

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTONOM İŞ MAKİNESİ TASARIMI VE ALGORİTMASININ
OLUŞTURULMASI



Adem YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAYIS 2019

Tezin Başlığı: Otonom İş Makinesi Tasarımı ve Algoritmasının Oluşturulması

Tezi Hazırlayan: Adem YILDIRIM

Sınav Tarihi: 27.05.2019

Yukarıda Adı Geçen Tez Jürimizce Değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi Olarak Kabul Edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR.....

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Kâzım TÜRK

İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Hasan POLAT

Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Otonom İş Makinesi Tasarımı ve Algoritmasının Oluşturulması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Adem YILDIRIM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTONOM İŞ MAKİNESİ TASARIMI VE ALGORİTMASININ OLUŞTURULMASI

Adem YILDIRIM

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

95 + xv sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR

İş güvenliği riskinin yüksek olduğu; nükleer kalıntılara sahip yüzey küreme işleri, askeri yollar için yol seviyeleme uygulamaları veya insansız müdahale gerektiren küreme işlerinin yapılması için insansız iş makineleri kullanılmaktadır. Arazi yapısı ve içeriği göz önüne alındığında toprak işleri kendine özgü olmaktadır. Bunun sonucu olarak her zemin için yapılan iş kendine özgü bir nitelik taşımaktadır. Otonom araçların taşımacılıkta yaygınlaşmaya başlamasıyla birlikte iş makineleri için de farklı çözüm önerileri artmaktadır. Açık maden veya tesviye kazıları gibi programlanabilecek iş koşullarında insansız uygulamalar daha çok görülmektedir.

Bu tezde dışarıdan girilebilecek bir arazi yapısının kotunu istenilen seviyeye getirmek için bıçak genişliği 1 m olan iş makinesinin belirli kısıtları göz önünde bulundurularak küreme işlemi yapan algoritma geliştirildi. Geliştirilen algoritma ile araç geri geri giderek başladığı noktaya en yakın tepeyi bulup ve bulunan tepe noktasından itibaren sınıra doğru küreme yapar. Bu işlem, kürenen şerit istenilen seviyeye gelene kadar tekrar edilir.

Algoritmanın denenmesi için rastgele sayılarla farklı yüksekliklerde arazi modelleri oluşturuldu ve ızgara biçiminde küçük karelere ayrıldı. Başlangıçta şasi ağırlığı, batarya sayısı ve motor gücü vb. parametreler bir makul başlangıç değeri

değer atanarak küreme işlemine başlandı. Aracın kazı yüksekliği ve sürüklenme hacmi belirli bir sınır değerinin altında tutuldu. Kazılan bölgenin yükseklik değeri güncellenerek arazi seviyelendi. Küreme işleminin süre, kazılan hacim ve sürüklenen hacim hesabı yapıldı. Boş gidiş, küreme ve sürüklenme işlemleri sırasında oluşan kazı, eğim, yuvarlanma, sürtünme, zemin ve sürüklenme dirençleri dinamik bir şekilde hesaplandı. Dirençlere ve araç hızına bağlı olarak gereken güç hesaplandı. Başlangıçta atanan motor gücü ile kıyaslanarak küreme işini yapabilecek kapasitede olup olmadığına karar verildi. Küreme işlemi boyunca harcanacak enerji miktarı hesaplandı ve gereken batarya sayısı bulundu. Başlangıçta atanan batarya sayısı ile kontrol edildi. Motor ve batarya gücünün yeterli olmaması durumunda yetersiz bileşenler güçlendirilerek küreme işlemi baştan benzetimle modellenerek tasarım hedeflerini yerine getirecek bir otonom dozer geliştirildi.

3 farklı küreme simülasyonu ve 9 farklı araç modelleme simülasyonu gerçekleştirildi. Otonom küreme aracının hızları değiştirilerek, 3 farklı zemin türü için analiz yapılmıştır. Arazi zorluğu arttıkça gerekli motor gücü ve batarya sayısı artmakta, araç ağırlığı azaldıkça motor gücü ve batarya sayısı azalmaktadır. İş makinesinin tasarım hedeflerini gerçekleştirebilecek biçimde üretilmesinin maliyeti simülasyonla hesaplanmıştır. Bir iş makinesi tasarımcısının fiyat konusunda referans alabileceği bir çalışma sunulmuştur.

Belirli kısıtlara sahip insansız iş makinesi ile insan müdahalesi olmadan seviyeleme işlemi yapılmıştır. Yenilemeli biçimde benzetim yapılarak seviyeleme işleminin zemin ve arazi koşullarına bağlı olarak en iyi iş makinesi özelliklerinin bulunmasına çalışılmıştır. Bu çalışma sayesinde insansız müdahale gerektiren seviyeleme uygulamaları iş güvenliği riski arttırılmadan en ekonomik biçimde çözülmüş olacaktır. Aracın motor kapasitesi, batarya gücü ve yürüyen aksamı yüksek verimli kullanılacaktır. Yenileme ile motor gücü ve batarya sayısı tasarım kriterlerini sağlayacak şekilde belirleneceği için iş makinesinin üretim maliyeti azalacaktır.

ANAHTAR KELİMELER: İnsansız Kara Aracı, Otonom İş Makinesi, Yapay Zekâ,

Simülasyon, Elektrikli Araç Tasarımı

ABSTRACT

Msc Thesis

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS GRADER AND ALGORITHM

Adem YILDIRIM

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

91 + xv sayfa

2019

Supervisor: Assoc. Prof. Önder Halis BETTEMİR

Unmanned machines are used for leveling works such as removal of nuclear residues, road leveling applications for military roads, or for leveling tasks that requires unmanned intervention where the risk of occupational hazard is high. Earthworks are unique when the soil type and terrain are considered. As a result, each earthwork task is unique. As autonomous vehicles become more widespread in transportation, different solutions are being proposed for construction machinery. Unmanned applications are seen more often in applications such as open mine or leveling excavations which can be programmed.

In this thesis, an algorithm is developed for the autonomous leveling of a terrain whose elevation can be entered as input data. Terrain is excavated to the desired level by the autonomous machine with a blade width of 1 m. With the developed algorithm, the vehicle finds the closest local maximum elevation and starts grading to the boundary point where it started. This process is repeated until the strip is excavated to the desired elevation.

In order to test the algorithm, terrain models with different heights were created with random numbers and divided into small squares in grid form. Initial values are assigned for chassis weight, number of batteries and engine power etc. in the beginning and inadequate components are improved. Excavation thickness and blade capacity of the vehicle were kept below a certain limit. The height of the excavated area was updated and the terrain is leveled. The time of the shoveling process, the excavated volume and the drained volume were calculated. Forces and resistances acting on the construction machine caused by the excavation, inclination, rolling, friction, ground and drag resistances that occurred were calculated dynamically. The required power is calculated based on the calculated resistive force and design speed. It was decided whether or not it was capable of doing the leveling task by comparing it with the engine power assigned in the beginning. Depending on the power and calculated time, the energy requirement thus, the number of required batteries was calculated. Initially assigned number of batteries and the engine powers are compared by the results of analysis. In case the engine and battery power is not sufficient, insufficient components are strengthened and the simulation of leveling continued until all components are adequate.

Three different leveling simulations and nine different soil-machine interaction modeling simulations were performed. Three different velocities are assigned for the autonomous grade for three different soil types. As the stiffness of the land increases, the required motor power increases. However, the number of batteries decreases as the vehicle weight decreases. The cost of the construction machine which achieves the design objectives is calculated by simulation. This study can be used as a reference for a manufacturer to estimate the cost of the construction machine.

The leveling process was carried out by the unmanned machine with certain limitations without human intervention. The autonomous shovel tool study has been tried to find the best alternative depending on the power and battery options of the iteration process. Thanks to this study, the leveling practices requiring unmanned intervention will be solved without increasing the safety risk. The vehicle's engine capacity, battery power and chassis will be highly efficient. As the engine power and number of batteries will be determined to meet the design criteria, the production cost of the machine will be reduced. In the simulation operation, the most suitable engine

power, number of batteries and chassis weight were obtained without any human intervention.

KEYWORDS: Unmanned Ground Vehicle, Autonomous Construction Machine,
Artificial Intelligence, Simulation, Electric Vehicle Design



TEŞEKKÜR

Dokuz yaşıma kadar beni büyüten dedem Battal YILDIRIM ve babaannem Altun YILDIRIM'a;

Ayrıca bu çalışmanın her aşamasında yardım, bilgi ve tecrübeleri ile desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR'e;

sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP FYL-2017-592 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
1.2. İzlenilen Yol	2
1.3. Çalışmanın Beklenen Katkıları	3
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	6
3. İŞ MAKİNESİ TASARIMI	17
3.1. Elektrik Motoru	17
3.2. Batarya	19
3.3. Küreme Bıçağı.....	21
3.4. Şasi.....	23
3.5. Tekerlekler.....	25
3.6. Motor Kontrol Devresi	27
3.7. Otonom Küreme Aracı Özellikleri	28
4. YÖNTEM	32
4.1. Sanal Arazi Modelinin Oluşturulması.....	32
4.2. Tesviye Algoritması.....	34
4.3. Direnç Kuvvetlerinin Hesaplanması	39

4.3.1.	Eğim direnci	40
4.3.2.	Yuvarlanma direnci	41
4.3.3.	Kazı direnci	43
4.3.4.	Gömölme direnci	44
4.3.5.	Sürüklenme direnci	44
4.3.6.	İvmelenme direnci	45
4.4.	Motor Gücünün Hesaplanması.....	46
4.5.	Batarya Sayısının Hesaplanması	47
5.	VAKA ANALİZİ.....	50
5.1.	Küreme Simülasyonu.....	50
5.1.1.	Küreme Simülasyonu I.....	52
5.1.2.	Küreme Simülasyonu II.....	57
5.1.3.	Küreme Simülasyonu III.....	61
5.2.	Araç Modelleme Simülasyonları.....	65
5.2.1.	Zayıf zemin ve düşük hızda araç modellemesi	67
5.2.2.	Zayıf zemin ve orta hızda araç modellemesi.....	68
5.2.3.	Zayıf zemin ve yüksek hızda araç modellemesi.....	69
5.2.4.	Orta zemin ve düşük hızda araç modellemesi.....	71
5.2.5.	Orta zemin ve orta hızda araç modellemesi.....	73
5.2.6.	Orta zemin ve yüksek hızda araç modellemesi.....	75
5.2.7.	Sert zemin ve düşük hızda araç modellemesi.....	77
5.2.8.	Sert zemin ve orta hızda araç modellemesi.....	79
5.2.9.	Sert zemin ve yüksek hızda araç modellemesi.....	80
6.	ARAÇ MODELLERİNİN MALİYET ANALİZİ.....	82

7.	SONUÇ	86
8.	KAYNAKÇA.....	88



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Motor – Tork – Devir Sayısı Eğrisi [63].....	18
Şekil 3.2.	2025 Yılına Kadar Elektrik Batarya kullanım tahmini [65].....	20
Şekil 3.3.	Otonom Küreme Aracı Yürüyen Aksam Yan Görünüş.....	24
Şekil 3.4.	Otonom Küreme Aracı Yürüyen Aksam Üst Görünüş.....	25
Şekil 3.5.	Otonom Küreme Aracı Genel Görünüm.....	28
Şekil 3.6.	Otonom Küreme Aracının Üst Görünümü.....	29
Şekil 4.1.	Sanal Arazi Modeli Örneği.....	34
Şekil 4.2.	Tesviye Algoritmasının Akış Şeması.....	36
Şekil 4.3.	Kuzey Sınırına Malzeme Yığılmasını Görselleştirilmesi.....	39
Şekil 4.4.	Otonom Küreme Aracına Atki Eden Direnç Kuvvetleri.....	40
Şekil 4.5.	Yokuş Çıkan Otonom Küreme Aracı Görünümü.....	41
Şekil 4.6.	Tekerlek Yol Etkileşimi.....	42
Şekil 4.7.	Kazı Direnç Etkisi Görseli.....	44
Şekil 5.1.	Sanal Arazi Modeli Görseli.....	52
Şekil 5.2.	Doğu Doğrultusundaki 1. Metre için İlk 10 Küreme Adımı.....	54
Şekil 5.3.	Doğu Doğrultusundaki 1. Metre için Küreme Adımları.....	56
Şekil 5.4.	Doğu Doğrultusundaki 7. Metre için İlk 10 Küreme Adımı.....	59
Şekil 5.5.	Doğu Doğrultusundaki 7. Metre için Küreme Adımları.....	61
Şekil 5.6.	Doğu Doğrultusundaki 15. Metre için İlk 10 Küreme Adımı.....	63
Şekil 5.7.	Doğu Doğrultusundaki 15. Metre için Küreme Adımları.....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Batarya Türlerinin Karşılaştırması.....	21
Çizelge 3.2.	Kullanılan Motorların Özellikleri.....	28
Çizelge 3.3.	İlgili Motor Gücüne Ait Şasi Ağırlıkları.....	30
Çizelge 4.1.	Arazinin Kürenecek Alanlarının Gösterilmesi.....	33
Çizelge 4.2.	Otonom Küreme Aracı Hız Durumları.....	46
Çizelge 5.1.	Sanal Arazi Modeli Yükseklik Değerleri.....	51
Çizelge 5.2.	Doğu Doğrultusundaki 1. Metre için İlk 10 Küreme Adımı.....	53
Çizelge 5.3.	Doğu Doğrultusundaki 1. Metre için Küreme Adımları.....	55
Çizelge 5.4.	Doğu Doğrultusundaki 7. Metre için İlk 10 Küreme Adımı.....	58
Çizelge 5.5.	Doğu Doğrultusundaki 7. Metre için Küreme Adımları.....	60
Çizelge 5.6.	Doğu Doğrultusundaki 15. Metre için İlk 10 Küreme Adımı.....	62
Çizelge 5.7.	Doğu Doğrultusundaki 15. Metre için Küreme Adımları.....	64
Çizelge 5.8.	Otonom Küreme Aracı Hız Verileri.	66
Çizelge 5.9.	Zemin Türü Verileri.....	66
Çizelge 5.10.	Zayıf Zemin ve Düşük Hız Analiz I.....	67
Çizelge 5.11.	Zayıf Zemin ve Düşük Hız Analiz II.....	68
Çizelge 5.12.	Zayıf Zemin ve Orta Hız Analiz I.....	69
Çizelge 5.13.	Zayıf Zemin ve Yüksek Hız Analiz I.....	70
Çizelge 5.14.	Zayıf Zemin ve Yüksek Hız Analiz II.....	70
Çizelge 5.15.	Zayıf Zemin ve Yüksek Hız Analiz III.....	71
Çizelge 5.16.	Orta Zemin ve Düşük Hız Analiz I.....	72
Çizelge 5.17.	Orta Zemin ve Düşük Hız Analiz II.....	72

Çizelge 5.18.	Orta Zemin ve Orta Hız Analiz I.....	73
Çizelge 5.19.	Orta Zemin ve Orta Hız Analiz II.....	74
Çizelge 5.20.	Orta Zemin ve Orta Hız Analiz III.....	74
Çizelge 5.21.	Orta Zemin ve Orta Hız Analiz IV.....	75
Çizelge 5.22.	Orta Zemin ve Yüksek Hız Analiz I.....	75
Çizelge 5.23.	Orta Zemin ve Yüksek Hız Analiz II.....	76
Çizelge 5.24.	Orta Zemin ve Yüksek Hız Analiz III.....	76
Çizelge 5.25.	Sert zemin ve Düşük Hız Analiz I.....	77
Çizelge 5.26.	Sert zemin ve Düşük Hız Analiz II.....	78
Çizelge 5.27.	Sert zemin ve Düşük Hız Analiz III.....	78
Çizelge 5.28.	Sert zemin ve Düşük Hız Analiz IV.....	79
Çizelge 5.29.	Sert zemin ve Orta Hız Analiz I.....	79
Çizelge 5.30.	Sert zemin ve Orta Hız Analiz II.....	80
Çizelge 5.31.	Sert zemin ve Yüksek Hız Analiz I.....	81
Çizelge 5.32.	Sert zemin ve Yüksek Hız Analiz II.....	81
Çizelge 5.33.	Araç Modellemesi Vaka Analizleri Özeti.....	82
Çizelge 6.1.	Elektrik Motorlarının Fiyat Listesi.....	83
Çizelge 6.2.	Şasi Türlerinin Fiyat Listesi.....	83
Çizelge 6.3.	Diğer Maliyetler.....	84
Çizelge 6.4.	Araç Modellerine Göre Toplam Maliyetler.....	84
Çizelge 6.5.	2 Farklı Araç Maliyet Çizelgesi.....	85

1. GİRİŞ

Yol yapımı, hava alanı inşası, yüzey seviyeleme ve hafriyat yığınlarının düzenlenmesinde küreme önemli bir iş kalemidir. Genellikle kazıcı ve yükleyici gibi iş makineleriyle yapılan küreme işlerinde amaç, mevcut yüzeyin sabit eğimli ya da yatay duruma getirilmesidir. Küreme çalışmaları genellikle cm hassasiyetinde yapıldığı için operatörün dikkatinin yüksek olması istenir. Kotun doğruluğunun kontrolü için araç geçişlerinden sonra yüzeyin yükseklik kontrolünün yapılması gerekmektedir.

Eski uygarlıklardan beri yol kazıları, kanal kazıları ve yüzey küreme işleri yapılmaktadır. Yol temel yüzeyinin yapımı, temel tesviyesi, halkın kullanımına ait kent meydanları, askeri yollar, açık maden kazıları, nükleer ya da radyoaktif atık içeren zeminlerin ıslahı ve stadyum alanı gibi düzlük istenen alanlarda yüzey seviyeleme işleri yapılmaktadır.

Geleneksel biçimde yapılan küreme işleminde seviyelenecek bölgeye yükseklik değerleri işaretlenir. Noktaların kotundan istenilen kot çıkarılarak küreme derinliği hesaplanır. Küreme aracı ilerledikçe belirli aralıklarla ölçüm yapılır. Eğer ölçülen yükseklik istenilen seviyede değilse doğru seviye elde edilene kadar tekrar kazı veya dolgu yapılır. Ölçümler belirli aralıklarda veya her bir araç geçişinden sonra yapılmaktadır. Geliştirilen algoritma iş makinesinin üzerinde hassas konum belirleyebilen bir GPS alıcının yerleştirilmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu sayede araç kendisi konum belirleyebileceği için kendi konumunu ve proje koordinatlarını anlık karşılaştıracak insan kaynaklı hataların önüne geçilebilecektir.

Yapılan kazılarda aracın motor gücü, itiş kapasitesi veya teknik donanımı yeterli gelmeyebilir bunun sonucunda seviyelenecek alan bir kaç kez geçiş yaparak kürenebilir. Özellikle istenilen kotun arazi kotunun daha altında olması durumunda yapılacak kazı bir kaç defada yapılamayabilir. Operatörün bu kazılarda hata yapma riski oldukça yüksektir. Tekrarlı uygulamalarda operatörün dikkati dağılabilir ve hata yapabilir. Otonom küreme aracı insansız bir şekilde tasarlandığı için operatör hatası olmayacaktır.

Bu bölüm çalışmanın amacı, izlenen yol ve çalışmanın beklenen sonuçları olmak üzere üç alt başlık altında incelenecektir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Çalışmada geliştirilen algoritma, dikdörtgen biçimindeki bir alanın insan müdahalesi olmadan kürenmesi ve küreme hesaplarının yapılması amaçlanmıştır. Otonom iş makinesi kullanılarak eğimli bir yüzeye sahip alanın yükseklik değerleri istenilen seviyeye getirilmesi hedeflenmiştir.

Yüzey seviyeleme işlerinde sahada belirli sıklıklar ile ölçüm alınması gerekmektedir. Operatör hatası veya ölçüm aletlerinin sistematik hata içermesinden dolayı hatalar oluşabilmektedir. Otonom iş makinesi ile insan kaynaklı hataların önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

Küreme araçları seviyeleme işlemi sırasında farklı zorlanmalara maruz kalmaktadır. Motor gücü olması gerekenden farklı olabilmektedir. Aracın tasarımı sırasında gereğinden fazla motor gücünün tercih edilmesi durumunda yüksek motor maliyeti ortaya çıkacak ve enerji tüketimi artacaktır. Arazi yapısına en uygun, piyasada bulunabilecek en küçük elektrik motorunun seçilebilmesi hedeflenmiştir. Belirlenen arazi boyutunu tek şarjla küreyebilecek güçteki elektrik motorunun ihtiyacı olan batarya sayısının optimum sayıda olması amaçlanmıştır.

1.2. İzlenilen Yol

Algoritma diğer otonom iş makineler ile kıyaslandığında her metrede bir koşul parametrelerini güncellemektedir. Karar verme algoritmasının çalışma aralığı her birim karede tekrarlanmaktadır. Kazı derinliği, sürüklenme hacmi, maruz kalınan dirençler, gerekli güç ve enerji miktarı birim kazı alanları için yenilenmektedir.

Küçük ölçekli otonom bir iş makinesinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu iş makinesinin performansı benzetimle ölçülmüş ve tasarım aşaması benzetim yapılarak yenilemeli biçimde sürdürülmüştür. Benzetimin nasıl yapıldığı aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır. Bu çalışmada aşağıdaki adımlar uygulandı:

- Sanal arazi modeli oluşturuldu. Arazi 1 metre genişliğe sahip birim karelere ayrıldı. Her bir birim karenin yükseklik değeri rastgele sayılar üretilerek oluşturuldu.

- Araç geriye doğru giderek sınıra en yakın tepe noktasını buldu. Tepe noktası bulunurken bir önceki birim kare yüksekliğinden mevcut biri kare yüksekliği çıkarıldı.
- Maksimum noktadan itibaren her bir birim kare için kazı derinliği hesaplandı.
- Araç kısıtlarına bağlı olarak kazı ve sürükleme hacimleri hesaplandı.
- Aracın motor gücü kontrolü yapıldı ve motor gücü yeterli ise kazı yapıldı.
- Her birim karenin yüksekliği birim küremeden sonra güncellendi ve bu işlemler arazi istenilen kota gelinceye kadar tekrar edildi.
- Mevcut batarya kapasitesi ile ihtiyaç duyulan batarya kapasitesi karşılaştırıldı ve yeterli gelen en düşük batarya kapasitesi ile kazı yapıldı.

Yerel maksimum noktadan kuzey sınırına doğru kazı işlemi yapılmaktadır. Otonom araç kazı ve sürükleme işlerinde her zaman yokuş aşağı inmektedir veya yatay düzlemde ilerlemektedir. Araç sadece küreme sınırına en yakın yerel maksimum noktaya ilerlerken boş durumda yokuş çıkmaktadır.

Birim küreme alanları için aracın maruz kaldığı direnç kuvvetleri; eğim, gömülme, yuvarlanma, kazı ve sürükleme direnci hesapladı. Hesaplanan direnç kuvvetine bağlı olarak gerekli güç miktarı bulundu. Aracın maksimum zorlandığı durumlar için güç kontrolü yapıldı. Güç miktarına bağlı olarak gerekli enerji miktarı bulundu ve batarya sayısı hesaplandı.

1.3. Çalışmanın Beklenen Katkıları

Araç kazı ve sürükleme yaparken küreme algoritması yapısı itibari ile yerel maksimum noktadan küreme sınırına doğru toprağı itmektir. Sunulan algoritma sayesinde araç toprağı yokuş yukarı itmemektedir. Bu sayede gerekli motor gücü ve batarya sayısından tasarruf edilmektedir. Motor hacmi ve batarya sayısı küçüldüğü için araç ağırlığı azalmış ve araç dinamiği daha sade hale gelmiştir. Tasarım süreci iş makinesi üreticileri için örnek bir model teşkil etmektedir.

Önerilen küreme algoritması sayesinde araç müdahalesiz bir şekilde mevcut alanı küreyebilmektedir. Kürenecek alanı birim alanlara ayırmakta, küreme derinliği,

sürüklenme hacmi hesaplayarak şerit alanını seviyelemektedir. Bıçak hareketlerini kendi kontrol edebilmektedir.

Aracın hareketi için elektrik motoru seçilmiş, enerji depolaması için lityum bataryalar kullanılmıştır. Elektrik şebekesinde fiyatın ucuz olduğu saatlerde bataryaların doldurulması dizel ya da benzinli araçlara göre fiyat avantajı sağlayacaktır.

Yol inşaatlarında yol temelini oluşturmadan önce yüzeyin seviyelenmesi gerekmektedir. Yol seviyeleme işlemi belirli aralıklarla kontrol gerektiren uygulamalardır. Oluşacak küreme hatalarının temel dolgu malzemesiyle giderilmesi en fazla uygulanan yöntemdir. Sürekli ve doğru ölçümler ile dolgu hatalarının önüne geçilebilir böylece yol inşaatlarında maliyet düşüşü sağlanabilir. Otonom iş makinesi sadece kazı yapmak amacı ile tasarlandığı için dolgu yapılabilecek bir yüzey kaldırma uygulaması yapmamaktadır. Yol müteahhitleri için yüzey küreme veya düzeçleme işlemleri için kullanılabilir bir makine simülasyonu tasarlanmıştır.

Tasarlanan iş makinesi kanal kazısı ve kanal temel yüzeyinin kürenmesi işlemleri için uygulanabilecektir. Özellikle ekskavatör kazısı sonrası temel yüzeyinin düzeltilmesi yapı uygulamalarında sıkça görülmektedir. Yapı temelinin düz bir zemine konumlandırması gerekmektedir. V kesitli bir kanal zemininin istenilen kota gelmesi için otonom iş makinesi kullanılabilir bir tasarıma sahiptir. Kanal kazısı çalışmalarında kullanılabilir.

Küreme aracı insansız olacak şekilde tasarlanmıştır. Operatörden kaynaklı hatalar tamamen yok olmaktadır. Ölçüm yapılan aletler insan faktörüne bağlı olduğu için kalibrasyon hatalarının da önüne geçilmektedir. Operatörün hata riskini sıfıra indirmektedir. Kişiden bağımsız karar verme ve hesap yapma kabiliyetine sahip olduğu için hızlı ve doğru bir şekilde küreme işlemi yapılacaktır.

Can güvenliği riskinin yüksek olduğu küreme uygulamalarında kullanılabilir. Askeri amaçlı kullanım alanı oldukça geniştir. Ordunun ve askeri araçların, yolun olmadığı bölgeye götürülmesi gerektiği durumlarda, yol yüzeyini nakliye araçlarının geçebileceği bir yapıya getirebilecektir. Operatörün nükleer sızıntı veya radyoaktif atığın olduğu alanlarda çalıştırmak oldukça riskli olmakta ve operatörün can güvenliğini tehdit etmektedir. Özellikle nükleer santral ve araştırma laboratuvarı çevresinde bu durumlar görülebilmektedir. Santraller soğutma suyunu karşılamak

amacıyla nehir veya deniz kenarlarına yapılmaktadır. Soğutma suyunun alındığı bölümlerin ıslahı çalışmalarında otonom küreme aracı sayesinde operatör nükleer sızıntıya maruz kalmayacaktır.

Açık maden sahalarında yüzey kazıları yapılmaktadır. Kürenen malzemenin belli bir alana sürüklenmesi gerekmektedir. Toplanan cevher yığını yükleyicilerle fabrika silolarına taşınmaktadır. Malzemenin kürenmesi ve yükleyici alanına sürüklenmesi aktivitelerinde otonom küreme aracı insansız bir şekilde kontrolör ve operatör olmadan hafriyat yığını istenilen alana taşıyabilecektir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

İnsansız araçların gün geçtikçe yaygınlaşmasıyla birlikte insansız iş makinelerinin de kullanım alanı artmaktadır. Uygulama alanına göre farklı algoritmalar geliştirilmekte ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

Otonom araç uygulamalarında sensörlerden alınan veriler işlenerek kullanım amacına uygun algoritmalar geliştirilmektedir. Kato ve Shinpei [1] çalışmasında insansız araçlar için açık kaynaklı bir platform geliştirmiştir. Sensörler kullanarak bulunduğu ortamı tanıma, yol planlama ve araç kontrolü için gerekli algoritmaları, yazılım kütüphanelerini ve veri kümelerini sunmuşlardır. Çalışmanın geliştiriciler ile insansız araçların temelini incelemelerine, yeni algoritmalar tasarlama ve ortak ara yüzü kullanarak performanslarını test etmelerine izin verebilir bir platform ortaya koymuşlardır. Amer [2] vd. otonom araçların temel zorluk problemlerinden olan yol izleme kontrolünü ele almış, insansız araçları yol izleme türüne göre sınıflandırmıştır. Yol izleme kontrolündeki ana zorlukları belirlemiş ve gelecekte yapılabilecek araştırmaları önermiştir. Matthew vd. [3] otonom araçların halka açık yollarda milyonlarca mil yol kat ettiklerini ancak en basit senaryolar bile güvenlik açısından onaylanmadığını belirtmiştir. APEX adında yeni bir doğrulama aracı önermiştir. APEX'i davranışsal bir planlayıcı ve devlet tabanlı kafes hareket planlayıcısını birleştirerek güvenli bir araç yörüngesi oluşturmayı amaçlamıştır. Howard ve Andrew [4] insansız bir kara aracında arka arkaya stereo görüntü çiftlerinden kareden kareye kamera hareketini tahmin etmek için görsel bir kilometre sayacı algoritması oluşturmuşlardır. Algoritma, birçok görsel kilometre sayacı algoritmasından kamera hareketi hakkında önceden bir varsayımda bulunmaması ve ayrı bir stereo algoritması ile diğer kilometre sayacılarından farklıdır. Testler sonucunda 4000 kare ve 400 m hareketten sonra, konum hatalarını 1 m'nin (seyahat mesafesinin % 0,25'i) altında, işlem süresi 512x384 görüntüde yaklaşık 20 ms olarak hesaplamıştır. Bajracharya ve Max, LAGR [5] programı ile insansız bir arazi navigasyonu uygulaması sunmuşlardır. Sensörler, operatör girişi ve stereo kameralar kullanarak, otonom yol dışı navigasyon için tam entegre halinde olan gerçek zamanlı sistemin davranışını incelemiştir. Kurmuş oldukları sistem iki öğrenme algoritmasından oluşmaktadır: çok az propriyoseptif örnekten öğrenen ve pek çok yol dışı ortamda sağlam olan kısa mesafeli, geometriye dayalı sınıflandırmadan öğrenen ve geometri görünümünden sürekli genelleyen uzun mesafeli öğrenmedir. Hu ve Chuan [6] insansız kara

taşıtlarının yol takibi için H geri besleme kontrol stratejisi sunmuşlar. Aracın yanıl hızını düşük maliyetli sensör ile ölçmüş, genetik algoritma ve doğrusal matris eşitsizliği yaklaşımına dayanan yol takip sistemini oluşturmuştur. Önerilen sistemin, lastik viraj alma sertliği, araç boyuna hızı, yalpalama hızı ve yol eğrisi gibi parametrelerle ve belirsizliklere karşı dayanıklı olduğunu belirtmiştir. CarSim-Simulink platformunda oluşturulan simülasyon sonuçları, önerilen kontrol yaklaşımının etkinliğini doğrulamıştır. Pendleton vd. [7] otonom sistemlerdeki araştırmalar, mevcut bilgisayar gücündeki artış, algılama ve hesaplama teknolojilerindeki maliyetin düşmesi otonom araçların teknolojik hazırlık seviyelerinin olgunlaşmasına neden olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında otonom araç yazılım sistemleri alanındaki son gelişmeleri sunmuştur. Makkonen vd. [8] otonom bir iş makinesini simülasyon programı ile tasarlamış, serbestlik derecesine göre kıyas etmiştir. Altı serbestlik dereceli bir ekskavatörün, yol yüzeyinin CAD modeliyle birlikte bir GPS ile konumlandırma sistemi kullanarak ekskavatörün hareketlerini kontrol etmeyi amaçlamıştır. Tasarımında geleneksel 4 serbestlik dereceye sahip ekskavatöre göre ilave 2 serbestlik derecesini rototilt uygulayarak sağlanmıştır.

Farklı türdeki iş makineleri için farklı algoritmalar oluşturulmaktadır. Ekskavatör diğer iş makinesi türlerine göre kazı işlerinde daha fazla kullanılmaktadır. Dunbabin ve Corke, [9] kazıma döngüsünü otomatikleştirmek için bir sistem geliştirilmesini amaçlamıştır. Otomatik kepçe dolumu gösterilerek, kepçenin dolu olduğu durumda bulunduğu yerden ayrılma zamanının saptanması için yöntemler belirlenmiştir. Kepçe duraklarını belirlemek için yedinci seviye model kullanılmıştır, kepçe doluluk oranı çevrimiçi tahmin edilmiştir. Operatörlerin insan olduğu durumlara yakın performans gösterdiği tespit edilmiştir. Vahed vd. [10] otonom ekskavatörde makine toprak etkileşimi sırasında meydana gelen dinamik kayıpları incelemiş ve enerji tahmin etmek için eşitlikler oluşturmuştur. Önerdiği yeni algoritma ile gerçek zamanlı bir örneği test etmiş ve hata performansını %3 olarak ölçmüştür. Singh ve Cannon [11] otonom ekskavatörde toprak zemin etkileşimini modellemiştir. Ekskavatör kepçesine etki eden kuvvet denklemlerini revize etmiş ve temel denklemlere ilave eşitlikler eklemiştir. Eşitlikler farklı toprak tiplerine göre değişmektedir. Kim ve diğerleri [12] hafriyat ekskavatörleri için zaman verimi ve minimum tork hareketleri üretme sorunu üzerine çalışmıştır. Mümkün olan en hızlı ve minimum asgari tork hareketlerini oluşturmak için hafriyat ekskavatörlerine özel bir dizi analitik gradyan tabanlı hareket

optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir. Elde edilen yörüngeler deneyimli operatörlerin gerçek kazma hareketleriyle karşılaştırılmış ve operatör yörüngesine yakın yörünge elde edilmiştir. Ha vd. [13] küçük ölçekli sadece küçük ağızlı kepçeye sahip otonom bir ekskavatör tasarlamış ve tasarım kriterlerini çalışmasında paylaşmıştır. Ekskavatör dinamiğinin empedans kontrolünü ve her çalışma eksenini için elektro hidrolik sistemlerin pozisyon ve kuvvet kontrolünü uygulamak için değişken yapıya dayalı teknikler kullanmıştır. Yu vd. [14] uzaktan kumanda ile kontrol edilebilen bir iş makinesinin tasarımı için robotik bir mimari tasarım önermiştir. Çalışmasında modelleme, sensörler, görüntü sinyal işleme, iletişim ağları, kontrolörler, görev ve yol planlama, insan-bilgisayar etkileşimi, optimal tasarım, birlikte simülasyon ve sanal eğitim ortamını konuları hakkında tasarım önerisinde bulunmuştur. Zweiri vd. [15] tam ölçekli bir ekskavatör aracının modellenmesini ve kontrolünü incelemiştir. Kontrol sistemi tasarımında, ekskavatörün kepçesini ve yürüyen aksamını birleşik bir model olarak önermiş, mobil bir ekskavatörün kepçesini hareket ettirmek için bazı durumlarda tüm aracın hareketine ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir.

İş makinesi tasarımında en etkili parametrelerden biri de toprak makine etkileşimidir. Tan ve diğerleri [16] toprak- araç etkileşimi için çok önemli bir husus olan toprak parametrelerinin tahmini için yeni bir yöntem önermektedir. Newton Raphson ile yeni bir hibrit toprak modeli geliştirilmiştir. Hibrit model Mohr-Coulomb toprak modelinden ve Chen ve Liu üst sınırından oluşan toprak modelinden oluşmaktadır. Newton Raphson yöntemi ile toprak parametreleri belirlenmiştir ve en küçük kareler yöntemine kıyasla üstün bir başarı elde edilmiştir. Vehad ve diğerleri [17] toprak kestirimi ve sınıflandırma için yeni bir yaklaşım önermektedir. Toprak-alet etkileşimi sırasında ortaya çıkan dinamik sürtünme kuvvetini tahmin etmek için gerçek zamanlı bir enerji bazlı yöntem önerilmiştir. Yöntem, kepçe hızının ve dağılımının çevrimiçi olarak belirlenmesini sağlayan kuvvet ve yer değiştirme değişkenlerini ölçmek için yeni bir tekniğe dayanır. Önerilen yöntem toprak türlerinin çevrimiçi tahmini için pratik ve teknik olarak güçlü bir yaklaşımdır. Nagaoka ve diğerleri [18] özellikle yakın gelecekteki ay yeraltı araştırmaları için bir oyuk robotunun kazı mekanizmasını incelemiştir. Yazarlar, yapıya tepki vermeyen CSD adı verilen yeni bir delme mekanizması önerdiler. Arşimet vidasına benzer bir yapıya sahip olan bir vida modeli ile toprağı delirken bağlı olduğu yüzeyden ayrılmaktadır.

Özellikle, günümüz vida delme mekanizmalarına göre delme hızı, dönme hızı, itme kuvveti ve delme performansı fazladır. Jud ve diğerleri [19] toprak bileşiminden bağımsız ve tek bir kazının ötesine geçen insansız kazı için yeni bir planlama ve kontrol yaklaşımı sunmuştur. Tek bir kazı döngüsünü doğrudan bir uç ile efektif kuvvet-tork yörüngesi ile tanımlamış ve bu yörünge farklı toprak tiplerine uygulanmıştır. İstenen bir zemin geometrisi elde edilinceye kadar art arda tekli kazı yapmak için büyük ölçekli bir yinelemeli planlayıcı önermiştir. Tek kazıma maksimum verimde sonuçlanmıştır. Fernando ve diğerleri [20] parçalanmış kayaların robotik kazısı için kontrol edilebilir kova doldurma faktörünü elde etmek için ayar noktalarının öğrenilmesine ve uyarlanmasına yönelik bir kabul kontrol planının geliştirilmesini amaçlanmıştır. 14 ton kapasiteli loadhaul-damperli araç ve yeraltı bir yığın kazık ile yapılan tam ölçekli robotik kazı deneyleri yapılmış ve sonuçları, daha önce geliştirilen bir Dig Admittance Controller'ın (DAC) gaz ve referans hız ayar noktalarını değiştirdiğini belirtmiştir. Tan ve diğerleri [21] toprağın deneysel tanımlanması için Newton-Raphson yöntemine dayanan bir model sunmuştur. Toprak mekaniği denklemlerinin bilinmeyen parametrelerini ölçülen kuvvetleri ile tahmin edilen kuvvetler arasındaki hatayı minimize etmeyi amaçlamıştır. Parametre tahmini için dört farklı toprak tipi kullanılarak test edilmiştir (Ticino, Yağmurlu Ticino, Nevada Fine ve Cam Boncuklar). Sonuçlar tahmin ile gerçekleşmenin yakın olduğunu göstermiştir. Tan ve Choopar [22] zemin tesviye ve kazma gibi kazı işleri sırasında çevrimiçi olarak toprak özelliklerini tahmin etmek için Newton Raphson tabanlı yeni bir yöntem sunmuşlardır. Önerilen yöntem, toprakla temas halindeyken ekskavatör keççesine etkiyen kuvvetleri ölçerek tahmin edilen kuvvetler arasındaki hatayı minimize etmeyi amaçlamaktır. Newton raphson yönteminin Coulomb toprak modeli ve Chen ve Liu üst sınır toprak modellerine yakın sonuçlar bulduğunu ama 2000 kat daha hızlı olduğunu paylaşmıştır.

Otonom dozerlerde küreme işleminin yapılabilmesi için farklı algoritmalar geliştirilmektedir. Yıldırım ve Bettemir [23] bıçak genişliği 1 m olan otonom dozer için küreme algoritması geliştirmiştir. Otonom dozer müdahalesiz bir şekilde araziye tesviye etmiştir. Bettemir ve Tombaloğlu [24] küreme işlemi için küçük ölçekli bir iş makinesi tasarlamış, yüksekliğin tanımlandığı araziler için müdahalesiz seviyeleme işlemi yapmayı amaçlamıştır. Aracın 1200 W gücünde, küreme kuvvetinin 300 N olduğunu belirtmiş, seviyeleme hassasiyetini 3 cm olarak hesaplamıştır. Saska [25]

hava alanlarında kar temizleyebilecek otonom kar küreme araçları ile bağımsız mobil araçları kıyaslamıştır. Bir simülasyon çalışması ile rotalama yapılan otonom araç grubunu daha başarılı bulmuştur.

Kazı ve yükleme işlemleri iş makinelerinde hız ve verim istenilen uygulamalardır. Koyachi vd. otonom [26] lastik tekerlekli yükleyicinin, dışarıdan müdahale olmadan yığını kamyonu yükleyebilmesi için çözüm algoritması geliştirmiştir. Aracın yol planlama, kontrollü yol takibi, kazma ve yükleme kontrolü içeren fonksiyona sahip olduğunu belirtmiştir. Sarata ve Shigeru [27] lastik tekerlekli yükleyici ile yükleme işleminin insansız olarak yapılmasını incelemiştir. Sistem çevre ölçüm ve modelleme, planlama ve hareket kontrolü olarak küç alt başlık altında incelemiştir. Çevre ölçüm alt sisteminde ortamın 3D şeklini stereo-görme olarak planlamıştır. Oluşturmuş olduğu modelin küçük ölçekli bir prototipini laboratuvar ortamında test etmiş, müdahalesiz bir şekilde yükleme işlemini tamamlamıştır. Shigeru vd. [28] tekerlekli bir yükleyicinin kazı yığını yüklemesi üzerine araç yönünü ve kuvvetlerini tespit etmiştir. Yığın-bıçak etkileşimi sırasında, kepçe üzerine uygulanan direnç kuvvetinin bir tahminine dayanarak kepçe yönünü belirlemiştir. Önerilen yöntemi deneysel bir modelde uygulamış, modelin çalıştığını sonuçlarla ortaya koymuştur. Magnusson vd. [29] otonom bir loderin yükleyeceği malzeme yığını tanıyabilmesi ve en uygun konuma göre loderin bıçağını kullanmayı amaçlamıştır. Çalışmasını simülasyona uyarlamış, gerçek bir gözlem ile test edip benzer sonuçlar bulduğunu belirtmiştir. Park ve Sung Hee [30] Amesim programını kullanarak bir yükleyicinin hidrolik sistem yazılımını simülasyon modelleme yöntemini sunmuştur. Simülasyon programı, ana pompa, ana kontrol vanası, kompansatör, yönetme kolu ve ekleri gibi her bir elemanı tanımlamıştır. Çalışmasında maliyet ve zaman kısıtlarını göz önüne almıştır. Dadhich vd. [31] çalışmasında lastik tekerlekli yükleyicilerin otonom malzeme yüklemesindeki temel zorlukları incelemiş, Kova ile toprak veya kova ile çevre etkileşiminin literatürde hala çözülemediğine değinmiştir. Yapılan bir çok çalışmanın simülasyon olduğunu ve uygulama projelerinin eksik olduğunu belirtmiştir. Siddharth vd. [32] farklı tip çakıl yığınlarının yüklenmesi sırasında kaydedilen verilerin bir Volvo L110G tekerlekli yükleyici ile analizini yapmıştır. Makine öğrenmesi yaklaşımıyla dozeri otonom hale getirmeyi amaçlamıştır. Yükleme ve taşıma çevrimlerinde ortalama kepçe ağırlığının hâkim parametre olduğunu, yakıt verimliliği ve yükleme süresinde kısa yükleme çevrimleriyle ilişkili olduğunu belirtmiştir. Ghabcheloo ve Reza [33]

hidrolik mafsallı iş makinesinin otonom kontrolü için prototip geliştirmiştir. Sistem tasarımını; görev planlama, grafiksel bir kullanıcı ara yüzü, gelişmiş bir kilometre sayacı algoritması ve navigasyon amaçlı bir GPS cihazı ile oluşturmuştur. Yapmış olduğu prototipin hız kontrolünü de incelenmiştir. Sistemin gerçeğe uygun çalıştığını sonucuna ulaşmıştır. Petty vd. [34] yeraltı madenciliğinde LHD (load - haul - dump) tipi araçları otonom kullanımını incelemiştir. Cevher yığınının üç boyutlu uzamsal verilerini kamera görüntülerinden gerçek zamanlı olarak elde etmiş ve kepçe işleminin planlanmasında kullanmıştır. Osumi ve Hisashi [35] otonom tekerlekli yükleyici tarafından tortunun verimli bir şekilde toplanması için deneysel bir çalışma yapmıştır. Küreme işlemi için gerekli enerjiyi hesaplamış, kova üzerinde üretilen reaksiyon kuvvetinin modelini oluşturmuştur. Bıçak konumunu doğrulamak için mekanik bir simülasyon kullanmıştır. Deneysel sonuçlarında kepçenin içine yerleşmiş tortunun bozucu etki göstermesine rağmen, teorik değerleri yansıtan sonuçları paylaşmıştır.

Kazı simülasyonu genellikle maden, yüzey, temel hafriyatı gibi belirli kısıtları olan ve periyodik uygulamalara sahip işler üzerinde denenmektedir. Zeng, [36] çalışmasında hafriyat simülasyonu tasarlamıştır. Küreme ve yükleme araçlarını kullanarak mikro trafiğe sahip bir ortamda küreme işlemini, yükleme için çevrim sayısını ve rotalama işlemlerini minimize etmeyi amaçlamıştır. Kazı ve yükleme filosu arttıkça kamyon bekleme sürelerinin azaldığını ancak tonaj hacminin doyma noktasından sonra sabit kaldığını belirtmiştir. Afrapoli vd. maden çalışmalarında kullanılan araç modelleme tekniklerini araştırmıştır. [37] Filo yönetim sistemlerini gözden geçirmek için literatürde üç farklı probleme sıklıkla çalışılmaktadır. En kısa yol, üretim optimizasyonu ve gerçek zamanlı sevkiyat problemleri genetik algoritma, yöneylem araştırmaları, rotalama ve matematiksel modellerle çözülmektedir. Ataepour [38] vd. yüzey madenleri için küreme ve yükleme simülasyonu uygulaması çalışmıştır. Uygulamada genellikle her yükleyiciye bir kamyonun atandığını belirtmiş ve bekleme sürelerini hesaplamıştır. Yapmış olduğu simülasyonda ARENA programını kullanmış ve her yükleyiciye birden fazla kamyon atayarak bekleme sürelerini minimize etmiştir. Bastos [39] açık bir maden sahası üzerinde kürenecek olan maden yığının kürenmesini ve taşıyıcı araçların zaman optimizasyonunu yapmıştır. Çalışmasında 15 kamyon, 3 öne doğru hareketle kazı yapan makine ve 1 kırıcı ile stokastik bir örnek madenciliğinde vardiya değişim problemini en aza indirmek için Zamana Bağlı Markov Karar Süreci'ne dayanan bir karar verme

metodolojisi sunmaktadır. Sistem, performansı sezgisel sonuçları ile karşılaştırılarak SimEvents'de modellenmiş ve simüle edilmiştir. Bissiri [40] vd. çalışmasında sürü haberleşme yaklaşımı ile bir gönderi sistemini modellemek ve simüle etmek için koloni böceklerin davranışını kullanan yeni bir teknik kullanmıştır. Tüm filonun kamyonlarını ve küreyicilerini verimli bir şekilde dağıtabilen ve kamyon, küreme ve bakım ortamındaki değişikliklere uyum sağlayabilen esnek bir sevk sistemi geliştirmiştir. Manuel vd. [41] 17 derecelik serbestliğe sahip 14 katı cisimden oluşan 3 boyutlu fiziksel ekskavatör simülasyonu geliştirmiştir. Tasarımda çok gövdeli sistem dinamiğini gerçek zamanlı simülasyon teknikleri ile uygulamıştır. Filla vd. [42] çalışmasında lastik tekerlekli yükleyicilerin aktarma organı ve hidrolik sistemleri arasındaki anlık güç dağılımını dinamik bir şekilde simüle eden uygulamasını paylaşmıştır. Simülasyon aracının toplam performansını, yakıt verimliliğini başarılı bulmuş ve ürün geliştirme sürecinde konsept bir tasarım olarak uygulanabileceğini belirtmiştir.

Yüzey madenleri kazılarında bıçak derinliği sabit veya değişken olabilmektedir. Yapılan işin amacına göre küreme bıçağının sürekli toprağa belirli bir derinliği geçmeme şartıyla saplanması ve toprağın kesme kuvvetini yenmesi ile cevherin kazılması amaçlanmaktadır. Bu uygulama sürekli tekrar eden bir aktivite olmakla birlikte farklı kullanım alanlarında insansız bir şekilde yapılabilir. Nebot [43] bir yüzey madeni için otonom küreme aracının kullanılabilirliğini önermiş ve aracın karşılaşacağı muhtemel sorunları öngörmeye çalışmıştır. Onyukh ve Vlademir [44] yüzey kazılarında robot kullanımı için altı kriter sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Madencilik robotiği için üç olası şekil sunmuştur. Madencilik robot sistemlerini simüle etmek için fonksiyonel modelleme ve Petri ağları kullanılmış ve karlılığını değerlendirmek için, doğrudan ve dolaylı robotik verimlilik kaynaklarını kullanan basit bir yöntem önerilmiştir. Lever [45] robotik bir ön-uç yükleyici tipi maden makinesinin otonom kazı kontrolü için sinir ağları ve bulanık davranışların kullanımını incelemiştir. Genel kazı işleri için dokuz tipik davranış programını bulanık mantık kuralları ile oluşturulmuştur. Çalışmasını puma 560 robot kolu, bir Zebra tork sensörü ve bir sun iş istasyonu kullanılarak gerçekleştirmiştir. Sonuç bölümünde bulanık davranışların kazı işlemi sırasında öngörülemeyen olaylara tepki verebildiğini ve istenen kazı hedeflerini başarıyla tamamlayabildiğini paylaşmıştır. Wang [46] robotik kazılarda bulanık davranış programlaması için temsilci tabanlı kontrol kavramı

formülasyonu ve uygulanması çalışmasında sunmuştur. Bulanık kontrol kuralları ilkel hareketleri uygulamak için kullanılmış, petri ağı dönüştürücüler ile de kazı kontrol koordinasyon ve özellikleri tarif etmek için kullanmıştır. Kazı görevlerini dinamik ve yapılandırılmamış ortamlarda tamamlayabildi sonucuna ulaşmıştır. Berglund ve Tomas [47] açık maden sahalarında engellerden kaçınarak hedefe hızlı şekilde ulaşabilen otonom kara aracı algoritması oluşturmuştur. Aracın 4 tekerden tahrik aldığı varsayarak, engel konumlarına göre B-Spline eğrileri ile rota oluşturmuştur. Çalışmasında, yeni yolların kullanımına göre yeni rotalar ortalama % 32,13 daha hızlı yolculuk ettiğini sonucuna ulaşmıştır.

Çevre sorunlarının artmasıyla birlikte dizel ve benzinli araçlara olan ilgi azalmaktadır. Yeni teknolojilerin gelişmesiyle birlikte elektrikli araçlar tercih edilebilmektedir. Elektrikli araç performansının önemli bir kısmı batarya sistemleriyle ilişkilidir. İş makinelerinde yakıt kullanımı diğer araç sınıflarına göre daha fazla olmakla birlikte, depolanması gereken enerjide daha fazladır. Affanni ve Antonio [48] çevre sorunlarından dolayı elektrik araçlara yönelmesi gerektiğini belirtmiş, elektrikli araçlarda batarya seçimi kriterlerini paylaşmıştır. Yüksek performanslı ve insansız özelliklere sahip bir prototip elektrikli scooter için li-ion teknolojisine dayalı bir pil takımını tasarlamıştır. Kullanılan batarya sistemi, yüksek bir gerilim seviyesine sahip olduğunu ve yedek bir bataryayla da yolda kalma riskini azaltmıştır. Lukic ve Srdjan [49] elektrikli tahrik kabiliyetine sahip yeni araçların yakıt verimliliği ve performansı, enerji depolama sisteminin performansı ile büyük ölçüde sınırlı olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında, otomotiv uygulamalarındaki son teknoloji enerji depolama sistemlerini kıyaslamış batarya teknolojisi seçenekleri, batarya izleme, yönetme, koruma ve dengeleme yöntemlerine ağırlık vererek detaylı olarak ele almıştır. Ayrıca ultrakapasitörler, volanlar ve yakıt hücreleri gibi diğer enerji depolama sistemi elemanlarının performansını ve verime etkisini incelemiştir. Cao vd. [50] elektrikli araca olan eğilimin yüksek voltaj, yüksek verimlilik ve uzun ömürlü akü sistemlerine ihtiyaç duyduğunu belirtmiş, bir batarya sisteminin; koruma, yönetme ve dengeleme sistemlerinden oluştuğuna değinmiştir. Makalesinde son 20 yıl içinde batarya sistemleri için önerilen dengeleme yöntemlerinin arkasındaki teoriyi karşılaştırmış, yöntemlerin birbirine göre avantaj ve dezavantajlarını sunmuştur.

Elektrikli araç motorlarının çeşitli seçim kriterleri bulunmaktadır. Maliyet, ağırlık, verim, güç yoğunluğu ve maksimum gibi parametreler motor seçiminde etkilidir. Xue

vd. [51] elektrikli araçlar için altı çeşit elektrikli motorunu ve aktarma organları ele alınmıştır. Anahtarlamalı relüktans motoru, endüksiyon motoru, sürekli mıknatıslı allıksız DC motor ve fırçalanmış DC motor seçenekleri için verimlilik, ağırlık, maliyet, soğutma, maksimum hız ve hata toleransı, güvenlik ve güvenilirlik üzerine karşılaştırmalı inceleme yapmış, elektrikli araç uygulamaları için en uygun elektrikli motor seçeneğini bulmayı amaçlamıştır. Çalışmasında, anahtarlamalı relüktans motor tahriklerinin elektrikli araçlar için öncelikli seçenek olduğu sonucuna ulaşmıştır. De Santiago ve Juan [52] ticari elektrikli taşıtlarda kullanılan elektrik motorlarına ilişkin bir anket çalışması paylaşmış, piyasadaki elektrikli taşıtların çoğu, diferansiyelli geleneksel bir mekanik aktarma organına sahip tek endüksiyonlu olmakla birlikte daimi mıknatıslı (PM) bir motor ile tahriklenmektedir. Anket sonucunda otomobil üreticilerinin yeni teknolojiler sunmaya gelince çok tutucu olduklarını, piyasada birçok aracın benzer özelliklere sahip olduğu bulgusuna ulaşmıştır. Yıldırım vd. [53] çalışmasında anahtarlamalı relüktans motor (SRM), asenkron motor (IM), fırçasız DC motor ve daimi mıknatıslı motor (PM) ve sürücülerinin verim, maliyet, ağırlık, soğutma, maksimum hız, güvenilirlik, hata toleransı, güç değerleri ve araç hızlanma süresi parametreleri ile karşılaştırmak için kapsamlı bir literatür araştırması sunmuşlardır. PM motorlarının ve sürücülerinin en verimli ve yüksek güç yoğunluğuna, fırçasız DC motorlara ve sürücülerinin düşük maliyetli olduğu, IM'nin kontrol edilebilirlik ve maliyete uygun olduğu, SRM'nin ağırlığının düşük olduğu, güvenilirliğinin yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Cakir vd. [54] 4 tekerlekte de tahrik alabilen araçlar için teker içi motor tasarımı yapmıştır. 3 boyutlu model oluşturmuş, gelen kuvvetleri hesaplamıştır. Elektromanyetik sonuçlar ile model sonuçlarının tutarlı olduğunu belirtmiştir. Dizqah ve Arash [55] 4 tekerlekten tahrik alan elektrik motorları için optimum tork analizi yapmışlardır. Sonsuz sayıda kombinasyon olduğunu belirtmiş, aktarma organlarının güç kayıplarını azaltmada önemli önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Yazısında, optimum tork dağılımını araç hızına bağlı olarak oluşturmuş, alternatif tork dağılımlarına enerji tasarrufunun olduğu sonucuna varmıştır.

Araç iskeletinin hafif ve dayanıklı olması istenmektedir. Hafif olması araca etki eden direnç kuvvetlerin azalmasına sebep olacak ve motor gücü azalacaktır. Dayanıklı olması zorlama ve olası bir kaza riskinde kullanıcının ve araç elemanlarının zarar görmesini engelleyecektir. Cavazzuti ve Marco [56] çalışmasında arka-orta motorlu

yüksek performanslı bir Ferrari F458 Italia'nın araç şasisinin tasarımını yapmıştır. Topoloji, topometri ve boyut optimizasyonlarını kullanarak sonlu eleman yöntemi analizleriyle optimum şasi konfigürasyonuna ulaşmayı amaçlamıştır. Önermiş olduğu model ile aracın daha da hafiflediğini belirtmiştir. Otomobil ve iş makineleri şasisleri sökülebilen parçalardan oluşmaktadır. Yolculuk, frenleme ve kazı işleri gibi titreşimli uygulamalarda araç şasi titreşim zorlamasına maruz kalmaktadır. Yu vd. [57] lastik tekerlekli araçlar için fren ve tork dalgalanmasının neden olduğu titreşimlerden dolayı araç şasisinin ilettiği yükü analiz etmek için bir simülasyon teknolojisinin geliştirmiştir. Direksiyon, süspansiyon, kayan alt şasi, lastik tekerleği ve sanal bir uyarma teçhizatından oluşan birleştirilmiş ön şasi sistemi için çok gövdeli bir simülasyon modeli oluşturmuştur. Derzlerin sürtünmesini ve yer değiştirmeye bağlı gerilmeleri önlemek için hidrolik güç destek sistemi gibi doğrusal olmayan elemanlar ile modellemiştir.

Kazılan toprakla temas eden iş makinesi uzvu küreme bıçağıdır. Küreme bıçağının ağırlığı, genişliği düşey ve yatay eğimi uygulanacak kuvveti değiştirmektedir. Freivalds ve Kim [58] kum zemini hareket ettirmek için farklı ebatlara ve ağırlıklara sahip beş değişik bıçak kullanılarak ölçümler yapmıştır. Kullanılan yüke göre enerji harcaması, bıçak boyutu / kürek ağırlığı (B/W) oranına göre dört kat değiştiğini gözlemlemiş, minimum enerjinin tüm kürekler için ortalama 5.16 kcal / dak değerinde olduğunu belirtmiştir. Çalışmasının sonucunda çok büyük veya çok ağır bir bıçağın enerji harcamalarını kabul edilebilir seviyelerin üzerine çıkarırken, çok küçük bir bıçağın da küreme verimini düşürdüğünü gözlemlemiştir. Bıçak boyutu ve ağırlığı sadece araç motorunu değil bıçak motor ve hidrolik boyutunu da etkilemektedir. Küreme bıçağının düşey ve açısız hareketlerini kontrol etmek için hidrolik sistemler tercih edilmektedir. Shi vd. [59] yeni bir elektrohidrolik kontrol sistemiyle kürek kesme derinliğini daha doğru kontrol etmeyi amaçlayan bir tasarım sunmuştur. Elektromanyetik orantılı dönüştürme valfi üzerinden paralel olarak yeni hidrolik devreye bağlamış böylece manuel kontrol ve otomatik kontrol çalışma talebine göre değişebilen bir yapı oluşturmuştur. Manuel sistemlere göre daha doğru bıçak derinliği hassasiyetine sahip olan bir model geliştirmiştir.

Yamakawa vd. [60] araştırmasında lastiklerin zemin temasıyla yaptığı sürtünme işini en aza indirmek için varyasyon prensibi kullanılarak bir optimum tork belirleme yöntemi sunmuşlardır. Dört tekerlekli bir taşıt için her bir tekerlek üzerinde optimum

tork hesaplamıştır. Elektrikli araç veriminin artırılması için her tekerleğin tork optimizasyonun yapılması gerektiği sonucuna ulaşmıştır. Suzuki vd. [61] elektrikli bir taşıtın hareket kontrolleri için bazı normlara sahip ileri beslemeli lastik gücü dağıtım kontrollerini 2 farklı yöntemle sunmuştur. Uygulanan dağıtım kontrolü normlarından biri lastik iş yükünü en aza indirirken diğeri araç hareketi sırasında lastik kayması nedeniyle lastik yayılma enerjisini en aza indirmektir. Uzunsoy [62] çalışmasında standart araç manevraları ile düzgün kaplamalı yok ve off road iki yol üstünde araç tekerini simüle etmiş ve iki ayrı yol türü için davranışlarını kıyaslamıştır. 30 ve 50 km/h için yuvarlanma oranı hesaplamış off road yol tipi ile on road yol tipi arasında 1-2 deg/s gibi küçük farklar hesaplamış bunun sonucunda off road için seçilen uygun tekerlek modelinin yolda da yakın bir davranış gösterdiğini belirtmiştir.

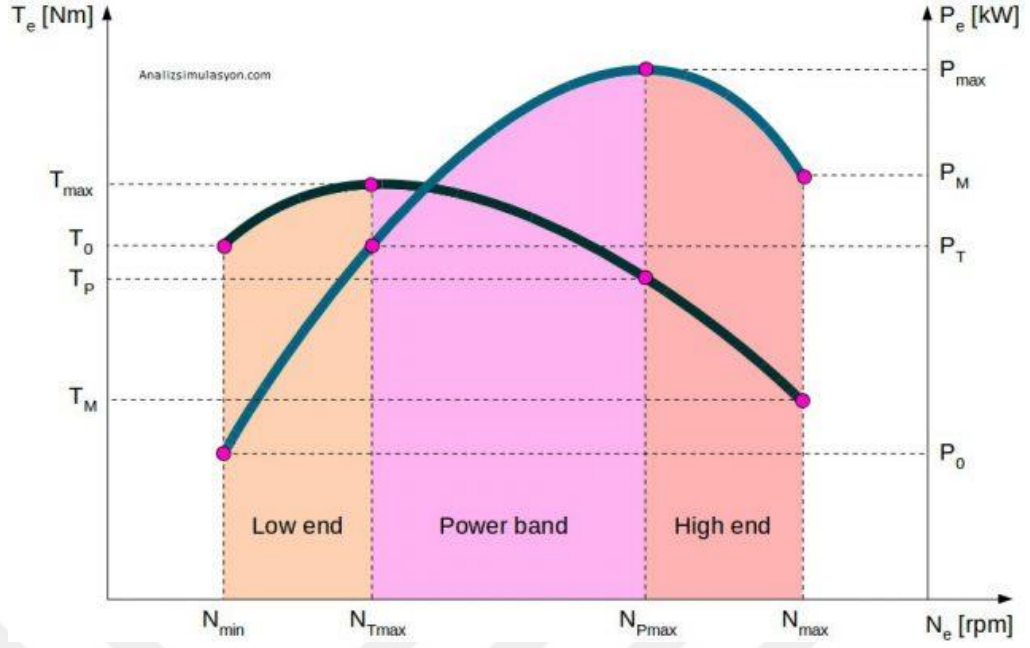
Yapılan çalışmalar incelendiğinde otonom iş makineleri çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Küreme, yükleme, kazma ve kırma gibi işlerde makine toprak etkileşimi çalışmaları oldukça fazladır. Maden sahaları, tünel kazıları ve iş güvenliği riskinin yüksek olduğu çalışma alanlarında otonom iş makinesi uygulamaları görülmektedir.

3. İŞ MAKİNESİ TASARIMI

Bu bölümde iş makinesinin motor, yürüyen aksamı, batarya ve küreme bıçağı hakkında bilgi verilmektedir. Elektrikli araçlarda 4 tekerden tahrikli ve merkezi motordan tahrikli güç elemanı kullanılmaktadır. Motor için gerekli enerji batarya üniteleri ile sağlanmaktadır. Bataryalar elektrikli aracın bir bölümüne toplu bir şekilde yerleştirilmiştir. İş makineleri zorlu arazi şartlarında çalıştıkları için kullanılan tekerlekler geniş ve sürtünme katsayısı yüksek malzemelerden oluşan tekerlekler seçilmektedir.

3.1. Elektrik Motoru

Motorların tork ve güç değerleri dakikadaki devir sayısı ile değişmektedir. Düşük devir sayılarında tork yüksek değerlerdedir. Torkun maksimumu bulunduğu devir sayısı gücün maksimum olduğu devir sayısından daha küçüktür. Bu da aracın kalkış performansını etkilemektedir. Devir sayısı, tork ve güç eğrisi Şekil 3.1'de görselleştirilmiştir. Grafik çift eksenli çizdirilmiştir. Açık mavi renkte olan eğri güç ile devir sayısını, lacivert olan eğri tork ile devir sayısı ilişkisini göstermektedir. Elektrik motorlarında diğer motor türlerinden farklı olarak başlangıç torku T_0 yüksektir. Elektrik motoru diğer motor türlerine göre daha düşük devir sayılarında maksimum torka ulaşmaktadır. Bu durumda da motorun güç bandı genişliği artmakta ve motor daha geniş devir sayısı aralığında iyi performansla çalışmaktadır.



Şekil 3.1. Motor – Tork – Devir Sayısı Eğrisi [63]

Şekil 3.1’de; N_{min} tam yükte minimum stabil devir sayısı, N_{Tmax} maksimum motor torkunda devir sayısı, N_{Pmax} maksimum motor gücünde ki devir sayısı ve N_{max} tam yükte maksimum stabil devir sayısını temsil etmektedir. Devir sayıları bir dev/dk cinsindedir. T_0 minimum devir sayısında ki tork, T_{max} maksimum tork, T_P maksimum motor gücü durumunda ki tork ve T_M maksimum devir sayısında oluşan torktur. P_0 minimum devir sayısında ki güç, P_{max} maksimum güç, P_T maksimum motor torku durumunda ki güç ve P_M maksimum devir sayısında ki güç olarak gösterilmiştir.

Aracın maksimum ivmelenme performansı için motor maksimum tork noktası ile maksimum güç noktası arasında çalıştırılmalıdır. Bu iki nokta arasında kalan bölge “Power Band” olarak adlandırılmaktadır. Bu aralık torku maksimum yapan devir sayısı ile gücü maksimum yapan devir sayısı arasındadır.

Elektrik motorundan; anlık tahrikin yüksek olması, yüksek güç yoğunluğu, arazi şartlarında ki ani moment ihtiyacına hızlı cevap verme, güvenilirlik, sağlamlık ve makul düzeyde bir ücret beklenmektedir. Motor seçiminde ise araç beklentisi, enerji kaynağı ve kısıtlar etkilidir. Araç beklentisi; hız, ivmelenme ve ivmelenme ile ilişkiliyken, kısıtlar araç türü, ağırlığı ve maruz kaldığı yük ile ilişkilidir. Enerji kaynağında ise her geçen gün batarya teknolojisi ilerlemektedir. Akü, yakıt pili ve diğer batarya seçeneklerine bağlı olarak motor seçimi yapılabilir. [64] Yapılan

çalışmadaki araç boyutu standart iş makinesi boyutlarından küçük olduğu için elektrik motorunun seçilmesi uygun görülmüştür.

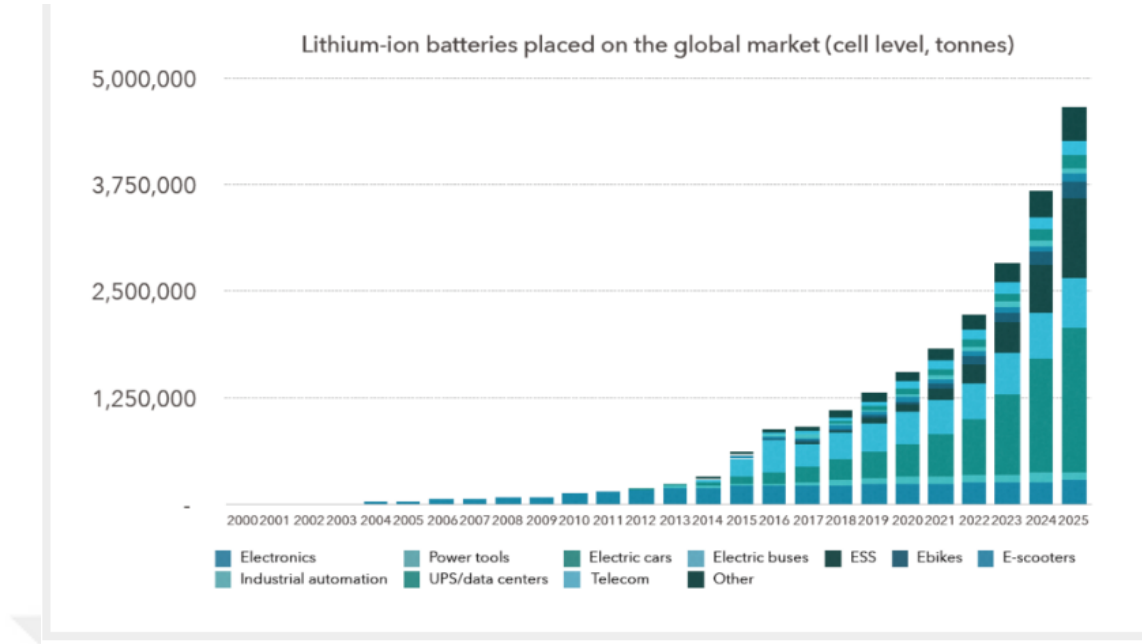
Araçlarda kullanılacak elektrik motorları DC, AC, asekron, mıknatıslı ve aktarmalı relüktans motoru sınıfında olabilir. Doğru akım ile çalışan DC motorlar küçük araçlar için tercih edilmektedir. Asekron motorunun sağlam yapısı nedeniyle uygulamada sıkça tercih edilmektedir. AC motorlar ise DC motora göre daha büyük araçlar için kullanılmaktadır.

Araçta tekerler için 4 tane ve küreme bıçağı için 2 tane olmak üzere 6 adet DC motor bulunmaktadır. Seçilen motorların teker içi montaja uygun olmasına ve istenilen gücü sağlamasına dikkat edilmiştir. Teker için seçilen motorların aynı kapasitede olmasına dikkat edilmiştir.

Elektrik motoru seçiminde motor ağırlığı önemli bir parametredir. Motor ağırlığı arttıkça motorun harcadığı güç miktarı artmaktadır. Bu sebeple seçilen motorların hafif olmasına dikkat edilmiştir.

3.2. Batarya

Elektrikli araçlar için depolama teknolojileri çeşitlilik göstermekle batarya miktarının üstel artması öngörülmektedir. Şekil 3.2’de küresel piyasaya sunulacak olan batarya miktarı sunulmuştur. Eğri incelendiğinde üstel bir şekilde arttığı görülmektedir. Elektrikli araç bataryasında da önemli bir artış beklenmektedir. Enerji depolama sistemleri elektrikli araçlar için önemli bir maliyet kalemi olmaktadır. Gelişmiş ülkelerin elektrikli araçlara teşvik vermesi ile birlikte elektrik araçların sayısı artmaktadır. Bunun sonucu olarak depolama sistemlerine verilen önem de artmaktadır.



Global battery output is predicted to more than triple by 2025

Image: Circular Energy Storage 2018

Şekil 3.2. 2025 Yılına Kadar Elektrik Batarya kullanım tahmini [65]

İş makinelerinin enerji depolama ihtiyacı aynı motor gücünde olan normal bir araca göre daha fazla olmaktadır. Aracın iş yapabilme kapasitesi ve kullanım şekline bağlı olarak depolama miktarı değişkenlik göstermektedir. Küreme, kazma ve yükleme işlemlerinde kullanılan araçların moment zorlanması fazla olması gücü, gücünden fazla olması depolama kapasitesini arttırmaktadır.

Elektrikli araç depolama sistemleri genelde paralel ve seri bağlı depolama sistemlerinden oluşmaktadır [66]. Özgül güç ve enerjisi yüksek olan li-ion bataryaları pek kullanılsa da ömür sayısı diğer alternatiflere göre fazladır. Dünyada genellikle kurşun asit aküleri kullanılmaktadır. Temininin kolay olması, bakım için yetişmiş işçi gücünün bulunması ve ekonomik nedenlerden dolayı kullanımını yaygınlaştırmıştır. Sulu tip akülerin yerini günümüzde kuru tip elyaf içerikli aküler almaktadır. Kurşun içerikli akü ağırlığının fazla olmasından dolayı otonom küreme aracında kullanılmamıştır. Elektrik depolama sistemlerinde, yüksek özgül güç (W/kg), yüksek güç ve enerji yoğunluğu, hızlı şarj, uzun ömür, yüksek güçle şarj olabilme, güvenilirlik ve düşük maliyet beklenmektedir. Günümüzde bu niteliklerin tamamını aynı anda bulunması mümkün değildir. Simülasyonda kullanılan otonom küreme aracında ise enerjinin tümü lityum batarlardan karşılanmaktadır. Lityum bataryaların maliyeti normal akü

sistemlerine fazla olmasına karşın özgül enerjisi (Wh/kg) fazladır. İterasyon ile farklı motor sınıfı ve farklı şasi ağırlıkları için akü sayısı hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1. Batarya Türlerinin Karşılaştırması

Batarya	Wh/kg	W/kg	Çevrim Ömrü
Lityum - Sülfat	60-200	50-70	150-220
Çinko - Bromin	70-100	30-50	200-350
Nikel - Çinko	60-100	80-120	100-150
Nikel - Demir	50-90	80-120	500-1100
Nikel - Metal	50-90	100-140	80-500
Sodyum - Sülfür	70-200	100-140	300-910
Kurşun - Asit	30-60	20-80	300-500

Araçta kullanılan batarya lityum batarya olup özellikleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Birim ağırlık başına düşen enerji miktarı bakımından diğer batarya türlerine göre avantajlıdır. Batarya seçiminde birim ağırlık başına düşen enerji miktarı azaldıkça batarya sayısı artacaktır. Tasarımda lityum batarya kullanılmasının en baskın sebebi birim ağırlık başına düşen enerji miktarının fazla olmasıdır. Lityum – Sülfat bataryaları çevrim ömrü bakımından diğer bataryalarla kıyaslandığında çevrim ömürleri daha kısadır.

3.3. Küreme Bıçağı

Dozerler bıçak şekillerine göre düz, yan açılı ve eğimli olabilirler. Düz bıçaklı dozerlerin kazı bıçağı traktör eksenine bağlanmıştır ve sadece aşağı yukarı yönde hareket edebilmektedir. Genellikle yüzey kazılarında ve düzeltmede kullanılmaktadır. Yan açılı bıçağa sahip dozerlerde, bıçak sağa ve sola 30 derecelik açı ile hareket edebilmektedir. Açılı hareket serbestliği yamaç kazılarında iş makinesi için avantaj sağlamaktadır. Eğimli bıçağa sahip dozerlerde ise bıçak alt ve üst uçları 60 derecelik açı yapabilecek kadar serbestlik verilmiştir. Hendek kazıları ve şev istenen kazılar için kullanılmaktadır. Simülasyonda kullanılan otonom küreme aracı için sadece yukarı aşağı yönde hareket edebilen düz bıçak seçilmiştir. Aracın yüzey kazısı yapacağı öngörülmüştür.

Dozer bıçağı seçiminde, kürenecek malzeme sınıfı, malzemenin boşluklu yapısı, nem oranı ve makine gücü etkili parametrelerdir. Hemen hemen her tür zemini küremek mümkündür, fakat malzemenin tanecik boyutu, boşluklu yapısı ve sertliği dozer verimini etkilemektedir. Zeminin nem oranı attıkça kürenecek malzeme bıçağa daha çok yapışacak ve ağırlığı artacaktır. Düşey yönde ağırlığın artması itki kuvvetini attıracaktır.

Küreme bıçakları S (Straight), SU (Semi Universal) , U (Universal) , VR(VaiableRadius), CU (Cushion), güç eğimli ve tırmık şekillerinde olabilir [67]. S bıçağı düz bir yapıya sahiptir. Düz yapı araçlar hareketini kolaylaştırmaktadır. U bıçağı büyük yan kanatlara sahiptir ve silo doldurma, depolama vb. İşler için kullanılmaktadır. SU bıçağı S ve U bıçağının karışımıdır. Yan kanatlar küçültülerek daha ergonomik ve araç hareketini kolaylaştıran bir konstrüksiyon elde edilmiştir. VR bıçağı U bıçağının özelliklerini taşımaktadır, fakat geometrisi farklılık göstermektedir. VR bıçağı ağaç kökleri kazıma, arazi ıslahı gibi işlerde kullanılır. CU bıçağı yük itme işleri için kullanılır. Güç eğimli bıçak öne ve arkaya yatarak malzemeye uygulan kesme kuvvetini değiştirebilmektedir. Fazla sert zeminler için bıçak arkaya doğru yatırılır tersi durumda öne doğru yatırılarak küremenin daha kolay yapılması sağlanır. Tırmık bıçakta ise tırmıklama ve temizlik işleri için bıçağın ucunun taraklı olması durumudur

Bıçak S tipi bir yapıya sahiptir. Tasarımda kullanılan bıçağın yan kanatları bulunmamaktadır. Aracın sadece küreme ve sürüklenme yapacağı şekilde tasarlanmıştır. Bıçak geometrik olarak profil izdüşümünde bir yay halindedir. Bıçağın et kalınlığı sürüklenme yaptığında eğilmeyecek şekilde seçilmiştir. Et kalınlığının fazla olduğu durumda da bıçak ağırlığı artacak, bıçak hareketleri için gerekli motor gücü artacaktır.

Küreme bıçağı ST37 çeliğinden yapılmıştır. ST37 çeliğinin emniyet gerilmeleri $\sigma_{em} = 14 \text{ kN/cm}^2$ ve $\tau_{em} = 9 \text{ kN/cm}^2$ 'dir. Küreme bıçağının et kalınlığı 8 mm'dir. Bıçağa eğilme ve kesilme tahkiki yapılarak Eşitlik 1 ve 2'de sonuçları paylaşılmıştır.

$$v = P L^3 / 3EI \quad (3.1)$$

$$v = 110 \times 0,05 \times 0,2^3 / (3 \times 200 \times 10^6 \times (1 \times 0,008^3 / 12))$$

$$v = 0,00002959 \text{ m}$$

Bir eşitliğinde bıçağın yapacağı maksimum sehim metre cinsinden hesaplanmıştır. Aracı en fazla zorlayacak, kazı direnç katsayısı 110 kN/m^2 olan zemin baz alınmıştır. Bıçağın moment kolu 20 cm alınmış ve öngörülen sehim miktarı 1 mm'dir. Bulunan sehim uzunluğu bu değer çok altındadır. 8 mm et kalınlığına sahip bıçak 5 cm kalınlığında ve 110 kN/m^2 kazı direncine sahip zemini ihmal edilebilecek kadar küçük bir sehimle küreyebilmektedir.

$$\tau = F/A \quad (3.2)$$

$$\tau = 110 \times 0,05 / (100 \times 0,8)$$

$$\tau = 0,06875 \text{ kN/cm}^2$$

Kesme kontrolü için kayma gerilmesi hesaplanmış sonucu paylaşılmıştır. Bulunan kayma gerilmesi emniyet kayma gerilmesinden ($\tau_{em} = 9 \text{ kN/cm}^2$) küçüktür. Küreme bıçağının kesme emniyet katsıyı 130,9 olarak hesaplanmıştır.

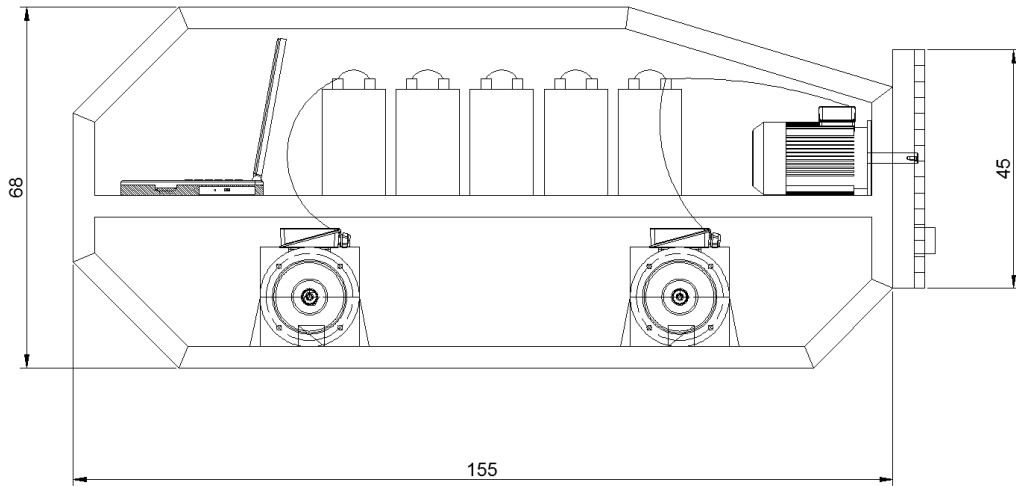
3.4. Şasi

İş makinelerinde genellikle büyük hacimli dizel motorlar kullanıldığı için araç geometrisi motorun ve yakıt tankının konumlandırıldığı yere göre şekillenmektedir. Motorun olduğu bölüm büyük hacimli bir kaporta ile korunmakta, motordan alınan tahrik tekerlere iletilmektedir. Genellikle iş makinesi motorları ön tekerle yakın konumlandırılır. Düz olmayan arazilerde araç rahat hareket edebilsin diye tekerleklerin yerden yüksekliği ve akslar zeminden uzak tutulur. Aracın tabanı sertleştirilmiş ve darbelere dayanıklı metal bir koruma sacıyla kaplanır ve aracın teknik aksamının zarar görmesi engellenir.

Aracın çeşitli sistemlerini üstünde bulunduran ve aracın kafes yapısını oluşturan yapıya şasi denmektedir. Dayanıklı, hafif, rijit ve tamir edilebilir bir yapıya sahip olması istenmektedir. Otomobil şasilerinde yolcu güvenliği ön plana çıkarken iş makinesi şasilerde sadece operatör güvenliği ön plana çıkmaktadır. Simulasyon aracı insansız olduğu için aracın kısıtları göz önünde bulundurulmuştur.

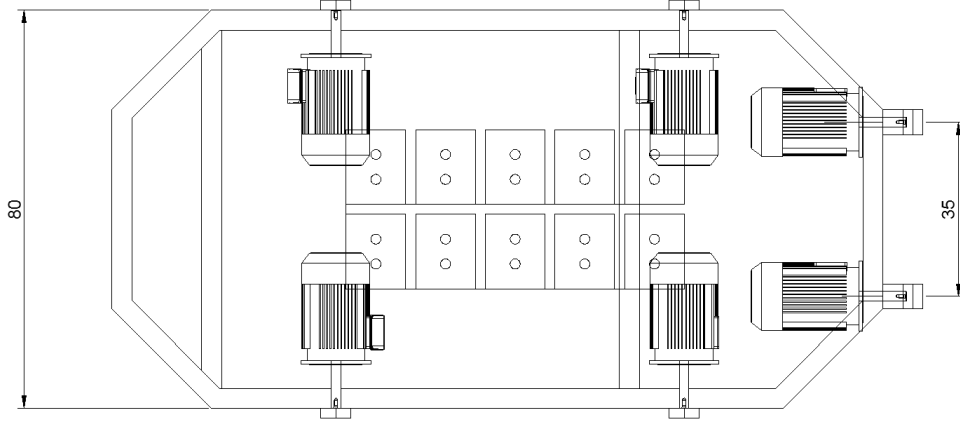
Şasi için uygun metal seçilirken piyasada kolaylıkla bulunabilen ve kaynak edilebilen profiller seçilmiştir. Seçilen profillerin için boşluk ve ağırlık için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şasi ağırlığının düşük olması istenmektedir.

Araç iskeleti iki katlı olarak tasarlanmıştır. Bataryaların ve kontrol elemanın konulduğu alan üst katta kalacak şekilde araç içinde bir bölme oluşturulmuştur. Alt katta motorların sığacağı kadar bir bölüm tasarlanmıştır. Batarya, motorlar ve diğer elemanlar kafes yapı içerisinde kalmaktadır. Araç iskeletin üstü sac bir plaka ile kapatılmıştır. Araç yokuş çıktığında ve indiğinde aracın uç noktaları yere değmemesi için köşeler kırılmıştır. Bu işlem araca daha işlevsel ve kompakt bir tasarım sağlamıştır.



Şekil 3.3. Otonom Küreme Aracı Yürüyen Aksam Yan Görünüş

Aracın profil izdüşümü Şekil 3.3’de görselleştirilmiştir. Aracın şasisinin yüksekliği 68 cm ve uzunlu 155 cm’dir. Üst bölümde batarya, bilgisayar ve bıçak motorları bulunmaktadır. Alt bölümde ise tekerden bağlı 4 adet motor yerleştirilmiştir. Küreme bıçağının bağlı olduğu 2 adet 45 cm uzunluğunda profil bulunmaktadır.



Şekil 3.4. Otonom Küreme Aracı Yürüten Aksam Üst Görünüş

Araç uzunluğu 80 cm olup bıçak genişliği 100 cm'dir. Teker genişliğiyle birlikte bıçak genişliği ile araç genişliği eşitlenmektedir. Küreme bıçağının bağlı olduğu profiller arası 35 cm'dir. Bataryalar yerleştirilirken teker aksları içinde kalmasına ve ağırlık merkezine yakın olmasına özen gösterilmiştir.

3.5. Tekerlekler

İş makinelerinde paletler, tekerleklere göre daha fazla tercih edilmektedir. İş makinesinin zemin ile sürtünme alanı arttığı için makine kohezyona sahip zeminlerde daha kolay hareket edebilmektedir. Aracın toprağa temas eden yüzey alanı arttığı için zemine saplanma veya batma riski azalmaktadır. Özellikle lastik tekerleklerin deforme olabileceği arazi şartlarında ve iş durumlarında paletler sıkça tercih edilmektedir. Askeri uygulamalarda lastik tekerlekler delinme ve patlama gibi riskler taşıdığı için palet kullanımı yaygındır. Palet maliyeti tekerlek maliyetine göre daha fazladır.

Demir yolu sistemlerinin yaygınlaşmasıyla rijit tekerlek rijit zemin üzerinde hareket etmektedir. Otomobillerin yaygınlaşmasıyla da esnek yollarda hareket eden lastik tekerlek türleri gelişmiştir. Tekerlek yol etkileşiminde yumuşak zemin türleri için esnek tekerlek tercih edilmektedir. Pnömatik tekerlekler bu alanda en yaygın kullanıma sahip tekerlek türleridir.

Araçta kullanılacak tekerler için seçilen lastiklerin seçilirken piyasada kolaylıkla bulunabilen ve belli bir standarda sahip bir teker modeli olacak biçimde seçilmiştir. Lastik çapı yuvarlanma direnci etkisi göz önünde bulundurularak küçük seçilmiştir.

2000 W motor gücünde 4 motor, 750 W gündeki 2 motor, 30 bataryalı, 420 kg şasi ağırlığı ve 115 kg ilave (küreme bıçağı, redüktörler, birleşim elemanları vs.) ağırlığı sahip bir araç 618 kg gelmektedir. Aracın teker genişliği 6 cm'dir. Araç tekerleri bu ağırlıktan dolayı bir miktar çökecektir. Tekerin 15 derecelik yay açısının gördüğü kiriş genişliğinin yere tam temas edeceği düşünülerek her bir tekerin 0,0157079633m²'lik yüzey alanı zemine temas etmektedir. Bu değerler 3.3 eşitliğinde yerine konularak yere uygulanan basınç hesaplanmıştır.

$$P = G / A \quad (3.3)$$

$$P = 618,1 * 9,81 / (4 * 0,0157079633)$$

$$P = 386,02 \text{ kN/m}^2$$

Hesaplanan basınç değeri en ağır araç tasarımı için hesaplanmıştır. 120 kN/m² basınç değerinin üstündeki basınçlarda aracın gömüleceği öngörülmektedir. Aracın gömüldüğü durumlarda hareketi zorlaşacaktır. Gömülme durumları için gömülme direnci hesaplanmıştır.

Araç lastikleri çelik tel ve kauçuğun birleşiminden oluşmuş kompozit bir yapıya sahiptir. Tekerin dayanabileceği maksimum basınç teker özellikleri ve boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Hertzian temas teorisine lastik maksimum basıncı ve temas genişliğinin yarısı hesaplanmıştır.

$$k_1 = 1/R_1 + 1/R_2 \quad (3.4)$$

$$A_1 = 2 \left(\frac{1-v_{çelik}^2}{E_{çelik}} + \frac{1-v_{kauçuk}^2}{E_{kauçuk}} \right) \quad (3.5)$$

$$b = \sqrt{\frac{2 F A_1}{k_1 \pi l}} \quad (3.6)$$

$$P_{max} = \frac{2 F}{b l \pi} \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.4'te R₁ teker yarıçapını, R₂ temas yüzeyinin yarıçapını temsil etmektedir. Teker yarıçapı 25 cm ve temas ettiği yüzeyin yarıçapı ise 1000 m alınmıştır. Asfalt yüzeyler için temas yarıçapı büyük seçilmektedir, otomobil tekerleri için 1000'den daha da büyük değerler seçilebilir. Eşitlik 3.5'te v poisson oranını ve E elastisite modülünü temsil etmektedir. Çeliğin ve kauçuğun özellikleri kullanıldı, çeliğin poisson oranı 0,3 elastisite modülü 200000 N/mm² ve kauçuğun poisson oranı 0,5

lastisite modülü 14 N/mm² olarak alındı. Eşitlik 3.6'da temas genişliğinin yarısı "b" hesaplandı. F araca etki eden ağırlık, l ise teker genişlidir. Temas genişliğinin yarısı 23 mm olarak hesaplanmış ve temas genişliği 46 mm olarak bulunmuştur. Zeminden tekere uygulanabilecek maksimum kuvvet $P_{max} - 679,46 \text{ kN/m}^2$ olarak hesaplanmış ve aracın zemine uyguladığı basınç hesaplanan değeri geçmemiştir.

3.6. Motor Kontrol Devresi

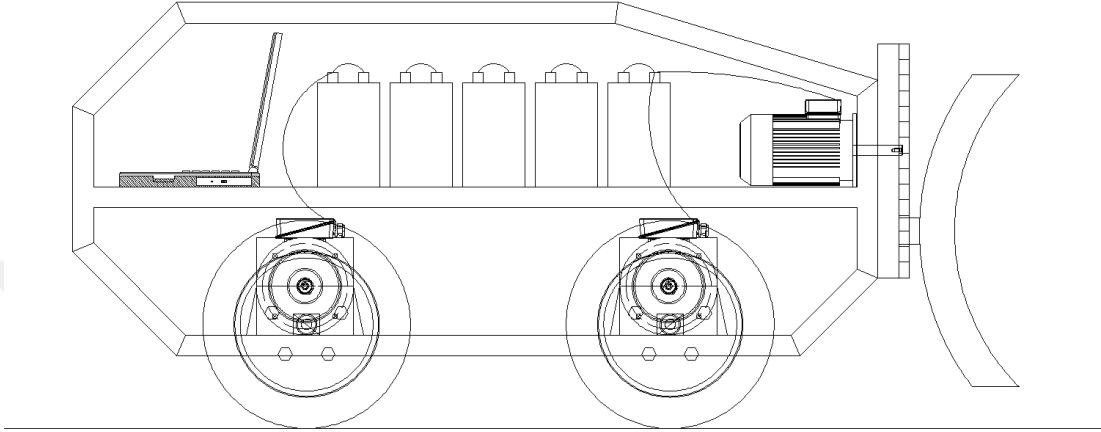
Elektrik motorunun devir sayısını ve hızlanma zamanını ayarlayabilmek için motor kontrol devreleri kullanılmaktadır. Aracın boş gidişi, küreme ve sürüklenme yaptığı durumlarda aracın hızı değişmektedir. Motordaki hız değişimini kontrol etmek için motor kontrol devresi kullanılmıştır. Kontrol devresinin maliyeti düşünülerek istenilen hızı minimum sürede ayarlaması referans alınmıştır.

Elektrik motorlarına aç kapa hareketi yaptırabilmek için kontaktör kullanılmaktadır. Motorların kontak açma ve kontak kapama işleri için röleler kullanılabilir, fakat açma kesme sayısının fazla olması isteniyorsa kontaktör kullanılmaktadır. Kontaktörü diğer anahtar türlerinden ayıran başka bir özellik ise uzaktan kumanda edilebilir olmasıdır.

Otonom küreme aracında rölenin yetersiz geleceği düşünülerek kontaktör kullanılmıştır. Araçta kullanılan kontaktör uzaktan kontrol edilebilir bir yapıya sahiptir. Kontaktör seçiminde maliyete bağlı olarak birim zamanda yapabileceği açma kesme sayısı referans alınmıştır. Her bir motorun rotoru ve statoru için ayrı ayrı kontaktör seçilmiştir. Statora ait kontaktörün seçiminde termik akım değeri referans alınmaktadır. Motor gücüne bağlı olarak ticari tablolarda 4 motor gücü için ayrı ayrı seçilmiştir. Rotoru ait kontaktörde ise kesme sayısı, kalkış ayarlama ve ara kontaktör kontrolü yapılmıştır. Dakikada 150 kesme sayısı istenmektedir. Motora yol vermede üçgenden yıldız dönüşümü yapılmıştır. Motor nominal gücüne göre üçgenden yıldız kontaktörü seçimi yapılmıştır.

3.7. Otonom Küreme Aracı Özellikleri

Simülasyon aracı sürücü kabininin olmadığı basık bir araç geometrisine sahiptir. Aracın arkasında bir bilgisayar koyacak kadar boş alan oluşturulmuştur. Aracın içinde üst ve alt bölüm olmak üzere iki bölüm oluşturulmuştur. Şekil 5'te araca ait bir görsel sunulmuştur.



Şekil 3.5. Otonom Küreme Aracı Genel Görünüm

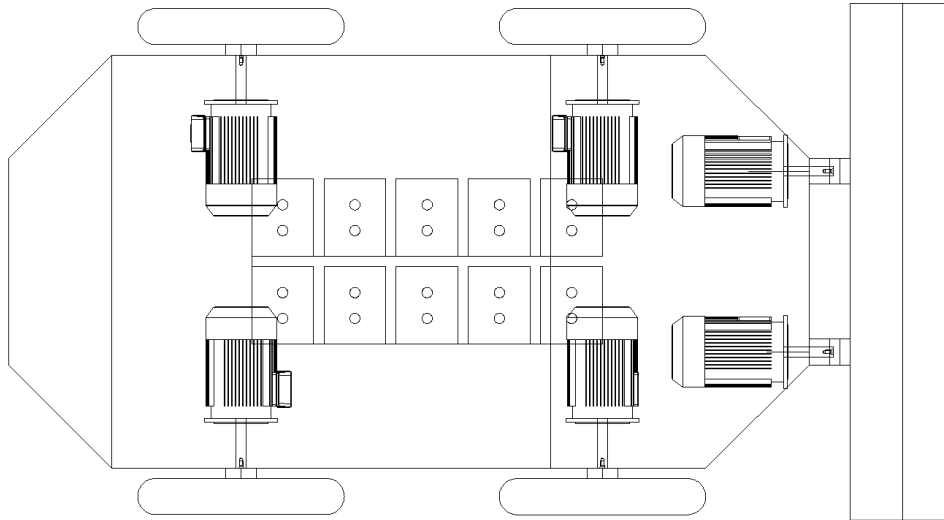
Otonom küreme aracında toplamda 6 motor kullanılmaktadır. Bu motorların dördü tekerleri döndürmek için diğer ikisi ise küreme bıçağını hareket ettirmek için kullanılmaktadır. Simülasyonda yapılan iterasyonlarda tekerleri döndüren motorlar değiştirilmiş, küreme bıçağını hareket ettiren motorlar değiştirilmeden sabit tutulmuştur. Bıçağı hareket ettirecek motorların iterasyonla seçilmemesinin nedeni maksimum küreme derinliğinin sabit tutulmasıdır. Otonom küreme aracının tasarımında 4 farklı tipte AC motoru karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.2. Kullanılan Motorların Özellikleri

Motor Çeşitleri	Güç [W]	Tork [Nm]	Ağırlık [kg]
Motor 1	750	2,4	3,5
Motor 2	1000	4	4,1
Motor 3	1500	6	7,8
Motor 4	2000	7,9	8,9

Motorlardan alınan dönme kuvvetini tekerlere aktarmak için redüktör kullanılmaktadır. Redüktörlerin kendinden motorlu seçenekleri de mevcuttur. 150 dev/dk değerinde dönme kuvveti istenmektedir. Tüm motorlar için 3,6 kg ağırlığında redüktör kullanılmıştır. Elektrik motorunun verimi yüksektir, fakat redüktör sürtünme ve kuvvet aktarımı nedeniyle gücün belli bir bölümü kaybolmaktadır. Girişteki devir sayısı ve çıkıştaki devir sayısına göre verim hesabı yapılmaktadır. Seçilen redüktör araç motor verimini 0,06 azaltmaktadır. Elektrik motor verimi, redüktör verimi ile birlikte % 20 azalmaktadır. Motor hesaplarında bulunan motor gücü 0,8 ile çarpılmıştır.

Seçilen motor çeşitleri Çizelge 3.2’de görülmektedir. Motor 1’de 750 W gücünde ve 3,5 kg ağırlığında alternatif akımla çalışan elektrik motoru seçilmiştir. Motor 2’de 1000 W gücünde 4,1 kg, Motor 3’te 1500 W gücünde 7,8 kg ve Motor 4’te 2000 W gücünde 8,9 kg ağırlığında alternatif akımla çalışan elektrik motorları seçilmiştir. Motor kapasiteleri ve ağırlıkları uygulamada kullanılan motor verilerine yakın olmasına özen gösterilmiş olup ekonomik açıdan temin edilebilecek motor türleri kullanılmıştır. DC motor seçimi yapılmamasının nedeni istenilen güçlerde DC motor fiyatlarının aşırı yüksek olması ve temininin zor olmasıdır.



Sekil 3.6. Otonom Küreme Aracının Üstten Görünümü

İş makinesinin genellikle zorlu çalışma koşullarında çalışacağı öngörüldüğü için seçilen bataryalar askeri tip olarak seçilmiştir. Seçilen enerji depolama elemanının sığası 290 Wh, voltaj değeri 14,4 V, ağırlığı 1350 gr, yüksekliği 12 cm, uzunluğu 12

cm ve derinliği 6 cm'dir. Birim ağırlığa düşen sığanın yüksek olmasına dikkat edilerek batarya seçimi yapılmış ve boyutlarının küçük olmasına özen gösterilmiştir. Bataryanın 14,4 V ve 28,8 V olarak iki farklı voltaj seçeneği bulunmaktadır. Bataryalar paralel bağlanmış ve yüksek amperde çalıştırılmak istendiği için 14,4 V olan alternatif tercih edilmiştir. Uygulamada olan ve istenilen enerji miktarına uygun olan batarya ünitelerinin genelinde bu özellikler bulunmaktadır. Araçta kullanılacak batarya sayısı farklı motor ve şasi tipleri için iterasyonla bulunmuştur. Küreme bıçağını hareket ettiren motorlar için ayrı ayrı batarya tahsis edilmemiş, tüm motorlar gereken enerji ihtiyacını birbirine paralel bağlanmış bataryalardan karşılamaktadır. Şekil 3.6'da motorların ve bataryaların konumları görselleştirilmiştir.

Simülasyonda kullanılan küreme bıçağında merkez açısı 60 derece, giriş yüksekliği 65 cm olan bıçak kullanılmıştır. Bıçak giriş merkezinden iş makinesine bağlanmış olup sadece yukarı aşağı hareket edebilmektedir. Bıçağın et kalınlığı 8 mm'dir. S tipi bıçak yapısına sahiptir. Aşağı yukarı hareket edebilen makine elemanına 2 noktadan mesnetlenmiştir. Herhangi bir açısal serbestlik verilmemiştir.

Aracın şasisi metal profillerden yapılmıştır. Metal profillerden iki katlı kafes sistem oluşturulmuş ve et kalınlığı farklı profiller kullanılmıştır. Kafes sistemin 2 katlı tasarlanmasının nedeni batarya hacminin motorlarla aynı alana sığmamasıdır. Alt katta motorlar ve güç iletim elemanları bulunmaktadır. Motordan alınan dönme hareketi doğrudan tekerlere verilmektedir. Üst katta bataryalar ve bıçağı hareket ettiren 2 motor bulunmaktadır. Ayrıca üst katta bir bilgisayar konumlandırabilecek kadar boş alan bulunmaktadır. 4 farklı motor seçeneği için motor gücü ile birlikte artan şasi ağırlıkları Çizelge 3.3'de sunulmuştur.

Çizelge 3.3. İlgili Motor Gücüne Ait Şasi Ağırlıkları

Motor Çeşitleri	Güç [W]	Profil Kalınlığı [mm]	Uzunluk [m]	Birim Ağırlık [kg/m]	Şasi Ağırlığı [kg]	Sac Ağırlığı [kg]	Toplam Ağırlık [kg]
Motor 1	750	3	19,80	9,60	190,00	80,00	270,00
Motor 2	1000	4	19,80	11,62	230,00	80,00	310,00
Motor 3	1500	5	19,80	15,15	300,00	80,00	380,00
Motor 4	2000	6	19,80	17,17	340,00	80,00	420,00

4 farklı motor tipi için farklı et kalınlığına sahip şasi profilleri kullanılmıştır. Motor hacmi arttıkça motor ağırlığı artmakta ve profil kesitleri kalınlaşmaktadır. 3, 4, 5 ve 6

mm et kalınlığında kutu kesitli profiller kullanılmış ve tüm alternatiflerde aynı uzunlukta olmak koşulu ile 19.8 m uzunluğunda profil harcanmıştır. Alt sac ve üst sac ağırlıkları 80 kg olarak eklenmiş tüm alternatifler için toplam ağırlık paylaşılmıştır.

Maliyet sınırlarından dolayı palet yerine lastik tekerlekler düşünölmüştür. Çapı 50 cm olan tekerlek seçilmiştir. Tekerleklerin kesit genişliği 6 cm'dir. Dört tekerlek, dört farklı motordan tahrik almaktadır. Motorların milleri tekerleğe sabit bir şekilde mesnetlenmiş olup, mille tekerlek arasında herhangi bir hareket serbestliği bulunmamaktadır. Dönme sadece mil ile motor arasında olmaktadır.



4. YÖNTEM

Çalışma iki aşamalı olarak yapıldı. Önce aracın küreme algoritması geliştirildi. Küreme derinliği, küreme hacmi ve sürüklenme hacmi belirlendi. Ardından iş makinesi tasarlandı. Küreme ve sürüklenme kısıtları göz önünde bulundurularak dirençlere bağlı olarak motor gücü ve batarya kapasitesi hesaplandı.

Küreme aracının dikdörtgen bir alanı seviyelemesi; küreme işlemi, ağırlık ve oluşan dirençlere göre motor kontrolü, güç kapasitesine göre batarya kontrolü, küremenin sınırına taşınması aşamalarından oluşmaktadır. Bu kontroller ve arazi güncellemeleri her bir araç gidişinden sonra güncellenmektedir.

İş makinesini simülasyon çalışması, ücretsiz bir yazılım olan dev C++ uygulaması ile geliştirilmiştir. Çalışmaya başlamadan önce sanal bir arazi modeli oluşturulmuştur. Küreme aşamaları, direnç kuvvetleri, motor gücü ve batarya sayısı hesaplanmıştır.

4.1. Sanal Arazi Modelinin Oluşturulması

Kürenecek alan dikdörtgen şeklindedir. Farklı boyutlarda olabileceği gibi farklı yükseklik değerlerinde de olabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan arazi 15 m x 20 m boyutundadır. Sanal arazi rastgele oluşturulmuş sayılar türetilmiştir. Uygulanacak arazi modelinin yükseklik değerleri 1 m x 1 m boyutundaki kafes yapının ortalama yükseklik değerlerinin bilinmesi durumunda, arazi yükseklik değerleri dışarıdan da bilgisayar programına girilebilecektir.

Doğal haldeki arazi yapısı genellikle yuvarlak hatlara sahiptir ve keskin yükselti ve inişler nadir görülmektedir. Oluşturulan arazi modelinde rastgele sayılar üretilerek yükseklik değerleri elde edilmiş, arazinin gerçek bir yüzeye benzetilmesi amaçlanmıştır. Yükseklik değerlerinin rastgele sayılardan oluşturulmasıyla engebeli bir yüzey ortaya çıkmıştır. Rastgele sayılar üretmek için C++ programında bulunan rand() komutu kullanılmıştır. Eşitlik 3'te arazinin yükseklik değerinin bulunmasında kullanılan denklem sunulmuştur. Eşitlikte 960 değeri sabit tutularak bu değer üstüne rastgele sayılar eklenerek birbiri ile ilişkisiz yükseklik değerleri elde edilmiştir. 2 adet rastgele sayının çarpımlarının 10^6 'ya bölümünden kalan 0 ile 1 milyon arasında 2. dereceden sayılar üretilmiştir. Üretilen sayı 10^6 'ya bölünerek sayının 0 m ile 1 m

arasında kalması sağlanmıştır. 960 değeri Malatya ilinin rakımıdır. Eşitlik 4.1’de üretilen sayı 960 ile 961 arasında kalmaktadır.

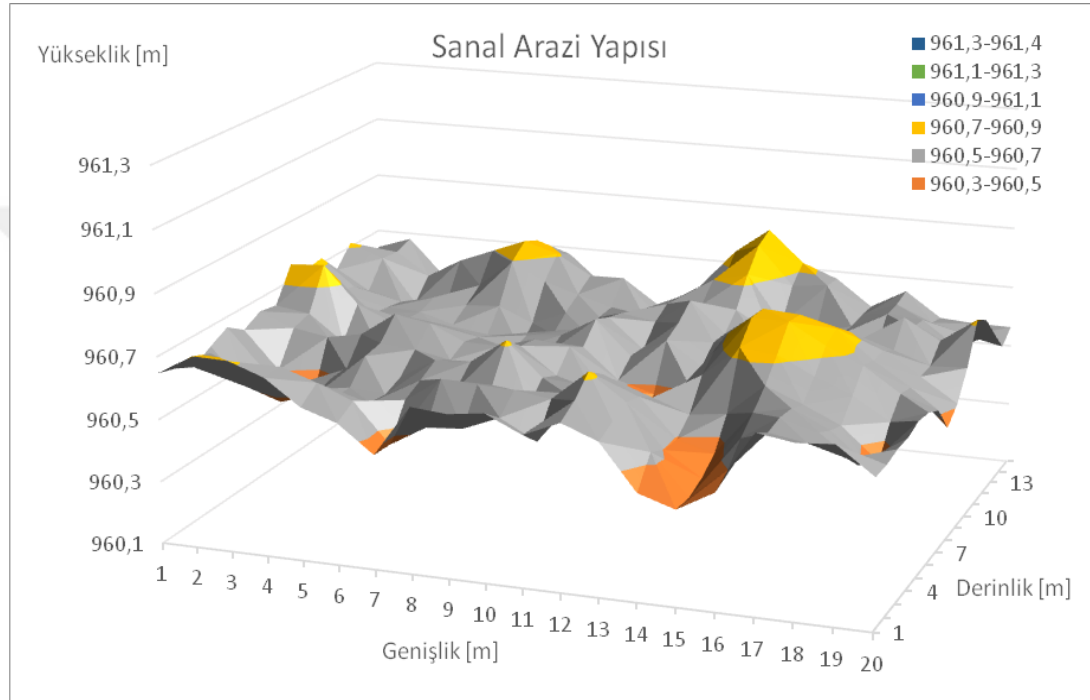
$$\text{Rastgele Yükseklik} = 960 + [(\text{double}(\text{int}(\text{rand}())) * \text{int}(\text{rand}())) \% 1000000] / 1000000 \quad (4.1)$$

Üretilen “Rastgele Yükseklik” değerleri incelendiğinde arazinin ani yükseklik farklılıklarının olduğu görülmektedir. Üretilen rast gele sayıların 0 m ile 1 m olduğu iterasyonda ardışık iki birim metrekarelik alan içinde yükseklik farkının 1 metre olma riski doğmaktadır. Bu riski ortadan kaldırmak için arazi boyutlarına bir birim (1 m) daha eklenmiştir. Kuzey, güney, doğu ve batı sınırları 1 metre arttırılmıştır. Sınır birim alanlar(1 m²) hariç tutularak, içeride kalan her bir birim alana temas eden birim alanı ve kendi alanının ortalaması alınmıştır. Bu sayede yüzey eğrisi normalleştirilmiştir. Komşu birim alanların ani yükseklik farklılıkları sönmülmüş olup, doğadakinine daha yakın bir yüzey elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Arazinin Kürenecek Alanlarının Gösterilmesi

1	23	45	67	89	111	133	155	177	199	221	243	265	287	309	331	353	1
2	24	46	68	90	112	134	156	178	200	222	244	266	288	310	332	354	2
3	25	47	69	91	113	135	157	179	201	223	245	267	289	311	333	355	3
4	26	48	70	92	114	136	158	180	202	224	246	268	290	312	334	356	4
5	27	49	71	93	115	137	159	181	203	225	247	269	291	313	335	357	5
6	28	50	72	94	116	138	160	182	204	226	248	270	292	314	336	358	6
7	29	51	73	95	117	139	161	183	205	227	249	271	293	315	337	359	7
8	30	52	74	96	118	140	162	184	206	228	250	272	294	316	338	360	8
9	31	53	75	97	119	141	163	185	207	229	251	273	295	317	339	361	9
10	32	54	76	98	120	142	164	186	208	230	252	274	296	318	340	362	10
11	33	55	77	99	121	143	165	187	209	231	253	275	297	319	341	363	11
12	34	56	78	100	122	144	166	188	210	232	254	276	298	320	342	364	12
13	35	57	79	101	123	145	167	189	211	233	255	277	299	321	343	365	13
14	36	58	80	102	124	146	168	190	212	234	256	278	300	322	344	366	14
15	37	59	81	103	125	147	169	191	213	235	257	279	301	323	345	367	15
16	38	60	82	104	126	148	170	192	214	236	258	280	302	324	346	368	16
17	39	61	83	105	127	149	171	193	215	237	259	281	303	325	347	369	17
18	40	62	84	106	128	150	172	194	216	238	260	282	304	326	348	370	18
19	41	63	85	107	129	151	173	195	217	239	261	283	305	327	349	371	19
20	42	64	86	108	130	152	174	196	218	240	262	284	306	328	350	372	20
21	43	65	87	109	131	153	175	197	219	241	263	285	307	329	351	373	21
22	44	66	88	110	132	154	176	198	220	242	264	286	308	330	352	374	22
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	

Sınır şeritlerinin eklenmesiyle birlikte arazi boyutu 17 m x 22 m olmuştur. 2 m kuzey ve güney sınırına, 2 m’de doğu ve batı sınırına eklenmiştir. Sınır şeridinde olan birim alanlar sadece arazinin yükseklik değerlerinin normalleştirme için kullanılmıştır. Sınır şeritlerinde herhangi bir küreme işlemi yapılmamaktadır. Küreme işlemi sınıra kenarı olmayan birim alanlarda yapılmıştır. Küreme işleminin yapıldığı alanlar Çizelge 4.1’de mavi renk ile görselleştirilmiştir. Kürenen malzemeler güney sınırına yığılmıştır.



Şekil 4.1. Sanal Arazi Modeli Örneği

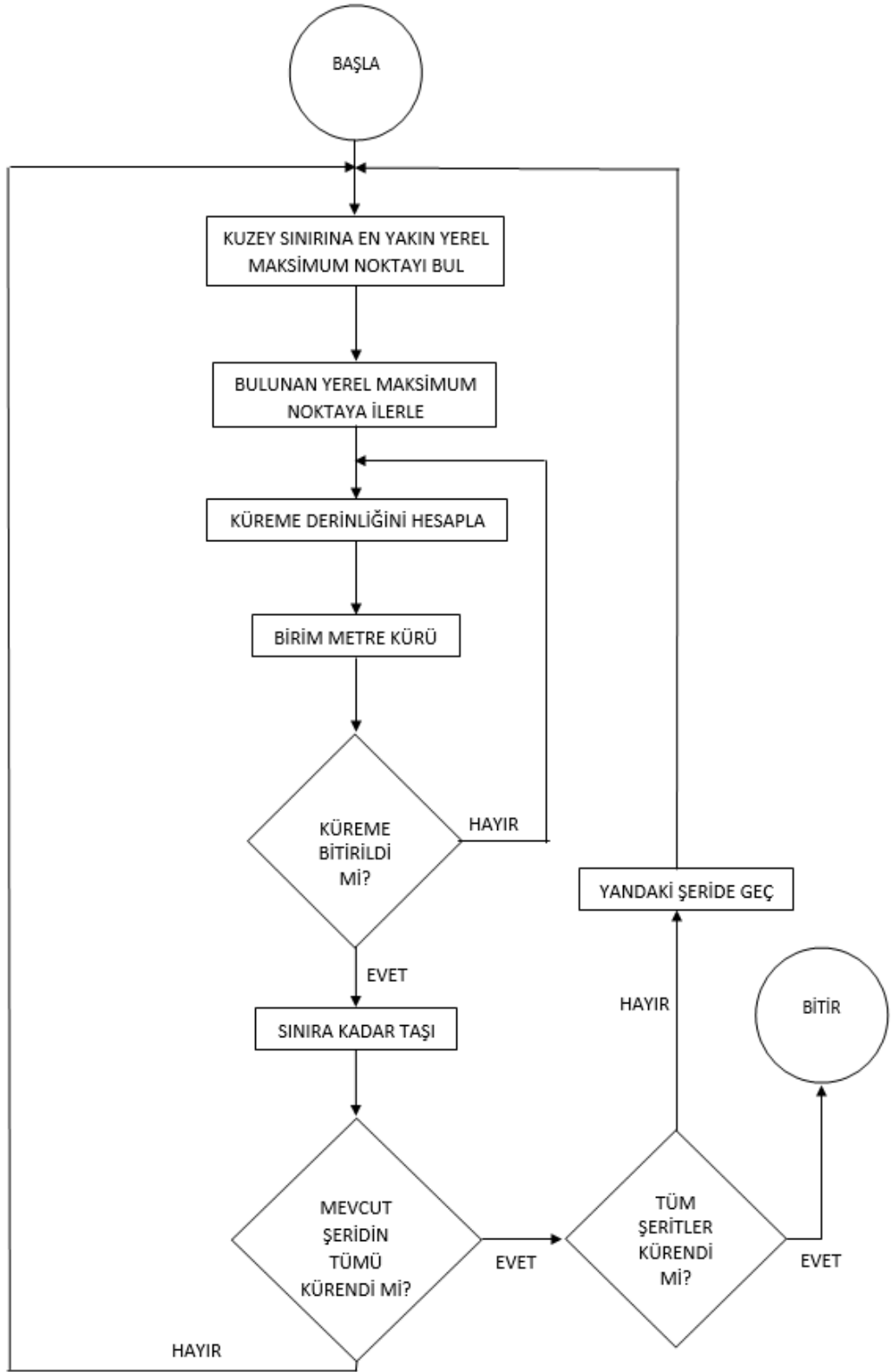
15 m x 20 m ebatlarında 300 m² bir alan kürenecektir. 1 m x 1 m boyutunda birim karelerden oluşmaktadır. Her bir birim karenin ortalama yükseklik değeri mevcuttur. Bu değerler istenilen seviyeye gelene kadar küreme işlemi yapılacaktır. Oluşturulan arazi modeline ait görsel Şekil 4.1’te sunulmuştur.

4.2. Tesviye Algoritması

Oluşturulan arazi modeli 1 m x 1 m’lik birim karelere ayrıldığı için küreme aracının bıçak genişliği 1 m seçilmiştir. Her bir şeridi tek doğrusal hareket ile alması amaçlanmıştır. Şeritlerin kürenmesi sırasında aynı şerit için herhangi bir dönme işlemi

yapmadan sadece ileri geri giderek şerit istenilen seviyeye getirilmiştir. Kürenen şerit bittikten sonra bir yandaki şeride geçilerek aynı algoritma tekrar uygulanmıştır.

Seviyeleme işlemi yüzeyin kürenmesi ve kürenen malzemenin sürüklenmesi olmak üzere birbiri ile ilişkili iki farklı işten oluşmaktadır. Küreme işleminin yapılabilmesi için kazı derinliğinin hesaplanması gerekmektedir. Aracın küreme yapacağı durumda hesaplanan kazı derinliği kadar küreme bıçağını zemine saplar ve itki kuvveti uygulamaya başlar. Araç gücü göz önünde bulundurularak maksimum küreme derinliği sınırı belirlenmiştir. Hesaplanan küreme derinliği maksimum küreme derinliğine eşit olacak şekilde hesaplandı. Kürenen malzemenin sürüklenmesi için aracın küreme işlemini bitirmesi gerekmektedir. Aracın itki gücü düşünülerek maksimum sürüklenme hacmi seçilmiştir. Sürüklenen hacim maksimum küreme hacmi sınırı olacak şekilde hesaplandı. Küreme işlemi bittiğinde araç bıçağını kaldırarak bıçağın önündeki hacmi kuzey sınırına kadar sürükledi. Küreme işlemine ait akış şeması Şekil 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Tesviye Algoritmasının Akış Şeması

Araçlara etki direnç kuvvetler incelendiğinde eğim direncinin diğer dirençlere göre daha fazla etkilediği görülmektedir. Otonom küreme aracına etki eden eğim direncini azaltmak için sürekli güneye en yakın yerel tepe noktasından güney sınırına doğru

küreme ve sürüklenme yapıldı. Araç küremeye başlamadan önce geri geri giderek güney sınırına en yakın yerel maksimum noktası bulundu. Yerel maksimum noktası bulunurken aşağıdaki 4 adım uygulanmıştır.

- Kuzey sınırına ilerle
- Geri geri kuzey sınırından güney sınırına doğru her bir birim alanın yükseklik değerlerini tara
- İlerleme sırasında bulunduğu birim alanın yükseklik değerini bir önceki birim alanın yükseklik değerinden çıkar
- Yükseklik farkının negatif olduğu birim alan kuzey sınırına en yakın yerel maksimumdur

Araç gücü sınırlı olduğu için küreme bıçağını belli bir yükseklikten fazlasını toprağa batırmaması gerekmektedir. Bu sınır aşıldığında aracın itme kuvveti toprağı yerinden ayırmaya yetmeyecektir. Bu nedenle maksimum küreme derinliği sınırı seçilmiştir. Benzer şekilde itki gücüne bağlı olarak sürükleyebileceği hacim de sınırlıdır. Aracın maksimum derinlikte 4 birim alandan kazılan zemini sürükleyebileceği kabul edilmiştir. Maksimum küreme derinliğinin 5 cm seçildiği iterasyonda maksimum küreme hacmi 0,2 doğal metreküptür.

Maksimum kazı derinliğinin 5 cm olduğu durumda, arazi kotu ile istenilen kot arasında 5 cm'den daha az bir yükseklik farkı olabilir. Araç bu durumlarda maksimum kazı yapmaz ve küreme hacmi 0,2 m³'ten az olabilir. Bazı durumlar da son küreme birim alanı sınırda çıkabilir, aracın sadece küreme işlemi yapması bıçağın önündeki zeminin kuzey sınırına taşıyacaktır ve sürüklenme yapılmayacaktır. Bazı durumlarda da yerel maksimum nokta aracın harekete başladığı ilk birim alanda (kuzey sınırında) çıkabilir, bu durumda araç sadece ilk birim alanı küretilir.

Araç kuzey sınırına en yakın maksimum noktayı bulduktan sonra kazı derinliği hesaplanmaktadır. İtiş gücü ve bıçak hacmi sınırlı olduğundan maksimum kazı yüksekliğinde 4 birim alanı küreyebilmektedir. Küreme işlemi için iki temel kısıt bulunmaktadır. Maksimum kazı derinliği ve maksimum sürüklenme hacmi. Araç daha önce geri geri giderek ölçmüş olduğu birim alanın yüksekliğini istenilen yükseklikten çıkarır. Eğer yükseklik farkı maksimum kazı derinliğinden büyük ise sürüklenen hacim hesaplanır. Maksimum sürüklenme hacmi ile hesaplanan sürüklenme hacim kontrolü yapılır. Maksimum sürüklenme hacminin aşılmadığı kazı derinliği seçilir.

Kürenecek birim alan yüksekliği ile istenilen yükseklik arasındaki farkın maksimum kazı derinliğinden büyük olması durumunda aşağıdaki adımlar uygulanır.

1. Maksimum sürüklenme hacmi ile bıçağın önünde sürüklenen hacmin farkını bul
2. Kazılabilecek hacmi ve bıçak derinliğini hesapla
3. Kazılabilecek bıçak derinliği ve maksimum kazı derinliğinden minimum olanı seç

Kürenecek birim alanın yüksekliğinden istenilen yükseklik farkı maksimum kazı derinliğinden az ise yükseklik farkı kazı derinliğine eşit olur. Sürüklenen hacim hesaplanır. Maksimum sürüklenme hacmine göre kazı derinliği seçilir. Kürenecek alanın yükseklik ile istenilen yükseklik arasında fark maksimum kazı derinliğinden az ise aşağıdaki adımlar uygulanır.

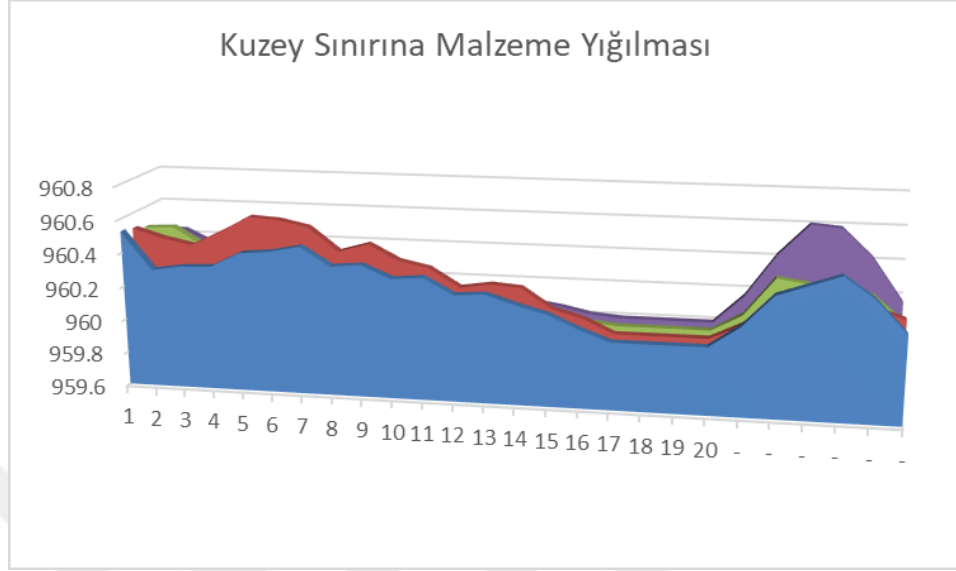
1. Kürenecek birim alanın yüksekliğinden istenilen yükseklik farkını bul
2. Bulunan farkı kazı derinliğine eşitle
3. Maksimum sürüklenme hacmi ile bıçağın önünde sürüklenen hacmin farkını bul
4. Kazılabilecek hacmi ve bıçak derinliğini hesapla
5. Kazılabilecek bıçak derinliği ve 2. adımda hesaplanan kazı derinliğinden minimum olanı seç

Küreme bıçağının önündeki hacim maksimum sürüklenme hacmine geldiği zaman iş makinesi bıçağını arazi yüzeyine kadar kaldırarak sadece kazılan malzemeyi sürüklenme başlar. Benzer şekilde hesaplanan kazı derinliğinden sonra araç bıçağını dışarıdan müdahale olmadan hesaplanan uzunluk kadar toprağa saplar. Hesaplanan kazı derinlikleri birim alan yüksekliklerinden çıkarılarak arazinin yükseklik değerleri güncellenmektedir. Yapılan işlemler ve hesaplar her bir birim alan için kümülatif olacak şekilde hesaplanmaktadır. Küreme adımları Şekil 4.3'te sunulmuştur.

Her bir birim alan için hesaplanan küreme derinliği birim alan genişlik ve uzunluğuyla çarpılarak küreme hacmi hesaplandı. Aracın küreme yaptığı ardışık birim alanlar küreme hacmi kümülatif olarak toplandı. Aracın her bir küreme adımı için küreme hacmine bağlı olarak sürüklenme hacmi hesaplandı.

$$V = \sigma \times b \times l \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2’de her bir küreme adımı için küreme adımı V , kazı derinliği σ , birim alan uzunluğu b ve genişliği l ile belirtilmiştir. Bu formül tüm birim alan kazılarında uygulanmış kümülatif olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. Kuzey Sınırına Malzeme Yığılmasını Görselleştirilmesi

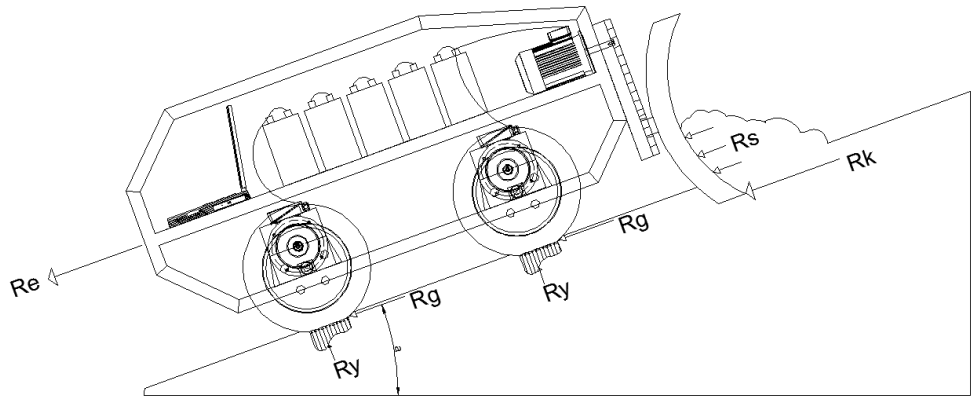
Yapılan tüm küremeler kuzey sınırına yığılmaktadır. Yığılan toprak Şekil 4.3’te görselleştirilmiştir. Kuzey sınırına yığılan toprak hacmiyle kazılan toprak hacmi birbirine eşit olmayacaktır. Kazılan toprağın bulunduğu konumdan ayrılmasıyla toprak taneleri arasındaki uzaklık artacak ve bunun sonucunda toprak boşluk kazanacaktır. Ayrıca küreme bıçağının önündeki hacim sürekli olarak birbiri üstünde hareket ederek etrafa saçılacağı için boşluk hacmi daha da artacaktır. Boşluklar toprağın ağırlığını değiştirmeyecek, kabarmış toprak ağırlığı kazılan toprak ağırlığına eşit olacaktır. Araca etki eden direnç kuvvetleri hacimden değil ağırlıktan etkilendiği için kabarmış hacim değil doğal hacim hesaplanmıştır.

4.3. Direnç Kuvvetlerinin Hesaplanması

Araçlarda ve iş makinelerinde motordan gelen tahrik kuvvetinin maruz kalınan direnç kuvvetlerini yenmesi sonucu hareket oluşmaktadır. Motor kuvvetinin direnç kuvvetini yendiği ilk an hareket başlar. Genellikle oluşan dirençlerin yönü veya bileşeni harekete ters yönlü oluşmaktadır. Bu dirençler araç dururken veya hareket halindeyken etki etmektedir. Araçların geometrisi, teker yapısı, zemin sınıfı gibi özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Araca etki eden dirençler aracın türü ve

amacına göre değişiklik göstermektedir. Bir hafriyat kamyonuna yokuş çıkarken diğer dirençlerden daha fazla eğim direnci etki etmektedir. Yarış arabalarında aşırı hız istediği için hava ve ivmelenme direnci önemli bir etkide bulunmaktadır. Arazi şartlarında çalışan iş makinelerine gömülme direnci, dozerler için kazma ve sürüklenme direnci daha fazla etki etmektedir. İş makinesine aşağıdaki dirençler etki etmektedir.

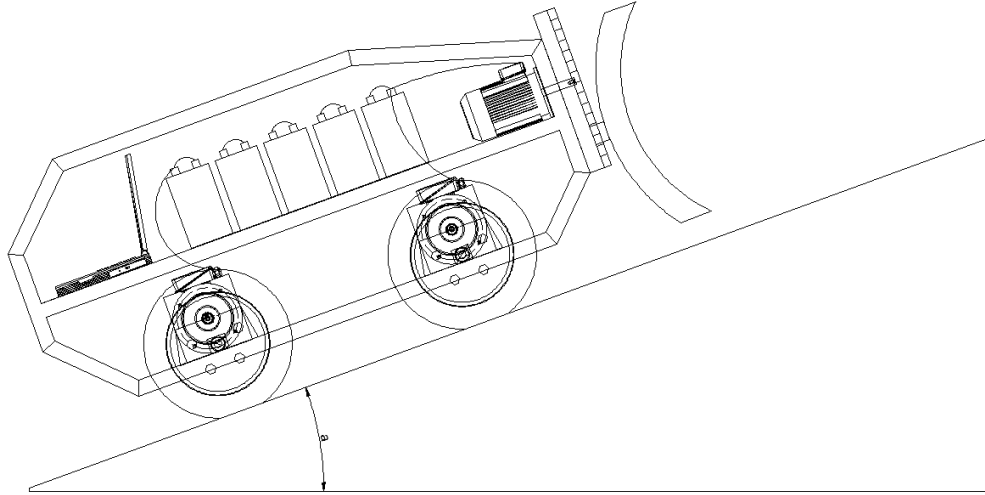
- Yuvarlanma Direnci
- Eğim Direnci
- Gömülme Direnci
- Kazı Direnci
- Sürüklenme Direnci
- İvmelenme Direnci



Şekil 4.4. Otonom Küreme Aracına Atkı Eden Direnç Kuvvetleri

4.3.1. Eğim direnci

Aracın yokuş çıktığı durumlarda etki etmektedir. Eğimli bir alanda aracın yola paralel olan ağırlık bileşeni aracın yokuş çıkmasını zorlaştırmaktadır. Araç yokuş inerken de aynı bileşen aracı hızlandırmakta ve kontrol edilebilir durma mesafesini uzatmaktadır. Eğim direnci aracın ağırlığına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 4.5. Yokuş Çıkan Otonom Küreme Aracı Görünümü

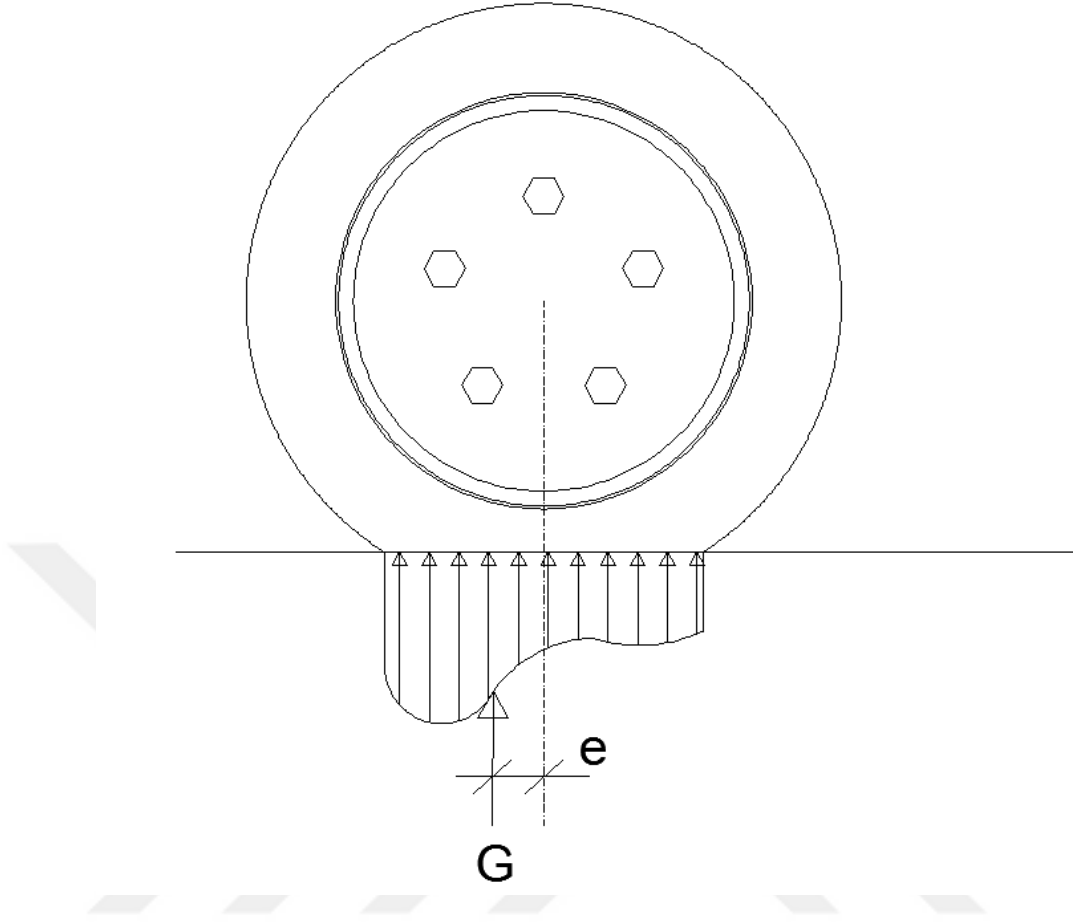
Eğim direnci için eşitlik 4.3 kullanılmıştır. Aracın alfa açısına sahip yokuşu çıkarken maruz kaldığı eğim direnci R_e ile gösterilmiştir. Aracın ağırlığı ve arazinin eğimi ile orantılıdır. Aracın yokuş aşağı indiği durumda etki eden eğim direnci negatif olacaktır. Eğim açısının yokuş aşağı olduğu senaryoda eğimin tanjant değeri negatif çıkacaktır. Küreme simülasyonunda net kuvvetin sıfırdan küçük olduğu duruma net kuvvet sıfıra eşitlenmektedir. Net kuvvet sıfırdan büyük ise olduğu gibi kullanılmıştır.

$$R_e = (X + Y + Z) * g * \text{tg}(\alpha) \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3’de X şasi ağırlığı, Y motor ağırlığı, Z batarya ağırlığı, g yerçekimi ivmesini ve $\text{tg}(\alpha)$ eğimi temsil etmektedir. Araç yerel maksimum noktayı bulurken boş gitmiş ve herhangi bir kazı işlemi yapmamıştır. Aracın boş gidişi, kazı işlemi ve sürüklenme işleri için eğim direnci hesaplanmıştır. Boş gidiş sırasında karşılaşılan eğim direnci motor gücü sınırının aşılmasına yol açmamaktadır, çünkü sürüklenme ve kazı dirençleri daha büyük çıkmaktadır. Aracın küreme yaptığı sırada önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

4.3.2. Yuvarlanma direnci

Araç tekerleği viskoelastik bir yapıya sahiptir. Zemin teker etkileşimi sırasında tekerlek aracın etkisi ve yolun durumuna göre şekil değiştirmektedir. Hareket halindeki bir araçta tekerleğin şekil değiştirmesi sürekli dir. Araç sürekli olarak yuvarlanma direncine maruz kalmaktadır.



Şekil 4.6. Tekerlek Yol Etkileşimi

Özellikle lastiklerin hava basıncının az olması lastiğin daha kolay şekil değiştirmesine yol açmakta ve yuvarlanma direncini arttırmaktadır. Kamyon tekeri gibi düz profile sahip lastiklerin şekil değiştirmesi daha az olduğu için diğer araç türlerine göre daha az yuvarlanma direncine maruz kalmaktadırlar. Aracın hızı arttıkça tekerleğin şekil değiştirmesi artacaktır. Yuvarlanma direnç katsayısı aracın hızıyla orantılı olarak artmaktadır. Lastik çapının büyük olması yuvarlanma direncini etkilemektedir. Lastik çapı büyüdükçe yuvarlanma direnci azalmaktadır. Lastiğe verilen eğiklik, zeminin ıslanması ve frenleme yuvarlanma direncini arttırmaktadır.

Yol teker etkileşiminde 4 farklı durum gözlenebilir Bunlar aşağıda sunulmuştur.

- Rijit teker – rijit zemin
- Rijit teker – esnek zemin
- Esnek teker – esnek zemin
- Esnek teker – rijit zemin

Rijit teker rijit zeminler genellikle demiryolu uygulamalarında kullanılmaktadır. [66] En az teker şekil değiştirmesi bu durumda olduğu için en az yuvarlanma direnci demir yolu araçlarını etkilememektedir. Rijit teker esnek zemin etkileşimi çelik tekerli traktörlerde görülmekle birlikte yuvarlanma direnci çelik tekerden dolayı çok azdır. Esnek teker rijit zemin kara yolu taşıtları için kullanılmaktadır. Teker genellikle yola yayılmış bir şekilde durur. Yuvarlanma direnci önemli miktarda etki eder. Esnek teker esnek zemin etkileşiminde ise tekerlek en fazla bu senaryoda şekil değiştirir. Lastik tekerlekli iş makineleri esnek teker esnek zemin etkileşimine uymaktadır. Yuvarlanma direnci en fazla bu etkileşimde görülmektedir.

$$R_y = (X + Y + Z) k_y \quad (4.4)$$

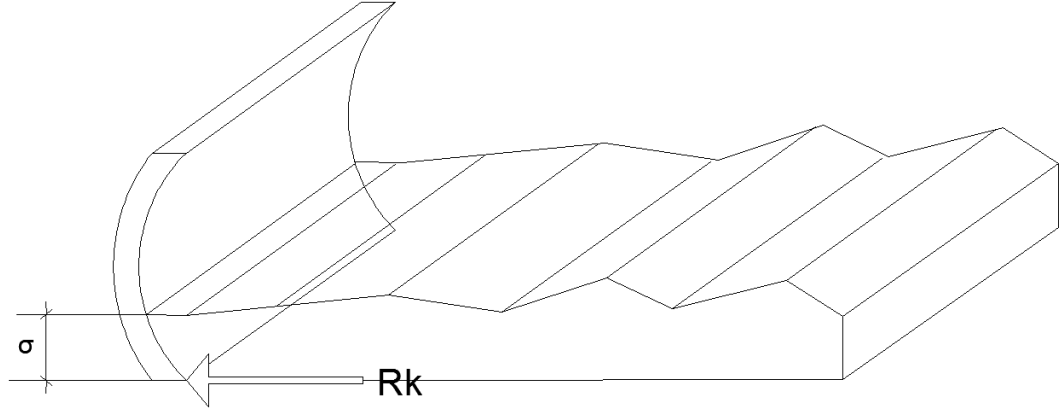
Yuvarlanma direnci 4.4. eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır. X şasi ağırlığı, Y motor ağırlığı, Z batarya ağırlığı ve k_y yuvarlanma direnci katsayısını temsil etmektedir. Katsayı, tekerleğin çapına, malzemesine, basıncına, zemin türüne ve aracın hızına bağlıdır.

4.3.3. Kazı direnci

Küreme işleminin başlayabilmesi için aracın küreme bıçağını toprağa saptırması gerekmektedir. Bıçak motorları çalışır ve bıçağı toprağın içine saplar. Zemin kesilmeye zorlanır. Zemin bıçağına karşı kesme direnci gösterir. Gösterilen kesme direnci zemin sınıfına göre değişiklik göstermektedir. Aracın sadece kazı yaptığı durumlar için hesaplanmıştır. Kazı direnci eşitlik 4.5 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$R_k = \text{Kazı derinliği} * \text{bıçak genişliği} * C_u \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.5'te kazı derinliği her birim alan küremesinde maksimum kazı derinliği düşünülerek hesaplanmıştır. Bıçak genişliği sabit olup 1 m genişliğindedir. C_u , zeminin kesme direnç sayısını temsil etmektedir. Zemin sınıfına göre değişebilen katsayıdır.



Şekil 4.7. Kazı Direnç Etkisi Görseli

4.3.4. Gömülme direnci

Aracın çalıştığı zeminin rijit bir yapıya sahip olması beklenmemektedir. Çalışılan zeminden sürekli toprak kaldırılacağı için esnekliği artması beklenmektedir. Aracın tekerleri aracın ağırlıkları ile zemine gömülecektir. Zemin araca bir gömülme direnci uygulayacaktır. Gömülme direnci 4.6. eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_g = (X + Y + Z) k_g \quad (4.6)$$

X şasi ağırlığı, Y motor ağırlığı, Z batarya ağırlığı ve k_g gömülme direnci katsayısını temsil etmektedir. k_g zemin sınıfına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Araç ağırlığı artınca araç zemine daha fazla gömülecek ve araca etki eden gömülme direnci de artacaktır. Bu çalışmada araç ağırlığının gömülme direnci katsayısı üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir.

4.3.5. Sürüklenme direnci

Kazılan zemin küreme bıçağının önünde birikmektedir. Her bir birim küremede bıçağın önündeki hacim artmaktadır. Bıçağın önünde biriken zemin aracın hareketine engel olmaktadır. Birbiri üzerinde kayarak hareket eden zeminin oluşturduğu sürtünme direncini yenmesi gerekmektedir. Ayrıca eğimli yüzeylerde sürüklenen malzeme eğim direnci oluşturacaktır. Sürüklenen hacmin oluşturduğu eğim direnci sürüklenme direncine dahil edilmiştir.

$$R_s = G * u * \cos(a) + G * \text{tg}(a) \quad (4.7)$$

Eşitlik 4.7 kullanılarak sürüklenme direnci hesaplanmıştır. G bıçak önünde toplanan zeminin ağırlığını, u sürtünme katsayısını ve a aracın küredığı birim alanın yatayla yapmış olduğu açıyı temsil etmektedir. Araç güç sınır gereği maksimum küreme derinliğinde ardışık 4 birim alanı küreyebilmektedir. Bıçak önündeki hacim maksimum küreme sınırına ulaştığı an araç sadece sürüklenme yapmaktadır. Sürüklenme direnci aracın kazı yaptığı durumda ve sınıra kadar küredığı durumda etki etmiştir.

Yuvarlanma, eğim ve gömülme dirençleri eşitliğinde bulunan X (şasi ağırlığı), Y (motor ağırlığı) ve Z (batarya ağırlığı) değişkenleri iterasyonlarda güncellenmektedir. Aracın şasi ağırlığı motor gücüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. Motor ağırlığı her bir motor gücü için farklılık göstermektedir. Aracın motor gücüne bağlı olarak motor ağırlıkları güncellenmektedir. Batarya ağırlığı batarya sayısına göre değişmektedir.

4.3.6. İvmelenme direnci

Araçların hız değişiminden dolayı oluşan dirençtir. Hızını değiştiren bir aracın V_1 hızından V_2 hızına geçmesi sonucu oluşmaktadır. Değiştirilen hız esnasında oluşan kuvvet yönüne ters bir şekilde oluşmaktadır. Tekerlekler hızlanma eğiliminde iken araç gövdesinin eski konumunda kalma isteğinden dolayı oluşmaktadır. Bu durumda aracın ağırlık merkezinin tahrik tekerlerine yakın olması avantaj sağlayacaktır.

İvmelenme direnci aracın kütlesiyle ve hareket yönündeki ivmesiyle ilişkilidir. Aracın kütlesinin artması araca etki eden ivmelenme direncini arttıracaktır. Ayrıca tekerleğin dinamik çapı ve atalet momentine bağlıdır.

İvmelenme direnci aracın ağırlığı ve ivme ile orantılıdır. Araç hızı 0,5-1,5 m/s arasında değişmektedir. Hız değişimi maksimum 1,0 m/s olmaktadır. Otonom küreme aracında hız değişimi çok düşük olduğundan araca etki edecek ivmelenme direnci ihmal edilmiştir.

Otonom küreme aracına etki eden dirençler hesaplanmıştır. Yuvarlanma direnci, eğim direnci, gömülme direnci, kazı direnci ve sürüklenme direnci her birim alan küremesinde hesaplanmıştır. Araç maksimum noktayı bulurken; eğim, yuvarlanma ve gömülme direnci hesaplanmıştır. Kazı yaptığı durumda; eğim, yuvarlanma, gömülme, kazı ve sürüklenme direnci hesaplanmıştır. Sürüklenme yaptığı durumda ise eğim, yuvarlanma, gömülme ve sürüklenme direnci hesaplanmıştır. Hesaplanan tüm dirençler Newton biriminde bulunmuştur.

4.4. Motor Gücünün Hesaplanması

Araç 4 tekerden de tahrik almaktadır. Her bir teker için aynı motor hacimlerine sahip aynı tip motorlar seçilmiştir. Motor teker ile doğrudan bağlanmıştır. 4 farklı motor hacmi için simülasyon uygulamaları güncellenmiştir. 750, 1000, 1500 ve 2000 W gücündeki motorların iterasyonla hangisinin seçilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Motorlara ait özellikler Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Otonom küreme aracının her bir birim alandaki küreme işlemini sürüklenmeden daha uzun sürede yapacağı düşünülmüştür. En hızlı olduğu durum ise maksimum noktayı bulurken yaptığı boş gidişlerdir. Aracın küreme, sürüklenme ve boş gidiş işlemlerindeki hızının sabit olduğu düşünülmüştür. Çizelge 4.2.’te aracın hız değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Otonom Küreme Aracı Hız Durumları

Hız Durumları	V	Hız I [m/s]	Hız II [m/s]	Hız III [m/s]
Boş Gidiş Hızı	$V_{\text{boşgidiş}}$	1,00	1,5	2
Küreme Hızı	$V_{\text{küreme}}$	0,50	0,7	1
Sürüklenme Hızı	$V_{\text{sürüklenme}}$	0,75	1	1,5

Bir önceki bölümde hesaplanan direnç kuvvetleri toplanarak aracın toplam direnç kuvvetleri üç farklı durum için hesaplanmıştır. Aracın sadece maksimum noktaya ilerlemesi, küreme işlemi ve sürüklenme işlem adımları için ayrı ayrı kontroller yapılmıştır. Aracın sadece maksimum noktaya gittiği durumda eşitlik 4.8, küreme yaptığı durumda eşitlik 4.9 ve sürüklenme yaptığı durumda ise eşitlik 4.10 kullanılmıştır.

$$P_{\text{boşgidiş}} = (R_e + R_y + R_g) * V_{\text{boşgidiş}}/n \quad (4.8)$$

$$P_{\text{küreme}} = (R_e + R_y + R_g + R_k) * V_{\text{küreme}}/n \quad (4.9)$$

$$P_{\text{sürükleme}} = (R_e + R_y + R_g + R_s) * V_{\text{sürükleme}}/n \quad (4.10)$$

Motor verimleri dizel motor için genellikle 0,6-0,7 civarındadır. Bu değerler elektrikli motorlar için daha yüksektir. Simülasyonda kullanılan motor verimi 0,8'dir. Motorlar dört tekerden tahrik aldığı için güç aktarma organına ihtiyaç duyulmamıştır. Bu da motordan alınan hareketin doğrudan tekerleklere aktarılmasını sağlamış ve verimi arttırmıştır.

Araç küremeye başlamadan motor tipi seçilmiş ve 4 tane motor araca atanmıştır. Her adımda güç kontrolü yapılmıştır. Araca atanan 4 motorun yeterli olup olmadığı her birim alan kürenmesinde ve sürüklenmesinde kontrol edilmiştir. Hesaplanan motor gücünün atanan motor gücünden fazla olduğu birim alanda gücün yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Örnek arazi modeli için atanan motor gücünün yeterli olup olmadığı kontrolü yapılmıştır. Motor gücü tüm küreme işi boyunca 60 saniyeden daha uzun süre yetersiz kalmışsa, tayin edilen motor motor gücünün yetersiz olduğu belirlenmiştir.

Araçta tekerleklerin dönmesi için 4 tane, küreme bıçağının hareketi için 2 tane olmak üzere toplamda 6 adet motor bulunmaktadır. Tekerlerin dönmesi için atanan motorlar iterasyon sonucuna göre farklı güçlerde olabilmektedir. Küreme bıçağının düşey hareketi için gerekli motorlar için analiz yapılmamış, 750 W gücünde 2 motor seçilmiştir. Bu 2 motor sabit olduğu için şasi ağırlığının içinde değerlendirilmiştir.

4.5. Batarya Sayısının Hesaplanması

Aracın her birim kare için enerji ihtiyacı hesaplanmıştır. Aracın tüm hareketleri için harcadığı anlık süreler belirlenmiş, aracın küreme işlemini tamamlaması için geçen süre bulunmuştur. Süre değerleri hesaplanırken boş gidiş için geçen süre, kazı işlemi için geçen süre ve sürükleme eylemi için geçen süre ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tablo 4'te belirtilen hız değerleri kullanılarak eşitlik 4.11, 4.12 ve 4.13 yardımıyla süre hesabı yapılmıştır.

$$t_{\text{boşgidiş}} = \text{Birim Alanın Bıçağa Dik Uzunluğu} / V_{\text{boşgidiş}} \quad (4.11)$$

$$t_{\text{küreme}} = \text{Birim Alanın Bıçağa Dik Uzunluğu} / V_{\text{küreme}} \quad (4.12)$$

$$t_{\text{sürükleme}} = \text{Birim Alanın Bıçağa Dik Uzunluğu} / V_{\text{sürükleme}} \quad (4.13)$$

Süreler her bir birim ilerleme için hesaplanmıştır. Birim alanın bıçağa dik uzunluğu 1 m'dir. Oluşturulan arazi modeli 1 m x 1 m uzunluğunda olduğu için bu değer tüm birim alanlar için aynıdır.

Otonom aracın enerji ihtiyacı kümülatif olarak hesaplandı. Motor hesabı için her adımda hesaplanan güç değeri sürelerle çarpılarak tüm birim alanlar için "Wsn" biriminde enerji hesaplanmıştır.

$$E_{\text{ihtiyaç}} = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i \quad (4.14)$$

Aracın harcayacağı toplam enerji eşitlik 4.14 ile hesaplandı. Eşitlikteki P_i motor gücü için hesaplanan güç değeri olup birimi "W" cinsindedir. Formüldeki başka bir değişken olan t_i 4.11, 4.12 ve 4.13. eşitliklerde hesaplanan sürerlerdir. Süreler saniye biriminde hesaplanmıştır. Eğer araç maksimum noktaya gidiyor ve küreme yapmıyorsa t_i , $t_{\text{boşgidiş,i}}$ olacaktır. Benzer şekilde araç küreme yaparken harcanan enerji hesabında kullanılan t_i , $t_{\text{küreme,i}}$ ve sürükleme yaparken hesaplanan enerji hesabında kullanılan t_i , $t_{\text{sürükleme,i}}$ olacaktır.

Aracın enerji ihtiyacı bulunduktan sonra seçilen batarya tipine göre gerekli batarya sayısı hesaplanmıştır. Seçilen bataryanın bir saat boyunca besleme gücü 290 Wh'dir. Seçilen batarya tipi lityum seçildiği için bu değer araçlarda kullanılan bataryalara makul değerdedir. Araç için gerekli batarya sayısı 4.15. eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$n_{\text{batarya}} = \frac{\frac{E_{\text{ihtiyaç}}}{3600}}{E_{\text{batarya}}} \quad (4.15)$$

Eşitlikte 4.15 n_{batarya} hesaplanan batarya sayısını, E_{batarya} değeri bir bataryanın sahip olduğu enerjisi (290 Wh) temsil etmektedir. Eşitlik 4.14'de hesaplanan enerji ihtiyacının birimi "Wsn" olduğu için 3.600.000 değerine bölünerek "kWh" olarak güncellenmiştir.

Araç küremeye başlamadan önce batarya sayısı atanmış, atanan batarya sayısının ağırlığına göre direnç kuvvetleri hesaplanmıştır. Küreme bıçağı motorunun enerji

ihtiyacını karşılamak amacıyla atanan batarya sayısı 2 adet arttırılmıştır. Küreme sonunda atanan batarya sayısının yetip yetmeyeceğinin analizi yapılmıştır.



5. VAKA ANALİZİ

Bu bölümde zeminin kazı direnci katsayısı ve aracın tasarım hızı değiştirilerek farklı motor güçleri için vaka analizleri sunulmuştur. Tüm vakalar aynı arazi üzerinde analiz edilmiştir. Batarya sayısı ve motor gücü için başlangıç değeri atanmış ve bu değerlerin uygunluğu analiz sonuçları karşılaştırılarak denetlenmiştir.

Analizler 2 farklı tür vaka tipi olarak paylaşılmıştır. Bunlar; küreme simülasyonu ve araç tasarımıdır. Küreme simülasyonunda otonom küreme aracının aynı zemin üzerinde 3 farklı zemin tipi için küreme adımları sunulmuştur. Arazinin yükseklik değerleri adım adım güncellenerek paylaşılmıştır. Araç tasarımında ise aracın batarya kapasitesi ve motor gücü kontrol edilmiş, zorlamalara bağlı olarak uygun motor seçimi ve batarya sayısı hesaplanmıştır.

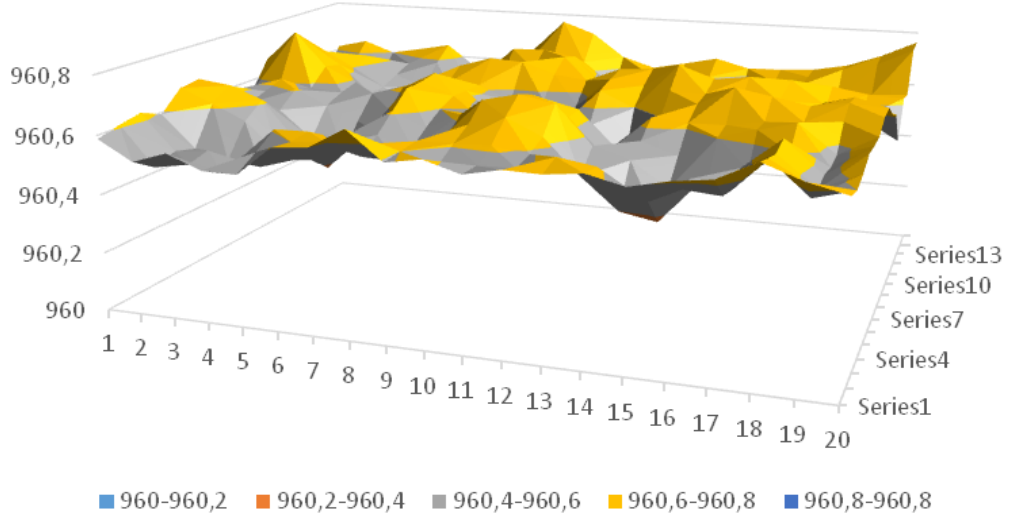
5.1.Küreme Simülasyonu

Tüm vaka analizleri için aynı zemin modeli kullanılmıştır. Arazi 15 m x 20 m boyutundadır. 960 m kotuna rastgele sayılara eklenerek arazi yüzeyi oluşturulmuştur. Araç 15 şerit küremektedir. Her şeritte 20 birim alan bulunmaktadır. Doğu sınırındaki şeritten başlayarak bulunduğu şeridi tamamen küredikten sonra en yakın batı şeridine geçmektedir. Batı sınırındaki şeridi küredikten sonra küreme işlemi tamamlanmaktadır.

Çizelge 5.1. Sanal Arazi Modeli Yükseklik Değerleri

Arazi Modeli	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	960,588	960,609	960,624	960,594	960,663	960,673	960,63	960,586	960,558	960,661	960,669	960,624	960,581	960,528	960,613
2	960,521	960,473	960,5	960,48	960,615	960,658	960,568	960,589	960,613	960,775	960,717	960,659	960,623	960,561	960,642
3	960,56	960,493	960,513	960,447	960,561	960,614	960,551	960,604	960,585	960,649	960,633	960,597	960,628	960,526	960,6
4	960,513	960,474	960,486	960,436	960,457	960,479	960,453	960,551	960,578	960,594	960,527	960,528	960,556	960,581	960,622
5	960,511	960,556	960,605	960,471	960,441	960,384	960,412	960,501	960,582	960,519	960,47	960,434	960,512	960,592	960,646
6	960,61	960,6	960,607	960,533	960,534	960,494	960,499	960,553	960,613	960,606	960,556	960,475	960,485	960,526	960,557
7	960,62	960,607	960,589	960,503	960,551	960,609	960,666	960,665	960,676	960,615	960,66	960,498	960,582	960,542	960,597
8	960,689	960,613	960,544	960,497	960,513	960,561	960,599	960,623	960,617	960,616	960,697	960,603	960,692	960,597	960,65
9	960,594	960,6	960,605	960,558	960,563	960,615	960,593	960,582	960,514	960,566	960,69	960,638	960,696	960,654	960,77
10	960,614	960,567	960,606	960,642	960,699	960,678	960,61	960,574	960,48	960,573	960,649	960,696	960,677	960,634	960,728
11	960,578	960,575	960,611	960,675	960,727	960,702	960,62	960,524	960,49	960,563	960,635	960,612	960,561	960,538	960,64
12	960,603	960,578	960,593	960,62	960,705	960,629	960,635	960,551	960,652	960,67	960,686	960,654	960,637	960,609	960,604
13	960,6	960,624	960,563	960,501	960,573	960,512	960,517	960,42	960,598	960,656	960,695	960,61	960,575	960,574	960,629
14	960,614	960,605	960,525	960,398	960,535	960,572	960,624	960,599	960,669	960,74	960,699	960,659	960,572	960,605	960,656
15	960,585	960,507	960,474	960,375	960,452	960,534	960,615	960,655	960,666	960,695	960,664	960,601	960,506	960,535	960,624
16	960,613	960,558	960,558	960,512	960,493	960,603	960,618	960,721	960,655	960,712	960,673	960,654	960,581	960,599	960,627
17	960,629	960,548	960,533	960,572	960,531	960,638	960,638	960,698	960,657	960,669	960,685	960,644	960,623	960,629	960,635
18	960,691	960,672	960,657	960,675	960,602	960,671	960,645	960,674	960,589	960,634	960,6	960,647	960,572	960,665	960,659
19	960,645	960,565	960,56	960,574	960,565	960,576	960,657	960,694	960,689	960,659	960,565	960,625	960,6	960,694	960,704
20	960,616	960,6	960,618	960,648	960,644	960,644	960,68	960,686	960,638	960,612	960,491	960,621	960,61	960,754	960,763

Arazi modeli modelinin engebeli bir yüzeye sahip olması istenmiş ve ani yükseklik farklılıklarının önüne geçilmiştir. Küreme işlemi tanımlanan birim alanlardaki yükseklik değerleri 960 m kotuna getirilmektedir.



Şekil 5.1. Sanal Arazi Modeli Görseli

Çizelge 5.1’de sanal arazi modelinin yükseklik değerleri paylaşılmıştır. Verilere ait yüzey grafiği Şekil 5.1. ile görselleştirilmiştir. Araç görseldeki engebeli yüzeyi yokuş yukarı küremeden 960 m kotuna getirmektedir.

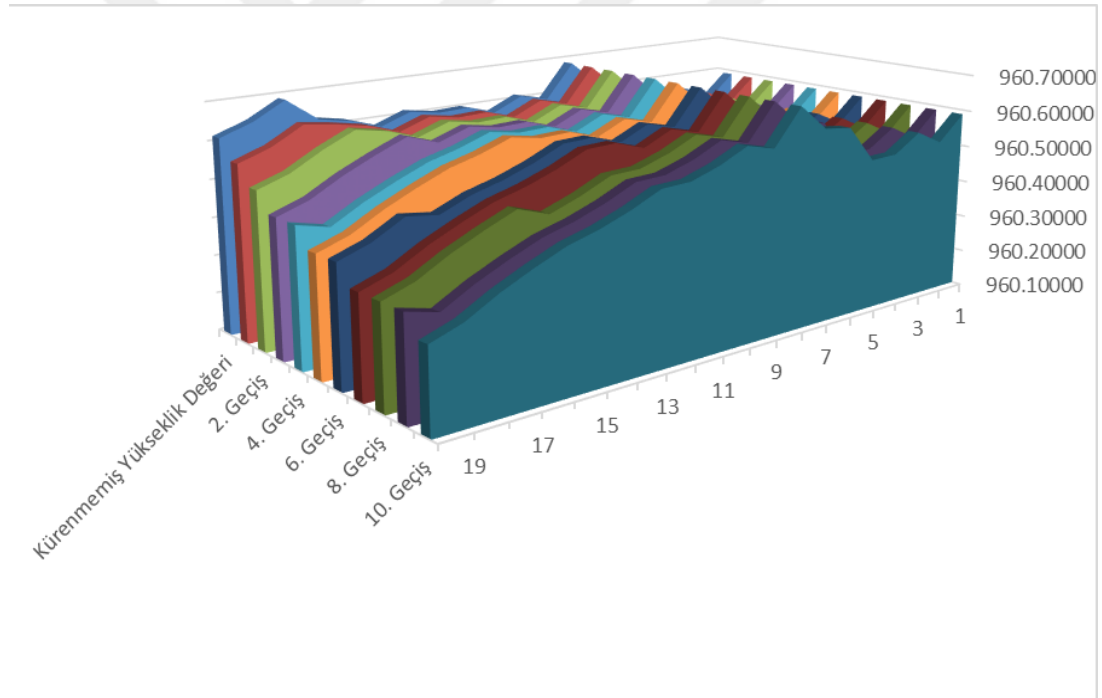
5.1.1. Küreme simülasyonu I

Otonom küreme aracı ilk olarak yerel maksimum noktayı bulmaktadır. Araç 1. sütun 20. metreden itibaren geri geri giderek birim alanların yüksekliklerini ölçmektedir. İlk birim alanın yükseklik değerini bir sonraki birim alanın yükseklik değerinden çıkararak küredığı şeridin kuzey sınırına en yakın yerel maksimum noktasını bulmaktadır.

Çizelge 5.2. Doğu Doğrultusundaki 1. Metre için İlk 10 Küreme Adımı

Metre	Kürenmemiş Yükseklik Değeri	1. Geçiş	2. Geçiş	3. Geçiş	4. Geçiş	5. Geçiş	6. Geçiş	7. Geçiş	8. Geçiş	9. Geçiş	10. Geçiş
Yerel Maks.	17	17	16	15	19	13	17	11	15	19	9
0	960,588	960,588	960,588	960,588	960,588	960,588	960,588	960,588	960,588	960,588	960,588
1	960,521	960,521	960,521	960,521	960,521	960,521	960,521	960,521	960,521	960,521	960,521
2	960,560	960,560	960,560	960,560	960,560	960,560	960,560	960,560	960,560	960,560	960,560
3	960,513	960,513	960,513	960,513	960,513	960,513	960,513	960,513	960,513	960,513	960,513
4	960,511	960,511	960,511	960,511	960,511	960,511	960,511	960,511	960,511	960,511	960,511
5	960,610	960,610	960,610	960,610	960,610	960,610	960,610	960,610	960,610	960,610	960,610
6	960,620	960,620	960,620	960,620	960,620	960,620	960,620	960,620	960,620	960,620	960,620
7	960,689	960,689	960,689	960,689	960,689	960,689	960,689	960,689	960,689	960,689	960,689
8	960,594	960,594	960,594	960,594	960,594	960,594	960,594	960,594	960,594	960,594	960,594
9	960,614	960,614	960,614	960,614	960,614	960,614	960,614	960,614	960,614	960,614	960,614
10	960,578	960,578	960,578	960,578	960,578	960,578	960,578	960,578	960,578	960,578	960,578
11	960,603	960,603	960,603	960,603	960,603	960,603	960,603	960,603	960,553	960,553	960,553
12	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,550	960,550	960,550
13	960,614	960,614	960,614	960,614	960,614	960,614	960,564	960,564	960,514	960,514	960,514
14	960,585	960,585	960,585	960,585	960,585	960,585	960,535	960,535	960,485	960,485	960,485
15	960,613	960,613	960,613	960,613	960,563	960,563	960,513	960,513	960,513	960,463	960,463
16	960,629	960,629	960,629	960,579	960,529	960,529	960,479	960,479	960,479	960,429	960,429
17	960,691	960,641	960,591	960,541	960,491	960,491	960,491	960,441	960,441	960,391	960,391
18	960,645	960,595	960,545	960,495	960,445	960,445	960,445	960,395	960,395	960,345	960,345
19	960,616	960,566	960,516	960,466	960,466	960,416	960,416	960,366	960,366	960,366	960,316

Çizelge 5.2 incelendiğinde başlangıçta yerel maksimum nokta 960.691 olarak tespit edilmiştir. Bu nokta 17. metrede bulunmaktadır. Kazı için araç bu noktaya kadar ilerlemektedir. Kazı derinliği 5 cm olarak belirlendiği için ilk geçiş sonrası bu noktanın yüksekliği 5 cm azalmıştır. Bu durum Çizelge 5.2’de verilen kürenmemiş ve 1. geçiş değerleri incelenerek görülebilir. Bıçağın taşıma kapasitesi aşılmadığı için araç kazıya devam etmiş ve bir sonraki birim alanı küremiştir. Araç arazi sınırını geçmemişse küreme sınırına ulaştığı an küreme bıçağını kaldırıp sürükleme işlemine geçmektedir. Arazi sınırında ise küremeyi bitirip, bir sonraki birim alana geçmektedir. Aynı şeritte 7. Geçiş incelendiğinde yerel maksimum 11. metrede (960,603) bulunmaktadır. Araç küreme derinliğini 5 cm olarak hesaplamış ve maksimum küreme hacmi sınırına (0,2 m³) ulaşana dek zeminden toprak kaldırmıştır. 11. metreden sürükleme sınırına doğru ardışık 4 birim alanı küremiştir. 15. metreye geldiğinde bıçağını kaldırıp, bıçak önünde kalan hacmi kuzey sınırına doğru taşımaktadır.



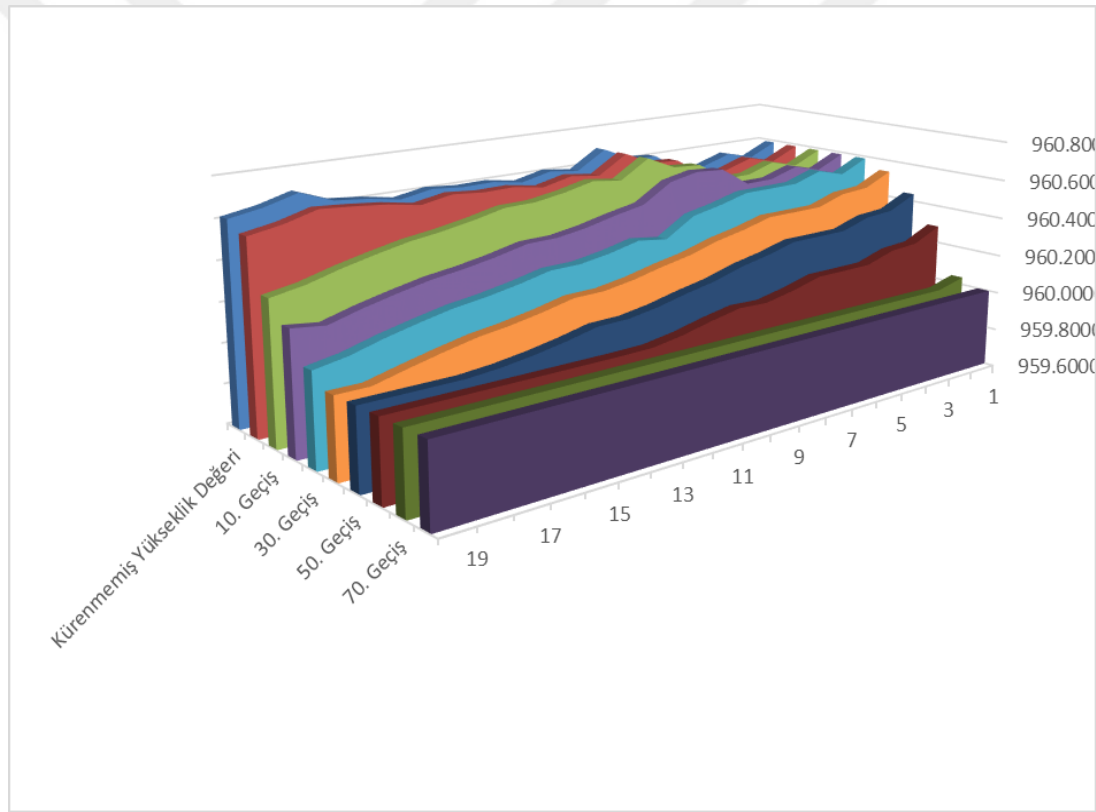
Şekil 5.2. Doğu Doğrultusundaki 1. Metre için İlk 10 Küreme Adımı

Çizelge 5.2’te sunulan veriler Şekil 5.2’de görselleştirilmiştir. Doğu doğrultusundaki birinci metre için ardışık ilk 10 küreme adımı sunulmuştur. Her bir küreme adımı farklı renklendirilmiştir. Araç sürekli kuzey sınırına en yakın yerel maksimumdan itibaren küreme yapmaktadır. Arazi her bir araç geçişinde getirilmek istenilen kota yaklaşmıştır.

Çizelge 5.3. Doğu Doğrultusundaki 1. Metre için Küreme Adımları

Metre	Kürenmemiş Yükseklik Değeri	1. Geçiş	10. Geçiş	20. Geçiş	30. Geçiş	40. Geçiş	50. Geçiş	60. Geçiş	70. Geçiş	71. Geçiş
Yerel Maks.	17	17	9	19	9	0	0	8	0	0
0	960,588	960,588	960,588	960,588	960,588	960,538	960,438	960,288	960,038	960,000
1	960,521	960,521	960,521	960,521	960,521	960,471	960,371	960,221	960,000	960,000
2	960,560	960,560	960,560	960,560	960,560	960,460	960,360	960,210	960,000	960,000
3	960,513	960,513	960,513	960,513	960,513	960,413	960,313	960,163	960,000	960,000
4	960,511	960,511	960,511	960,511	960,511	960,411	960,311	960,161	960,000	960,000
5	960,610	960,610	960,610	960,610	960,510	960,410	960,310	960,160	960,000	960,000
6	960,620	960,620	960,620	960,620	960,470	960,370	960,270	960,120	960,000	960,000
7	960,689	960,689	960,689	960,589	960,439	960,339	960,239	960,089	960,000	960,000
8	960,594	960,594	960,594	960,494	960,344	960,294	960,194	960,094	960,000	960,000
9	960,614	960,614	960,614	960,464	960,364	960,264	960,164	960,064	960,000	960,000
10	960,578	960,578	960,578	960,428	960,328	960,228	960,128	960,028	960,000	960,000
11	960,603	960,603	960,553	960,403	960,303	960,203	960,103	960,003	960,000	960,000
12	960,600	960,600	960,550	960,400	960,300	960,200	960,100	960,000	960,000	960,000
13	960,614	960,614	960,514	960,364	960,264	960,164	960,064	960,000	960,000	960,000
14	960,585	960,585	960,485	960,335	960,235	960,135	960,035	960,000	960,000	960,000
15	960,613	960,613	960,463	960,313	960,213	960,113	960,013	960,000	960,000	960,000
16	960,629	960,629	960,429	960,279	960,179	960,079	960,000	960,000	960,000	960,000
17	960,691	960,641	960,391	960,241	960,141	960,041	960,000	960,000	960,000	960,000
18	960,645	960,595	960,345	960,195	960,095	960,000	960,000	960,000	960,000	960,000
19	960,616	960,566	960,316	960,216	960,066	960,000	960,000	960,000	960,000	960,000

Çizelge 5.3'te doğu sınırındaki 1. sütun için küreme adımlarına ait yükseklik değerleri paylaşılmıştır. Tablo uzunluğu göz önünde bulundurularak onar atlamalı bir şekilde küreme adımları paylaşılmış, ara geçişlere yer verilmemiştir. Geçişlere ait yerel maksimum noktalar renklendirilerek gösterilmiştir. Yerel maksimum nokta sütunun 17. metresinde olduğu görülmektedir. 960,691 metre yüksekliğindedir. Bu yükseklik değeri 5 cm kürenmiş, 18. metreye geçilmiştir. Sürüklenme kontrolü yapılmış ve 19. metreye geçilmiştir. 1. Geçiş değerleri incelendiğinde 17,18 ve 19. metre 5'er cm kürenmiştir. 10. geçişte yerel maksimum nokta 9. metrede çıkmış, 20. Geçişte 19. metrede çıkmıştır. 20. geçiş durumunda araç sadece son birim alanı küremekte ve daha sonra geri geri giderek yerel maksimum noktasını bulma adımına geçmektedir. Otonom küreme aracı 71 adımda arazinin tamamını 960 m kotuna getirmektedir.



Şekil 5.3. Doğu Doğrultusundaki 1. Metre için Küreme Adımları

Şekil 5.3'te doğu doğrultusundaki 1. metre için küreme adımları görselleştirilmiştir. Aracın her bir küreme işlemi için farklı renkler kullanılmıştır. Araç doğu doğrultusundaki 1. metreyi 71 geçişte istenilen yükseklik değerine getirmektedir. 71. adım sonunda kürenen şerit düz bir yüzeye sahip olmuştur. Aracın ilk gidişlerinde yerel maksimum nokta kuzey sınırında veya kuzey sınırına yakın çıkarken son

gidişlerinde genellikle güney sınırında veya güney sınırına yakın noktalarda çıkmaktadır.

5.1.2. Küreme simülasyonu II

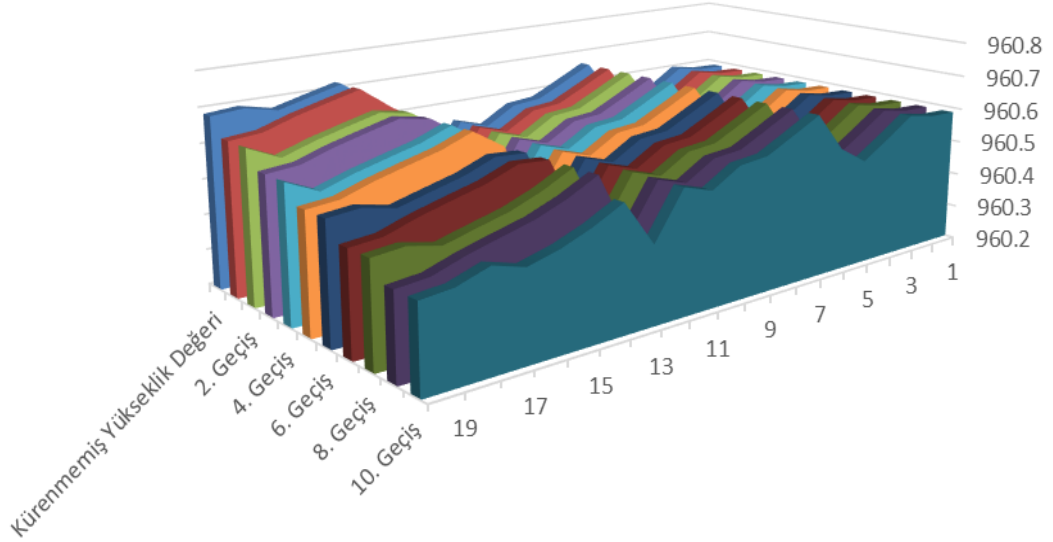
Doğu doğrultusundaki 7. şerit için küreme simülasyonu örneği sunulmuştur. Çizelge 10'da ilk 10 geçişe ait yükseklik değerleri sunulmuştur. Her bir geçişe ait yerel maksimum noktası mavi renk ile görselleştirilmiştir.



Çizelge 5.4. Doğu Doğrultusundaki 7. Metre için İlk 10 Küreme Adımı

Metre	Kürenmemiş Yükseklik Değeri	1. Geçiş	2. Geçiş	3. Geçiş	4. Geçiş	5. Geçiş	6. Geçiş	7. Geçiş	8. Geçiş	9. Geçiş	10. Geçiş
Yerel Maks.	18	15	19	15	19	14	18	14	18	13	17
0	960,586	960,586	960,586	960,586	960,586	960,586	960,586	960,586	960,586	960,586	960,586
1	960,589	960,589	960,589	960,589	960,589	960,589	960,589	960,589	960,589	960,589	960,589
2	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604
3	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551
4	960,501	960,501	960,501	960,501	960,501	960,501	960,501	960,501	960,501	960,501	960,501
5	960,553	960,553	960,553	960,553	960,553	960,553	960,553	960,553	960,553	960,553	960,553
6	960,665	960,665	960,665	960,665	960,665	960,665	960,665	960,665	960,665	960,665	960,665
7	960,623	960,623	960,623	960,623	960,623	960,623	960,623	960,623	960,623	960,623	960,623
8	960,582	960,582	960,582	960,582	960,582	960,582	960,582	960,582	960,582	960,582	960,582
9	960,574	960,574	960,574	960,574	960,574	960,574	960,574	960,574	960,574	960,574	960,574
10	960,524	960,524	960,524	960,524	960,524	960,524	960,524	960,524	960,524	960,524	960,524
11	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551
12	960,420	960,420	960,420	960,420	960,420	960,420	960,420	960,420	960,420	960,420	960,420
13	960,599	960,599	960,599	960,599	960,599	960,599	960,599	960,599	960,599	960,599	960,549
14	960,655	960,655	960,655	960,655	960,655	960,655	960,605	960,605	960,555	960,555	960,505
15	960,721	960,721	960,671	960,671	960,621	960,621	960,571	960,571	960,521	960,521	960,471
16	960,698	960,698	960,648	960,648	960,598	960,598	960,548	960,548	960,498	960,498	960,448
17	960,674	960,674	960,624	960,624	960,574	960,574	960,524	960,524	960,474	960,474	960,474
18	960,694	960,644	960,594	960,594	960,544	960,544	960,544	960,494	960,494	960,444	960,444
19	960,686	960,636	960,636	960,586	960,586	960,536	960,536	960,486	960,486	960,436	960,436

Çizelge 5.4 incelendiğinde, otonom küreme aracı geri geri giderek yerel maksimum noktayı 960,694 m yükseklikteki 18. metre de bulmuştur. Bir sonraki geçişte arazi kürenmiş ve yerel maksimum nokta 15. metrede çıkmıştır. İlk küreme adımları olduğu için toprak genellikle kuzey sınırına yakın yerlerde kaldırılmıştır.



Şekil 5.4. Doğu Doğrultusundaki 7. Metre için İlk 10 Küreme Adımı

Çizelge 5.4 verileri Şekil 5.4'te görselleştirilmiştir. Her bir küreme adımı farklı renk ile görselleştirilmiştir. Şeridin engebeli olduğu belirgin bir şekilde belli olmakla birlikte kürenmemiş profilinin yerel maksimum sayısı fazladır. Araç kısıtları için bu durum geçiş sayısını arttırmaktadır.

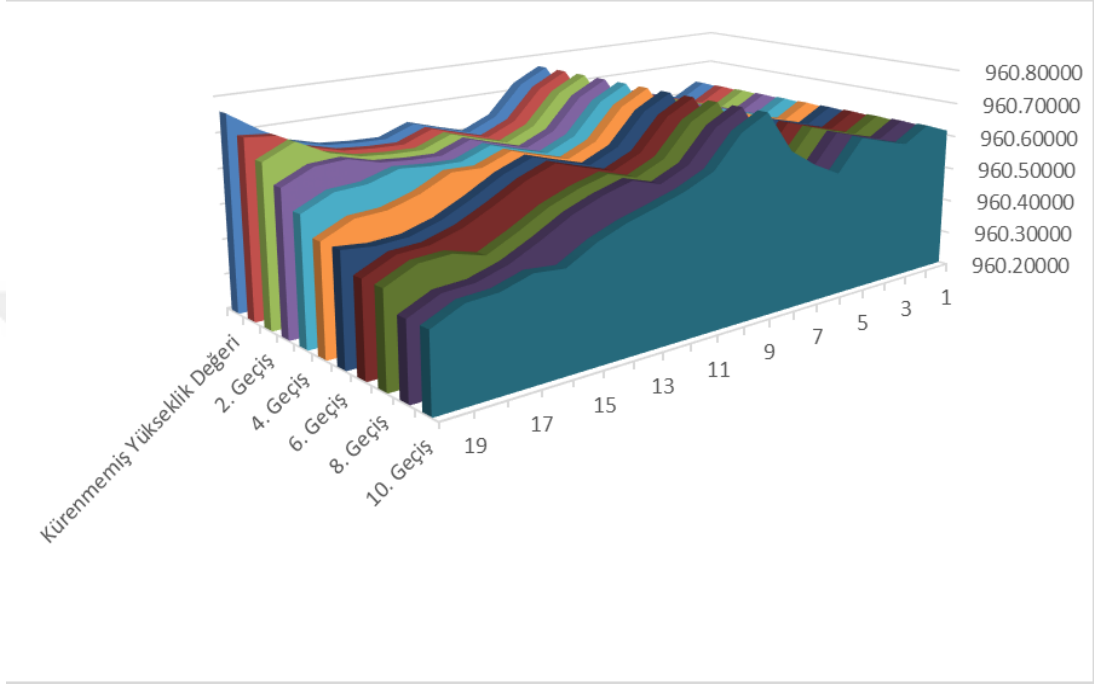
Çizelge 5.5. Doğu Doğrultusundaki 7. Metre için Küreme Adımları

Metre	Kürenmemiş Yükseklik Değeri	1. Geçiş	10. Geçiş	20. Geçiş	30. Geçiş	40. Geçiş	50. Geçiş	60. Geçiş	70. Geçiş	75. Geçiş
Yerel Maks.	18	15	17	6	14	2	8	8	0	0
0	960,586	960,586	960,586	960,586	960,586	960,586	960,536	960,386	960,186	960
1	960,589	960,589	960,589	960,589	960,589	960,589	960,489	960,339	960,139	960
2	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,454	960,304	960,104	960
3	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,551	960,401	960,251	960,051	960
4	960,501	960,501	960,501	960,501	960,501	960,501	960,351	960,201	960,001	960
5	960,553	960,553	960,553	960,553	960,553	960,453	960,303	960,153	960	960
6	960,665	960,665	960,665	960,665	960,515	960,415	960,265	960,115	960	960
7	960,623	960,623	960,623	960,623	960,473	960,373	960,223	960,073	960	960
8	960,582	960,582	960,582	960,582	960,432	960,332	960,232	960,082	960	960
9	960,574	960,574	960,574	960,574	960,424	960,324	960,224	960,074	960	960
10	960,524	960,524	960,524	960,524	960,374	960,274	960,174	960,024	960	960
11	960,551	960,551	960,551	960,501	960,351	960,251	960,151	960,001	960	960
12	960,420	960,420	960,420	960,370	960,220	960,120	960,020	960	960	960
13	960,599	960,599	960,549	960,349	960,199	960,099	960	960	960	960
14	960,655	960,655	960,505	960,305	960,205	960,055	960	960	960	960
15	960,721	960,721	960,471	960,271	960,171	960,021	960	960	960	960
16	960,698	960,698	960,448	960,248	960,148	960	960	960	960	960
17	960,674	960,674	960,474	960,224	960,124	960	960	960	960	960
18	960,694	960,644	960,444	960,194	960,094	960	960	960	960	960
19	960,686	960,636	960,436	960,186	960,086	960	960	960	960	960

Çizelge 5.6. Doğu Doğrultusundaki 15. Metre için İlk 10 Küreme Adımı

Metre	Kürenmemiş Yükseklik Değeri	1. Geçiş	2. Geçiş	3. Geçiş	4. Geçiş	5. Geçiş	6. Geçiş	7. Geçiş	8. Geçiş	9. Geçiş	10. Geçiş
Yerel Maks.	19	19	18	17	16	15	19	13	17	12	16
0	960,613	960,613	960,613	960,613	960,613	960,613	960,613	960,613	960,613	960,613	960,613
1	960,642	960,642	960,642	960,642	960,642	960,642	960,642	960,642	960,642	960,642	960,642
2	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600
3	960,622	960,622	960,622	960,622	960,622	960,622	960,622	960,622	960,622	960,622	960,622
4	960,646	960,646	960,646	960,646	960,646	960,646	960,646	960,646	960,646	960,646	960,646
5	960,557	960,557	960,557	960,557	960,557	960,557	960,557	960,557	960,557	960,557	960,557
6	960,597	960,597	960,597	960,597	960,597	960,597	960,597	960,597	960,597	960,597	960,597
7	960,650	960,650	960,650	960,650	960,650	960,650	960,650	960,650	960,650	960,650	960,650
8	960,770	960,770	960,770	960,770	960,770	960,770	960,770	960,770	960,770	960,770	960,770
9	960,728	960,728	960,728	960,728	960,728	960,728	960,728	960,728	960,728	960,728	960,728
10	960,640	960,640	960,640	960,640	960,640	960,640	960,640	960,640	960,640	960,640	960,640
11	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604	960,604
12	960,629	960,629	960,629	960,629	960,629	960,629	960,629	960,629	960,629	960,629	960,579
13	960,656	960,656	960,656	960,656	960,656	960,656	960,656	960,656	960,606	960,606	960,556
14	960,624	960,624	960,624	960,624	960,624	960,624	960,624	960,624	960,574	960,574	960,524
15	960,627	960,627	960,627	960,627	960,627	960,627	960,577	960,577	960,527	960,527	960,477
16	960,635	960,635	960,635	960,635	960,635	960,585	960,535	960,535	960,485	960,485	960,485
17	960,659	960,659	960,659	960,659	960,609	960,559	960,509	960,509	960,509	960,459	960,459
18	960,704	960,704	960,704	960,654	960,604	960,554	960,504	960,504	960,504	960,454	960,454
19	960,763	960,713	960,663	960,613	960,563	960,513	960,513	960,463	960,463	960,413	960,413

Çizelge 5.6’de sunulan yükseklik değerleri Şekil 15’te görselleştirilmiştir. Şeridin kürenmemiş sütunu incelendiğinde tepe noktalarının belirgin olduğu görülmektedir. Araç kuzey sınırındaki dışarı çıkıntılı olan bölümü küremiştir. 10. geçişte 19. metrenin yüksekliği 960.413 m’ye düşürülmüştür.



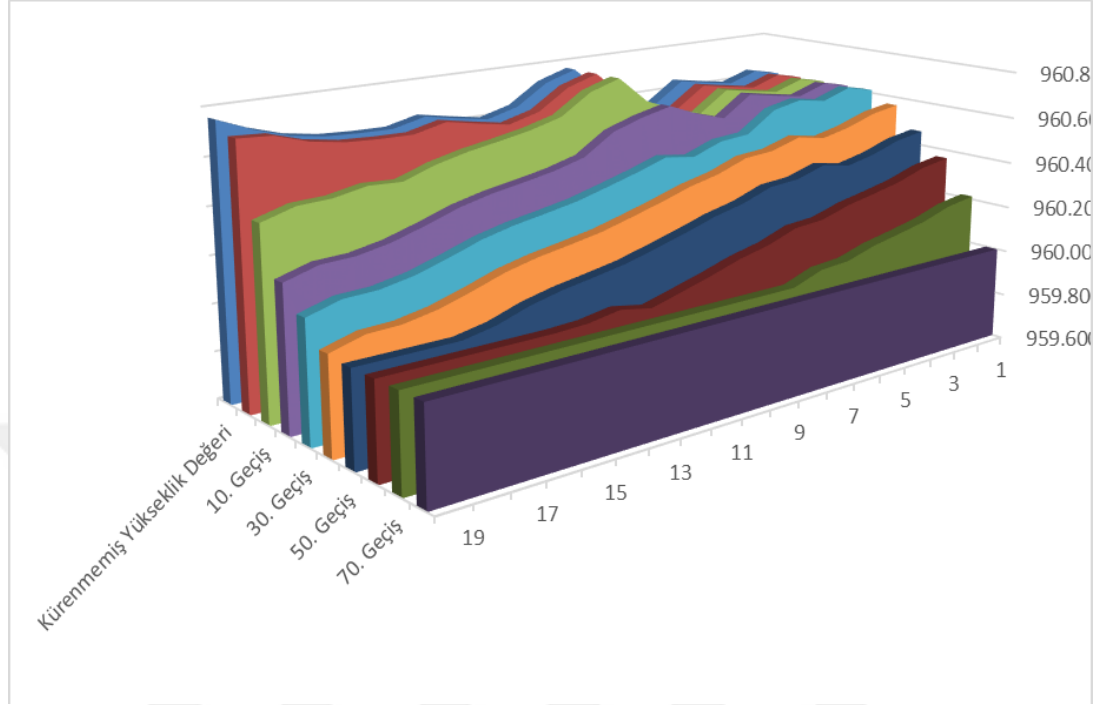
Şekil 5.6. Doğu Doğrultusundaki 15. Metre için İlk 10 Küreme Adımı

Şekil 5.6’te 10. geçiş sonrasında yerel maksimum 16. metrede oluşmuştur. 10. geçiş maksimum noktası 8. metrededir. Araç eğer 8. metreden itibaren küreme yapmış olsaydı, 15 ve 16. metrede yokuş çıkmak zorunda kalacaktı. Bu durum araca etki eden eğim direncini arttıracak ve motor gücünü arttıracaktır.

Çizelge 5.7. Doğu Doğrultusundaki 15. Metre için Küreme Adımları

Metre	Kürenmemiş Yükseklik Değeri	1. Geçiş	10. Geçiş	20. Geçiş	30. Geçiş	40. Geçiş	50. Geçiş	60. Geçiş	70. Geçiş	77. Geçiş
Yerel Maks.	19	19	16	7	8	4	4	12	0	
0	960,613	960,613	960,613	960,613	960,613	960,563	960,463	960,363	960,213	960,000
1	960,642	960,642	960,642	960,642	960,642	960,542	960,442	960,342	960,192	960,000
2	960,600	960,600	960,600	960,600	960,600	960,500	960,400	960,300	960,150	960,000
3	960,622	960,622	960,622	960,622	960,622	960,472	960,372	960,272	960,122	960,000
4	960,646	960,646	960,646	960,646	960,596	960,496	960,396	960,246	960,096	960,000
5	960,557	960,557	960,557	960,557	960,507	960,457	960,357	960,207	960,057	960,000
6	960,597	960,597	960,597	960,597	960,497	960,447	960,347	960,197	960,047	960,000
7	960,650	960,650	960,650	960,650	960,450	960,400	960,300	960,150	960,000	960,000
8	960,770	960,770	960,770	960,620	960,470	960,370	960,270	960,120	960,000	960,000
9	960,728	960,728	960,728	960,578	960,428	960,328	960,228	960,078	960,000	960,000
10	960,640	960,640	960,640	960,490	960,390	960,290	960,190	960,040	960,000	960,000
11	960,604	960,604	960,604	960,454	960,354	960,254	960,154	960,004	960,000	960,000
12	960,629	960,629	960,579	960,429	960,329	960,229	960,129	960,029	960,000	960,000
13	960,656	960,656	960,556	960,406	960,306	960,206	960,106	960,006	960,000	960,000
14	960,624	960,624	960,524	960,374	960,274	960,174	960,074	960,000	960,000	960,000
15	960,627	960,627	960,477	960,327	960,227	960,127	960,027	960,000	960,000	960,000
16	960,635	960,635	960,485	960,285	960,185	960,085	960,000	960,000	960,000	960,000
17	960,659	960,659	960,459	960,259	960,159	960,059	960,000	960,000	960,000	960,000
18	960,704	960,704	960,454	960,254	960,154	960,054	960,000	960,000	960,000	960,000
19	960,763	960,713	960,413	960,213	960,113	960,013	960,000	960,000	960,000	960,000

Doğu doğrultusunda ki 15. metrenin küreme adımları Çizelge 5.7’te sunulmuştur. İlgili küreme adımına ait kuzey sınırına en yakın yerel maksimum noktalar mavi renk ile görselleştirilmiştir. Çizelge 5.7’ye ait veriler Şekil 5.7’de görselleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Doğu Doğrultusundaki 15. Metre için Küreme Adımları

Otonom küreme aracı geri geri giderek kuzey sınırına en yakın yerel maksimum noktayı bulmaktadır. Bulunan noktadan itibaren kazı derinliği hesaplayarak küreme bıçağına komut vermektedir. Her küreme alanında sürüklenen hacmin $0,2 \text{ m}^3$ kontrolü yapılmaktadır. Eğer bıçağın önündeki hacim $0,2 \text{ m}^3$ 'e ulaşmış ise araç bıçağını kaldırıp küremeyi durdurmaktadır. Bıçağın önünde kalan hacim kuzey sınırına kadar sürüklenmektedir. Bu işlemler arazi şeridinin her metresi istenilen seviyeye gelinceye kadar devam etmektedir.

5.2. Araç Modelleme Simülasyonları

Araç modelleme simülasyonu vaka analizlerinde aracın 3 farklı hız durumu için 3 farklı zemin türünde analizler sunulmuştur. Zeminler için sürtünme katsayısı aynı kabul edilmiş ve 0,3 değeri kullanılmıştır. Araca önce motor ataması yapılmış, oluşan dirençlere bağlı olarak motor gücü kontrolü yapılmıştır. Motor gücünün yeterli olmadığı durumda bir üst motor gücüne sahip motor tercih edilmiş algoritma yeniden

çalıştırılmıştır. Motor gücünün yeterli olduğu iterasyonda araca uygun motor bulunmuştur. Batarya sayısı atanmıştır. Motor gücü ve araç tasarım hızına bağlı olarak batarya kapasitesi hesaplanmış, atanan batarya sayısı ile kontrolü yapılmıştır. Batarya sayısının yetersiz olduğu durumda sayı artırılmış, batarya sayısı yeterli olana kadar iterasyon yapılmıştır. Aracın hız durumları Çizelge 5.8’de sunulmuştur.

Çizelge 5.8. Otonom Küreme Aracı Hız Verileri

Hız Türleri [m/s]	Kazı Hızı	Sürüklenme Hızı	Boş Gidiş Hızı
Düşük Hız	0,50	0,75	1,00
Orta Hız	0,70	1,00	1,50
Yüksek Hız	1,00	1,50	2,00

Aracın hız durumları Çizelge 5.8’de sunulmuştur. Araç kazı, sürüklenme ve boş gidiş hızları olmak üzere 3 farklı hıza sahiptir. Boş gidiş aracın en az zorlanmaya maruz kaldığı durumdur. Çünkü araca kazı ve sürüklenme direnci etki etmemektedir. Boş gidi hızı tüm alternatifler için maksimum hız seçilmiştir. Aracın en fazla direnç kuvvetine maruz kaldığı durumlar aracın kazı yaptığı durumlardır. Kazı direncine maruz kalmaktadır. Kazı hızları diğer hızlara göre düşük seçilmiştir.

Çizelge 5.9. Zemin Türü Verileri

Zemin Türü	Kazı Direnç Katsayısı [N/m ²]	Yuvarlanma Katsayısı	Gömülme Katsayısı
Yumuşak Zemin	30 000	0,250	0,050
Orta Zemin	70 000	0,220	0,045
Sert Zemin	110 000	0,200	0,040

Çizelge 5.9’da ki zemin türleri ve Çizelge 5.8’de ki hız durumlarına göre 3 farklı zemin türü için 9 farklı vaka analizi paylaşılmıştır. Tüm hız seçenekleri zemin türlerine uygulanmıştır. Uygulanan vaka analizleri maddeler halinde sunulmuştur.

- Zayıf Zemin - Düşük Hız
- Zayıf Zemin - Orta Hız
- Zayıf Zemin - Yüksek Hız

- Orta Zemin - Düşük Hız
- Orta Zemin - Orta Hız
- Orta Zemin - Yüksek Hız
- Sert zemin - Düşük Hız
- Sert zemin - Orta Hız
- Sert zemin - Yüksek Hız

Tüm vaka analizleri için Çizelge 5.9’da sunulan arazi modeli kullanılmıştır. Hız ve zemin yapısına göre tüm eşleşmelerde vaka analizleri paylaşılmıştır. Motor gücü ve batarya sayısı yeterli gelinceye kadar aynı arazi yapısında iterasyonlar paylaşılmıştır.

5.2.1. Zayıf zemin ve düşük hızda araç modellemesi

Zayıf zeminler için kazı direnç katsayısı 30000 N/m^2 ’dir. Yuvarlanma direnç katsayısı 0,25 ve gömülme direnç katsayısı 0,05 değerindedir. Araç tasarım hızları; kazı hızı 0,5, sürüklenme hızı 0,75 ve boş gidiş hızı 1 m/s ’dir. Atanan batarya sayısı 8 adettir. 4 Adet 750 W gücünde elektrik motoru ile analize başlanmıştır.

Çizelge 5.10. Zayıf Zemin ve Düşük Hız Analiz I

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	22460	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	M^3
Toplam Sürüklenme İş	625,02	$\text{M}^3 \times \text{m}$
Enerji	4,25	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	750	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	8	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	14	Adet

Çizelge 5.10'da zayıf zemin ve düşük hız değerleri için kodlar çalıştırılmış ve sonuçları çizelgede sunulmuştur. Arazi 22460 saniyede 960 metre kotuna getirilmiştir. 179.06 m³ hacim yüzeyden kürenmiş ve 625.02 m³ x m'lik iş yapılmıştır. Arazinin kürenmesi için 4.25 kWh enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.

İlk denemede 750 W gücünde 4 adet motor ile başlanmış ve motor gücü yeterli gelmiştir. Batarya sayısı 8 adet olarak seçilmiş ama gerekli batarya sayısı 14 adet olarak bulunmuştur. Batarya sayısı güncellenerek kodlar yeniden çalıştırılmış ve sonuçları Çizelge 5.11'de sunulmuştur.

Çizelge 5.11. Zayıf Zemin ve Düşük Hız Analiz II

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	22460	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	M ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	M ³ x m
Enerji	4,29	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	750	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	14	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	14	Adet

Çizelge 5.11 incelendiğinde süre, küreme hacmi ve toplam küreme işi değişmemiştir. Batarya sayısı arttırıldığı için aracı toplam ağırlığı artmış ve sonucunda gereken enerji miktarı da artmıştır. Başlangıçtaki batarya sayısı gerekli batarya sayısı kadar çıkmış ve analiz tamamlanmıştır.

5.2.2. Zayıf zemin ve orta hızda araç modellemesi

Zayıf zeminler için kazı direnç katsayısı 30 000 N/m²'dir. Yuvarlanma direnç katsayısı 0,25 ve gömülme direnç katsayısı 0,05 değerindedir. Araç tasarım hızları; kazı hızı 0,7, sürüklenme hızı 1 ve boş gidiş hızı 1,5 m/sn'dir. Atanan batarya sayısı 14 adettir. 4 Adet 750 W gücünde elektrik motoru ile analize başlanmıştır.

Çizelge 5.12. Zayıf Zemin ve Orta Hız Analiz I

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	15526	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	4,29	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	750	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	14	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	14	Adet

Araç hızlandırıldığı için süre değeri azalmıştır. Küreme hacmi ve toplam sürüklenme işinde bir değişiklik olmamıştır. 750 W gücündeki 4 motor yeterlidir. Batarya sayısı 14 adet seçilmiş ve gerekli batarya sayısı 14 adet olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan araç zayıf zemin düşük hız analizinde tasarlanan araç ile aynı özelliklere sahiptir. Hesaplanan motor gücü değişmediği için motor ve şasi ağırlığı değişmemiş batarya sayısı da aynı bulunmuştur.

5.2.3. Zayıf zemin ve yüksek hızda araç modellemesi

Zayıf zeminler için kazı direnç katsayısı 30 000 N/m²'dir. Yuvarlanma direnç katsayısı 0,25 ve gömülme direnç katsayısı 0,05 değerindedir. Araç tasarım hızları; kazı hızı 1, sürüklenme hızı 1.5 ve boş gidiş hızı 2 m/sn'dir. Atanan batarya sayısı 14 adettir. 4 Adet 750 W gücünde elektrik motoru ile analize başlanmıştır.

Çizelge 5.13. Zayıf Zemin ve Yüksek Hız Analiz I

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	11230	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	4,29	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	750	W
Önerilen Motor Gücü	Yetersiz	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	14	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	14	Adet

Araç hızı orta ve düşük hızdaki araç sürelerine göre arttırıldığı için küreme için gerekli süre azalmıştır. Küreme hacmi ve sürüklenme işi diğer analizdekilerle aynıdır. Analize 14 adet batarya ile başlanmış ve 14 adet batarya yeterli gelmiştir. 4 adet 750 W gücünde motor atanmış ve bu motor gücü yetersiz gelmiştir. Motor gücü 1000 W olarak güncellenmiş ve program yeniden çalıştırılarak sonuçları Çizelge 5.14’de sunulmuştur.

Çizelge 5.14. Zayıf Zemin ve Yüksek Hız Analiz II

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	11230	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	4,48	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1000	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	14	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	15	Adet

Süre, küreme hacmi ve toplam sürüklenme işi değişmemiştir. Motor gücü 1000 W’a çıkarılmış ve 4 adet 1000 W’lık motor gücü yeterli gelmiştir. Başlangıçtaki batarya sayısı 14 adet olarak seçilmiş ama motor gücü arttırıldığı için motor ağırlığı da artmıştır. Motor ağırlığı ve şasi ağırlığı arttığı için gerekli enerji miktarı artmış ve

batarya sayısı yetersiz gelmiştir. Batarya sayısı 15 adet olarak güncellenmiş ve analiz sonuçları Çizelge 5.15’de sunulmuştur.

Çizelge 5.15. Zayıf Zemin ve Yüksek Hız Analiz III

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	11230	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	4,49	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1000	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	15	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	15	Adet

Batarya adedi arttırıldığı için batarya ağırlığı artmış ve gereken enerji ihtiyacı 0,01 kWh artmıştır. Batarya adedi 15 olarak güncellenmiş ve bu sayı yeterli gelmiştir.

5.2.4. Orta zemin ve düşük hızda araç modellemesi

Orta zeminler için kazı direnç katsayısı 70 000 N/m²’dir. Yuvarlanma direnç katsayısı 0,22 ve gömülme direnç katsayısı 0,045 değerindedir. Araç tasarım hızları; kazı hızı 0,5, sürüklenme hızı 0,75 ve boş gidiş hızı 1 m/s’dir. Atanan batarya sayısı 10 adettir. 4 Adet 750 W gücünde elektrik motoru ile analize başlanmıştır.

Çizelge 5.16. Orta Zemin ve Düşük Hız Analiz I

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	22460	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	6,525	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	750	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	10	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	22	Adet

15 x 20 metre boyutunda bir alanın kürenmesi için gerekli süre 22 460 saniye çıkmıştır. Küreme hacmi ve toplam sürüklenme işi değişmemiştir. Gerekli enerji miktarı 6,525 kWh olarak hesaplanmıştır. 4 adet 750 W gücüne sahip motorlar yeterli gelmiştir. 10 adet batarya ile başlanmış ama bu sayının yetersiz olduğu analiz sonrası görülmüştür. Gerekli Batarya sayısı 22 adet olarak hesaplanmıştır. Batarya sayısı 22 adet olarak güncellenmiş ve analiz sonuçları Çizelge 5.17’de sunulmuştur.

Çizelge 5.17. Orta Zemin ve Düşük Hız Analiz II

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	22460	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	6,593	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	750	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	22	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	22	Adet

Batarya sayısı 22 adet olarak güncellenmiş ve kodlar yeniden çalıştırılmıştır. Batarya sayısı 10'dan 22'ye çıkarıldığı için ağırlık artmış ve gerekli enerji miktarı 6,593 kWh olarak hesaplanmıştır. Gerekli batarya sayısı 22 olarak hesaplanmış ve atanan batarya sayısı yeterli bulunmuştur.

5.2.5. Orta zemin ve orta hızda araç modellemesi

Orta zeminler için kazı direnç katsayısı 70 000 N/m²'dir. Yuvarlanma direnç katsayısı 0,22 ve gömülme direnç katsayısı 0,045 değerindedir. Araç tasarım hızları; kazı hızı 0,7, sürüklenme hızı 1 ve boş gidiş hızı 1,5 m/s'dir. Atanan batarya sayısı 22 adettir. 4 Adet 750 W gücünde elektrik motoru ile analize başlanmıştır.

Çizelge 5.18. Orta Zemin ve Orta Hız Analiz I

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	15526	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	6,593	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	750	W
Önerilen Motor Gücü	Yetersiz	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	22	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	22	Adet

Küreme için gerekli süre düşük hızdaki analizlere göre azalmıştır. Küreme hacmi ve sürüklenme işi değişmemiştir. Gerekli enerji miktarı 6,593 kWh olarak hesaplanmıştır. 22 adet batarya ile analize başlanmış ve bu sayı yereli bulunmuştur. 750 W gücündeki 4 adet motor yetersiz gelmiş ve motorlar 1000 W gücüne çıkarılarak kodlar yeniden çalıştırılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 5.19'de sunulmuştur.

Çizelge 5.19. Orta Zemin ve Orta Hız Analiz II

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	15526	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşİ	625,02	m ³ x m
Enerji	6,772	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1000	W
Önerilen Motor Gücü	Yetersiz	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	22	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	23	Adet

Motor türü değiştiği için motor ağırlığı ve şasi ağırlığı artmış bu nedenle enerji ihtiyacı da paralel olarak 6,772 kWh'a çıkmıştır. Gerekli batarya sayısı 23 adet hesaplanmış bunun sonucunda başlangıçtaki batarya sayısı yetersiz gelmiştir. Motorlar 1000 W'a çıkarılmasına rağmen yetersizdir. Motorlar 1500 W gücüne çıkarılmış ve batarya sayısı 23 adet olarak güncellenerek sonuçları Çizelge 5.20'de paylaşılmıştır.

Çizelge 5.20. Orta Zemin ve Orta Hız Analiz III

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	15526	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşİ	625,02	m ³ x m
Enerji	7,136	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1500	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	23	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	24	Adet

Motor gücü tekrar arttırıldığı için ağırlığın değişmesi sonucu enerji miktarı artmıştır. Motorlar yeterlidir fakat gerekli batarya sayısı, başlangıçtaki batarya sayısından 1 adet fazladır. Batarya sayısı 24 adet olarak güncellenmiş ve sonuçları Çizelge 5.21'de sunulmuştur.

Çizelge 5.21. Orta Zemin ve Orta Hız Analiz IV

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	15526	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	7,141	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1500	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	24	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	24	Adet

Batarya sayısı 1 adet arttırıldığı için enerji miktarı artmıştır. Batarya sayısı 24 adet olarak seçilmiş ve gerekli batarya sayısı 24 adet olarak hesaplanmıştır. Batarya sayısı yeterlidir. 4 kez algoritma çalıştırılmış ve 4. run işleminin sonucunda uygun tasarım oluşturulmuştur.

5.2.6. Orta zemin ve yüksek hızda araç modellemesi

Orta zeminler için kazı direnç katsayısı 70000 N/m²'dir. Yuvarlanma direnç katsayısı 0,22 ve gömülme direnç katsayısı 0,045 değerindedir. Araç tasarım hızları; kazı hızı 1, sürüklenme hızı 1.5 ve boş gidiş hızı 2 m/s'dir. Atanan batarya sayısı 24 adettir. 4 Adet 1500 W gücünde elektrik motoru ile analize başlanmıştır.

Çizelge 5.22. Orta Zemin ve Yüksek Hız Analiz I

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	11230	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	7,141	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1500	W
Önerilen Motor Gücü	Yetersiz	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	24	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	24	Adet

Araç hızlandırıldığı için süre kısalmıştır. Araç 15 x 20 metre boyutundaki alanı 11230 saniyede seviyelemektedir. Küreme için gerekli enerji miktarı 7,141 kWh olarak hesaplanmıştır. Gerekli batarya sayısı 24 adet hesaplanmış ve yeterlidir. Motorların gücü 1500 W seçilmiş ama yetersiz gelmiştir. Motorların gücü arttırılmış ve analiz sonuçları Çizelge 5.23’de sunulmuştur.

Çizelge 5.23. Orta Zemin ve Yüksek Hız Analiz II

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	11230	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	7,329	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	2000	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	24	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	25	Adet

Motorlar yeterli gelmiştir. Motorların ağırlığı arttırıldığı için şasi ağırlığı da artmaktadır. Araç ağırlığı artmış ve gerekli enerji miktarı 7,329 kWh’e çıkmıştır. Batarya sayısı 24 adet seçilmiş fakat gerekli batarya sayısı 25 adet hesaplanmıştır. Batarya sayısı 1 arttırılarak kodlar yeniden çalıştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 5.24’de paylaşılmıştır.

Çizelge 5.24. Orta Zemin ve Yüksek Hız Analiz III

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	11230	Saniye
Küreme Hacmi	179,06	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,02	m ³ x m
Enerji	7,334	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	2000	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	25	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	25	Adet

Batarya sayısı 25 adet seçilmiş ve gerekli batarya sayısı 25 adet bulunmuştur. 2000 W gücünde 4 motor yeterlidir. Bir önceki analize göre enerji miktarı batarya sayısının artırılması sonucu artmış ama gerekli batarya sayısını arttıracak kadar artmamıştır. Küreme için uygun araç 3. analizin sonucunda tasarlanmıştır.

5.2.7. Sert zemin ve düşük hızda araç modellemesi

Sert zeminler için kazı direnç katsayısı 110000 N/m^2 'dir. Yuvarlanma direnç katsayısı 0,2 ve gömülme direnç katsayısı 0,04 değerindedir. Araç tasarım hızları; kazı hızı 0,5, sürüklenme hızı 0,75 ve boş gidiş hızı 1 m/s'dir. Atanan batarya sayısı 24 adettir. 4 Adet 750 W gücünde elektrik motoru ile analize başlanmıştır.

Çizelge 5.25. Sert zemin ve Düşük Hız Analiz I

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	22460	Saniye
Küreme Hacmi	179,061	m^3
Toplam Sürüklenme İşİ	625,018	$\text{m}^3 \times \text{m}$
Enerji	8,879	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	750	W
Önerilen Motor Gücü	Yetersiz	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	24	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	30	Adet

Alanın kürenmesi için gerekli süre 22460 saniye olarak hesaplanmıştır. 750 W gücündeki motorlar yetersiz gelmiştir. Gerekli enerji miktarı 8,879 kWh olarak hesaplanmıştır. Başlangıçta 24 adet batarya ile başlanmış ama gerekli batarya sayısı 30 olarak hesaplanmıştır. Motor gücü ve batarya sayısı artırılarak kodlar yeniden çalıştırılmış ve sonuçları Çizelge 5.26'te sunulmuştur.

Çizelge 5.26. Sert zemin ve Düşük Hız Analiz II

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	22460	Saniye
Küreme Hacmi	179,061	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,018	m ³ x m
Enerji	9,072	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1000	W
Önerilen Motor Gücü	Yetersiz	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	30	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	31	Adet

Motorların gücü artırıldığı için motor ve şasi ağırlığı artmıştır. Batarya sayısı da yetersiz geldiği için 30'a çıkarılmıştır. Bu işlemlerin sonucu olarak gerekli enerji miktarı araç ağırlığı arttığı için 9,072 kWh'e çıkmıştır. Motor gücü ve batarya sayısı yetersiz gelmiştir. Motor gücü ve batarya sayısı artırılarak kodlar yeniden çalıştırılmış ve sonuçları Çizelge 5.27'de sunulmuştur.

Çizelge 5.27. Sert zemin ve Düşük Hız Analiz III

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	22460	Saniye
Küreme Hacmi	179,061	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,018	m ³ x m
Enerji	9,401	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1500	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	31	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	32	Adet

Batarya sayısı 31 adet olarak güncellenmiştir. Analiz sonucunda motor gücü yeterlidir ancak batarya sayısı yetersizdir. Batarya sayısı artırılarak kodlar yeniden çalıştırılmış ve analiz sonuçları Çizelge 5.28'de sunulmuştur.

Çizelge 5.28. Sert zemin ve Düşük Hız Analiz IV

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	22460	Saniye
Küreme Hacmi	179,061	m ³
Toplam Sürüklenme İşİ	625,018	m ³ x m
Enerji	9,406	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1500	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	32	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	32	Adet

Batarya sayısı 32 adet seçilmiş ve gerekli batarya sayısı ile aynı değer bulunmuştur. Enerji miktarı bir adet batarya arttırıldığı için 0,005 kWh artmıştır. 1500 W gücünde 4 motor yeterlidir. Zeminin kürenmesi için istenilen hıza sahip araç 4. analizin sonucunda tasarlanmıştır.

5.2.8. Sert zemin ve orta hızda araç modellemesi

Sert zeminler için kazı direnç katsayısı 110 000 N/m²'dir. Yuvarlanma direnç katsayısı 0,2 ve gömülme direnç katsayısı 0,04 değerindedir. Araç tasarım hızları; kazı hızı 0,7, sürüklenme hızı 1 ve boş gidiş hızı 1,5 m/s'dir. Atanan batarya sayısı 30 adettir. 4 Adet 1500 W gücünde elektrik motoru ile analize başlanmıştır.

Çizelge 5.29. Sert zemin ve Orta Hız Analiz I

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	15526	Saniye
Küreme Hacmi	179,061	m ³
Toplam Sürüklenme İşİ	625,018	m ³ x m
Enerji	9,396	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1500	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	30	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	32	Adet

Seviyeleme işlemi için gerekli süre 15,526 saniye olarak hesaplanmıştır. Küreme hacmi ve toplam sürüklenme işi değişmemektedir. Aracın küreme için ihtiyaç duyduğu enerji miktarı 9.406 kWh olarak bulunmuştur. Motorlar 1500 W gücünde seçilmiş ve yeterlidir. Batarya sayısı yetersizdir. Batarya sayısı artırılarak kodlar yeniden çalıştırılmış ve sonuçları Çizelge 5.30'da sunulmuştur.

Çizelge 5.30. Sert zemin ve Orta Hız Analiz II

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	15526	Saniye
Küreme Hacmi	179,061	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,018	m ³ x m
Enerji	9,406	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1500	W
Önerilen Motor Gücü	Yeterli	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	32	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	32	Adet

Motorların gücü 1500 W seçilmiş ve seçilen motor gücü yeterli bulunmuştur. Motor gücü artırıldığı için motorların ve şasinin ağırlığı artmış bu durum enerji ihtiyacını arttırmıştır. Batarya 32 adet seçilmiş ve gerekli batarya sayısı 32 adet hesaplanmıştır. Zeminin kürenmesi için istenilen hıza sahip araç 2. analiz sonucunda tasarlanmıştır.

Tasarlanan araç Sert zemin düşük hızdaki araç ile aynı özelliktedir. Hesaplanan motor gücü ikisinde de aynı çıkınca motor ağırlığı ve şasi ağırlığı değişmemiş ve batarya sayısı da aynı kalmıştır.

5.2.9. Sert zemin ve yüksek hızda araç modellemesi

Sert zeminler için kazı direnç katsayısı 110000 N/m²'dir. Yuvarlanma direnç katsayısı 0,2 ve gömülme direnç katsayısı 0,04 değerindedir. Araç tasarım hızları; kazı hızı 1, sürüklenme hızı 1,5 ve boş gidiş hızı 2 m/s'dir. Atanan batarya sayısı 32 adettir. 4 Adet 1500 W gücünde elektrik motoru ile analize başlanmıştır.

Çizelge 5.31. Sert zemin ve Yüksek Hız Analiz I

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	11230	Saniye
Küreme Hacmi	179,061	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,018	m ³ x m
Enerji	9.406	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	1500	W
Önerilen Motor Gücü	Yetersiz	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	32	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	32	Adet

Arazinin kürenmesi için gerekli süre 11230 saniyedir. Seviyeleme için gerekli enerji miktarı 9.406 kWh olarak hesaplanmış ve gerekli batarya sayısı 32 adet bulunmuştur. Batarya sayısı yeterlidir. 1500 W gücündeki motorlar yeterli değildir. Motorların gücü artırılarak kodlar yeniden çalıştırılmış ve sonuçları Çizelge 5.32’de sunulmuştur.

Çizelge 5.32. Sert zemin ve Yüksek Hız Analiz II

Tasarım Parametresi	Değer	Birim
Süre	11230	Saniye
Küreme Hacmi	179,061	m ³
Toplam Sürüklenme İşi	625,018	m ³ x m
Enerji	9,576	kWh
Başlangıçtaki Motor Gücü	2000	W
Önerilen Motor Gücü	Yetersiz	
Başlangıçtaki Batarya Sayısı	32	Adet
Gerekli Batarya Sayısı	33	Adet

Enerji miktarı motor ve şasi ağırlığı artırıldığı için artmıştır. Gerekli batarya sayısı bu işlemin sonucunda 1 adet artmıştır. Motorların gücü 2000 W’a çıkarılmıştır. Seçilen motorlar yeterli değildir. Bir üst sınıfa ait motor seçilmelidir.

Çizelge 5.33. Araç Modellemesi Vaka Analizleri Özeti

Araç Tasarım Parametresi	Motor Gücü	Batarya Sayısı
Zayıf Zemin - Düşük Hız	4x750	14
Zayıf Zemin - Orta Hız	4x750	14
Zayıf Zemin - Yüksek Hız	4x1000	15
Orta Zemin - Düşük Hız	4x750	22
Orta Zemin - Orta Hız	4x1500	24
Orta Zemin - Yüksek Hız	4x2000	25
Sert zemin - Düşük Hız	4x1500	32
Sert zemin - Orta Hız	4x1500	32
Sert zemin - Yüksek Hız	4x2000 ++	33 ++

9 farklı araç modelleme vaka analizi sunulmuştur. Analizler sonucunda zemin ve aracın hız durumuna bağlı olarak araçların itiş motor gücü ve itiş batarya sayısı hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 31’de sunulmuştur.

6. ARAÇ MODELLERİNİN MALİYET ANALİZİ

Vaka analizi bölümünde tasarlanan araçların fiyatları bu bölümde anlatılmaktadır. Araçların şasi ağırlığı, batarya sayısı ve motor güçlerine fiyatları incelenmiş, 9 araç modelleme vaka analizinde sunulan araçların yaklaşık maliyetleri hesaplanmıştır.

Çizelge 6.1. Elektrik Motorlarının Fiyat Listesi

Motor Gücü	Adet Fiyatı [\$]
750	440
1000	510
1500	620
2000	660

Çizelge 6.1’de elektrik motorlarının birim fiyatı paylaşılmıştır. Her bir motor kontrol devresi ile birlikte fiyatlanmıştır. Motor gücü arttıkça motor fiyatı artmaktadır. Fiyatlar piyasada bulunan motorların fiyatlarının derlenmesi ile oluşturulmuştur.

Çizelge 6.2. Şasi Türlerinin Fiyat Listesi

Motor Gücü [W]	Profil Kalınlığı [mm]	Uzunluk [m]	Birim Fiyat [\$ /m]	Fiyat [\$]
750	3	19,8	8,27	163,78
1000	4	19,8	10,92	216,20
1500	5	19,8	13,64	270,12
2000	6	19,8	16,62	328,98

Araç şasisi profillerden oluşmaktadır. Araçtaki motor gücü arttıkça motor ağırlığı artmakta ve motorları taşıyacak şasi zorlanmaktadır. Motor gücü arttıkça şasi profillerinin et kalınlığı da artmaktadır. Çizelge 6.2’de dolar cinsinden şasi alternatifleri için fiyat tablosu sunulmuştur.

Çizelge 6.3. Diğer Maliyetler

Maliyet Kalemi	Birim Fiyat [\$]	Adet	Fiyat [\$]
Tekerlek	15	4	60
Redüktör ve Güç Aktarma Elemanları	83	4	332
Sac Plaka	80	1	80
Küreme Bıçağı	180	1	180
Küreme Bıçağı Bataryası	403	2	806
Küreme Bıçağı Motoru	430	2	860
Kontaktör	85	12	1020
Ölçüm Ekipmanları	60	1	60
Elektronik Ekipmanlar	100	1	100
Batarya	403		
İşçilik	500		

Araçta yaklaşık maliyeti 60 dolar olan 4 tekerlek kullanılmıştır. Motorlar ile tekerlerin bağlantısı için redüktör ve güç aktarma elemanı gerekmektedir ve her teker için 83 \$ fiyatındadır. Aracın toz ve topraktan korunması için üstünün sac plaka ile kaplanması gerekmektedir. Tüm plaka yaklaşık 80 \$ değerindedir. Küreme bıçağı 8 mm et kalınlığına sahiptir ve 180 \$ değerindedir. Küreme bıçağının hareketi için 2 adet batarya ve 2 adet 750 W gücünde elektrik motoru kullanılmıştır. Araçta motorlara aç kapa hareketi vermek için 85 \$ değerinde 12 adet kontaktör kullanılmıştır. Kontaktör, batarya ve motorlar arasında kablolama ve bilgisayar bağlantısı için ekipmanlar için 100 \$ dolar kullanılmıştır. Her bataryanın birim bataryanın fiyatı 403 \$'dır ve askeri amaçlı bir tasarım olduğu için diğer batarya türlerine göre pahalıdır. Ekipmanların birleştirilmesi için 500 \$ değerinde işçilik öngörülmüştür.

Çizelge 6.4. Araç Modellerine Göre Toplam Maliyetler

Araç Tasarım Parametresi	Motor Gücü	Batarya Sayısı	Maliyet [\$]
Zayıf Zemin - Düşük Hız	4x750	14	11.524
Zayıf Zemin - Orta Hız	4x750	14	11.524
Zayıf Zemin - Yüksek Hız	4x1000	15	12.259
Orta Zemin - Düşük Hız	4x750	22	14.748
Orta Zemin - Orta Hız	4x1500	24	16.380
Orta Zemin - Yüksek Hız	4x2000	25	17.002
Güçlü Zemin - Düşük Hız	4x1500	32	19.604
Güçlü Zemin - Orta Hız	4x1500	32	19.604
Güçlü Zemin - Yüksek Hız	4x2000 ++	33 ++	20.226

Çizelge 6.4'te vaka analizi bölümünde tasarlanan araçların maliyetleri hesaplanmıştır. Zayıf zemin düşük hız eşleşmesinde 11.524 \$ maliyetinde en uygun fiyatlı araç tasarlanmıştır. Zemin zorluğu ve araç hızı arttıkça araç maliyeti artmaktadır. Sert zemin yüksek hız eşleşmesinde 2000 W gücündeki motor yeterli gelmemiştir. Son analizde 2000 W gücünde batarya ile kodlar çalıştırılmış ve batarya sayısı 33 bulunmuştur. 2000 W'lık motorlarla 33 batarya kullanıldığında 20.226\$ maliyet oluşmaktadır. Analiz sonucuna göre motorlar yeterli gelmediği için bu tutardan daha fazla bir maliyet oluşacaktır.

Çizelge 6.5. 2 Farklı Araç Maliyet Çizelgesi

Maliyet Kalemi	Zayıf Zemin - Düşük Hız Durumu [\$]	Sert Zemin - Orta Hız Durumu [\$]
Küreme için Alınan Tutar	119,98	159,36
Yıpranan Batarya Tutarı	9,40	21,49
Araç Yıpranma Bedeli	1,73	3,03
Harcanan Enerji Tutarı	0,26	0,57

Aracın 15 x 20 metre boyutundaki bir alanı küremesi sonucu maliyet kalemleri hesaplanmış ve sonuçları sunulmuştur. Çevre ve şehircilik bakanlığının kazı pozunda kazılan zemin sınıfına bağlı olarak % 25 müteahhit kazancı ile m³ cinsinden yaklaşık maliyetler paylaşılmaktadır. “Y.15.001/1A“ ve “Y.15.006/1A“ birim fiyatları ile küreme için alınan tutarlar hesaplanmıştır. Bu birim fiyatlarda makine ile zayıf zeminin kazılması için 0,67 \$/m³ ve orta sertlikte zeminin kazılması için 0,89 \$/m³ bedel biçilmiştir. Tüm alternatifler için 179,061 m³ toprak kürenmiştir. Araç yüzeyi seviyeledikten sonra milyonda 150 yıpranması beklenmektedir. Bataryalar 600 defa şarj edilebilir bir tasarıma sahiptir. Bu da iş sonunda bataryaların 1/600 kadar yıpranacağını göstermektedir. Enerji Piyasası Denetleme Kurulu'nun tarifeler tablosunda tek zamanlı tarife için enerji kullanım bedelinin 0,06075 \$/kWh değerindedir. Dolar kuru 6 \$/TL alınmıştır. Araç zayıf zemin düşük hız vaka analizinde 4,25 kWh, güçlü zemin orta hız vaka analizinde ise 9,406 kWh enerji harcamaktadır. Bu iki vaka analizi için maliyet tablosu Çizelge 6.5'de sunulmuştur.

7. SONUÇ

Bu tezde 1 m bıçak genişliğine sahip otonom bir dozerle rastgele sayılar üretilerek oluşturulan 15 x 20 m boyutundaki bir sanal arazi modelinin yükseklik değerleri insansız bir şekilde istenilen seviyeye getirilmesi benzetimle gerçekleştirilmiştir. Farklı zemin türleri için farklı hızlarda otonom küreme araçları tasarlanmış ve maliyet analizi paylaşılmıştır.

Otonom küreme aracı her bir tekerden tahrikli 4 elektrik motoruna sahip, askeri amaçlarla üretilmiş bataryalar ile desteklenmiştir. Araçta 4 farklı motor seçeneği ve bu seneklere bağlı bir şekilde değişen kutu kesitli profillerden oluşmuş şasi bulunmaktadır. 1 m genişliğinde bir küreme bıçağı ve küreme bıçağının hareketi için 2 adet batarya, 2 adette 750 W gücünde elektrik motoru bulunmaktadır.

Çalışma, küreme simülasyonu ve araç tasarım simülasyonu olmak üzere 2 aşamadan oluşmaktadır. Küreme simülasyonunda araç 15 x 20 m boyutundaki bir alanı dışarıdan insan müdahalesi olmadan istenilen kota getirmektedir. Araç tasarım simülasyonunda ise küreme işlemi için araç gereksinimleri hesaplanmış ve bu parametrelere bağlı olarak tasarlanan araçların maliyeti \$ cinsinden hesaplanmıştır.

Küreme simülasyonunda araç sütun sütun küreme yapmaktadır, bulunduğu sütunu bitirince en yakın doğusundaki sütuna geçmektedir. Bulduğu sütunu küremeden önce kuzey sınırına en yakın yerel maksimum noktayı bulmaktadır. Bu noktadan itibaren kuzey sınırına doğru küreme işlemi yapmaktadır. Sürekli yerel maksimum noktadan küreme yaptığı için araç yokuş yukarı küreme ve sürüklenme yapmamaktadır. Araç motor gücü sınırlı olduğu için küreme derinliği ve sürüklenme hacmi kısıtı bulunmaktadır. Araç kazı derinliğini ve sürüklenme hacmi kontrolünü otonom bir şekilde yapmaktadır.

Otonom küreme aracı yokuş yukarı küreme ve sürüklenme yapmadığı için motor gücü kapasitesinde önemli bir tasarruf edilmektedir. Motor gücü düşürüldüğü için araç ağırlığı azalmakta ve batarya sayısında tasarruf edilmektedir. İş makinesi tasarımcılarının referans alabileceği bir küreme algoritması geliştirilmiştir.

Araç tasarım simülasyonunda zorluk seviyesine göre farklı araç hızında dozerler tasarlanmıştır. Zeminin; kazı direnç katsayısı, yuvarlanma katsayısı ve gömülme direnç katsayısı değiştirilerek 3 farklı zorlukta zemin oluşturulmuştur. 3 farklı hız

durumu ve 3 farklı arazi yapısı için vaka analizleri sunulmuş, aracın motor gücü ve batarya sayısı optimize edilmiştir.

Hız durumları ve arazi yapıları için tüm eşleşmelerde araç hızı arttıkça motor gücü artmakta, araç ağırlığı artıkça batarya sayısı artmaktadır. Motor seçeneğine bağlı olarak şasi profillerinin et kalınlığı değişmektedir. Tasarım için başlangıç motor gücü ve başlangıç batarya sayısı atanmış optimum değerleri bulunmuştur. İş makinesi üreticilerinin yararlanabileceği bir kaynak sunulmuştur.

Araç yükseklik ölçümlerini her birim alanda bir yapmaktadır bu sayede ölçüm sıklığı artmakta ve ölçüm hataları azalmaktadır. Otonom küreme aracı tüm hesaplamaları ve karar alma işlemlerini insansız bir şekilde yapmaktadır. Uzun yol seviyeleme, kanal tesviyesi gibi uzun ve tekrarlı şeritlerin kürenmesinde operatörün dikkati dağılabilir. Otonom küreme aracı insan müdahalesi olmadan çalışacağı için insan kaynaklı hataların, hesap yanlışlarının ve operatör hatalarının önüne geçmektedir.

Otonom küreme aracı altyapı, temel ve maden sahaları gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Yol temel yüzeyi, kanal kazıları gibi seviyeleme işlerinin uzun zaman aldığı uygulamalarda kullanılacak bir araç tasarlanmıştır. Temel yüzeyin düzeçlenmesi, açık maden sahalarında cevherin toplanması işlemlerinde insansız bir şekilde kullanılabilir.

Operatör can güvenliği riskinin yüksek olduğu seviyeleme uygulamalarda otonom küreme aracı kullanılabilir. Nükleer santral alanlarının ıslahı ve radyoaktif sızıntıların bulunduğu alanların düzeçlenmesinde kullanılabilir. Otonom küreme aracı askeri araçların yürütülmesi ve konumlandırılması için zeminin kürenmesi uygulamalarına uygun bir yapıya sahiptir. Operatörün can güvenliği tehlikeye atılmamış olacaktır.

Çalışmanın ileri aşamalarında araç bıçak genişliğini normal bir dozer boyutuna getirmek ve araç kısıtlarını daha esnek hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

8. KAYNAKÇA

- [1] Kato, Shinpei, et al. "An open approach to autonomous vehicles." **IEEE Micro** 35:6 (2015) 60-68.
- [2] Amer, Noor Hafizah, et al. "Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles: a review of state of the art and challenges." **Journal of Intelligent & Robotic Systems** 86:2 (2017) 225-254.
- [3] O'Kelly, Matthew, et al. "APEX: Autonomous vehicle plan verification and execution." (2016) 1.
- [4] Howard, Andrew. "Real-time stereo visual odometry for autonomous ground vehicles." Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2008.
- [5] Bajracharya, Max, et al. "Autonomous off-road navigation with end-to-end learning for the LAGR program." **Journal of Field Robotics** 26:1 (2009) 3-25.
- [6] Hu, Chuan, et al. "Robust H_{∞} output-feedback control for path following of autonomous ground vehicles." **Mechanical Systems and Signal Processing** 70 (2016) 414-427.
- [7] Pendleton, Scott Drew, et al. "Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles." **Machines** 5:1 (2017) 6.
- [8] Makkonen, Tomi, Kelervo Nevala, and Rauno Heikkilä. "A 3D model based control of an excavator." **Automation in Construction** 155 (2006) 571-577.
- [9] Dunbabin, Matthew, and Peter Corke. "Autonomous excavation using a rope shovel." **Journal of Field Robotics** 23:7 (2006) 379-394.
- [10] Vahed, S. M., et al. "Soil estimation based on dissipation energy during autonomous excavation." **IFAC Proceedings Volumes** 41:2 (2008) 13821-13826.
- [11] Luengo, Oscar, Sanjiv Singh, and Howard Cannon. "Modeling and identification of soil-tool interaction in automated excavation." Intelligent Robots and Systems, 1998. Proceedings., 1998 IEEE/RSJ International Conference on. 3. IEEE, 1998.
- [12] Kim, Young Bum, et al. "Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators." **Automation in Construction** 35 (2013) 568-578.

- [13] Ha, Quang, et al. "*Robotic excavation in construction automation.*" **IEEE Robotics & Automation Magazine** 9:1 (2002) 20-28.
- [14] Yu, Hongnian, Yang Liu, and Mohammad HASAN. "*Review of modelling and remote control for excavators.*" **International Journal of Advanced Mechatronic Systems** 2:1/2 (2010) 68-80.
- [15] Zweiri, Y. H., L. D. Seneviratne, and K. Althoefer. "*Modelling and control of an unmanned excavator vehicle.*" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: **Journal of Systems and Control Engineering** 217:4 (2003) 259-274.
- [16] Tan, Choopar, et al. "Hybrid model in a real-time soil parameter identification scheme for autonomous excavation." Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 5. IEEE, 2004.
- [17] Vahed, Shahram Mohseni, et al. "On-line energy-based method for soil estimation and classification in autonomous excavation." Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2007.
- [18] Nagaoka, Kenji, et al. "Experimental study on autonomous burrowing screw robot for subsurface exploration on the Moon." Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2008.
- [19] Jud, Dominic, et al. "*Planning and Control for Autonomous Excavation.*" **IEEE Robotics and Automation Letters** 2:4 (2017) 2151-2158.
- [20] Fernando, Heshan A., et al. "*Towards Controlling Bucket Fill Factor in Robotic Excavation by Learning Admittance Control Setpoints.*" **Field and Service Robotics**. Springer, Cham, 2018.
- [21] Tan, Choo Par, et al. "*Online soil parameter estimation scheme based on Newton-Raphson method for autonomous excavation.*" **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics** 10:2 (2005) 221-229.
- [22] Tan, Choopar, et al. "Online Soil Property Estimation for Autonomous Excavator Vehicles." Proceedings of the IEEE International Robotics & Automation Conference (ICRA). 2003.

- [23] Yıldırım, Adem, and Önder Halis Bettemir. "Otonom Dozer için Küreme Algoritması Geliştirilmesi." **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi** 6:1 292-308.
- [24] BETTEMİR, Önder Halis, and Burak Tombaloğlu. "Kürüme İçin Küçük Ölçekli Otonom İş Makinesi Tasarımı Ve Üretimi." **Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi** 28:3 (2013)
- [25] Saska, Martin, Martin Hess, and Klaus Schilling. "Efficient airport snow shoveling by applying autonomous multi-vehicle formations." Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on. IEEE, 2008.
- [26] Koyachi, Noriho, and Shigeru Sarata. "Unmanned loading operation by autonomous wheel loader." **ICCAS-SICE**, 2009. IEEE, 2009.
- [27] Sarata, Shigeru, et al. "Development of autonomous system for loading operation by wheel loader." Proceedings of the 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2006.
- [28] Sarata, Shigeru, Yossee Weeramhaeng, and Takashi Tsubouchi. "Approach path generation to scooping position for wheel loader." Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. IEEE, 2005.
- [29] Magnusson, Martin, and Håkan Almqvist. "Consistent pile-shape quantification for autonomous wheel loaders." Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2011.
- [30] Park, Sung Hee, et al. "Modeling and simulation of hydraulic system for a wheel loader using AMESim." **ICCAS-SICE**, 2009. IEEE, 2009.
- [31] Dadhich, Siddharth, Ulf Bodin, and Ulf Andersson. "Key challenges in automation of earth-moving machines." **Automation in Construction** 68 (2016) 212-222.
- [32] Dadhich, Siddharth, et al. "Machine learning approach to automatic bucket loading." Control and Automation (MED), 2016 24th Mediterranean Conference on. IEEE, 2016.

- [33] Ghabcheloo, Reza, et al. "Autonomous motion control of a wheel loader." ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [34] Petty, Matt K., John Billingsley, and Thanh Tran-Cong. "Autonomous LHD loading." *Mechatronics and Machine Vision in Practice*, 1997. Proceedings., Fourth Annual Conference on. IEEE, 1997.
- [35] Osumi, Hisashi, et al. "*Efficient Scooping of Rocks by Autonomous Controlled Wheel Loader.*" **Journal of Robotics and Mechatronics** 24:6 (2012) 924-932.
- [36] Zeng, Weiguo. "A simulation model for truck-shovel operation." (2018).
- [37] AFRAPOLI, A. M. and ASKARI-NASAB, H. 2017. *Mining fleet management systems: a review of models and algorithms.* **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, DOI: 10.1080/17480930.2017.1336607, 1-19.
- [38] Ataepour, N., and E. Y. Baafi. "ARENA simulation model for truck-shovel operation in despatching and non-despatching modes." **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment** 13:3 (1999) 125-129.
- [39] BASTOS, G. S. 2013. Decision making applied to shift change in stochastic open-pit mining truck dispatching. In: 16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, San Diego, California, USA. 34-39.
- [40] Bissiri, Yassiah, W. Scott Dunbar, and Allan Hall. *Swarm-based truck-shovel dispatching system in open pit mine operations.* Diss. Ph. D. thesis, University of British Columbia, 2002.
- [41] González, Manuel, et al. "A 3d physics-based hydraulic excavator simulator." ASME-AFM 2009 world conference on innovative virtual reality. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [42] Filla, Reno, Allan Ericsson, and Jan-Ove Palmberg. "*Dynamic simulation of construction machinery: Towards an operator model.*" arXiv preprint cs/0503087 (2005).
- [43] Nebot, Eduardo M. "*Surface mining: main research issues for autonomous operations.*" **Robotics Research.** Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. 268-280.

- [44] KONYUKH, VLADIMIR. "*Robotics for mining.*" **Mineral Resources Engineering** 11:01 (2002) 73-88.
- [45] Lever, Paul JA, et al. "*Autonomous robotic mining excavation using fuzzy logic and neural networks.*" **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems** 3:1 (1995) 31-42.
- [46] Wang, Fei-Yue. "*Agent-based control for fuzzy behavior programming in robotic excavation.*" **IEEE Transactions on Fuzzy Systems** 12:4 (2004) 540-548.
- [47] Berglund, Tomas, et al. "*Planning smooth and obstacle-avoiding B-spline paths for autonomous mining vehicles.*" **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering** 7:1 (2010) 167-172.
- [48] Affanni, Antonio, et al. "*Battery choice and management for new-generation electric vehicles.*" **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 52:5 (2005) 1343-1349.
- [49] Lukic, Srdjan M., et al. "*Energy storage systems for automotive applications.*" **IEEE Transactions on industrial electronics** 55:6 (2008) 2258-2267.
- [50] Cao, Jian, Nigel Schofield, and Ali Emadi. "Battery balancing methods: A comprehensive review." Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE. IEEE, 2008.
- [51] Xue, X. D., K. W. E. Cheng, and N. C. Cheung. "Selection of electric motor drives for electric vehicles." Power Engineering Conference, 2008. AUPEC'08. Australasian Universities. IEEE, 2008.
- [52] De Santiago, Juan, et al. "*Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review.*" **IEEE Transactions on Vehicular Technology** 61:2 (2012) 475-484.
- [53] Yildirim, Merve, Mehmet Polat, and Hasan Kürüm. "A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles." Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International. IEEE, 2014.

- [54] Cakir, Kazim, and A. Sabanovic. "In-wheel motor design for electric vehicles." *Advanced Motion Control*, 2006. 9th IEEE International Workshop on. IEEE, 2006.
- [55] Dizqah, Arash M., et al. "A fast and parametric torque distribution strategy for four-wheel-drive energy-efficient electric vehicles." **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 63:7 (2016) 4367-4376.
- [56] Cavazzuti, Marco, et al. "High performance automotive chassis design: a topology optimization based approach." **Structural and Multidisciplinary Optimization** 44:1 (2011) 45-56.
- [57] Yu, Jinghong, Brian Nutwell, and Brian Brickner. *Analysis of vehicle chassis transmissibility of steering shimmy and brake judder: system modeling and validation*. No. 2007-01-2341. **SAE Technical Paper**, 2007.
- [58] Freivalds, A., and Y. J. Kim. "Blade size and weight effects in shovel design." **Applied ergonomics** 21:1 (1990) 39-42.
- [59] SHI, Juan-juan, et al. "Design of Electro-hydraulic System for Dozer Blade Automatic Control [J]." **Tractor & Farm Transporter**1 (2011) 010.
- [60] Yamakawa, Junya, and Keiji Watanabe. "A method of optimal wheel torque determination for independent wheel drive vehicles." **Journal of terramechanics** 43:3 (2006) 269-285.
- [61] Suzuki, Yuta, Yoshio Kano, and Masato Abe. "A study on tyre force distribution controls for full drive-by-wire electric vehicle." **Vehicle System Dynamics** 52.sup1 (2014) 235-250.
- [62] Uzunsoy, Erdem. "Vehicle Dynamics Simulations on Road and Off-Road Surfaces—A Comparative Analysis." **Sakarya University Journal of Science** 22:5 (2018) 1199-1203.
- [63] Anonim. (2019) . <http://analizsimulasyon.com/motor-guc-ve-tork-iliskisi/> (25.2.2019)
- [64] Chan, C. C., and K. T. Chau. *Modern electric vehicle technology*. 47. **Oxford University Press on Demand**, 2001.
- [65] Anonim. (2019) . <https://circularenergystorage.com/report> (15.2.2019)

[66] Tür, Okan. *Hibrid Elektrikli Araç Güç Sisteminin Simülasyonu*. Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.

[67] Anonim. (2019) . <http://www.ismakinalari.org.tr/tr/article.asp?id=171> (25.1.2019)



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyadı: Adem YILDIRIM

Doğum Yeri ve Tarihi: HEKİMİHAN – 27/07/1994

E-Posta: ademyildiriminsaat@gmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Çift Anadal Lisans: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans (Varsa):

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Limak Enerji / Limak Uludağ Elektrik Perakende Satış A.Ş./ İş Geliştirme ve Veri Analisti / 10/2017 – Devam

Yayın Listesi:

Yıldırım, A., Ergün, E., Bettemir, Ö. H. (2016). " Bina Bilgi Modeli Destekli Kaynak Dengeleme Uygulaması Örneği", 4. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, Eskişehir, 705-717.

Yıldırım, A. ve Bettemir, Ö. H. (2017)," Solution Of Resource Constrained Project Scheduling By Line Of Balance", International 7th Construction Management Congress, Samsun, 553-566.

Yıldırım A., Bettemir Ö.H., "Otonom Dozer için Küreme Algoritması Geliştirilmesi", Duzce University Journal of Science Technology, vol.6, pp.292-308, 2018

Yıldırım A., Bettemir Ö.H., "Economical Analysis of Heating of Buildings in Malatya Province", Uluslararası Katılımlı 7. İnşaat Yönetimi Kongresi, Samsun, TÜRKİYE, , vol.1, pp.257-270

Bettemir Ö.H. Yıldırım A, "Visualisation of Grading Simulation", International Civil Engineering and Architecture Conference 2019 (ICEARC'19), 17-20 April 2019, Trabzon, Turkey