok özel hafif araçların aynı yoldan 50 kez geçebileceği toprak zemin

186–228, Hafif araçların 50 kez geçebileceği toprak zemin
 276–352, Orta ağırlıktaki paletli araçların 50 kez geçebileceği toprak zemin
 372–497, SUV araçların 50 kez geçebileceği toprak zemin
 517–662, Ağır araçların gömülmeden hareket edebileceği zemin
 683–935, Yolcu taşıtlarının gömülmeden hareket edebileceği zemin
 1000, Zemin üzerinde hareket etmenin bir problem oluşturmadığı zemin.

2.3.2.3 Koni Endeksini Sınırı

$$CI = CI_L = 0,827 \text{ MMP (kPa)}. \quad (2.5)$$

Bu ifade, belirli MMP'ye sahip aracın hareketli olduğu en düşük toprak yükünü belirlemek için kullanılabilir. Başka bir deyişle, güzergâhı başarılı bir şekilde geçmek için belirli bir araç için toprak yükü verilen MMP'nin en az % 83'ü olmalıdır.

Aynı zemin üzerinde tekrarlı hareketler için koni indeksi sınırını (CI_L) bulmak için; deneysel bir şekilde elde edilmiş RI katsayısı kullanılmaktadır. RI katsayıları çizelge 2.4'te verilmiştir. Çoklu geçiş için koni indeksi şu şekilde hesaplanır;

$$RCI = RI * CI. \quad (2.6)$$

Çizelge 2.4 Çoklu geçiş için RI katsayıları (Mikulic 2012).

Geçiş Sayısı	1	2	5	10	25	50
RI	1	1,2	1,53	1,85	2,35	2,8

2.3.2.4 Tekerlek İz Derinliği

İlk olarak fiziksel özellikleri (yapı, yoğunluk, nem, su geçirmezlik ve diğerleri) ve mekanik özellikler (yük kapasitesi, kesme direnci, kohezyon özellikleri, yapışkanlık ve diğerleri) olmak üzere birçok faktör aracın hareket etmesini etkiler. Toprak, tekerleğin her dönüşünde plastik olarak deforme olur. Tekerleğin altında toprak, karmaşık normal

ve teğetsel gerilmelere maruz kalır. Bu, toprak sıkışmasına ve kesilmesine yol açar. Deformasyon derecesi toprak özelliklerine, yani mekanik özelliklerine bağlıdır. Deformasyona karşı direnç daha yüksek olduğunda, toprak, araç hareketi için daha uygun koşullar, yani daha iyi toprak üstü hareket kabiliyeti sağlar. Farklı araçların çevresel olarak kabul edilebilirliğini değerlendirmek için, ilgili bir parametre olarak tekerlek indeksi için genel formül (tekerlek sayısal) şu şekilde tanımlanır (Mikulic 2012).

$$N_k = CI/p \quad (2.7)$$

Tek geçiş için tekerlek iz derinliği (z)'de

$$z_1 = D \left(\frac{0,224}{N_k^{1,25}} \right). \quad (2.8)$$

Çoklu geçişler için tekerlek iz derinliği;

$$z_n = z_1 n^{1/a}. \quad (2.9)$$

D ; Tekerlek çapı (m)

z_1 ; İlk geçiş batma derinliği (m)

z_n ; n 'inci geçiş batma derinliği (m)

n ; Geçiş sayısı

p ; Lastik patlama basıncı (kPa)

a ; Çoklu geçiş katsayısı (düşük toprak yük kapasitesi için $a = 2-3$; orta toprak yük kapasitesi için $a = 3-4$; yüksek toprak yük kapasitesi için $a = 4-5$)

Araç koni indeksi (VCI), WES (Stevens vd. 2013) tarafından geliştirilen birim hareketlilik değerlendirmesi için referans NRMM modeli olarak kabul edilmektedir. VCI , MI için kısmen deneysel bir terime (Mobilite İndeksi) dayalı olarak geliştirilmiştir (Mikulic 2012). Deneyler, bir ve elli indeks için ($VCI1$ ve $VCI50$) VCI değerlerinin hesaplanması için ifadeleri belirlemek için kullanılır. VCI - Araç Koni Endeksi, aracın belirli sayıda geçişi başarıyla tamamlamasını sağlayan kritik katman içindeki minimum toprak yükünü

(psi - pound / inç kare) temsil eder. ABD Ordusunda, toprağın askeri araçları destekleme kapasitesi anlamına gelen Toprak Arazi Üzerindeki Hareket Kabiliyeti (soil trafficability) ifadesi kullanılmaktadır. Tipik düşük yüklü arazide aynı yol üzerindeki bir veya daha fazla aracın hareketliliği ile ilgili olarak, araç hareketliliği toprağın yapısı (ince taneli toprak / killi-balçık, çamur) ilgili olduğundan, toprakta çoklu geçiş aşağıdaki şekilde modellenmiştir.

2.3.2.5 Mobilite Endeksi

$$MI = \left(\frac{K_{KP}K_T}{K_GK_L} + K_{OK} - K_{CL} \right) K_M K_{MJ}. \quad (2.10)$$

K_{KP} ; Temas basıncı faktörü , $K_{KP} = w/0,00035 n_1 d b$

K_T ; Araç aks yük faktörü , $K_T = 0,073(w/1000) + 1,050$

K_G ; Tekerlek genişlik faktörü , $K_G = (10 + b/25,4)/100$

K_L ; Palet tırnağı faktörü , (zincirsiz olduğunda 1.00, zincirli olduğunda 1.05 alınır.)

K_{OK} ; Tekerlek yük faktörü , $K_{OK} = w/907,2$

K_{CL} ; Şasinin toprağa mesafesi faktörü , $(H/254, H$ aksın zemine olan mesafesi)

K_M ; Araç spesifik güç faktörü , $(> 7,36 kW/t \rightarrow 1,0; < 7,36 kW/t \rightarrow 1,05)$

K_{MJ} ; Şanzıman faktörü (Otomatik vites ise 1,00; manuel vites ise 1,05)

w ; Ortalama aks yükü (kg)

n_1 ; Aks üzerindeki tekerlek sayısı

b ; Yüksüz tekerlek genişliği (mm)

d ; Yüksüz tekerlek çapı (mm)

2.3.2.6 Araç Koni Endeksi

Tek geçiş için;

$$VCI_1 = 11,48 + 0,2MI - \left(\frac{39,2}{MI+3,74} \right) 6,89655 (kPa) \quad (2.11)$$

Elli tekrarlı geçiş için;

$$VCI_{50} = 28,23 + 0,43MI - \left(\frac{92,67}{MI+3,67} \right) 6,89655 \text{ (kPa)}. \quad (2.12)$$

Araç hareket ve çekiş kabiliyeti;

- Tek tekrarlı geçiş için; $CI > VCI$, ise araç hareket eder.
- Çok tekrarlı geçiş için; $RCI > VCI$, ise araç hareket eder. ($RCI = RI * CI$)

Çizelge 2.5 Bazı mayın temizleme araçlarının MMP ve NGP değerleri (Mikulic 2012).

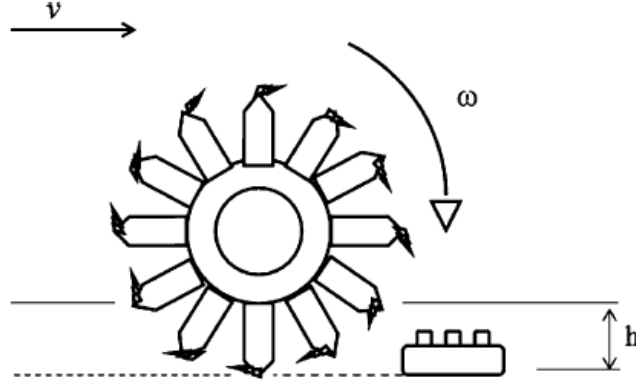
Mayın Temizleme Makinası	Ağırlık (kg)	MMP (kPa)	NGP (kPa)	CI_L (kPa)
MV-4	5,500	125	46	108
MV-10	18,000	150	39	124

Hafif ve orta boy mayın temizleme makinelerinin iki örneğinin MMP basıncı, NGP basıncı ve CI_L indeksi izelge 2.5'te değeri verilmiştir. Paletli mayın temizleme makineleri, önemli ölçüde daha yumuşak toprak zemin üzerinde iyi hareket kabiliyeti sunmaktadır.

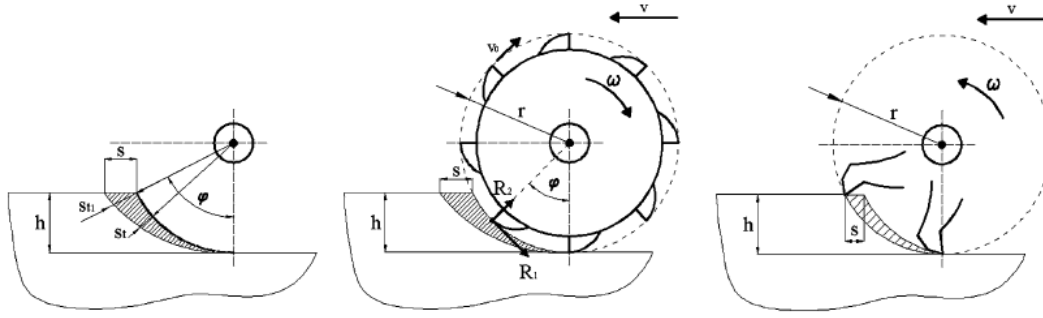
2.3.3 Tiller Ataşmanı ile Mayın Temizleme

Tiller tasarımı, toprağı kazma ve mayın etkisiz hale getirmek prensibine dayanmaktadır. Toprak kazma modu, makine hareketine göre rotorun göreceli dönüşünü gösterir, yani rotorun altındaki toprağın dışarı atıldığı yönü gösterir, (şekil 2.4). Tiller ataşmanı ile iki şekilde mayın temizleme yapılabilir. Aracın ilerlediği yn x doğrultusu ve zeminden yukarıya doğru z eksenini yerleştirilirse +y yönündeki dönüş ise araç doğrultusu ile ters yönde kazma olarak adlandırılır. Ters yönde kazma işleminde mayın ataşmanın tam altında infilak eder (şekil 2.5). Toprağı aynı yönde kazarken, kesme kuvveti nesneyi yerden kaldırmaya çalışır ve mayın kırılabilir, patlatılabilir veya fırlatılabilir. Ters yönde toprak kazma modunda, ataşman nesneyi yere bastırmaya çalışır ve mayın kırılabilir, patlatılabilir veya daha derine gömülebilir. Takım dayanıklılığı ile ilgili olarak, aynı yönde kazmak, sert yüzey tabakalı toprak için daha iyidir. Çünkü takım bıçakları ilk önce sert yüzey tabakasının altındaki daha yumuşak toprağı kazar. Ters yönde ise takım

bıçakları önce sert yüzey katmanına vurur. Şekil 2.4'te gösterilen h , işleme derinliğini göstermektedir. Muhtemel mayınlar h derinliği ile zemin arasında yerleştirilmiştir.



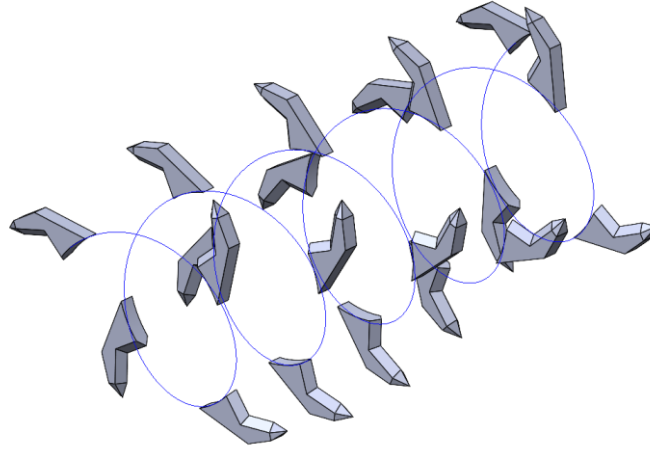
Şekil 2.4 Tiller ataşmanı ile mekanik olarak mayın temizleme şematik gösterimi.



Şekil 2.5 Saat yönünde ve ters yönde toprağın kazılması ve kazılan katman geometrisi (Mikulic 2012).

2.3.3.1 Helis Sistemi

Tiller takımlarının konumlandırma modeli, toprak kazma ve mayın etkisiz hale getirme için keskin dişlerle (takımlara) rotor boyunca (rotor merkezinden sola ve sağa) civatalanmış bir helis şekline sahiptir. Helis eğim açısı $\alpha = h/2r\pi$ 'dir. Şekil 2.6'da hayali bir helisel eğri üzerine eşit aralıklarla dizilmiş takımlar gösterilmiştir. Burada h , helis adımı ve r , tiller rotorunun yarıçapıdır. Bu helis boyunca rotora dişler tutturulmuştur. Takılı dişlerin yoğunluğu ve tiller kesme direnci, helis hassasiyetine bağlıdır. Frezelemenin yanı sıra, frezelenmemiş toprağın bir kısmı, sarmal nedeniyle rotor boyunca şerit döngüsü gibi düzgün bir harekete sahiptir. Her rotor devri için malzeme, helis aralığına eşit mesafe boyunca ileri doğru hareket ettirilir.



Şekil 2.6 Helisel eğri üzerinde eşit aralıklarla dizilmiş takımların şematik gösterimi.

Bıçaklar, tiller rotoruna göre teğet olarak konumlandırılmalıdır. Bıçakların rotor üzerindeki konumu, imha edilmesi gereken nesneye bağlıdır. Anti-personel mayınları için, kritik boyut veya takım kesmesi 16–30 mm olarak varsayılır (Mikulic 2012). En küçük mayınların imhası için 16 mm'lik boyut kesin olarak belirlenmiştir.

2.3.3.2 Kesme Direnci

Kazarken, takım bıçaklarının çoğu toprağı kavrar. Toprağı kavrayan bıçakların sayısı, çalışma derinliğine bağlıdır. Toprağı kavrayan eşit olmayan sayıda takım ve toprak kesme derinliğinde değişiklik, gerekli rotor momentinde asimetric kazma direncine ve asimetriye neden olmaktadır. Toprak kazma, kesme aşaması ve toprak tabakası yer değiştirme aşaması olmak üzere iki aşamadan oluşur. İlk fazın toplam kazma direnci, kanat yörüngesinde teğet yönünde teğet bileşen ve rotor eksenine, yani radyal bileşenlere yönelik dikey direnç bileşeninden oluşur.

Kesme direnci, kazma direncinin teğetsel bileşenidir.

$$R_1 = k_1 b S_t (N). \quad (2.13)$$

k_1 ; Spesifik kesme direnci (kN/m^2),

b ; takım bıçağı genişliği (m),

S_t ; kesme tabakası kalınlığıdır. (m)

S_t , herhangi bir t anında takımın toprak ile etkileşim halinde bulunan uzunluğudur. Kesme direnci k_1 , toprak sınıflandırmasına göre 25 kN/m^2 ile 320 kN/m^2 arasında değişkenlik göstermektedir (Mikulic 2012). Aşağıda deneysel verilerden elde edilmiş bazı toprak sınıfları için spesifik kesme dirençleri verilmiştir.

- Özgül direncin ortalama değerleri:
- $k_1 = 25 \text{ kN/m}^2$ kumlu kil, çakıl
- $k_1 = 95 \text{ kN/m}^2$ sıkı örüntülü kumlu kil, orta kil, yumuşak kömür
- $k_1 = 175 \text{ kN/m}^2$ çakıllı sert kumlu kil, sert kil, çakıl kaya
- $k_1 = 320 \text{ kN/m}^2$ orta kayrak, sert kuru kil, tebeşir ve yumuşak sıva taşı, kalkerli kil

Toplam kesme direnci (m sayıda kavramış takım için);

$$R_{1u} = \sum_{i=1}^m k_{1i} b S_{ti} \quad (N). \quad (2.14)$$

Normal kuvvet, radyal bileşendir.

$$R_2 = (0.2 - 0.6) R_1 \quad (N). \quad (2.15)$$

Spesifik kesme direnci, takımın şekline ve bıçağının durumuna bağlıdır. Direnç için daha önemli olan, genişliğe göre kesme derinliğinin artmasıdır, yani daha düşük kesme derinliği ve daha yüksek genişlik uygulanırsa direnç azalır. Bıçak açısının (β) değişmesiyle direnç biraz değişir, kesme açısının $\alpha = 45^\circ$ 'in üzerine çıkmasını yüksek direnç artışı izler. Bıçak, koni, yarım daire, dikdörtgen, vb. şeklinde olabilir. En iyi sonuçlar, $12^\circ - 15^\circ$ açı altında dışbükey ön kısma sahip kemerli dairesel bıçak sağlar (Mikulic 2012). Takım toprağa hızla girer, takım kenarlarına basınç yayılır ve rotorun önünde toprak prizması oluşur. Kullanılmış ve kör bıçaklar kazma direncini %30'a kadar artırabilir. Kazma hızlarında ($0,5 - 2,0 \text{ m/s}$) direnç değişikliği ihmal edilebilir, ancak iki kat hız, direnci önemli ölçüde artırır. Toprak tabakası kesme derinliği, tüm dirençlerin azalması söz konusu olduğunda en etken değerdir, ancak bu da çalışma verimini düşürür. Sert ve kayalık topraklar için, ilk yükü alan ve toprağı dağıtan ek dişler kullanılarak bıçak

güçlendirilir. İlave dişler, kesme direncini %10-30 oranında azaltabilmektedir ve takımın çok hızlı aşınmasını engellemektedir. Kategori I ve II' ye ait yumuşak topraklarda, sürtünme direncini ve kazma direncini arttırdığı için ek diş etkisi önemsizdir. Toprak dişlere ve takıma yapışarak toprağın tozumasını ve dökülmesini engeller. Toprağın dağılması için ayrıca sıyırıcılar kullanılabilir.



Resim 2.8 Tiller çalışma takımı şekli, "kulaklı" kama bıçağı (MV-4) (Mikulic 2012).



Resim 2.9 Tiller ile mayın temizleme makinasının testleri (Mikulic 2012).

Dişler aşınmaya dayanıklı çelikten imal edilmelidir. Dişler veya takımlar, mayın temizleme silindirinin tutucusuna monte edilir (Resim 2.8). Uç malzemesi, sert toprak kategorisinde kesim yaparken hem darbe yüküne hem de aşınmaya dayanıklı olmalıdır. Tungsten karbür kullanımı ile aşınma ve darbe dayanımı oldukça iyileştirilmiş ve takım ömrü artmıştır.

Tiller mayın temizleme ataşmanı, kazma direncinin üstesinden gelmek için yeterli dönüş hızına sahip olmalı ve toprak kazma için yeterli gücü sağlamalıdır (Şekil 2.5). Genellikle kesici takımın şekli toprak kategorisine göre ayarlanmaktadır. Tiller üzerindeki kazma direncindeki eşit olmayan artış nedeniyle, gerekli çalışma gücü ayarlanmalı ve doğrulanmalıdır (Resim 2.9).

Makinanın çalışması için gerekli güç hesabı;

$$P_r = R_{1u} v_0 [W]. \quad (2.16)$$

v_0 ; Rotorun teğet çizgisel hızı (m/s)

Makinanın hareketini engelleyen direnç kuvvetleri toplamı;

$$R_u = R_u + R_i + R_\alpha (N). \quad (2.17)$$

$R_u = G f_k \cos \alpha$; yuvarlanma direnci (tekerlekli ve paletli araçlar için) (kN)

$R_i = m a$; Eylemsizlik (atalet) direnci ($G v / g t_s$)

$R_\alpha = G \sin \alpha$; Yokuş direnci

v ; Makina hızı (m/s)

G ; Makina ağırlığı (kN)

f_k ; Yuvarlanma direnci katsayısı

a ; Makine ivmesi (t_s ; makina hızlanma süresi) (m/s^2)

Makinanın hareketi için gerekli güç;

$$P_v = R_u v [W]. \quad (2.18)$$

Mayın temizleme makinasının toplam güç ihtiyacı;

$$P_T = P_r + P_v [W]. \quad (2.19)$$

Şanzıman, motor soğutma sistemi, hidrolik yağ soğutma sistemi, hava filtreleme, yardımcı ekipmanlardan kaynaklı kayıplar için motor gücü fazla seçilmelidir.

$$P_m = \frac{P_T}{\eta_p} [W]. \quad (2.20)$$

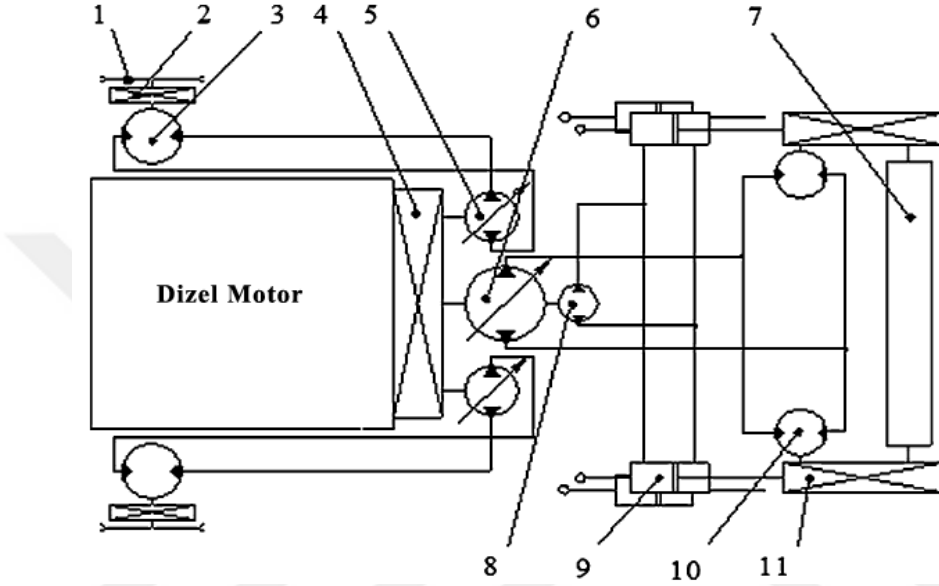
η_p ; Sistemin verim katsayısı

2.3.4 Makina Sürüş Sistemi

Zırhlı gövde, bir dişli kutusu aracılığıyla, makine çalışması ve hareketi için değişken debili hidrolik pompaları çalıştıran bir dizel motor bulunmaktadır. Tiller ataşmanlı mayın temizleme makinası, sağ ve sol paletin güç aktarımı ve kontrolü için ayrı ayrı iki adet kapalı devre hidrostatik transmisyon sistemi, ayrıca tiller rotoruna hareket sağlamak için ayrı bir hidrostatik transmisyon sistemi ve ek hareketler için ise bir adet açık çevrim hidrolik sistemi barındırır. Ayrıca hidromotor ile paletler arasına yüksek aktarım oranına (i_{pr}) sahip planet redüksiyon dişlileri monte edilmektedir. Şekil 2.7’de numaralandırılan hidrostatik transmisyon organları aşağıda sıralanmıştır.

- 1- Palet cer dişlisi,
- 2- Planet redüksiyon dişlisi,
- 3- Paletli hidrolik motor,
- 4- Dişli kutusu çoğaltıcı,
- 5- Hidrolik pompa,
- 6- Hidrolik pompa,

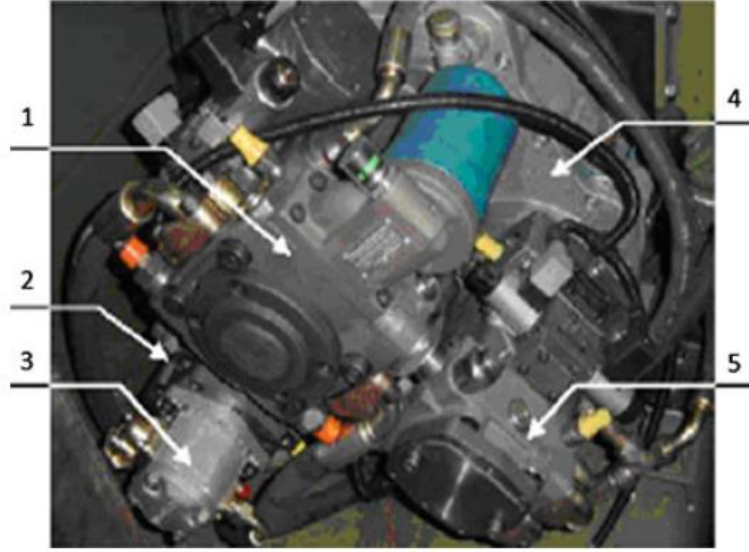
- 7- Tiller rotoru,
- 8- Teleskop döndürme kolu için hidrolik pompa,
- 9- Hidrolik silindir teleskop hareketli kol için,
- 10- Hareketli hidrolik motor,
- 11- Zincirli aktarım.



Şekil 2.7 Bir mayın temizleme makinesinin hidrolik şeması.

2.3.4.1 Motor Gücü ve Hidrolik Sistem

Toplam tiller rotoru dönme direnci momentini, takım toprağa çarpana kadar veya kinetik enerji kaybına, açısal hız değişikliğine ve rotor devrinin düşmesine kadar, tiller elemanlarının statik ve dinamik dönme momentini içerir. Gerekli makine gücü, çalışma gücü ve makine hareketi için gereken güçten oluşur: $P_T = P_r + P_v [W]$. Bu güce şanzıman, motor soğutması, hidrolik yağ soğutması, hava temizleme, ikincil cihazların tahriki vb. için gereken güç miktarı eklenmelidir. Bunun dışında, gücün %90'ından fazlası toprak kazma için ve geri kalanı makine hareketi için kullanılır. Makine çalışması ve hareketi için dişli kutusu aracılığıyla hidrolik pompaları çalıştıran yeterli bir dizel motor kullanılmaktadır. Değişken debili hidrolik pompaların yanı sıra eksenel pistonlu, paletli ya da orbital hidrolik motorlar, optimum hidrolik basınç aralıklarında kullanılmaktadır (Resim 2.10).



Resim 2.10 Hidrolik pompa sistemi; 1-Tiller için hidrolik pompa, 2- Sol palet tahriki için hidrolik pompa, 3- Ek ekipmanlar için gerekli olan açık çevrim hidrolik pompa, 4- Çoklayıcı dişli kutusu, 5- Sağ palet tahriki için hidrolik pompa (Mikulic 2012).

Bundan sonra hidrolik motor, nominal kapasite ve diğer özelliklerin seçimini takip eder. Uygun güçte hidrolik motor ve hidrolik pompa seçilmelidir. Yüksek aşınma dirençli hidrolik akışkanlar, zorlu talepleri karşılamak için dayanıklılık ve performansın korunmasının fayda sağlayabilmektedirler. Hidrolik sistem, tek bir besleme tankından elde edilen fan soğutmalı bir serpantin ile soğutulmalıdır (Resim 2.11). Haznenin hidrolik kapasitesi sistemde dolaşan akışkanın üç ila beş katı arasında seçilmelidir. Hidrolik depo, her bir hidrolik devre için bağımsız bir filtre içermelidir. Dört bağımsız hidrolik devre; tiller rotorunu, sağ ve sol paletli yürüyüş takımını ve ek hidrolik ekipmanları kontrol eder. Makineyi kurtarmak veya onarmak için tüm hidrolik tankı boşaltmadan hidrolik sistem, arıza veya sızıntı durumunda besleme tankından bağımsız olarak izole edilebilmelidir. Aktarma organı sistemi, makinenin çekilmesine izin vermek ve paletlerin serbestçe hareket etmesine izin vermek için aktarma organına hidrolik akışı engelleyebilmek için hidromotor bölmesinin içinde bulunan baypas valfleri etkinleştirilerek baypas edilebilmelidir.

Hidrolik devreler, dört hidrolik pompayı çalıştıran çoklayıcı tertibatını çalıştırmak için motor torku kullanılarak basınçlandırılır. Bu pompalar, akış yönünü kontrol etmek ve sistem boyunca çeşitli motorlara ve valflere basınç uygulamak için makinenin uzaktan

kumandalı sistemi aracılığıyla kontrol edilir. Bu kontrol pompa deplasmanının elektro-oransal bir şekilde kontrolü ile gerçekleştirilir. Makine ek hidrolik ekipman (hidrolik silindirler vs.) kontrolü, makinenin elektronik bölmesinde bulunan valf bloğu tarafından gerçekleştirilir. Valfler, normal çalışma sırasında uzak sistem aracılığıyla kontrol edilebilir.

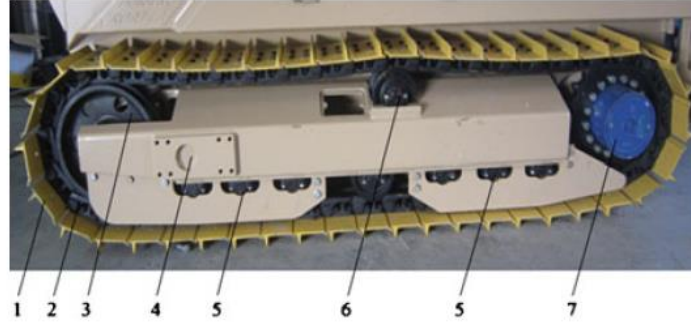


Resim 2.11 Hidrolik yağ ısı değiştiricisi ve hidrolik tank (Mikulic 2012).

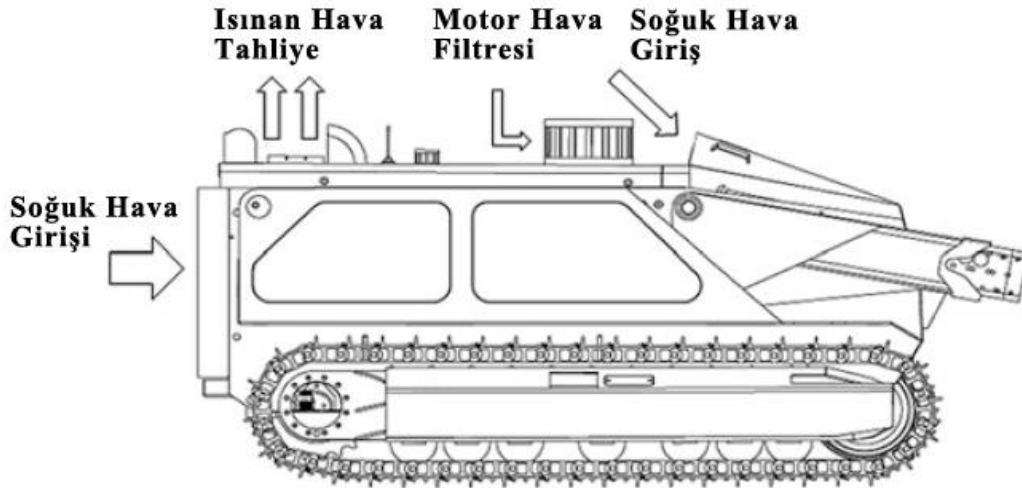
Takımın işleme derinliği ataşmanı dikey yönde hareket ettiren bir hidrolik silindir ve bu silindiri kontrol eden bir valf vasıtasıyla ayarlanabilir. Bu valf, ataşmana bağlı ivmeölçer ile birlikte kullanıldığında, arazi değişikliğinden bağımsız olarak uygun zemin penetrasyonunu sağlayabilmektedir.

İçten yanmalı motora bağlı çoklayıcı dişli kutusuna bağlı değişken debili elektro-oransal kontrollü eksenel pompalar paletlere bağlı hidromotorlar için gerekli açığı pompa içerisindeki eğik düzlemin açısının değişmesiyle istenen debi ve basınçta sağlamaktadır. Palet sisteminin kararlı çalışabilmesi ve yol spektrumundan kaynaklı darbeleri sönmüleyebilmek için yay, damper ve gergi tertibatından oluşmaktadır. Gergi sistemi, paletin serbest hareketini sağlar ve çalışma sırasında sıkışmayı önler ve palet aşınmasını ve esnemesini telafi etmek için ayarlanabilir. Hidrolik motor ve ona bağlı şanzıman, ana dişlisini döndürerek makineyi hareket ettirir, (Resim 2.12). Cer dişlisi, şanzıman torkunu aktarmak için palete bağlanır. Palet, direnci azaltmak ve palet hizalamasını korumak için

palet uzunluğuna yerleştirilmiş çok sayıda yol tekerleği ve en önde istikamet tekeri üzerinde sürmektedir. Uzaktan kumanda sistemi, hareket yönünü ve hızı belirleyen hidrolik akışkanın motorlara olan basıncını ve yönünü kontrol eder. Aracı döndürmek için, makineyi kendi konumunda veya bir yol boyunca dönmeye zorlamak için bir palet diğerine göre kilitlenir veya ters yönde döndürülür.



Resim 2.12 Paletli yürüyüş takımı; 1- Metal Palet Tırnağı, 2- Palet Zinciri, 3- İstikamet Teker, 4- Gerdirme Tertibatı, 5- Yol Teker, 6- Destek Teker, 7- Yürüyüş hidrolik Motoru ve Cer dişlisi (Mikulic 2012).



Şekil 2.8 Mayın temizleme aracı motor ve soğutma sistemi hava akış şeması.

Hidrostatik şanzıman için hidrolik yağ, yağ soğutucusu fan ve serpantin ikilisi ile soğutulur. Hesaplama için, giriş-çıkış yağ sıcaklığının yanı sıra hava sıcaklığı, soğutucudaki yağ akışı, soğutucudaki hava akışı ve soğutucu tarafından dağıtılması gereken ısı miktarı da önemlidir. Hidrolik pompa drenaj hatlarından ve hidrolik

motorların sızıntı hatlarından gelen yağ da soğutulur. Makina çalışması için yüksek gereksinimler nedeniyle, enerji dengesi termodinamik denklemlere göre hesaplanır ve sistem bileşeni çıkışlarındaki ortalama yağ sıcaklığına göre soğutucu çıkışındaki optimum sıcaklık göre belirlenir.

Hidrostatik sistemdeki yağın soğutulması için hava girişi makinenin ön tarafında bulunur. Burada hidrolik yağ, elektrikli ya da hidromotorlu vantilatörlü yağ soğutucusu vasıtasıyla soğutulur. Motor soğutması için hava girişi makinenin arka kısmında bulunur (Şekil 2.8). Dizel motor tarafından tahrik edilen ayırık bir radyal vantilatör yer almaktadır. Vantilatörün bir tarafı motor sıvısını bir su soğutucusundan soğutur, ardından tozlu sıcak havayı dikey olarak dışarı atar.



Resim 2.13 Yüksek toz konsantrasyonlu ortamda çalışan bir mayın temizleme aracı (Mikulic 2012).



Resim 2.14 İki aşamalı motor hava filtresi.

Radyal vantilatörün diğer tarafı, havayı makinenin ön kısmından aldığı ve aynı şekilde makinenin arka kısmındaki makinenin içinden sıcak hava ve tozu dışarı attığı uzunlamasına hava akışı sağlar. Bu makinalar Resim 2.13'te görüleceği üzere genellikle yoğun toz ortamında çalışmaktadır. Makinenin ön tarafında emilen hava akışı ve makinenin arka tarafında dışarı atılan hava akışı ile hava filtresi alanı yüksek toz konsantrasyonundan korunur. Bu nedenle, genel hava akışı, motor ve şanzıman soğutma ve makinenin üst tarafında bulunan siklon hava ön filtresine doğru temiz hava girişi işlevindedir (Resim 2.14).

Toz konsantrasyonu, kaba yaklaşım; İnşaat makineleri: 35 mg/m^3 , (yerden 1–1,5 m) mayın temizleme makinaları makineleri: $35\text{--}100 \text{ mg/m}^3$ (yerden 1–1,5 m yukarıda)

Hava filtresi gereksinimleri:

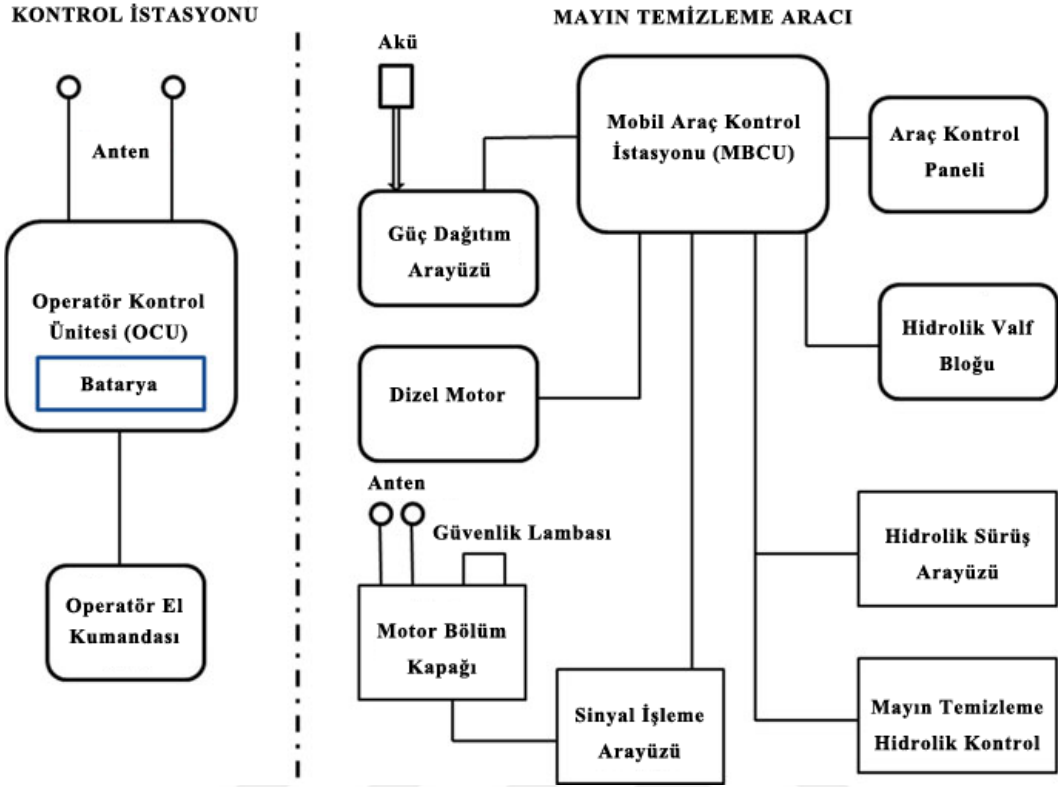
- Hava filtresi, aşırı toz konsantrasyonu koşullarına ve -40 C° ila $+80 \text{ C}^\circ$ sıcaklık aralığına göre modüler tipte seçilmelidir.
- Hava filtresinin motora mümkün olduğunca yakın yerleştirilmesi gerekir.
- Hava filtresi, daha temiz filtrenin kolayca değiştirilmesi için yeterli alana sahip olmalıdır.
- Servis göstergeleri görünür olmalıdır.

Mayın şüpheli alanlarda çalışacak bir makine için, bir kontrol kutusu (Motor kontrol ünitesi, kontrolcü, alıcı anten, kumanda malzemeleri) ve kontrol konsolundan oluşan bir uzaktan kumanda sistemi (Resim 2.15) gereklidir. Makinenin üzerinde kontrol kutusunun içinde, içten yanmalı motoru, oransal pompaları ve oransal valfleri ve yön kontrol valflerini kontrol edebilecek bir mikroişlemci ve şalt malzemeleri bulunmaktadır. Ayrıca makine üzerinde arızaların tespiti ve bazı önemli parametrelerin takibini sağlayan hatta kontrol sistemi geri bildirimi sağlayan sensörler bulunmaktadır. Operatör tarafından uzaktan kontrol konsolunu kullanarak, makineyi güvenli bir mesafeden veya ona eşlik eden bir zırhlı araçtan doğrudan uzaktan kontrol edilebilmektedir.



Resim 2.15 Makina kontrolü için kumanda konsolu örneği.

Operatör uzaktan kumanda kiti, operatör kontrol ünitesi (OCU) ve operatör el ünitesinden (OHU) oluşur, (Resim 2.15). OCU, makinenin mevcut durumunu ve gerçekleştirilen işlevleri gösteren bir dijital ekrana sahiptir. Makineye zarar gelmesini önlemek için gerçekleştirilen tüm işlevleri durdurabilen mikro işlemciler içerir ve entegre devreler makinenin çalışmasını kontrol eder. Kutunun içinde değişken güç çıkışlı bir verici, geri bildirim bilgisi için alıcı ve bir pil bulunur. Kendi kendini test eden bir sistem, OCU makine operatörünü olası arızalar konusunda uyarır.



Şekil 2.9 Elektronik sistem ana şeması.

Makinenin uzaktan kontrolü OHU kullanılarak gerçekleştirilir. Ergonomik tasarım ve hafif, kullanım kolaylığı sağlar. Düğmelerin ve yönetme kollarının (joystick) durumunu okumak için, üniteye yerleşik bir işlemci bulunmaktadır. Aynı işlemci, OCU ile OHU arasındaki iletişimi izler. Aralarındaki iletişim seri ve çift yönlüdür. OCU, OHU'dan gelen verileri saniyede yaklaşık 10 000 kez okur ve bu da, verilerin doğruluğunu etkileyebilecek herhangi bir dış müdahale veya EMI (Elektromanyetik girişim) durumunda hızlı bir yanıt ve yanlış bilgi olasılığının azaltılmasını sağlar. Uzaktan kumanda edilen bir mayın temizleme aracının genel kontrol şeması Şekil 2.9'da verilmiştir.

2.4 Patlama Teorisi

Bu bölümde patlayıcı infilakı, patlama dalgaları mevcut literatür bilgileri ile birlikte verilecektir. Bu bölümün ana odak noktası, patlama dalgasını tahmin etmek için mevcut yöntemler ile özellikle de yarı-ampirik yöntemler kullanılarak sonlu ya da sonsuz yüzeylerdeki patlama yansımalarının değerlendirilmesidir. Farklı yükleme

varsayımlarının yapısal tepki üzerindeki etkisi gözden geçirilecektir, ancak sonlu elemanların ayrıntılı teorisi ve uygulaması ve tek serbestlik derecesi analizleri sonraki bölümlerde sağlanacaktır. Bu bölüm, bu tezin ele almayı amaçlayacağı mevcut bilgi birikimlerindeki boşlukları vurgulamaktadır.

2.4.1 Patlama Yüğü

2.4.1.1 Serbest Hava Ortamındaki Patlama Dalgaları

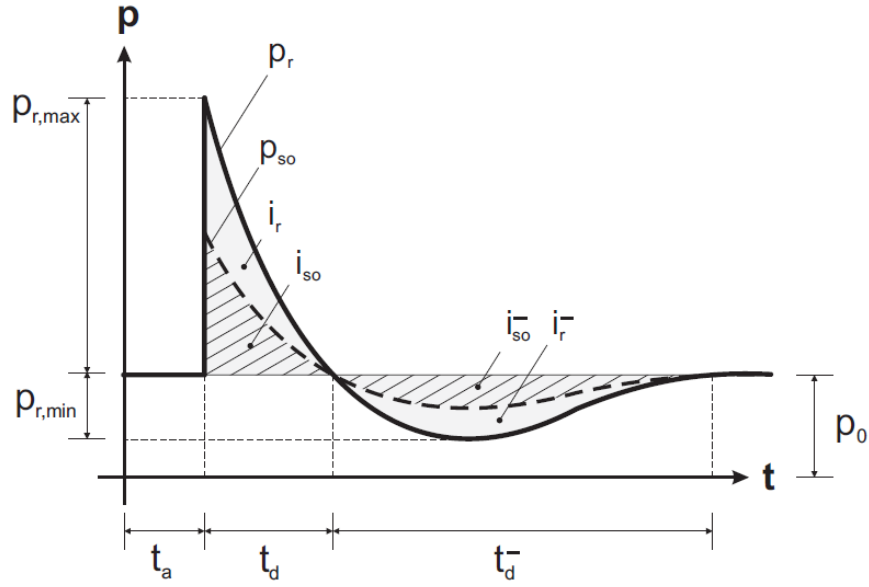
Bir patlayıcı madde kütlesi patladığında, son derece yoğun, yüksek basınçlı bir gaza dönüşür. Bu reaksiyona giren ortam, süpersonik hızda (bozulmamış doğal hava ortamındaki ses hızından daha hızlı), hızla genişler ve çevredeki havayı patlama kaynağından uzaklaştırır. Havanın sıkıştırılabilir bir akışkan olarak doğası, basınç bozukluğunun bir şok cephesi oluşturmaya, basınç ve yoğunlukta neredeyse sürekli olmayan bir artışa, patlamanın merkezinden dışarıya doğru gitmesine neden olur (Baker 1974).

Patlayıcıdan sabit bir mesafede, patlama dalgası; ortam hava basıncı (p_0) 'den tepe aşırı basınç ($p_{so,max}$) noktasına ani bir artış ve ardından süresi pozitif faz süresi olarak bilinen (td) süresinde ortam basıncına geri dönüş ile karakterize edilir. Alt indis "so", gelen basınç değerlerini, yani bir basınç transdüseri tarafından şok cephesinin arkasından ya da yansıtıcı bir yüzeye paralel veya "yandan" yayılan bir şok dalgasıyla ölçülen basıncı belirtir. "Aşırı basınç" terimi, patlama dalgasının neden olduğu normal atmosferik koşulların üzerindeki basınç artışını ifade eder.

Pozitif fazın ardından, tepe genliği $p_{so,min}$ ve süresi $t\bar{d}$ olan ve negatif faz olarak bilinen şok cephesini takiben havanın aşırı genişlemesinin neden olduğu bir negatif (atmosferik basıncın altında) basınç dönemi gelir. Negatif fazdan sonra, ortam basıncına geri döner. İdeal bir patlama dalgası Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Darbe; i , basıncın zamana göre integrali, yani basınç-zaman eğrisinin altındaki alan olarak tanımlanır.

2.4.1.2 Patlama Dalgası Yansıması

Bir patlama dalgası rijit bir hedefe çarptığında, ara yüzdeki kütle, momentum ve enerjinin korunumu; patlama dalgasının basıncının, yoğunluğunun ve sıcaklığının başlangıç değerlerinin üzerine çıkmasına neden olur. Rijit yüzeydeki aşırı basınç, değerleri " r " alt indisi olarak verilen yansıyan basınç olarak adlandırılır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 İdeal basınç dalgası için basınç-zaman grafiği (Rigby 2014).

Rankine-Hugoniot koşulları, hareket eden bir şok cephesinin her iki tarafındaki basınçlı havanın durumları arasındaki ilişkiyi tanımlar (Anderson 2001). Şok cephesi boyunca kütle ve enerjinin dengelenmesi, şok cephesinin hemen arkasındaki yoğunluk (ρ_s) ve parçacık hızının (u_s) şu şekilde verilmesini sağlar;

$$\rho_s = \rho_0 \frac{(\gamma+1)p_{s0} + 2\gamma p_0}{(\gamma-1)p_{s0} + 2\gamma p_0} \quad (2.21)$$

$$u_s = p_{s0} a_0 \sqrt{\frac{2}{\gamma \rho_0 [(\gamma+1)] p_{s0} + 2\gamma p_0}} \quad (2.22)$$

Burada ρ_0 , γ ve a_0 , çevredeki bozulmamış havanın yoğunluğu, basıncı ve ses hızıdır. Ayrıca γ özgül ısı oranıdır (hava için 1,4).

Normal yansıma için, yansıyan basınç p_r , gelen basınç, p_{s0} ve dinamik basınç, q_s cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$p_r = 2p_{s0} + (\gamma + 1)q_s \quad (2.23)$$

Burada birinci terim, akustik rejimdeki gelen basıncın yansıması ile ilgilidir ve ikinci terim, sıkıştırılmış sıvının yansıma yüzeyinde dinginliğe getirilmesi ile ilişkili basınç artışını temsil eder.

$$q_s = \frac{1}{2} \rho_s u_s^2 \quad (2.24)$$

Denklem 2.21, 2.22 ve 2.24'ün Denklem 2.23 de yerlerine konulmasıyla;

$$p_r = 2p_{s0} \frac{7p_0 + 4p_{s0}}{7p_0 + p_{s0}} \quad (2.25)$$

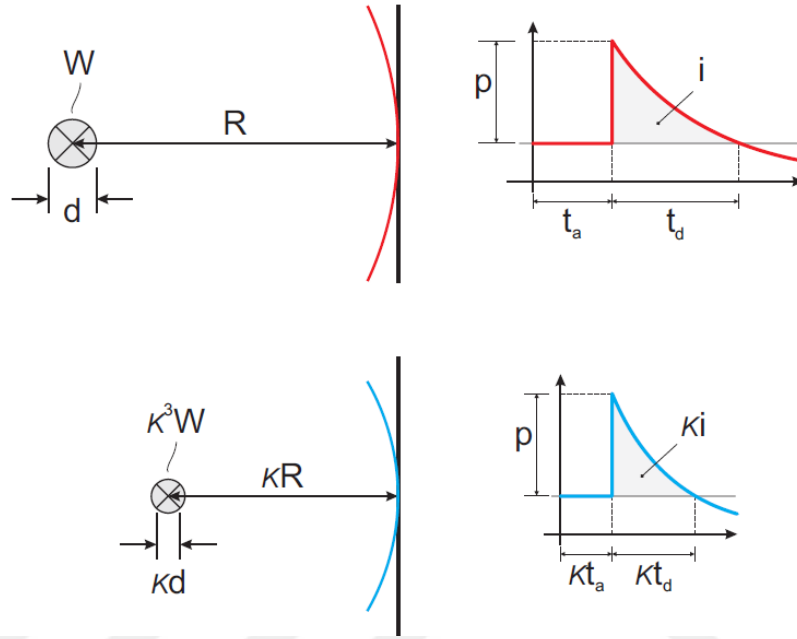
Yansıma katsayısı C_r , yansıyan basıncın gelen basınca oranı olarak tanımlanır, $C_r = p_r / p_{s0}$. Zayıf şoklar durumunda (aşırı basıncın atmosferik basınca göre küçük olduğu, yani $p_0 \gg p_{s0}$) Yansıyan basınca Denklem 2.23'deki akustik terim hâkimdir ve $C_r \approx 2,0$ 'tir. Güçlü şoklar için ($p_{s0} \gg p_0$), yansımaya dinamik terim hâkimdir ancak Denklem 2.25'deki $C_r = 8,0$ 'ın üst sınırı, havanın aşırı yüksek basınç ve sıcaklıklarda hala ideal bir gaz olarak davrandığı varsayımına dayanmaktadır. Hava moleküllerinin ayrışması ve iyonlaşması gibi gerçek gaz etkileri hesaba katılırsa yansıma katsayısı 20'ye kadar çıkabilir (US Army Materiel Command 1974).

2.4.1.3 Ölçeklendirme Kuralları

Hopkinson (1915) ve Cranz (1926) tarafından bağımsız olarak önerilen Hopkinson-Cranz (veya küp-kök) ölçeklendirmesi, benzer geometriye ancak farklı boyutlardaki iki patlayıcı yükten aynı ölçekli mesafelerde üretilen patlama dalgaları arasında benzerliğin var olduğunu belirtir (Şekil 2.11). Yani, bir W patlayıcı kütlesinden R mesafesindeki patlama basıncı profili, bir K^3W kütlesinden KR mesafesindeki patlama basıncına benzer

olacaktır. Bu, ölçeklendirilmiş mesafenin $m / kg^{1/3}$ birimlerinde verildiği Z ölçeklendirilmiş mesafe kavramını ortaya koymaktadır.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2.26)$$



Şekil 2.11 Hopkinson-Cranz patlama dalgası ölçeklendirmesi (Baker 1973).

Hopkinson-Cranz ölçeklendirmesinde, tüm basınçlar ölçeklenmiş ve gerçek değerler arasında aynıdır ve tüm zamanlar uzunluk ölçek faktörü K veya yük kütlesinin küp kökü ile aynı değerle ölçeklenir (Kinney ve Graham 1985). Dolayısıyla Denklem 2.27 şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} p_{gerçek} &= p_{ölçeklenmiş} \\ t_{gerçek} &= t_{ölçeklenmiş} \cdot W^{1/3} \\ i_{gerçek} &= i_{ölçeklenmiş} W^{1/3} \end{aligned} \quad (2.27)$$

2.4.1.4 Pozitif Faz Parametreleri

Patlama yükü altındaki bir hedefin davranışını tahmin edebilmek için, patlama dalgasının oluşturacağı fiziksel değişimleri tahmin etmek gereklidir. Patlama dalgası

parametrelerinin analitik tahminleri ile ilgili çalışmalar Taylor (1950), Brode (1955) ve Granström (1956) tarafından yapılan çalışmalardır ve bazı varsayımlara dayanmaktadır. Örneğin noktasal bir ani enerji hesaplamalarında atmosfer basıncı ihmal edilebilir düzeydedir.

Kingery ve Bulmash'ın (1984) yarı ampirik bir tahmin yöntemi (burada KB olarak kısaltılmıştır), serbest hava ortamındaki patlama yükünü belirlemek için hızlı ve basit bir yol sunduğu için genellikle tercih edilmektedir.

Bu yöntem, kısmen bilgisayar analizlerine ve kısmen de bir dizi orta ila büyük ölçekli deneysel patlama verilerinden elde edilen ölçümlere dayanan eğrileri kullanır ve basınç, impuls (itme), varış zamanı ve süresinin ölçeklenmiş mesafenin 0,067 ile 39,67 $m / kg^{1/3}$ aralığındaki değerleri için belirlenmesini sağlar. Yakın patlama parametreleri, patlama kaynağına yakın aşırı yüksek basınçların ölçülmesiyle ilgili zorluklardan dolayı analitik hesaplama sonuçlarından türetilmiştir. Patlayıcı iki ana tipte karakterize edilir; ya küresel bir serbest hava patlaması ya da yarım küre bir yüzey patlaması (Düz, rijit bir yansıtma yüzeyi üzerinde küre patlayıcı). Patlama parametreleri tipik olarak burada Şekil 2.21'de tekrarlanan bir dizi eğri olarak sunulmuştur. Bu patlama parametreleri, ABD Savunma Bakanlığı (2008) Tasarım Kılavuzu UFC-3-340-02, Kaza Sonucu Patlamaların Etkilerine Direnecek Yapılar ve ConWep (Hyde 1991) bilgisayar kodu gibi tasarım kılavuzunun temelini oluşturur.

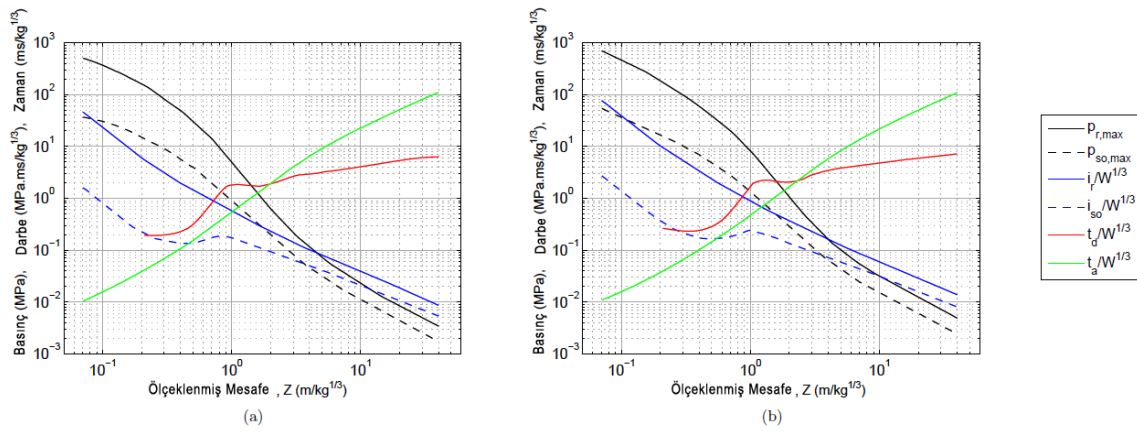
Literatürde bu yöntemin doğrulanması ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve KB yönteminin pozitif faz parametrelerini deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Patlamanın pozitif fazı, üçgen darbe olarak basitleştirilebilir,

$$p_r(t) = p_{r,maks} \left(1 - \frac{t}{t_{d,lin}} \right) \quad (2.28)$$

Denklem 2.28'da doğrusal pozitif faz süresi $t_{d,lin}$,süreyi $t_{d,lin} = t_d$ veya impulsı $t_{d,lin} = 2i_r/p_{r,maks}$ sağlamak için seçilebilir. Pozitif fazı bununla birlikte daha yaygın olarak, 'modifiye edilmiş Friedlander denklemi' (Friedlander 1946) şeklindeki bir üstel azalma ile tarif edilebilir.

$$p_r(t) = p_{r,maks} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-b \frac{t}{t_d}} \quad (2.29)$$

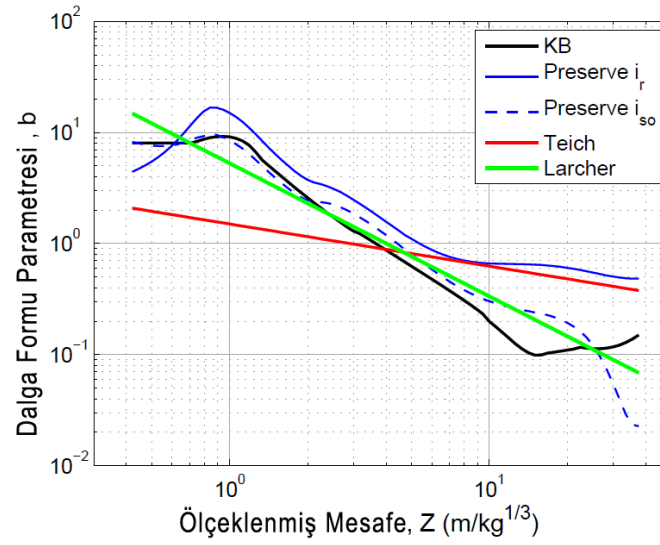
Dalga formu parametresi olarak bilinen b , basınç-zaman eğrisinin azalma eğilimin kontrol eder. KB yöntemi bu parametre için bir ilişki sunar. Şekil 2.12 küresel ve yarı küresel patlama yüklerinin oluşturduğu fiziksel değerleri KB yöntemi ile tahmin etmeye yaramaktadır. Darbe yani impuls aslında pozitif faz süresi boyunca etkiyen yansıyan basınç-zaman grafiğinin altında kalan alan ile hesaplanabilir.



Şekil 2.12 UFC-3-340-02'den sonra gelen ve yansıyan pozitif faz patlama dalgası parametreleri (ABD Savunma Bakanlığı 2008). (a) serbest havada TNT'nin küresel yükleri, (b) yüzeydeki yarım küre TNT yükleri (Rigby 2014).

$$i_r = \int_0^{t_d} p_{r,maks} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-bt/t_d} dt = \frac{p_{r,maks} t_d}{b^2} (b - 1 + e^{-b}) \quad (2.31)$$

Denklem 2.31, gelen ve yansıyan basınçlar için b 'yi bulmak için ayrı ayrı çözülebilir. Şekil 2.13, KB ilişkisi tarafından verilen dalga formu parametresi, b 'yi ve Larcher (2007) ($b = 5,278 \cdot Z^{-1,1975}$) ve Teich ve Gebbeken (2010) ($b = 1,5 \cdot Z^{-0,38}$) tarafından verilen üstel ifadeleri göstermektedir. “ b ”nin KB değerleri bir "ilk tahmin" olarak uygun olabilirken, dalga formu parametresinin patlama aşırı basıncını tanımlarken Denklem 2.31'in iterasyonla yeniden belirlenmesi önerilir (Hyde 1991).



Şekil 2.13 Dalga formu parametrelerinin karşılaştırılması, b (Rigby 2014).

2.4.1.5 Numerik Yöntemlerin Doğrulanması ile İlgili Çalışmalar

Terör saldırıları, ülkelerin savunma ihtiyaçları veya patlama kaynaklı kazalar gibi durumlarda yapılara, insanlara veya araçlara gelebilecek zararı en aza indirmek için hava patlama yükleri tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Kısaca; patlama, genellikle ani sıcaklık artışı ve gaz salınımı ile meydana gelen, hızlı hacim genişlemesine ve çok yüksek bir ses eşliğinde aşırı yüksek enerjinin açığa çıkmasına neden olan bir olaydır. Patlayıcının merkezinden çıkan hava basınç artışı oluşturur. Bu basınç değişikliği, şok dalgası adı verilen bir basınç dağılımına neden olur. Patlatma yüklerinin yapılar üzerindeki etkilerinin araştırılması ve modellenmesi için patlayıcının cinsine, miktarına ve patlayıcının bulunduğu ortama göre şok dalga parametrelerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Patlama yükünün deneysel tahmini maliyetlidir ve uzun süreçler gerektirir. Sayısal hesaplama yöntemleri, patlatma yüklerinin ve patlatma yüklerine maruz kalan yapıların modellenmesinde umut vadeden ve sıklıkla kullanılan bir hesaplama yöntemidir.

Serbest hava ortamında patlama yüklemesinin sayısal olarak hesaplanması ve çeşitli metodolojilerin karşılaştırılması konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Zakrisson vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada iki farklı senaryo üzerinde sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu senaryolardan ilki, silindirik bir NSP 71 patlayıcının çelik kap

içerisinde patlatıldığı araştırma, diğeri ise silindirik bir NSP 71 patlayıcının serbest havada patlatıldığı çalışmadır. Zakrisson vd. (2011) CONWEP olarak da bilinen ampirik patlama yükleme yöntemi ve ALE Multimaterial grubu ile test sistemlerini modellemişlerdir. İki boyutlu modelleme dışında kartezyen mesh ile haritalama yöntemi kullanılarak üç boyutlu olarak da çözülmüştür. Simülasyon ve deney sonuçları, hedef plaka üzerindeki darbe ve sapma açısından karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre levha yer değiştirmesi %9,4-11,1 sapma ile tahmin edilmiş ve ALE yöntemi kullanılarak hesaplanan çözümde toplam darbedeki sapma sadece %1,0-1,6 olarak hesaplanmıştır (Zakrisson vd. 2011). Tabatabaei ve Volz (2012) tarafından yürütülen başka bir araştırma, hedef beton panelden 168 cm mesafeye 36 kg TNT patlayıcının yerleştirildiği LBE, MM-ALE, birleştirilmiş MM-ALE ile LBE yöntemlerini karşılaştırılmıştır (Tabatabaei ve Volz 2012). Tüm sayısal modellerde kartezyen ağ uygulanmış ve bu çalışmada ağ duyarlılığı analizi yapılmamıştır. Yansıtılan basıncı ve serbest hava basıncını ölçen iki sensörün sonuçları tepe basınç değerleri ve çözüm süreleri açısından karşılaştırma yapılmıştır. Serbest hava basıncının hesaplandığı sensördeki hibrit yöntem sonuçlarının, test sonuçlarıyla büyük ölçüde örtüştüğü, yansıyan basınç hesabı sonuçlarının ise tüm yöntemlerde test sonuçlarının altında kaldığı görülmüştür. Fichera ve Scapin (2013) farklı derinliklerde kumda mayınların neden olduğu patlamaların sayısal modellemesi üzerinde çalışmışlardır (Fichera ve Scapin 2013). ALE yöntemi ile simüle edilen çelik boru ve kum ortamında 100 gr C4 patlayıcının patlaması sonucu havada farklı irtifalarda oluşan basınç tepe değerleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Diğer test sistemi ise 250 gr pentolit patlayıcının kum zemin altında patlaması sonucu hava ortamında hedef plakaya yaptığı basınçların karşılaştırılmasıdır.

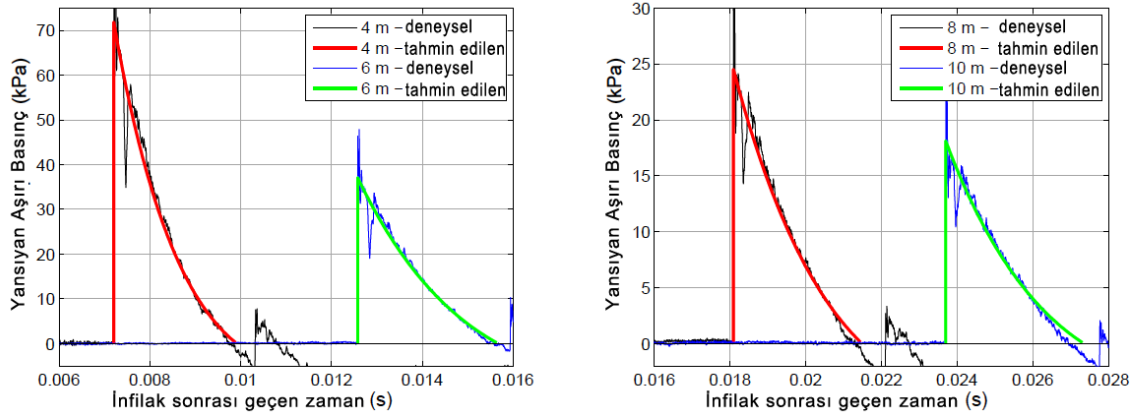
Trajkovski vd. (2014) MM-ALE (Multimaterial) yöntemini kullanarak ağ boyutu ve sapma parametrelerinin olay ve yansıyan basınç değerleri üzerindeki etkilerini araştırmak için bir dizi serbest hava patlaması sayısal simülasyonu gerçekleştirmiştir (Trajkovski vd. 2014). Ayrıca, hedefin patlayıcıdan olan mesafesinin değiştirilmesinin yansıyan basınç üzerindeki etkilerini de incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre, patlayıcı çapının dört katından daha küçük mesafelerde yansıyan basınç parametreleri olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca, patlayıcı yarıçapı boyunca en az 10 elemanın gerekli olduğu sonucuna varmışlardır. Han ve Liu (2015), diğerlerinden farklı olarak ampirik metot ile

hibrit MM-ALE yöntemini yani hibrit yöntemi kullanmışlar ve UFC 3-340-02 kılavuzundaki ölçeklenmiş mesafe değerlerine göre olay basınçlarının değişimini sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Hibrit MM-ALE yönteminin ölçekli mesafesinin 0,4'ün üzerinde olduğu durumlarda kullanışlı olduğu, büyük hava elemanlarından kaynaklanabilecek problemlerin hava yoğunluğunun belli bir orana kadar arttırılmasıyla telafi edilebileceği ve daha büyük hava elemanlarının ölçeklenen mesafenin nispeten büyük olduğu simülasyonlarda kullanılabilir olduğu sonucuna varmışlardır (Han ve Liu 2015). Flis ve Dobrociński (2015), CONWEP, hibrit MM-ALE ve SPH sayısal yöntemleriyle yer düzleminde 1 m x 1 m çelik levha üzerinde patlatılan 1 kg TNT üzerindeki yarım küre patlama dalgalarını simüle etmişlerdir ve MMALE yönteminin temas patlamalarında yaklaşık sonuçlar veren tek yöntem olduğu sonucuna varmışlardır (Flis ve Dobrociński 2015). CONWEP yönteminin, şarj yarıçapının üç katından daha yakın olan ve ölçeklenmiş mesafenin yaklaşık $1 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ olan patlamalarda doğru biçimde patlama dalgaları üretemediğini gözlemlemişlerdir. Rebelo ve Cismasiu (2017), 2B ve 3B modelleme yaparak CONWEP, MM-ALE ve hibrit MMALE sayısal yöntemlerini kullanarak 8 kg TNT ile 3 m uzaklık mesafesinden 2,17m x 2,6 m çelik levha üzerindeki serbest hava patlama yükünü modellemişlerdir (Rebelo ve Cismasiu 2017). Parçanın alt yüzeyinde iki, üst yüzeyinde iki ve patlama yönünde altı farklı mesafelerde olmak üzere on farklı noktanın basınçları test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. CONWEP yönteminin gölgeleme ve odaklama özelliklerinin olmamasından dolayı levhanın alt yüzeyindeki basınçların elde edilemediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca 2B'den 3B'ye eşleme yönteminin kullanılmasının çözüm süresini önemli ölçüde kısalttığı ve çözünürlük hassasiyetinin bozulmadığı sonucu çıkmaktadır.

Erdik ve Uçar'ın çalışması gibi farklı araştırmalar da Tabatatei ve Volz'un (2012) test tasarımına ve bulgularına atıfta bulunarak patlatma yükü hesaplama tekniklerini karşılaştırmışlardır. Gelen basınç ve yansıyan tepe basıncı açısından, 34 kg TNT'nin 1675 mm'lik mesafeden 1830x1830x165 mm çelik levha üzerinde patlamasıyla oluşan basınç dalgaları ölçülmüş ve tahmin edilmiştir. Erdik ve Uçar'ın (2018) çalışmasında CONWEP, ALE ve hibrit MM-ALE yöntemleri ile karşılaştırılmış ve hibrit tekniğin toplam çözüm süresi ve doğruluk açısından ölçüldüğünde etkili olduğu görülmüştür.

Yarı ampirik pozitif faz tahminlerinin doğruluğunu göstermek için, İngiltere Buxton'daki Sheffield Üniversitesi “Blast & Impact” Laboratuvarında bir dizi patlama denemesi yapılmıştır. 0,25 kg PE4 yarı küresel patlayıcı yükleri, yarı sonsuz, rijit bir hedeften 4 m, 6 m, 8 m ve 10 m uzakta patlatılmıştır. (500 mm kalınlığında betonarme sığınak duvarı, 4,5 m yüksekliğinde) (Rigby 2014). Yükler 50 mm kalınlığında bir çelik plaka üzerinde patlatılmış, düz bir beton zemin plakası üzerine yerleştirilmiş ve patlamanın yarım küre yüzey patlaması olarak kabul edilmesini sağlamışlardır. Hedefin tabanından 375 mm uzağa bir basınç göstergesi yerleştirilmiş ve patlama ile senkronize 100 kHz'lik bir örnek hızında 16 Bit Dijital Osiloskop kullanılarak basınçlar kaydedilmiştir. Patlama dalgası düzlemsel olarak varsayılmış geliş açısı etkileri ihmal edilmiştir.

Şekil 2.14 Rigby'nin (2014) deneysel pozitif faz basınç zaman geçmişlerini ve dalga formu parametresinin Friedlander denklemini entegre ederek bulunduğu CONWEP tahminlerini göstermektedir. Friedlander denkleminin ölçülen basınç-zaman geçmişinin formuyla oldukça iyi eşleştiği görülebilir ve pozitif faz tahminlerinin deneysel sonuçlarla niteliksel uyum içinde olduğu görülebilir. Kaydedilen veriler, şok cephesinde az miktarda sensör çınlaması göstermiş ve birincil şoktan bir süre sonra ikincil bir şok dalgasının geldiği görülebilir (Şekil 2.14'teki 4 m'lik mesafe için patlamadan 10,3 ms sonra).



Şekil 2.14 Rijit bir yüzeyden 4, 6, 8 ve 10 metre uzaklıktaki yarı sonsuz bir hedef için 0,25 kg PE4 patlayıcı için tahmin edilen ve deneysel basınç-zaman diyagramı (Rigby 2014).

Çizelge 2.6 deneysel ve tahmin edilen pozitif fazdan yansıyan basınçları ve darbeleri (impals) göstermektedir. Yukarıda bahsedilen sensör çınlaması, yansıyan tepe basıncının doğrudan ölçülmesini açıkça engellerken, etkinin tüm kayıt boyunca etkili bir şekilde

kaybolduğu gösterilmiştir (Smith vd. 1999) ve bu nedenle ölçülen iz, deneysel spesifik uyarıyı vermek için geçici olarak entegre edilebilir. Tepeden yansıyan basınçlar, geriye doğru varış zamanına ekstrapolasyon yapılarak, Friedlander denkleminin en küçük kareler yöntemiyle basınç okumalarına tepe değeri olarak verilir. Eğrinin uyması gereken aralığı tanımlamanın kesin bir yöntemi yoktur. Bu deneyde, sensör çınlamasının, tüm testler için varıştan yaklaşık 0,4 ms sonra durduğuna karar verilmiş ve eğri, bu süre ile deneysel pozitif fazın sonu arasına sığdırılmıştır (Rigby 2014).

Rigby (2014) tarafından yapılan bu deney ile tahmin edilen tepe basınçları ve darbeleri arasında % 6'dan fazla olmayan bir farkla, CONWEP tahminlerinin yüksek patlayıcı patlamasından kaynaklanan pozitif faz yükünü modellemek için doğru bir şekilde kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

Çizelge 2.6 Yansıyan darbe basıncının tahmin edilen pozitif faz basınçlarına oranlarını gösteren tablo (Rigby 2014).

Uzaklık (m.)	Tepe Yansıyan Basınç (kPa)			Tepe Yansıyan Darbe Impals (kPa.ms)		
	Deney	Tahmin Edilen	Oran	Deney	Tahmin Edilen	Oran
4	76,8	71,8	0,94	68,8	69,1	1,00
6	39,2	37,1	0,95	44,8	44,6	1,00
8	26,1	24,5	0,94	32,6	32,9	1,01
10	18,3	18,1	0,99	24,9	26,0	1,04

2.5 LS-DYNA Kullanarak Patlama Analizi

LS-DYNA gibi doğrusal olmayan sonlu eleman (FE) yazılımı, sınırlı bir ortam boyunca patlayıcı infilakını ve takip eden şok dalgası yayılmasını modellemek için kullanılabilir. Kütlenin, momentumun ve enerjinin korunumunu sağlayan diferansiyel eşitlikler zamanın her bir adımında ve belirli bir uzay ortamında sonlu elemanlar üzerinde tatbik edilir. İnterpolasyon 'şekil' fonksiyonları, tüm süreklilik yerine tek tek düğüm noktalarında çözülen yer değiştirmeler ve gerilmeler gibi değişkenlere yaklaşımlar oluşturmak için kullanılır. Nümerik analizler, çok çeşitli fiziksel parametrelerin yaklaşıma gerek kalmadan açık (explicit) şekilde modellenmesine izin verdikleri için güçlü bir araçtır.

FE yazılımının yapısal deformasyonu modellemek için kullanılabileceği iyi bilinmesine rağmen, bu bölümde sadece hava patlamasının modellenmesine odaklanılmıştır. Bu bölümün amacı, LS-DYNA'nın patlayıcı olayları simüle edebileceği doğruluğu göstermek için LS-DYNA'yı bir dizi iyi kontrollü deneylere ve yarı deneysel basınç tahminlerine karşı doğrulamaktır. Mesh iyileştirme ve yeniden haritalama gibi farklı modelleme tekniklerinin etkileri de incelenecektir.

Sonlu elemanlar problemlerini çözerken implicit (kapalı) ve explicit (açık) yöntemler kullanılabilir. Zamanın fonksiyonu olmayan olmayan tipteki örneğin yapısal analiz, modal analiz gibi problemleri çözmek için kapalı (implicit) yaklaşımı daha kullanışlı olurken; çarpışma, patlama gibi kısa zamanda yüksek deformasyonların gerçekleştiği hesaplamalarda; açık (explicit) yöntem kullanılmaktadır.

Kapalı ve açık yöntemlerin arasındaki en önemli fark problemde hız ve/veya ivmenin var olmasıdır. Aşağıda bulunan kütle (m), sönümleme (c), rijitlik (k) ve kuvvet (F) gibi terimlerin yer aldığı Denklem 2.32 incelendiğinde ' x ' yer değiştirmeyi gösterirken $\dot{x}$ ve $\ddot{x}$ sırasıyla x değerinin birinci ve ikinci türevini yani hızını ve ivmesini belirtmektedir.

$$F = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (2.32)$$

Kapalı (Implicit) sayısal çözüm yönteminde x , sabit olduğu için yer değiştirme zamanın bir fonksiyonu değildir. Hız ve ivme yer değiştirmeye bağlı türevler olduğu için denklemin birinci ve ikinci terimleri sıfır kabul edilebilir. Doğrusal olmayan kapalı modeller her çözüm adımında iterasyon ile sınır değerleri kontrol edilir. Bir sonlu elemanlar modelini kapalı yöntem ile çözerken rijitlik matrisi temel alınır ve her adımda bu matrisin tersini almak gereklidir. Eleman sayısı arttıkça bu işlem çok uzun süreler almaktadır. Açık metotta (explicit) ise buna ihtiyaç duyulmaktadır.

Açık (explicit) metodu zamana bağlı bir çözüm elde eder. Bu nedenle hız, ivme, kütle ve sönümleme de dikkate alınmaktadır. Explicit yöntemde her zaman adımında yer değiştirmeler hesaplanmaktadır.

2.5.1 Keyfi Lagrange Euler Yöntemi (ALE)

Bir sonlu eleman modeli, sayısal ağın malzemeye sabitlendiği ve temsil ettiği süreklilik ile deforme olduğu, yani malzemenin elemanlar boyunca taşınmadığı bir Lagrangian çerçevesi ile tanımlanabilir. Ağın uzayda sabitlendiği ve malzemenin ağ içinden aktığı, yani ağ distorsiyonunun olmadığı bir Euler çerçevesi içinde de tanımlanabilir. Tipik olarak, sıvı akışı sorunları Euler çerçevesi kullanılarak çözülür, ancak malzeme karıştırma ve malzeme arayüzlerini doğru bir şekilde modelleme ihtiyacı, oldukça zordur. Ayrıca, Euler analizleri için genellikle daha fazla sayıda eleman gereklidir. Lagrange formülasyonları, mesh yapısının malzemenin kendisine bağlı olması nedeniyle çok malzemeli sorunları önemli ölçüde daha doğru bir şekilde çözebilir. Bununla birlikte, büyük deformasyonlar ciddi ağ distorsiyonuna, karmaşıklığa ve kararsızlığa yol açabilmektedir.

2.5.1.1 Denklemleri ve Adveksiyon (Taşınım) Yöntemi

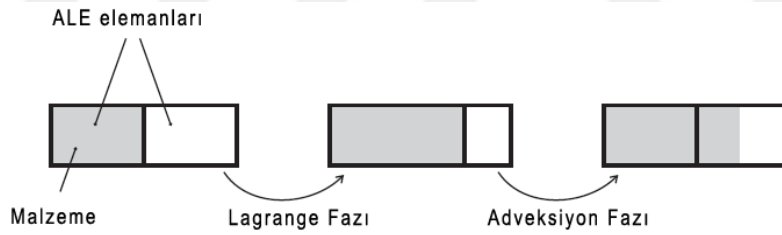
Keyfi Lagrangian Eulerian (ALE) yöntemi, malzemeye göre keyfi bir hızla hareket eden bir ağdan akan bir malzeme için geçerli denklemleri çözmek için bir formülasyondur. Hareketli bir kontrol hacminin sıkıştırılabilir akışı için kütle, momentum ve enerjinin korunumu için geçerli denklemler Souli vd. (2000) tarafından verilmiştir.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\rho \frac{\partial v}{\partial x} - w \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= \sigma_{ij} + \rho b - \rho w \frac{\partial v}{\partial x} \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} &= \sigma_{ij} v + \rho b v - \rho w \frac{\partial E}{\partial x}\end{aligned}\tag{2.33}$$

Denklem 2.33'de v , malzemenin hızı ve w , malzeme ile ağ arasındaki bağıl hızdır, ρ ve E sıvının yoğunluğu ve özgül enerjisidir ve σ_{ij} , $\sigma_{ij} = -p + \tau$ olarak tanımlanan gerilme tensörüdür. Diğer taraftan, p basınç ve τ kayma gerilmesidir. Bu matematiksel yaklaşım, Keyfi Lagrange Euler olarak bilinir çünkü ne tamamen Lagrange ne de tamamen Euler bir durum olmayan keyfi bir durumu tanımlar. Denklem 2.33'te $w = v$ yazılırsa Euler

denklemleri, malzeme ve ağ arasında bağıl hareket yoksa yani $w = 0$, Lagrangian denklemleri Denklem 2.33'den alınır. LS-DYNA'da, ALE yöntemi, operatör ayırma olarak bilinen bir süreçte iki adımda çözülür. İlk olarak, Denklem 2.33, $w = 0$ ile çözülür ve Lagrangian çevrimi gerçekleştirilir. Bundan sonra, deforme olmuş ağ orijinal (deforme olmamış) konumuna geri taşınırken, kütle, enerji ve momentum, adveksiyon aşaması olarak bilinen Euler işleminde eleman sınırları boyunca taşınır. Tüm zamana bağlı fizik Lagrangian aşamasında çözüldüğü için Eulerian adveksiyon aşaması tamamen hesaplamaya dayalıdır. Bu süreç Şekil 2.15'te şematik olarak gösterilmiştir.

ALE yöntemi, Lagrangian formülasyonları ile ilişkili aşırı ağ deformasyonları, "yeniden haritalama" işlemi nedeniyle önlemesi nedeniyle patlama olaylarını simüle etmek için oldukça kullanışlıdır. ALE yöntemi, aynı zamanda, Eulerian formülasyonlarından daha çok malzemeli formülasyonları çözme ve malzeme arayüzlerini izleme yeteneğine sahiptir (Souli vd. 2000). LS-DYNA'daki adveksiyon aşaması parametreleri CONTROL ALE kartı üzerinden ayarlanabilir.



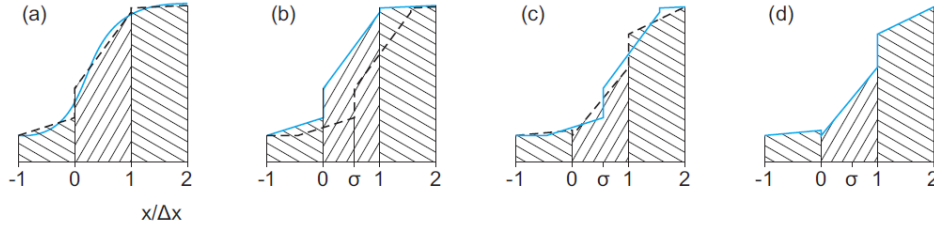
Şekil 2.15 ALE analizlerinde Lagrangian ve Adveksiyon fazları.

Van Leer MUSCL algoritması, değişkenlerin rastgele dağılımının doğrusal konveksiyonuna uygulandığında monoton yani sürekli artış ya da sürekli azalma gösteren bir fonksiyondur ve aynı zamanda korunumludur (Rigby 2014). Şekil fonksiyonu $\emptyset$ olmak üzere;

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial x} = a(x) \frac{\partial \emptyset}{\partial t} \quad (2.34)$$

Yani yeni maksimum veya minimumlar oluşturulmaz ve bu değişkenler adveksiyon sırasında korunur. Şekil 2.16'da farklı adveksiyon şemalarının şekil fonksiyonlarını nasıl etkilediği şematize edilmiştir.

$$\int_V \phi_{yeni} dV = \int_V \phi_{eski} dV \quad (2.35)$$



Şekil 2.16 Van Leer MUSCL şeması kullanılan değişkenlerin adveksiyonu (Rigby 2014).

Van Leer adveksiyon yöntemi, genellikle büyük basınç gradyanları beklendiğinde daha güvenilirdir (Hallquist 2006).

2.5.1.2 Malzeme Modelleri ve Durum Denklemleri

LS-DYNA, sayısal model içindeki parçaların tanımlanmasını gerektirir. Her parça, patlayıcı, hava, hedef vb. gibi ayrı bir bileşeni temsil eder ve gerilmeyi her bir elemanın içindeki deformasyona ve iç enerjiye bağlamak için her parçaya atanmış bir malzeme modeli olmalıdır. Patlayıcı modelleme (sıvıların modellenmesi) durumunda, basınç, p , spesifik hacim, V ve spesifik enerji E arasındaki bir ilişkiyi ifade eden her akışkan parçası için bir “Durum Denklemi” (EOS) tanımlanmalıdır. Bu tezde hava, sırasıyla MAT_NULL ve EOS_LINEAR_POLYNOMIAL malzeme modeli ve durum denklemi kullanılarak ideal bir gaz olarak modellenenecektir. Doğrusal polinom hal denklemi şu şekilde verilir;

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E. \quad (2.36)$$

Denklem 2.36’da $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ sabitler, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ ve ρ ve ρ_0 havanın mevcut ve başlangıç yoğunluklarıdır. İdeal gazlar için, $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 0$ ve $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ ve denklem ideal gaz hal denkleminde indirgenir.

$$p = (\gamma - 1)E\rho/\rho_0. \quad (2.37)$$

Denklem 2.37’de E özgül iç enerjidir ve γ , sabit sıcaklıktaki ısı kapasitesinin sabit hacimdeki ısı kapasitesine oranı olarak tanımlanan özgül ısı oranıdır. Hava için, $\gamma = 1,4$ ’tür. $E = 253,4 \text{ kPa}$ ’lık özgül bir iç enerji $101,36 \text{ kPa}$ ’lık bir atmosferik basınç verir. Patlama süreci açık bir şekilde modellenirse, patlayıcı için bir malzeme modeli ve EOS belirtilmelidir. LS-DYNA’da, tipik olarak, tanımlanacak patlayıcının yoğunluğu, ρ , patlama hızı D ve Chapman-Jouguet basıncını (PCJ) gerektiren MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN kartı kullanılır. Yüksek patlayıcılar için kullanılan EOS, patlayıcının basınç, hacim, enerji ilişkisini şu şekilde tanımlayan Jones-Wilkins-Lee (JWL) ampirik EOS_JWL formülüdür (Lee ve diğerleri, 1968);

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}. \quad (2.38)$$

Bu ifadede, basınç p , bağıl özgül hacim $V = v/v_0$ ve enerji E ile ilişkilendirir. Burada özgül hacim v_0 , patlayıcının başlangıç yoğunluğunun tersidir ve özgül hacim v , bağımsız değişkendir. Enerji terimi E , kimyasal bağ enerjisinin yanı sıra akışın momentum yönüyle ilişkili kinetik enerjiyi içerir. A , B , C ve ω basınç katsayılarıdır, R_1 ve R_2 sırasıyla ana ve ikincil özdeğerlerdir.

2.5.1.3. LS-DYNA’daki İlgili Anahtar Kelimeler ve Gelişmeler

LS-DYNA, giriş dosyasında “keywords” ile tabir edilen parametre ve çözüm yöntemlerinin belirlendiği fonksiyonlar kullanarak çeşitli algoritmalara erişir. Son yıllarda LS-DYNA’nın patlayıcı olayları simüle etme yeteneğini geliştiren bir dizi özellik eklenmiştir. Bu tezdeki sayısal çalışma ile ilgili olan anahtar kelimeler burada tanıtılmaktadır.

- ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP; modelleme için gerekli olan her bir elemanın birden fazla farklı malzeme içermesini sağlar (Luo vd. 2004, Alia ve Souli 2006)
- ALE_REFINE; fonksiyonu ALE elemanlarının özellikle şok cephesi gibi yüksek basınç ve hacim değişimlerinin olduğu bölgelerde mesh yapısının iyileştirilmesini sağlamaktadır.

- **CONTROL_ALE**; adveksiyonlar arasındaki döngü sayısı (NADV), adveksiyon yöntemi (METH), çeşitli yumuşatma kontrolleri gibi ALE analizleri için genel parametrelerin ayarlanmasına ve ALE alanının serbest yüzeylerine bir referans basıncın eklenmesinde kullanılır.
- **DATABASE_TRACER**; bir malzeme üzerindeki seçilen herhangi bir düğümün uzayda ya da malzeme üzerinde sabitlenerek düğüm üzerindeki fiziksel değişimlerin takip edilmesine olanak verir.
- **INITIAL_ALE_MAPPING**; simülasyon sırasında ağ boyutunu veya model boyutunu değiştirmesine izin
- **INITIAL_DETONATION**; yüksek patlayıcıda patlama (infilak) noktasını tanımlamak için gereklidir. Bir elemanın yanma süresi, t_L , elemanın merkezinden infilak noktasına olan mesafenin patlama hızına D , bölünmesiyle verilir.
- **INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY**; ALE multi-materyal grupları ile bir hacmi doldurmanıza izin verir.
- **LOAD_BLAST_ENHANCED**; patlayıcı kütle ve uzaklık mesafesini dikkate alarak LOS CONWEP basınç tahminini modeldeki yüzeylere uygular.

2.5.2 Conwep Ampirik Yöntemi

LS-DYNA'da uygulanan CONWEP yöntemi, Kingery ve Bulmash'tan (1984) alınan TNT verilerine ve Randers ve Pehrson (1997) ve Bannister'ın çalışmasına dayanan ampirik patlatma yükü fonksiyonuna dayanmaktadır (Randers vd. 1997), (Zakrisson vd. 2011), (Kingery ve Bulmash, 1984). LS-DYNA'da **LOAD_BLAST_ENHANCED** (LBE) hesaplama modeli ile modellenen bu patlama yükü, herhangi bir Euler alanını modellemeye gerek kalmadan Lagrange yapısında bir patlamayı simüle etmeye yarar. Serbest hava patlama ortamında küresel veya yarı küresel patlama yükleri simüle edilebilir. Yük, katı elemanlar veya kabuk elemanlar gibi bir dizi önceden tanımlanmış parçadan oluşan bir yüzeye etki eder. CONWEP yöntemi, Friedlander Denklemini (Denklemler 2.29) kullanır (Friedlander 1946).

Yüksek dereceli polinom eğri uydurma oldukça külfetli olduğundan, küresel ve TNT patlayıcılar için şok dalgası parametrelerinin ölçekli mesafeye göre tahmini, açık literatürde önceki bir çalışmalardan elde edilen bir dizi eğri ile ifade edilir. (UFC 3-340-

02, 2008). Bu eğriler ayrıca ampirik yöntemi kullanarak patlama parametrelerini hesaplayan CONWEP bilgisayar kodunun temelini oluşturur. Ayrıca ABD Savunma Bakanlığı (2008) Tasarım Kılavuzu UFC-3-340-02'deki (Hyde 1991) bu çalışmaya dayanmaktadır.

Küresel TNT patlayıcılar için, patlayıcı kütlesinin ve patlayıcının hedefe olan mesafesinin bilindiği durumlarda, (UFC 3-340-02, 2008)'deki grafikte x eksenini yani ölçeklenmiş mesafeye karşılık gelen y değerleri maksimum basınç, yansıyan basınç, darbe, ta ve td eğrilerine karşılık gelir. Ancak darbeler, ta ve td aynı zamanda patlayıcı kütlenin küp köküne de bağlıdır. Öte yandan, hedefin ön yüzeyine etki eden basınç, tepe dinamik basınca karşı tepe olay basıncının değişimine ilişkin veriler kullanılarak bulunabilir (UFC 3-340-02, 2008). Elde edilen P_{so} değeri, tepe dinamik basınca karşı tepe gelen basıncın değişiminin x eksenini ile ilişkilendirilirken, dinamik basınç q_0 , y eksenine karşılık gelen nokta olacaktır. Böylece hedef yüzeyin sürüklenme katsayısına göre etki eden toplam basınç hesaplanabilmektedir. Bu yöntemin LS-DYNA uygulamasında, patlayıcı kütle ve hedefe olan mesafesini hesaba katarak modeldeki yüzeylere LOS CONWEP basınç tahminini uygulayan LOAD BLAST ENHANCED kartıdır.

2.5.3 SPH, Enterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği Yöntemi

Enterpolasyonlu Parçacık Hidrodinamiği (SPH) yöntemi, parçacığın zaman içindeki değişimini inceleyen, diğer bir deyişle parçacığı takip eden ve çözümde Lagrangian denklemlerini kullanan bir tekniktir. Şok dalgası problemlerinde parçacık yöntemleri sadece sürekli akışkan denklemlerinin yaklaşık çözümünde değildir; zor parçacık sistem denklemlerini ortaya koyan, altyapısında moleküler dinamik sistemleri içeren süreklilik denklemlerinden daha temel bir yaklaşım olduğunu belirtmektedir. SPH yöntemi, genellikle kısmi diferansiyel denklemler biçiminde olan alan değişkenlerinin hidrodinamik problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bunun için öncelikle problem alanının ayrıklaştırılması, ardından alan fonksiyonları ve bu fonksiyonların türevleri alınarak bu kısmi diferansiyel denklemler sadece zamana bağlı adi diferansiyel denklemlere dönüştürülür. Son olarak, bu adi diferansiyel denklemler herhangi bir entegrasyon yöntemiyle çözülebilir.

Parçacıklar, ara bağlantı olmadan alan boyunca rastgele dağılır. Etki alanında geçerli olan fonksiyona yaklaşmak için bir integral tanımlama yöntemi (çekirdek yaklaşımı) kullanılır. Çekirdek yaklaşımından sonra parçacıkları kullanan başka bir yaklaşım yapılır ve buna "parçacık yaklaşımı" denir. Bu adımda, integral tanımında kullanılacak alana dağılmış parçacıkların fonksiyon ve türev değerleri, her bir parçacığın belirli bir mesafedeki komşuluklarının ortalaması alınarak hesaplanır. Parçacık yaklaşımı her zaman adımında yinelenir ve fonksiyon değerleri her adımda güncellenir. Kısmi diferansiyel denklemler biçiminde olan alan değişken fonksiyonları, parçacık yaklaşımından sonra adi diferansiyel denklemlere dönüşür. Bu aşamadan sonra adi diferansiyel denklemlerin çözümü yapılır. Buradaki en önemli avantajlardan biri "açık" entegrasyon algoritması ile çözüm yapılabilmesidir. Yani, her adımda, bir önceki adımda elde edilen değerler, alan fonksiyonlarının zaman değişimini hesaplamak için kullanılır. SPH yönteminde patlayıcı HIGH EXPLOSIVE BURN malzeme modeliyle, çelik levha JOHNSON COOK malzeme modeliyle ve patlayıcının durum denklemi JW (JONES WILKINGS LEE) kartıyla tanımlanır. AUTOMATIC NODES TO SURFACE kartı, parçacıklar ve çelik plaka yüzeyi arasındaki temasın modellenmesinde kullanılır. SPH yönteminde kullanılan parçacık sayısı, sonucun yakınsamasını doğrudan etkilerken, bazı önemli parametreler de vardır. Bunlar;

- SOFSC; Esnek kısıtlama seçeneğinin kısıtlama kuvvetleri için ölçek faktörü.
- TSSFAC; Hesaplanan zaman adımı için ölçek faktörü.
- CSLH; Parçacıkların yumuşatma uzunluğuna uygulanan sabit.

2.5.4 Hibrit Yöntem

Önceki bölümde açıklandığı gibi, Ampirik yöntem olan Conwep ile ALE olarak bilinen bu bağlantılı yaklaşımda, ALE formülasyonu ile simüle edilen hava alanına ampirik patlama yükleri uygulanır (Slavik 2009). Ampirik yöntem, hesaplama açısından verimli olmasına rağmen, patlayıcı ile hedef arasında şok dalgasının önünde herhangi bir şok dalgası yansımaya veya şok dalgası birleşmesine neden olabilecek bir engel varsa yöntem pratik değildir. Ampirik yöntemde, şok dalgası birleşmesi veya yansımından kaynaklanan patlama enerjisi odağı dikkate alınmaz. ALE formülasyonunda nispeten

büyük bir hava alanı ve nispeten ince bir ağ yapısı gereklidir. CONWEP yönteminden daha yüksek hesaplama karmaşıklığına neden olur (Rebelo ve Cismasasiu 2017).

ALE ve CONWEP yöntemlerinin birleşimi olan bu yöntemde, ALE formülasyonu ile hava alanı modellenirken, LOAD_BLAST_ENHANCED kartındaki ampirik formülasyon ile ortam katmanı olarak bilinen ALE katmanına patlamanın neden olduğu basınç değerleri uygulanır. Patlama dalgası, ALE olarak modellenen hava alanında şok dalgası boyunca yayılır. Kapsamlı hava alanlarını modellemeden her bir modelin güçlü özelliklerinin kullanılması nedeniyle, hibrit yöntem, gölgeleme ve odaklamayı simüle etmeyi sağlayabilir (Slavik 2009).

Hibrit yöntemin birincil dezavantajı, sınır etkilerini önlemek için genellikle hava ortamında patlama modeline dâhil edilmesi gereken geniş hava çözüm ağıdır. Hava şokunu uygun bir şekilde çözmek için çok ince ağ çözünürlüğü kullanma gerekliliği, hesaplama süresini oldukça artırmaktadır (Slavik 2009). Bazı özel kartlar da bu yöntemi tanımlar.

- INITIAL VOLUME FRACTION GEOMETRY; ALE çözüm ağında patlamanın ampirik değerler ile yüklenmesini sağlar.
- ALE REFERENCE SYSTEM GROUP; ağ genişlemesine maruz kalan hava alanını ve ilgili parametreleri ayarlamaya yardımcı olur.

2.6 Tiller ile Toprağın Kazılmasının LS-DYNA Kullanılarak Modellenmesi

Tiller ile mayın temizleme operasyonunda rotor üzerine bağlı takımlar sırasıyla toprağı önce kesmek sonra kaldırmak suretiyle sürekli etkileşim halindedirler. Explicit hesaplama yöntemi kullanarak takımın zamana bağlı olarak yer değiştirdiği modeller kurulabilmektedir. Toprak tiller takımı etkileşiminin incelenmesi, toprak deformasyon temellerinin ve bunu etkileyen faktörlerin anlaşılmasıyla başlamaktadır. Takım geometrisi ve toprak yapısı bu modellemenin en önemli iki parametreleridir. Toprak lineer davranış sergileyen bir malzeme değildir. Anizotropik özellik sergileyen toprak yapısı çekme ya da kesme yönündeki gerilmelere farklı tepki verirken, iç sürtünme açısı,

kohezyon, konsolidasyon gibi lineer olmayan birçok parametreyi de içinde barındırmaktadır. Bu nedenle toprak yapısının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi toprağın visko elastikliğinden dolayı oldukça karmaşıktır. Tez kapsamında yapılan açık analizde sabit açısal hızda dönen ve sabit çizgisel hızda ilerleyen rotor modellenmiştir. Rotor üzerindeki takım rijit kabul edilmiş ve toprak MAT_FHWA_SOIL kartı kullanılarak modellenmiştir.

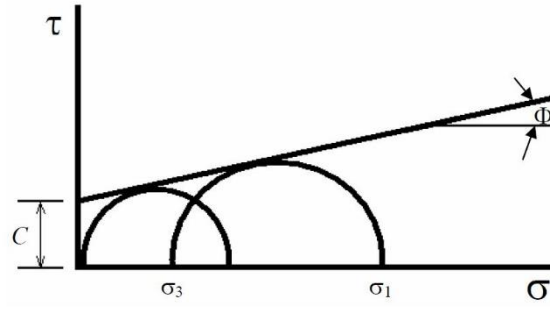
2.6.1 Toprak Malzeme Modeli

MAT_FHWA_SOIL toprak malzeme modeli Amerikan Ulaştırma Bakanlığı tarafından LS-DYNA yazılımında kullanılmak üzere tasarlanmış zemine ait birçok parametrenin kolayca ayarlanabilir olduğu bir toprak modelidir. Toprakta lineer olmayan pekleşme ve yumuşama davranışı, toprağın nem içeriği, topraktaki gözenekliliğin etkisi gibi birçok mekanizma modellenmektedir.

Toprağın kesme kuvvetleri karşısındaki dayanımı ya da tatbik edilen dış kuvvetlere karşı direnci, toprak dayanımı olarak adlandırılır. Toprağın yapısı, içerisinde bulunan boşluklar, nem içeriği ve yoğunluğuna göre dayanım değişebilmektedir. Aynı içeriğe sahip toprağın gevşek ya da sıkı olması dayanımını değiştirmektedir. Tiller ile toprak işleme esnasında toprağa daha çok kesme kuvvetleri etki etmektedir. Coulomb tarafından bulunan Denklem 2.38 de gösterilen eşitlik Mohr-Colulomb kriteri olarak adlandırılmaktadır (Savrukoğlu 2016).

$$\tau_{maks} = C + \sigma_n \tan \varphi \quad (2.38)$$

Üç eksenli gerilme testi kullanılarak toprak kohezyonu C ve iç sürtünme açısı φ bulunmalıdır (Şekil 2.17). Denklem 2.38'deki σ_n , asal normal gerilmeyi, τ_{maks} , ise kesme gerilmesini göstermektedir.



Şekil 2.17 Mohr-Coulomb teorisi grafik gösterimi.

FHWA toprak modeli, birinci dereceden Mohr-Coulomb denklemini (Denklem 2.38) kullanan, ikinci dereceden bir modeldir. FHWA modelinde boşluk suyu basıncı, Denklem 2.39'da gösterildiği gibi hacimsel sıkıştırma birim şekil değişimine göre hesaplanmaktadır.

$$u = \frac{K_{sk}}{1 + K_{sk} D_2 n_{cur}} \varepsilon_v \quad (2.39)$$

Yukarıdaki denklemde u ; boşluk suyu basıncı, K_{sk} ; toprak örüntüsü Bulk modülü, n_{cur} ; hava boşluklarından meydana gelen anlık porozite, D_2 ; skempton boşluk suyu basıncı fonksiyonu ve ε_v ise hacimsel sıkışma oranıdır.

Görüldüğü gibi basınç, hacimsel sıkıştırma birim şekil değişimine göre, ε_v monoton olarak artmaktadır. Dolayısıyla bu, doymuş zeminin birinci dereceden bir fonksiyonudur ve yüksek doygunluk oranlarında yetersiz hale gelebilir. Boşluk suyu basıncının başlangıç basınçlarının ötesinde artması, komşu zemin parçacıkları arasında ayrışma ile sonuçlanacaktır. Toprak ve su karışımında aşırı su doygunluğu neticesinde ana yük tutma bileşeni artık su olacaktır. Bu, toprağın sıvılaşmasının ve makroskobik toprak yumuşamasının bir işaretidir (Reid vd. 2004).

2.7 Mayın Temizleme Aracında Kullanılan Zırh Çeliği Modellemesi

Son yıllarda dünya çapında artan patlama ve balistik ile ilgili tehdit seviyeleriyle, bu tür tehditlere karşı koruyucu sistemlerin tasarımı sivil, havacılık, mekanik, savunma ve açık deniz mühendisleri için büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, örneğin ulaşım araçları ve

inşaat yapılarının patlamaya ve balistik dirençli performansının iyileştirilmesi için çabalar sarf edilmiştir. Bu hedefe ulaşılabilen en iyi yol, doğru malzeme seçimidir. Aslında, sayısal, deneysel ve teorik olarak değerlendirilen uniform olarak (uzak alan patlayıcıları tarafından üretilen) patlamalara veya lokal patlamalara maruz bırakılan çelik, alüminyum ve kompozit plakaların performansı hakkında önemli miktarda literatür mevcuttur. Bazı malzemelerin balistik enerji emme kapasitesi düşük süneklik, düşük mukavemet ve zayıf sertleşme nedeniyle yetersiz olabilirken, yüksek mukavemetli ARMOX çeliği gibi diğer malzemeler, yüksek mukavemet ve süneklik ve dolayısıyla yüksek enerji emilimi kapasitesi nedeniyle mükemmel balistik performansa sahip oldukları için daha umut vericidir.

2.7.1 Malzeme ve Modeli

Patlama yükü bir yapıya etki ettiğinde malzemenin yüksek birim şekil değişimi hızında önce plastik şekil değişimine sıcaklık artışına ve sonunda da kırılmasıyla sonuçlanır. Johnson-Cook malzeme modeli birim şekil değişimi oranı, pekleşme ve sıcaklıktan gelen etkileri içerdiğinden, mevcut sayısal modelleme literatüründe sıklıkla kullanılır. Patlama hesaplamalarında da oldukça kullanışlıdır. Patlama sonrası oluşan yüksek hızlardaki deformasyon problemlerinin numerik yöntemler ile çözümünde kullanılacak malzeme modeli oldukça önemlidir. Bu çalışmadaki tüm sayısal benzetim modellerinde Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde birim şekil değiştirme hızının etkisi hem kırılma modelinde hem de gerilme modelinde oldukça önemlidir. Diğer taraftan ısı yumuşama etkisi de bu modelde tanımlanmıştır. Yüksek deformasyon hızlarındaki malzeme davranışlarını gözlemleyebilmek için “Split Hopkinson” test sistemi kullanılmaktadır.

$$\sigma = [A + B\varepsilon_p^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - (T^*)^m] \quad (2.40)$$

$$\dot{\sigma}_y = [A_1 + B_1\varepsilon^n][1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)]. \quad (2.41)$$

Denklem 2.40’da A, B, n, C ve m malzeme sabitleri, $\dot{\varepsilon}_0$ referans birim şekil değişim hızı ve T^* ise homolog sıcaklıktır. Denklem içerisindeki ilk parantez pekleşmeyi, ikinci

parantez şekil değişim hızına bağlı sertleşmeyi ve son parantez de sıcaklık etkilerini belirtir. ‘m’ ısı yumuşama sabitidir.

Denklem 2.41’deki ilk parantez içerisindeki ifade, $A_1 = \sigma_0$ statik akma gerilmesinin olduğu yerde ve B_1 ve n sırasıyla pekleşme sabiti ve üs olduğu, herhangi bir şekil değişim hızı etkisi olmaksızın malzeme pekleşmesinin (yani referans birim şekil değişim hızı $\dot{\epsilon} = 1/s$) etkisini verir. İkinci kısımda kısaltılan ifade, birim şekil değiştirme oranının etkisini verir, burada C birim şekil değiştirme hızı duyarlılık parametresidir ve $\epsilon^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ boyutsuz plastik şekil değiştirme hızıdır. Bu model Bauschinger etkisini göz ardı ederken, izotropik malzemelerin pekleşme davranışına maruz kalan malzeme davranışını uygun bir şekilde tahmin eder. Böylece plakanın malzeme ve geometrik özelliklerine atfedilen parametreler $W_f, H, \rho, \sigma_0, L, B_1, E, \epsilon$ şeklindedir.

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}] * [1 + D_4 \log_e \epsilon^*] * [1 + D_5 T^*] \quad (2.42)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \quad (2.43)$$

σ^* , üç eksenli gerilme oranıdır.

Denklem 2.42’de verilen Johnson-Cook Hasar modeli ile kırılma anındaki şekil değişim oranının σ^* , üç eksenli gerilme oranına, şekil değişim hızına ve sıcaklık değişimine bağlı olduğu görülebilir. Denklem 2.42’de birinci parantezdeki terimler, hidrostatik gerilme arttıkça azalan kırılmaya kadar olan uzamayı, ikinci parantez, artan birim şekil değişimi oranının malzeme sünekliği üzerindeki etkisini ve üçüncü parantez, termal yumuşamanın etkisini ifade eder.

Şekil 3.2’de taralı alan takımın bir her turunda toprak içerisinde işlediği alandır. Mayın temizleme operasyonlarında rotor üzerine yerleştirilecek takım miktarı ve konumları, mayın temizleme iş başarısı kriteri için oldukça önemlidir. Zira, rotorun ilerleme yönündeki alanı tam taramadan geçtiği durumlarda temizlenmemiş mayın kalma olasılığı yüksektir. Bu nedenle rotor üzerindeki takım yerleşimi, rotorun çizgisel hızı v , açısıl hızı ω , ve işleme derinliği d , bu anlamda en önemli parametrelerdir. Şekil 3.2’de d , işleme derinliğini, r ataşmanın takım yüksekliği dahil yarıçapını ve $T(1)$ ise takımın toprağa giriş yaptığı ilk zamanı temsil etmektedir. $n = 1 \rightarrow \infty$, olmak üzere $T(n)$ ise takımın hareketi

esnasındaki toprağa giriş, topraktan çıkış ya da bir önceki turunda takımın geçtiği teğet noktalarının çakıştığı kritik zaman adımlarını belirtmektedir.

3.1.1 Tekil Tiller Takımı Hareket Denklemlerinin Türetilmesi

Tekil tiller takımı için hareket denklemlerinin türetilmesi için önce herhangi bir t anında takımın konumunu Kartezyen koordinat sisteminde belirleyen denklem takımına ihtiyaç vardır. Bu noktanın konumu kutupsal koordinat sisteminde şu şekilde bulunur.

$$P(x, y) = P(r, \theta) = P(r, \omega t) \quad (3.1)$$

Burada x ve y , P noktasının t anındaki koordinatlarını, r , rotorun en dış yarıçapını, θ , noktanın t anındaki apsis ile yaptığı açığı, ω ise parçanın açısal hızını temsil etmektedir. Takımın taradığı alan Şekil 3.2’de taralı alanın hesaplanmasıyla bulunacaktır. Takımın en uç noktasının Kartezyen koordinat sisteminde çizdiği helisel eğri fonksiyonu f_1 ise P noktasının t anındaki konumları aşağıdaki gibi olacaktır;

$$f_1 = \begin{cases} x = v \cdot t + r \cdot \cos(\omega t) \\ y = r \cdot \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3.2)$$

Diğer taraftan işleme derinliği d ise bu helisel grafiğin diğer bir sınır fonksiyonu ise aşağıdaki gibidir.

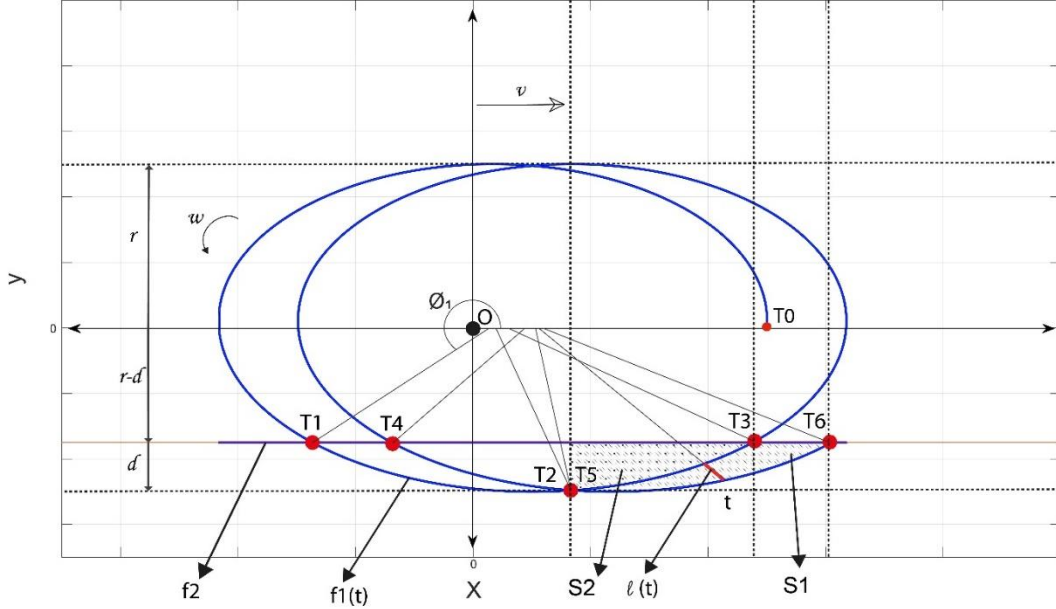
$$f_2 = y = d - r \quad (3.3)$$

3.1.2 Tiller Takımı Hareketinde Kritik Zaman Adımlarının Belirlenmesi

Tekil tiller takımının en dış noktası sabit bir ω açısal hızında hareket ettiğinde hesaplamanın sınır şartlarını oluşturan dört önemli zaman adımı takip eder (Şekil 3.3);

- $T(2)$ = Bir önceki turda toprağa temas ettiği an,
- $T(3)$ = Bir önceki turda topraktan ayrıldığı an,

- $T(5)$ =İçerisinde bulunduğu dönüşte toprağa temas ettiği an;
- $T(6)$ = İçerisinde bulunduğu dönüşte topraktan ayrıldığı an;



Şekil 3.3 Rotor üzerindeki tekil tiller takımının zaman adımları.

T_0 Anında hareketine başlayan takım $T(1)$ anında toprağa ilk temas eder, $T(2)$ zamanındaki noktadan geçerek $T(3)$ anında topraktan ayrılmaktadır. Tekrar eden turda ise $t = 2\pi$ anında x eksenini kestikten sonra $T(4)$ anında $f_2 = y = d - r$ doğrusunu kesmekte $T(5)$ anında tekrar toprağa temas etmektedir. $T(2)$ ile gösterilen zaman bir önceki turda $x(T5)$ konumundan geçtiği zamanı belirtmektedir. Dolayısıyla tekrarlı zaman dilimleri şu şekilde bulunur.

$$y = d - r = r \cdot \sin(\pi - \omega \cdot T(1)) \quad (3.4)$$

$$T(1) = \left[\pi - \sin^{-1} \left(\frac{d-r}{r} \right) \right] / \omega \quad (3.5)$$

Aynı takımın bir sonraki turunda toprağa girdiği an ωt değerinin 2π fazlası olacaktır. Dolayısıyla $\omega T(4) = 2\pi + \omega T(1)$ 'dir. $T(2)$ ve $T(5)$ zamanlarının hesaplanabilmesi içinse eğrinin iki farklı dönüşte kesiştikleri aynı x ve y değerleri üzerinden bir denklem sistemi türetilmelidir.

$$f_1(T(2)) = f_1(T(5)) \quad (3.6)$$

$$x = vT(2) + r \cdot \cos(\omega \cdot T(2)) = vT(5) + r \cdot \cos(\omega \cdot T(5)) \quad (3.7)$$

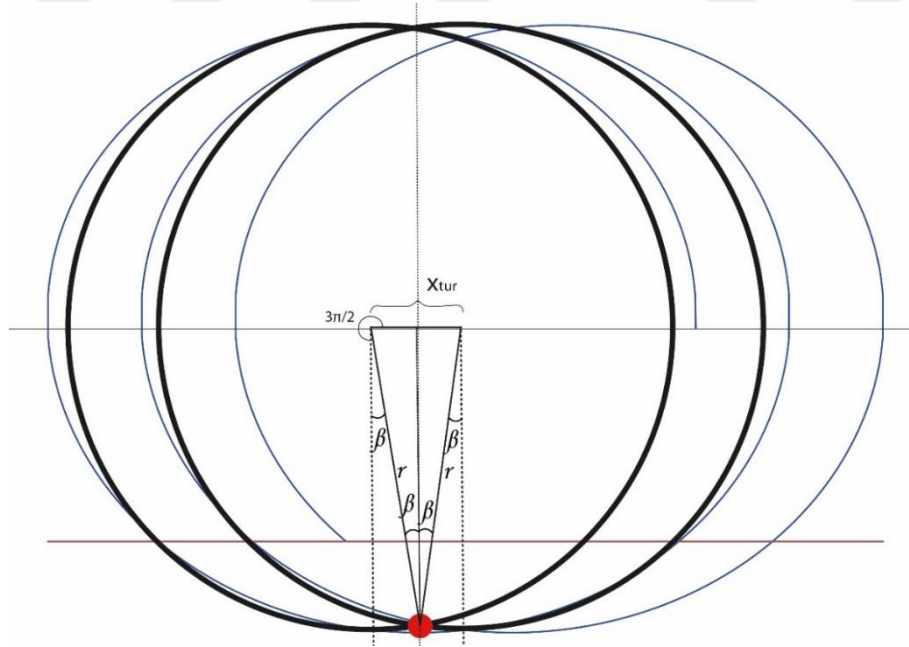
$$y = r \cdot \sin(\omega \cdot T(2)) = r \cdot \sin(\omega \cdot T(5)) \quad (3.8)$$

Aynı zamanda $T(2)$ ve $T(5)$ zamanlarındaki ortak x mesafesinin $T(4)$ ve $T(3)$ zamanlarındaki x mesafelerinin tam ortasında olduğu bilinmektedir. ω rad/sn hızla dönen rotorun 1 turunu yani 2π radyanı alacağı süre;

$$t_{tur} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.9)$$

Bir tur sonunda x ekseninde alacağı mesafe ise;

$$x_{tur} = t_{tur} \cdot v = \frac{2\pi \cdot v}{\omega} \quad (3.10)$$



Şekil 3.4 Tiller takımı hareketi kesişim noktalarının tayini.

Şekil 3.4'te tiller takımının iki turundaki kesişim noktaları sanki $v = 0$ hızında, fakat her turda x_{tur} kadar yer değiştirdiği kabulüyle şematize edilmiştir. Bu şekle göre ilk turda

$T(2)$ anında rotorun taradığı açı aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$T(2) = \left[\frac{3\pi}{2} + \sin^{-1} \left(\frac{\pi v}{\omega r} \right) \right] / \omega \quad (3.11)$$

Buradan hareketle $n \in \mathbb{Z}^+$ olmak üzere sırasıyla tiller takımının taradığı alanın kritik noktaları $T(n)$ genel denklemi şu şekilde oluşturulabilir.

$$T(n) = \left[\left| \sin \frac{n\pi}{2} \right| * \frac{n\pi - \sin^{-1} \left(\frac{d-r}{r} \right)}{\omega} \right] + \left[\left| \cos \frac{n\pi}{2} \right| * \frac{n\pi - \frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \left(\frac{-\cos \left(\frac{n\pi}{2} \right) \pi v}{\omega r} \right)}{\omega} \right] \quad (3.12)$$

3.1.3 Birim Takım Tarafından İşlenen Toprak Alanının Belirlenmesi

Birim zamanda işlenen toprak miktarını belirleyebilmek için öncelikle rotorun bir turu için tekil takımın işlediği toplam alanı bulmak gerekmektedir. Bu alan iki farklı zaman aralığındaki f_1 eğrisi ile f_2 doğrusu arasında kalan alandır. Örneğin $T(1)$ ile $T(6)$ döngüsü dikkate alındığında $T(5)$ zamanı ile $T(6)$ zamanı arasındaki alan $T(3)$ noktası gibi bir düzensizlik ihtiva ettiğinden dolayı Şekil 3.3'te gösterildiği üzere S1 alanından S2 alanı çıkartılarak bulunabilir. İki eğri arasında kalan alan fonksiyonların sınır değerleri arasında belirli integrasyon yapılarak elde edilir.

$$A = y * x \quad \text{ve} \quad dA = y * dx \text{ ise;} \quad (3.13)$$

$$\frac{dx}{dt} = v - r\omega \sin \omega t \quad (3.14)$$

$$dA = r \sin \omega t. (v - r\omega \sin \omega t) dt \quad (3.15)$$

$$S_{f1} = \int dA = \int_{T(5n)}^{T(5n+1)} r \sin \omega t. (v - r\omega \sin \omega t) dt \quad (3.16)$$

$$S_{f1} = \frac{r[r\omega((\sin 2\omega t) - 2\omega t) - 4v \cos \omega t]}{4\omega} \Big|_{T(5n)}^{T(5n+1)} \quad (3.17)$$

V sabit hızında çizgisel hıza ve sabit w açısal hızına sahip bir tiller takımının zaman boyunca izlediği helisel eğrinin $T(5n + 1)$ ve $T(5n)$ zamanları arasında y ekseninde kalan alan yukarıda türetilen formül ile bulunabilir. f_2 doğrusu ile y ekseninde kalan alan ise yine aynı yaklaşımla aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$dA = (d - r)dt \quad (3.18)$$

$$S_{f2} = \int dA = \int_{T(5n)}^{T(5n+1)} (d - r)dt \quad (3.19)$$

$$S_{f2} = (d - r)(v - r\omega \sin \omega t) \Big|_{T(5n)}^{T(5n+1)} \quad (3.20)$$

Dolayısıyla Şekil 3.3'te gösterilen $S1$ alanı ; $S1 = S_{f1} - S_{f2}$ olacaktır. $S2$ alanı ise aynı yöntem ile aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$S2 = \frac{r[r\omega((\sin 2\omega t) - 2\omega t) - 4v \cos \omega t]}{4\omega} \Big|_{T(2n)}^{T(2n+1)} - (d - r)(v - r\omega \sin \omega t) \Big|_{T(2n)}^{T(2n+1)} \quad (3.21)$$

Dolayısıyla $S = S1 - S2$ olarak bulunmaktadır. S , tiller rotoru üzerine sıralanmış takımlardan herhangi birisinin rotorun bir dönüşünde taradığı alan olarak ifade edilebilir. Rotor üzerindeki hayali bir helis üzerine sıralanmış n adet takımın birim zamanda işleyeceği toplam toprak miktarı $\sum_t l_t$ 'i öğrenebilmek için herhangi bir t zamanında toprak içerisinde bulunan takımların l_t boyunun zamana bağlı değişimini veren fonksiyonu bulmak gereklidir.

3.1.4 Toprak içerisindeki Takım Boyu denkleminin Türetilmesi

Rotor üzerine dizili takımlardan bir tanesini ele alalım. Şekil 3.3'te gösterilen l_t , kritik zamanlar olan $T(5)$ ile $T(6)$ arasında herhangi bir t anındaki takımın toprak içerisindeki kısmını ifade etmektedir. l_t 'nin zamana bağlı değişimini hesaplayabilmek için S alanının zamana bağlı türevi alınmalıdır. $S1$ alanını $T(6)$ ile t arasında, $S2$ alanını ise t ile $T(3)$ arasında integre ettiğimizde aşağıdaki denklemleri elde ederiz.

B , C ve D denklemleri kolaylaştırmak için belirlenen sabitler olmak üzere;

$$S1 = \frac{r[r\omega((\sin 2\omega t) - 2\omega t) - 4v \cos \omega t]}{4\omega} \Big|_t^{T(6)} = (d - r)(v - r\omega \sin \omega t) \Big|_t^{T(6)} \quad (3.22)$$

$$S2 = \frac{r[r\omega((\sin 2\omega t) - 2\omega t) - 4v \cos \omega t]}{4\omega} \Big|_{T(3)}^t - (d - r)(v - r\omega \sin \omega t) \Big|_{T(3)}^t \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial S1}{\partial t} = l_{1t} = T(1) \cdot \frac{[v\omega - r(\pi - \omega T(1)) \sin(t.T(1))] (r - d + r \sin(t.T(1)))}{\omega^2} \quad (3.24)$$

$$B = \sqrt{(r\omega)^2 - (\pi v)^2} \quad (3.25)$$

$$C = \sin^{-1} \left(\frac{\pi v}{\omega r} \right) \quad (3.26)$$

$$D = \frac{\sqrt{B}}{r\omega} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial S2}{\partial t} = l_{2t} = \frac{(2v\omega - 2Cr \cdot \sin(-t.T(4))(d - r + r \sin(-t.T(4)))(2\pi v + 2CDr\omega - 7\pi r\omega D)}{4\omega^3 B} \quad (3.28)$$

Takım $T(5)$ anından $T(6)$ anına doğru ilerlerken takım boyu l_{1t} denklemine göre değişecektir. Fakat bir önceki dönüşte $T(3)$ anına karşılık gelen zamana kadar $S2$ alanı kadar toprak kaldırılmıştı. Dolayısıyla $T(5)$ te hareketine başlayan takım $T(2) - T(3)$ zaman aralığındaki takım boyu artışı l_{2t} kadar eksik yol alacaktır. Bir önceki dönüşte kesilen toprak miktarının hesaplanmasında $\omega t \sim 2\pi$ kadar fark olduğu için iki ayrı l boyu Δt zaman adımında hesaplanacak ve vektörel olarak $l_{1t} - l_{2t}$ hesaplanacaktır. Adım miktarı “n1” ve “n2” olsun.

$$[l_{1t}(n1)]_{m1} = [l_{1t}(T(5)) \quad l_{1t}(T(5) + \Delta t) \quad l_{1t}(T(5) + 2\Delta t) \quad \dots \dots \quad l_{1t}(T(6))]$$

$$[l_{2t}(n2)]_{m2} = [l_{2t}(T(2)) \quad l_{2t}(T(2) + \Delta t) \quad l_{2t}(T(2) + 2\Delta t) \quad \dots \dots \quad l_{2t}(T(3))]$$

İki farklı alandaki takım boylarının Δt zaman adımlarına göre değerleri matrisi elde edilmiştir. l_{1t} ve l_{2t} 'nin aynı zaman adımındaki farkları l_t 'yi verecektir. İki matrisin farkını elde edebilmek için aynı eleman sayılarına eşit olmaları gerekmektedir. Şekil 3.3'ten de anlaşılacağı üzere $[l_{2t}]$ matrisi ve $[l_{1t}]$ matrislerinin ilk sütunlarındaki elemanlar birbirlerine eşittir. Bu nedenle l_{2t} te matrisinin sonuna $m2 - m1$ kadar sıfır eklenmelidir.

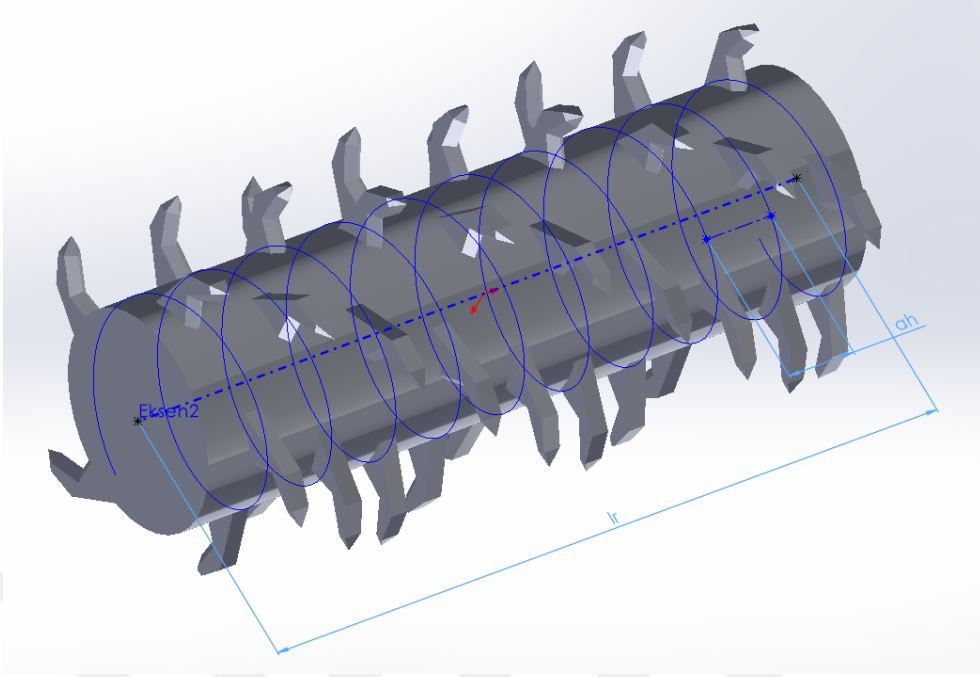
$$[l_t]_{m1} = [0 \quad (l_{1t}(T(5) + \Delta t) - (l_{2t}(T(2) + \Delta t) \quad (l_{1t}(T(5) + 2\Delta t) - l_{1t}(T(2) + 2\Delta t)) \quad \dots \quad l_{1t}(T(6))]$$

$$\Delta t < T(3) - T(2) \quad (3.31)$$

Böylece farklı zaman adımlarına karşılık gelen l_t matrisi elde edilmiştir. Tekil takım için birim zamanda toprak içerisindeki aktif takım boyunun hesaplanabilmesi için MATLAB yazılımında hazırlanan kod EK I' de verilmiştir.

3.1.5 Birim Zamanda İşlenen Toprak Alanının Belirlenmesi

Toplam lr uzunluğu , r ataşmanın toplam yarıçapı ve h takım yüksekliği olmak üzere $(r - h)$ yarıçapında bir rotor üzerine helisel dizilmiş takımların oluşturacağı toplam toprak direncinin hesaplanabilmesi için toplam takım sayısı, takımların birbirlerine göre konumları ve aynı t anında toprak ile etkileşim halinde bulunan takımları belirlemek gereklidir. Şekil 3.5'te örnek bir tiller ataşmanı ve takımların yerleşimleri gösterilmektedir. Farklı takımlar aynı anda toprak ile etkileşim halinde bulunabilir. Takım dizilimine göre tüm takımlar aynı anda toprak içerisinde bulunabilirken, sadece tek takım da toprak içerisinde bulunabilmektedir. Bu durum helis parametreleri, helis çapı ve takım sayısı ile ilişkilidir.



Şekil 3.5 Rotor üzerine helisel dizilmiş tiller takımlarının şematik gösterimi.

l_r toplam takım uzunluğu, a_h helis adımı, n_h sarım sayısı ve toplam takım sayısı n_t olmak üzere; toplam helis uzunluğu l_h , takip eden takımlar arasındaki açı α_t , takip eden takımlar arasındaki rotor eksenine paralel ve rotor yüzeyinde herhangi bir hayali eksen oluşturulmuş (Şekil 3.6).

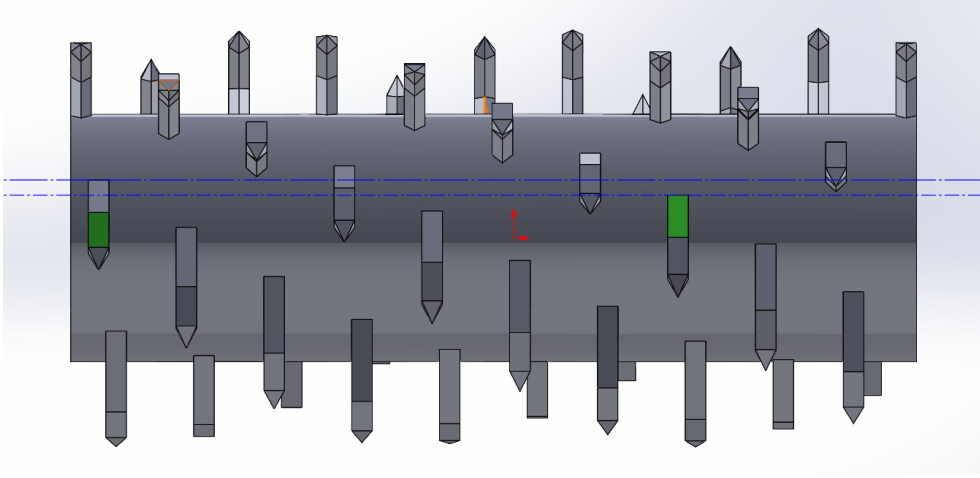
$$l_h = n_h \sqrt{a_h^2 + (2\pi r)^2} \quad (3.32)$$

$$l_t = l_r / (n_t - 1) \quad (3.33)$$

$$\alpha_t = 2\pi n_h / (n_t - 1) \quad (3.34)$$

$$T_s = \alpha_t / \omega \quad (3.35)$$

Takip eden takımlar toprağa T_s periyoduyla girseler de helis boyunca farklı takımlar aynı anda toprak içerisinde farklı konumlarda olabilmektedir. Takım üzerindeki herhangi bir takımın rotor eksenine paralel ve rotor yüzeyinde herhangi bir hayali eksen oluşturulmuş (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Birbirine açısal olarak en yakın herhangi iki tiller takımı.

n_1 , birinci takımın toprağa ilk girdiği andaki zamanı ve açığı sıfır kabul edelim. Dolayısıyla n. Takımın ilk takım ile arasındaki açı $\alpha_t(n) = \alpha_t(1) + n \cdot \alpha_t$ olacaktır. Bu açının esas ölçüsü yani $\alpha_{t-esas} = 2k\pi - \alpha_t(n)$ değerleri bulunmalıdır. Bu açıların esas değerleri arasındaki fark sıralandığında birbirine açısal olarak en yakın takımlar bulunabilmektedir. Bu açığa karşılık gelen zaman öteleme değeri birinci takım ile en yakın takım arasındaki $\Delta t_{öteleme} = (\alpha_{t1-esas})/\omega$ olacaktır. Tekil takım için bulunan $[l_t]_{m1}$ birinci takım için $[l_t]_{m1}(1)$ ise bir sonraki açısal en yakın takım;

$$[l_t]_{m1 + \frac{\Delta t_{öteleme}(1)}{\Delta t}}(2) = \left[[l_{t+\Delta t_{öteleme}(1)}]_{m1}, [0]_{\frac{\Delta t_{öteleme}(1)}{\Delta t}} \right](1) \quad (3.36)$$

Olacaktır. Yani zaman $\Delta t_{öteleme}(1)$ kadar öteleneyecektir. Aynı zamana ait l_t değerlerinin toplanmasıyla da t zamanına ait toplam $\sum l_t$ bulunacaktır. Matematiksel ifadeyle; $m1$, $[l_t]$ 'nin sütun sayısı olmak üzere; Birbirine açısal en yakın takımlar arası öteleme miktarları ve toplam öteleme miktarı aşağıda verilmiştir.

$$\sum t = m1 + \frac{\sum \Delta t_{öteleme}(n)}{\Delta t} \quad (3.37)$$

$$\Delta t_{öteleme}(0) = [0]_{1 \times 0} \quad (3.38)$$

$$\Delta t_{\text{öteleme}}(1) = [0]_{1x \frac{\Delta t_{\text{öteleme}}(1)}{\Delta t}} \quad (3.39)$$

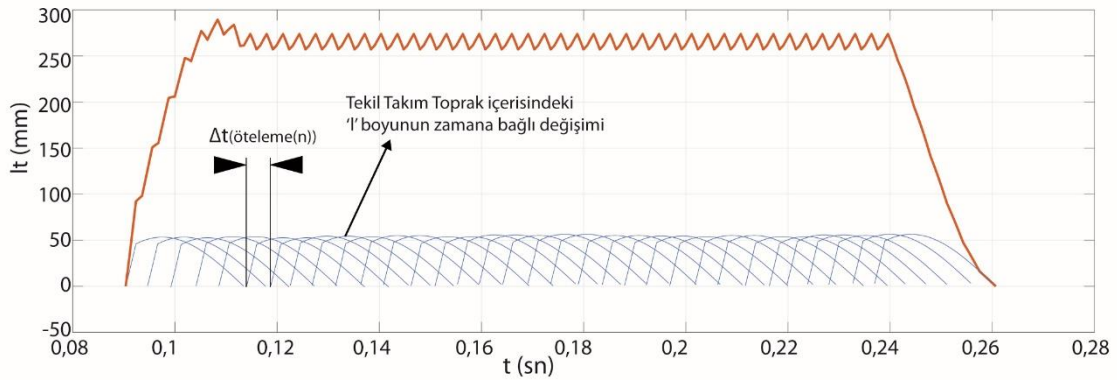
$$\Delta t_{\text{öteleme}}(2) = [0]_{1x \frac{\Delta t_{\text{öteleme}}(1) + \Delta t_{\text{öteleme}}(2)}{\Delta t}} \quad (3.40)$$

$$\Delta t_{\text{öteleme}}(n_t - 2) = [0]_{1x \frac{\Delta t_{\text{öteleme}}(1) + \dots + \Delta t_{\text{öteleme}}(n_t - 2)}{\Delta t}} \quad (3.41)$$

$$\Delta t_{\text{öteleme}}(n_t - 1) = [0]_{1x \frac{\sum \Delta t_{\text{öteleme}}(n)}{\Delta t}} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} [l_t]_{\Sigma t}(1) &= [l_t(t(5)) \quad l_t(t(5) + \Delta t) \quad l_t(t(5) + 2\Delta t) \quad \dots \quad l_t(t(6)) \quad \dots \quad 0 \quad 0]_{\Sigma t} \\ [l_t]_{\Sigma t}(2) &= [0 \quad \dots \quad 0 \quad l_t(t(5)) \quad l_t(t(5) + \Delta t) \quad l_t(t(5) + 2\Delta t) \quad l_t(t(6)) \quad \dots \quad 0 \quad 0]_{\Sigma t} \\ [l_t]_{\Sigma t}(3) &= [0 \quad \dots \quad 0 \quad l_t(t(5)) \quad l_t(t(5) + \Delta t) \quad \dots \quad 0]_{\Sigma t} \\ &\dots \\ [l_t]_{\Sigma t}(n_t - 2) &= [0 \quad \dots \quad l_t(t(5) + \Delta t) \quad \dots \quad l_t(t(6)) \quad 0]_{\Sigma t} \\ [l_t]_{\Sigma t}(n_t - 1) &= [0 \quad \dots \quad l_t(t(5) + \Delta t) \quad \dots \quad l_t(t(6))]_{\Sigma t} \end{aligned} \quad (3.43)$$

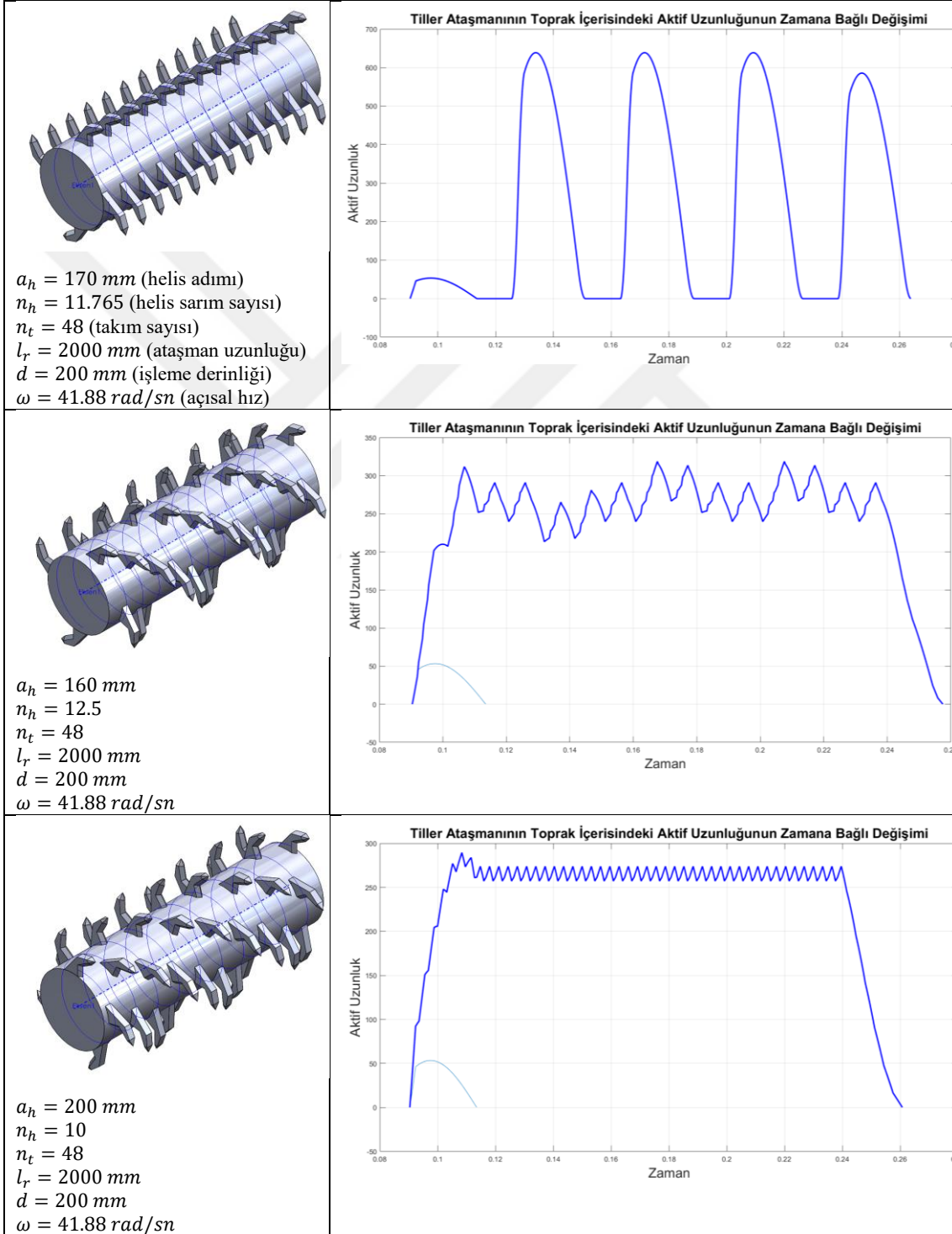
$$\sum_{t=T(5)}^{m1 + \frac{\sum \Delta t_{\text{öteleme}}(n)}{\Delta t}} l_t = [[l_t]_{\Sigma t}(1)] + \dots + [[l_t]_{\Sigma t}(n_t - 1)] \quad (3.44)$$



Şekil 3.7 Rotor üzerinde n_t kadar takım olan tiller ataşmanın sıralı takımlar arası $\Delta t_{\text{öteleme}}(n)$ miktarı ve toplam aktif uzunluğun grafiksel gösterimi.

Birim takımın toprak ile etkileşim halinde bulunduğu ve zamanın fonksiyonu olan uzunluğu aktif uzunluk diye tanımlayalım. Şekil 3.7' de örnek bir toplam l_t grafiği ve grafik üzerinde birim takımların aktif uzunlukları değişimi verilmiştir. Grafikte helis

üzerine dizilmiş takımların açısal olarak birbirlerine en yakın olanları arasındaki açı çıkmıştır. Fakat aynı olmak zorunda değildir. Helis parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Aşağıda Şekil 3.8’de farklı helis parametrelerine göre değişen $\sum l_t$ grafikleri verilmiştir.

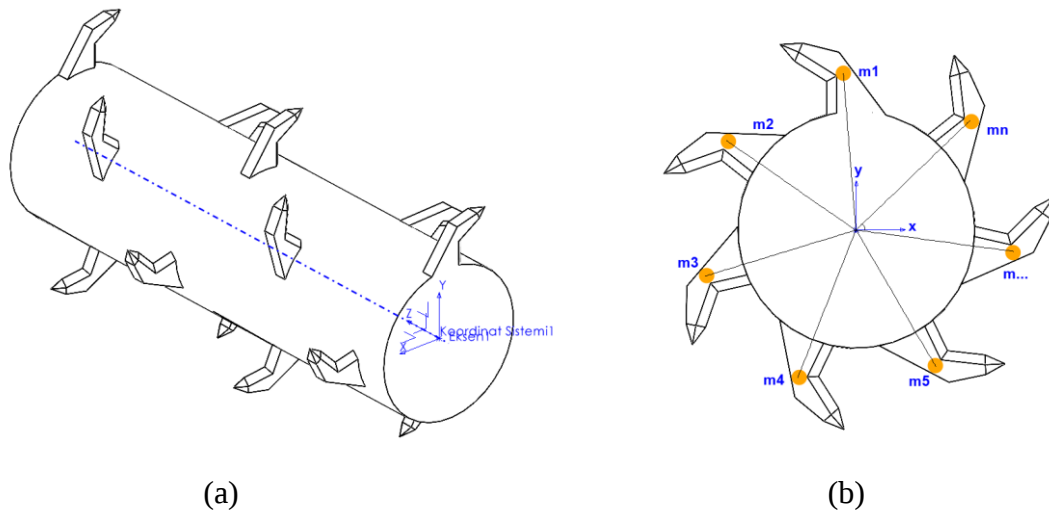


Şekil 3.8 Helis Parametrelerinin toplam aktif takım boyuna etkisi.

Zamana bağılı takım aktif uzunluk diyagramı formunu, dalga parametrelerini ve genliği sadece tiller takımlarının üzerine yerleşimi etkilemektedir. Ortalama uzunluğu ise işleme derinliği, çizgisel hız, açısal hız, rotor çapı ve takım sayısı etkilemektedir. Takımların optimum yerleşim planında ataşmanın dinamik yüklere maruz kalması engellenerek yorulma performansı artırılabilir. Takım yerleşimi ve takım geometrisi optimum değerlere ulaştığında gerekli moment değeri düşecek ve makine daha az güce gereksinim duyacaktır.

3.1.6 Helis Parametleri ve Takım Parametreleri ile Kütle Dengelenmesi

Diğer taraftan rotor üzerine eklenen n_t sayıda takım rotorda kütle dengesizliğine sebep olacak, ataşmanda istenmeyen titreşimlere yol açacaktır. Bu nedenle rotor üzerine yerleştirilen takımların ayrıca sarsma kuvvetleri dikkate alınarak tasarlanması gerekir. Kısaca rotorun dönme eksenini, asal eylemsizlik eksenini olacak şekilde tasarlanmalıdır. Sarsma kuvvetleri özellikle tiller rotoru gibi yüksek hızda dönen kütlelerde mühendislik hesabında dengelenmiş olsa bile montaj ya da üretim esnasında değişebilecek herhangi bir parametre asal eylemsizlik ekseninin yerini değiştirebilir. Ya da çalışma esnasında aşınma, ya da parça kopması gibi nedenlerle denge bozulabilir. Bu nedenle belirli periyotlarda kütle dengelenmesi yapılmalıdır.



Şekil 3.9 (a) Tiller Ataşmanın O,x,y,z eksen takımında dönme eksenini ve düzensiz kütleler, (b) xy düzleminde düzensiz kütlelerin yerleşimi.

Şekil 3.9’da örnek bir tiller ataşmanı ve eksen takımının yerleşimi gösterilmiştir. Rotorun z eksenine etrafında döndüğü bilindiğine göre O merkezine göre I_{xz} ve I_{yz} eylemsizliklerinin tüm kütleler için bulunması gerekir. Her bir kütlenin z eksenine boyunca orjine olan uzaklığı l_{ti} olmak kaydıyla eylemsizlik momentleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$I_{xz} = \sum m_i \cdot x_i \cdot z_i = \sum m_i \cdot r \cdot \cos(\alpha)_i \quad (3.45)$$

$$I_{yz} = \sum m_i \cdot y_i \cdot z_i = \sum m_i \cdot r \cdot \sin(\alpha)_i \quad (3.46)$$

$i = 0: 1: (n_t - 1)$ olmak üzere;

$$l_{t1} = 0 \text{ ve } l_{ti} = l_{ti-1} \frac{l_r}{(n_t-1)} \quad (3.47)$$

$$\alpha_t = \frac{2\pi n_h}{(n_t-1)} , \quad \alpha_{ti} = \frac{2\pi n_h \cdot i}{(n_t-1)} \quad (3.48)$$

L ve R olarak isimlendirilen iki düzlemde dengeleme yapıldığında $\alpha_i = \frac{2\pi n_h}{n_t-1}$ ise;

$$\Delta L_x = - \sum_{i=0}^{n_t-1} \left(1 - \frac{l_{ti}}{l_r}\right) \cdot m_i r_i \cdot \cos \alpha_{ti} \quad (3.49)$$

$$\Delta L_y = - \sum_{i=0}^{n_t-1} \left(1 - \frac{l_{ti}}{l_r}\right) \cdot m_i r_i \cdot \sin \alpha_{ti} \quad (3.50)$$

$$\Delta R_x = - \sum_{i=0}^{n_t-1} \left(\frac{l_{ti}}{l_r}\right) \cdot m_i r_i \cdot \cos \alpha_{ti} \quad (3.51)$$

$$\Delta R_y = - \sum_{i=0}^{n_t-1} \left(\frac{l_{ti}}{l_r}\right) \cdot m_i r_i \cdot \sin \alpha_{ti} \quad (3.52)$$

Formülleriyle her iki düzlemdeki toplam dengelenmesi gereken eylemsizlikler bulunmuş olur. Dengeleme kütlesi ve dengeleme yarıçapı ‘r’ indisi ile gösterildiğinde;

$$\Delta L = (m_d r_d)_L = \sqrt{\Delta L_x^2 + \Delta L_y^2} \quad , \quad \alpha_L = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta L_y}{\Delta L_x} \right) \quad (3.53)$$

$$\Delta R = (m_d r_d)_R = \sqrt{\Delta R_x^2 + \Delta R_y^2} \quad , \quad \alpha_R = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta R_y}{\Delta R_x} \right) \quad (3.54)$$

Elde edilmiş olur. Biraz önce de ifade edildiği gibi mayın temizleme ataşmanı olarak kullanılan rotorda çalışma esnasında mutlaka düzensizlikler meydana gelebilecektir. Bu nedenle saha ortamında rotorda sarsıntı meydana geldiğinde yerinde balans ayarlanabilecek bir tasarım yapılmıştır.

3.2 Serbest Hava Ortamı Patlama Yükleme Numerik Hesaplama ve Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması

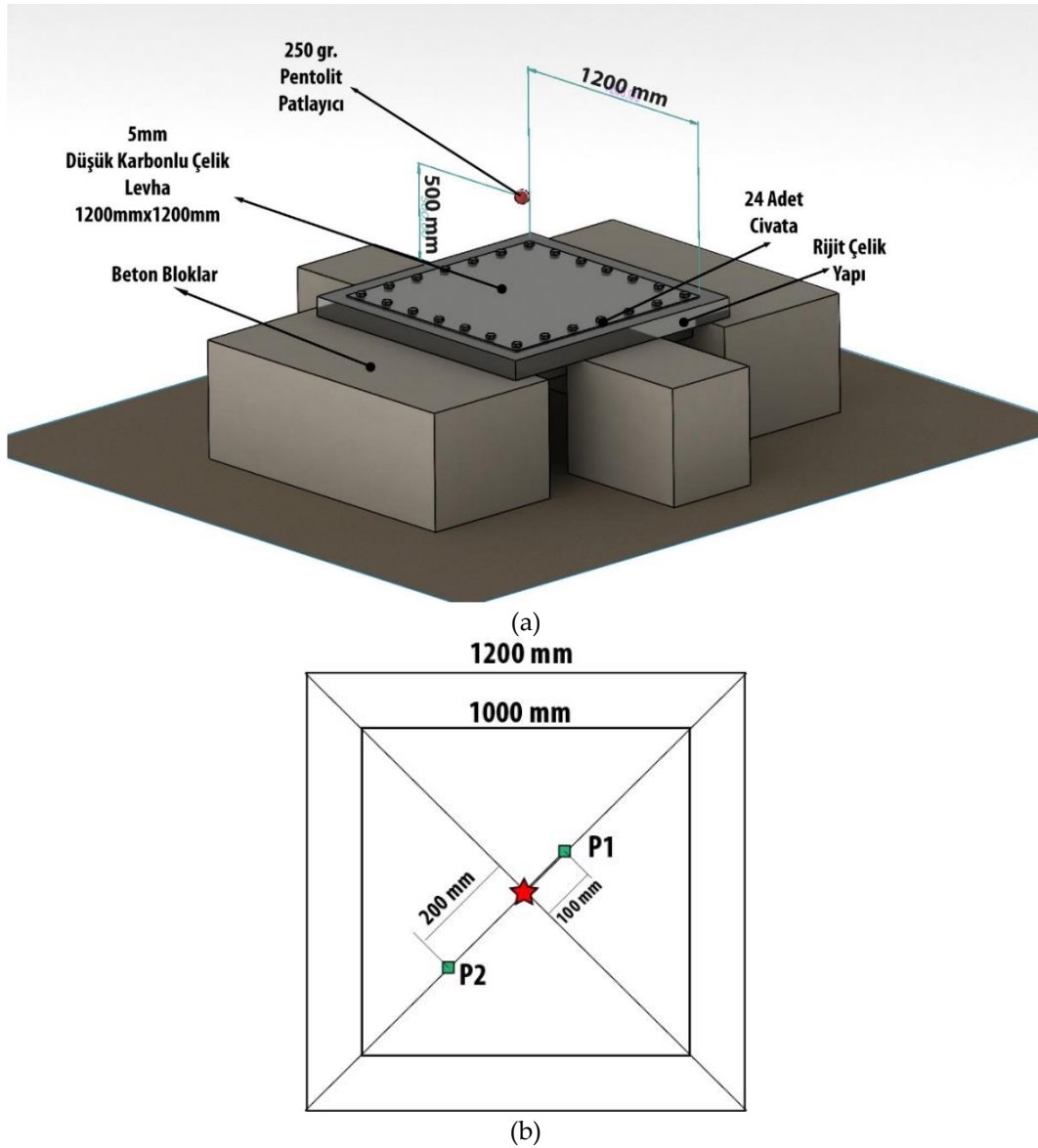
Bu çalışmada, deneysel bir çalışmanın sonuçlarına göre CONWEP, SPH, ALE ve birleştirilmiş MM-ALE ile LBE sayısal yöntemleri birbiriyle karşılaştırılmıştır. Her bir yöntem, çözüm süresi, yakınsama ve farklı patlayıcı türleri ve ortamları için kullanım açısından test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

3.2.1 Test Sistemi

Patlama testleri çok kısa süre periyodunda gerçekleştiği için kullanılacak sensörlerin ve gerekli donanımların çok hassas olması gereklidir. Öte yandan gerekli patlayıcıyı temin etmenin zorluğu nedeniyle bu alandaki akademik çalışmalar da sınırlıdır. Bu nedenle bu çalışmada Boyd'a (2000) ait literatürde aşağıda açıklanan deney ve sonuçları kullanılmıştır. Deneysel test raporu, test metodolojisini, cihaz özelliklerini ve mühendislik parametrelerini içerdiğinden, bu çalışmada sayısal sonuçlar Boyd'un (2000) test raporunun sonuçlarına göre karşılaştırılmıştır.

Bir kenarı 1200 mm ve kalınlığı 5 mm olan kare hedef düşük karbonlu çelik levha (AS3678-250), 11,06 N.m moment ile ön gerilmeli 24 adet yüksek dayanımlı çelik civata ile daha rijit bir ağır çelik çerçeveye Şekil 3.10 (a)'da gösterilen şekilde sabitlenmiştir. (Boyd, 2000). Bu deneylerden biri 500 mm mesafede ve 250 gr pentolit yükünde (E14)

gerçekleştirilmiştir. Her kenardan 100 mm beton blok üzerine sabitlenmiş ve plakanın 1000 mm'si patlama yükü ile serbestçe hareket etmeye bırakılmıştır. Basınç, ivme ve yer değiştirme verilerini kaydetmek için Şekil 3.10 (b)'de görüldüğü gibi gerekli sensörler P1 ve P2 noktalarına yerleştirilmiştir. Boyd'un (2000) deneyi LS-Dyna programı yardımıyla sayısal hesaplama için dört farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir. SPH, ALE ve LBE ile hibrit MM-ALE yöntemleri farklı ağ boyutları ile ayrı ayrı çözülmüş ve sonuçları ağ boyutu ve toplam hesaplama süresi açısından karşılaştırılmıştır.



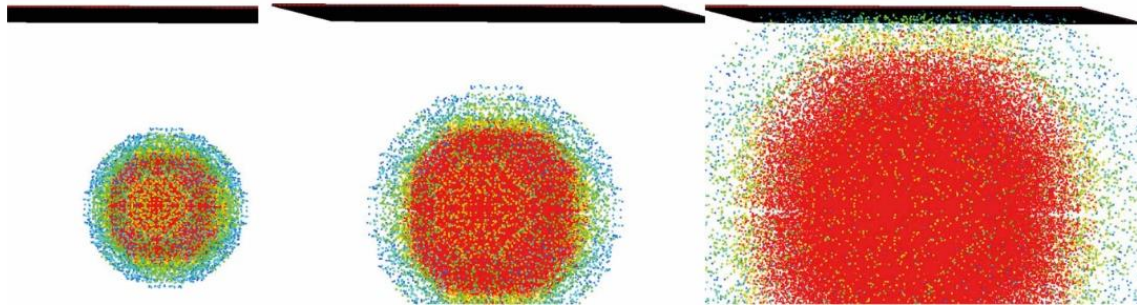
Şekil 3.10 (a) Boyd'un test düzeneği ve yerleşim planı (b) ilgili sensörler için plaka üzerinde bulunan noktaların şeması.

Boyd'un (2000) test numarası E14'e göre tepe aşırı basıncı P1 noktasında 9,4 MPa ve P2 noktasında 8,7 MPa olarak ölçülmüştür.

3.2.2 Test Sisteminin Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi

Boyd'un (2000) 250 gr PETN patlayıcı ile yaptığı deneysel çalışma, sorunu ampirik olarak çözen CONWEP, sorunu yarı ampirik olarak çözen ampirik metot ile birleştirilerek hesaplayan hibrit MM-ALE, tamamen sayısal olarak çözen ALE ve genellikle kısmi diferansiyel denklemler biçiminde olan hidrodinamik yaklaşımları kullanan SPH yöntemi kullanılarak LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı ile çözülmüştür (Boyd, 2000).

SPH yönteminde farklı sayıda parçacık ile dört farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Parçacık sayısı çözümün yakınsamasını doğrudan etkilemekte ve çözüm süresini de uzatmaktadır. Simülasyon sırasıyla 2176, 8176, 137376 ve 1114121 parçacık ile modellenmiş ve bu modellerde SOFSC=0,25; TSSFAC=0,001 ve CSLH=1,2 alınmıştır. Şekil 3.11, SPH yöntemini kullanan sayısal modelin şematik gösterimini göstermektedir.



Şekil 3.11 Enterpolasyonlu parçacık hidrodinamiği (SPH) yöntemi ile patlama simülasyonu zaman adımları.

Sonlu elemanlar yönteminde, fiziksel büyüklükler ağ yapısındaki elemanlar ve düğümler üzerinden aktarıldığından, şok dalgası yayılımını küresel biçimde modellemek için ağ yapısının oluşturulması ve seçilmesi önemlidir. Bu nedenle patlayıcı çekirdeğinden itibaren eleman sayısının küre şeklinde yayılabilecek kadar fazla olması ve radyal olarak düzenlenmesi önemlidir. Bu nedenle mesh yapısını oluşturmak için bir ön çalışma yapılmış ve bu ilk çalışmanın sonuçlarına göre yüksek basınç altındaki bölgelerde

iyileştirmeler (refinement) yapılmıştır. Eleman boyutları, bias yöntemi kullanılarak patlayıcı çekirdeğinden hava ortamı sınırına kadar büyütülmüştür. Daha sonra eleman sayıları azaltılarak farklı hesaplamalar yapılmış ve sonuçların yakınsaması beklenmiştir. Sonuçların yakınsaması ve çözüm süresi dikkate alınarak yakınsak sonuç için optimum eleman sayısı belirlenmiştir. Numerik hesaplamalarda Çizelge 3.1’ de verilen ALE parametreleri kullanılmıştır. LS DYNA yazılımı yardımıyla modellenen patlama hesaplamalarında kütle için kg , zaman için ms , uzunluk için mm , kuvvet için kN , enerji için $kN.mm$, gerilme ve basınç için ise GPa birimleri kullanılmıştır.

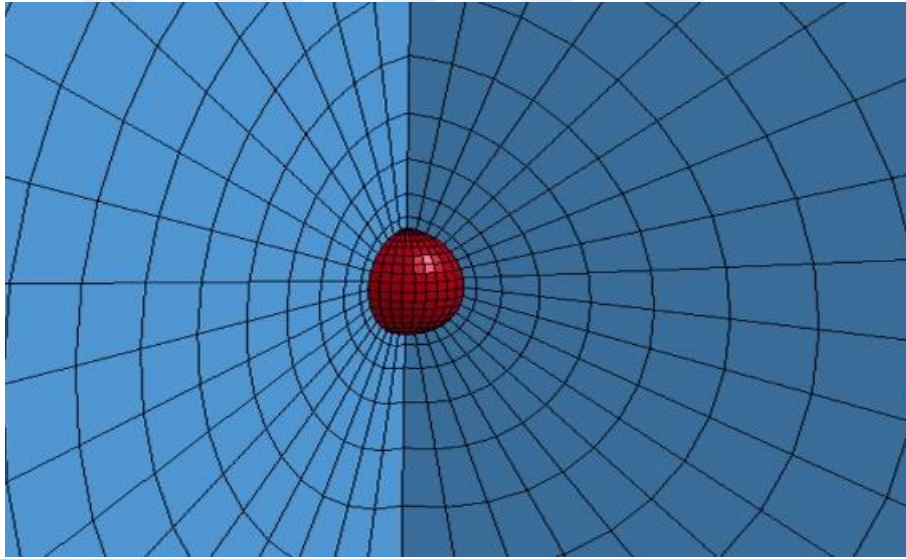
Çizelge 3.1 Çalışmada kullanılan ALE parametreleri (Schwer, 2016).

Hava	MAT_NULL								
	ρ_0 1,225								
Pentolit	EOS_LINEAR_POLYNOMIAL								
	C_0 0,0	C_1 0,0	C_2 0,0	C_3 0,0	C_4 0,4	C_5 0,4	C_6 0,0	E_0 2,55e-6	V_0 1
Düşük Karbonlu Çelik Levha(AS3678- 250)	MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN								
	ρ_0 1650	D 7360	PCJ 23,5						
Düşük Karbonlu Çelik Levha(AS3678- 250)	EOS_JWL								
	A 531,77	B 8,93	R_1 4,6	R_2 1,05	w 0,33	E_0 8	V_0 1		
Düşük Karbonlu Çelik Levha(AS3678- 250)	MAT_JOHNSON_COOK								
	ρ_0 7,850e-06	G 77	E 203	PR 0,3	A 0,35	B 0,275	N 0,36	C 0,0022	m 1
Düşük Karbonlu Çelik Levha(AS3678- 250)	TM 1673	TR 293	$EPSO$ 1	CP 4400	PC -1000	$SPALL$ 1	IT 1	$FMIN$ 1e-6	
	EOS_GRUNEISEN								
Düşük Karbonlu Çelik Levha(AS3678- 250)	C 4596	$S1$ 1,49	$S2$ 0	$S3$ 0	$GAMAO$ 2,17	A 0,46	E_0 0	VO 0	

Her bir yöntem için ağ hassasiyetini belirlemek için farklı yoğunluklarda ağ yapıları kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Her iki hesaplama yönteminde de (ALE ve hibrit MM-ALE) kaba ağlar için yaklaşık eleman boyutu 25 mm olarak seçilmiştir. Özellikle ALE yönteminde patlayıcı eleman boyutu hava alanına göre çok küçük seçilmelidir. Örneğin, bu çalışmada patlayıcı çapı 63 mm iken minimum eleman boyutu 2,5 mm'dir (ince gözenekli durumda). Tüm modelde aynı eleman boyutu seçilirse, hesaplama süresi, toplam eleman sayısı gibi son derece yüksek olacaktır. Bu nedenle, şok yayılımı yönünde patlamanın çekirdeğinden hava alanının sınırına kadar eleman boyutunu artırmak için ALE ve hibrit MM-ALE modellerinde bias fonksiyonu kullanılmıştır. Bias fonksiyonu,

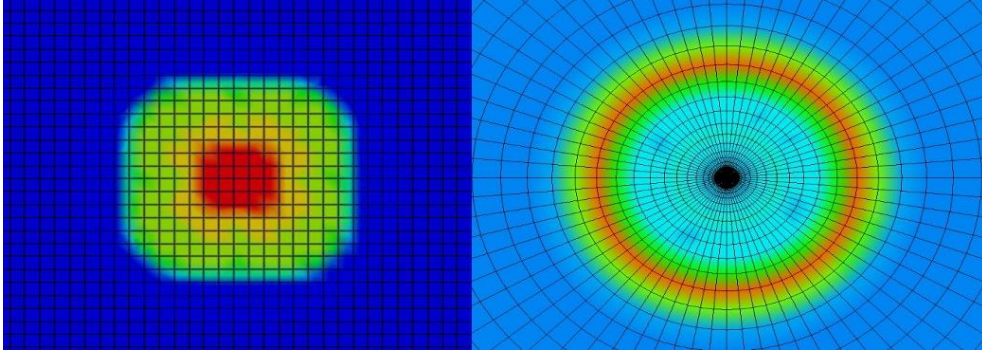
kenar boyunca düğümlerin boşluk oranını ayarlamak için kullanılmaktadır. Bu fonksiyon, düğümlerin ağ yapısının belirli bir hacminde veya alanında yoğun bir şekilde kümelenmesi gereken sonlu elemanlar problemleri için oldukça kullanışlıdır.

Tüm simülasyonlar, patlayıcıların ve sıvıların Euler formülasyonu ile tanımlandığı ALE ve hibrit MM-ALE yönteminde 3B radyal ağ yapısında modellenmiştir. Serbest hava bölgesinde küresel patlayıcıların oluşturduğu şok cephesi, doğası gereği merkezden dışarıya doğru radyal olarak ilerler. Kartezyen ağ yapılarında şok dalga formu bozulduğu için, radyal ağ yapısı ile bir bias özelliği kullanılarak ağ boyutunun çekirdekten dışı doğru kurallı olarak arttığı bir yapı kullanılmıştır. Hava alanı ve küresel patlayıcı ağ Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Şok dalgasının radyal ve Kartezyen ağ ile analizdeki şekli Şekil 3.13'te verilmiştir.



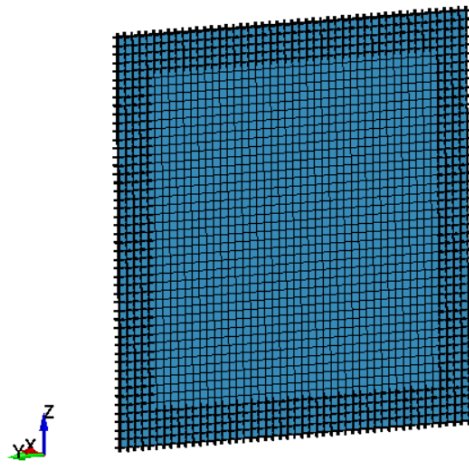
Şekil 3.12 ALE için patlayıcı ve hava alanının 3B radyal ağ yapısı.

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi CONWEP yöntemi, kontrollü deneyler sonucunda geliştirilen matematiksel bir ifadeye göre çalışır. Bu kontrollü deneyler TNT ile yapıldığından farklı tip patlayıcılarda TNT eşdeğerleri ile yakınsama yapmaktadır. Ancak her patlayıcının patlama hızı ve açığa çıkardığı enerji miktarı farklı olduğu için karmaşık analizler için pek kullanışlı değildir. Ayrıca CONWEP yöntemi sadece küresel veya yarı küresel patlamalar için bir seçenek sunar. Pentolit patlayıcı için TNT eşdeğeri 1,12 olarak alınmış ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır (Kingery ve Coulter 1983).



Şekil 3.13 Kartezyen ve radyal ağ yapısı arasındaki şok yayılımındaki fark.

Öte yandan, hedef plakası üzerindeki P1 ve P2 izleme noktalarına etki eden basınçlar UFC-3-340-02 kılavuzuna göre tahmin edilmiş ve Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Ölçekli mesafe P1 noktası için $0,78 \text{ m} / \text{kg}^{1/3}$ ve P2 noktası için $0,82 \text{ m} / \text{kg}^{1/3}$ olarak hesaplanmıştır. Hedefin ön duvarı için yapılan hesaplamalarda c_d katsayısı 1 olarak alınmış ve ilgili noktalara etki eden basınç tahmin edilmiştir (Karlos ve Solomos 2013).



Şekil 3.14 Hedef plakanın sınır koşullarını tanımlama.

Test düzeneğinde çelik levha, 24 adet 11,06 N.m yüksek çekme dayanımlı civata ile çelik bir flanş altında sabitlenmiştir. Rapora göre, hedef levhanın 1000 mm’lik kare merkez alanının serbestçe hareket ettiği vurgulanmaktadır. Civata tipleri ve konumları hakkında herhangi bir bilgi bulunmadığından, ilgili bölge elemanları herhangi bir yönde sabit elemanlar olarak kabul edilmiştir. Plakayı çevreleyen 200 mm genişliğindeki kısımdaki elemanların x, y, z, rx, ry ve rz yönlerindeki hareketleri sabitlenerek sınır koşulları belirlenmiştir (Şekil 3.14). Öte yandan hedefe 500 mm mesafede infilak eden patlayıcı

için ALE ve hibrit yöntem modellerinde kontrol hacmi çapı 3000 mm olan küre şeklinde modellenmiş, bu sayede şok dalgasının küresel yayılımı gözlemlenmiştir.

3.2.3 Çözüm Ağı Yakınsama Çalışması

Ağ yakınsaması, eleman boyutunun ALE yönteminde 1,5; hibrit yöntemde 1,25 ve SPH yönteminde 8'lik bir iyileştirme oranıyla aşamalı olarak azaltıldığı bir dizi hesaplamada ele alınmıştır. Bu çalışmada levhanın kare elemanlarının ölçüsü 12,5 mm olarak alınmıştır. Ek olarak, CONWEP algoritması hava ortamı kullanmadığından, ağ özellikleri ile sonuçlar arasında bir ilişki yoktur. Çözülmesi gereken tüm durumlar ve yöntemler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Bağlı hata oranları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$\varepsilon = \frac{\text{Calculated Value} - \text{Measured Value}}{\text{Measured Value}} \times 100 \quad (3.54)$$

Çizelge 3.2 ALE, SPH ve hibrit MMALE metotlarının yakınsama analizi için farklı ağ yapıları.

Yöntem	Ağ Numarası	Eleman / Parçacık Sayısı	Yaklaşık eleman boyutu
ALE	1	158 256	2,5 mm -250 mm (bias)
ALE	2	106 651	3,7 mm - 250 mm (bias)
ALE	3	92 340	4 mm - 250 mm (bias)
ALE	4	16 301	5,5 mm - 250 mm (bias)
HİBRİT-MMALE	1	4 098 304	12,5 mm
HİBRİT-MMALE	2	3 235 912	16 mm
HİBRİT-MMALE	3	2 983 506	20 mm
HİBRİT-MMALE	4	514 304	25 mm
SPH	1	1 114 121	12,5 mm (Hedef Plaka)
SPH	2	137 376	12,5 mm (Hedef Plaka)
SPH	3	8 176	12,5 mm (Hedef Plaka)
SPH	4	2 176	12,5 mm (Hedef Plaka)

Roache (1998), ağ boyutları arasında belirli bir iyileştirme (refinement) oranı ile üç sonuca dayanarak yakınsama oranını aşağıdaki gibi hesaplamıştır (Roache, 1998).

$$p = \log \left[\frac{F_1 - F_3}{F_1 - F_2} \right] / \log(r) \quad (3.55)$$

Burada F_1 , farklı simülasyonlardan elde edilen sonuçtur ve r , ağ iyileştirme oranıdır. Üç farklı yöntemin sonuçları karşılaştırıldığında asimptotik yakınsama vardır. Yakınsama noktasını elde etmek için aşağıdaki denklem kullanılır (Roache 1998).

$$F_0 = F_1 + (F_1 - F_2)/(r^p - 1) \quad (3.56)$$

Sabit bir iyileştirme oranıyla yapılan hesaplama sonuçları arzu edilen sonuç değerine asimptotik olarak yakınsayacaktır. Eleman sayısı sonsuza gittiğinde çözüm sonucunun tek bir değere ulaşması beklenmektedir. Bu nedenle sonucun logaritmik olarak yakınsayacağı değer ve bu değere karşılık gelen eleman sayısı çözümün yakınsayacağı değerleri vermektedir.

3.3 Tiller Ataşmasının Toprak Etkileşiminin Numerik Yöntemler ile Modellenmesi

Belirli bir açısal hızla dönen ve belirli bir çizgisel hızla ilerleyen rotora bağlı tiller takımının toprak ile etkileşimine daha önceki bölümlerde bir yaklaşım geliştirilmişti. Bu yaklaşıma göre zamana bağlı olarak toprak içerisinde bulunan takımların anlık toplam uzunluklarının rotorun dönebilmesi için gerekli moment ihtiyacıyla doğru orantılı olacağı varsayımında bulunulmuştu. Bu bölümde ise analitik çözümü gerçekleştirilen modelin açık yöntem (explicit) ile modellenmesi ve numerik yöntemler ile çözülmesi konusu gerçekleştirilecektir. Toprak, önceki bölümlerde bahsedildiği üzere mukavemeti etkileyen çok fazla değişken olduğu ve tamamen doğrusal olmayan davranış sergilediği için analitik çözümü oldukça zordur. Geçmiş dönem araştırmalarına göre toprağın mekanik davranışı üzerine çok fazla sayısal model geliştirilmiştir. Bu modellerin en çok kullanılanları Mohr-Coloumb kriteri ve Drucker-Prager modelleridir. Yapılacak numerik çalışmada tiller takımı ve bağlı olduğu rotor rijit kabul edilmiş sadece toprağın takım üzerinde oluşturacağı direnç ve takımın ihtiyaç duyacağı moment araştırılmıştır. Son yıllarda Amerikan Ulaştırma Bakanlığı tarafından LS-DYNA ticari yazılımında kullanılmak üzere FHWA MAT_147 isminde toprak modeli geliştirilmiştir. Bu modelin kullanışı olmasının en önemli nedeni toprak yapısına ait birçok değişkene cevap verebilmesidir. Örneğin toprağın içerdiği su miktarı, porozitesi, pekleşmesi ve sıkıştırılabilirliği gibi birçok konuya yaklaşımlar geliştirmiştir. Toprak yapısının vizkoelastik davranışının tahmin edilebilmesi için birçok parametreye ihtiyaç

duyulmaktadır. Çözüm süresinin kısaltılması için başlangıçta rotora bağlı tek bir takım üzerinden numerik hesaplama yapılmış, sonrasında nihai tasarıma göre tiller ataşmanın toprak alandaki davranışı simule edilmiştir.

3.3.1 Malzeme Tanımlamaları

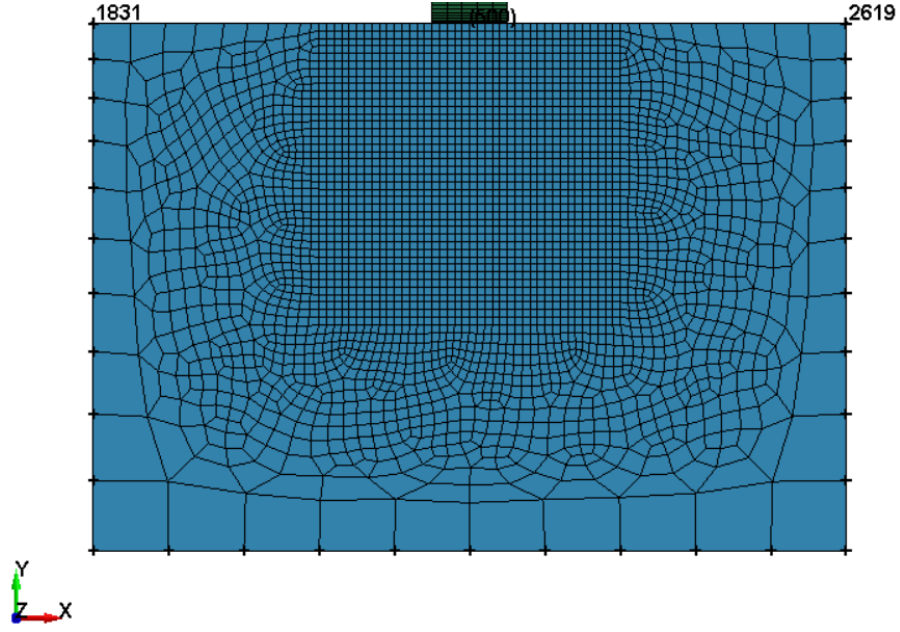
Bölüm 2.6.1’de detaylı olarak anlatılan FHWA toprak modeli için aşağıdaki Çizelge 3.3’teki parametreler kullanılmıştır. Bunun haricinde hem hesaplama süresinin kısaltılması hem de takıma etkiyen direncin oluşturacağı moment ihtiyacının bulunması gerektiğinden takım rijit olarak modellenmiştir.

Çizelge 3.3 Çalışmada kullanılan FHWA parametreleri (Saleh ve Edwards 2011).

NPLOT	RO	SPGRAV	RHOWAT	VN	GAMMAR	INTRMAX
1,225	2,114e-06	1,000e-06	1,000e-06	1,1	0	10
K	G	PHIMAX	AHYP	COH	ECCEN	AN
0,465	0,186	1.1	1,000e-07	6,200e-06	0,7	0
ET	MCONT	PWD1	PWKSK	PWD2	PHIRES	DINT
10	0,034	0	0	0	0	0,0025
VDFM	DAMLEV	EPSMAX				
1,000e-09	0,99	0				

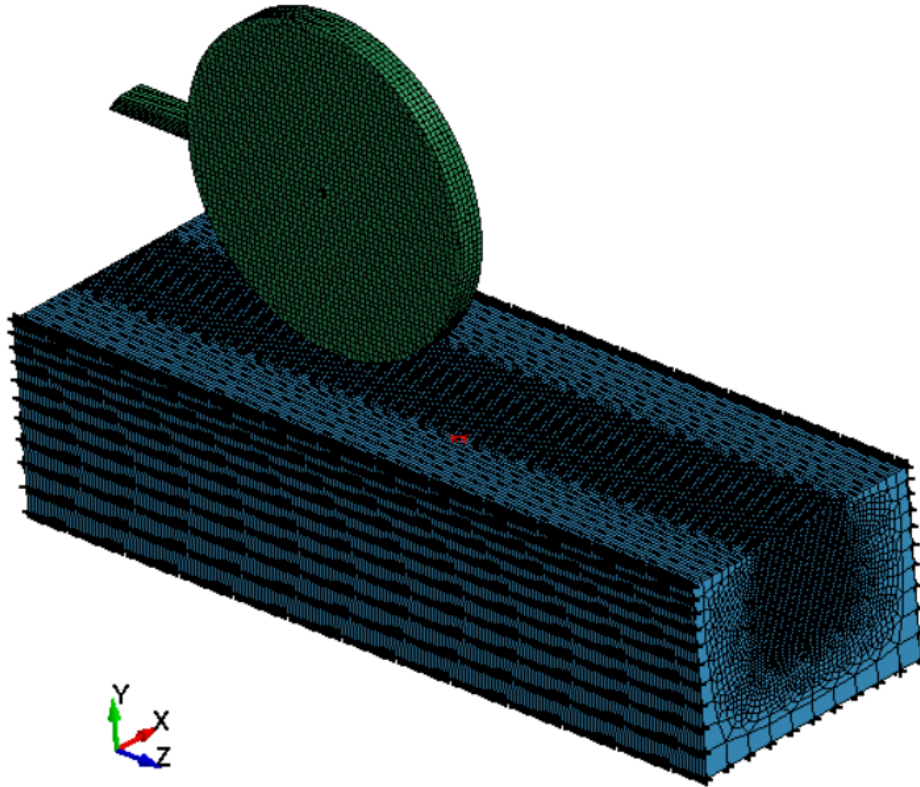
3.3.2 Çözüm Ağının Oluşturulması, Sınır ve Başlangıç Koşulları

Toprak 500 mm genişliğinde, 500 mm derinliğinde ve 3000 mm uzunluğunda modellenmiştir. Çözüm süresi dikkate alınarak takımın toprağı işleyeceği kısım bias komutuyla merkezden dış yüzeye doğru genişleyecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.15’te toprağa ait mesh yapısı gösterilmiştir. Şekil 3.16’da gösterilen takım ve bağlı olduğu rotor yekpare ve rijit yani şekil değişimine müsaade etmeyen şekilde modellenmiş takım ile rotor arasındaki bağıl şekil değişimleri ihmal edilmiştir. Gerçek durumda ise takımlar rotor üzerine bağlantı elemanları ile tesbit edilmektedir. Fakat bu hesaplamada sadece rotorun toprak işleme neticesinde ihtiyaç duyacağı momentin tahmin edilmesi hedeflenmiştir.



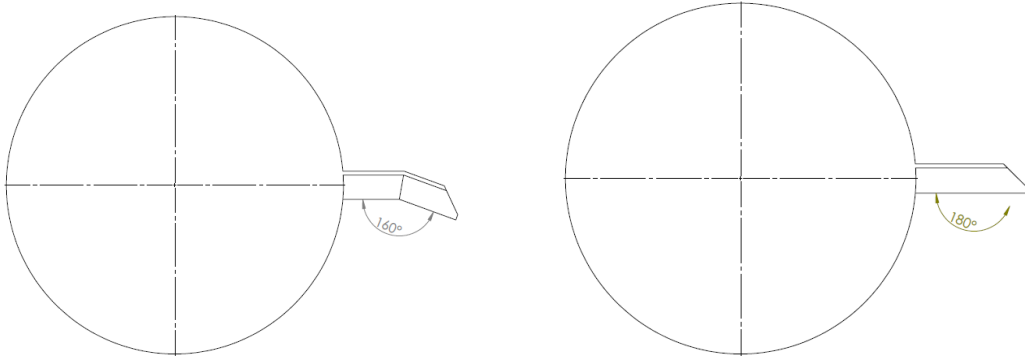
Şekil 3.15 Toprak takım etkileşiminin numerik hesaplanmasında kullanılan toprak modelinin ağ yapısı.

En düşük eleman boyutu 5 mm iken en büyük eleman boyutu 50 mm dir.



Şekil 3.16 Toprak modelinin sınır koşullarının gösterimi.

Toprak alan üç boyutlu ve katı olarak modellenmiştir. Toprak alanın yz düzlemlerinde ve alt yüzey olan xz düzleminde tüm serbestlik dereceleri hareketi kısıtlanmıştır (Şekil 3.16). Tiller takımının ise dönme eksenini yalnız z ekseninde hareket edebilmesi sağlanmıştır. “BOUNDARY PRESCRIBED MOTION RIGID” kartıyla takım hem +z yönünde 0,28 mm/ms, hem de 0,04188 rad/sn sabit hızında -x yönünde dönmesi sağlanmıştır. Hız değerleri “DEFINE CURVE” anahtar kelimesiyle tanımlanmıştır. Takım yüzeyi ile toprak alanı temas algoritması aşırı şekil değiştiren elemanların silinmesine ve bu sayede toprak işlemeyi modelleyebildiğimiz “CONTACT ERODING NODES TO SURFACE” kartıyla modellenmiştir. Bu temas algoritmasında master yüzey takım yüzeyi köle düğümler ise toprak alanıdır. Takım ile toprak arasındaki sürtünme katsayısı ise 0,5 olarak belirlenmiştir. Toplamda 613 559 eleman ve 625 739 sayıda düğümden oluşan modelin CPU çözüm süresi 242 347 sn’dir. Çözüm adımı ise 0,1 ms olarak ayarlanmıştır. Ayrıca benzer analizler Şekil 3.17’de gösterilen takım kesme açısının 120° -160° arasında değiştirilerek tekrarlanmıştır. Bu çalışma ile de kesme açısının toprak direnci ile ilişkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.17 Tekil tiller takımının farklı kesme açıları.

Bıçak açısının ise her durumda toprakta sadece kesme gerilmesi oluşturabilecek kadar açığa sahip olduğu varsayımı yapılmıştır.

3.4 Tiller Ataşmanının Mayın Patlaması Yükü Karşısında Davranışı

Mayın temizlemede kullanılan tiller ataşmanları genellikle silindirik bir rotor ve bu rotor üzerine helisel biçimde dizilmiş toprak kazıcı takımlardan oluşmaktadır. Ataşmanın mayın ile temasa geçtiğinde ve patlamaya maruz kaldığında yarı küresel bir patlama olayı gerçekleşmektedir. Bu yük karşısında ataşmanın eylemsizlik momentinin bozulmaması için üzerindeki kütle dağılımının değişmemesi gereklidir. Bu nedenle tasarımda diğer önemli nokta seçilecek geometri, malzeme cinsi ve parça et kalınlıkları, ataşmanın kalıcı şekil değiştirmeden patlama yükünü atlatmasıdır. Bu arazi şartlarında mayın temizlemenin sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir. Genellikle mayın temizleyen tiller ekipmanlarında silindirik rotor veya sac plakalardan oluşan kafes yapılar tercih edilmiştir. Anti-tank mayınları içerisinde en çok patlayıcı ihtiva eden mayında 13,5 kg TNT patlayıcı bulunmaktadır. Bu nedenle 13,5 kg lık TNT yüküne mukavim olacak şekilde bir tasarım yapılacaktır. Tiller ataşmanı tasarımlarında malzeme seçimi de çok önemlidir. Genellikle ticari ARMOX serisi zırh çelikleri kullanılmaktadır. Bu çelikler düşük karbon içerikleri sayesinde kolayca imal edilebilmektedirler. Zırh çeliklerinin en önemli özellikleri yüksek süneklikte ve rezilyanslarının yüksek olmasıdır. Malzeme kopma olayı gerçekleşene kadar diğer konvansiyonel çeliklere nazaran çok fazla miktarda enerji absorbe edebilmektedir. 200 mm yakınlıkta ve 13,5 kg'lık TNT yükü altında 200, 250, 300 mm'lik yarıçaplara sahip iki tarafı kapalı silindirlerin sadece elastik deformasyon ya da çok küçük miktarlarda plastik deformasyona uğrayabileceği kritik et kalınlıkları üzerinde çalışma yapılmıştır.

3.4.1 Zırh Çeliği Parametreleri

Tiller ataşmanlarında ve askeri araçların muhtemel patlama bölgelerinde sıklıkla ARMOX 500T malzemesi kullanılmaktadır. Malzemeye ait kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikleri Çizelge 3.4'te, sayısal analiz parametreleri de Çizelge 3.5'te verilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde malzeme JOHNSON_COOK malzeme kartıyla tanımlanmış olup durum denklemleri EOS_GRUNEISEN kartıyla tanımlanmıştır.

Çizelge 3.4 Çalışmada kullanılan ARMOX 500T Johson Cook parametreleri (İnt Kyn. 8).

ARMOX 500T	Kimyasal Bileşim								
	C %	Si %	Mn %	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	B%
	0,32	0,40	1.2	0,010	0,003	1,0	1,8	0,7	0,005
	Mekanik Özellikleri								
	Kalınlık	Sertlik (HBW*)	Akma Dayanımı R _{P0,2} , Mpa	Çekme Dayanımı R _M , Mpa	Uzama, A ₅ , %		Uzama, A ₅ , %		
	3,0-80,0	480-540	1250	1450-1750	8		10		

* HBW Sertlik Brinell Wolfram karbür anlamına gelir. Wolfram karbür (= tungsten karbür), daha yeni Brinell standartlarının, daha önce kullanılan (daha yumuşak) çelik bilyaların (HBS) aksine, tungsten karbür bilyelerin kullanılması daha yüksek sertlikleri ölçmek içindir.

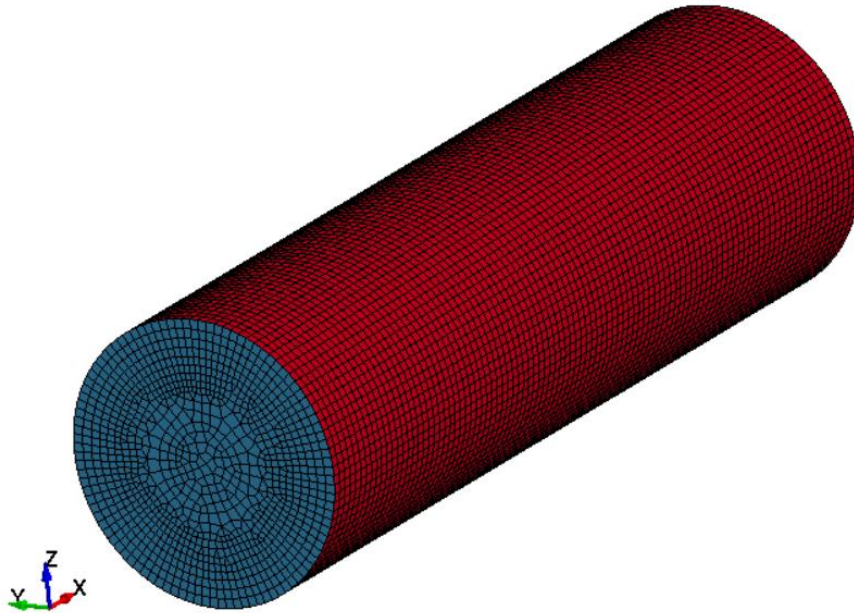
Çizelge 3.5 Çalışmada kullanılan ARMOX 500T Johson Cook parametreleri (Niezgoda ve Morka 2009).

ARMOX 500T	MAT_JOHNSON_COOK								
	ρ_0	G	E	PR	A	B	N	C	m
	7,850e-06	77	200	0,3	0,849	1,34	0,092	0,0054	0,87
	TM	TR	EPSO	CP	PC	SPALL	IT	D1	D2
	1673	293	1	4400	-1000	1	1	0,001	0,747
	D3	D4	D5	C2/P	EROD	FMIN	NUMINT		
	0,201	0	0	0	0	0,06			
	EOS_GRUNEISEN								
	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	E ₀	V ₀
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	2,55e-6	1

3.4.2 Sonlu Elemanlar Modeli

Toplam uzunluğu 2000 mm, yarıçapı 300 mm olan rotor SHELL elemanları kullanılarak modellenmiştir. Mesh çalışmasında uzunluk 100 parçaya bölünmüş yani eksenel yönde 20 mm’lik elemanlar elde edilmiştir. Silindirin yanal yüzeylerindeki daireler ise en dış çap 100’e bölünerek elde edilmiştir (Şekil 3.18). Böylece 12 098 tane, yaklaşık 20 mm x 20 mm’lik boyutlarda kabuk elemanlar elde edilmiştir. Yanal yüzeylerdeki daireesel kapakların merkezden çapı 80 mm olacak kadarlık kısmı tüm yönlerde hareket

edemeyecek şekilde sınır koşulları belirlenmiştir. Patlama yükü hibrit MMALE metoduyla simule edilmiş hava yani euler ortamı ise yarıçapı 2500 mm'lik bir küre ile modellenmiştir. Küre çekirdeğinden itibaren bias fonksiyonu kullanılarak merkezde 10 mm den çeperde yaklaşık 250 mm'ye kadar genişlemektedir. Çizel 3.6' da simülasyonlarda kullanılan TNT parametreleri verilmiştir. Patlayıcı malzeme modeli için MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN kartı, durum denklemleri için ise EOS_JWL kartı kullanılmıştır.



Şekil 3.18 Silindirik tiller rotoru mesh çalışması.

Çizelge 3.6 Çalışmada kullanılan TNT parametreleri (Dobratz ve Crawford 1981).

TNT	MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN						
	ρ_0	D	PCJ				
	1630	6930	2,10E9				
	EOS_JWL						
	A	B	R_1	R_2	w	E_0	
	371,20E9	3,231E9	4,15	0,95	0,3	7,0E9	

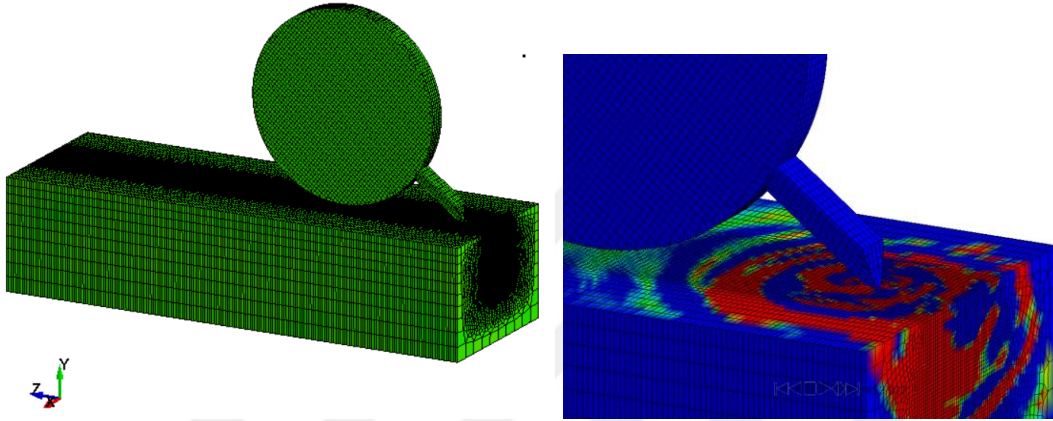
Hava elemanları bölüm 3.2.2’ de olduğu gibi EOS_LINEAR_POLYNOMIAL durum denklemiyle ve MAT_NULL malzeme kartıyla modellenmiştir. Patlama INITIAL_DETONATION, INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY kartlarıyla tanımlanmıştır. Çözüm adımı 0,01 olarak seçilmiştir.



4. BULGULAR

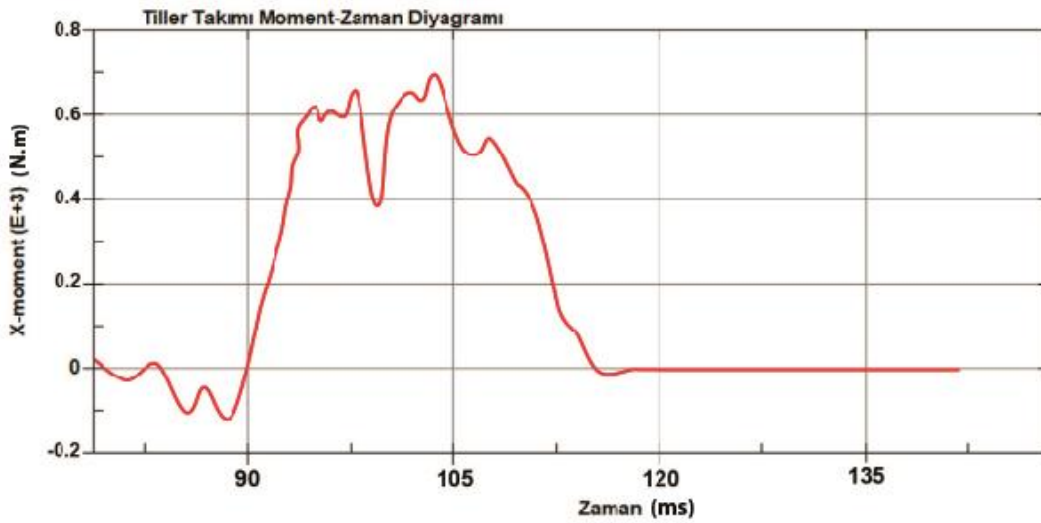
4.1 Tiller Takımının Sonlu Elemanlar Yöntemi Sonuçları

Tekil takım ile yapılan numerik modelleme şeması Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu çalışma sonucunda rijit olarak kabul edilen rotora ait moment-zaman grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Tekil tiller takımının LS-DYNA yazılımı ile modelinin şematik gösterimi.

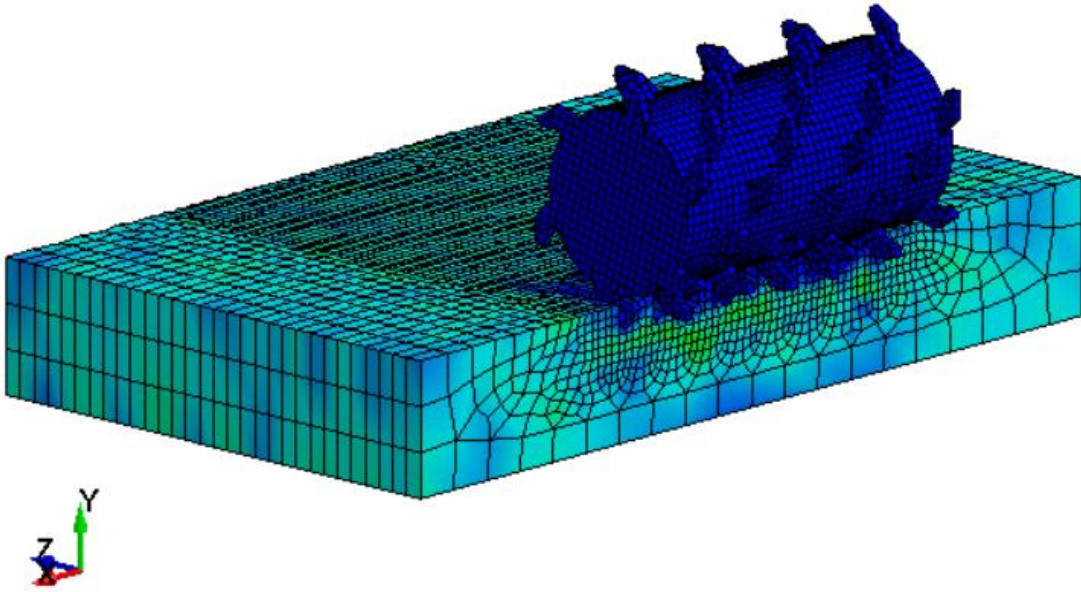
Şekil 4.2’den de görüldüğü üzere toprağı işleyen takım başına yaklaşık 690 Nm moment gereksinim duyulmaktadır.



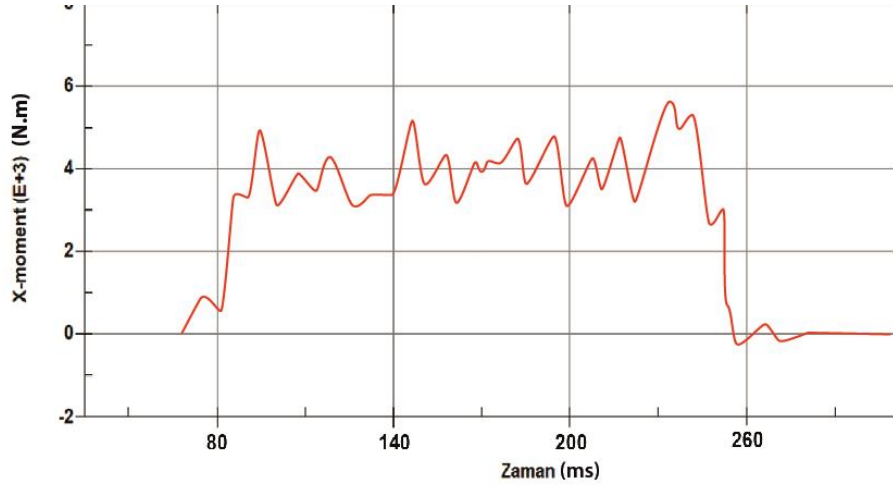
Şekil 4.2 Tekil tiller takımının LS-DYNA ile rotorun M_x moment-zaman diyagramı ($\omega_n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $b=50$ mm).

Rotorun dönmesiyle birlikte takım toprak ile temasa geçen takım toprağı kesmeye/kazmaya çalışır. Maksimum toprak derinliğinde rotorun ihtiyaç duyduğu momentin de maksimum olması beklenir. Şekil 4.2’de takım 90. ms’de toprağa temas eder, moment yaklaşık doğrusal artarak maksimum momente, maksimum derinlikte ulaşır. Daha sonra ise toprak ile teması kesilene kadar moment parabolik olarak azalır ve neticede sıfıra ulaşır. Şekil 4.2’de grafikte bazı dalgalanmalar görülmektedir. Bunun birinci sebebi takımın hareketi esnasında kritik kesme gerilmelerine ulaşan toprak elemanların silinerek toprak hacminin kesilmesi ile boşalma ve yükleme çevrimidir. Diğer taraftan çözüm ağında oluşturulan eleman boyutlarının göreceli olarak büyük olmalarıdır. Eleman boyutları küçüldükçe istenmeyen dalgalanmalar da ortadan kalkacaktır.

Şekil 4.3’te gösterilen tiller ataşmanın tüm takımlarıyla birlikte yapılan sonlu elemanlar analizinde ise yoğun mesh’in kullanıldığı bölgelerde 25 mm’lik eleman boyutu seçilmiştir. Eleman boyutunun daha ince olması sonuç grafiğinin daha sapmasız olmasına neden olurken; çözüm süresini oldukça artırmaktadır. Yapılan numerik modellemeye göre ortalama yaklaşık 4000 Nm’lik bir moment ihtiyacının olduğu Şekil 4.4’de verilen moment-zaman diyagramında görülmektedir.



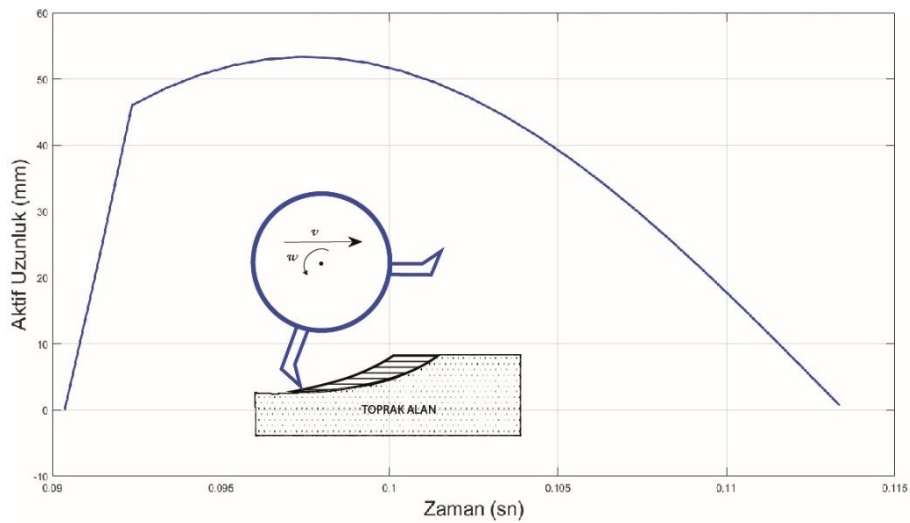
Şekil 4.3 Tiller ataşmanı LS-DYNA yazılımı ile rotorun şematik gösterimi.



Şekil 4.4 Tiller ataşmanı LS-DYNA yazılımı ile rotorun M_x moment-zaman diyagramı ($\omega_n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $n_t=48$, $a_h=200$ mm, $l_r=2000$ mm, $b=50$ mm).

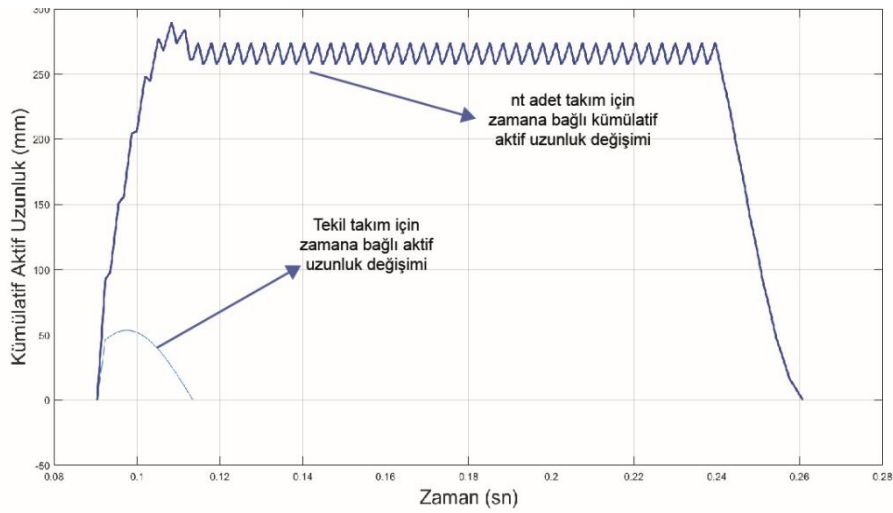
4.2 Tiller Ataşmasının Analitik Hesabı Değerlendirilmesi

Bölüm 3.1’de anlatılan tiller rotorunun moment gereksinimi ihtiyacına dayanan analitik model toplamda sekiz farklı değişkene sahiptir. Bu değişkenlerin sonucu nasıl etki ettiğine dair ayrı ayrı MATLAB kodu oluşturulmuştur. Bu verilerin bilinmesi belirli bir güce sahip makinanın sınırlarının belirlenmesinde ya da operasyonel koşullara bağlı olarak parametre seçilmesinde uygulanabilir. Hatta makinanın maksimum verimde çalışacağı parametreler de arazi koşullarına göre belirlenebilir.



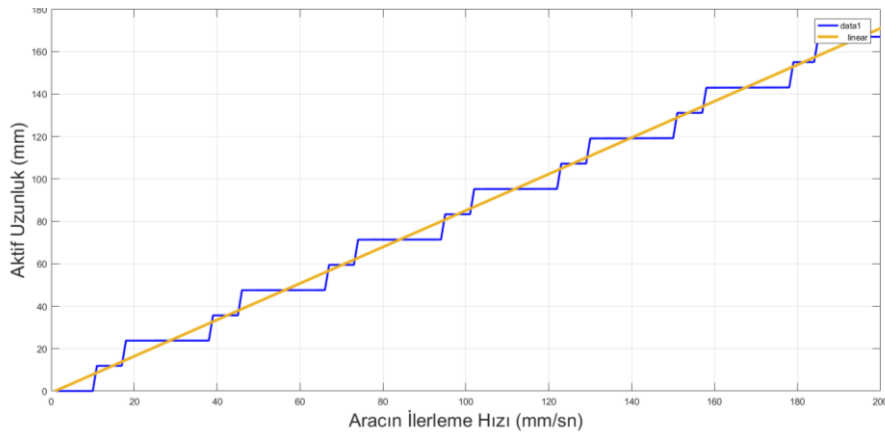
Şekil 4.5 Birim tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğunun zaman bağlı değişimi ($\omega_n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm).

Şekil 4.5’te rotor üzerine bağlı takımlardan sadece bir tanesinin toprak içerisinde zamanla değişen aktif uzunluğunu göstermektedir. Toprak içerisindeki aktif uzunluk toprak direncini doğrusal olarak etkilemektedir. Diyagramdaki eğrinin formu değişkenlere bağlı şekillenmektedir. Eğrinin iki sıfır konumu toprağa giriş ve çıkış zamanlarını vermekte doğrusal kısımdan parabolik kısma geçtiği an ise bir önceki turdan kazılan toprak ile kesiştiği noktadır.



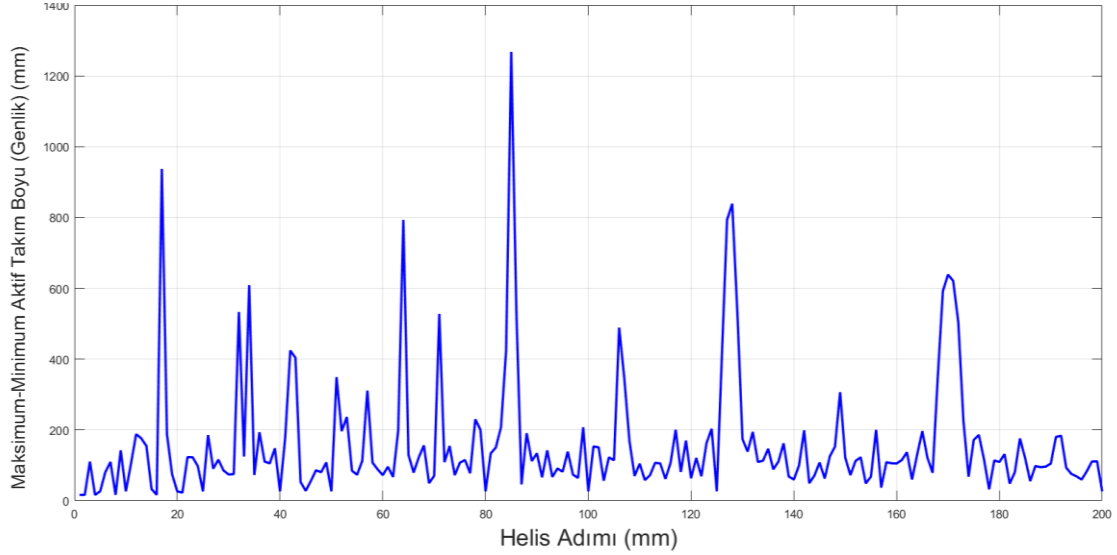
Şekil 4.6 Tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğunun zamanla değişimi ($\omega_n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $n_t=48$, $a_h=200$ mm, $l_r=2000$ mm, $b=50$ mm).

Bölüm 3.1’de anlatılan birim takımların belirli zaman adımlarında oluşturdukları kümülatif aktif uzunluk, rotorun ihtiyaç duyduğu moment ile doğru orantılıdır. Şekil 4.6’da birim takımın eğrisi ile birlikte verilmiştir.



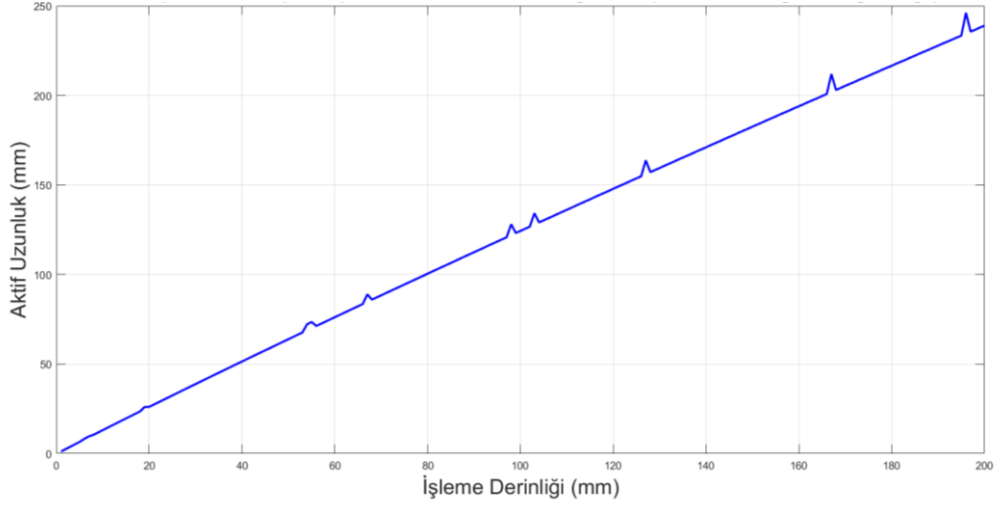
Şekil 4.7 Tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğuna ilerleme hızının etkisi.

Parametrelerin değişmesiyle moment grafiğinin tepkisi ölçülmüştür. Aracın ilerleme hızı etkisi Şekil 4.7’de verilmiş olup genel itibariyle sonuca doğrusal etki ettiği anlaşılmaktadır.



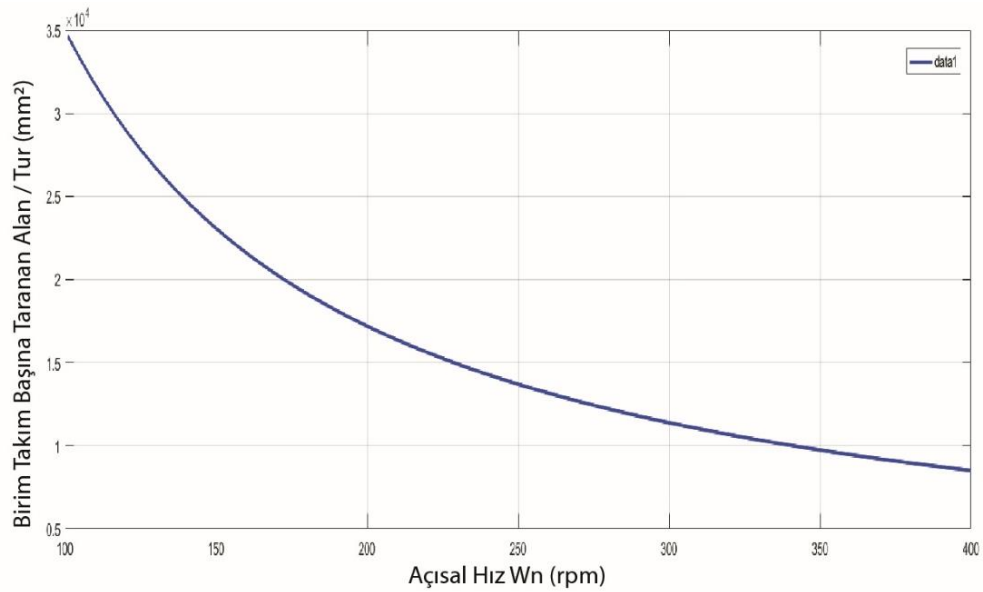
Şekil 4.8 Tiller ataşmanı üzerinde helisel şekilde dizilen takımların helis adımının, aktif uzunluk grafiğinde meydana getirdiği moment düzensizliği grafiği (aktif uzunluk – genlik).

Şekil 4.8’deki diyagram ise oldukça önemlidir. Bu diyagramda takımların yerleştirildiği helis adımı (a_h) haricindeki tüm parametreler sabit tutulmuş ve oluşacak moment-zaman grafiğinin rejim durumunda maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark (genlik) ölçülmüştür. Genliğin düşük olması makinaya etki edecek dinamik yüklerin azalmasına yorulma dayanımının artmasına diğer taraftan da makinada oluşacak sarsıntıların bertaraf edilmesi konularında en önemli tasarım parametresidir. Bu grafiğe göre bazı helis adımlarında genlik maksimum takım boyuna gelmektedir. Grafikte bazı helis adımlarında ise genliğin en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Genliğin en düşük 16,5 mm olduğu 200 mm’lik helis adımı seçilmiştir. Tasarım esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli parametredir. 2000 mm uzunluğunda rotor için en küçük mayın olan anti-personel kelebek mayınlarını dahi kaçırmaması için en yakın takımlar arası uzaklık 16 mm seçilmiştir. Bu nedenle takım sayısı 48 olarak belirlenmiştir.



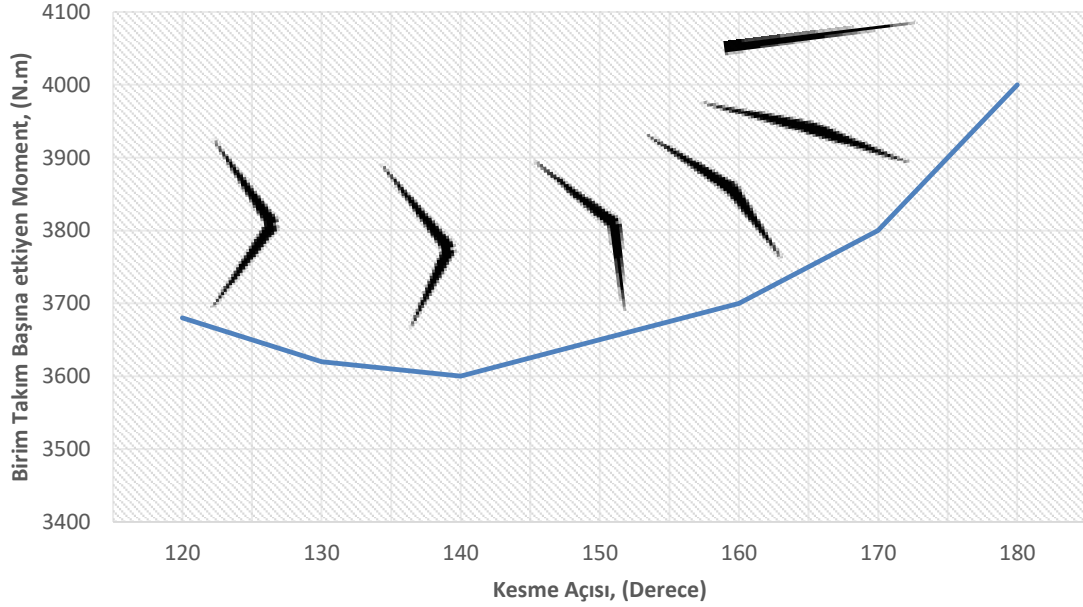
Şekil 4.9 Tiller takımının aktif uzunluğuna işleme derinliğinin etkisi.

İşleme derinliğinin etkisi her ne kadar Şekil 4.9'da doğrusal olduğu gözükse de takımın toprağın alt yüzeyine doğru ilerledikçe toprak dayanımı artmaktadır. Toprak zemin üzerinde hareket eden araçların da neden olduğu yükleme boşalma sonucunda toprak direnci artmaktadır. Buna konsolidasyon denir. Fakat tamamen arazinin geçmişine ve içerdiği kohezyon miktarına bağlı olması nedeniyle bunu analitik olarak ön görmek mümkün değildir. Topraktan alınan numune ile de ölçülemez. Lakin Bölüm 2.3.2.6'da da bahsedildiği üzere koni testi ile bir fikir edinilebilir.



Şekil 4.10 Tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğuna açısal hızın etkisi.

Şekil 4.10'da verilen diyagramda açısal hızın artmasıyla da birim takımın her turda kaldırdığı toprak miktarı logaritmik azalmaktadır. Grafiğin x ekseninde daha da uzatılması sıfır noktasında bir asimptot'a da sebep olacaktır.



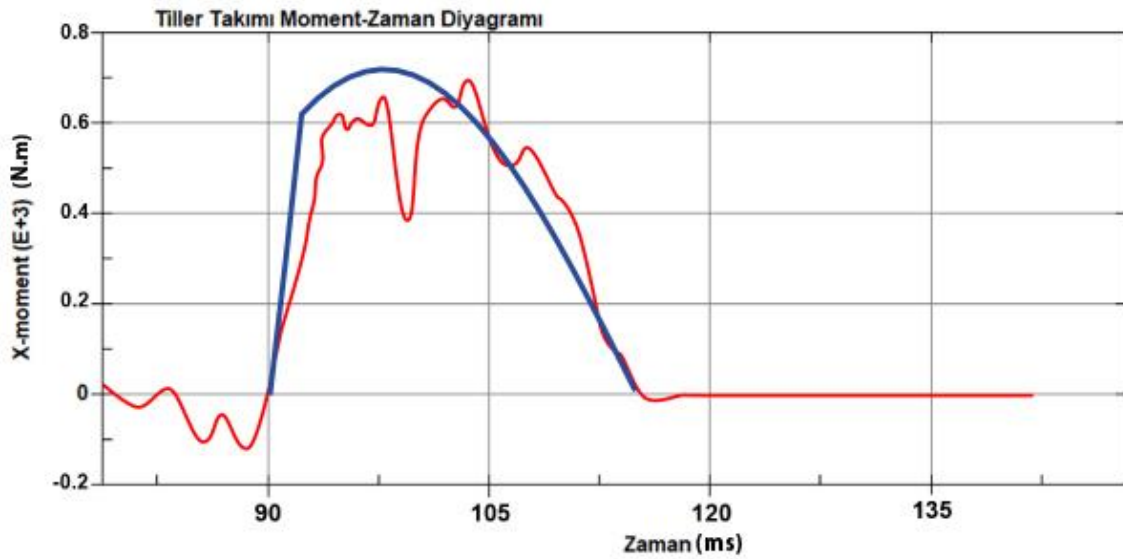
Şekil 4.11 Tiller takımının kesme açısının moment gereksinimine etkisi.

Şekil 4.11 de verilen grafik takımın kesme açısına bağlı olarak değişen ve bir dizi numerik sonuçlardan elde edilmiş bir grafikdir. Bu grafiğe göre düz bıçakta 180° olduğu bilinen bıçağın kesme açısı 10° ar derece düşürülerek 120°'ye kadar çözülmüştür. Buradan çıkan sonuca göre kesme açısının 120-180 derece arasında değiştirilmesi yaklaşık %10'luk bir verim kaybına neden olabilmektedir. 140°'de en iyi sonuç alınmasına karşın toprak parametreleriyle de doğrudan ilintilidir. Farklı toprak parametrelerinde de ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir.

4.3 Tiller Ataşmasının Analitik Hesabı ve Numerik Hesaplamanın Birlikte Değerlendirilmesi

Bölüm 2.3.3.2' te tiller takımı için spesifik kesme direnci ve makinanın toprak direncine karşılık gelecek moment hesabı ile bilgiler verilmişti. Bu bilgiler ışığında spesifik kesme direnci k_1 , toprak yapısına göre 25 kN/m^2 ile 320 kN/m^2 aralığında değişmektedir.

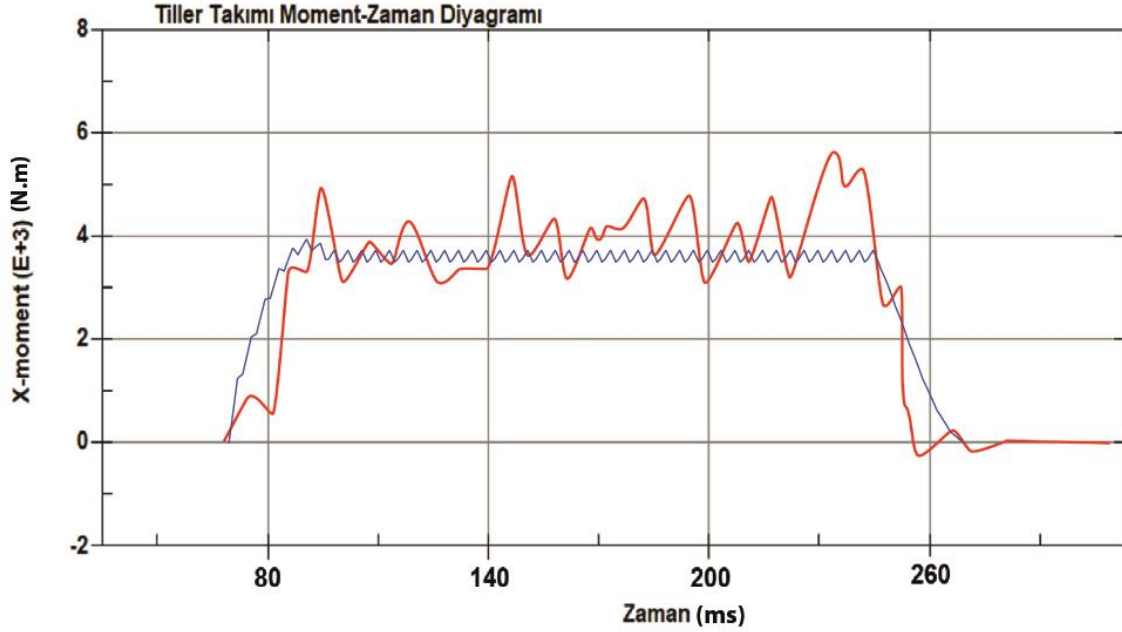
Farklı toprak yapılarında aynı mayın temizleme makinaları kullanılabilir. Fakat ilerleme hızı, açısal hız gibi bazı parametrelerin ayarlanması gereklidir. Denklem 2.13 uyarınca takımın toprak içerisinde bulunan aktif kısımlarının toplam boyu bilindiğine göre, moment kesme genişliği yani takım genişliği ile doğru orantılıdır. Hem analitik hesaplamada hem de numerik modellemede takım genişliği b , 50 mm olarak alınmıştır. Buna göre tekil takım ile yapılan numerik hesaplama sonucu maksimum moment 690 kN.mm olarak bulunmuştur. Takım anlık aktif boyu analitik hesaplamasında ise l_{maks} , 53,35 mm bulunmuştur. Numerik hesaplamada kullanılan FHWA toprak modeli parametreleri literatürden killi sert toprak olarak düzenlenmişti. Tekil takıma etkileyen moment, $M_x = b \cdot k_1 \cdot l_{maks} = 50 \times 53,35 \times k_1$ ise $k_1 = 517 \text{ kN/m}^2$ olduğu anlaşılmıştır. Bölüm 2.1.5.3'te verilen spesifik kesme direnci aralığında da bulunan bu değer sert killi toprağa aittir. Şekil 4.12'de hem analitik hem de numerik sonuç aynı diyagramda verilmiştir.



Şekil 4.12 Tekil tiller takımı M_x moment-zaman diyagramı analitik hesap ile numerik sonucun karşılaştırılması ($\omega_n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $n_t=48$, $a_h=200$ mm, $l_r=2000$ mm, $b=50$ mm).

Hem analitik hem de numerik yolla elde edilen tillerin bir turu için moment hesabına ait diyagram aşağıda Şekil 4.12'te verilmiştir. Tekil moment hesabından elde edilen k_1 değeri 517 kN/m^2 alındığında ve analitik hesapla elde edilen tiller ataşmanı ortalama tepe aktif takım boyu uzunluğunun yaklaşık 275 mm olduğu bilindiğine göre; toplam moment $M_x=3555$ N.m olarak bulunur. Kümülatif moment diyagramı aşağıdaki Şekil 4.13'te

gösterilmiştir. Numerik analiz sonucunda bulunan ~ 4000 N.m' ye yaklaşık 11,125%'lik bir hata payı ile yaklaşılmıştır.



Şekil 4.13 Tiller atışmanı M_x moment-zaman diyagramı analitik hesap ile numerik sonucun karşılaştırılması ($\omega_n=400$ rpm, $v=280$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=500$ mm, $n_t=48$, $a_h=200$ mm, $l_r=2000$ mm, $b=50$ mm).

4.4 Serbest Hava Ortamı Patlama Yüğü Deneysel Doğrulama Sonuçları

Boyd'un (2000) test sisteminin dört farklı yöntem ile sabit bir iyileştirme oranına sahip farklı mesh yapılarında her bir numerik yöntemi dört farklı eleman sayısı ile çözmek suretiyle sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalara ait P1 noktasında hesaplanan tepe basınçlar test verileri ile Çizelge 4.1'de karşılaştırılmış olup toplam çözüm zamanları ve bağıl hatalar verilmiştir. Karşılaştırılan tüm yöntemlerde en sık mesh yapısına sahip modeller test verileri ile daha fazla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. ALE ve SPH yönteminde eleman sayısı arttıkça P1 noktasına etkiyen tepe basınç düşerken, hibrit yöntemde eleman sayısı arttıkça hesaplanan tepe basınç artmaktadır. Bunun sebebi hibrit metotta patlama hava ortamında hacimsel genişleme şeklinde ampirik olarak modellenip hedefe çarpan şok dalgalarının yansıması veya yansıyan dalgaların tekrar birleşmesinin söz konusu olmamasıdır.

Çizelge 4.1 ALE, SPH ve hibrit MMALE metotlarının farklı ağ yapıları ile karşılaştırması.

Yöntem	Ağ numarası	Eleman / Parçacık Sayısı	Yaklaşık eleman boyutu	CPU zamanı	P1 noktasında hesaplanan yaklaşık tepe basınç	ϵ -Bağıl Hata P1 (%)
ALE	1	158 256	2,5 mm -250 mm (bias)	21 467 saniye	~13,4 MPa	43%
ALE	2	106 651	3,7 mm - 250 mm (bias)	19 245 saniye	~14,5 MPa	54%
ALE	3	92 340	4 mm - 250 mm (bias)	18 831 saniye	~14,9 MPa	59%
ALE	4	16 301	5,5 mm - 250 mm (bias)	12 305 saniye	~17,2 MPa	83%
HİBRİT-MMALE	1	4 098 304	12,5 mm	19 112 saniye	~8,7 MPa	-7%
HİBRİT-MMALE	2	3 235 912	16 mm	13 456 saniye	~8,1 MPa	-14%
HİBRİT-MMALE	3	2 983 506	20 mm	11 304 saniye	~6,9 MPa	-27%
HİBRİT-MMALE	4	514 304	25 mm	8 306 saniye	~5,1 MPa	-46%
SPH	1	1 114 121	12,5 mm (Hedef Plaka)	82 379 saniye	~19,1 MPa	103%
SPH	2	1 373 76	12,5 mm (Hedef Plaka)	34 521 saniye	~22,5 MPa	139%
SPH	3	8 176	12,5 mm (Hedef Plaka)	7 884 saniye	~29,4 MPa	213%
SPH	4	2 176	12,5 mm (Hedef Plaka)	2 905 saniye	~35,2 MPa	274%

En ince mesh yapısına sahip dört farklı yöntemin sonuçları ve UFC-3-340-02 kılavuzu yardımıyla ampirik olarak hesaplanan sonuçlar Çizelge 4.2’de Boyd’un (2000) deneysel çalışmasının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Boyd (2000) 500 mm’lik mesafe ve 250 gr patlayıcı ile iki ayrı test gerçekleştirmiştir (E14 ve E15). Bu testleri parça üzerine yerleştirilen basınç transdüserleri yardımıyla tepe basınçların ölçümü ve aynı zamanda parçaların deplasman ve ivmelerini de ölçmüştür. Ne var ki deney düzeneğinde kullandığı çelik ve parçayı sabitleme sistemi ile ilgili fazla bilgi vermemiştir. Bu nedenle doğrulama kapsamında ivme ve yerdeğiştirmeye ait veriler numerik veriler ile hata oluşabileceği endişesi ile dikkate alınmamıştır.

Çizelge 4.2 CONWEP, ALE, Hibrit MM-ALE ve SPH yöntemlerinin karşılaştırmalı sonuçları.

Yöntem	Patlayıcı Miktarı	P1 noktasında hesaplanan Tepe Basınç	P1 Noktasında Deneysel Sonuçlara Göre Hata oranı	P2 noktasında hesaplanan Tepe Basınç	P2 Noktasında Deneysel Sonuçlara Göre Hata oranı
E14 Experiment	250 gr Pentolite	9,4 MPa	-	8,7 MPa	-
UFC-3-340-02 (UFC 3-340-02, 2008)	280 gr TNT	6,4 MPa	31,91%	5,8 MPa	33,34%
CONWEP	280 gr TNT	~9,6 MPa	2,12%	~7,8 MPa	10,34%
ALE	250 gr Pentolite	~13,4 MPa	42,55%	~9,1 MPa	4,59%
HİBRİT MM-ALE	250 gr Pentolite	~8,7 MPa	7,44%	~8,5 MPa	2,29%
SPH	250 gr Pentolite	~19,1 MPa	103,19%	~16,3 MPa	87,35%

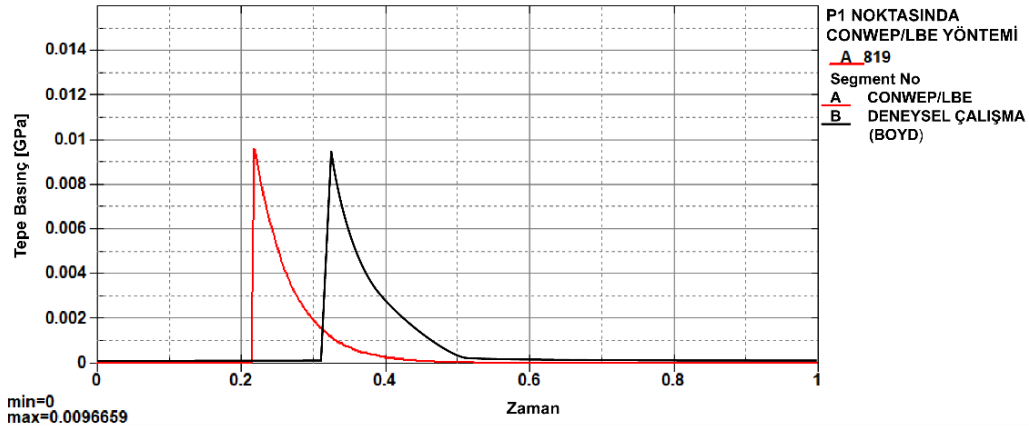
Herbir yöntem için sabit bir iyileştirme oranında ALE, SPH ve hibrit yöntem için mesh yakınsama analizi yapılmıştır. Bu yakınsama hesabına göre P1 noktasındaki tepe basınçların yakınsadığı değerler ve bu değerler için kullanılacak eleman boyutu veya parçacık sayısı Çizelge 4.3'te verilmiştir. Buna göre hibrit yöntemin yakınsadığı basınç değeri test verileri ile 3,19% sapma göstererek diğer yöntemlere göre çözüm süresi de göz önüne alındığında en yaklaşık sonucu vermektedir.

Çizelge 4.3 ALE, SPH ve hibrit MMALE metotlarına ait yakınsama çalışması.

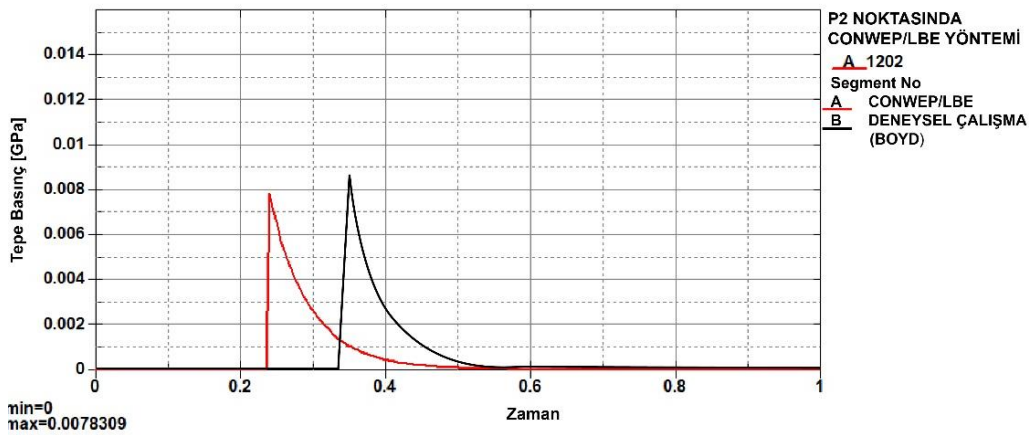
Yöntem	İyileştirme Oranı	Parçacık Sayısının Yakınsadığı Değer	Yakınsayan Eleman Boyutu	P1 Noktasındaki Tepe Basıncın Yakınsadığı Değer	P1 Noktası İçin Yakınsak Değer ile Hesaplanan Değer Arasındaki Fark (%)
ALE	1,5	-	1,6 mm	~12,95 MPa	7,64%
HİBRİT MMALE	1,25	-	10,5 mm	~9,1 MPa	4,39%
SPH	8	379 820	-	~17,42 MPa	9,64%

Yakınsama hata oranları %10'dan az olduğundan ve eleman sayısındaki artış CPU süresini artıracığından, en küçük eleman boyutlarına sahip simülasyonlarla deneysel karşılaştırma yapılmıştır.

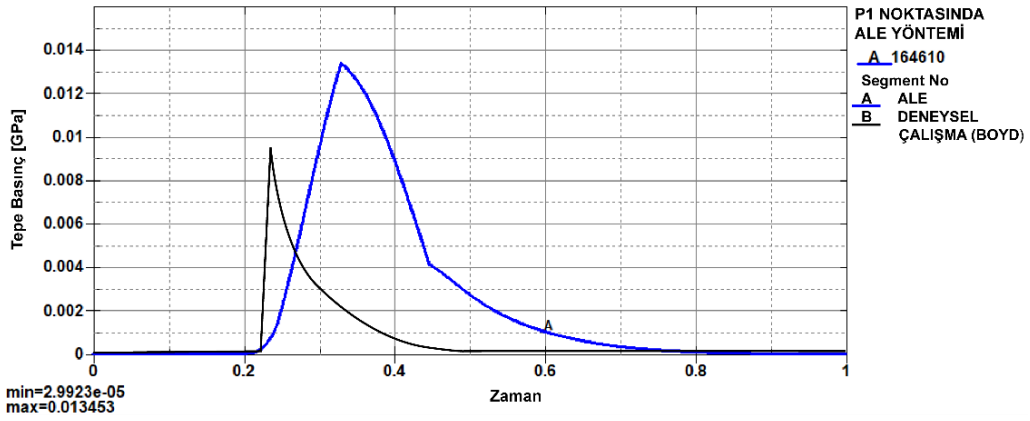
ALE ve hibrit MM-ALE yöntemlerinde eleman boyutunun küçülmesi hesaplama süresini arttırsa da hesaplanan basınçların deneysel sonuçlara yakınsadığı görülmektedir. Plaka, test sisteminde düşük karbonlu çelik (AS3678-250) olarak kullanılmıştır. Patlama basıncı ile plakanın yerdeğişimesi sonucu plaka titreşime maruz kalmaktadır. Dolayısıyla parça üzerine sabitlenmiş bir basınç transdüseri tarafından okunan verilerde, parçaya etki eden ivmenin sonucu olarak basınç dalgalı bir formdadır. Bu nedenle parçanın rijit kabul edildiği durumlar, ilgili noktalara etki eden tepe basınçları açısından daha temiz sonuçlar vermektedir. Plakanın rijit kabul edildiği durumlar için her bir yöntem için P1 ve P2 noktaları tepe basıncının zamana bağlı değişimini gösteren diyagramlar Şekil 4.14-4.21 arasında verilmiştir.



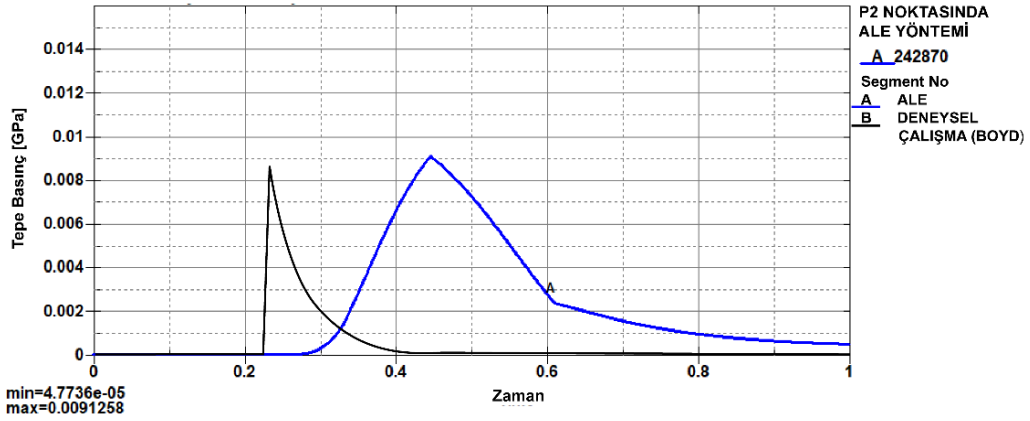
Şekil 4.14 CONWEP yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



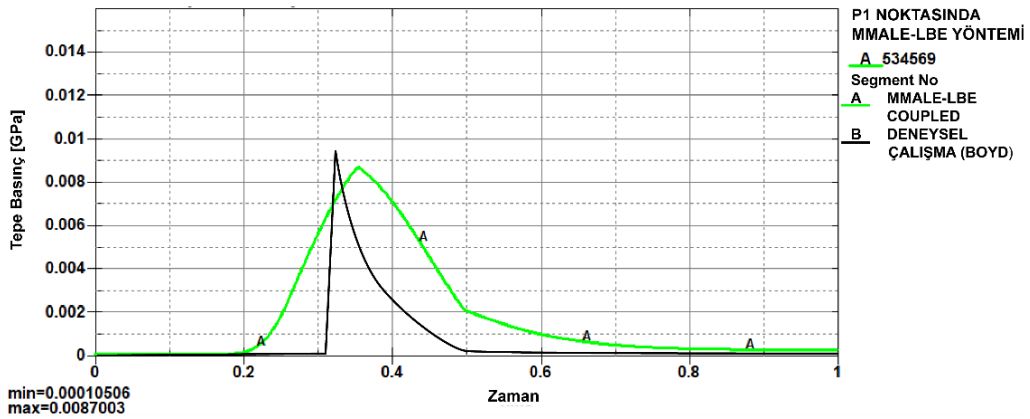
Şekil 4.15 CONWEP yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



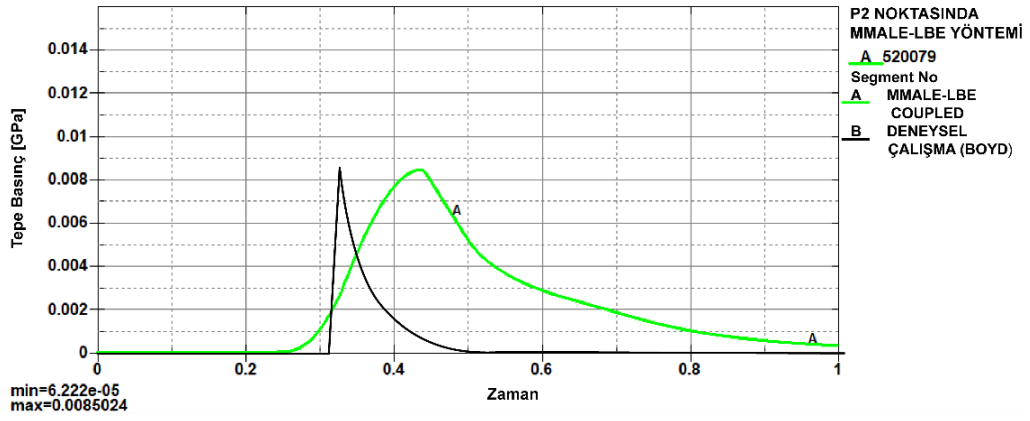
Şekil 4.16 ALE yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



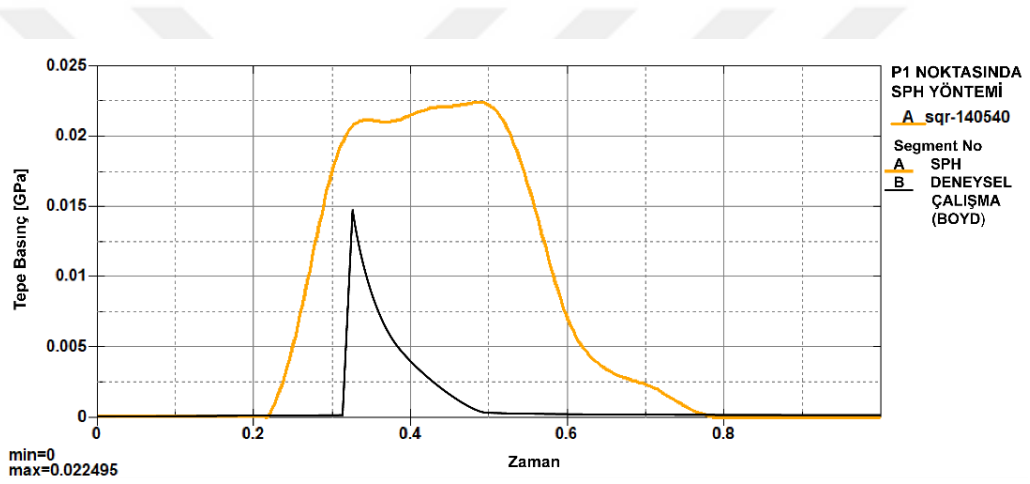
Şekil 4.17 ALE yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



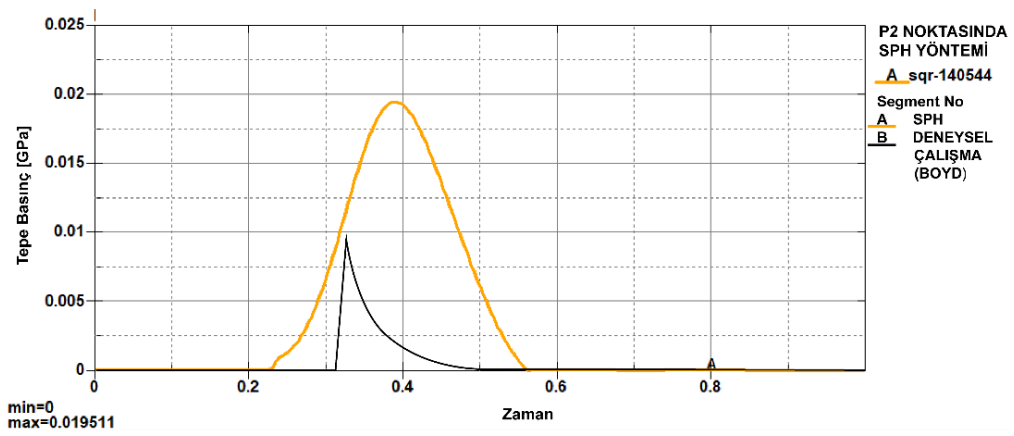
Şekil 4.18 Hibrit ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



Şekil 4.19 Hibrit ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.

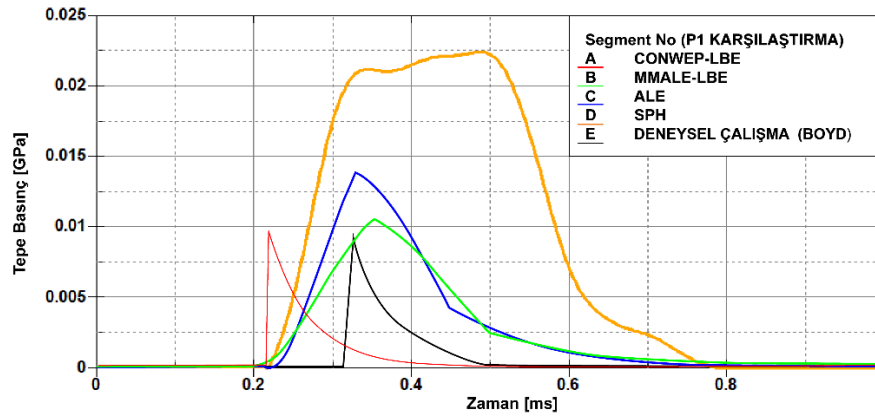


Şekil 4.20 SPH yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.

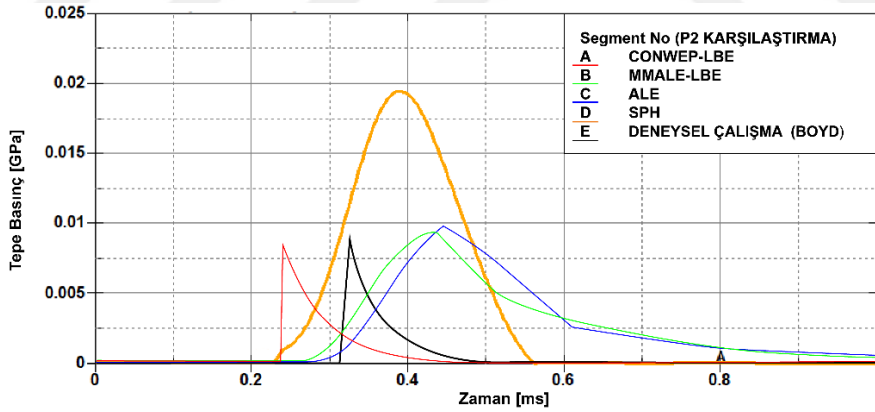


Şekil 4.21 SPH yöntemi ile elde edilen, plakanın rijit olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.

Farklı yöntemlerin aynı diyagram üzerinde P1 ve P2 noktalarındaki tepe basınç açısından karşılaştırması ise Şekil 4.22'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde CONWEP yöntemi hesaplama süresi ve hesaplanan basınçlar dikkate alındığında en yakın sonuçları vermiştir. Ancak CONWEP yönteminde TNT verileri kullanıldığı için Şekil 4.22'de görüldüğü gibi test verilerine göre zaman kayması söz konusudur. Bunun nedeni, TNT patlama hızının pentolit patlama hızından daha yüksek olmasıdır.



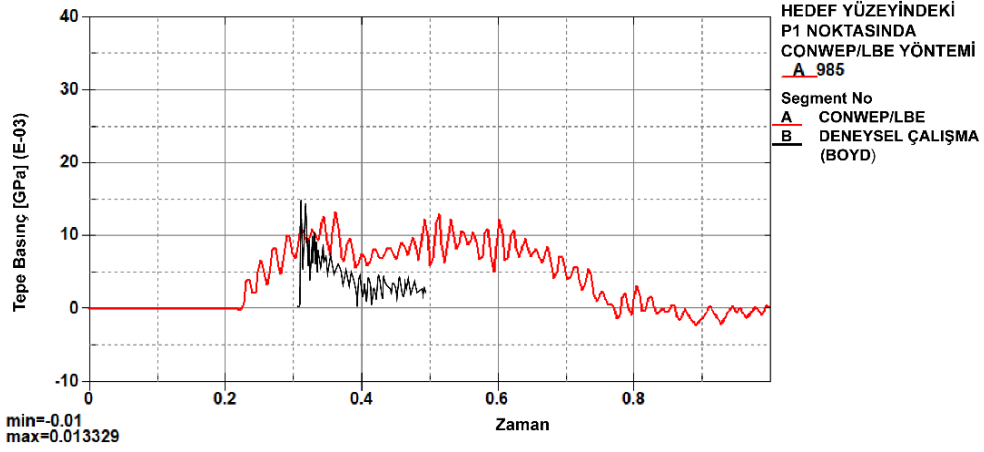
(a)



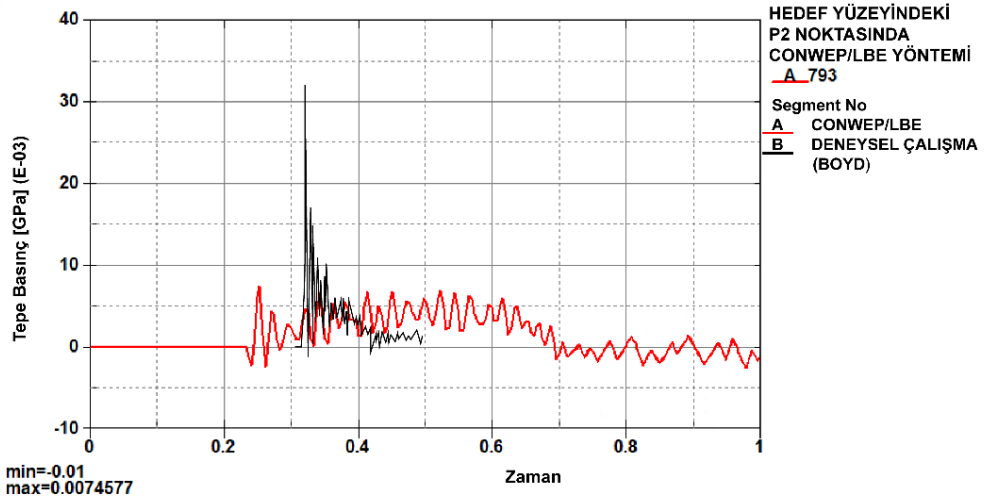
(b)

Şekil 4.22 Farklı yöntemlerle elde edilen (a) P1 ve (b) P2 noktalarındaki tepe basınç-zaman diyagramı.

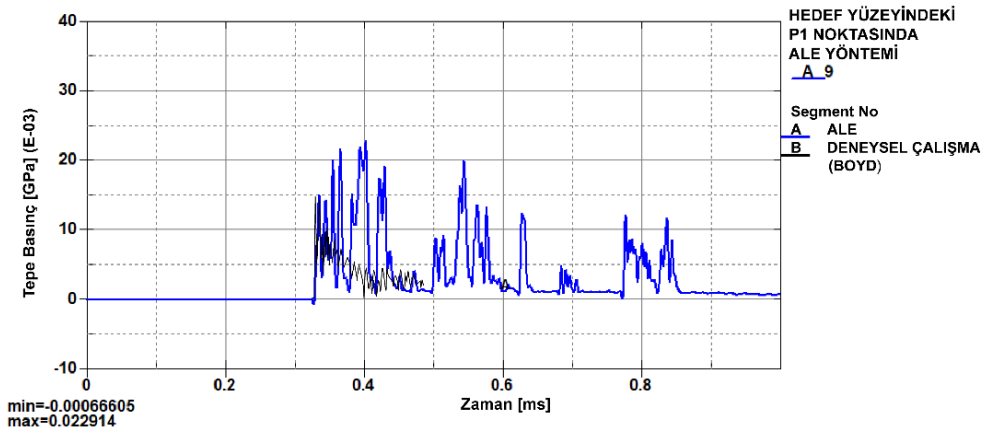
Plakanın elastik kabul edildiği durumlarda parçaya etki eden basınç ivme ve sehimlere ve titreşimlere neden olur. P1 ve P2 noktalarındaki basınç sensörünün parça üzerine sabitlendiği durumlardaki basınç-zaman diyagramları Şekil 4.23-4.30 arasındaki grafiklerde verilmiştir. Basınç değerlerindeki zamana bağlı dalgalanmaların sebebi budur.



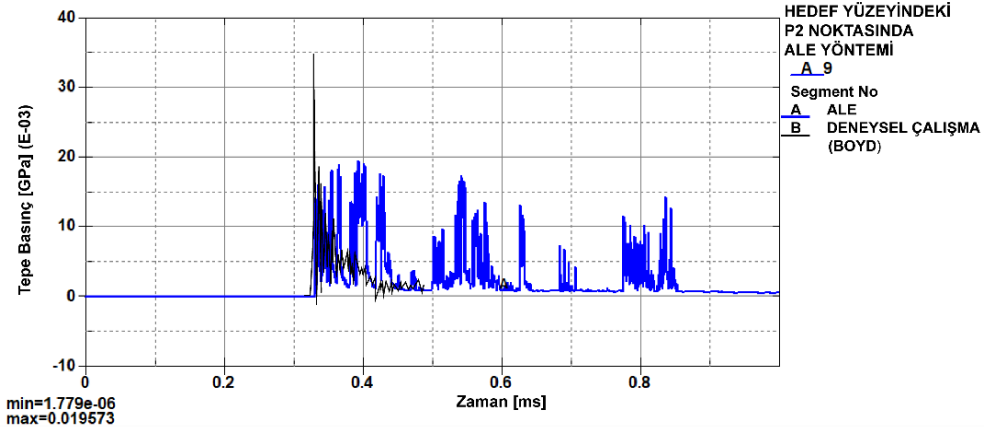
Şekil 4.23 CONWEP yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiği durumda P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



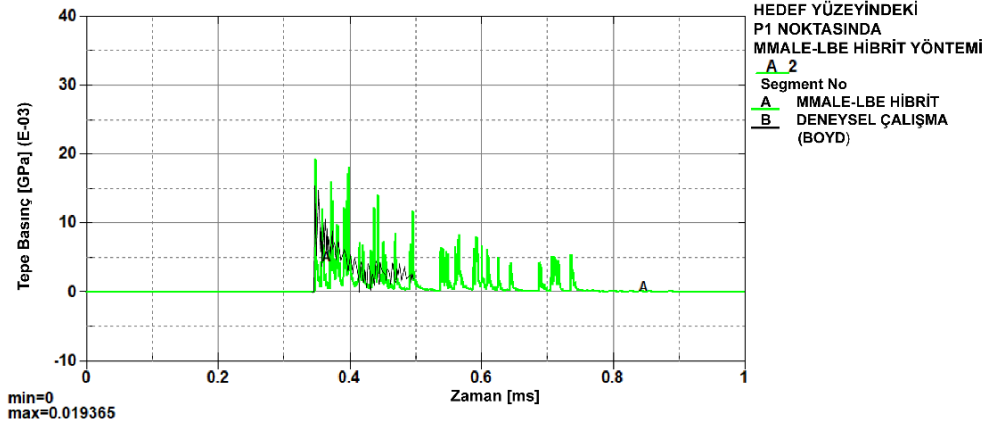
Şekil 4.24 CONWEP yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiği durumda P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



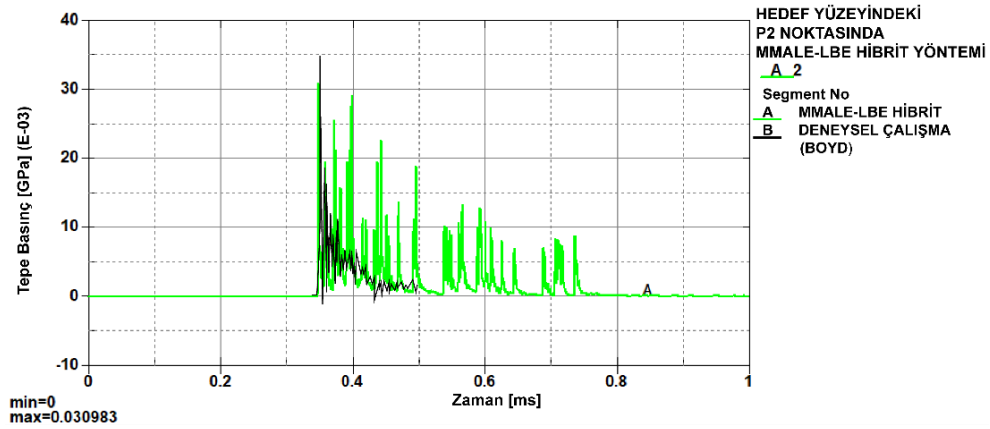
Şekil 4.25 ALE yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



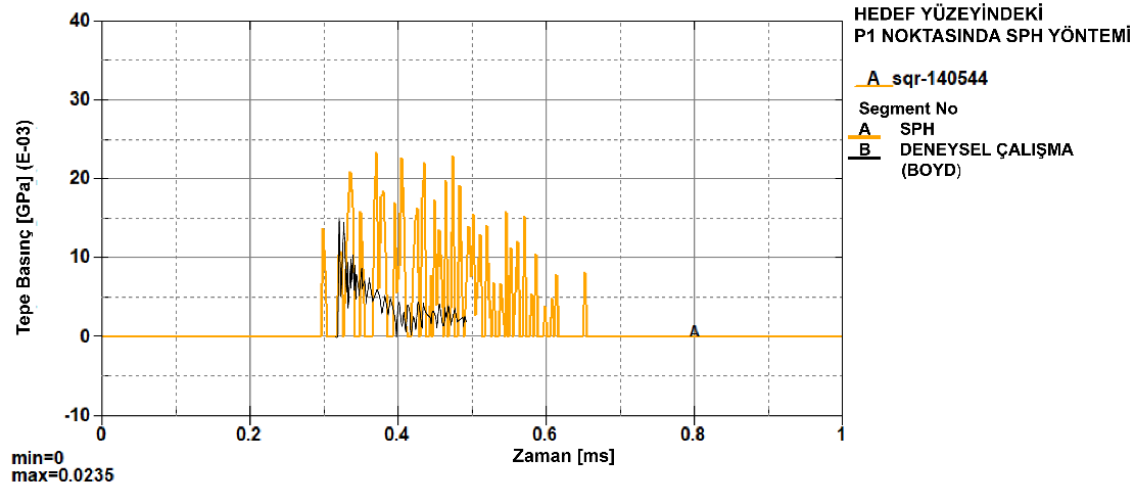
Şekil 4.26 ALE yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



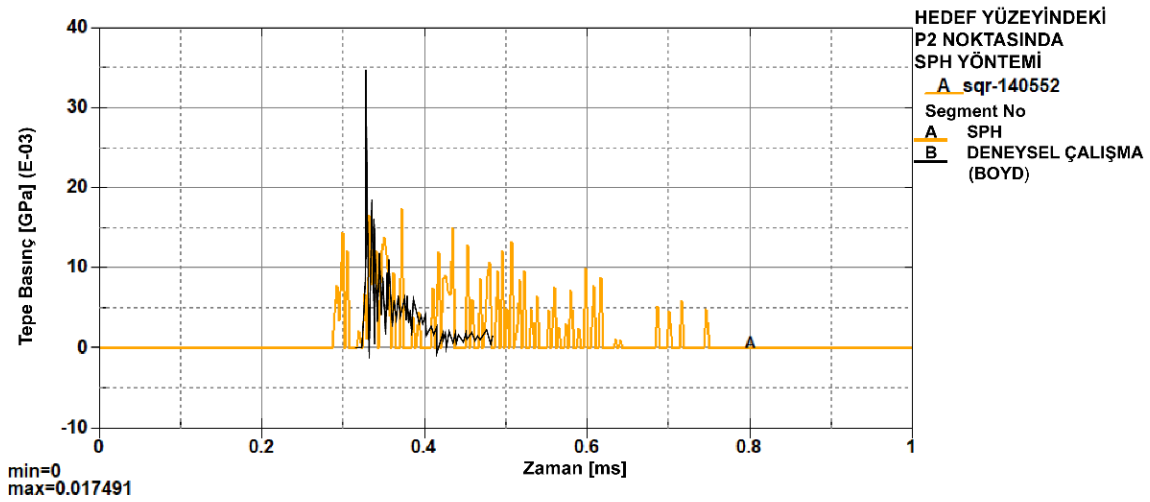
Şekil 4.27 Hibrit Yöntem ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



Şekil 4.28 Hibrit Yöntem ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



Şekil 4.29 SPH Yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P1 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.



Şekil 4.30 SPH Yöntemi ile elde edilen, plakanın elastik olduğu kabul edildiğinde P2 noktasındaki tepe basınç-zaman diyagramı.

Eleman boyutunun küçülmesi ile ALE ve SPH yöntemlerinde tepe basınç değerleri azalarak gerekli değere yakınsarken, hibrit yöntemde ters bir ilişki söz konusudur. Bunun nedeni hibrit yöntemde patlama sonucu oluşan basınç dalgasının akışkan ortamda hızlı bir hacim genişlemesi olarak modellenmesidir. Bu genişleme sonucu oluşan basınç artışı adveksiyon yöntemiyle Euler elemanları üzerinden taşınır.

Tüm sonuçlara göz önüne alındığında, hibrit yöntemin bu deney sistemi özelinde çözüm süresi ve deneysel sonuçlarla daha fazla örtüşmesi nedeniyle serbest hava ortamında

patlama yüklerinde en güvenilir sonuçları verdiği görülmektedir. ALE yönteminde mesh yakınsama analizi dikkate alındığında P1 noktasındaki tepe basıncın 12,95 MPa'da yakınsadığı görülmektedir. Bu sonuca göre %37,7 hata hesaplanmıştır. Daha hassas çözümler için hem hava elemanları hem de patlayıcı elemanları için eleman boyutunun küçültülmesi gerekmektedir. SPH yöntemi ile yapılan çözümlerde çözümün 17,42 MPa'da yakınsadığı ve dolayısıyla %85 hata oranı oluşturduğu görülmektedir. SPH yönteminde hem P1 hem de P2 noktalarında hesaplanan basınçlar test değerlerinden oldukça yüksek olmasına rağmen parçacık sayısının artmasıyla doğruluk artmaktadır. Öte yandan, basınç dalgasının ilgili noktalara ulaşma süresi test verileri ile örtüşmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre hibrit yöntemin tamamen küresel serbest hava patlaması yükleme durumlarında hem çözüm süresi hem de yakınsama açısından diğer yöntemlere göre avantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte, karmaşık geometrilerde, yansıyan basıncın hedefe etki eden basınç üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yansıyan basıncın etkisi hibrit yöntemde modellenemez. Bu nedenle, Çizelge 4.1'den de görülebileceği gibi eleman boyutu küçüldükçe tepe basıncı azalır. SPH yönteminde diğer yöntemlere göre daha fazla dalgalanma görülmektedir. Bunun nedeni hava sahasının modellenmemiş olmasıdır. Farklı senaryolar için uygun hesaplama yöntemi seçim kriterleri aşağıdaki Çizelge 4.4'de verilmiştir. Buna göre patlayıcı geometrisi, akışkan ortamı, çözüm süresi, patlayıcı türü, şok dalga parametrelerinin modellenmesi gibi kriterler sayısal tasarım için en önemli parametrelerdir. Hedef plakası üzerine yerleştirilen basınç transdüserlerinde hedefin titreşimi basınç değerlerinde dalgalanmalara neden olur.

Çizelge 4.4 CONWEP, ALE, hibrit MM-ALE and SPH metotlarının özet seçim kriterleri.

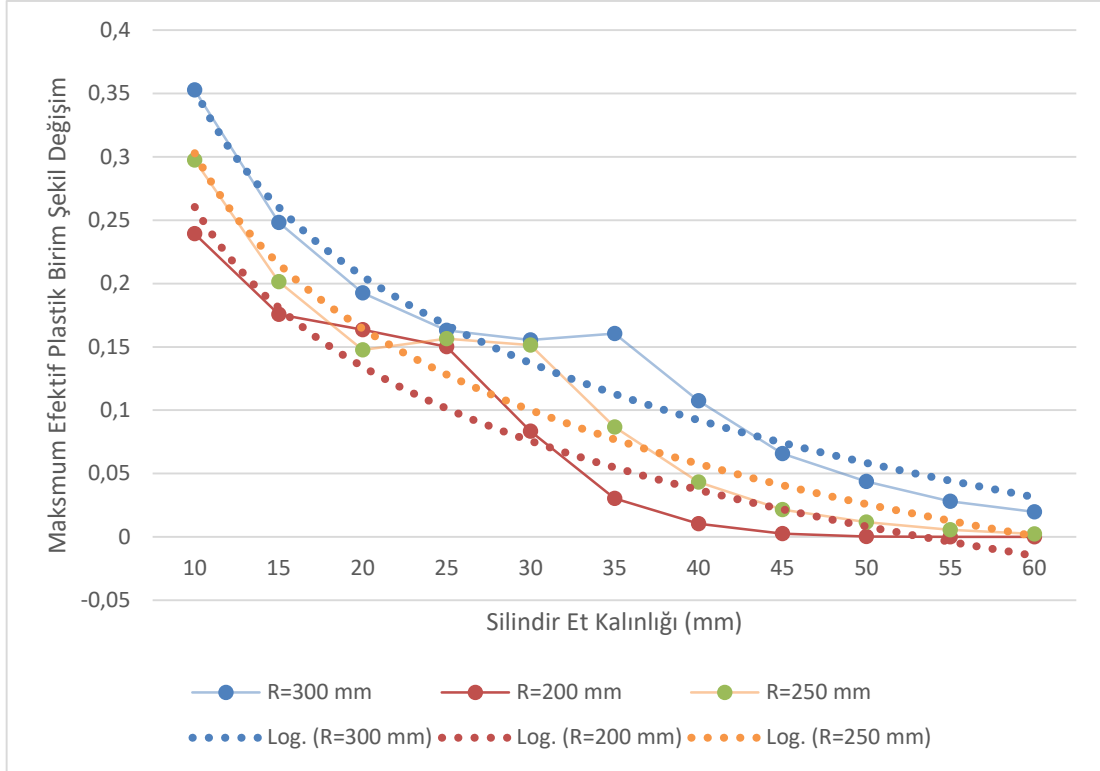
Yöntem	Patlayıcı Geometrisi	Patlayıcı Cinsi	Çözüm Süresi	Şok Dalgasının Modellenenebilmesi	Patlayıcı Ortamının Modellenenebilmesi
CONWEP	Küresel	TNT	Kısa	Mümkün Değil	Mümkün Değil
ALE	Herhangi	Herhangi	Uzun	Mümkün	Mümkün
Hibrit MM-ALE	Küresel	Herhangi	Orta	Mümkün	Mümkün
SPH	Herhangi	Herhangi	Orta	Mümkün Değil	Mümkün Değil

4.5 Tiller Ataşmanının Patlama Yüğü Davranışı

Silindirik rotor için 13,5 kg'lık TNT ve 200 mm'lik patlama mesafesi içi ölçeklenmiş mesafe Z; 0,084 olarak bulunmaktadır. Fakat bu değeri UFC-3-340-02 kılavuzunda yer almamaktadır. Z ölçekli mesafesi ilgili diyagramda 0,1'den başlamaktadır. Dolayısıyla bu ölçeklenmiş mesafe değerlerinde UFC-3-340-02 kılavuzu kullanılabilir değildir. Bu nedenle farklı silindir yarıçapları (200, 250, 300 mm) için hibrit MMALE yöntemiyle ayrı ayrı paylayıcının silindirin tam merkezinde olduğu durumlar için numerik hesaplamalar yapılmış ve bu ölçekli mesafeye göre silindir et kalınlığı-maksimum efektif plastik birim şekil değişim grafiğı çıkartılmıştır. Bu bilginin gerek tiller ataşmanında gerekse silindirik rotor kullanan diğer ataşmanların tasarımında kullanılması ve ön tasarım konusunda süreci hızlandırması planlanmaktadır.

4.5.1 Silindirik Rotorun Patlama Yüğü Karşısındaki Davranışı

200 mm, 250 mm ve 300 mm'li yarıçaplardaki ARMOX 500T malzemeden yapılmış silindirler 200 mm uzaklıkta 13,5 kg'lık yarı küresel TNT patlama yüğü altında incelenmiştir. Farklı et kalınlıklarına göre her çap için 11 adet simülasyon koşulmuş ve ilgili noktalardan geçecek bir logaritmik eğilim çizgisi eklenmiştir. Plastik şekil değişimi olmadan kullanılabilecek et kalınlıkları Şekil 4.30'de verilen grafikte noktalı çizgi olarak gösterilen eğilim çizgilerinin x eksenini kestiğı noktalardır. Grafikten anlaşılacağı üzere silindir çapı azaldıkça ihtiyaç duyulan et kalınlığı da azalmaktadır.



Şekil 4.31 Farklı et kalınlıklarındaki ve yarıçaplardaki maksimum efektif birim şekil değişimi.

Şekil 4.31’de verilen grafiğe göre anti-tank mayınlarının oluşturacağı patlama yüküne maruz kalacak silindirik bir tiller ya da farklı bir ataşmanın, bu yüke karşı mukavim olabilmesi için örneğin yarıçapı 200 mm olan bir silindirin et kalınlığının minimum 53,5 mm olması gerektiği anlaşılmaktadır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez kapsamında uzaktan kumanda edilen mayın temizleme araçlarında kullanılan patlayıcıyı infilak ettirmek suretiyle mayın temizleyen tiller ataşmanlarının ilerleme hızı, açısal hız, takım yerleşim planı ve takım geometrisi gibi parametreler üzerinden sayısal tasarımı ve analitik hesaplama yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Tiller rotoru üzerinde belirli bir helis üzerinde dizili takımların toprağa girme sıraları ve anlık olarak toprak içerisinde bulundukları mesafelerin toprağın göstereceği direnç ile doğru orantılı olacağı varsayımıyla yapılan analitik hesaplamalar, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre sonlu elemanlar yönteminde kullandığımız FHWA toprak malzeme modeli toprağa ait birçok parametreyi karşılaştırabilmeye imkan sağladığı için farklı toprak yapıları için toprak sınıflarına ait spesifik kesme direnci aralığı belirlenmiştir. Analitik ve numerik sonuçların örtüştürülmesi ile hesaplama süresi oldukça uzun olan toprak ile tiller ataşmanı etkileşimi sonucunda rotorun ihtiyaç duyduğu moment, kısa sürede hesaplanabilecektir.

Diğer taraftan rotor üzerine helisel takım dizilimi parametrelerinin moment kararlılığı anlamında etkisi büyüktür. Takım sayısı, helis adımı ve helis tur sayısı parametreleri rotorun bir turunda toprak içerisinde kalacak takım boylarını etkilemekte ve bu değişim de momentin dinamik bir şekilde etkimesine neden olmaktadır. Yüksek devirlerde çalışan tiller rotorlarının dinamik yüklemeye maruz kalması yorulmaya ve kısa sürede beklenmeyen hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle 2000 mm uzunluğunda bulunan bir rotorda dizili 48 adet takım olan örnek bir çalışmada helis adımına karşılık gelen moment değişimi-helis adımı grafiği elde edilmiş ve optimum değerler elde edilmiştir.

Rotor üzerine bağlı farklı ağırlıkların rotorda sarsma kuvvetleri oluşturabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle her bir kütle için eylemsizlikler hesaplanmış ve rotorun iki yanal düzlemine gerekli ağırlıklar MS Excel yardımıyla hesaplanmıştır. Analitik hesaplama sonucu elde edilen veriler ışığında işleme derinliği, açısal hız, ilerleme hızı, rotor çapı gibi parametrelerin toplam moment gereksinimi ile ilişkileri ortaya konmuş ve bundan sonraki tasarım süreçleri hızlanmıştır.

Tiller ataşmanı mayın ve patlama etkilerine en fazla maruz kalan yapı olduğu için patlama yüküne karşı gerilme ve şekil değişimlerinin bilinmesi ve bunun için de patlama yükünün oluşturacağı basınç ve süre bilgileri bilinmelidir. Bu nedenle patlama yükünün sonlu elemanlar metodu ile çözülmesi gereklidir. Patlama yükünü sayısal yöntemler ile çözebilecek ALE, SPH, hibrit MMALE gibi yöntemler olduğu gibi ampirik hesaplama ilkelerine dayanan CONWEP gibi hesaplama yöntemleri de vardır. Tüm bu yöntemleri kıyas edilebilmesi için test verileri üzerinden karşılaştırması gerekmektedir.

Bu çalışmada Boyd'un (Boyd, 2000) küresel bir patlama yükü altında belirli bir mesafedeki hedef çelik levha üzerinde yaptığı deneysel çalışma, farklı sayısal yöntemler kullanılarak doğrulanmaya çalışılmıştır. Farklı hesaplamalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Patlayıcı yüküne bağlı olarak gerçek durumlarda patlayıcı tipi, geometrisi ve ortam koşulları farklılık gösterebilir. Bu nedenle belirli bir hesaplama yöntemine daha güvenilir demek doğru değildir. Her yöntem farklı durumlarda analiz için değerlendirilebilir.
- ALE yöntemi ve hibrit yöntemler aynı yaklaşımı kullanmasına rağmen, dalga formunun küresel yayılımı çoğunlukla hem patlayıcı hem de hava alanları ağ yapısı ile ilgilidir. ALE yönteminde, ağ yapısının neden olduğu aşırı hata oranı elde edilir. Hibrit yöntemde aynı parametreler kullanılmasına rağmen hata oranı oldukça düşüktür.
- Literatürde deneysel çalışmalar, küresel veya yarı küresel patlama yüklerine maruz kalan yapılara maruz bırakılmıştır. Özellikle ALE ve hibrit MM-ALE yöntemlerinde gerekli parametrelerin doğru olarak belirlenmesi için farklı geometri ve farklı tipteki patlayıcılar için daha fazla deneye ihtiyaç vardır.
- Sayısal yöntemler, özellikle ölçeklendirilmiş mesafenin 0,4 ile 1 arasında olduğu orta menzilli patlama yükleri için umut verici sonuçlar verir.
- Patlatma yüklemesi gibi doğrusal olmayan analizlerde, hesaplanan zaman adımı için ölçek faktörü 0,67'nin altında tanımlanmalıdır. Bu değerın düşürülmesi çözüm süresini artırır ve çözümün yakınsamasını kontrol etmek için farklı değerlerle çözülebilir.

- Eleman boyutu küçüldükçe sayısal yöntemler daha doğru sonuçlar vermektedir. Ölçeklenen mesafe azaldıkça, eleman boyutunun da küçülmesi gerekir.
- SPH yöntemi diğer yöntemlere göre çözüm süresi ve sonuçları açısından ön tasarım süreçlerinde kullanılabilir. Ancak parçacık sayısı ve SOFSC, TSSFAC ve CSLH parametreleri ile ilgili yakınsama çalışmaları yapılmalıdır.

Tiller ataşmanına ait sayısal parametrelerin tasarımından sonra rotor ve takım dizilimi üç boyutlu olarak da tasarlanmış ve anti-tank mayının sahip olabileceği en yüksek patlayıcı miktarı temel alınarak hibrit yöntem ile patlama yükü silindirin tam merkezinde olacak şekilde parça üzerine tatbik edilmiştir. Genellikle tiller rotoru silindirik olarak imal edilmektedir. En yüksek mayın patlayıcı içeriği olan 13,5 kg'lık 200 mm derinlikte TNT patlama yükü altında farklı çaplarda ve farklı et kalınlıklarında çalışma yapılmıştır. Sabit rotor çapında et kalınlıkları arttıkça asimptotik bir şekilde efektif plastik birim şekil değişimleri sıfıra yaklaşmaktadır. Aynı çapa sahip rotor için 11 farklı et kalınlığı üzerinde çalışma yapılmış ve bir grafik üzerinde belirtilmiştir. Hesaplanan değerlere göre elde edilen eğri logaritmik bir eğilime uymaktadır. Şekil 4.31'de verilen grafik farklı et kalınlıkları ve çaplardaki rotorların plastik şekil değişimine maruz kalmadan dayanabilecekleri et kalınlıklarını vermektedirler. Bu grafikte elde edilen sonuca göre rotor çapı azaldıkça ihtiyaç duyulan et kalınlığı azalmaktadır. Ayrıca Şekil 4.31'de verilen bu grafik ile mayın temizleme tiller ataşmanı ön tasarımında silindirik rotor gerekli et kalınlığı için öngörü yapılmasını sağlayacaktır. Fakat patlama yükünün silindirin eksen doğrultusunda tam merkezde olmadığı durumlar için de ayrıca çalışma yapılmalıdır. Tiller takımları genellikle tungsten karbür gibi çelik malzemeye kıyasla yüksek sertlik, yüksek aşınma dayanımı ve yüksek tokluğu nedeniyle taşlık ve kayalık arazilerde de daha uzun ömür ile çalışabilen mukavim malzemelerden seçilmektedir. Diğer taraftan rotora ait yapısal malzemeler ise ARMOX gibi tokluğu ve sünekliği yüksek zırh çeliklerinden imal edilmektedir.

Tez kapsamında yapılan tüm çalışmalar değerlendirildiğinde uzaktan kumandalı mayın temizleme araçlarında sıklıkla kullanılan tiller ataşmanına ait gerekli moment hesabını tüm tasarım parametrelerini göz önünde bulunduran bir analitik hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Bu analitik hesaplama yöntemine ait EK 1'de verilen bir MATLAB kodu

oluşturulmuş ve farklı boyutlarda ve isterlerdeki tiller ataşmanı tasarım süresi oldukça kısalmıştır. Aynı zamanda parametrelerin etkileri de kolayca izlenebilmektedir. Bu parametrelere göre tasarlanan tiller ataşmanının diğer önemli aşaması ise mayınların oluşturduğu patlama yüklerine mukavim bir yapıya sahip olması mayın temizleme işinin daha sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır.

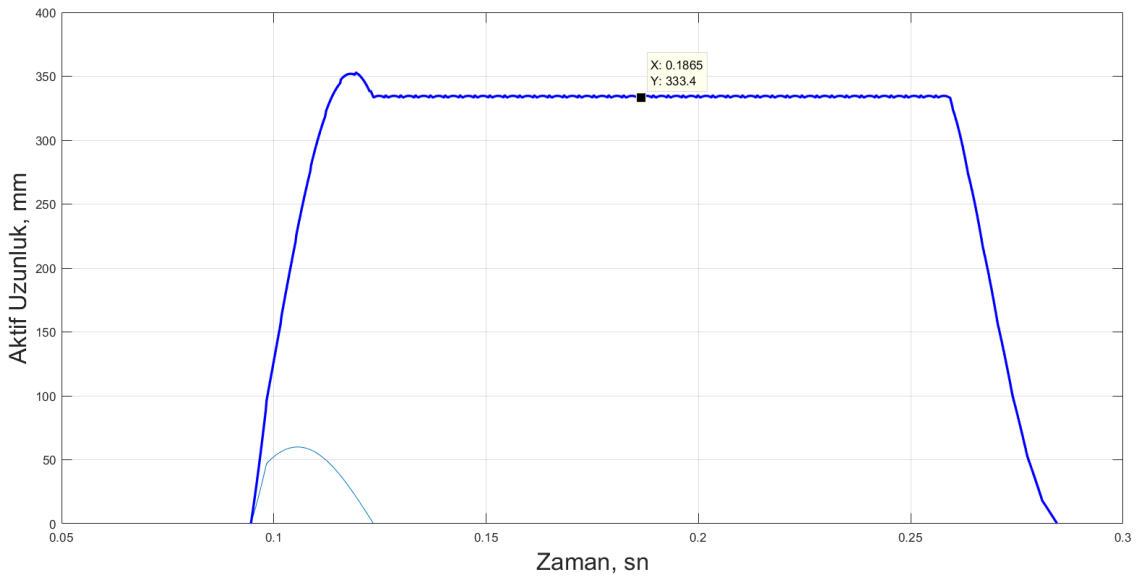
Patlama yüküne maruz kalan yapıların plastik ve elastik şekil değişimi, şekil değişim hızları, yer değiştirmeleri, yer değiştirme hızları ve hasar durumlarının sayısal yöntemler ile çözülmesinde Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmaktadır. Bu modelin matematiksel işleyişi Bölüm 2.7.1’ de verilmişti. Bu tez kapsamında kullanılan Johnson-Cook malzeme parametreleri literatürden alınmış olup herhangi bir deneysel doğrulamaya tabi tutulmamıştır. Bu modele ait parametrelerin belirli bir malzeme özelinde ‘Split Hopkinson’ test sistemi ile doğrulanması ve belirlenmesi bu tez çalışmasının devamı niteliğinde yapılması konunun daha kapsamlı anlaşılmasına yol açacaktır. Diğer taraftan bu malzeme modeli ile termal yumuşama veya ısı etkileri de hesaba katılmaktadır.

Mayın temizleme ataşmanı tasarımında önemli olabilecek bir diğer çalışma ise yapının titreşim analizidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile bulunabilecek titreşim genliği ve frekansı ile yapının titreşim analizi de yapılabilir. Tez kapsamında ataşmanın titreşimi ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Ataşmanın doğal frekansı tasarımının da yapılacağı bir çalışma ile yapının titreşim karşısındaki davranışları incelenebilir.

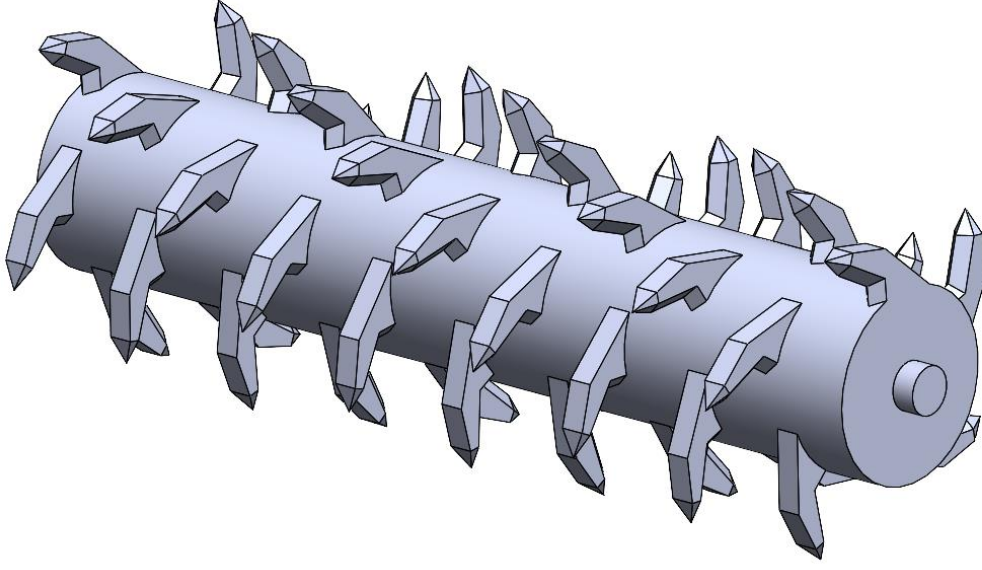
Bir diğer önemli husus ise ataşmanın toprak işleme esnasında maruz kaldığı tekrarlı dinamik yükler neticesinde oluşabilecek yorulma problemleridir. Takım yerleşimi ile optimize edilebilen moment dolayısıyla gerilme genliği belirli bir tekrar sayısında takımlarda beklenmeyen hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle tiller ataşmanı tasarımında yorulma konusu da çalışılması gereken bir diğer önemli konudur.

Ayrıca tez kapsamında hem analitik hem de numerik çözümlemesi yapılan takım-toprak etkileşimi kohezyon, iç sürtünme açısı, kesme gerilmesi gibi önemli toprak parametrelerinin değişimi ile deneysel olarak modellenip doğrulanması analitik hesabın güvenilirliğini artıracaktır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde birçok mayın temizleme makinasındaki gibi 2000 mm’lik bir iş genişliği ve 400 mm’lik bir ataşman yarıçapına sahip tiller ataşmanı için moment düzgünsüzlüğünün en az olduğu takım dizilimi; 48 adet takım, 200 mm’lik helis adımı, 350 mm/sn’lik ilerleme hızı ve 370 devir/dk’lık dönüş hızı ile elde edilmektedir. Bu durumda; Ortalama anlık takım boyu 333 mm olmakta ve 50 mm takım genişliğine sahip tiller ataşmanında en ağır toprak şartlarında 3412 Nm’lik bir moment ihtiyacına tekabül etmektedir. Bu ataşmanın ihtiyacı olan güç ise 132 kW olacaktır. Bu şartlar altında aktif takım boyunun zamana bağlı değişimi Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Optimum tiller takımının toprak içerisindeki aktif uzunluğunun zamanla değişimi ($\omega_n=370$ rpm, $v=350$ mm/sn, $d=200$ mm, $r=400$ mm, $n_t=48$, $a_h=200$ mm, $l_r=2000$ mm, $b=50$ mm).



Şekil 5.2 2000 mm iş genişliğine sahip mayın temizleme makinası için optimum tiller takımının takım yerleşimi.

Şekil 5.2’de ise 2000 mm iş genişliğine sahip tiller ataşmanı için optimum takım yerleşimi verilmiştir. Bu yerleşime göre takım yüksekliği 200 mm ve rotor çapı da 400 mm olmalıdır. Şekil 4.31’de ki diyagrama göre silindirik rotorun patlamaya karşı mukavim olabilmesi için et kalınlığı en az 53,5 mm seçilmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Alia A, Souli M, 2006, High Explosive Simulation Using Multi-Material Formulations, *Applied Thermal Engineering*, 26, 1032–1042.
- Anderson J D, 2001, *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc-Graw Hill, 1130s, New York.
- Anonim, 1998, *Humanitarian Demining: Developmental Technologies*, Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı, (OCO LC)40577034, Washington D.C.
- Anonim, 2007, *Toward a Mine-free World*, Human Rights Watch, Landmine Monitor Report, International Campaign to Ban Landmines, ISBN: 978-0-9738955-2-0, Kanada.
- ASAE EP542.1, 2019, *Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer*, Amerika Birleşik Devletleri.
- Baker W E, 1974, *Explosions in Air*, University of Texas Press, 268s, Austin.
- Brode H L, 1955, Numerical Solutions of Spherical Blast Waves, *Journal of Applied Physics*, 26, 766–775.
- Dobratz B M, Crawford P C, 1981, *LLNL Explosives Handbook - Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants*, UCRL 52997, 511s.
- Erdik A, Uçar, V, 2018, On Evaluation and Comparison of Blast Loading Methods Used in Numerical Simulations, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 1385-1391.
- Fichera C, Peroni, L, Scapin M, 2013, Numerical Simulation of Landmine Explosions: Comparison Between Different Modelling Approaches, V International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, 17-19 Haziran 2013, Ibiza, 708-719.
- Flis L, Dobrociński S, 2015, Numerical Simulations of Blast Loads from Near-Field Ground Explosions in Air, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37, 11-17.
- Friedlander F G, 1946, The Diffraction of Sound Pulses, I. Diffraction by a Semi-infinite Plane, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 186, 322–344.

- Nurick G N, Martin J B, 1989, Deformation of Thin Plates Subjected To Impulsive Loading-A Review -Part I: Theoretical Considerations, *Int. J. Impact Eng.*, 159–170.
- Granström S A, 1956, Loading Characteristics of Air Blasts from Detonating Charges, Lindstahl, 93s, Stockholm.
- Hallquist J O, 2006, LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, 680s, Kaliforniya.
- Han Y, Liu H, 2015, Finite Element Simulation of Medium-Range Blast Loading Using LS-DYNA, *Journal of Shock and Vibration*, 2015, Makale ID 631493.
- Hyde D W, 1991, Conventional Weapons Program (CONWEP), U.S Army Waterways Experimental Station, 39s, Vicksburg, Mississippi.
- Kingery C, Bulmash G, 1984, Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Burst, AD-B082 713, 51s.
- Lee E L, Hornig H C, Kury J W, 1968, Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products, Technical Report TID 4500-UCRL 50422, Amerika Birleşik Devletleri, 2s.
- Luo H, Baum J D, Löhner R, 2004, On the Computation of Multi-material Flows Using ALE Formulation, *Journal of Computational Physics*, 194, 304–328.
- Martynenko A V, 2001, Anti-personnel Landmines: A Force Multiplier or an Operational Liability in the 21st Century, ADA392968, 86s.
- Mikulić D, 2012, Design of Demining Machines, Springer, 221s, Londra.
- Niezgoda T, Morka A, 2009, On the Numerical Methods and Physics of Perforation in the High-velocity Impact Mechanics, *World Journal of Engineering*, 414-416.
- Poteet A N, 2008, Landmine Removal Technology Review and Design Proposal as Pertaining to Humanitarian Demining with a Focus on Locomotion Across Soft Terrain, Massachusetts Institute of Technology, Yüksek Lisans Tezi, 42s, Cambridge, Massachusetts.
- Rahmani N A, 2006, Electronic System for Deactivation of Clock- Activated Bombs with the Help of Liquid Nitrogen, Akbar Rahmaninejad Civil Aviation Organisation of

Iran, 1-10.

Randers-Pehrson G, Bannister K, 1997, Air Blast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D, ARL-TR-1310, 88s.

Rebelo H B, Cismasiu C, 2017, A Comparison Between Three Air Blast Simulation Techniques in LS-DYNA, 11th European LS-DYNA Conference, 18 Nisan 2017, Stuttgart.

Reid J D, Coon B A, Lewis B A, Sutherland S H, Murray Y D, 2004, Evaluation of LS-DYNA Soil Material Model 147, FHWA-HRT-04-094, 89s.

Rigby S, 2014, Blast Wave Clearing Effects on Finite-Sized Targets Subjected to Explosive Loads, University of Sheffield, The Department of Civil and Structural Engineering, Doktora Tezi, 168s, Sheffield.

Saleh M, Edwards L, 2011, Application of a Soil Model in the Numerical Analysis of Landmine Interaction with Protective Structures, 26th International Symposium on Ballistics, 12-16 Eylül 2011, Miami, Florida.

Savrukoğlu İ, 2016, Kulaklı Pullukların Kulak – Toprak İlişkisinin Numerik ve Analitik Yöntemler ile Modellenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 207s, İstanbul.

Schwer L, 2016, Jones-Wilkens-Lee (JWL) Equation of State with Afterburning, 14th International LS-DYNA User Conference, 12-14 Haziran 2016, Detroit, ABD, 1-29.

Slavik T P, 2009, A Coupling of Empirical Explosive Blast Loads to ALE Air Domains in LS-DYNA, 7th European LS-DYNA Conference, 14-15 Mayıs 2016, Salzburg.

Smith P D, Rose T A, Saotomlang E, 1999, Clearing of Blast Waves from Building Facades, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 134, 193–199.

Souli M, Ouahsine A, Lewin L, 2000, ALE Formulation for Fluid-structure Interaction Problems, Computer Methods in Applied Mechanics and Eng. , 190, 659–675.

Stevens M T, Towne B W, Mason G L, Priddy J D, Osorio J E, Barela C.A, 2013, Procedures for One-pass Vehicle Cone Index (VCI1) Determination for

Acquisition Support, ERDC/GSL SR-13-2, 51s.

Tabatabaei Z S, Volz J S, 2012, A comparison between three different blast methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE, 12th International LS-DYNA Users Conference, 3-5 Haziran 2012, Michigan.

Taylor G I, 1950, The Formation of a Blast Wave by a Very Intense Explosion, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 201, 159–174.

Trajkovski J, Kunc R, Perenda J, Prebil I, 2014, Minimum Mesh Design Criteria for Blast Wave Development and Structural Response – MMALE Method, Latin American Journal of Solids and Structures, 11, 1999-2017.

Zakrisson B, Wikman B, Häggblad H, 2011, Numerical Simulations of Blast Loads and Structural Deformation from Near-field Explosions in Air, International Journal of Impact Engineering, 38, 597-612.

İnternet Kaynakları

- 1- https://dbpedia.org/page/TM-72_mine, 17.11.2022
- 2- <https://donaldwilliamtate.medium.com/the-minefield-australias-greatest-military-blunder-of-the-vietnam-war-9abb817142a1>, 03.04.2022
- 3- <https://man.fas.org/dod-101/sys/land/apm.htm>, 03.04.2022
- 4- <https://nolandmines.com/MCC%20accident%20report.htm>, 04.04.2022
- 5- <https://en.topwar.ru/61675-sozdanie-boevogo-prostranstva-boevye-inzhenernye-mashiny-21-veka-postupayut-na-vooruzhenie.html> , 04.04.2022
- 6- https://military-history.fandom.com/wiki/Mine_flail, 04.04.2022
- 7- <https://www.ctro.hr/en/machine/digger-d-3/> , 04.04.2022
- 8- <https://www.ssab.com/tr-tr/markalar-ve-urunler/armox/urun-teklifi/armox-500t>, 10.01.2023

EKLER

EK 1. Tiller Takımı Kinematığı Matlab Kodu

```
clc; clear all;
% Değişkenler n:zaman adımları
% m:toprağa ilk giriş zamanlarındaki x koordinatları
% t zaman
syms n m t k j i e ah
% v:çizgisel hız
v = 280;
% wn: rpm
wn=400;
% w: açısal hız
w= (2* pi *wn)/60 ;
% rotor+takım yarıçapı
r = 500;
% d:işleme derinliği
d = 200 ;
n=1:1:10;
m=1:1:10;
% a:değişken
a=(d-r)/r;
% toplam rotor uzunluğu:lr
lr=2000;
% helis adımı:ah
ah=200;
% helis sarım sayısı:nh

nh=lr/ah;

% toplam helis uzunluğu:lh
lh=sqrt(ah^2+(2*pi*r)^2)*nh;
% tiller takımı sayısı
nt=48;
%Sıralı takımlar arası açı(radyan):at
at=(2*pi*nh)/(nt-1);
%Sıralı Takımlar arası Helis eksenli Boyunca Uzaklık:lt
lt=lr/(nt-1);
%Takımların toprağa girme periyodu:TT
TT=at/w;
for k=2:1:nt;
att(1)=0;
att(k)=-at+att(k-1)
end
near=mod(att,(2*pi))
[M,I]=min(near(2:1:nt))
%Birbirine açısal olarak en yakın iki takım arasındaki açı farkı
nearsort=sort(near);
increment=diff(nearsort);
%Birbirine açısal olarak en yakın iki takım arasındaki açı farkı
için
%oluşan zaman farkı
```

EK 1. (Devam) Tiller Takımı Kinematığı Matlab Kodu

```
tincrement=increment/w  
mt=6460
```

```
% K1 ve K2 sıralı zaman adımlarında genel terimi oluşturabilmek  
için 0 ve 1
```

```
% lerden oluşan dizi
```

```
K2(m)=abs(round(cos((pi*n)/2)));
```

```
K1(m)=abs(round(sin((pi*n)/2)));
```

```
% A1: toprağa giriş ve çıkışların adımlarını
```

```
% A2: kesişim noktalarını
```

```
A1(m)= ((n*pi)-asin(a))/w;
```

```
A2(m)=((n*pi)-(pi/2)+(asin(round(-  
cos((pi*n)/2))*(pi*v)/(w*r))))/w;
```

```
% t1 ve t2 kritik zaman adımları
```

```
t1=K1.*A1
```

```
t2=K2.*A2
```

```
% T ise kümülatif kritik zaman adımları
```

```
T=t1+t2
```

```
% % % % % % % % % % % % % % % % %
```

```
% x:toprağa giriş zamanındaki x koordinatının orjine olan  
mesafesi
```

```
x=(2*pi*v)/w;
```

```
x(m)=abs((abs(r*cos(w*T(3)))-(m*x)));
```

```
% % % % % % % % % % % % % % % % %
```

```
% % dalga fonksiyonu alanı dA
```

```
% dA1:helisel eğrinin dA s1
```

```
dA1 = (r* v * sin(w *t)) - (r.^2* w *(sin(w* t)).^2);
```

```
% dA2:y=d-r doğrusunun alanı
```

```
dA2 = (d - r)*(v-r*w*sin(w*t));
```

```
% dalga fonsiyonu integrali
```

```
% % t ile t1 arasındaki dA1 fonksiyonu integrali
```

```
SF1A=int(dA1, t, T(1)) ;
```

```
% % y=d-r mesafedeki doğrunun x eksenine ile arasında kalan alan  
dA1
```

```
% % % t-t1 arasındaki dikdörtgenin alanı
```

```
SF2A=int(dA2, t, T(1) ) ;
```

```
% % % % s1 1. bölge alanı
```

```
S1=SF1A-SF2A
```

```
% % % % % % % % % % % % % % % % %
```

```
% T(3) - T(4) bölgesi alan hesabı
```

```
SF1B=int(dA1, T(4), t ) ;
```

```
SF2B=int(dA2, T(4), t ) ;
```

```
% % % % % % % % % % % % % % % % %
```

```
S2=SF1B-SF2B
```

EK 1. (Devam) Tiller Takımı Kinematığı Matlab Kodu

```
S=S1-S2
% ALAN=double(S)
% % % % % % % % % % % % %
% S1 alanının zamanla değişimi, zamana göre türevi
L1=diff(S1);
% S2 alanının zamanla değişimi, zamana göre türevi
L2=diff(S2);

L=L1-L2;
% T(1)-T(2) bölgesi L1'in zamanla değişimini göstermek için
0.001 adımlı
% dizi oluşturulması
tt1 = [T(1) : 0.0001 : T(2)];

% T(3)-T(4) bölgesi L1'in zamanla değişimini göstermek için
0.001 adımlı
% dizi oluşturulması
tt2 = [T(3) : 0.0001 : T(4)];

% L1 fonksiyonunda her tt1 zaman adımına karşılık gelen takım
boyu
% değerleri dizisi
L11=subs(L1,tt1)/10000
% Numerik moda geçiş
L111=double(L11)

% simplify(L1):sadeleştirir.
% pretty(L1):Yazım formatı değişir.

% L2 fonksiyonunda her tt2 zaman adımına karşılık gelen takım
boyu
% değerleri dizisi
L22=subs(L2,tt2)/10000
L222=double(L22)

%T(3),T(4) bölgesi ile T(1)-T(2)bölgesi arasındaki zaman
adımlarının
%eşitlenmesi eksik olan tarafın başına 0 eklenmesi
zeromatrix = zeros(1,(length(tt1)-length(tt2)))

L2222=[zeromatrix,L222]

final=L111+L2222
plot(tt1,final)
hold

for i=1:1:length(tincrement)
shift(i)=round(tincrement(i)/0.0001)
end
%zaman kayması kadar başa sıfır ekleniyor.
shifting1=zeros(1,shift(1))
shifting2=zeros(1,shift(2))
shifting3=zeros(1,shift(3))
```

EK 1. (Devam) Tiller Takımı Kinematığı Matlab Kodu

```
shifting4=zeros(1,shift(4))
shifting5=zeros(1,shift(5))
.....
shifting45=zeros(1,shift(45))
shifting46=zeros(1,shift(46))
shifting47=zeros(1,shift(47))
%her takım için sonraki takıma eklenmesi gereken süre adımları,
dizi lerin
%başına sıfır matris eklenmektedir.
final1=[shifting1,final];
final2=[shifting2,final1];
final3=[shifting3,final2];
final4=[shifting4,final3];
final5=[shifting5,final4];
final6=[shifting6,final5];
.....
final44=[shifting44,final43];
final45=[shifting45,final44];
final46=[shifting46,final45];
final47=[shifting47,final46];
% son takımın hareketini tamamladığı an içi vektörlerin sonuna
41. takımın
% büyüklüğü kadar sıfır eklenmelidir.
final(numel(final47)) = 0;
final1(numel(final47)) = 0;
final2(numel(final47)) = 0;
final3(numel(final47)) = 0;
final4(numel(final47)) = 0;
final5(numel(final47)) = 0;
final6(numel(final47)) = 0;
.....
final45(numel(final47)) = 0;
final46(numel(final47)) = 0;
final47(numel(final47)) = 0;
LOAD=final+final1+final2+final3+final4+final5+final6+final7+final8+final9+final10+final11+final12+final13+final14+final15+final16+final17+final18+final19+final20+final21+final22+final23+final24+final25+final26+final27+final28+final29+final30+final31+final32+final33+final34+final35+final36+final37+final38+final39+final40+final41+final42+final43+final44+final45+final46+final47
tt3 = T(1) + 0.0001*(0:(length(LOAD)-1));
plot(tt3,LOAD,'b-', 'LineWidth', 2)
xlabel('Zaman', 'FontSize', 20);
ylabel('Aktif Uzunluk', 'FontSize', 20);
title('Tiller Ataşmanın Toprak İçerisindeki Aktif Uzunluğunun Zamana Bağlı Değişimi', 'FontSize', 20);
grid on;
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0, 0.04, 0.96, 0.96]);
lmin=min(LOAD(:,500:1:1000))
lmax=max(LOAD(:,500:1:1000))
genlik=lmax-lmin
```