



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DÖRT TEKERDEN TAHRİKLİ BİR MOBİL ROBOTUN GÜÇ TÜKETİMİ VE PERFORMANS ANALİZİ

FAHRİ ANIL SELÇUK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. M. Caner AKÜNER

EŞ-DANIŞMAN

Assoc.Prof. Dr. Gökhan ERDEMİR

İSTANBUL, 2024



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



POWER CONSUMPTION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A FOUR WHEEL DRIVE MOBILE ROBOT

FAHRİ ANIL SELÇUK

MASTER THESIS

Department of Mechatronics

Mechatronics Engineering Program

SUPERVISOR

Prof. Dr. M. Caner AKÜNER

CO-SUPERVISOR

Assoc.Prof. Dr. Gökhan ERDEMİR

İSTANBUL, 2024

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
SEMBOLLER	v
KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
1.GİRİŞ	1
2. METOT ve YÖNTEM	4
2.1 Mobil Robot Sistemi	5
2.2 Skid Steering Dönüş Sistemi	9
2.3.Tekerleklerin Matematik Modeli.....	10
2.3 Kontrol.....	15
2.4 Güç Tüketim Algoritması.....	20
3. SENARYOLAR	26
3.1 Senaryo1	27
3.2 Senaryo2	29
3.3 Senaryo3	32
3.4 Senaryo4	39
4. SENARYOLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	43
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	44
KAYNAKÇA.....	46

TEŞEKKÜR

Öncelikli olarak çalışma esnasında benden desteklerini esirgemeyen ve tez danıŐmanım Prof. Dr. M. Caner AKÜNER'e ve bana her alanda akıl hocalığı yapan ikinci danıŐmanım Assoc.Pr. Dr. Gökhan ERDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu zorlu süreçte benden maddi ve manevi desteklerini asla esirgemeyen babam Ahmet SELÇUK, annem Şennur SELÇUK ve kız kardeşim Ece SELÇUK'a, sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Fahri Anıl SELÇUK

Őubat 2024



ÖZET

DÖRT TEKERDEN TAHRİKLİ BİR MOBİL ROBOTUN GÜÇ TÜKETİMİ VE PERFORMANS ANALİZİ

Bu çalışmada, dört tekerlekten çekişli (4WD-MR) bir mobil robotun belirlenen çalışma koşulları altında güç tüketim modelinin ve performans özelliklerinin analizi yapılmıştır.

Clearpath Jackal 4WD mobil robotu test platformu olarak kullanılmıştır. İlk adım olarak, kullanılan mobil robotun tasarımı Solidworks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak, tasarım daha sonra analiz için simülasyon ve kontrol algoritmaları oluşturmak üzere Matlab Simulink modülüne aktarılmıştır. Mobil robotun kontrol denklemlerinin hesaplanması sürecinde kinematik modeller kullanılmıştır. Robotun hesaplanan tekerlek kinematik modelinden elde edilen çıktı verileri, yani tam olarak tekerlek açısız hızı, önceden tanımlanmış kinematik kontrol denklemleri için girdi görevi görmüştür. Daha sonra robotun güç tüketimini hesaplayan algoritma için gerekli formüller belirlenmiştir. Bu formüller daha sonra Matlab Simulink aracılığıyla blok diyagramlara çevrilmiştir. Mobil robotun güç tüketimi analizini değerlendirmek için dört farklı senaryo belirlenmiştir. Bu senaryolar sabit hızda doğrusal hareketi, ivmeli doğrusal hareketi, ivmeli dönme hareketini ve slalom hareketini içermektedir. Bu senaryolardan elde edilen güç tüketimi verileri titizlikle analiz edilerek kapsamlı değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuç olarak, dört tekerlekten tahrikli bir mobil robot için literatürde yer alan mevcut bir güç tüketimi modeli başarıyla uygulanmıştır. Bu uygulama, bu özel güç tüketimi modelinin literatürde belgelenen diğer modellere göre avantajlarını vurgulayarak karşılaştırmalı bir analizi kolaylaştırmıştır. Elektrikli araçların giderek yaygınlaştığı günümüz dünyasında, özellikle küçük boyutlu mobil robotların pil tüketim davranışlarının analiz edilmesi ve tüketim tahminlerinin yapılması açısından bu çalışma, literatürdeki önemli çalışmalardan biri olacaktır.

ABSTRACT

POWER CONSUMPTION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A FOUR-WHEEL DRIVE MOBILE ROBOT

In this study, an analysis of the power consumption model and performance characteristics of a four-wheel drive (4WD-MR) mobile robot under specified operational conditions was conducted.

Clearpath Jackal 4WD mobile robot was used as a test platform. As the first step, the design of the utilized mobile robot using Solidworks software was performed. Secondly, the design was subsequently imported into the Matlab Simulink module to create simulation and control algorithms for analysis. In the process of computing the control equations for the mobile robot, kinematic models were employed. The output data from the robot's calculated wheel kinematic model, precisely the wheel angular velocity, served as the input for the predefined kinematic control equations. Subsequently, formulas essential for the algorithm calculating the robot's power consumption were identified. These formulas were then translated into block diagrams via the Matlab Simulink. To assess the power consumption analysis of the mobile robot, four distinct scenarios were outlined. These scenarios included linear motion at a constant speed, linear motion with acceleration, rotational movement with acceleration, and slalom movement. The power consumption data derived from these scenarios were meticulously analyzed, leading to comprehensive evaluations. As a result, an existing power consumption model from the literature for a four-wheel drive mobile robot was applied successfully. This application facilitated a comparative analysis, highlighting the advantages of this specific power consumption model over others documented in the literature. In today's world, where electric vehicles are becoming increasingly widespread, this study will be one of the essential works in the literature, especially for analyzing the battery consumption behaviors of small-sized mobile robots and making consumption predictions.

SEMBOLLER

- p_x : Simulink Yazılımında Robot Gövdesi Bloğunun X eksenine Girdisi
- p_y : Simulink Yazılımında Robot Gövdesi Bloğunun Y eksenine Girdisi
- p_z : Simulink Yazılımında Robot Gövdesi Bloğunun Z eksenine Girdisi
- M_t : Tekerleğin Merkezi
- x_{mt} : Tekerleğin X Eksenindeki Konumu
- y_{mt} : Tekerleğin Y Eksenindeki Konumu
- V_t : Tekerleğin X İleri Eksenindeki Hızı
- V_{mek} : Mekanum Tekerleğin Hızı
- ϕ_M : Mekanum Tekerleğin Tekerlek İle Olan Açısı
- w_T : Tekerleğin Açısız Hızı
- r_t : Tekerleğin Yarıçapı
- w_{mek} : Mekanum Tekerleğin Açısız Hızı
- r_{mek} : Mekanum Tekerleğin Yarıçapı
- V_{Mek}^x : Mekanum Tekerleğin X Eksenindeki Hızı
- V_{Mek}^y : Mekanum Tekerleğin Y Eksenindeki Hızı
- B : Mobil Robot Gövdesinin Ağırlık Merkezi
- x_b : Robot Gövdesinin Robot Gövdesinden Geçen Düzlemin X Eksenindeki Hızı
- y_b : Robot Gövdesinin Robot Gövdesinden Geçen Düzlemin Y Eksenindeki Hızı
- u : Mobil Robot Gövdesinin X Eksenindeki Hızı
- v : Mobil Robot Gövdesinin Y Eksenindeki Hızı
- r : Mobil Robot Gövdesinin Açısız Hızı
- d_{xi} : Mobil Robotun Ağırlık Merkezi İle Tekerleklerin X Eksenindeki Uzaklıkları
- d_{yi} : Mobil Robotun Ağırlık Merkezi İle Tekerleklerin Y Eksenindeki Uzaklıkları
- ϕ_{Bi} : B noktası ile M_t Noktaları Arasındaki Açısı
- $V_{M_t}^{M_t}$: Mobil Robotun Tekerleği Üzerindeki Hız Matrisi
- R : Rotasyon Matrisi
- w_{Ti} : Mobil Robot Tekerleğinin Açısız Hızı

- v : Mobil Robotun Hız Matrisi
 v_x : Mobil Robotun Hız Matrisinin X Eksenindeki Bileşeni
 v_y : Mobil Robotun Hız Matrisinin Y Eksenindeki Bileşeni
 q : Mobil Robotun Konum Matrisi
 X : Mobil Robotun Konum Matrisinin X Eksenindeki Bileşeni
 Y : Mobil Robotun Konum Matrisinin Y Eksenindeki Bileşeni
 θ : Mobil Robotun Konum Matrisinin Z Eksenindeki Oryantasyonu
 V_x : Mobil Robotun X Eksenindeki Hızı
 V_x^R : Mobil Robotun Sağ Teker Takımının X Eksenindeki Hızı
 V_x^L : Mobil Robotun Sol Teker Takımının Y Eksenindeki Hızı
 V_R : Mobil Robotun Sağ Teker Takımının Hızı
 V_L : Mobil Robotun Sol Teker Takımının Hızı
 ω : Mobil Robotun Açısal Hızı
 P_x : Mobil Robotun X Eksenindeki Konumu
 P_y : Mobil Robotun Y Eksenindeki Konumu
 \tilde{P}_s : Mobil Robotun Kayma Hareketi Sonucu Tükettiği Güç Miktarı
 μ : Mobil Robotun Zemin İle Arasındaki Sürtünme Katsayısı
 $a^{r,l}$: Mobil Robotun Tekerleklerinin Zemin İle Teması Noktaları
 $p(a^{r,l})$: Mobil Robotun Tekerleklerinin Zemine Uyguladıkları Basınç Kuvveti
 $\vec{C}^{r,l}$: Mobil Robotun Teker Takımlarının Dönme Eksenine Olan Konum Matrisi
 \vec{C}_x : Mobil Robotun Teker Takımlarının Dönme Eksenine Olan Uzaklık Matrisi
 \tilde{P}_R : Mobil Robotun Motorlarında Tüketilen Güç Miktarı
 K : Oransal Çekiş Direnç Sabiti

KISALTMALAR

ICR : Instantaneous Centers of Rotation(Anlık Dönme Merkezi)



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Tasarım Şeması	6
Şekil 2.2	Mobil Robotun SIMULINK Şeması	7
Şekil 2.3	Mobil Robotun SOLIDWORKS Görüntüsü	8
Şekil 2.4	Tekerleğe Etki Eden Kuvvetlerin Gösterimi	10
Şekil 2.5	Tekerlek ve Gövde Arasındaki Kuvvet Etkileşimlerinin Gösterimi	12
Şekil 2.6	Mobil Robot Sisteminin Serbest Cisim Diyagramı	16
Şekil 2.7	Kontrol Denklemlerinin Blok Diyagramı Şeklinde Gösterimi	19
Şekil 2.8	C^T_x Değerinin Blok Diyagramı Şeklinde Gösterimi	22
Şekil 2.9	Kayma Esnasında Oluşan Güç Kaybı Formülünün Blok Diyagramı.....	23
Şekil 2.10	Mermer Zeminde K ve μ Değerlerinin Hesaplanması İçin Kullanılan Korelasyon Doğrusu.....	25
Şekil 2.11	Beton Zeminde K ve μ Değerlerinin Hesaplanması İçin Kullanılan Korelasyon Doğrusu.....	25
Şekil 2.12	Motorda Harcanan Güç Tüketimini Gösteren Formülün Blok Diyagramı Şeklinde Gösterimi	26
Şekil 3.1	Senaryo1 Esnasında Mobil Robotun Hız Grafiği	27
Şekil 3.2	Senaryo1'de Mermer ve Beton Zeminlerde Mobil Robottaki Güç Tüketimi ..	28
Şekil 3.3	Senaryo2 Esnasında Mobil Robotun Hız Grafiği	30
Şekil 3.4	Senaryo2 Esnasında Mermer ve Beton Zeminlerde Mobil Robottaki Güç Tüketimi	31
Şekil 3.5	Senaryo3 Esnasında Mobil Robotun Sağ Tekerinin Hız Grafiği.....	33
Şekil 3.6	Senaryo3 Esnasında Mobil Robotun Sol Tekerinin Hız Grafiği	34
Şekil 3.7	Mobil Robotun Senaryo3 Esnasında Mermer ve Beton Zeminlerde Motorlarında Harcanan Güç Tüketimi	35
Şekil 3.8	Senaryo 3 Esnasında Mermer Zeminde Mobil Robotun Sağ Teker Takımında Harcanan Güç	36
Şekil 3.9	Senaryo 3 Esnasında Mermer Zeminde Mobil Robotun Sol Teker Takımında Harcanan Güç	37
Şekil 3.10	Senaryo 3 Esnasında Beton Zeminde Mobil Robotun Sağ Teker Takımında Harcanan Güç	37
Şekil 3.11	Senaryo 3 Esnasında Beton Zeminde Mobil Robotun Sol Teker Takımında Harcanan Güç	38
Şekil 3.12	Senaryo4 Esnasında Mobil Robotun Sağ Teker Takımının Hızı.....	39
Şekil 3.13	Senaryo4 Esnasında Mobil Robotun Sol Teker Takımının Hızı.....	40
Şekil 3.14	Senaryo4 Esnasında Mermer Zeminde Mobil Robotun Motorlarında Harcanan Güç	40
Şekil 3.15	Senaryo4 Esnasında Beton Zeminde Mobil Robotun Motorlarında Harcanan Güç	41
Şekil 3.16	Senaryo4 Esnasında Mermer Zeminde Sağ ve Sol Teker Takımında Kayma Hareketi Sonucu Tüketilen Güç	42
Şekil 3.17	Senaryo4 Esnasında Beton Zeminde Sağ ve Sol Teker Takımında Kayma Hareketi Sonucu Tüketilen Güç	42

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 CLEARPATH JACKAL Teknik Özellikleri	5
Tablo 2.2 Akademik Çalışmada Deney Sonucu Bulunan K ve μ Değerleri.....	24
Tablo 3.1 Senaryo1 İçin Kullanılan Parametreler.....	27
Tablo 3.2 Senaryo2 İçin Kullanılan Parametreler.....	29
Tablo 3.3 Senaryo3 İçin Kullanılan Parametreler.....	32



1.GİRİŞ

Hızla gelişen günümüz dünyasında robot teknolojileri oldukça fazla ilgi görmektedir[1]. Robot teknolojilerinin gelişmesi ile, öncesinde insanların yaptığı birçok eylem, robotlar vasıtası ile yapılabilmektedir[2]. Sağlık, eğitim, askeri ve tarım gibi birçok sektörde kendisine kullanım alanı bulan robotlar, son yıllarda artan gelişmelerle birlikte insanların evlerinde de rahatlıkla kullanabildiği sistemler haline gelmiştir.Ayrıca mobil robotlar, çocuk gelişiminde ve fizyoterapi gibi sektörlerde de kullanılmaktadır[3], [4], [5]. Bu sektörde kullanılan robotlar, kullanıldığı sektöre bağlı olarak maliyetlerin azalması, imalat süreçlerinde imalat hızının artırılması ve imalat esnasında oluşan hata payının azaltılması, ev tipi kullanımlarda kullanıcıya pratiklik kazandırması, askeri kullanımlarda insan yaralanmaları ve kaybını azaltması gibi faydalar sağlayarak, kısa ve uzun vadede kullanıldığı sektörün gelişimine büyük katkılarda bulunmaktadır.

Neredeyse günlük yaşamın her evresinde kullanılabilen robotlar, kullanılacağı sektördeki ihtiyaçlara göre farklı amaçlara hizmet edebilir. Askeri alanda robotlar, gözetleme, haber iletme-alma ve muharebe gibi temel alanlarda kullanılmaktadır[6]. Tarım sektöründe ilaçlama, ürün hasadı, numune toplanması ve numune analizi gibi alanlarda kullanılmaktadır[7]. Sağlık alanındaki gelişmiş robotlar ile çok hassas ameliyatlara gerçekleştirilebilmektedir[8]. İmalat alanında ise gerek endüstriyel robot kollar ile kaynak, kesme, perçinleme, vidalama, boya gibi operasyonlar gerçekleştirilmekte, belirli düzlemlerde hareket kabiliyetine sahip tekerlek ya da benzeri sistemleri bulunan mobil robotlar ile, yüksek ağırlıklı ürünlerin bir noktadan diğer noktaya taşınması işlemi gerçekleştirilmektedir[9]. Bu sektörler dışında robotlar, insanların çalışması için çok zor şartlara sahip veya insan çalışmasının mümkün olmadığı ortamlarda da ortamın şartlarına göre imal edilerek görev alabilmektedir[10], [11]. Bu gibi çok riskli ortamlarda da kullanılabilen robotlar, insani risk etmenlerini sıfıra indirerek, çok daha güvenli çalışma şartları kazandırma kabiliyetlerine sahiptir.

Yüksek lisans tezinde kullanılacak olan mobil robotlar genel olarak robot gövdesi, robotun hareket edeceği yüzeydeki tahrik kuvvetini sağlayacak olan motorlar ve bu motorlara bağlı tekerlek ya da palet gibi tahrik elemanlarından oluşur. Bu robotlara, farklı robot kol sistemleri de entegre edilebilerek, çok farklı görevlerde kullanılabilir.

Robotlar temel olarak holonomik ve holonomik olmayan robotlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Holonomik kavramı, robotun kaç serbestlik derecesine sahip olduğu ve bu serbestlik derecelerinin kontrol edilebilmesi arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Kullanıcı ya da operatör tarafından kontrol edilebilen serbestlik derecesi, robotun toplam serbestlik derecesine eşit ise bu tip robotlara holonomik robotlar denmektedir. Mobil robotlarda, ileri-geri ve yan yönlere doğru hareket sağlama imkanı veren omnitekerlek sistemlerine sahip robotlar, holonomik robotlara örnek olarak gösterilebilir.

Kontrol edilebilir serbestlik derecesinin, normal serbestlik derecesinden az olduğu robotlara ise holonomik olmayan robotlar denilmektedir. Örnek olarak günümüzde kullanılan araçlarda, aracın iki eksenindeki hareketi ve kendi eksenindeki dönüş hareketi ile beraber üç serbestlik derecesi bulunmaktadır, ancak sürücü bu 3 serbestlik derecesinden sadece ikisini kontrol edebilme kabiliyetine sahiptir. Bunlar aracın ileri-geri hareketleri ve direksiyonun dönüş kabiliyetidir. Günümüz araçlarında bulunan üç serbestlik derecesinin sadece ikisi kontrol edilebilir olduğundan ötürü günümüz araçları holonomik olmayan sistemler sınıfına girmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan mobil robot da holonomik olmayan robotlar sınıfına girmektedir.

Robotun çalışması için gereken enerji, temel olarak batarya sistemleri ile sağlanmaktadır. Batarya sistemleri, farklı etken maddeler kullanılarak imal edilebilmektedir[12], [13]. Bu etken maddeler, bataryanın kullanılacağı ortam şartları, depoladığı enerji miktarı ve boyutları gibi çeşitli değişkenlere bağlıdır. Robot teknolojilerindeki temel sorunlardan biri, enerji tüketimidir. Batarya sistemleri için istenilen en optimal şartlar, öncelikli olarak bataryanın enerji kapasitesinin yüksek olması, bataryanın genel robot sistemi içinde fazla yer kaplamaması, enerji üretimi esnasında oluşan kimyasal reaksiyon sonucu oluşacak ısının robotun elektronik sistemleri gibi hassas sistemlerine zarar vermemesi ve herhangi bir kaza ya da bataryada oluşacak arıza durumunda, bataryanın çevreye zarar vermemesidir[13]

Batarya sistemlerinde, güç tüketimi çok fazla değişkene bağlıdır. Bu değişkenlere, robotun hareket halindeyken zemin ile arasındaki sürtünme, robotun hareketini sağlayan motorların parçaları arasındaki mekanik sürtünmeler, sistemin ağırlığı, robotun çalıştığı ortam sıcaklığı ve robot ile ortamda bulunan havanın, robot yüzeyi ile teması sonucu oluşacak tepki kuvveti gibi örnekler verilebilir[13].

Yukarıda bahsedilen bu güç tüketim değişkenlerinin gerçek zamanlı hesaplamalarını yapmak oldukça zordur. Bu sebeple güç tüketimini hesaplamak için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Mobil robot sistemlerinde günümüzdeki en büyük sorunlardan biri bahsedildiği gibi enerji tüketimidir. Literatürde, kullanılan batarya sistemlerinin geliştirilmesi, batarya verimliliğinin artırılması ve farklı materyaller kullanılarak imal edilmiş bataryaların mobil robot sistemlerine entegre edilmesi gibi çeşitli çalışmalar yapılmaktadır[14]. Literatürde yapılan bir çalışmada, dinamik güç kontrolü adı altında bir güç tüketim modeli kullanılarak, mobil robotta operasyon anında kullanılmayan elemanların güç tüketimi yüksek hassasiyetle en aza indirilmiştir[15]. Başka bir çalışmada, robotun çalışma esnasında izleyeceği yol optimize edilerek, güç tüketimi azaltılmaya çalışılmıştır[16]. Bir çalışmada ise mobil robotların, görev icra ederken tek başına çalışmasındansa en az iki robotun çalışması, bu robotlardan birinin görevi icra ederken diğer robotun, görevi icra eden robotu şarj etmesi senaryosu gösterilmiştir[17]. Sürü robotlar üzerine yapılan çalışmalarda, robotların sürekli olarak batarya durumlarının gözlemlenmesi gerektiği ve çeşitli ortamlarda uzun ve stabil çalışma yapabilmeleri için batarya durumlarının öneminden bahsedilmiştir[18], [19], [20]. Yapılan çalışmalarda, lityum-polimer bataryaların, sürü robotlarda kullanımındaki küçük boyut, daha stabil elektrik akımı üretimi ve kullanılan diğer pil türlerine göre avantajlarından bahsedilmiştir[21].

Bataryalardaki enerji tüketiminin azaltılması sorunu sadece mobil robotlarda değil, elektrikli araç sektöründe de en büyük sorunlardan biridir. Yapılan bir çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar için yaşam döngüsü optimize edilmeye çalışılmıştır[22]. Yine literatürde yapılan başka bir çalışmada ise elektrikli araçlarda batarya tüketimi hakkında yapılan çalışmalar hakkında genel bilgiler verilmiştir[23]. Elektrikli araçlarda enerji tüketen eleman sayısı mobil robotlara göre çok daha fazladır[24]. Bu sebeple elektrikli araçlar için yapılan literatürdeki çalışmalarda sadece batarya değil, elektrikli araç üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Bir çalışmada, batarya ve motor gibi elektrikli araç elemanları, belirlenen araç sürüş döngüsü içerisinde optimize edilerek, minimal enerji tüketimini sağlayacak bir algoritma üzerinde çalışılmıştır[25]. Başka bir çalışmada ise, makine öğrenmesi yöntemi kullanılarak, aracın çeşitli motor

elemanları üzerinde optimizasyonlar yapılmış ve aracın güç tüketimi minimize edilmeye çalışılmıştır[26].

Bu yüksek lisans tezinde, Matlab[27] yazılımının modüllerinden Simulink[28] ve Simscape[29] kullanılarak, literatürde bulunan bir güç tüketim algoritması ile bir mobil robotun, belirlenmiş senaryolardaki güç ve performans analizi incelenecektir.

2. METOT ve YÖNTEM

Bu yüksek lisans tezinde, Clearpath[30] firmasının Jackal[31] adlı mobil robotu kullanılmıştır. Mobil robotun Solidworks[32] yazılımında üç boyutlu tasarımı yapılmış, sonrasında bu tasarım Matlab yazılımına aktarılmıştır. Matlab yazılımı içerisinde bulunan Simscape Multibody eklentisi ile, robotun üç boyutlu tasarımı, blok diyagramı halinde Matlab içerisindeki Simulink eklentisinde kullanıma hazır hale getirilmiştir. Mobil robotun tüm kontrol diyagramları ve güç tüketim algoritması öncelikle matematiksel formüller olarak belirlenmiş, sonrasında bu formüller blok diyagramı olarak hazırlanarak sisteme entegre edilmiştir.

Mobil robot sistemi tasarlanırken öncelikli olarak Solidworks yazılımı ile elde edilen mobil robotun blok diyagramları sisteme eklenmiştir. Daha sonra, mobil robotun tekerlekleri ve gövdesinin hareket kabiliyeti kazanması için, robotun tekerlek ve gövdesini gösteren bloklara, belirlenen hareketleri yapan Simulink blokları eklenmiştir. Mobil robot, tekerleklere bağlı olan döner eklem bloklarına girdi olarak belirtilecek tekerlek açısız hızı ile hareket edecektir.

Tekerlek açısız hızını ve tekerlek açısız hızı ile mobil robotun konumunun arasındaki ilişkiyi belirlemek adına mobil robotun tekerleklerinin matematiksel modeli belirlenmiştir. Sonrasında bu matematiksel model Simulink yazılımında blok diyagramı haline getirilmiştir. Bu matematiksel modelden çıktı olarak elde edilen mobil robotun x,y ve z düzlemlerindeki hızları, mobil robotun kontrol denklemlerinin bulunduğu Simulink bloklarına girdi olarak tanımlanmıştır. Bu sayede mobil robotun hareketi gerçekleştirilmiştir.

2.1 Mobil Robot Sistemi

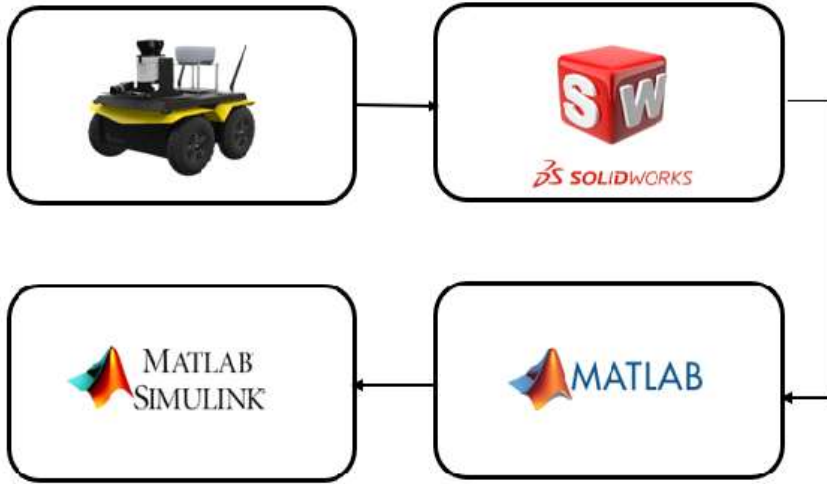
Yüksek lisans tezinde, mobil olarak Clearpath firmasının Jackal adlı modeli belirlenmiştir. Bu mobil robotun seçilmesindeki temel amaç, robotun eğitim başta olmak üzere çeşitli sektörlerde oldukça fazla kullanılmasıdır.

Tablo 2.1: CLEARPATH JACKAL Teknik Özellikleri

<i>Parametreler</i>	<i>Değerler</i>
Uzunluk	508 mm
Genişlik	430 mm
Yükseklik	250 mm
Maksimum Ağırlık	20 kg
Maksimum Hız	2 m/sn
Batarya Kimyası	Lityum, 270Wh
Operasyon Süresi	8 Saat(Basit kullanım, 2 Saat(Tam kullanım)
Kullanıcı Gücü	16A/25.6V,7A/12V,5A,5V
Çalışma Sıcaklıkları	-19/+45 Santigrat Derece
Çalışma Ortamı	İç ve Dış Ortam

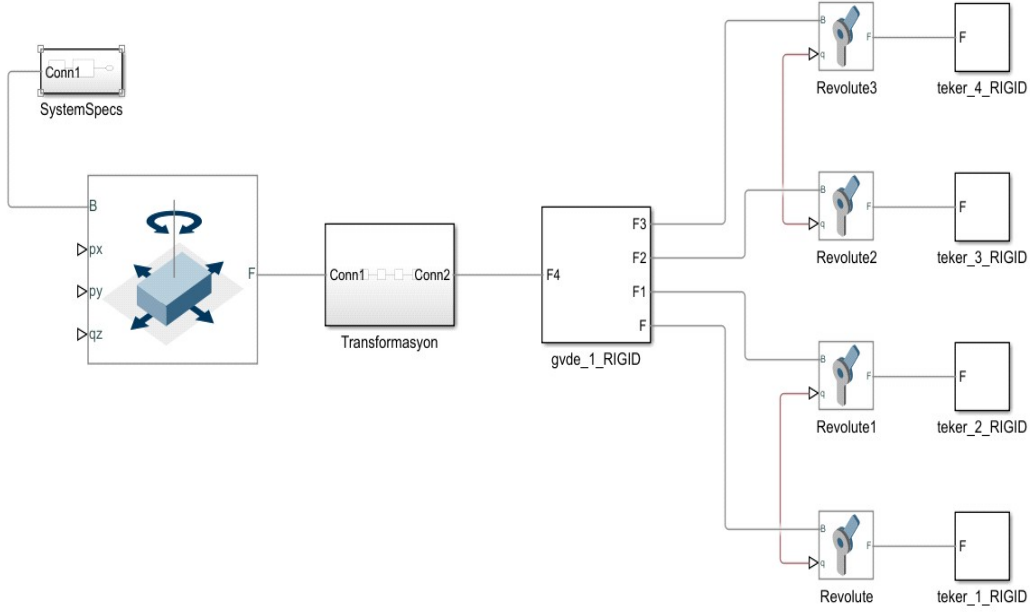
Clearpath firmasına ait Jackal mobil robot sistemi, özellikle robot eğitimi verilen kurumlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Jackal, modüler yapısı sayesinde birçok sensör ve kamera sistemleri ile beraber kullanılabilir. 3 farklı elektriksel güç girişi ile çalışabilmesi sayesinde, birden fazla sensör ve kamera sistemini aynı anda çalıştırabilir. -20/+45 santigrat derece hava sıcaklıkları arasında çalışabilen Jackal, su geçirmez özelliği sayesinde çok farklı hava koşullarında, tekerlek yapısı ve motor gücü sayesinde de zorlu zemin şartlarında görev alabilir.

Robotun üç boyutlu modeli, Solidworks adlı üç boyutlu tasarım programı ile yapılmıştır. Tasarım esnasında, mobil robotun katalogundaki değerlerden faydalanılmıştır. Bu tasarım, sadece robotun hareketini görsel olarak Matlab’de görme amacı taşıdığından ötürü, katalogda belirtilmeyen bazı ölçüler, robotun gerçek tasarımına en yakın olacak şekilde uygulanmıştır. Tasarım tamamlandıktan sonra, Solidworks yazılımı içerisinde bulunan bir eklenti kullanılarak robotun tasarımı, Matlab yazılımı bünyesindeki Simulink’e aktarılmıştır.



Şekil 2.1 Tasarım Şeması

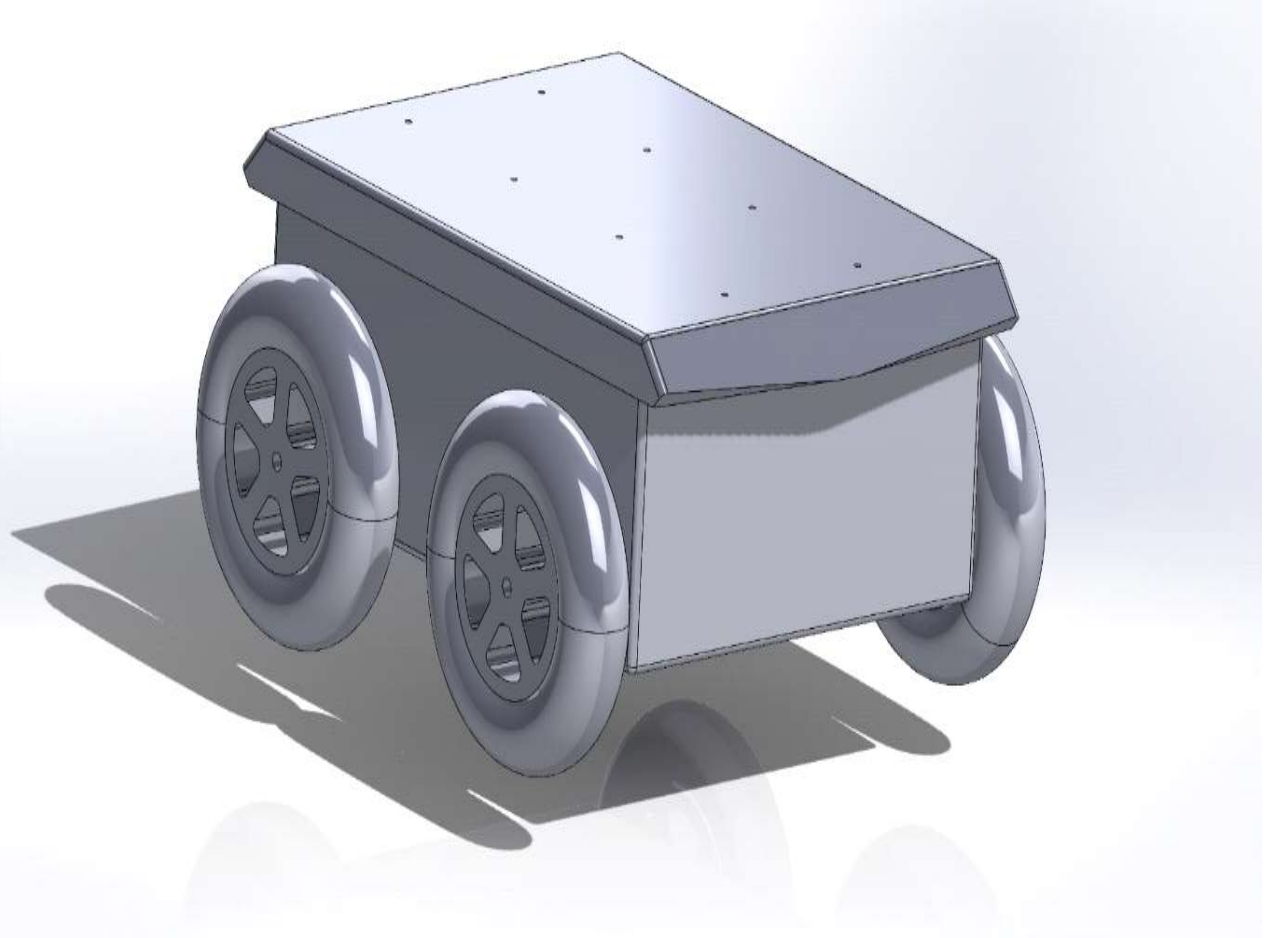
Tezde kullanılan Clearpath firmasının Jackal adlı robotu, üç boyutlu tasarım programında, gövde ve 4 adet tekerlek olacak şekilde 5 parçalı bir şekilde tasarlanmıştır. Gövde sabitlenerek tekerlekler, katalog ölçülerine birebir uyacak şekilde gövdeye montajlanmıştır. Bu montaj işlemi, dönme hareketli montaj ile yapılarak, robotun tekerleklerine dönme kabiliyeti kazandırılmıştır.



Şekil 2.2 Mobil Robotun SIMULINK Şeması

Solidworks ve Matlab yazılımlarının koordinat tanımları farklı olduğundan ötürü mobil robot, Matlab'e aktarıldığında, farklı koordinat eksenlerinde tanımlanmaktaydı. Bu sorunu ortadan kaldırmak adına, Matlab Simulink kutuphanesinde bulunan katı transformasyon blokları yardımıyla, robotun koordinat eksenini, Matlab'e uygun hale getirilmiştir. Mobil robotun blok diyagramı temel olarak, sistem özelliklerinin ve kabul edilmiş tanımların bulunduğu sistem blokları, gövdenin boyutlarının ve özelliklerinin bulunduğu gövde bloğu ve bu gövdeye bağlı 4 adet tekerlek bloklarından oluşmaktadır. Mobil robotun hareketinin görsel olarak görebilmek adına, robotun gövdesine Matlab Simulink bünyesindeki Simscape Multibody kütüphanesinde bulunan planar joint(düzlemsel eklem) bloğu eklenmiştir.

Bu blok, robot gövdesinin düzlemsel hareket yapmasına olanak sağlamaktadır. Tekerleklerin öncesine eklenmiş revolute joint(döner eklem) blokları ile de tekerleklerin kendi eksenini etrafında dönmesi sağlanmıştır. Düzlemsel eklem bloğu üzerinde girdi şeklinde görülen p_x , p_y ve q_z değerleri, bloğun düzlemsel hareketi yapabilmesi için gereken kuvvetleri simgelemektedir. p_x değeri x eksenindeki hızı, p_y değeri y eksenindeki hızı, q_z değeri ise robotun z eksenindeki dönme hareketini simgelemektedir. Mobil robota hareket, kontrol denklemleri sonucu belirlenen hız değerlerinin ilgili eksenlere bağlanması ile sağlanmıştır. Hareket esnasında oluşacak tork, yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.3 Mobil Robotun SOLIDWORKS Görüntüsü

2.2 Skid Steering Dönüş Sistemi

Mobil robotlarda kullanılan farklı çeşit ve amaçlara sahip dönüş sistemleri bulunmaktadır. Bunlar Ackermann, diferansiyel ve skid steering ve dönüş sistemleridir. Ackerman dönüş sistemlerinde, mobil robotun tahriğinin sağlandığı ön ya da arka tekerler, dönüş yönüne göre dönüş yaparlar. Diferansiyel sistemde ise robotun dönüş hareketi, robotun sol ve sağ tekerleklerinin farklı hızlarda dönmesi ile gerçekleşmektedir. Skid-steering dönme hareketi temelinde diferansiyel dönme hareketine benzemektedir, ancak iki teker takımı farklı yönlere doğru dönerek mobil robotun kendi ekseninde dönmesini de sağlayabilir. Bu dönme sistemi genel olarak küçük robotlarda ya da tank benzeri mobil robotlarda kullanılmaktadır.

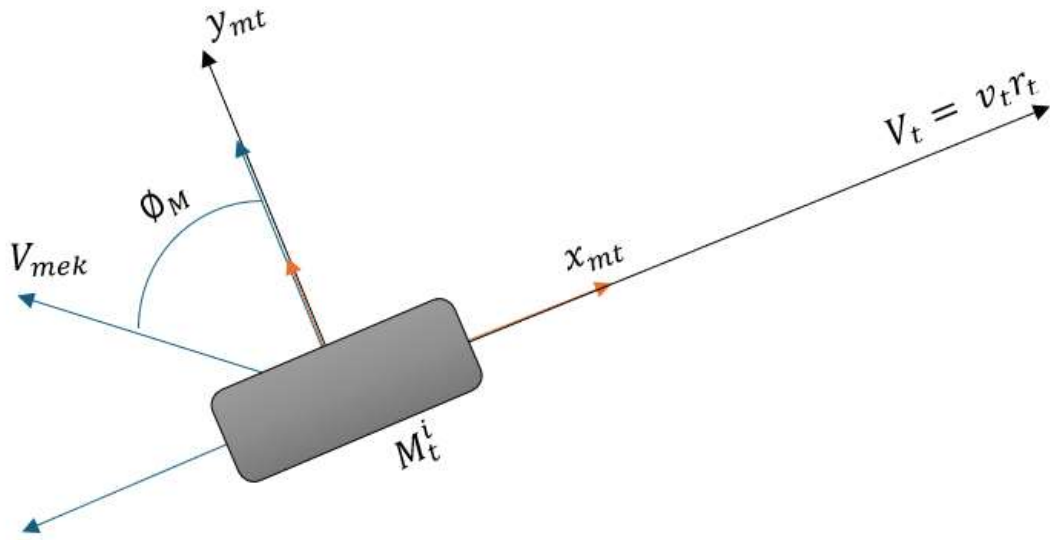
Bu tez çalışmasında, skid steering dönme hareketine sahip bir mobil robot kullanılmıştır. Skid steering, mobil robotlarda oldukça fazla kullanılan bir dönme yöntemidir[33]. Bu dönme sisteminin mobil robotlarda sıklıkla kullanılmasının temel sebebi, bu dönme sistemine sahip robotların, dönüş kabiliyetlerinin oldukça fazla olmasıdır[34], [35]. Bu dönme hareketine sahip mobil robotlarda, tekerlekli ve paletli robotlar benzer kabiliyetlere sahiptirler[36], [37]. Bu dönme hareketi sayesinde bu robotlar, zorlu engellerin bulunduğu ya da zorlu zemin şartlarına sahip bölgelerde görev yapabilmektedirler.

Skid steering dönme hareketinin dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan ilki, robotun kontrol girdileri ile tam bir kontrol sağlanamamasıdır[37]. Bu durumun sebebi, bu tip dönme hareketinde kaymalar gerçekleşmesidir. Oluşan bu kayma hareketinin düzgün hesaplanabilmesi adına derin öğrenme metodlarının kullanıldığı çalışmalar yapılmaktadır. Bu sebeple bu dönme hareketine sahip mobil robotlarda, sadece dönmenin kabul edildiği, kaymanın egale edildiği tam bir kontrol hareketi gerçekleştirilememektedir[37]. Bu dönme hareketinin bir diğer dezavantajı da enerji sarfiyatının yüksek olmasıdır. Ayrıca diğer dönme hareketlerine kıyasla bu tip mobil robotlarda, tekerleklerin dönme hareketine bağlı olarak daha çok aşındıkları görülmektedir[38].

2.3. Tekerleklerin Matematik Modeli

Mobil robot sistemi hazırlanırken tekerleklerin matematik modeli hazırlanmıştır. Bu matematik model hazırlanırken, literatürde daha önce de kullanılmış olan bazı tekerlek modellerinden yardım alınmıştır[39], [40], [41].

Yukarıdaki şekilde tekerleğin merkezini, tekerleğin x ve y eksenlerini, tekerleğin x ileri eksenindeki çizgisel hızını, tekerlek üzerindeki mekanum tekerin çizgisel hızını, değeri ise mekanum tekerleğin, mobil robotun tekerleklerinin eksenlerine göre olan açısını simgelemektedir



Şekil 2.4 Tekerleğe Etki Eden Kuvvetlerin Gösterimi

Yukarıdaki şekilde M_t tekerleğin merkezini, x_{mt} ve y_{mt} tekerleğin x ve y eksenlerindeki konumunu, V_t tekerleğin x ileri eksenindeki çizgisel hızını, V_{mek} tekerlek üzerindeki mekanum tekerin çizgisel hızını, ϕ_M değeri ise mekanum tekerleğin, mobil robotun tekerleklerinin eksenlerine göre olan açısını simgelemektedir.

Mobil robotun tekerleğinin x ileri eksenindeki hızı

$$V_T = w_T r_t \quad (2.1)$$

Şeklinde yazılabilir. Bu denklemler w_t mobil robotun tekerleğinin açısal hızını, r_t ise mobil robotun tekerleğinin yarıçapını simgelemektedir.

Mobil robotun tekerleğinin yanal hareket yapmasını sağlayan mekanum tekerleğinin hızı, V_{mek} ile gösterilmiştir. Mekanum tekerleğinin çizgisel hızı

$$V_{Mek} = w_{mek}r_{mek} \quad (2.2)$$

Şeklinde gösterilebilir. Bu denklemde w_{mek} mekanum tekerleğinin çizgisel hızını, r_{mek} ise mekanum tekerleğinin yarıçapını simgelemektedir.

Mobil robotlarda tekerlek kinematığının hesaplanması için mekanum tekerleğinin çizgisel hızının mobil robotun tekerleğinin eksenleri üzerindeki bileşenlerinin hesaplanması gerekmektedir. Mobil robotun tekerleği üzerindeki mekanum tekerleğinin çizgisel hızının, mobil robotun tekerleğinin eksenleri üzerindeki bileşenleri

$$V_{Mek}^x = w_{mek}r_{mek}\sin\phi_{mek} \quad (2.3)$$

$$V_{Mek}^y = w_{mek}r_{mek}\cos\phi_{mek} \quad (2.4)$$

Şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerdeki V_{Mek}^x mobil robotun tekerleği üzerindeki mekanum tekerleğinin hızının, mobil robotun tekerinin x eksenine göre bileşeni, V_{Mek}^y ise tekerlek üzerindeki mekanum tekerleğinin, tekerleğinin y eksenine üzerindeki bileşke hızıdır.

Bu denklemleri kullanarak kuvvetleri eşitlersek

$$y_{mt} = w_{mek}r_{mek}\cos\phi_{mek} \quad (2.5)$$

$$w_{mek}r_{mek} = \frac{y_{mt}}{\cos\phi_{mek}} \quad (2.6)$$

Şeklinde yazılabilir.

Mobil robotun tekerleğinin x eksenine düşen bileşke kuvvetler ise

$$x_{mt} = w_T r_t - w_{mek}r_{mek}\sin\phi_{mek} \quad (2.7)$$

Şeklinde yazılabilir. Bir önceki denklemde bulunan değerler bu denklemde yerine konulduğunda

$$x_{mt} = w_T r_t - y_{mt}\tan\phi_{mek} \quad (2.8)$$

Denklemleri elde edilir.

Bu denklemlerde yola çıkarak mobil robotun tekerleğinin açısal hızı olan w_T değeri

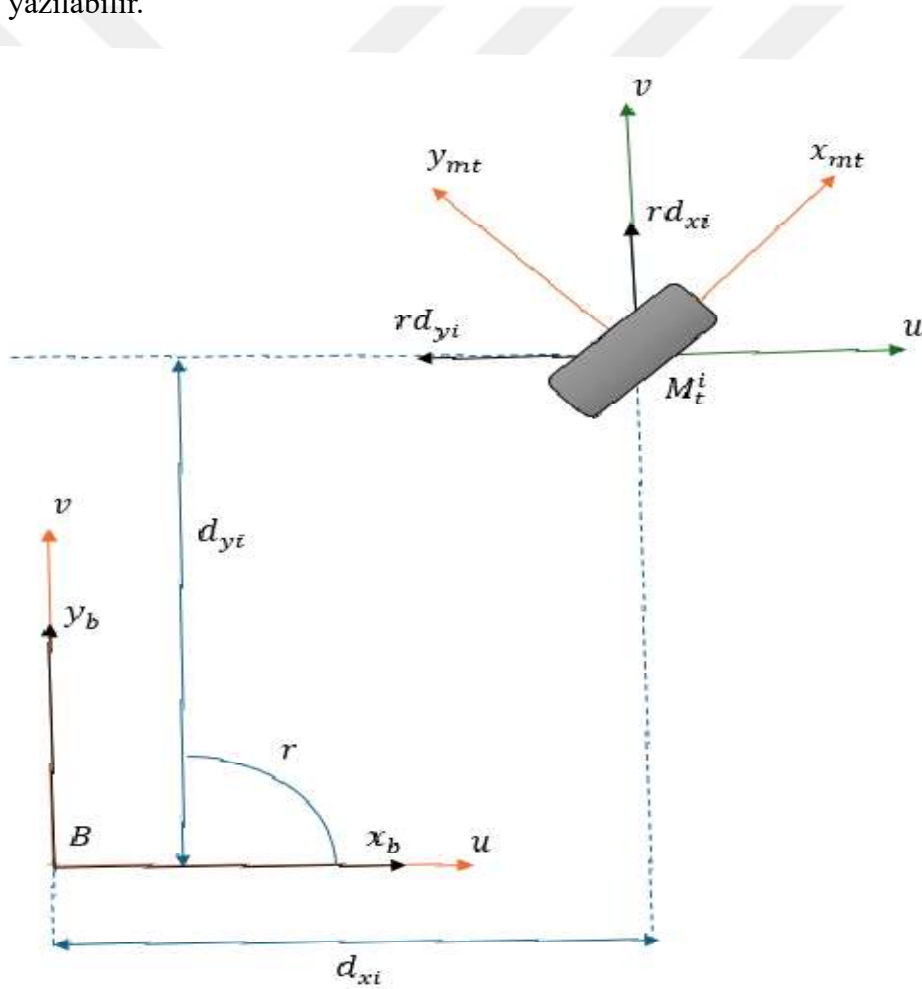
$$w_T = \frac{1}{r_t}(x_{mt} + y_{mt}\tan\phi_M) \quad (2.9)$$

Olarak bulunur.

Bu denklem matris formunda

$$w_t = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_t} & \frac{1}{r_t}\tan\phi_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{mt} \\ \dot{y}_{mt} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Şeklinde yazılabilir.



Şekil 2.5 Tekerlek ve Gövde Arasındaki Kuvvet Etkileşimlerinin Gösterimi

Mobil robotun ağırlık merkezi olan B noktasındaki açısal hızı olan r değerinin , tekerleğin ağırlık merkezi olan M_t üzerindeki izdüşümü x ve y eksenleri için sırasıyla rd_{xi} ve rd_{yi} şeklinde gösterilebilir.

Mobil robotun tekerleği üzerindeki hız matrisi

$$V_{M_t}^{M_t} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{mt} \\ \dot{y}_{mt} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Şeklinde gösterilebilir.

M_t eksenindeki hızların, B ekseninde gösterimi,

$${}^B V_{mt} = {}^B R(\phi_{Bi}) \begin{bmatrix} \dot{x}_{mt} \\ \dot{y}_{mt} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Şeklinde gösterilebilir. Bu denklemde R değeri rotasyon matrisini simgelemektedir.

x_b ve y_b eksenleri üzerindeki hız bileşenleri sırasıyla

$$x_b = \dot{x}_{mt} \cos \phi_{Bi} - \dot{y}_{mt} \sin \phi_{Bi} \quad (2.13)$$

$$y_b = \dot{x}_{mt} \sin \phi_{Bi} + \dot{y}_{mt} \cos \phi_{Bi} \quad (2.14)$$

Şeklinde yazılabilir. Bu denklem dikkate alındığında ${}^B V_{mt}$ değeri

$${}^B V_{mt} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{Bi} & -\sin \phi_{Bi} \\ \sin \phi_{Bi} & \cos \phi_{Bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{mt} \\ \dot{y}_{mt} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Şeklinde yazılabilir.

M_t noktasına üzerine düşen kuvvetler hesaplandığında

$$u - rd_{yi} = \dot{x}_{mt} \cos \phi_{Bi} - \dot{y}_{mt} \sin \phi_{Bi} \quad (2.16)$$

$$v + rd_{xi} = \dot{x}_{mt} \sin \phi_{Bi} + \dot{y}_{mt} \cos \phi_{Bi} \quad (2.17)$$

Denklemleri elde edilir.

Bu denklemlerde yola çıkılarak

$${}^B V_{mt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d_{yi} \\ 0 & 1 & d_{xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Elde edilir.

Tüm denklemler birleştirildiğinde mobil robotun tekerleklerinin açısal hızı w_{Ti} değeri

$$w_{Ti} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_t} & \frac{1}{r_t} \tan \phi_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_{Bi} & -\sin \phi_{Bi} \\ \sin \phi_{Bi} & \cos \phi_{Bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d_{yi} \\ 0 & 1 & d_{xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Şeklinde elde edilir. Bu tez çalışmasındaki mobil robotun tekerleklerinde herhangi bir mekanum sistem olmadığından ötürü $\phi_{Bi} = 0$ olacaktır. Bu değer denklemde yerine konulduğunda mobil robotun tekerleklerinin açısal hızı

$$w_{Ti} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_t} & \frac{1}{r_t} \tan \phi_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d_{yi} \\ 0 & 1 & d_{xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Denklemleri ile bulunabilir.

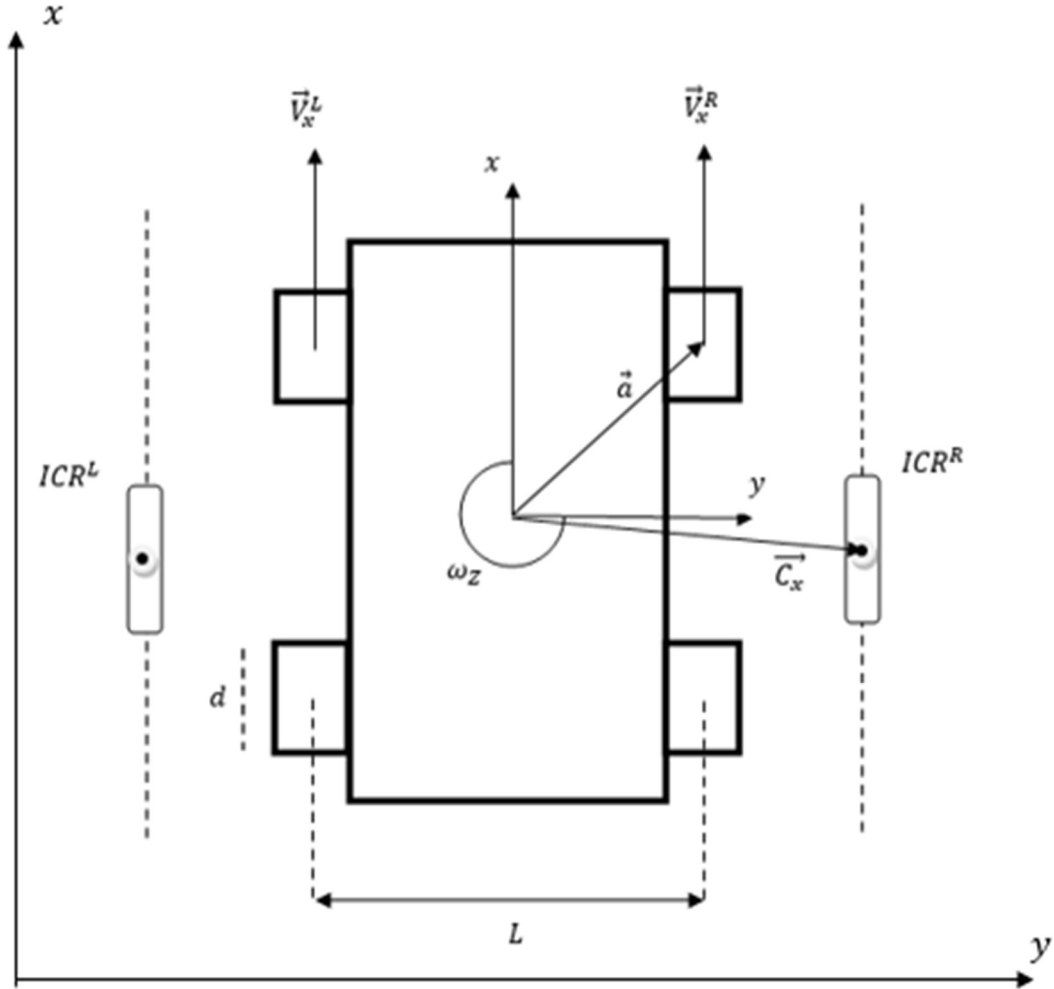
Tekerleklerin matematiksel modelinin belirlenmesi ile birlikte, robotun düzlemlerdeki hızları tespit edilebilmektedir. Simulink ile kontrol edilen robot, yazılımda tekerleklerin hareketini sağlayan *revolute* bloğuna verilen açısal hız ile hareket etmektedir. Tekerleklerin matematik modelleri dikkatli incelendiğinde, robotun tekerleklerine verilen açısal hızlar ile robotun düzlemlerdeki hızlarının kontrolünün sağlanabildiği görülecektir.

2.3 Kontrol

Mobil robotlarda kontrol temel olarak dinamik ve kinematik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kinematik kontrol, mobil robotun kontrolünün, robota bağlı tork ve kuvvetlerden bağımsız şekilde gerçekleştirilmesidir. Bu kontrol türü, ileri kinematik ve geri kinematik olarak ikiye ayrılmaktadır. Dinamik kontrol denklemlerinde ise, robotun kuvvet ve tork değerleri kullanılarak robotun kontrolü sağlanmaktadır. Dinamik denklemler, robotun ağırlığı ve ivmesine de bağlıdır. Özellikle dinamik kontrol denklemlerinde, mobil robot sisteminde dönüş esnasında oluşacak olan kayma hareketinin hesaplanması çok önemlidir.

Mobil robotların kontrolü esnasında, ölçülen değerler ile gerçek zamanlı değerler arasında farklılıkları görülebilmektedir. Bu farklılıkların temel sebepleri olarak kontrol denklemlerindeki belirsizlikler, ölçüm aygıtlarından kaynaklanan gürültü ölçümleri ve ölçüm aygıtlarının çevresel şartlardan etkilenmesi ve mekanik sistemde ölçülemeyecek kadar küçük olan ya da belirli kabuller ile hesaplamaları sağlanan mekanik sınırlamalar örnek gösterilebilir[42]. Literatürde yapılan bir çalışmada, bu gibi sorunların çözülmesi adına günümüzde kontrol esnasında kontrol girdilerinin sürekli güncellenmesi gerekliliğinde bahsedilmiş ve bu durumun robotun güç tüketimini arttırdığı belirtilmiştir. Bu sorunları çözmek adına, olay-tetikli dinamik kontrol yaklaşımı altında bir model öne sürülmüştür[42]. Sürü formasyonlu çalışan robotlar üzerinde yapılan bir çalışmada, bahsi geçen sorunlara çözüm olarak, tekerleklerin aks mesafesinin ve robotun ağırlık merkezinin çakışmadığı mobil robotlar için dinamik yüzey kontrolü adı verilen bir yöntem öne sürülmüştür[43]. Literatürde yapılan başka bir çalışmada ise, holonomic olmayan tekerlekli mobil robotlar için, uyarlanabilir kayma modu dinamik kontrolörü altında bir sistem geliştirilerek bu sorunlar giderilmeye çalışılmıştır[44].

Mobil robotun kontrolü için ilk aşamada robotun serbest cisim diyagramı çizilmiştir. Bu diyagram üzerinde, robota etki eden kuvvetler belirlenmiş, tekerlekler ve robot gövdesi üzerindeki hızların tanımları yapılmış ve robotun dönme eksenini belirlenmiştir. Robotun ağırlık merkezi, robotun gövdesinin merkezinde kabul edilmiştir.



Şekil 2.6 Mobil Robot Sisteminin Serbest Cisim Diyagramı

Serbest cisim diyagramında \vec{V}_x^L ve \vec{V}_x^R değerleri sırasıyla robotun X ileri eksenindeki sol ve sağ tekerleklerinin hız vektörlerini, ω_z Srobotun düşey eksen olan Z eksenindeki açısal hızını, ICR^R ve ICR^L sırasıyla mobil robotun sağ ve sol tekerleklerinin dönme eksenlerini, \vec{a} mobil robotun tekerleklerinin, mobil robotun ağırlık merkezine göre pozisyonunun koordinat vektörünü, \vec{C}_x mobil robotun ağırlık merkezinin dönme eksenine göre olan vektörünü, L mobil robotun sol ve sağ tekerlekleri arasındaki uzunluğu, d ise mobil robotun tekerlek çapını göstermektedir.

Kontrol denklemleri hesaplanırken, kinematik kontrol denklemleri kullanılmıştır. Kinematik denklemlerde temel değişkenler olarak hız ve konum kullanılmaktadır. Öncelikli olarak, robotun serbest cisim diyagramı kullanılarak hızları belirlenmiş ve tanımları yapılmıştır.

Mobil robot, tez çalışmasında düzlemsel bir hareket yapmaktadır. Bu sebeple mobil robotun hız denklemi

$$v = [v_x \quad v_y \quad 0]^T \quad (2.21)$$

Şeklinde gösterilebilir. Bu denklemde v_x değeri, mobil robotun ağırlık merkezinde bulunan koordinat düzlemi üzerinde X eksenindeki çizgisel hızı, v_y değeri ise mobil robotun ağırlık merkezinde bulunan koordinat düzleminde üzerinde Y eksenindeki çizgisel hızı ifade etmektedir.

Mobil robotun dönme hareketi ise

$$\omega = [0 \quad 0 \quad \omega]^T \quad (2.22)$$

Matrisi ile gösterilebilir. Burada ω değeri, robotun açısal hızını göstermektedir.

Mobil robotun, bulunduğu konumu gösteren denklem ise

$$q = [X \quad Y \quad \theta]^T \quad (2.23)$$

Matrisi ile gösterilebilir. Bu matriste X değeri robotun X eksenindeki konumunu, Y değeri Y eksenindeki konumunu ve θ değeri ise robotun Z düşey eksenindeki açısal oryantasyonunu ifade etmektedir.

Bu denklemlerden yola çıkılarak mobil robotun hızı, konum değerlerinin türevi olacak şekilde

$$\dot{q} = [\dot{X} \quad \dot{Y} \quad \dot{\theta}]^T \quad (2.24)$$

Şeklinde ifade edilebilir.

Konum ve hız denklemleri kullanılarak, mobil robotun kinematik hız denklemi

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Matrisi ile ifade edilebilir. Bu matristeki \dot{X} değeri mobil robotun genel koordinat düzlemi üzerindeki X eksenindeki hız değerini, \dot{Y} değeri ise mobil robotun genel koordinat düzlemi üzerindeki Y eksenindeki hız değerini ifade etmektedir.

Ayrıca mobil robotun X ileri eksenindeki hızı, mobil robotun tekerlerinin açısal dönüş hızına ve tekerleklerin yarı çapına bağlıdır. Mobil robotun bir tekerleğinin X ileri eksenindeki hızı, bu değişkenler kullanılarak

$$V_T = \omega_T r_T \quad (2.26)$$

Denklemleri ile hesaplanabilir. Bu denklemlerde V_T mobil robotun bir tekerleğinin X ekseninde sahip olduğu doğrusal hızı, ω_T mobil robotun motoru tarafından sağlanan tahrik ile tekerleğin, kendi ekseninde sahip olduğu açısal hızı, r_T ise mobil robotun bir tekerleğinin yarıçapını simgelemektedir.

Mobil robotun bir tekerleğinin X eksenindeki ileri yöndeki hızı hesaplandıktan sonra, iki teker takımı için de bu denklemler kullanılarak, robotun X eksenindeki hızı

$$V_x = \frac{v_x^R + v_x^L}{2} \quad (2.27)$$

Şeklinde de hesaplanabilir.

Robotun açısal hızı, robotun X eksenindeki hızı hesaplandıktan sonra

$$\omega = \frac{(V_R - V_L)}{L} \quad (2.28)$$

Denklemleri ile hesaplanabilir. Denklemlerde görülen V_R ve V_L değerleri sırasıyla robotun sağ ve sol teker takımının çizgisel hızlarını, L değeri ise robot gövdesinin uzunluğunu göstermektedir.

Yukarıda bahsedilen hız denklemlerinden yola çıkılarak, robotun eksenlerdeki konumları hesaplanmıştır. Robotun X eksenindeki konumu

$$P_x = \int V_x \cdot \cos\theta \quad (2.29)$$

2.4 Güç Tüketim Algoritması

Mobil robotlarda güç tüketimi, aşılması gereken temel sorunlardan biridir. Bu sebeple, literatürde mobil robotlardaki güç tüketimini optimal hale getirmek adına çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, literatürde daha önce çalışması yapılmış basitleştirilmiş güç tüketim algoritması kullanılmıştır[45], [46].

Tez çalışmasında mobil robot düzlemsel hareket yapmaktadır. Bu sebeple kullanılan güç tüketim algoritmasında yer çekimi ivmesi kullanılmamıştır. Güç tüketiminde temel olarak iki denklem kullanılmıştır. Bu denklemlerden ilki, mobil robotun dönüş hareketi esnasında oluşacak kayma hareketi sonucu oluşan güç kayıplarını, ikincisi ise robotun hareketi esnasında motorda oluşan harekete karşı dirençler sonucundaki güç kayıplarınıdır.

Skid-steering mobil robotlarda, dönüş hareketi iki teker takımı arasındaki hız farkı ile gerçekleşmektedir. Bu hız farkı sonucundaki dönme hareketi esnasında, tekerler ve yüzey arasında bir kayma hareketi gerçekleşmektedir. Bu kayma hareketi sonucunda güç kaybı yaşanmaktadır.

Tekerlek ile yüzey arasında oluşan bu kayma hareketi, yüzeyin sürtünme katsayısı ile doğru orantılı olarak gerçekleşir. Asfalt ya da beton gibi sert ve pürüzlü yüzeylerde sürtünme katsayısı fazla olduğundan ötürü, dönme hareketi esnasındaki kayma hareketi sonucu oluşan güç kaybı fazla olacaktır.

Kayma esnasında oluşan güç kaybı, robotun kendi ağırlığı ile de doğru orantılı olarak gerçekleşir. Robotun ağırlığı ne kadar fazla ise, robotun tekerlerinin yüzeye uygulayacağı basınç da o kadar fazla olacaktır, bu da mobil robotun kayma esnasındaki güç kaybını arttıracak unsurlardan biridir.

Robotun kayma esnasındaki güç kaybı, aşağıdaki gibi formülize edilebilir.

$$\tilde{P}_s = \mu |\omega| \sum_{a^{r,l}} (p(a^{r,l}) \|\vec{a}^{r,l} - \vec{C}^{r,l}\|) \quad (2.32)$$

Bu formülde görülen μ değeri sürtünme katsayısını, $a^{r,l}$ değeri sırasıyla sağ ve sol tekerleklerin zemine temas ettikleri yüzeyleri, $\vec{a}^{r,l}$ değeri sırasıyla sağ ve sol tekerleklerin temas yüzeylerinin robotun ağırlık merkezinden geçen yerel düzleme göre olan konum vektörünü, $p(a)$ ise, tekerleklerin zemine uyguladıkları basıncı, $\vec{C}^{r,l}$ vektörü ise sırasıyla

mobil robotun sağ ve sol teker takımlarının mobil robotun dönüş noktası kabul edilen noktaya göre olan konum vektörünü ifade etmektedir.

Hesaplamalar yapılırken, mobil robotun ağırlık merkezi, robotun kuş bakışı görüntüsüne göre mobil robotun tam orta noktasında kabul edilmiştir. Bu sebeple mobil robotun tekerleklerinin yüzeye temasındaki basıncı ifade eden $p(a)$ değeri, tüm tekerleklerde eşit kabul edilmiştir.

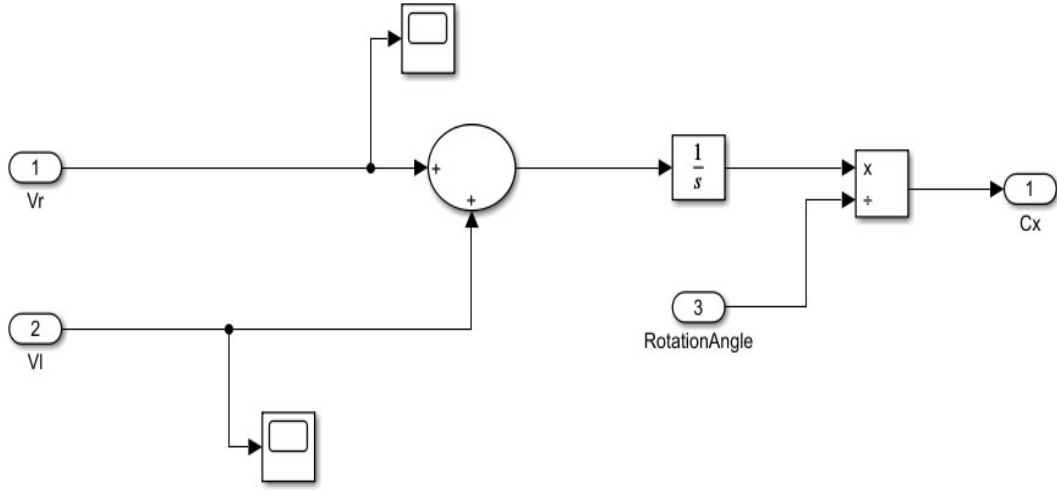
Formülde görülen $\vec{C}^{r,l}$ vektörü mobil robotun teker takımlarının dönme noktasına göre olan konum vektörünü ifade etmektedir. Çoğu durumda mobil robotun dönme eksenini, iki teker takımı için de aynı olur. Bu sebeple değeri $\vec{C}_Y = 0$ şeklinde yazılabilir. Mobil robot, X ileri ekseninde herhangi bir dönme hareketi yapmadığında $\vec{C}_Y = 0$ olarak kabul edilebilir.

Yukarıda verilen bilgilere göre \vec{C}_x değeri

$$\vec{C}_x = \int \frac{V_x dt}{Q_z} \quad (2.33)$$

Şeklinde formülize edilebilir. Bu formüldeki V_x değeri robotun X eksenindeki hızını, Q_z değeri ise robotun dönme hareketi esnasındaki dönüş açısını göstermektedir.

Tüm formüller belirlendikten sonra \vec{C}_x değeri Simulink yazılımında blok diyagramı şekline getirilmiştir. Bu blok diyagram serisinden elde edilen \vec{C}_x değerinin çıktısı, kayma esnasında tüketilen gücün hesaplamasının yapıldığı blok sistemine girdi olarak bağlanmıştır.

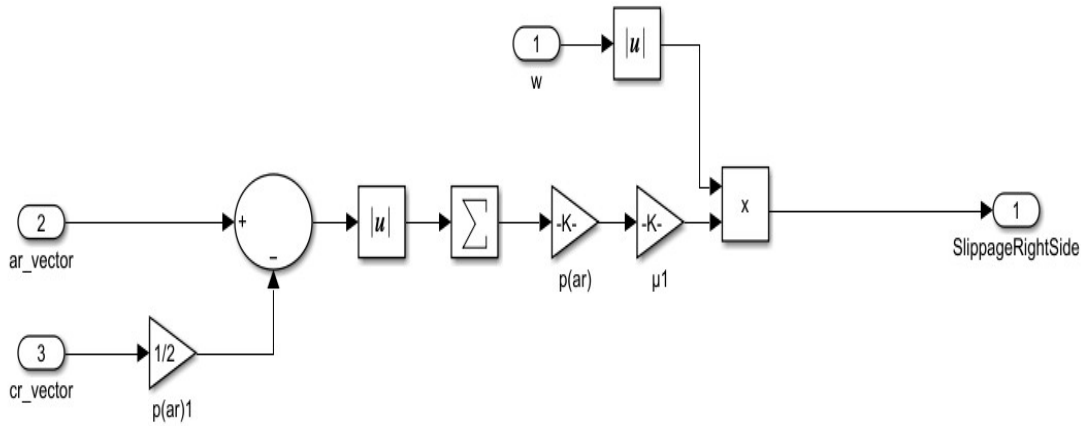


Şekil 2.8 \vec{C}_x Değerinin Blok Diyagramı Şeklinde Gösterimi

Mobil robotun dönüşü esnasında, mobil robotun ağırlık merkezinde bulunan koordinat sisteminin, mobil robotun dönme noktası ile olan dönüş vektörünü ifade eden \vec{C}_x değeri hesaplandıktan sonra, $p(a)$ değeri belirlenmiştir. Bu değer daha önce de bahsedildiği gibi, mobil robotun ağırlık merkezi tam ortada olacak şekilde kabul edilerek, mobil robotun ağırlığının 4 tekere de eşit şekilde dağıtılması ile hesaplanmıştır. \vec{a} değeri mobil robotun tekerleklerinin, mobil robotun ağırlık merkezine göre olan konum vektörü olup, kontrol bölümünde verilen denklemler yardımıyla hesaplanmıştır.

Tüm formüller belirlendikten sonra, kayma sonucu oluşan güç kaybını gösteren \tilde{P}_s değeri Simulink yazılımında blok diyagramı haline getirilmiştir. Blok diyagramı haline getirilirken yukarıda bahsedilen tüm değerler girdi olarak blok diyagramı sistemine tanımlanmıştır.

Kayma hareketi sadece mobil robotun dönüş hareketi yaptığı zamanlarda oluşacaktır. Bu sebeple, mobil robotun herhangi bir dönüş hareketi yapmadığı durumlarda, formülde bulunan ω değeri sıfır olacağı için, bu formül sonucunda sıfır değeri bulunacaktır.



Şekil 2.9 Kayma Esnasında Oluşan Güç Kaybı Formülünün Blok Diyagramı

Kayma esnasındaki güç kaybı hesaplandıktan sonra, robotun hareketi esnasında motor ve diğer sistemlerde oluşan güç kayıpları hesaplanmalıdır. Bu güç kayıplarına, motor milleri, transmisyon sistemi ve dişlilerdeki güç kayıpları gibi motor içi kayıplar ve tekerleklerin hareket esnasındaki deformasyonları örnek gösterilebilir. Ayrıca toprak zeminde yapılacak bir harekette, üzerindeki tekerleklerin hareketi sonucunda toprak zeminde oluşacak kayma hareketi de güç kaybını arttıracak bir değişken olarak kabul edilebilir.

Yukarıda bahsedilen değişkenler dikkate alındığında diğer sistemlerde ve diğer değişkenler aracılığıyla oluşan güç kayıpları

$$\tilde{P}_R = K(|V_X^R + V_X^L|) \quad (2.34)$$

Şeklinde gösterilebilir. Bu formüldeki V_X^R ve V_X^L değerleri sırasıyla sol ve sağ tekerleklerin mobil robotun ağırlık merkezinden geçen koordinat düzlemindeki X ileri eksenindeki çizgisel hızlarını, K değeri ise yukarıda bahsedilen kayıpları hesaplayabilmek için kullanılan oransal çekiş direnci sabitini göstermektedir.

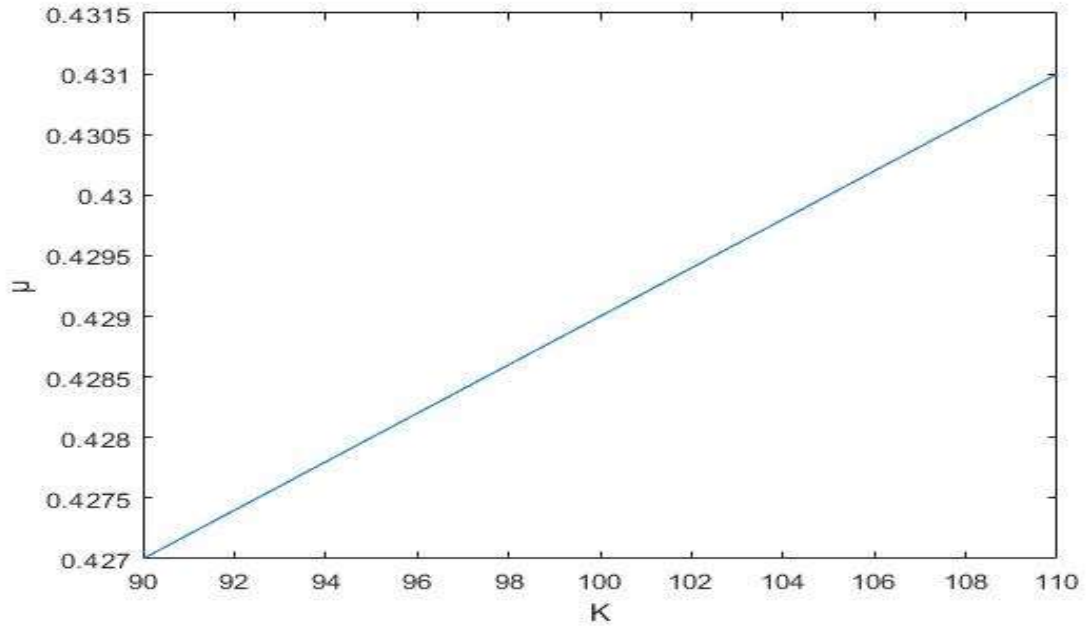
K ile bahsedilen oransal çekiş direnci sabiti, tezde baz alınan çalışmada, laboratuvar ortamında gerçek zamanlı yapılan bir test ile bulunmuştur. Literatürdeki çalışma incelendiğinde K değerinin biriminin N olduğu ve oransal bir sabit olduğu görülmektedir.

Bahsi geçen çalışmada, K değeri ve sürtünme katsayısını gösteren μ değeri, laboratuvar ortamında, belirli senaryolarda ve mermer ve beton olmaz üzere iki farklı zeminde yapılan gerçek zamanlı ölçümler ile bulunmuştur. Mobil robota belirli senaryolar tanımlanmış, bu senaryolar esnasında mobil robottaki güç tüketim değerleri sensörler yardımıyla ölçülmüştür. Bu ölçümler esnasında belirli veriler elde edilmiş ve sonrasında bu veriler belirli yakınsama metodları kullanılarak belirtilen değerlere ulaşılmıştır. Ancak bu tez yazılırken, bu şekilde bir gerçek zamanlı test ortamı oluşturma imkanı olmamıştır. Bu sebeple, literatür çalışmasında verilen değerler üzerinden bir korelasyon kurularak, tez çalışmasında kullanılan mobil robotun ağırlığına ve mekanik yapısına en uygun K ve μ değerleri bulunmaya çalışılmıştır.

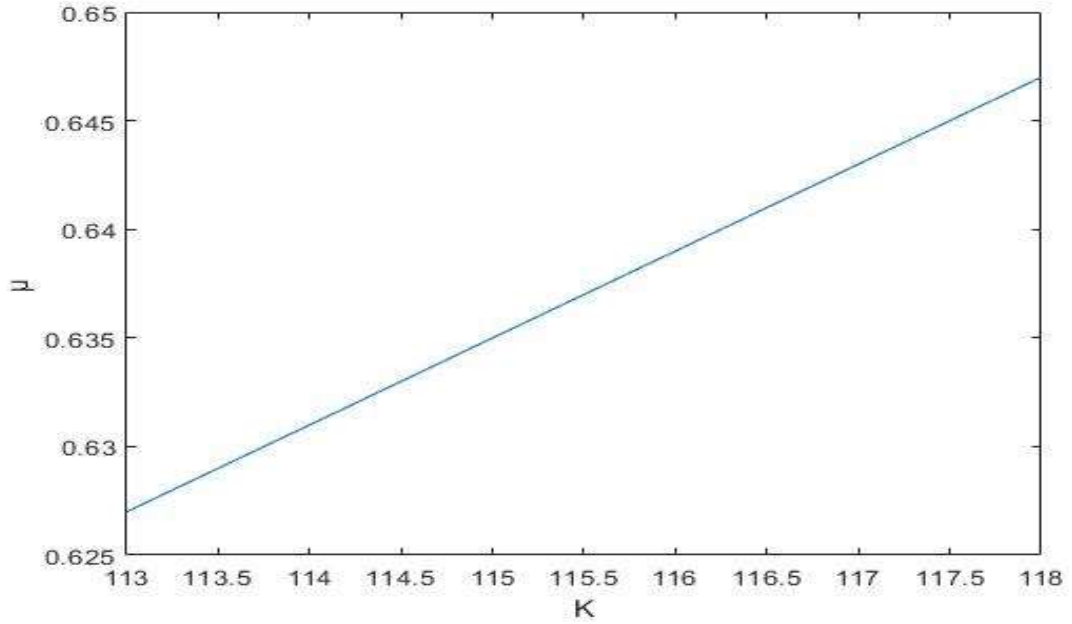
Tablo 2.2 Akademik Çalışmada Deney Sonucu Bulunan K ve μ Değerleri

K - μ	Yüklü Mobil Robot	Yüksüz Mobil Robot
Mermer Zemin	110N-0.431	90N-0.427
Beton Zemin	118N-0.647	113N-0.627

Tablo 2.2 deki değerler kullanılarak, bu yüksek lisans tezinde kullanılan Clearpath Jackal adlı robot için, K ve μ değerleri, literatür çalışmasında kullanılan mobil robotun ağırlığı ve bu yüksek lisans çalışmasında kullanılan Jackal adlı robotun ağırlığı arasında bir korelasyon kurularak hesaplanmıştır.



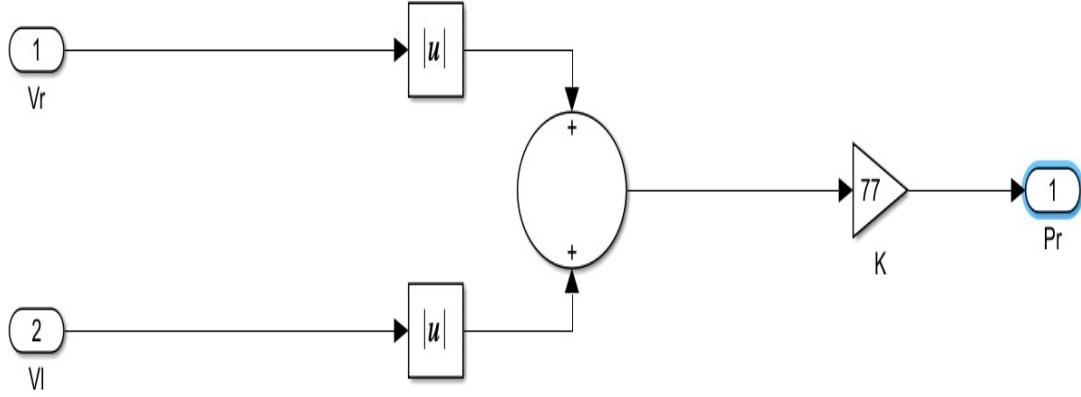
Şekil 2.10 Mermer Zeminde K ve μ Değerlerinin Hesaplanması İçin Kullanılan Korelasyon Doğrusu



Şekil 2.11 Beton Zeminde K ve μ Değerlerinin Hesaplanması İçin Kullanılan Korelasyon Doğrusu

Şekil 2.20 ve Şekil 2.11 de görülen korelasyon doğrularında oluşan eğim ve bu yüksek lisans tez çalışmasında kullanılan Jackal ve literatür çalışmasında kullanılan mobil robot arasındaki ağırlık farkı dikkate alınarak bir korelasyon kurulmuş ve K ve μ değerleri için yaklaşık değerler hesaplanmıştır.

K değeri hesaplandıktan sonra,, Simulink yazılımı ile blok diyagramı haline getirilmiştir.



Şekil 2.12 Motorda Harcanan Güç Tüketimini Gösteren Formülün Blok Diyagramı Şeklinde Gösterimi

3. SENARYOLAR

Bu bölümde, mobil robotun hareketinin sağlandığı senaryolardan bahsedilecektir. Bu senaryolar, mobil robotun teknik değerlerindeki maksimum hızında dönme hareketi olmadan belirli bir süre ile ivmesiz hareket edeceği Senaryo1, mobil robotun dönme hareketi olmadan ivmeli bir şekilde hareket edeceği Senaryo2, mobil robotun dönme dönme hareketi yaparken ivmeli bir şekilde hareket edeceği Senaryo3 ve mobil robotun dönme hareketi yaparken iki farklı taker takımının iki farklı ivmede hareket edeceği Senaryo4 şeklinde belirlenmiştir.

Bu senaryolarda kullanılacak sürtünme katsayısı ve oransal itiş direnç sabiti(K) değerleri, daha önce de bahsedildiği üzere korelasyon yöntemi ile hesaplanarak bulunmuştur.

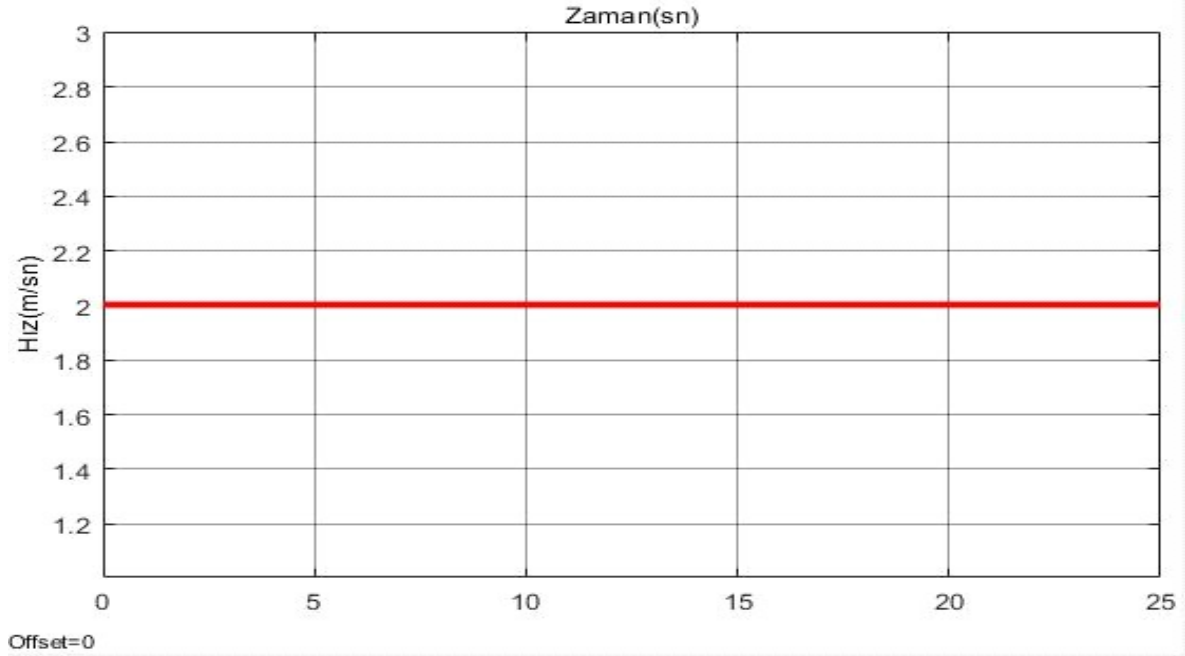
3.1 Senaryo1

Bu senaryoda mobil robot, dönme hareketi olmadan ivmesiz bir şekilde, maksimum hızda hareket etmektedir. Bu senaryoda mobil robot herhangi bir dönme hareketi yapmayacaktır. Bu senaryo için kullanılan parametreler tabloda belirtilmiştir.

Tablo 3.1 Senaryo1 İçin Kullanılan Parametreler

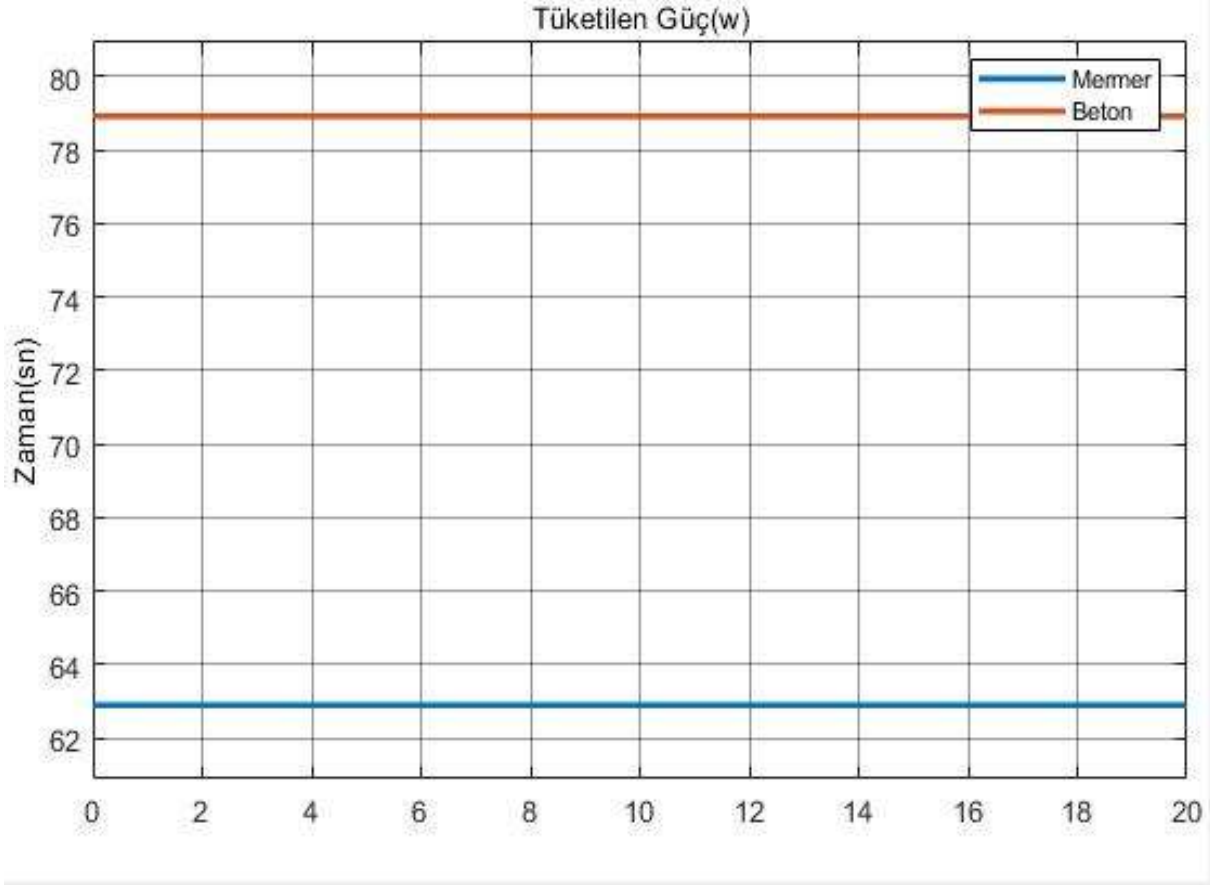
Parametreler/Zemin Türleri	Mermer	Beton
Hız	2m/sn	2m/sn
K	15.4N	19.7N
μ	0.404	0.567
Senaryo Süresi	25sn	25sn

Tablo 3.1’de gösterilen parametreler uygulandığında Senaryo 1 için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir



Şekil 3.1 Senaryo1 Esnasında Mobil Robotun Hız Grafiği

Şekil 3.1’de de görülebileceği üzere mobil robot Senaryo1’de, 25 saniye boyunca ivmesiz bir hareket yapmıştır. Bu ivmesiz hareket sonucunda mobil robotun hızında senaryo boyunca herhangi bir değişiklik olmamış ve mobil robotun hızı, mobil robotun teknik verilerinde de bahsedilen maksimum hızı olan 2 m/sn de sabit kalmıştır.



Şekil 3.2 Senaryo1’de Mermer ve Beton Zeminlerde Mobil Robottaki Güç Tüketimi

Şekil 3.2’ de görülebileceği üzere, mobil robot Senaryo1 esnasında mermer zemin üzerindeki hareketinde yaklaşık 63W güç harcamıştır. Mobil robotun mermer zemindeki güç tüketim grafiğinin de hız grafiği gibi lineer bir şekilde ilerlediği gözlemlenmiştir.

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere mobil robot Senaryo1 esnasında, mermer zemin üzerinde, yaklaşık olarak 77.8 W güç tüketimi yapmıştır.

Senaryo 1 incelendiğinde, mobil robot tarafından harcanan güç grafiğinin, mobil robotun hız grafiği ile benzer şekilde lineer durumda olduğu gözlenmiştir. Bu senaryo esnasında mobil robot dönme hareketi yapmamıştır. Bu sebeple mobil robotta kayma hareketi de

olmadığından ötürü, tüketilen güçleri gösteren bu grafikler sadece \tilde{P}_R değerini ifade eden formül ile hesaplanmıştır. Kayma hareketinde harcanan gücü veren \tilde{P}_S formülü bu senaryo esnasında 0 değerini vermiştir.

Senaryo esnasında kullanılan \tilde{P}_R değeri, mobil robotun sağ ve sol taker takımları ile orantılı olduğu için, hızın senaryo boyunca sabit kaldığı bu durumda \tilde{P}_R değeri de hız grafiği gibi sabit bir şekilde kalmıştır.

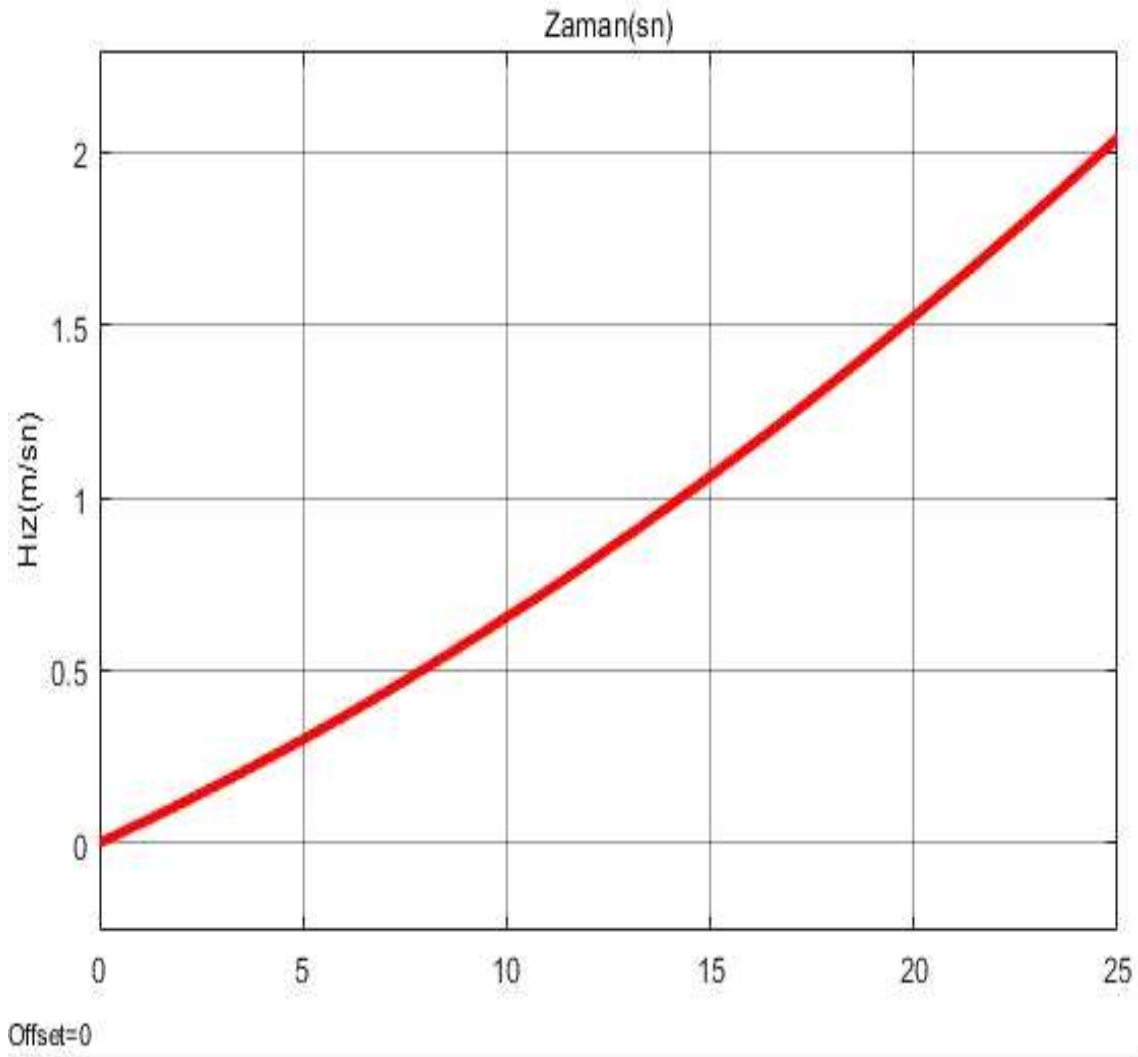
3.2 Senaryo2

Bu senaryoda mobil robot düz bir şekilde hareket edecek ve pozitif ivmeli bir hareket yapacaktır. Mobil robot bu senaryoda dönme hareketi yapmayacaktır. Dönme hareketi olmayacağından ötürü kayma hareketi de olmayacak ve senaryo sonunda \tilde{P}_S değerinin sıfır çıkması beklenmektedir.

Tablo 3.2 Senaryo2 İçin Kullanılan Parametreler

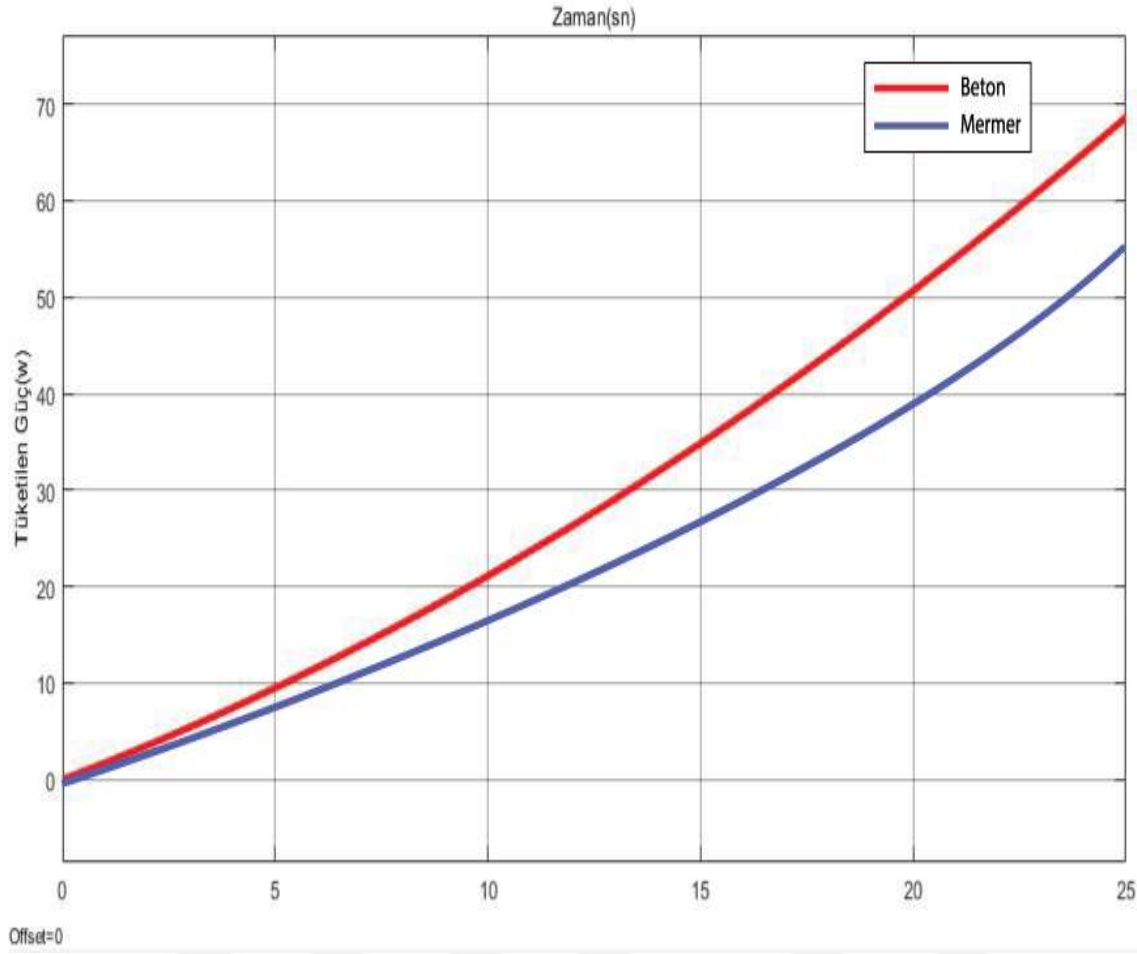
Parametreler/Zemin Türü	Mermer	Beton
Başlangıç Hızı	0m/sn	0m/sn
K	15.4N	19.7N
μ	0.404	0.567
Senaryo Süresi	25sn	25sn

Bu senaryoda temel amaç, mobil robotun ivmeli hareketi sonucu motorlarında harcanan güç tüketimi grafiği ile mobil robotun hız grafiği arasındaki korelasyonu incelemektir. Temel olarak mobil robotun motorlarında harcanan güç tüketimi, mobil robotun sağ ve sol taker takımlarının hızları ile orantılı bir şekilde değişiklik gösterdiği için, mobil robotun senaryo sonucunda motorlarında harcanan güç tüketimi ve mobil robotun sağ ve sol taker takımlarının hızlarını gösteren grafiğin benzer bir hareket yapması beklenmektedir.



Şekil 3.3 Senaryo2 Esnasında Mobil Robotun Hız Grafiği

Şekil 3.3'de de görüldüğü üzere mobil robot, belirlenen ivme değeri ile birlikte durağan durumdan, mobil robotun tektik verilerinde belirtilen maksimum hızı olan 2m/sn'ye kadar hareket gerçekleştirmiştir. Bu ivme sonucunda mobil robotun hız grafiğinde parabolik bir artış gözlemlenmektedir.



Şekil 3.4 Senaryo2 Esnasında Mermer ve Beton Zeminlerde Mobil Robottaki Güç Tüketimi

Şekil 3.4 incelendiğinde, mobil robotun mermer zemin esnasındaki hareketinde harcanılan güç miktarının, hız grafiğine benzer bir şekilde parabolik olarak artık gösterdiği belirlenmiştir. Maksimum hızına ulaştığında mobil robot mermer zemin üzerinde yaklaşık olarak 64W güç harcamaktadır.

Şekil 3.4 incelendiğinde, mobil robotun mermer zemin esnasındaki hareketinde harcanılan güç miktarının, hız ve mermer zemin grafiklerine benzer şekilde parabolik olarak artık gösterdiği belirlenmiştir. Maksimum hızına ulaştığında mobil robot beton zemin üzerinde yaklaşık olarak 80W güç harcamaktadır.

Senaryo2 esnasında mobil robot, durağan durumdan, belirli bir ivme ile hareketine başlamıştır. Mobil robotun hızı ve ivmesi Senaryo2 boyunca artmaya devam etmiştir. Bu senaryo esnasında mobil robot herhangi bir dönüş hareketinde bulunmamış, dolayısıyla senaryo esnasında kayma hareketi olmamıştır. Senaryo esnasında kayma hareketi

olmadığı için ölçülen tüm güç değerleri sadece \tilde{P}_R formülü ile elde edilmiştir. Kayma hareketi sonucu harcanan gücü ifade eden \tilde{P}_S formülü 0 değerini vermiştir.

3.3 Senaryo3

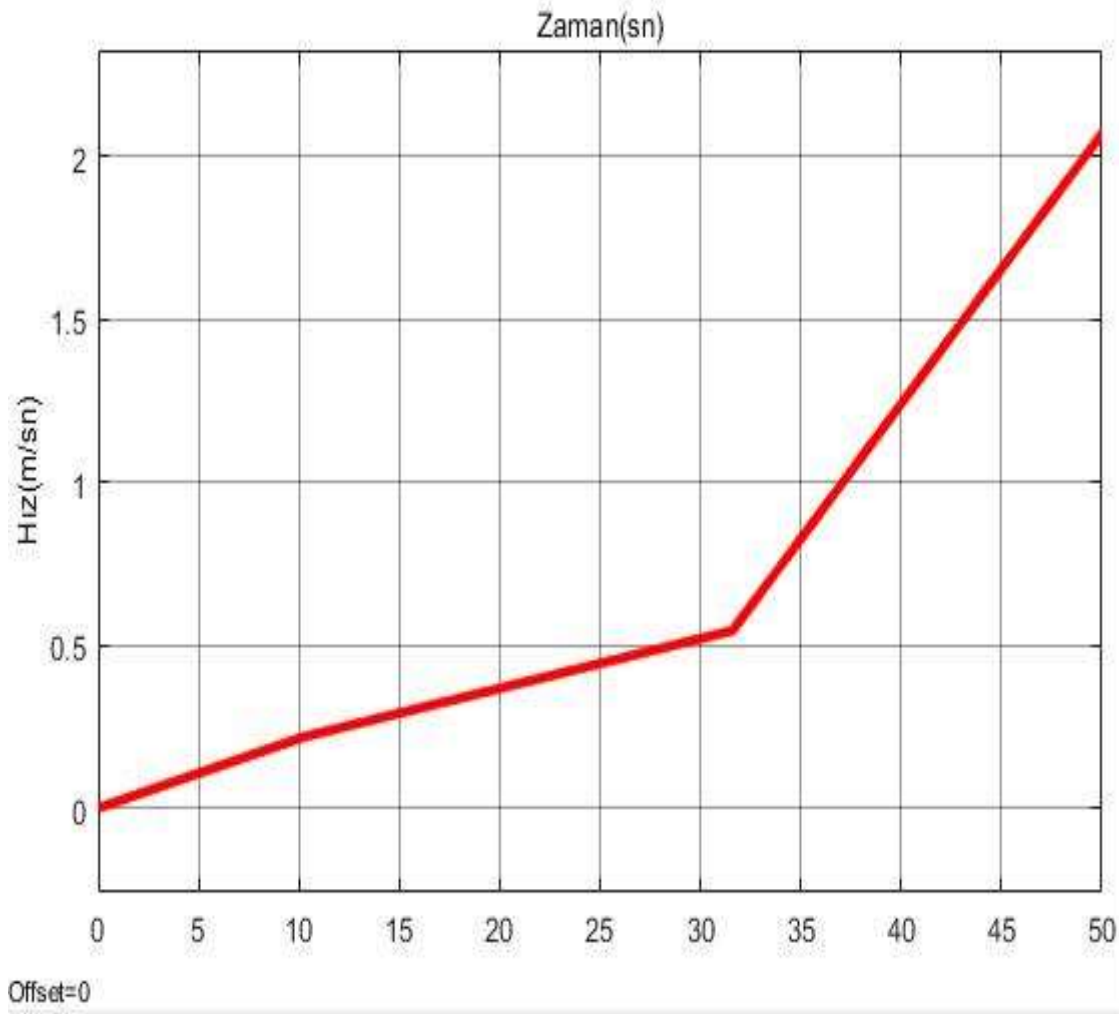
Bu senaryoda mobil robot belirli bir ivme ile dönme hareketi yapacaktır. Bu dönme hareketi mobil robotun sağ ve sol teker takımları arasındaki hız farkı ile gerçekleştirilecektir. Daha önceki senaryolarda herhangi bir dönme hareketi olmadığı için, kayma hareketi olmamıştır. Bu senaryoda ise dönme hareketi esnasında kayma hareketi de yaşanacağı için, kayma esnasındaki güç kayıpları da gözlenebilecektir. Bu senaryoda mobil robot durağan bir şekilde hareketine başlayacaktır. İki teker takımı arasında ivmeler farklılık göstermektedir.

Senaryoda kullanılacak olan parametreler tabloda belirtilmiştir

Tablo 3.3 Senaryo3 İçin Kullanılan Parametreler

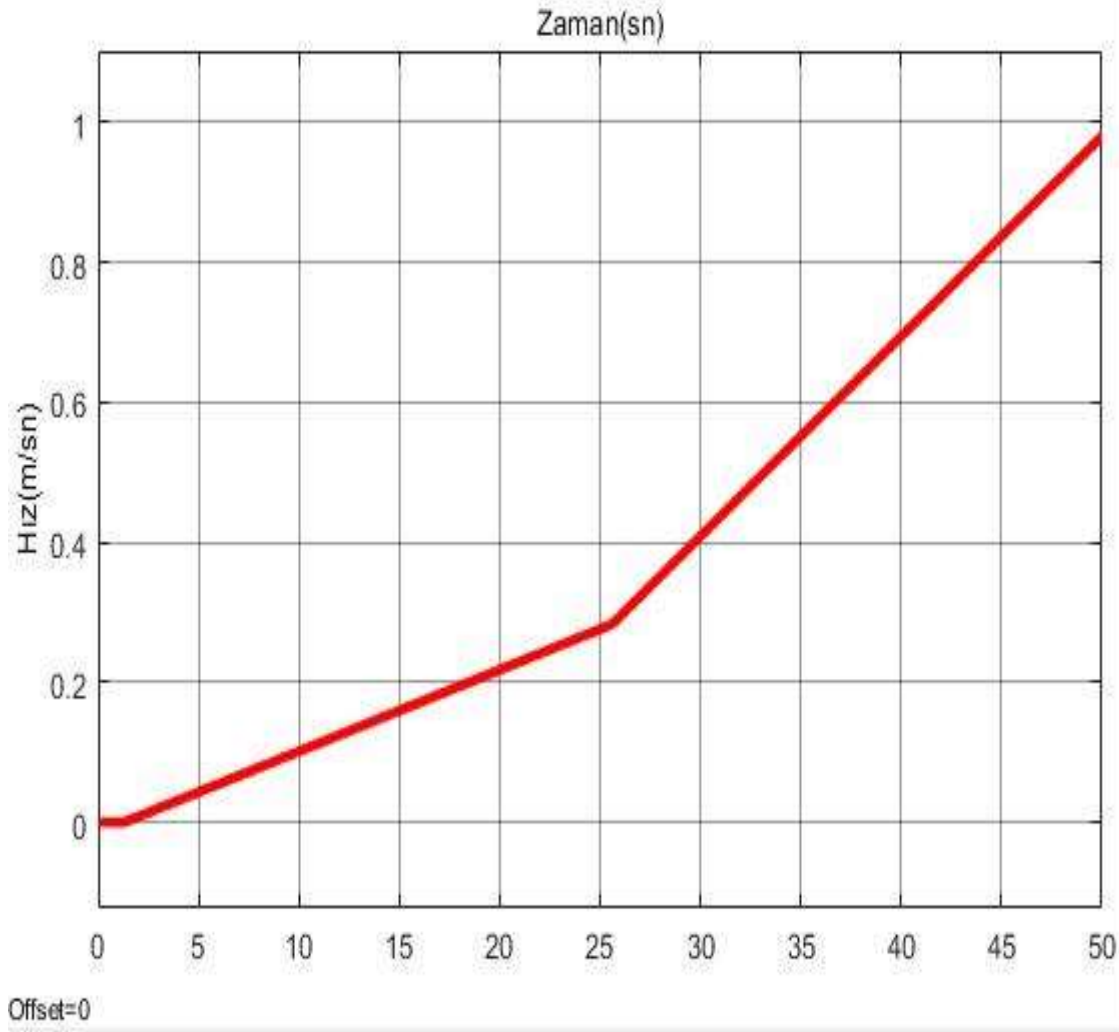
Parametreler/Zemin Türü	Mermer	Beton
Başlangıç Hızı	0m/sn	0m/sn
K	15.4N	19.7N
μ	0.404	0.567
Senaryo Süresi	25sn	25sn

Bu senaryoda mobil robot durağan bir şekilde hareketine başlayacak ve farklı ivmelere sahip iki teker takımının hareketi ile dönme hareketi yapacaktır. Teker takımları arasındaki ivme farkından dolayı, kayma hareketi ile harcanan güç miktarı olan \tilde{P}_S değerindeki değerlerin, mobil robotun kayma dışındaki harcadığı güç miktarı olan \tilde{P}_R değerinden yüksek olması beklenmektedir. Bu durumun başlıca sebebi senaryo boyunca sürekli bir dönme hareketi olacağı için, \tilde{P}_S formülündeki ω ve \vec{C}_x değerlerinde oluşacak sürekli artıştır.



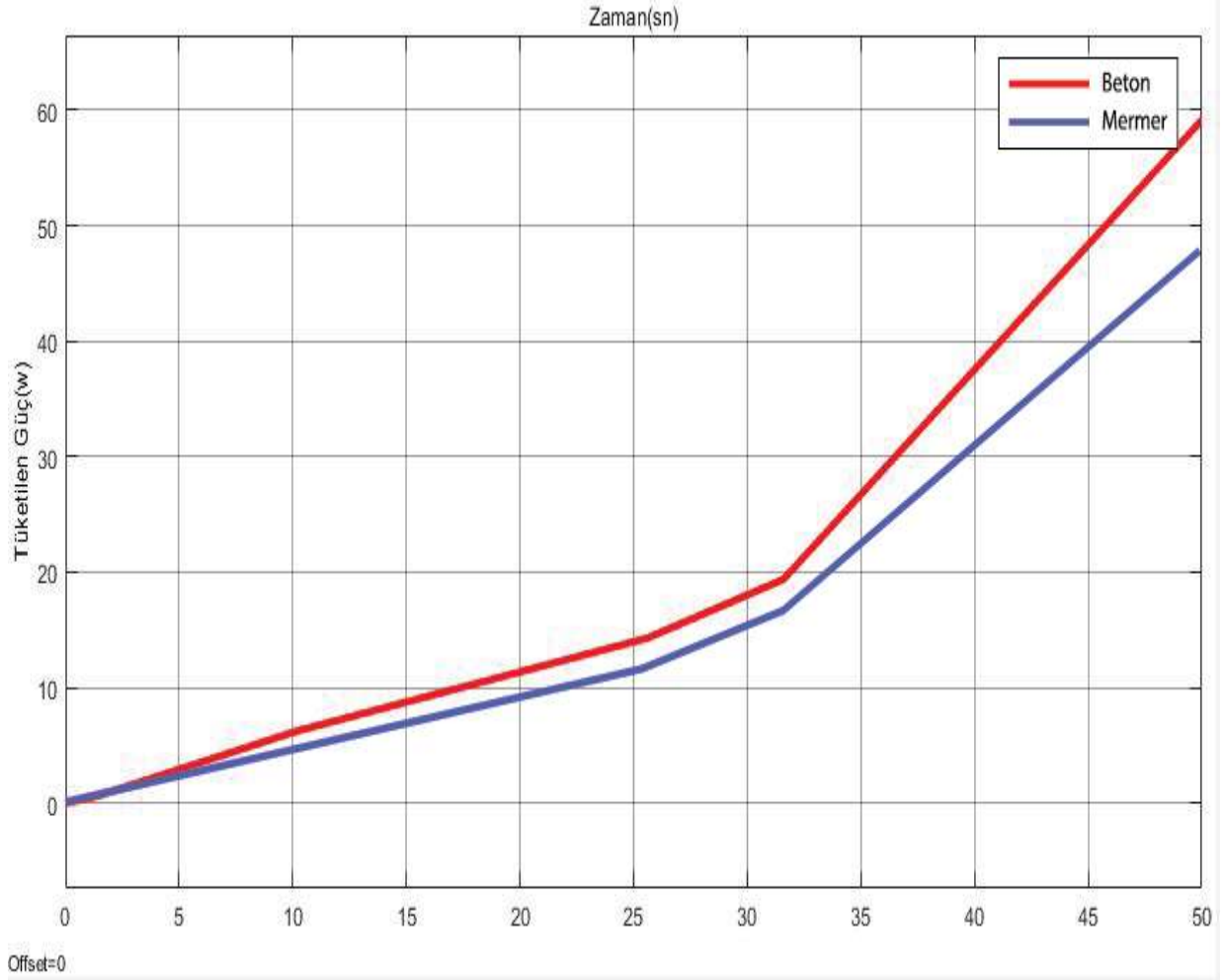
Şekil 3.5 Senaryo3 Esnasında Mobil Robotun Sağ Tekerinin Hız Grafiği

Şekil 3.5'te görüleceği üzere, Senaryo3 esnasında mobil robotun sağ teker takımı durağan bir şekilde hareketine başlamıştır. Mobil robot sabit bir pozitif ivme ile hareket etmiş, 32.saniyeden sonra mobil robotun pozitif ivmesi artış göstermiştir. Artış gösteren bu ivme ile mobil robot hareketini 50.saniyede tamamlamıştır. Mobil robot bu hareketi esnasında, firma tarafından paylaşılan mobil robotun maksimum hızı olan 2 m/sn lik hıza ulaşmıştır. İvmedeki bu artış sonucu mobil robotun dönüş esnasında yapacağı kayma hareketinde de artış olması beklenmektedir.



Şekil 3.6 Senaryo3 Esnasında Mobil Robotun Sol Tekerinin Hız Grafiği

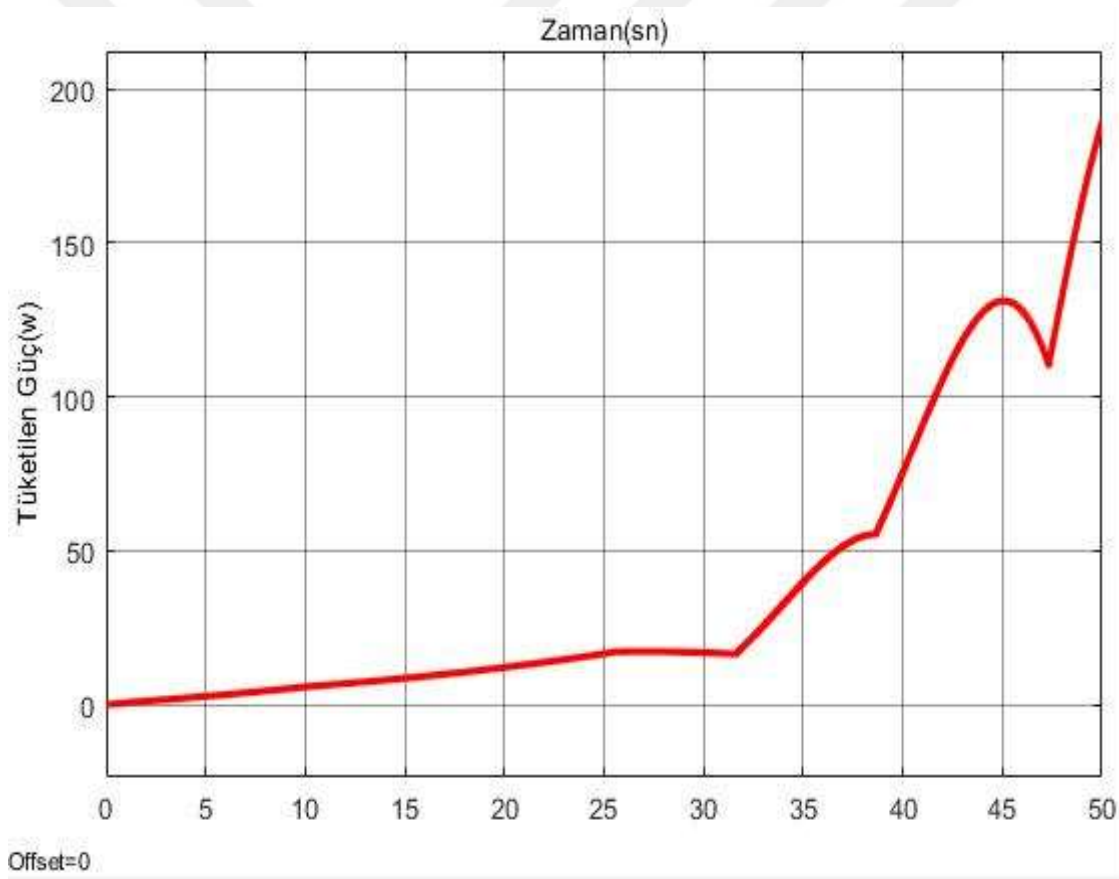
Şekil 3.6’da da görüleceği üzere mobil robotun sol teker takımının hız grafiği ile sağ teker takımının hız grafiği benzerlik göstermektedir. İki teker takımının hızları da incelendiğinde, mobil robot sisteminin hareketine durağan olarak başladığı, senaryonun belirli bir kısmına kadar pozitif ivme ile devam ettiği, sonrasında bu pozitif ivmede artış yaşandığı görülmektedir. Şekil 3.6 incelendiğinde, mobil robotun sol teker takımının artış ivmesinin 26.saniyede artışa geçtiği görülmektedir. Sol teker takımı 26.saniyeye kadar maksimum 0.3 m/sn lik bir hıza ulaşmış, sonrasında ivmesindeki artış ile hareketini 50.saniyede 1 m/sn lik bir hız ile bitirmiştir.



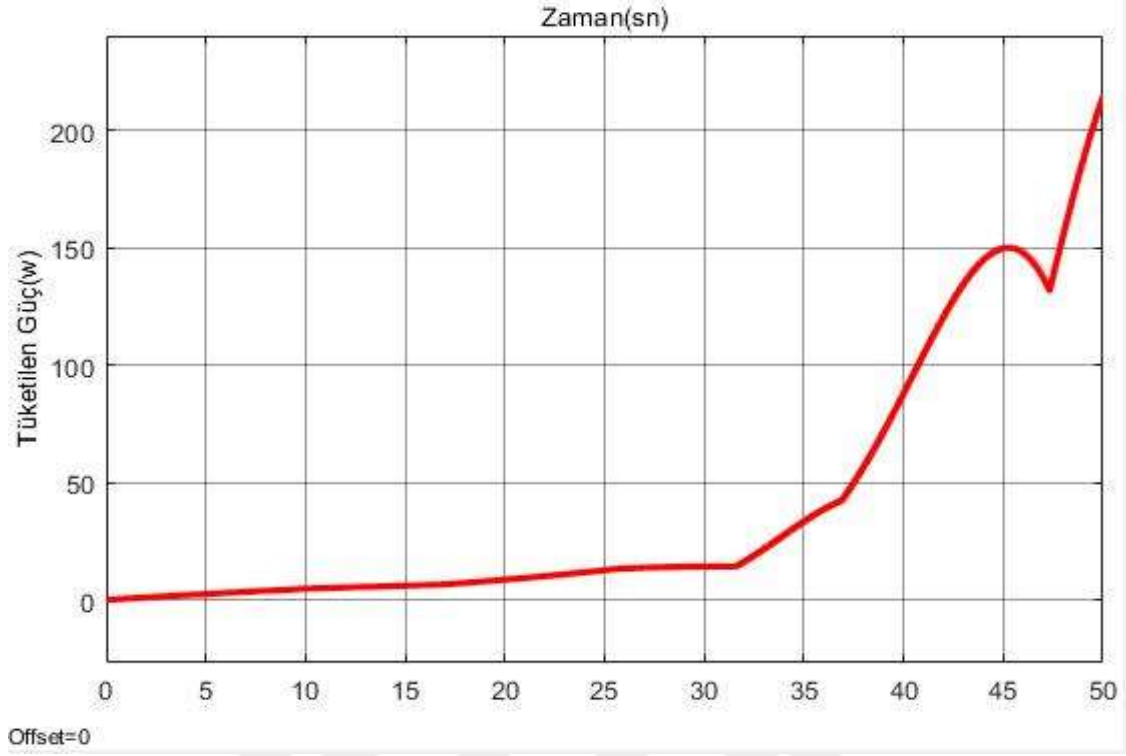
Şekil 3.7 Mobil Robotun Senaryo3 Esnasında Mermer ve Beton Zeminlerde Motorlarında Harcanan Güç Tüketimi

Şekil 3.7 incelendiğinde, mobil robotun mermer zeminde harcadığı kayma dışı güç görülmektedir. Mobil robot, Senaryo3 boyunca maksimum 48W lık bir güç harcamıştır. Bu grafik incelendiğinde, mobil robotun harcadığı güç grafiğinin, tekerlerin hız grafiği ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu durumun sebebi, mobil robotun kayma dışı harcadığı güçleri gösteren \tilde{P}_R değerini açıklayan formülde, mobil robotun harcadığı gücün, direk olarak mobil robotun sol ve sağ taker takımlarının hızlarının belirlenen katsayı ile çarpılması ile bulunmasıdır.

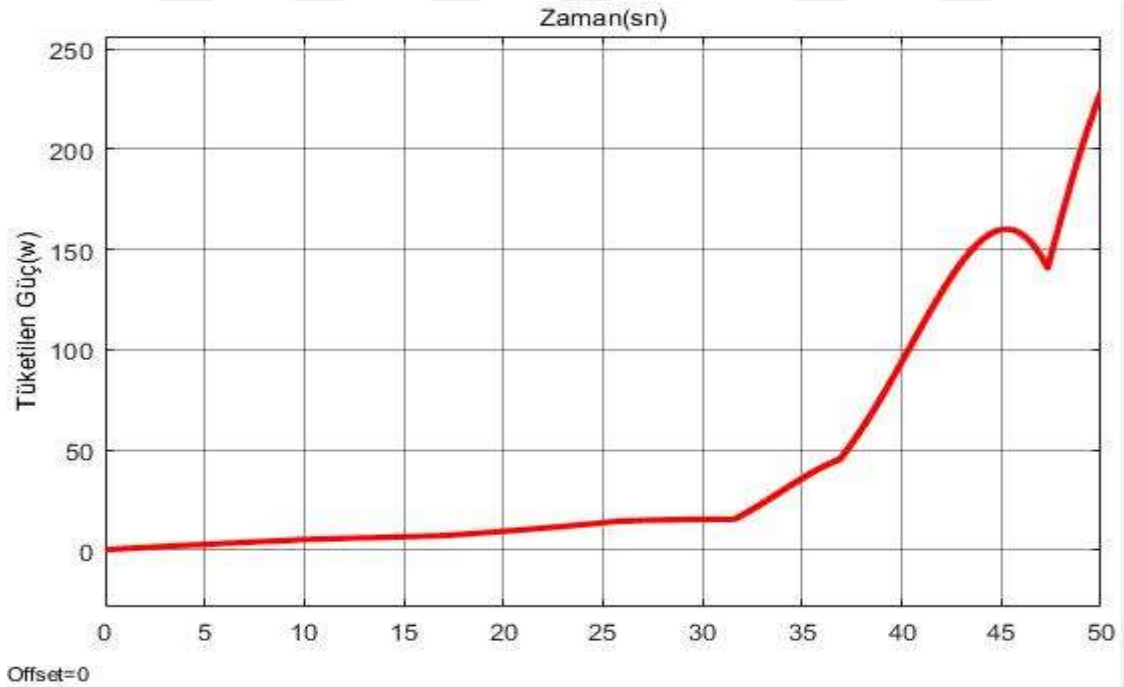
Şekil 3.7 incelendiğinde, mobil robotun beton zeminde harcadığı kayma dışı güç görülmektedir. Mobil robot, Senaryo3 boyunca maksimum 69W lık bir güç harcamıştır. Bu grafik incelendiğinde, mobil robotun harcadığı güç grafiğinin, tekerlerin hız grafiği ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu durumun sebebi, mobil robotun kayma dışı harcadığı güçleri gösteren \tilde{P}_R değerini açıklayan formülde, mobil robotun harcadığı gücün, direk olarak mobil robotun sol ve sağ teker takımlarının hızlarının belirlenen katsayı ile çarpılması ile bulunmasıdır. Beton zeminde harcanan güç ve mermer zeminde harcanan güç grafikleri arasındaki fark ise, bu iki zemin türünde belirlenen oransal çekiş sabitinin değişmesidir.



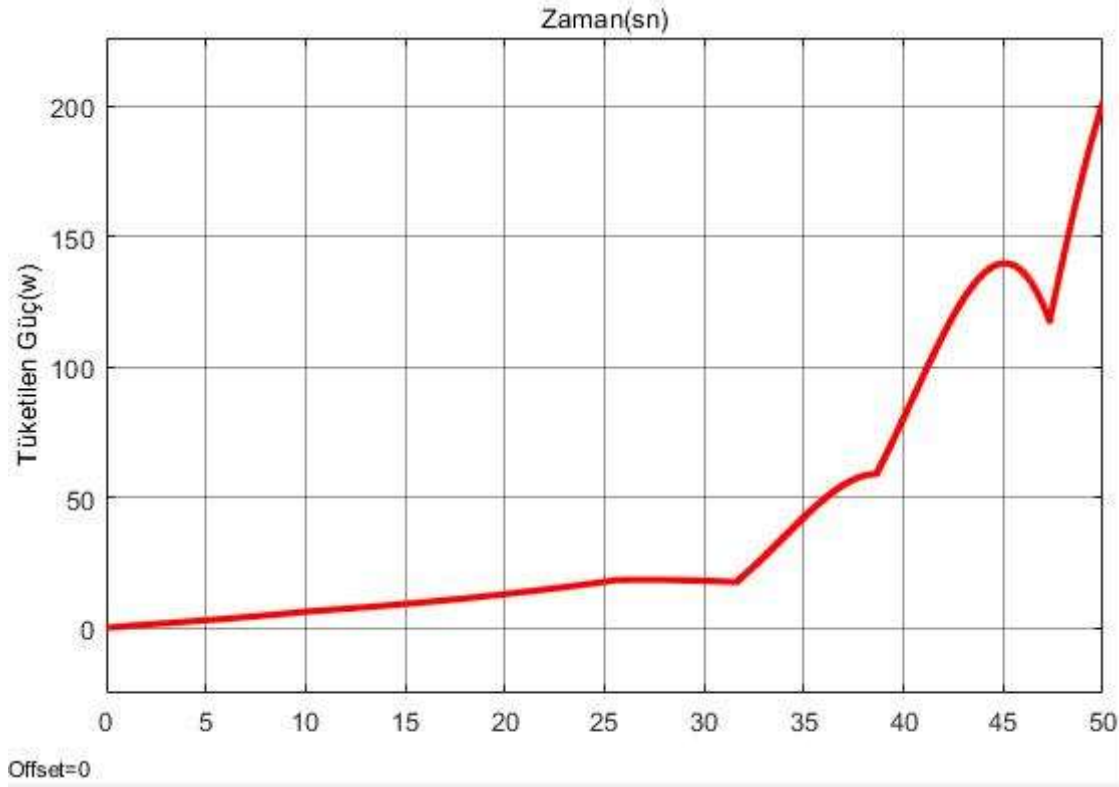
Şekil 3.8 Senaryo 3 Esnasında Mermer Zeminde Mobil Robotun Sağ Teker Takımında Harcanan Güç



Şekil 3.9 Senaryo 3 Esnasında Mermer Zeminde Mobil Robotun Sol Teker Takımında Harcanan Güç



Şekil 3.10 Senaryo 3 Esnasında Beton Zeminde Mobil Robotun Sağ Teker Takımında Harcanan Güç



Şekil 3.11 Senaryo 3 Esnasında Beton Zeminde Mobil Robotun Sol Teker Takımında Harcanan Güç

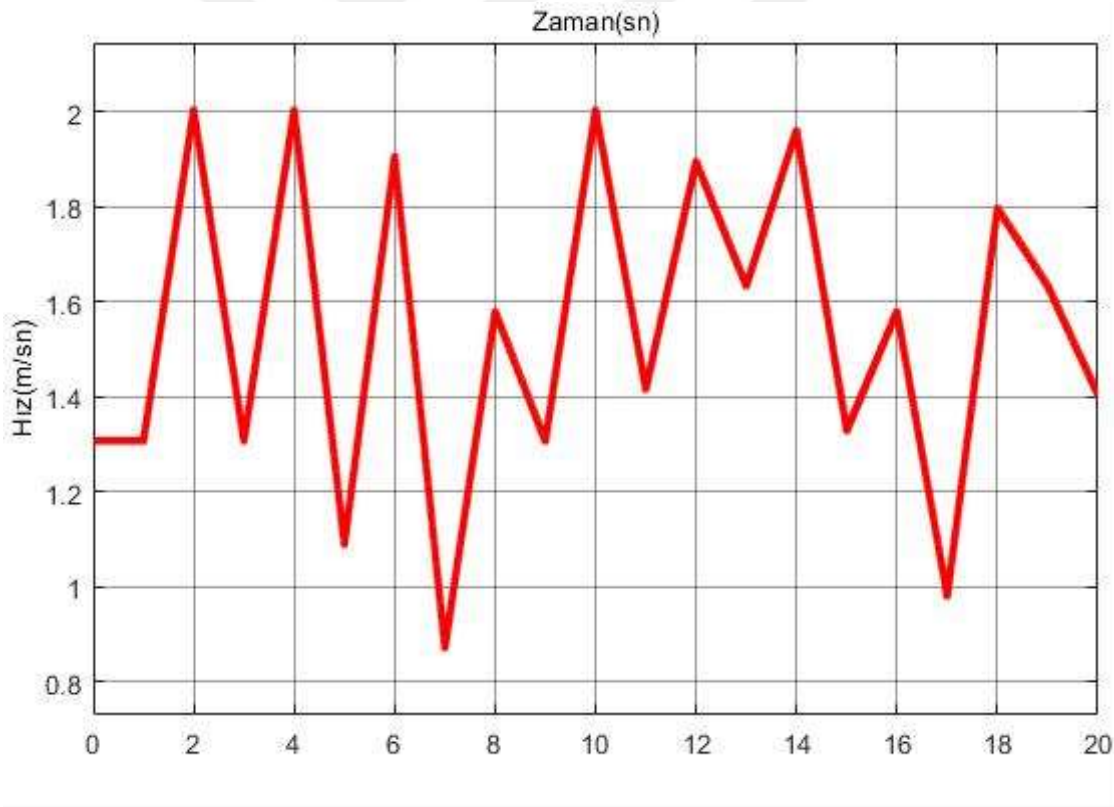
Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 incelendiğinde, mobil robotun Senaryo3 esnasında mermer ve beton zeminlerde dönüş hareketi sonucu oluşan kayma hareketi sebebiyle harcadığı güçler görülecektir. Mobil robotun zemin ile sürtünme katsayıları beton ve mermer zeminlerde farklı olduğundan ötürü, güç değerleri farklı büyüklüklerde bulunmuştur. Grafikler incelendiğinde, mobil robotun teker takımlarındaki ivme artışları yaşanana kadarki sürede oluşan kayma sonucu güç kayıplarının oldukça düşük seviyelerde olduğu gözlenmiştir. Mobil robotun teker takımlarındaki ivme artışları sonrasında ise güç tüketiminde artış ciddi oranda artmıştır. Bu durumun sebebi, teker takımlarındaki ivme artışı sonrası mobil robotun teker takımları arasındaki hız farkı artışa geçmiş ve mobil robotta kayma hareketleri daha çok yaşanmaya başlanmıştır. Senaryo3'te mermer ve beton zeminlerdeki kayma hareketi sonucu güç artışı grafikleri incelendiğinde, iki zemin türünde de Senaryo3'ün sonlarına doğru güç tüketim miktarında azalma görülmüş, ancak sonrasında güç tüketimi tekrar artışa geçmiştir. Bu durumun sebebi mobil robotun senaryonun bahsi geçen zamanlarında, tekerlek takımları

arasındaki hız farkından ötürü spin hareketi yapmasıdır. Mobil robotun hareketinin gorsel olarak gözleendiği simülasyon ortamında bu spin hareketi gözlenmiştir.

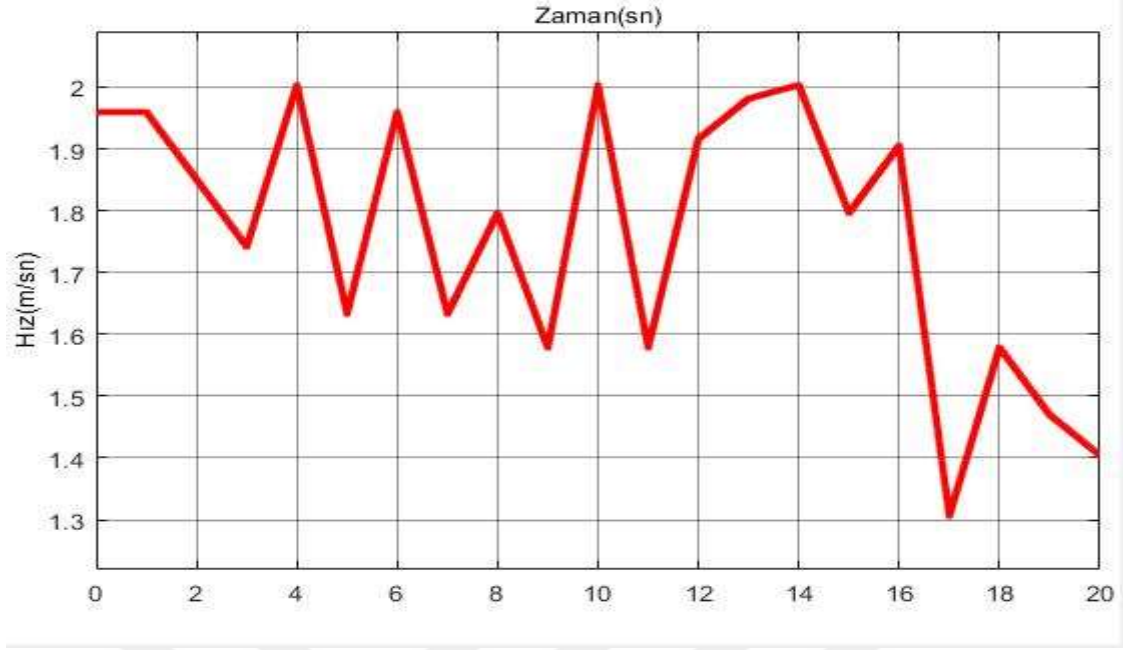
3.4 Senaryo4

Bu senaryoda mobil robot sabit ivmelerde hareket edecektir. İvmeler senaryo boyunca değişliklik gösterecektir. Senaryo boyunca mobil robotun sağ ve sol taker takımlarının hızları sürekli değişkenlik gösterecektir. Senaryoda mobil robotun sağ ve sol taker takımlarının hızları senaryo boyunca birbirinden farklı hızlarda hareket ettiğinden ötürü mobil robot senaryo boyunca dönme hareketi gösterecektir. Mobil robot bu senaryo esnasında slalom benzeri bir hareket yapacaktır

Bu slalom hareketi esnasında mobil robot sisteminin sürekli kayma hareketi yapacaktır. Bu kayma hareketi sonucunda mobil robot sisteminde harcanan güç, ağırlıklı olarak kayma sonucu harcanan güç olacaktır.

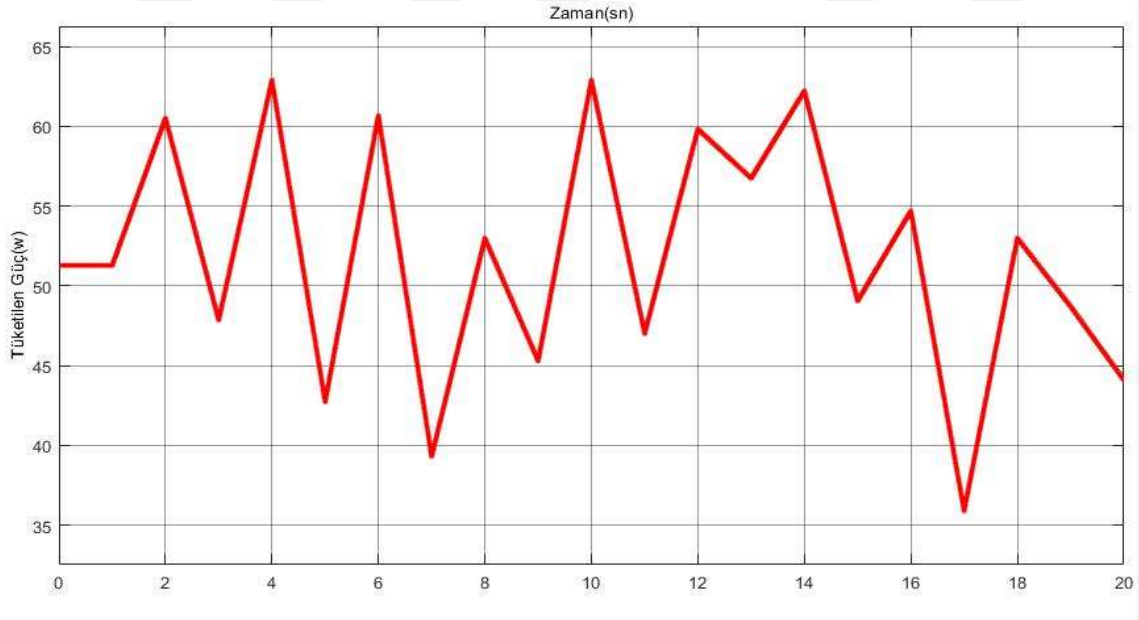


Şekil 3.12 Senaryo4 Esnasında Mobil Robotun Sağ Teker Takımının Hızı



Şekil 3.13 Senaryo4 Esnasında Mobil Robotun Sol Teker Takımının Hızı

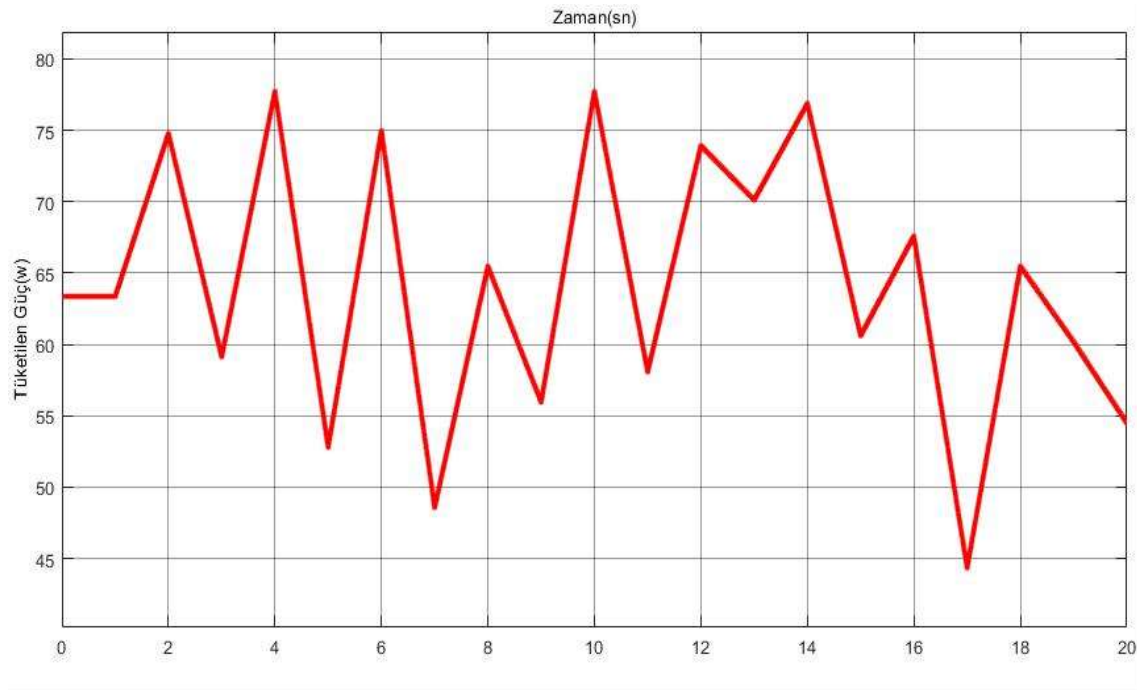
Şekil 3.12 ve 3.13 de görülebileceği üzere senaryo boyunca mobil robotun tekerleklerinin hızları birbirinden farklıdır. Bu sebeple mobil robot senaryo boyunca dönme hareketi yapacaktır.



Şekil 3.14 Senaryo4 Esnasında Mermer Zeminde Mobil Robotun Motorlarında Harcanan Güç

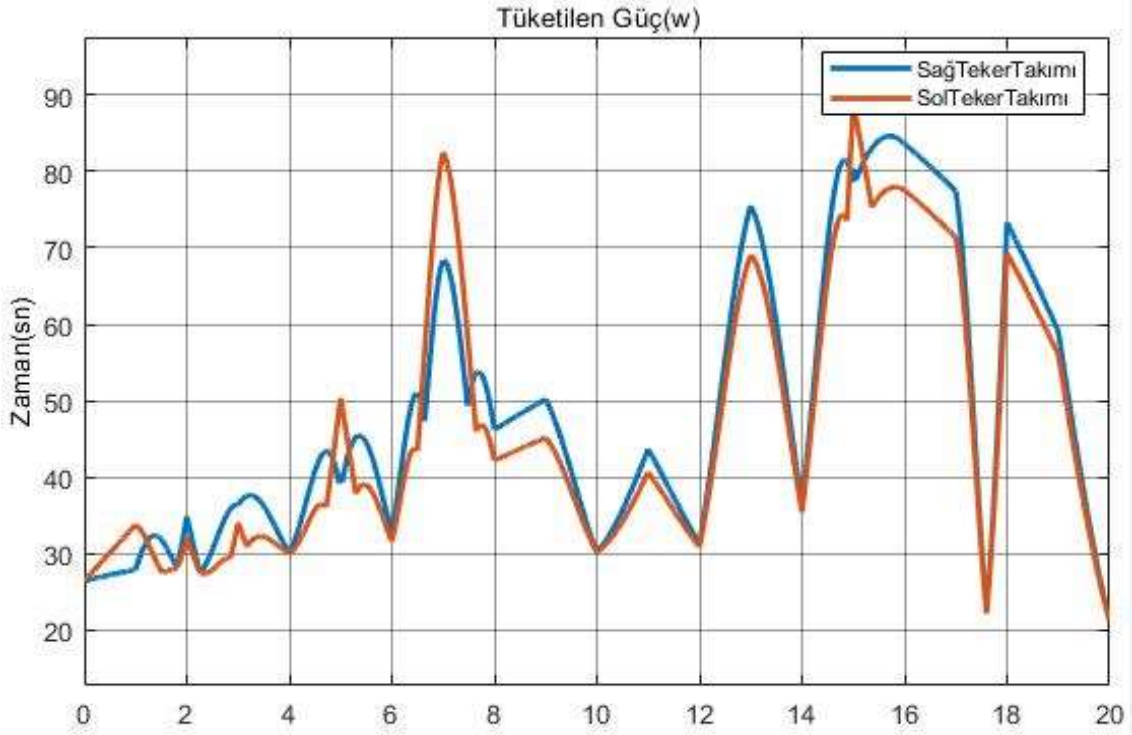
Şekil 3.14 de görülebileceği üzere mobil robotun Senaryo4 esnasında harcadığı kayma hareketi dışındaki güç, senaryo boyunca değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenliğin sebebi mobil robotun senaryo boyunca sağ ve sol taker takım hızlarının değişim göstermesidir.

Şekil 3.14 de görüldüğü üzere senaryo esnasında belirli noktalarda mobil robotun hızındaki düşüş, mobil robotta kayma dışı harcanan güç grafiğindeki eğride de düşüslere sebep olmuştur. Daha önce de bahsedildiği üzere bu düşüşün temel sebebi, bu güç tüketim hesaplamasında kullanılan formülün mobil robotun sağ ve sol taker takımlarının hızları ile doğru orantılı bir korelasyon içinde olmasıdır.

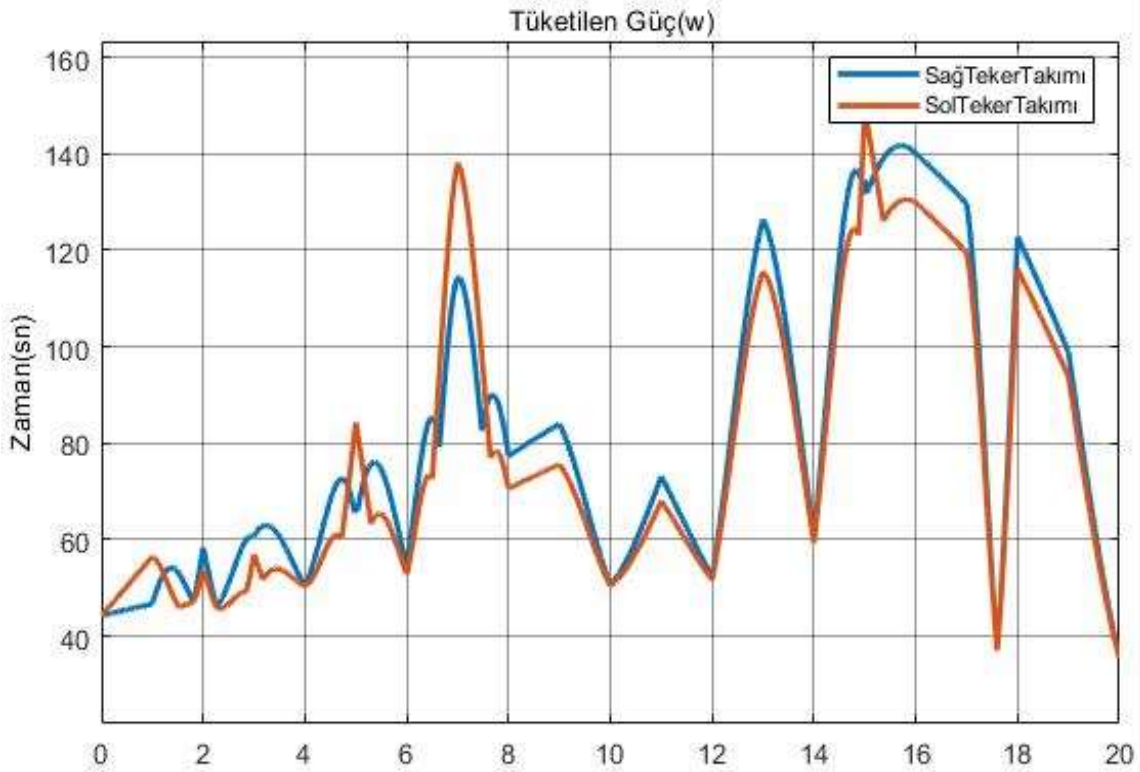


Şekil 3.15 Senaryo4 Esnasında Beton Zeminde Mobil Robotun Motorlarında Harcanan Güç

Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 incelendiğinde, mobil robotta Senaryo4 esnasında harcanan kayma hareketi dışındaki güçleri gösteren grafikler birbiri ile tıpatıp aynı şekilde gelişmiştir. Grafikler arasındaki tek fark, harcanan güç değerindeki büyüklüktür. Tüketilen güçteki bu farkın sebebi ise, bu güç tüketimini gösteren formüldeki oransal direnç sabiti değeridir. Bu değer, mermer zemine nazaran beton zeminde daha büyük bir değer aldığından, beton zeminde kayma hareketi dışında tüketilen güç miktarı, mermer zeminde tüketilen güç miktarından fazla çıkmıştır.



Şekil 3.16 Senaryo4 Esnasında Mermer Zeminde Sağ ve Sol Teker Takımında Kayma Hareketi Sonucu Tüketilen Güç



Şekil 3.17 Senaryo4 Esnasında Beton Zeminde Sağ ve Sol Teker Takımında Kayma Hareketi Sonucu Tüketilen Güç

Şekil 3.16 incelendiğinde, mobil robotta mermer zemin üzerinde kayma hareketi sonucu harcanan gücün, sağ ve sol taker takımları için oldukça farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılığın sebebi, senaryo boyunca sağ ve sol taker takımları arasındaki hız farkının sürekli değişkenlik göstermesidir. Grafikler değerlendirildiğinde, mobil robot hızlandığında grafiklerde güç tüketiminde artış, mobil robot yavaşladığında ise güç tüketiminde azalma görülmektedir. Ani düşüşlerin gerçekleştiği noktalarda mobil robotun spin hareketleri yaptığı gözlemlenmiştir.

Şekil 3.17 incelendiğinde mobil robotta senaryo esnasında beton zeminde kayma hareketi ile tüketilen güç görülecektir. Grafiklere bakıldığında beton zemin grafikleri ile mermer zemin grafiklerinin benzerlik gösterdiği görülecektir. İki teker arasındaki güç tüketim farkları, mermer zeminde olduğu gibi, tekerlek takımları arasındaki anlık hız farklarından kaynaklanmaktadır. Mermer zemin ve beton zemin arasındaki güç tüketim farklılıkları ise, kayma hareketi sonucu mobil robotta tüketilen güç miktarını gösteren formüldeki tekerlekler ve zemin arasındaki sürtünme katsayısı farkından dolayı gerçekleşmektedir.

4. SENARYOLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu tez çalışmasında mobil robotun hareket esnasındaki motor milleri, şaftlar gibi mekanik elemanlar vasıtasıyla oluşan güç kayıpları ve dönme hareketi esnasındaki kayma hareketinden kaynaklı oluşan güç kayıpları incelenmiştir.

Çalışmada uygulanan senaryolarda, mobil robota verilen hareketler ve güç tüketim algoritmaları sonucu oluşan grafikler incelendiğinde, genellikle mekanik güç tüketimi grafikleri ile mobil robotun hız grafikleri arasında benzerlik görülmektedir.

Mobil robotun kayma sonucu oluşan güç tüketim miktarının ise, mobil robotun senaryolarda ne kadar dönüş hareketi yaptığı ile doğru olarak arttığı, dönüş hareketi esnasındaki ivmenin ve tekerlekler arası ivme farkından dolayı oluşan ekstra kayma hareketlerinin, dönüş esnasında kayma sonucu oluşan güç tüketim grafiklerine büyük etkileri olduğu gözlenmiştir.

Senaryo1 boyunca mobil robot ivmesiz bir şekilde sabit hızla hareket etmiştir. Bu senaryo sonucunda görüleceği üzere mobil robotta herhangi bir dönüş hareketi olmadığından ötürü kayma hareketi olmamış, bu sebeple kayma hareketi sonucu herhangi bir güç tüketimi olmamıştır. Mobil robotta kayma hareketi dışındaki mekanik güç kayıplarının grafiğinin ise, hız grafiği gibi sabit olduğu görülmüştür.

Senaryo2 boyunca mobil robot ivmeli hareket yapmıştır. Bu senaryoda mobil robotun sağ ve sol taker takımının hızları aynıdır, ancak taker takımlarının ikisini de aynı miktarda ivme uygulanmıştır. Bu ivme sonucunda mobil robot durağan bir şekilde hareketine başlamış ve senaryo sonuna kadar hareketini hızlanarak devam ettirmiştir. Bu senaryoda da taker takımlarının hızları aynı olduğundan dönme ve kayma hareketi olmamıştır. Bu senaryoda tüketilen güç grafiği hız grafiği ile benzerlik göstermiştir.

Senaryo3 boyunca mobil robot dönme hareketi yapmıştır. Bu hareket esnasında mobil robotun taker takımlarına pozitif ivme uygulanmış ve mobil robotun taker takımlarına uygulanan ivmeler senaryonun farklı zamanlarında değişkenlik göstermiştir. Bu senaryodaki dönme hareketi sonucu kayma esnasındaki güç tüketimleri gözlenmiş ve mobil robotun senaryonun belirli bir zamanında spin hareketi yaptığı gözlenmiştir.

Senaryo4 te mobil robota slalom benzeri bir hareket uygulanmış, senaryo boyunca mobil robot dönme hareketi uygulamıştır. Senaryo süresince taker takımlarında oluşan hız değişimleri sonucu senaryonun belirli anlarında güç tüketiminde artış ve azalmalar görülmüş, senaryoda güç tüketimindeki ani düşüşler esnasında mobil robotun spin hareketi yaptığı gözlemlenmiştir.

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Clearpath markasına ait Jackal adlı mobil robot üzerinde, literatürde daha önce çalışması yapılmış bir güç tüketim modeli uygulanmıştır. Bu güç tüketim modeli, literatürde kullanılan çoğu güç tüketim modeli gibi elektriksel güç üzerinden değil, motorda harcanan mekanik güç ve mobil robotta oluşan kayma hareketi sonucu tüketilen güç üzerinden değerlendirme yapmaktadır. Literatürdeki çoğu güç tüketim modelinde, elektriksel güç tüketimleri üzerinden modellemeler yapılmıştır. Bu modellemeler yapılırken, mobil robotta kullanılan motorun armatür akımı, geri electromotor kuvveti, motorun indüktansı ve resistansı gibi değerlerin bilinmesi gerekmektedir. Günümüzde şirketler bu gibi değerleri paylaşmayı tercih etmemektedir. Bu sebeple bu elektriksel modeller her ne kadar doğru sonuçlar verse de, modellerin uygulanması gerekli verilen elde edilmesinin güç olmasından ötürü zor bir hal almaktadır. Tez çalışmasında kullanılan modelde ise, elde edilmesi güç veriler kullanılmamış, sadece belirli deneyler ile elde edilen katsayılar ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan bu modelin, karmaşık hareketlerin yapılmadığı veya motor

verilerinin elde edilemediği durumlarda kolaylıkla kullanılabilceği gözlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan modelde, Clearpath firmasının Jackal adlı robotunun parametreleri kullanarak çalışma gerçekleştirilmiştir. İstenilen herhangi bir 4 tekerlekli mobil robotun parametreleri kullanarak da model uygulanabilir. Çalışmada Jackal adlı mobil robotun motor parametreleri elde edilemediğinden dolayı, mobil robotun kontrolü esnasındaki kontrol girdisi olarak, tekerlek kinematiği sonucu elde edilen açısal hız kullanılmıştır. Mobil robotlarda kullanılan herhangi bir motor Simulink üzerinde modellenerek, motor parametrelerinin belirlenebildiği durumlarda motor milinin açısal hızı, kontrol girdisi olarak kabul edilerek tez çalışmasında uygulanan bu model kullanılabilir.



KAYNAKÇA

- [1] K. Kozłowski and D. Pazderski, "Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot," *International journal of applied mathematics and computer science*, vol. 14, no. 4, 2004.
- [2] R. Raj and A. Kos, "A Comprehensive Study of Mobile Robot: History, Developments, Applications, and Future Research Perspectives," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, p. 6951, Jul. 2022, doi: 10.3390/app12146951.
- [3] T. Shibata, K. Inoue, and R. Irie, "Emotional robot for intelligent system-artificial emotional creature project," in *Proceedings 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. RO-MAN'96 TSUKUBA*, IEEE, pp. 466–471. doi: 10.1109/ROMAN.1996.568881.
- [4] B. Robins, K. Dautenhahn, R. Te Boekhorst, and A. Billard, "Robotic assistants in therapy and education of children with autism: can a small humanoid robot help encourage social interaction skills?," *Univers Access Inf Soc*, vol. 4, no. 2, pp. 105–120, Dec. 2005, doi: 10.1007/s10209-005-0116-3.
- [5] P. Marmaglio, D. Consolati, C. Amici, and M. Tiboni, "Autonomous Vehicles for Healthcare Applications: A Review on Mobile Robotic Systems and Drones in Hospital and Clinical Environments," *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 23, p. 4791, Nov. 2023, doi: 10.3390/electronics12234791.
- [6] R. Zinko, O. Bojko, Y. Cherevko, R. Berezenskyi, and B. Chereushenko, "APPLICATION OF MOBILE ROBOTS SQUAD IN COMBAT," *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*, no. 15, pp. 51–57, Sep. 2021, doi: 10.37129/2313-7509.2021.15.51-57.
- [7] D. F. Yépez-Ponce, J. V. Salcedo, P. D. Rosero-Montalvo, and J. Sanchis, "Mobile robotics in smart farming: current trends and applications," *Front Artif Intell*, vol. 6, Aug. 2023, doi: 10.3389/frai.2023.1213330.
- [8] A. A. Morgan, J. Abdi, M. A. Q. Syed, G. El Kohen, P. Barlow, and M. P. Vizcaychipi, "Robots in Healthcare: a Scoping Review," *Current Robotics Reports*, vol. 3, no. 4, pp. 271–280, Oct. 2022, doi: 10.1007/s43154-022-00095-4.
- [9] H. Unger, T. Markert, and E. Müller, "Evaluation of use cases of autonomous mobile robots in factory environments," *Procedia Manuf*, vol. 17, pp. 254–261, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.044.
- [10] M. J. Bakari, K. M. Zied, and D. W. Seward, "Development of a Multi-Arm Mobile Robot for Nuclear Decommissioning Tasks," *Int J Adv Robot Syst*, vol. 4, no. 4, p. 51, Dec. 2007, doi: 10.5772/5665.
- [11] D. Zhang, R. Luo, Y. Yin, and S. Zou, "Multi-objective path planning for mobile robot in nuclear accident environment based on improved ant colony optimization with modified A*," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 55, no. 5, pp. 1838–1854, May 2023, doi: 10.1016/j.net.2023.02.005.

- [12] D. McNulty, A. Hennessy, M. Li, E. Armstrong, and K. M. Ryan, "A review of Li-ion batteries for autonomous mobile robots: Perspectives and outlook for the future," *J Power Sources*, vol. 545, p. 231943, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231943.
- [13] T. Verstraten, M. S. Hosen, M. Berecibar, and B. Vanderborght, "Selecting Suitable Battery Technologies for Untethered Robot," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 13, p. 4904, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16134904.
- [14] T. Mikotajczyk et al., "Energy Sources of Mobile Robot Power Systems: A Systematic Review and Comparison of Efficiency," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 13, p. 7547, Jun. 2023, doi: 10.3390/app13137547.
- [15] R. De Carvalho Teché and P. Thomaz Aquino, "Dynamic Power Management on a Mobile Robot," in *2021 6th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR)*, IEEE, Dec. 2021, pp. 8–14. doi: 10.1109/ICMERR54363.2021.9680818.
- [16] D. Sivaraman, B. M. Pillai, S. Ongwattanakul, and J. Suthakorn, "Energy Optimized Path Planning and Decision Making for Multiple Robots in Rescue Operations," in *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, Oct. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/IECON49645.2022.9968971.
- [17] P. Zebrowski and R. T. Vaughan, "Recharging robot teams: A tanker approach," in *ICAR '05. Proceedings., 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005.*, IEEE, 2005, pp. 803–810. doi: 10.1109/ICAR.2005.1507500.
- [18] F. Arvin, J. Murray, C. Zhang, and S. Yue, "Colias: An Autonomous Micro Robot for Swarm Robotic Applications," *Int J Adv Robot Syst*, vol. 11, no. 7, p. 113, Jul. 2014, doi: 10.5772/58730.
- [19] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, "Inspiration for optimization from social insect behaviour," *Nature*, vol. 406, no. 6791, pp. 39–42, Jul. 2000, doi: 10.1038/35017500.
- [20] F. Mondada, A. Guignard, M. Bonani, D. Bar, M. Lauria, and D. Floreano, "SWARM-BOT: from concept to implementation," in *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*, IEEE, pp. 1626–1631. doi: 10.1109/IROS.2003.1248877.
- [21] E. M. H. Zahugi, A. M. Shabani, and T. V. Prasad, "Libot: Design of a low cost mobile robot for outdoor swarm robotics," in *2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, IEEE, May 2012, pp. 342–347. doi: 10.1109/CYBER.2012.6392577.
- [22] A. Bocca and D. Baek, "Optimal Life-Cycle Costs of Batteries for Different Electric Cars," in *2020 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*, IEEE, Nov. 2020, pp. 1–6. doi: 10.23919/AEITAUTOMOTIVE50086.2020.9307426.
- [23] X. Cai, L. Chen, and M. Wang, "Current status and development trend of battery changing technology for electric passenger vehicles," in *2022 2nd International Conference on*

Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS), IEEE, Dec. 2022, pp. 215–221. doi: 10.1109/IC2ECS57645.2022.10087935.

- [24] C. Iclodean, B. Varga, N. Burnete, D. Cimerdean, and B. Jurchiș, “Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 252, p. 012058, Oct. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/252/1/012058.
- [25] B. Ban, M. Vrazic, and I. Bahun, “Electric vehicle model with driving cycle based algorithm for battery and motor minimization,” in *2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, IEEE, Sep. 2015, pp. 220–226. doi: 10.1109/EDPE.2015.7325297.
- [26] K. Sundararaju, S. Jagadeesh, N. Madhumithra, and K. Manikandan, “Machine Learning Based SoC Estimation For Lithium-Ion Battery In Electric Vehicle,” in *2023 9th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, IEEE, Mar. 2023, pp. 85–88. doi: 10.1109/ICEES57979.2023.10110259.
- [27] “<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.”
- [28] “<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.”
- [29] “<https://www.mathworks.com/products/simscape.html>.”
- [30] “<https://clearpathrobotics.com/>.”
- [31] “<https://clearpathrobotics.com/jackal-small-unmanned-ground-vehicle/>.”
- [32] “<https://www.3ds.com/products/solidworks>.”
- [33] Jingang Yi, Hongpeng Wang, Junjie Zhang, Dezhen Song, S. Jayasuriya, and Jingtai Liu, “Kinematic Modeling and Analysis of Skid-Steered Mobile Robots With Applications to Low-Cost Inertial-Measurement-Unit-Based Motion Estimation,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 5, pp. 1087–1097, Oct. 2009, doi: 10.1109/TRO.2009.2026506.
- [34] L. Caracciolo, A. de Luca, and S. Iannitti, “Trajectory tracking control of a four-wheel differentially driven mobile robot,” in *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*, IEEE, pp. 2632–2638. doi: 10.1109/ROBOT.1999.773994.
- [35] J. Yi, D. Song, J. Zhang, and Z. Goodwin, “Adaptive Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robots,” in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Apr. 2007, pp. 2605–2610. doi: 10.1109/ROBOT.2007.363858.
- [36] Jingang Yi, Junjie Zhang, Dezhen Song, and Suhada Jayasuriya, “IMU-based localization and slip estimation for skid-steered mobile robots,” in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, Oct. 2007, pp. 2845–2850. doi: 10.1109/IROS.2007.4399477.
- [37] A. Mandow, J. L. Martinez, J. Morales, J. L. Blanco, A. Garcia-Cerezo, and J. Gonzalez, “Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile robots,” in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, Oct. 2007, pp. 1222–1227. doi: 10.1109/IROS.2007.4399139.

- [38] J. L. Martínez, A. Mandow, J. Morales, S. Pedraza, and A. García-Cerezo, "Approximating Kinematics for Tracked Mobile Robots," *Int J Rob Res*, vol. 24, no. 10, pp. 867–878, Oct. 2005, doi: 10.1177/0278364905058239.
- [39] Z. Dorbetkhany, A. Murbabulatov, M. Rubagotti, and A. Shintemirov, "Spatial-Based Model Predictive Path Following Control for Skid Steering Mobile Robots," in *2022 18th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, IEEE, Nov. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/MESA55290.2022.10004456.
- [40] S. Dogru and L. Marques, "Estimation of rotational speeds of skid-steered wheeled mobile robots using an improved kinematic model," in *2017 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, IEEE, Apr. 2017, pp. 73–78. doi: 10.1109/ICARSC.2017.7964055.
- [41] G. K. Furlas, "Theoretical approach of model based fault diagnosis for a 4-wheel skid steering mobile robot," in *21st Mediterranean Conference on Control and Automation*, IEEE, Jun. 2013, pp. 597–602. doi: 10.1109/MED.2013.6608783.
- [42] Fang Yang, Chaoli Wang, and Baolei Wang, "Tracking control for uncertain dynamic nonholonomic mobile robots with unknown visual parameters," in *2011 9th World Congress on Intelligent Control and Automation*, IEEE, Jun. 2011, pp. 1189–1194. doi: 10.1109/WCICA.2011.5970704.
- [43] A. Dun, R. Wang, Q. Xu, and J. Zhai, "Leader-Follower Formation Control of Multiple Wheeled Mobile Robot systems Based On Dynamic Surface Control," in *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, IEEE, Nov. 2020, pp. 5357–5361. doi: 10.1109/CAC51589.2020.9326735.
- [44] Y. Koubaa, M. Boukattaya, and T. Damak, "Adaptive sliding-mode control of nonholonomic wheeled mobile robot," in *2014 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, IEEE, Dec. 2014, pp. 336–342. doi: 10.1109/STA.2014.7086759.
- [45] J. Morales, J. L. Martínez, A. Mandow, A. Pequeño-Boyer, and A. García-Cerezo, "Simplified power consumption modeling and identification for wheeled skid-steer robotic vehicles on hard horizontal ground," in *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings, 2010*. doi: 10.1109/IROS.2010.5649292.
- [46] J. Morales, J. L. Martínez, A. Mandow, A. J. García-Cerezo, and S. Pedraza, "Power consumption modeling of skid-steer tracked mobile robots on rigid terrain," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 5, 2009, doi: 10.1109/TRO.2009.2026499.