T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SEKİZ UZUVLU BİR YÜRÜME MEKANİZMASININ FARKLI ARAZİ ŞARTLARINA UYARLANMASI

Ali FEYZULLAH

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs - 2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

SEKİZ UZUVLU BİR YÜRÜME MEKANİZMASININ FARKLI ARAZİ ŞARTLARINA UYARLANMASI

Ali FEYZULLAH

Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK
2019, 102 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK
Prof. Dr. Ziya ŞAKA
Dr. Öğr. Üyesi Ziya ÖZÇELİK

Bu çalışmada, sekiz uzuvlu bir mekanizmanın yürüme mekanizması şartlarını sağlaması için gereken özellikler belirlenmiş, bu nitelikleri sağlayan bir mekanizmanın nasıl tasarlanabileceği üzerine denemelerde bulunulmuştur. Literatürdeki yürüme mekanizmalarının temel prensiplerinden, birbirlerine göre üstünlükleri ve farklarından da bahsedilmiştir.

Mekanizmanın düzgün satıhta ilerleme durumu için ideal biyel eğrisi ve bu eğriyi sağlayan optimal uzuv mesafeleri elde edilmiştir. Mekanizmanın kinematik analizi yapılmış, konum, hız ve ivmeyi veren genel denklemler bulunmuştur.

Literatürde, her türlü araç çeşidi ve arazi koşulunu tanımlayan, temel parametrelerini belirleyen bir çalışma bulunmaması nedeniyle satıh, engel ve aracın etkileşim halinde bulunduğu ortam çeşidi kıstasına göre arazi sınıflandırması yapılmış, mevcut çalışmada konu kapsamına çıkmamak için yalnızca satıh temaslı araçlar bölümüne yer verilmiştir.

Optimize edilen yürüme mekanizmasında uzuv mesafe değişimlerinin biyel eğrisine olan etkisi de incelenmiştir. Denklem çözümleri için Mathematica 10.4, vektörel analiz için Cinderella 2 yazılımı kullanılmıştır. Kinematik analiz sonucunda konum, hız ve ivme denklemlerinin çok terimli ve karmaşık fonksiyonlar olduğu görülmüştür. Bu nedenle, mekanizma uzuv mesafe değişimi ile biyel eğrisi arasındaki bağıntılar, eğri uydurma ve lineerleştirme yöntemi ile cebirsel fonksiyonlarla ifade edilmeye çalışılmıştır.

Arazi sınıflandırmasının yapılması ve uzuv mesafeleri ile biyel eğrisi parametreleri arasındaki eşitliklerin elde edilmesinden sonra, muhtemel engel tiplerine göre gereken mekanizma değişikliğinin ne şekilde olması gerektiği incelenmiştir. Bulunan neticeler Algadoo 2.1.0 fiziksel simülasyon yazılımında denenmiş, meydana gelen titreşim ve hareket düzensizlikleri belirlenerek çözüm yolları aranmıştır.

Son olarak yürüme mekanizmasının uygulandığı robotun konsept tasarımı ve 3B çizimi SolidWorks 2017 ile yapılmıştır. Robota ait temel mekanik ve elektronik bileşenler seçilmiş ayrıca yine SolidWorks 2017 ile statik ve modal analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mekanizma tasarımı, yürüme mekanizması, iki boyutta arazi sınıflandırması, mekanizma simülasyonu, kinematik-statik ve modal analiz.

ABSTRACT

MS THESIS

ADAPTATION FOR DIFFERENT TERRAIN CONDITIONS OF AN EIGHT MEMBER WALKING MECHANISM

Ali FEYZULLAH

The Graduate School of Natural and Applied Science of Selçuk University
The Degree of Master of Science in Mechanical Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Koray KAVLAK
2019, 102 Pages

Jury
Asst. Prof. Dr. Koray KAVLAK
Prof Dr. Ziya ŞAKA
Asst. Prof. Dr. Ziya ÖZÇELİK

In this study, the required properties of an eight-bar walking mechanism to provide the walking mechanism requirements were determined and some experiments were made on how to design a mechanism that provides these qualities. The basic principles of the walking mechanisms in the literature, the advantages and differences compared to each other were also mentioned.

The ideal coupler curve to move the mechanism on the smooth surfaces and the optimal link distances for this curve were obtained. The kinematic analysis of the mechanism was made and equations that provides to determine position, velocity and acceleration were found.

Since there is no study defining the basic parameters of all kinds of vehicles and terrain conditions in the literature, land classification was made according to the types of surfaces, obstacles and environment that vehicle interact with. Not to depart the subject, just the surface contact vehicles were mentioned in the current study.

The effect of link distance changes to the coupler curve in the optimized walking mechanism was also investigated. Mathematica 10.4 was used for equation solutions and Cinderella 2 software was used for vector analysis. The result of the kinematic analysis showed that the position, velocity and acceleration equations were expressed by multinomial and complex functions. For this reason, the relations between the link distance change and the coupler curve of the mechanism was tried to be expressed by the algebraic functions by using the curve fitting and the linearization method.

After making the land classification and obtaining the equations between the link distances and the coupler curve parameters, it is examined how the necessary mechanism changes should be made according to the common types of obstacles. The obtained results were tested by Algadoo 2.1.0 simulation software, the occurred vibration and movement irregularities were determined and solutions were sought.

Finally, the concept design and 3D drawing of the robot to be applied walking mechanism were made by SolidWorks software. Basic mechanical and electronic components of the robot were selected and static and modal analysis were performed.

Keywords: Mechanism design, walking mechanism, two dimensional terrain classification, mechanism simulation, kinematics-static and modal analysis.

ÖNSÖZ

Yürüme hareketinin robotlara tatbiki için pek çok tasarım ve kontrol sistemi geliştirilmiştir. Bu tasarımlardan biri de tek serbestlik dereceli yürüme mekanizmalarıdır. Tek serbestlik dereceli yürüme mekanizmalarının diğer tasarımlara nispeten bazı önemli üstünlükleri bulunsa da çevre şartlarına uyum, denge bozulmaları durumunda düzeltici tepkinin verilememesi gibi hususlarda eksiklikleri bulunmaktadır. Sonuç olarak temel sorun, mekanizma adından da anlaşılacağı üzere, sisteme yalnızca tek bir değişken ile müdahale edilebiliyor olunmasıdır. Bu nedenle mekanizma uzuv boylarının değiştirilmesi ile serbestlik derecesinin artırılması hedeflenmiş ve bunun üzerine denemeler yapılmıştır. Böylece mekanizmanın bacak uzvunun çizdiği biyel eğrisi değiştirilerek yürüme mekanizmasının uygulandığı robotun değişken arazi koşullarında uyumu sağlanmıştır.

Bu çalışmalar boyunca bilgi ve tecrübesi ile bana kılavuzluk eden değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK'a; engin bilgisi ile yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Ziya ŞAKA'ya; ayrıca hoşgörü ve manevi desteğini her an yanımda hissettiğim aileme teşekkürü borç bilirim.

Ali FEYZULLAH
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tezin Amacı 1
1.2. Tezin Önemi 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **5**

3. TEK SERBESTLİK DERECELİ YÜRÜME MEKANİZMASININ TASARLANMASI **13**

3.1. Dört Çubuk Mekanizmasıyla Yürüme Eğrisinin Sağlanması 14
3.2. Sekiz Çubuk Mekanizması ile Yürüme Mekanizmasının Oluşturulması 15

4. MEKANİZMANIN KİNEMATİK ANALİZİ **17**

4.1. Mekanizmanın Konum Analizi 19
4.1.1. Grafik yöntem 19
4.1.2. Vektörel yöntem 20
4.2. Mekanizmanın Hız Analizi 23
4.2.1. Grafik yöntem 23
4.2.2. Vektörel yöntem 26
4.3. Mekanizmanın İvme Analizi 28
4.3.1. Grafik yöntem 28
4.3.2. Vektörel yöntem 30
4.4. Seviye Değişimi ve Sarsıntı 32

5. SATIH TEMASLI ARAÇLARDA İKİ BOYUTTA ARAZİ VE ENGEL TİPLERİ **34**

5.1. Genel Tanımlamalar 34
5.2. Satıh Temaslı Araçlarda İki Boyutlu Arazi Özellikleri 37
5.2.1. Satıh tipleri 37
5.2.1.1. Destek tipine göre 38
5.2.1.2. Temasa zorlayan etkiye göre 38
5.2.1.3. Temas etkileşimi 42
5.2.1.4. Hareket, şekil değişimi ve tepkisine göre 44
5.2.2. Engel tipleri 46
5.2.2.1. Temas izin durumuna göre 46
5.2.2.2. Şekline göre 47
5.2.2.3. Hareket ve tepkisine göre 50

6. UZUV BOYLARI DEĞİŞİMİNİN BİYEL EĞRİSİNE ETKİSİ 51

6.1. Kontrol Noktaları ile Biyel Eğrisinin Analizi 51
6.2. Simülasyon Sonuçları 64
6.2.1. Rampa inme/çıkma durumu 65
6.2.2. Değişken eğimli zeminde ilerleme durumu 67
6.2.3. Basamak çıkma/inme durumu 70
6.2.4. Engel atlama durumu 73
6.2.5. Gevşek zeminde ilerleme durumu 75

7. KONSEPT TASARIM 78

7.1. Ana ve Yardımcı Parçalar 78
7.1.1. Uzuv ve mafsallar 78
7.1.2. Tahrik elemanları 79
7.1.3. Kontrol, haberleşme birimi ve sensörler 79
7.2. Mukavemet ve Modal Analiz 80
7.2.1. Mukavemet analizi 80
7.2.2. Frekans analizi 82
7.3. Geliştirmeler ve Tasarım Zorlukları 86

8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 91

KAYNAKLAR 93

EKLER 98

EK-1 Tasarlanan Mekanizmada J Noktasının Konumunu Veren Mathematica Kodları 98
EK-2 Tasarlanan Mekanizmada J Noktasının Hız Değerini Veren Mathematica Kodları 99
EK-3 Tasarlanan Mekanizmada J Noktasının İvme Değerini Veren Mathematica Kodları 100
EK-4 AB, AD, FG ve AG Mesnet Mesafe Değişimlerine Karşılık Biyel Parametreleri Veren ve Dosyaya Yazdıran CindyScript Kodları 101

ÖZGEÇMİŞ 102

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Yürüme mekanizmaları, dönme hareketi yapan bir uzuvdan tahrik alıp bunu yürüme hareketine dönüştüren mekanizmalardır. Bu çalışmada, var olan yürüme mekanizmaları araştırılmış ve tasarım özellikleri incelenmiştir. Ortaya çıkarılan sekiz uzuvlu tek serbestlik dereceli yürüme mekanizması, kinematik olarak analiz edilip konum, hız, ivme, seviye vb. özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca bu mekanizmanın uzuv boyutlarındaki değişimin bacak uzvunun çizdiği biyel eğrisine olan etkileri analiz edilmiştir. Böylece diğer yürüme mekanizmalarından farklı olarak uzuvları uzayıp kısalabilen bir tasarım ortaya çıkarılmıştır. Mobil robotlar için iki boyutlu arazi koşullarında satıh ve engel tipleri üzerine sınıflandırma yapılmıştır. Son olarak tasarımın farklı arazi şartlarındaki davranışı simüle edilmiş, deneme sonuçları üzerine yorumlar yapılmıştır.

1.2. Tezin Önemi

Günümüzde robotların kullanımına olan talepteki artış; otomasyon, yazılım ve mekanik sistemlere yapılan yatırımlara da doğru orantılı şekilde yansımaktadır. Genellikle mobil robotların gelişiminde hayvanlar referans olarak kullanılmakta, özellikle denge, uçuş, yürüme gibi hareketleri sağlayacak sistemlerde tersine mühendislik büyük önem arz etmektedir.

Özellikle savunma sanayi, uzay keşif ve ilk yardım-afet araçları, nispeten kısa mesafe yük ve gereç taşıma araçlarında tekerlek ve palet tipi ilerleme mekanizmalarının yetersiz kalışı, hayvanlardakine benzer şekilde yürüme hareketi sağlayan sistemlere olan ilgiyi artırmıştır. Örneğin mayın tarama robotlarında zeminin kimi zaman paletli robotlarla dahi ilerlemeye mani olacak derecede engebeli olması, bu alanda, yürüyen tip robotların kullanılmasını gerektirmektedir.

Ayaklı mobil robotlar grubu içinde değerlendirilen tek serbestlik dereceli yürüme mekanizmalı robotlar, kaba ve engebeli arazide tekerlekli ve paletli mobil robotlara göre daha rahat ilerleme sağlarken, bağımsız ayaklı sistemlere göre de daha yüksek enerji verimliliği ve pürüzsüz-sarsıntısız hareket sağlayabilirler. Maliyet ve teknolojik seviye bakımından ayaklı robotlar, tekerlekli ve paletli robotlara göre daha üst seviyededir. Çünkü ayaklı robotlar denge; görsel analiz ve görüntü işleme, gerçek zamanlı tepki verme

zorunluluğu gibi sebeplerden dolayı sistem denetiminde çok daha karmaşık fiziksel ve matematiksel hesaplamalara, yapay zeka algoritmalarına ihtiyaç duyarlar. Bağımsız ayaklı sistemlerde denge analizi, tahmin dışı bozucu girişler nedeniyle çoğu zaman lineer denklem tanımlamalarının dışına çıkar. Optik, sonar ve manyetik vb. yöntemlerle elde edilen arazi görüntüsünün analizi de teknolojik olarak nispeten yeni sayılabilecek bir düzeydedir. Yine bütün bu işlemlerin gerçek zamanlı olarak yapılıp dinamik tepkinin çok kısa sürelerde oluşturulma gerekliliği, elektronik donanım ve yazılım teknolojisi için yeni hedefler ortaya koymaktadır.

Son yıllarda bağımsız ayaklı robotların geliştirilmesinde önemli teknolojik gelişmeler yapılmıştır. Genellikle bu hususta deneme ve çalışmalar yüksek teknoloji merkezleri ve üniversite ortaklığıyla yapılmaktadır. Örneğin dünyada bu alanda öncü kuruluşlardan Boston Dynamics Şirketi'nin ürettiği dört bacaklı askeri amaçlı Big Dog robotu, Harvard University Concord Field İstasyonu ve NASA Jet İtiş Laboratuvarı'nda üretilmiştir (Siciliano and Khatib, 2016). Benzer olarak Şekil 1.1'de görülen İsviçre menşeli ANYmal robotu, Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilmiştir (Hutter ve ark., 2016).

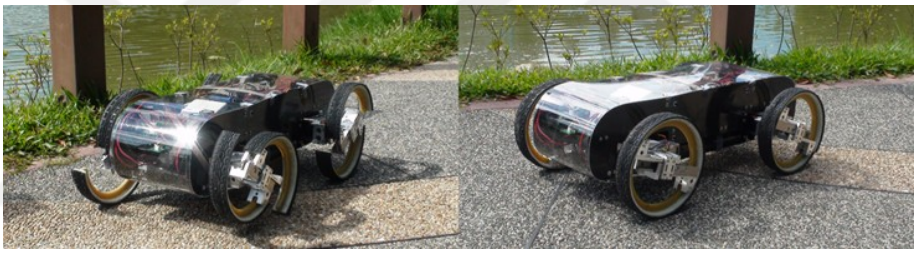


Şekil 1.1. ETH Zurich tarafından geliştirilen ANYmal robotu (Anonymous, 2018)

Bahsedilen bu robotlarda yürüme, her bir mafsalın birbirinden bağımsız servo motorlarla kontrolü ile sağlanmaktadır. Mevcut çalışmada ise yürüme hareketi, tek serbestlik dereceli sekiz uzuvlu bir yürüme mekanizmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu mekanizma, ideal yürüme eğrisine yakın bir yörünge izleyen dört çubuk mekanizmasının geliştirilmiş bir şeklidir. Mekanizma, normal şartlarda düz yüzeylerde ilerleme için

uygundur. İlerleme hızı arttıkça ayak uzvunun biyel eğrisinin yere temas bölgesinde yumuşatma yapılması, hız azaldıkça ise enerji verimliliği açısından bu bölgenin daha keskin olması gerekir. Hayvanların yürüyüş hareketinden örnek verilirse, bir atın rahvan yürüyüşü sırasında atın yere göre seviyesi sabit ve çapraz ayak çiftinin yerle teması neredeyse hiç kesilmezken, atın dörtnala koşusu sırasında sıçrama sebebiyle bu durum gerçekleşmez. Ayrıca atın koşusu sırasında ön ve arka ayak bilekleri esneme ve sönümleme sağlayarak düşüşe bağlı oluşacak vuruntu hareketine engel olurlar.

Yürüme mekanizmalarındakine benzer olarak ayak-tekerlek dönüşebilir hibrit tasarımlar mevcuttur. Bu tip robotların ilerleme yönünden enerji verimliliği yüksektir. Şekil 1.2' de bunlara örnek olarak Ulusal Tayvan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Chen ve ark.'nın (2014) hibrit robotu görülmektedir. Robot, düz ve hafif engebeli arazide ilerlerken yüksek verimlilik nedeniyle tekerlekleri kullanırken kaldırım gibi engelleri aşmak için tekerlerini açarak arazi düzensizliklerinde de yol alabilir.



Şekil 1.2. Tekerlekleri bacağa dönüşebilen robot (Chen ve ark.)

Yürüme hareketi için eklem bölgelerinde servo motor kullanımı, motorların robot ağırlığını sürekli olarak taşıma ve buna karşı iş yapılmasını gerektirdiğinden şarj kullanımını artırmaktadır. Oysa yürüme mekanizmalarında gabarinin sabit kalması sağlanmışsa robot, yerçekimine karşı iş yapmak yerine sadece robotun ileri hareket ettirilmesi için enerji harcar. Bu ise yürüyen robotlarda yürüme mekanizması kullanılması halinde enerji verimliliğinin diğer yürüme sistemlerinden daha üstün olacağının bir göstergesidir.

Bu tezin temel odak noktası, tek serbestlik dereceli sekiz uzuvlu yürüme mekanizmasında uzuv boyutlarının değiştirilmesi ile ortaya çıkan biyel eğrilerinin yorumlanması ve farklı arazi koşullarına göre optimize edilmesidir. Adım uzunluğu ve yüksekliğinin belirlenebilmesi için hangi uzuv boyutlarında ne kadar değişiklik yapılması gerektiği araştırılmıştır. Biyel eğrisindeki bu değişiklikler sayesinde de robotun değişken arazi şartlarına uyumu sağlanmıştır. Ayrıca engel tipleri ve arazi şartları incelenip

sınıflandırılmış, robotun bu engelleri nasıl aşabileceği üzerine tahmin ve değerlendirmeler yapılmıştır. Öncelikle basamak, çukur vb. tip engeller ve gevşek, kaygan, batak zemin vb. şartlarla ilgili genel sınıflandırma yapılıp engellere ait temel değişkenler ortaya konulmuştur.

Yürüme mekanizmalarına ait tasarım ve uyarlamalar, arazi yapısı ve engel farklılıklarının üstesinden gelme çabasını içermektedir. Zemin koşullarının tespiti; sonar gibi sensör veri analizi, görüntü işleme, titreşimin incelenmesi gibi çalışma konularını da kapsamaktadır (Best ve ark., 2013). Yapılan çalışmada arazi türlerinden bahsedilmiş, fakat robotun nasıl bir arazide ilerlediğinin tespiti ile ilgili konularına değinilmemiştir. Arazi sınıflandırma ile ulaşılmak istenen nokta, askeri pentatlonlardakine benzer şekilde robotik bir pentatlon oluşturup (Anonymous, 2017) ortaya konulan ve diğer mevcut tek serbestlik dereceli yürüme mekanizması tasarımlarının hangi engel tiplerinde başarılı, hangilerinde yetersiz olduğunu ortaya koymaktır. Uzuv boyu değişebilir tasarım için bu engelleri aşma hedefi konulmuş ve neticede bir başarı ölçütü elde edilmiştir. Bu sonuçlar diğer yürüme mekanizmaları ile karşılaştırılmış ve yorumlamalar yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

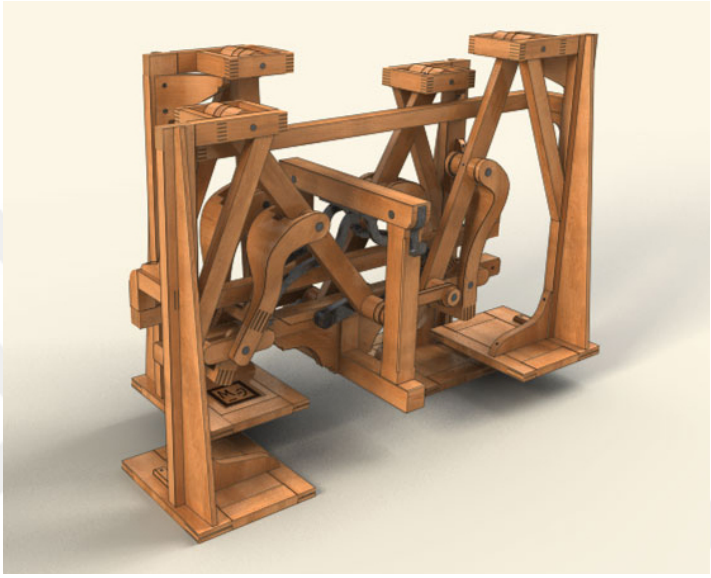
Elektronik ve yazılım sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak mekanik sistemlerde; istenen hareket yörüngesi, hız, ivme, kuvvet/tork gibi niceliklerin temini için karmaşık mekanizmalara başvurma ihtiyacı azalmıştır. Buna karşın aynı hareketin çok sayıda tekrarı, ayrık mekanizmalarda senkronizasyonun sağlanması gibi durumlarda mekanizmalar kullanılması; daha ucuz, yüksek ömürlü ve daha verimli çözümler sunabilmektedir. Tek serbestlik dereceli yürüme mekanizmaları da bazı üstün yönleriyle robotik teknolojisinde öne çıkan sistemlerdendir.

Bu güne kadar çok farklı tek serbestlik dereceli yürüme mekanizması tasarlanmış olmasına rağmen neredeyse hepsi, tasarım bakımından ortak bazı noktalar bulundurur. Örneğin bu tür mekanizmalarda kuvvet aktarımı, tespitleme ve hareket zorlukları nedeniyle genellikle kayar mafsallar kullanılmaz. Kuvvet aktarımı bakımından biraz zayıf olmalarına rağmen uzuv sayısını ve ağırlığı azaltmaları gibi sebeplerden dolayı dişli ve kam çiftleri de zaman zaman kullanılmaktadır. Çoğunlukla düşük maliyet, yağlama kolaylığı, toz, su, nem gibi dış etkilerden etkilenmeme, kuvvetlerin çok büyük olduğu durumlarda eksantere dönüşebilme gibi özelliklerinden dolayı döner mafsallar kullanılır. Bu nedenle yürüme hareketini oluşturan ilk mekanizma genellikle dört çubuk mekanizmasıdır. Buna bağlı diğer mekanizmalar genellikle yürüme hareketini değiştirme amacını taşır.

Yürüme mekanizmalarında aranan niteliklerden bazıları şöyle sıralanabilir:

- Mekanizma ideal yürüme eğrisini sağlayabilmelidir.
- Ayak uzvu yerle temas halindeyken çizgisel hız sabit olmalıdır.
- Yere temas etmeyen ayak, diğer ayak görev eğrisinin sonuna ulaşmadan evvel bu eğrinin başına ulaşmalıdır.
- Mekanizmanın yerden yüksekliği sabit kalmalıdır.
- Mekanizma giriş torku sabit olmalıdır.
- Mekanizma ağırlığı az olmalıdır. Uzuv sayısının artması, düşük bağlama açıları (uzuv kesit alanını artıracağından) vb. mekanizma ağırlığını artırıcı yönde etkide bulunurlar.
- Ağırlık merkezi, destek bölgesinin içinde olmalıdır.
- Mekanizma düz ve ters yönde hareket edebilmelidir (Shigley, 1960).

Bu şartları yerine getirmek üzere pek çok mekanizma tasarlanmıştır. Rus Matematikçi Pafnuty Chebyshev (1821-1894) 'in Plantigrade (düztaban) mekanizması bu konuda yapılmış ilk çalışmalardan biridir (Şekil 2.1). Mekanizma temelde dört uzuvludur ve Lambda mekanizması olarak adlandırılır (Tchebysheva, 1948). Bundan türetilen yürüme mekanizması ise sonraki çalışmalardan farklı olarak aralarında faz farkı bulunan iki ayaktan meydana gelir. Yürümenin sağlanabilmesi için eşlenik mekanizma sayısı iki veya daha fazla seçilir (Akihiro, 2004).



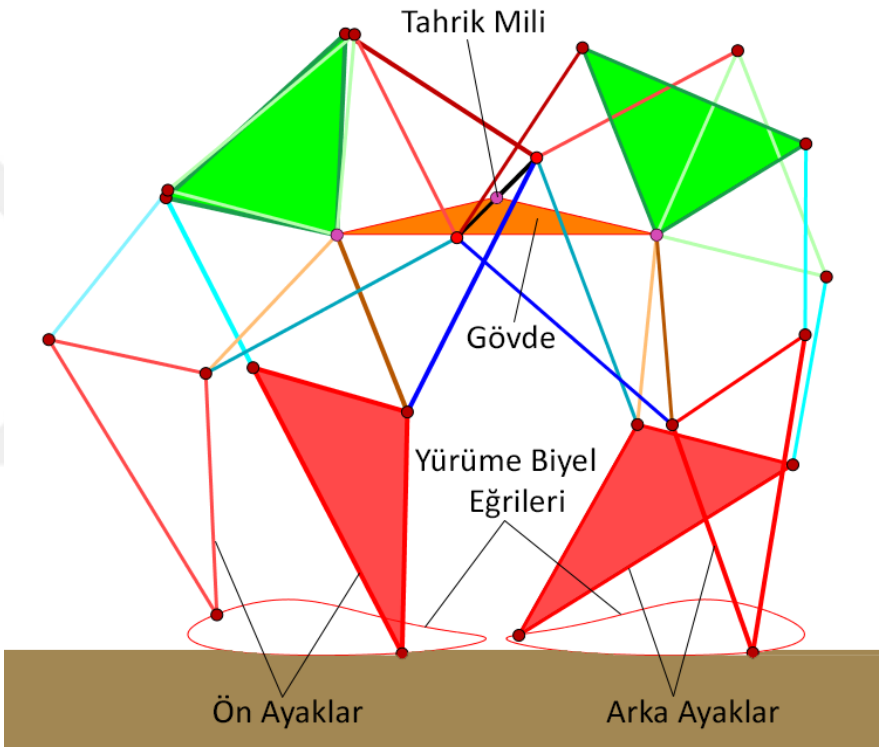
Şekil 2.1. Chebyshev'in Plantigrade mekanizması (Anonymous, 2018)

Hollandalı kinetik heykel sanatçısı Theo Jansen 1990 yılında PVC, ahşap ve kumaştan yapılmış, meltem rüzgarlarından tahrik alan bir mekanizma geliştirmiş ve buna Strandbeest (sahil canavarı) adını vermiştir. Mekanizma sekiz uzuvdan oluşur ve yürümenin sağlanabilmesi için en az dört eşlenik mekanizma (aynı biyel eğrisini çizen ayak sayısı) gereklidir (Burns, 2015). Sonradan bu çalışma üzerine bir çok akademik çalışma ve tez yapılmış, 2016 yılında ise NASA, AREE Projesi kapsamında Venüs'te kullanılacak keşif aracı için bu mekanizmanın konsept olarak kullanılacağını açıklamıştır (Sauder ve ark., 2017).

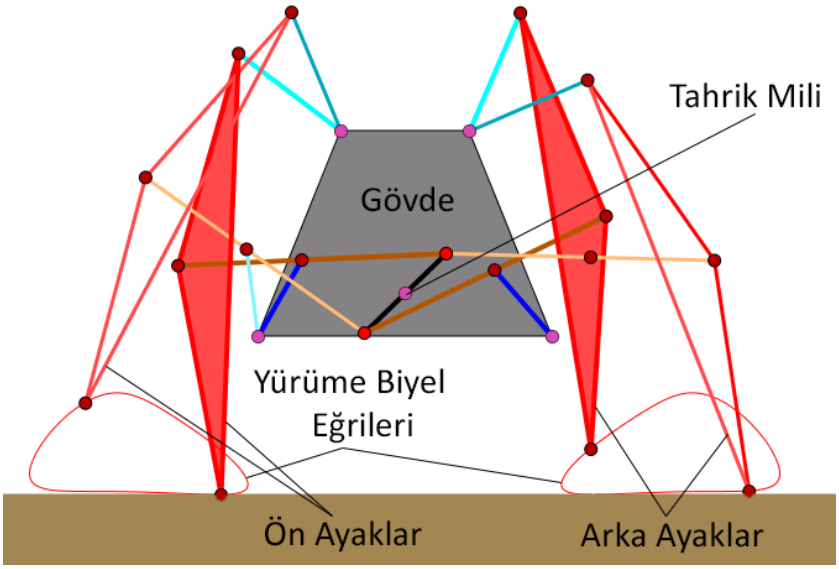
Mekanizmanın basitleştirilmiş çizimi Şekil 2.2'de görülmektedir. Şekildeki pembe noktalar sabit uzva bağlı döner mafsalları göstermektedir. İdeal yürüme eğrisi aynı döner uzva bağlı iki adet dört çubuk mekanizmasından alınan hareket ile sağlanır. Aynı biyel eğrisini çizen iki ayak, tahrik milinden 180° faz farkı ile tahrik almasına karşın ayak uzvunun zaman oranının bire yakın bir değerde olmamasından dolayı, robota ait eşlenik

mekanizma sayısı ikiden fazla seçilir. Aksi halde hareket sırasında robot titreşimi çok fazla olur.

Yürüme mekanizması olarak çok yaygın kullanılan altı uzuvlu Klann mekanizması, liman vinçleri için 1994 yılında Joe Klann tarafından tasarlanmış ve 2001 yılında patenti alınmıştır (Anonymous, 2001). Liman vinçlerinde de yükün kaldırıldıktan sonra hareket ettirilmesi sırasında sadece yatay yönde güç harcanması temel amaç olduğundan vinçlerde izlenen hareketin doğrusallığı, yürüme mekanizmaları ile benzerlik gösterir.

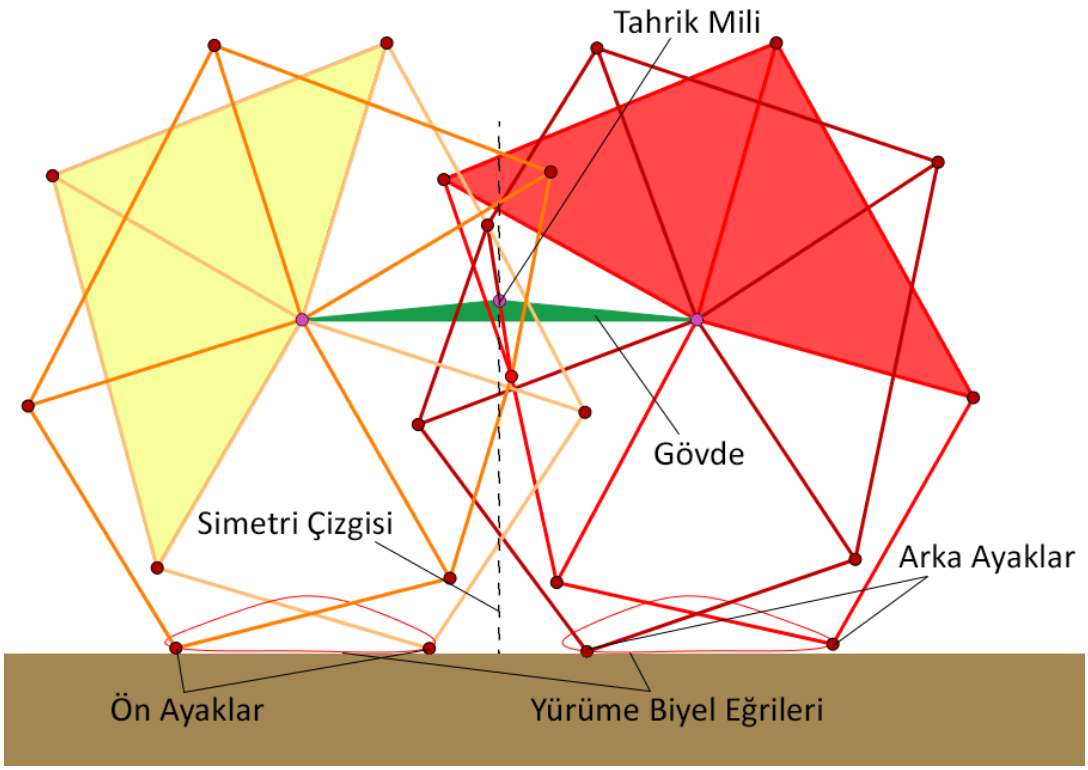


Şekil 2.2. Strandbeest mekanizması



Şekil 2.3. Klann mekanizması

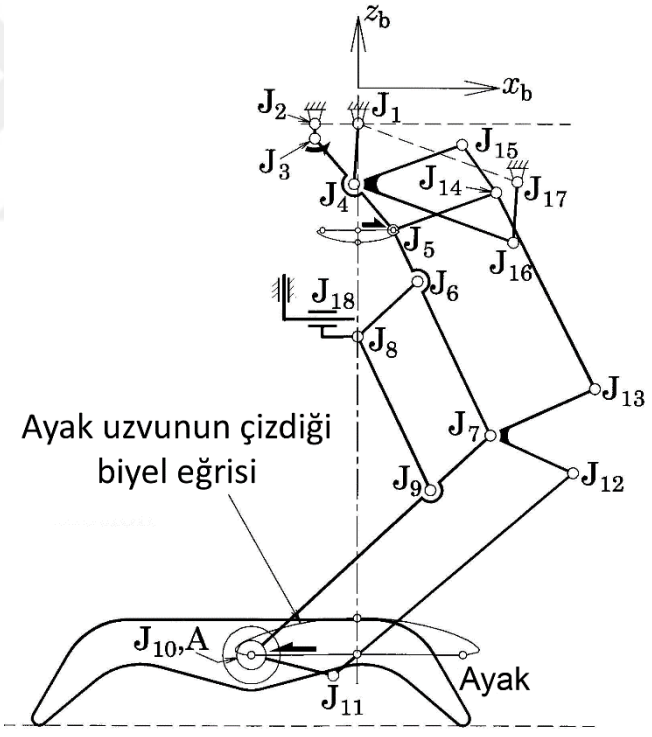
Şekil 2.3'te örnek bir Klann mekanizması görülmektedir. Mekanizmanın çizdiği biyel eğrisinde hücum açısı dik ve adım yüksekliği fazladır. Bu, ileride de açıklandığı gibi gövdede yüksek sarsıntı oluşturmasına rağmen ilerleme zeminindeki engellerin daha kolay aşılmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.4. Ghassaei mekanizması

Benzer olarak MIT Cambridge'den Amanda Ghassaei'nin yürüme mekanizması (Şekil 2.4) sekiz uzuvludur (Ghassaei, 2011). Mekanizma; seviye, hız ve tork sabitliği kriterlerini sağlayan bir tasarım olmasına rağmen ayak uzvunun geniş olması, engel gibi zemindeki süreksizliklerin aşılması konusunda önemli bir dezavantajı mevcuttur. Strandbeest ve Klann mekanizması gibi bu mekanizma da yapı olarak, tahrik noktasından geçen dikey çizgiye göre simetrik yapıdadır. Simetrik olma durumu, robotun ileri veya geriye hareketinde aynı hareket özellikleri göstermesini sağlar.

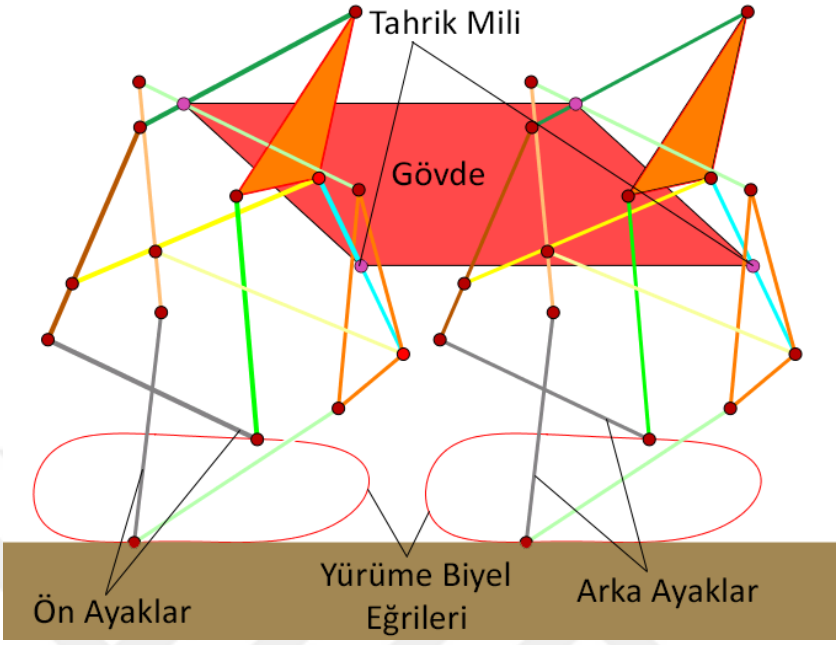
Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nden Takeda ve ark. (2001), yürüme engelliler için düz yüzeyde ilerleyebilen, yokuş tırmanabilen ve merdiven çıkabilen yürüyen sandalye tasarlamışlardır (Şekil 2.5). Böyle bir çalışmada basitlik, güvenilirlik, harekette düzgünlük ve hafiflik, uygulama alanının direkt insana yönelik olmasından dolayı daha büyük bir önem arz etmektedir. Ayrıca bu dizayn, çalışmada ele alınan mekanizmaya temel oluşturan Shieh'in (1996) tasarımıyla büyük ölçüde benzerlik gösterir.



Şekil 2.5. Yürüyen sandalye tasarımının ölçekli genel görünümü (Funabashi ve ark., 1999)

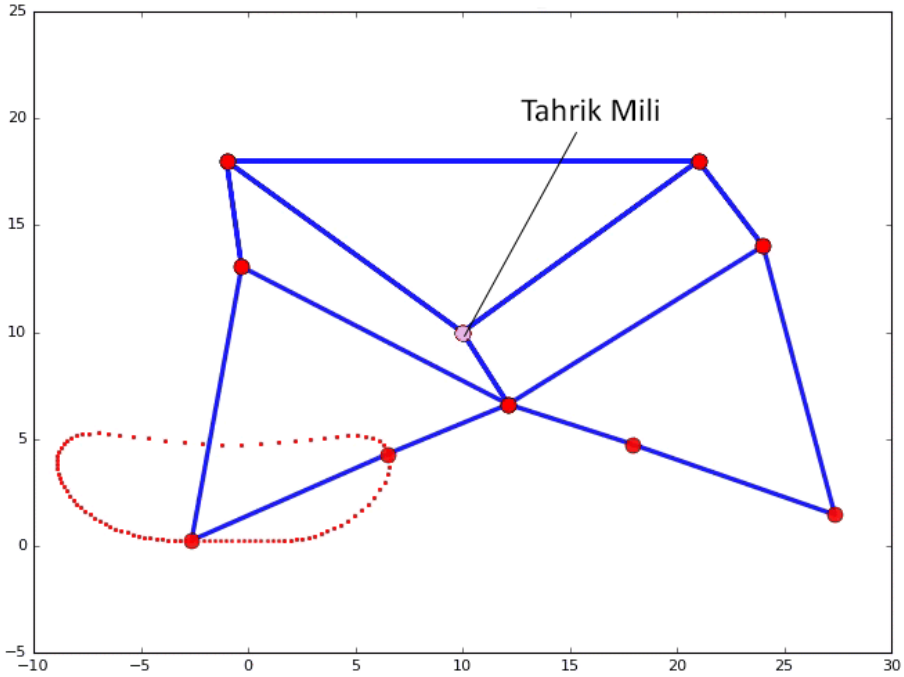
Trotbot mekanizması, dörtnala koşan atın modellenmesi ile oluşturulmuştur. Bu nedenle ayak uzvu, köşeleri kavisli dikdörtgen biçiminde bir biyel eğrisi çizer. Düz yüzeylerin yanı sıra engebeli arazilerde hareket edilebilse de biyel eğrisi şekli göz önüne alındığında enerji verimliliği nispeten azdır. Diğer taraftan biyel eğrisinin dikdörtgenimsi bir yapıda olması mekanizmayı engel atlama konusunda başarılı kılmaktadır. Hareketteki

vuruntu ve titreşim, daha sonra da açıklandığı gibi ayak uzvuna topuk ve parmak mekanizması vb. eklenerek önlenebilir.



Şekil 2.6. Trotbot mekanizması

Şekil 2.6'da sekiz uzuvlu Trotbot mekanizması görülmektedir. Diğer mekanizmalardan farklı olarak ön ve arka ayaklar tek milden değil, iki milden tahrik almaktadır ve simetrik değildir. Bu nedenle robotun öne ve arkaya hareketinde engel atlama becerisi farklıdır. DIY Walkers takımı tarafından Trotbot mekanizması'na ait farklı versiyonlar ve Şekil 2.7'de görülen Strider bağlantısı ortaya çıkarılmıştır (Anonymous 2018).



Şekil 2.7. Strider bağlantısı (Anonymous, 2018)

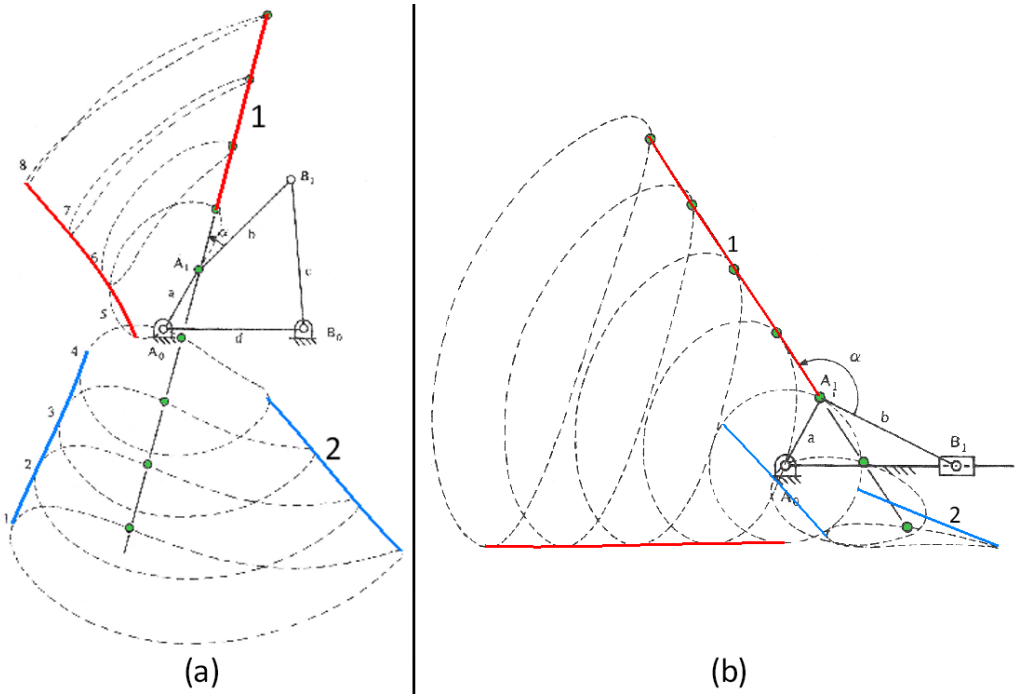
Hareket zemini ve engel tipinin tespiti için yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu tezde incelenen bir diğer kısım ise engel tiplerinin sınıflandırılması ve aşılması için aranan özelliklerdir. Robot yarışmalarında sprint, dik yüzeye tırmanma, basamak çıkma, hendek atlama vb. aşamalar yer almakta fakat bu parkur tipleri için belirli bir standart bulunmamaktadır. Amerikan Makine Mühendisleri Odası (ASME)'nın düzenlediği Student Design Challenge yarışmasında Robot Pentathlon olarak adlandırılan parkurda robotlar koşu, atış, tırmanma, kaldırma, hacim optimizasyonu, enerji verimliliği konularında yarıştırılmaktadır (Mitchell ve ark., 2016). Arazi, SUV, off-road, monster truck araçları ve spor parklarındaki engel tipleri içinse daha özelleşmiş sınıflandırmalar mevcuttur. SUV araçlar için çapraz platform, 3 teker parkuru, değişken eğimli yokuş, konik viraj gibi denge ve tutunma-tırmanma testleri bulunmaktadır (Heißing ve Ersoy, 2011), (Raymond ve ark., 1984). Off-road yarışlarında da muhtelif engebeler, balçık, gevşek zemin koşullarına ait sınıflandırmalar bulunmaktadır (Bidaud ve ark., 2011). Yine spor, kaykay parkları dizaynı ve engel tipleri ile ilgili çalışmalar da mevcuttur (Daskalov, 2015). Askeri parkurlarda da pistteki engel tipleri için sınıflandırmalar bulunmaktadır (Anonymous, 2009).

Roller-coaster tasarımları daha önceden belirlenmiş olan rayların uygun şekilde bir araya getirilmeleri şeklinde yapılır. Raylar genellikle imalatçı tarafından standart ölçülerde üretilir (Väisänen, 2018). Oluşturulan rollercoaster (lunapark treni) tasarımı

NoLimits 2, FVD++ vb. yazılımlarda simüle edilir ve hız, ivme, sarsım (jerk); dik (normal) ve yanal (lateral) kuvvet analizleri yapılır (Weisenberger, 2015), (Hunt, 2018). Raylardaki viraj (turn), eğimli viraj (banked turn), burkulma (twist), dikey ve eğimli dönüşler (vertical, inclined loop), helis (helix, corkscrew) vb. özellikler, daha sonra açıklanmış olan yaw, pitch, roll dönmelerine örnek oluşturması nedeniyle mevcut çalışmada konu edilen arazi analizi için de ek kaynak sağlamaktadır (Pendrill, 2005), (Marden, 2019).

Belli aralıklarda mekanizma uzuv boyları değişimiyle, bu değişim sonucu herhangi bir noktaya ait biyel eğrisinde meydana gelen etki arasında yaklaşık oransal bir bağıntı kurulabilir. Bu yaklaşıma örnek olarak Şekil 2.8'deki dört çubuk mekanizması verilebilir. Şekilden de görüldüğü gibi biyel eğrisindeki ekstremum noktaları uzuv değişimleri ile yaklaşık lineer bağımlıdır.

Şekil 2.8 (a)'da bir dört çubuk mekanizması ve Şekil 2.8 (b)'de krank biyel mekanizması görülmektedir. Her iki mekanizmada da 1(kırmızı renkli) ve 2 (mavi renkli) numaralı eğriler farklı tertiplere aittir. Bu nedenle eğri kesintiye uğramış şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Dört çubuk mekanizmasında uzuv boyu değişimine göre yaklaşık lineer değişim gösteren biyel eğrisi (Söylemez, 1985)

3. TEK SERBESTLİK DERECELİ YÜRÜME MEKANİZMASININ TASARLANMASI

Bir önceki bölümde yürüme mekanizmalarından istenen özellikler belirtilmiştir. Buna göre mekanizmanın yere olan mesafesinde, tahrik kuvvetinde ve ayak uzuv hızında dalgalanmanın olması istenmemektedir. Bu özellikler düz ve rijit zeminler için yeterli kriterlerdir. Birçok tek serbestlik dereceli yürüme mekanizması, mevcut durumu veya küçük eklemeler ile bu kriterleri yerine getirir. Bahsedilen hareketi sağlayan biyel eğrisi Şekil 3.1'de görülmektedir. Oysa engebeli, rampa, merdiven tipi, yüksek eğimli, gevşek zemin gibi zorlu şartlarda aranan eğri çok daha farklıdır. Örneğin yumuşak zeminde eğrinin ön hücum bölgesinin açılı olması gerekir (tank paletlerine benzer şekilde). Basamak gibi bir engele tırmanmak için ise eğrinin ön bölgesinde dik ve düzlemsel bir kısmın bulunması gerekir.



Şekil 3.1. Standart biyel eğrisi (Anonymous, 2018)

Dört ayağı üzerinde yürüyen hayvanlarda hareketin herhangi bir anında çapraz ayak çifti (sağ ön-sol arka ayak gibi) yerle temas halindedir. Ancak çapraz ayaklardan önde olan arkadakine göre belli miktarda faz farkı kadar önce davranır. Dört ayaklı bir robotta da ek bir dengeleme sistemi kullanılmaması halinde dengenin sağlanması açısından yerle temas aynı şekilde yapılmalıdır. Bu durumda dahi tasarımcının dengesizlik sorununu çözmesi gerekir.

Yürüme mekanizmalarındaki çözülmesi gereken bir diğer mesele yer mesafesi değişiminin en aza indirgenmesidir. Ayak sayısının artması, seviye değişimini azaltıcı yönde etki yapar. Böylece daha pürüzsüz bir hareket elde edilebilir fakat robotun engel atlama yeteneği azalır. Bu nedenle dikey titreşimin azaltılması için ya hareketin herhangi bir anında ayaklardan en az biri eğrinin düzlemsel bölgesinde bulunmalı, ya da bilek mekanizması gibi bir ek önleme başvurulmalıdır.

Dört çubuk mekanizmasında genel düzlemsel hareket yapan uzva katı bağlı özel bir nokta, yürüme mekanizmalarında istenen eğriye yakın bir hareket yapar. Hareketin

düzgünleştirilmesi, zamanlamanın (zaman oranı) ayarlanması gibi sebeplerden dolayı uzuv sayısı daha fazla seçilir. Mevcut çalışmada sekiz uzuvlu bir mekanizma seçilmesinin birincil nedeni ise biyel eğrisine etki eden parametre sayısını artırmaktır. Çünkü her uzva ait değişken için, konum vektörü denklemlerine yeni bir parametre eklenir. Aynı düşünce ile uzuv sayısı daha da arttırılabilir. Şimdiye kadar yapılan tasarımlarda altı ve sekiz uzuvlu mekanizmalar çoğunlukta olmakla birlikte on iki uzuvlu tasarımlar da mevcuttur (Pop ve ark., 2011). Uzuv sayısının artışı robot ağırlığını, atalet kuvvetlerini, sürtünmeye harcanan enerjiyi (mafsal sayısının artmasına bağlı olarak) artırdığından çok uzuvlu mekanizmalar optimizasyon kriterleri ile aykırılık gösterir.

Maryland Üniversitesi'nden Win-Bin Shieh'in 8 uzuvlu yürüme mekanizması, bu tezde incelenen mekanizmaya temel referans oluşturmaktadır (Shieh, 1996). Ayrıca bu mekanizma, daha önce ifade edilen Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nden Funabashi ve ark.'nın yürüyen sandalye tasarımı (Şekil 2.5) ile de tasarım teorisi bakımından benzerlik göstermektedir.

3.1. Dört Çubuk Mekanizmasıyla Yürüme Eğrisinin Sağlanması

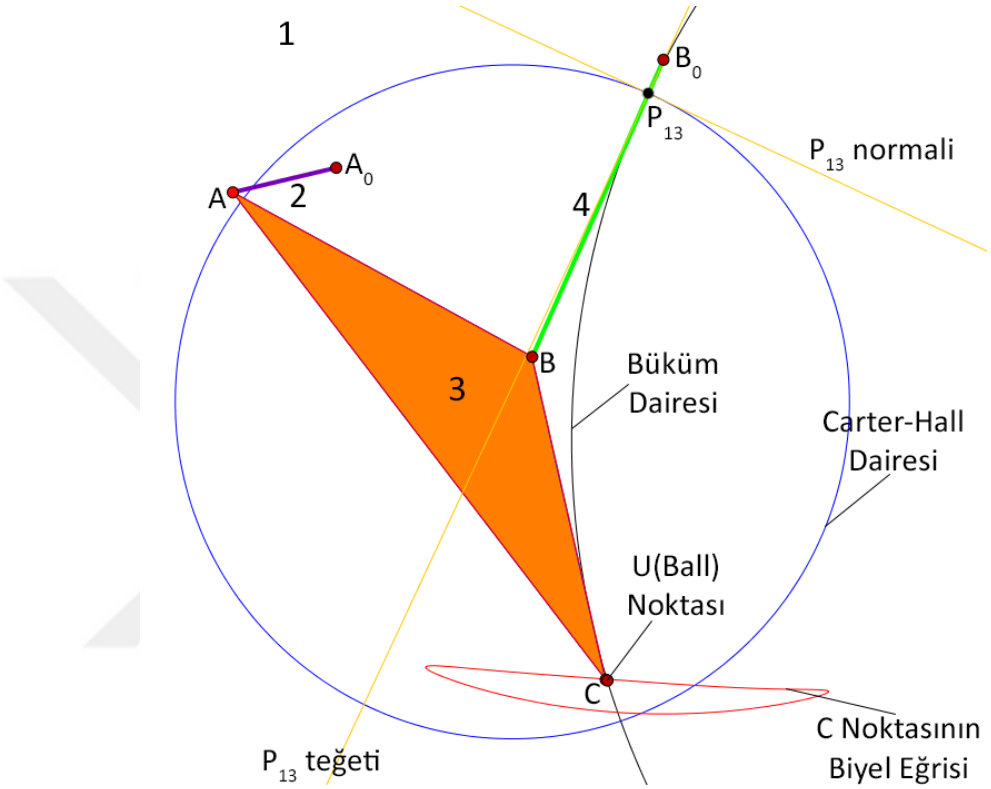
Bir mekanizmada herhangi bir uzva ait noktanın izlediği yörüngenin doğrusal olabilmesi için (yörünge eğrilik yarıçapının sonsuz olması durumu) ya o konumda noktaya ait hız ve ivme vektörü aynı doğrultuda olmalı ya da ivme değeri sıfır olmadır.

Önceki bölümlerde muhtelif yürüme mekanizması tasarımları açıklanmıştır. Tüm bu tasarımlar temelde aynı teoriyi esas alır. Bilindiği gibi büküm dairesi üzerindeki noktalar biyel uzvuna katı olarak bağlanırsa yörüngelerinin bir kısmı doğrusal olur. Bu nokta, Ball Noktası olursa doğrusallık kalitesi artar. Eğer bu nokta Ball-Burmester Noktası olarak ayarlanırsa biyel eğrisindeki doğrusallık daha da artar (Tesar ve ark., 1965).

Teze konu olan ve Şekil 3.2'de görülen mekanizma, temel yürüme eğrisini sağlayan bir dört çubuk mekanizması (1, 2, 3 ve 4 uzuvları ile) ve buna bağlı bir paralelogram mekanizmasından meydana gelmektedir. P_{13} noktası, 3 nolu uzvun ani dönme noktasını, A_0 ve B_0, A ve B'ye ait yörünge eğrilik merkezlerini göstermektedir. Mekanizma, Cinderella 2 yazılımında çizilip dört çubuk mekanizmasındaki 3 nolu uzvun Ball Noktası'nın (U) yine bu uzva katı bağlanması ile doğrusal yörünge elde edilmiştir (Yin ve ark., 2012). Bu, Şekil 3.2'deki C noktasının Ball Noktası üzerinde olması

durumudur. Ball Noktası'nın aynı zamanda büküm dairesi üzerinde bir nokta olduğuna da dikkat edilmelidir.

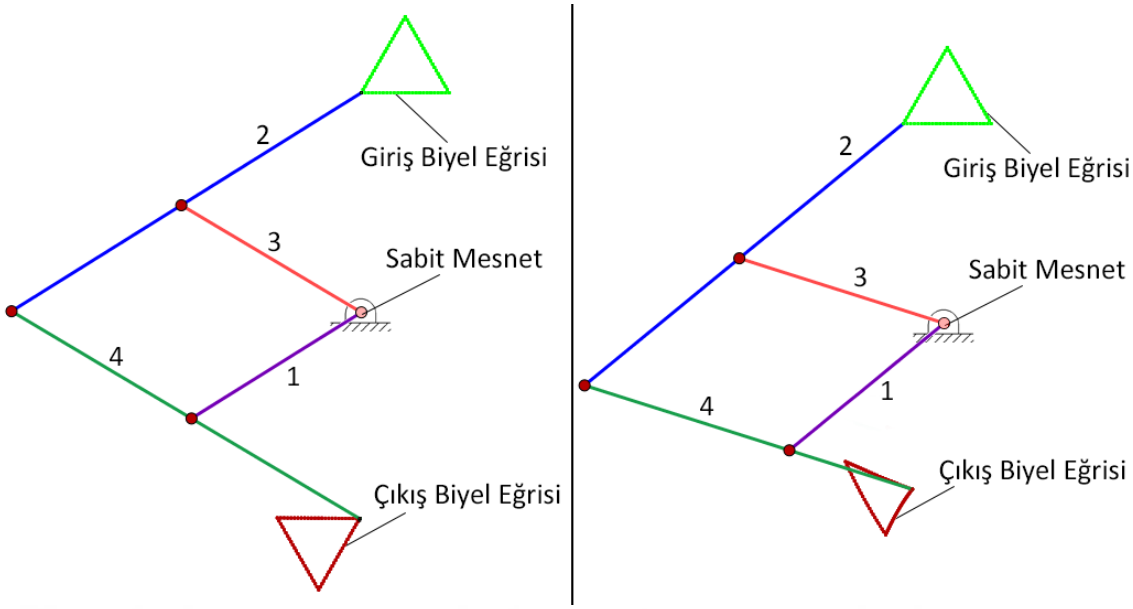
Aranan eğrinin doğrusal kısmı bulunduktan sonra eğrinin Şekil 3.1'deki biyel eğrisine benzemesi için uzuv boylarında değişiklik yapılarak dört çubuk mekanizmasının ölçüleri belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Ball Noktası'nın Carter Hall Dairesi ile bulunması ve büküm dairesi

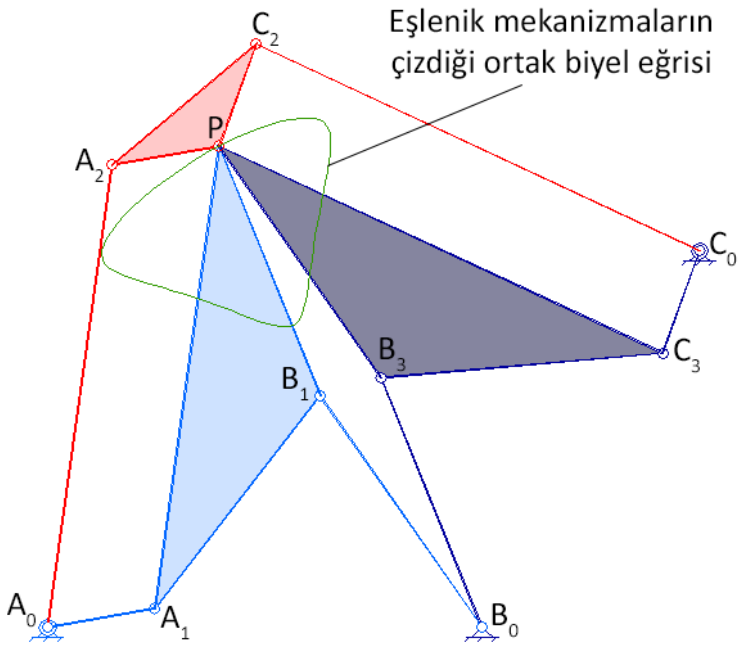
3.2. Sekiz Çubuk Mekanizması ile Yürüme Mekanizmasının Oluşturulması

Dört çubuk mekanizması ile istenen yürüme eğrisine yakın bir eğri elde edildikten sonra bu eğriye katkıda bulunan parametre sayısını artırmak için muhtelif mekanizmalar eklenebilir. Aranan eğri, dört çubuk mekanizması ile yaklaşık olarak elde edildiği için sonraki amaç bu eğrinin türetilmesidir. Paralelogram mekanizmaları, giriş noktasındaki herhangi bir biyel eğrisini belli bir ölçekte çarpıtmak (distorsiyon) veya büyütülüp küçültmek için kullanılabilir. Bunun günlük ve endüstriyel kullanımda pek çok uygulaması bulunmaktadır. Örneğin kalıpçılıkta kullanılan pantografalar, paralelogram mekanizmasının özel bir şeklidir (Koetsier ve Ceccarelli, 2012). Şekil 3.3'de görüldüğü gibi paralelogram mekanizması ile girişteki biyel eğrisi, belli bir yaklaşıklıkla aşağıya taşınmıştır.



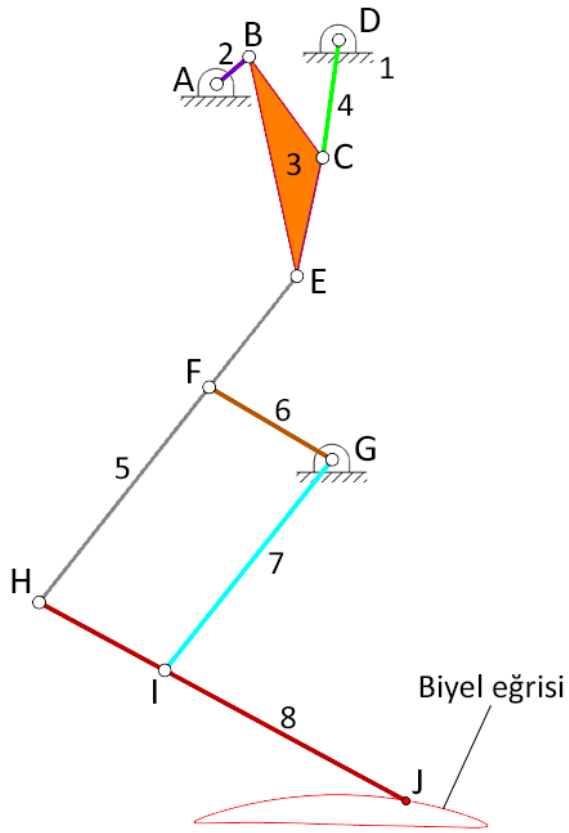
Şekil 3.3. Bir paralelogram mekanizması ile giriş eğrisinin simetriğinin çıkışta elde edilmesi ve uzuv mesafe değişimlerinin çıkış eğrisine etkisi

Mevcut çalışmada 5, 6, 7 ve 8 nolu uzuvların oluşturduğu paralelogram, dört çubuk mekanizmasında oluşturulan yürüme eğrisinin modifikasyonu için kullanılmıştır. Ayrıca Roberts-Chebyschev Teoremi'ne göre, son şeklini alan tasarımla aynı özellikte eşlenik mekanizmalar da türetilebilir (Depeyrot ve Märcher, 2015). Buna göre Şekil 3.2'de gösterilen dört çubuk mekanizması için üç adet, paralelogram mekanizması için de üç adet olmak üzere elde edilen biyel eğrisini çizen dokuz adet eşlenik mekanizma elde edilebilir. Şekil 3.4'te eşlenik mekanizma örneği görülmektedir.



Şekil 3.4. Aynı eğriyi oluşturan eşlenik mekanizmalar (Anonymous, 2019)

4. MEKANİZMANIN KİNEMATİK ANALİZİ



Şekil 4.1. Sekiz uzuvlu yürüme mekanizmasının şematik çizimi

Mekanizma, sabit uzuv dahil sekiz uzuvdan meydana gelmektedir. Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi 12, 23, 34, 14, 35, 56, 16, 17, 78 ve 58 uzuvları birbirlerine döner mafsalla bağlıdır. Burada 6 ve 7 nolu uzuvlar temas halinde olsalar bile çift oluşturmazlar. Bu iki uzuv 1 nolu uzuv ile döner çift oluşturur yani 67 çifti yoktur. İki boyutta Kutzbach Kriteri'ne (Li ve ark., 2013) göre uzuv sayısı $n = 8$, tek serbestlik dereceli çift sayısı $e_1 = 10$ ve iki serbestlik dereceli çift sayısı $e_2 = 0$ olduğuna göre serbestlik derecesi,

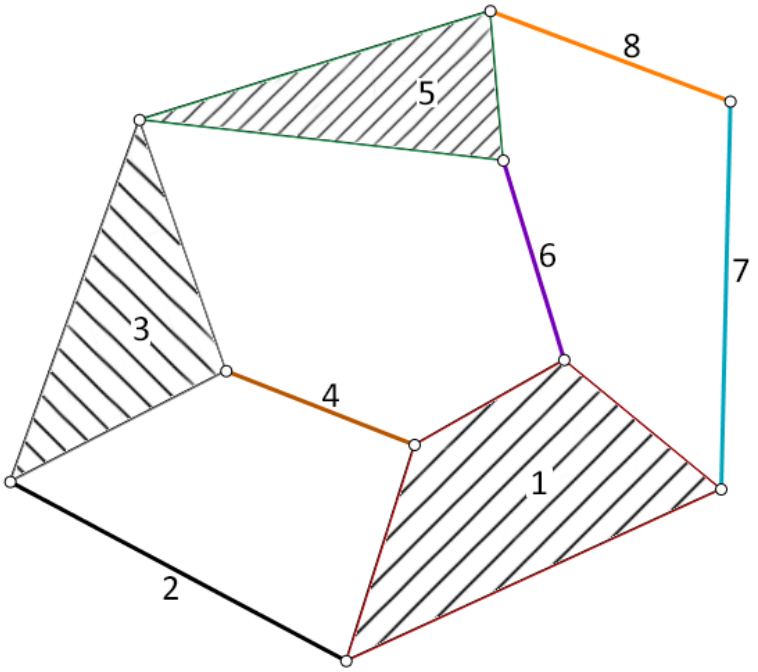
$$F = 3(n-1) - 2.e_1 - e_2 \tag{4.1}$$

denkleminden,

$$F = 3.(8-1) - 2.10 = 1$$

olarak bulunur. $F = 1$ olduğundan mekanizma mecburi hareketlidir. Mecburi hareketliliğin kontrolü için kinematik zincir çizilir. Şekil 4.2'den de görüldüğü gibi

mekanizmaya ait kinematik zincirde açık bölge ve zincirin kapalı uzuv bölgesinde ikiden az döner çift yoktur.



Şekil 4.2. Sekiz uzuvlu yürüme mekanizmasına ait kinematik zincir

İdeal yürüme eğrisini sağlayan mekanizma için ampirik olarak elde edilen uzuv boyları şu değerlerdedir:

$AB = 23.5\ mm$	$BC = 69.4\ mm$	$CD = 66\ mm$
$AD = 72.1\ mm$	$BE = 124.7\ mm$	$CE = 67.3\ mm$
$AG = 218.2\ mm$	$DG = 233.1\ mm$	$EF = 78.6\ mm$
$FG = 79.3\ mm$	$FH = 151.4\ mm$	$HI = 79.3\ mm$
$GI = 149.5\ mm$	$IJ = 152.4\ mm$	

Mekanizma uzunluklarının elde edilmesinden çıkan temel sonuç; mesafe değerinin ne olduğu değil, mesafelerin birbirlerine oranıdır. Bu şekilde mesafeler bir katsayı ile çarpılarak küçültülüp büyütülebilir.

Mekanizma tek serbestlik dereceli olmasına rağmen tez kapsamında uzuv boyları değişebilir bir mekanizma incelendiğinden serbestlik derecesi daha fazla olacaktır. Her uzvun, ayak uzvunun yerle temas noktası olan J'nin çizdiği biyel eğrisine etkisi incelenmiştir. Diğer taraftan robotun farklı engel tiplerine adapte olması için yalnızca AB, AD, AG ve FG uzuvlarının mesafe değişimlerinin biyel eğrisine tesiri incelenmiş, simülasyonlarda sadece bu uzuv parametreleri üzerinde değişiklik yapılmıştır.

4.1. Mekanizmanın Konum Analizi

Mekanizmaya ait konum, hız ve ivme analizleri hem grafik hem de vektörel yöntemle yapılmıştır. Bir mekanizmanın analizlerinin grafik yöntemle yapılması; elde edilmek istenen eğriye uygunluğun, uzuv ve mafsal çakışmalarının kontrolü, hız ve ivmenin değerlendirilmesi gibi konularda mekanizma tasarımcısına büyük kolaylık sağlar. Grafik yöntemle çözüm için Cinderella 2 yazılımı kullanılmıştır.

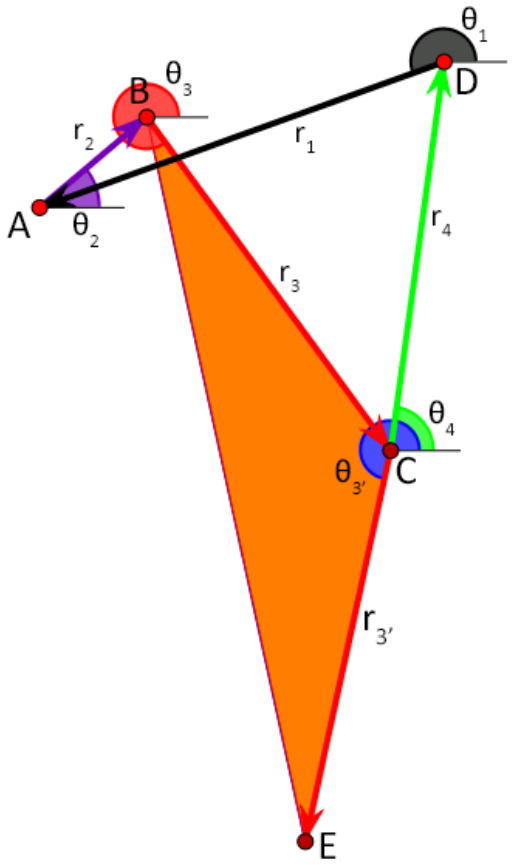
Diğer taraftan mekanizmanın vektörel analizi, hız ve ivmenin sayısal değerinin tam olarak bilinmesi, mekanizmayı kontrol eden mikroişlemciye giriş verisi sağlamak için gereklidir. Çünkü grafik çözümle elde edilen netice, direkt olarak kontrolcülerde kullanılamaz. Ayrıca bahsedildiği gibi Cinderella, Windows işletim sistemi üzerinde çalışan bir yazılımdır. Grafik analizin mikrokontrolörde kullanılması için Cinderella'nın bu platformda çalışabilir olması gereklidir. Oysa vektörel yöntemle ve lineerleştirme ile elde edilen cebirsel denklemler mikrokontrolörlerde işletilebilir özelliktedir. Bu nedenle her iki yöntem ile de analizler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

4.1.1. Grafik yöntem

Uzuv boyları bulunan mekanizma Cinderella yazılımında çizildikten sonra hareketin herhangi bir anında mekanizmaya ait noktaların koordinatları CindyScript ile bulunabilir. Örneğin J noktasının koordinatı konsol penceresinde görüntülenmek isteniyorsa,

```
println("Jx=" + J.x);
println("Jy=" + J.y);
```
komutu kullanılabilir.

4.1.2. Vektörel yöntem



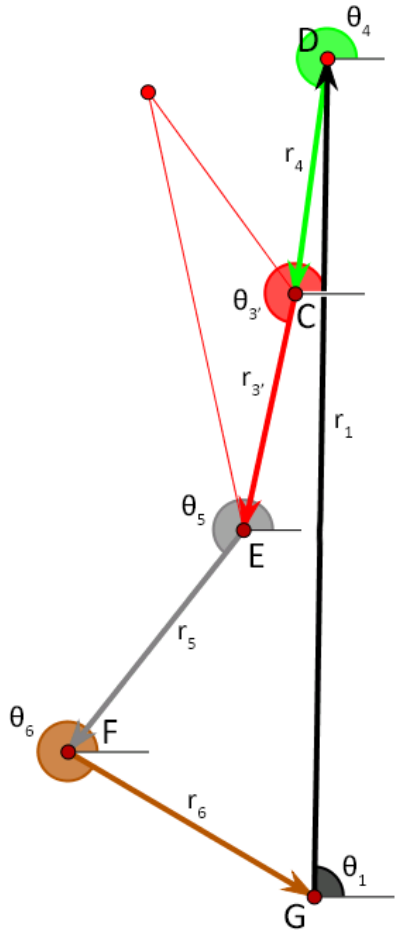
Şekil 4.3. 1,2,3 ve 4 nolu uzuvların oluşturduğu poligon

Şekil 4.3'te görülen vektör poligonuna göre r_1, r_2, r_3, r_4, θ_1 ve θ_2 parametreleri biliniyor. Vektörlerin poligon oluşturduğundan yatay ve dikey bileşenleri toplamı sıfır olmalıdır. Buradan vektörlerin yatay ve dikey bileşenleri için,

$$r_1.\cos\theta_1 + r_2.\cos\theta_2 + r_3.\cos\theta_3 + r_4.\cos\theta_4 = 0 \quad (4.2)$$

$$r_1.\sin\theta_1 + r_2.\sin\theta_2 + r_3.\sin\theta_3 + r_4.\sin\theta_4 = 0 \quad (4.3)$$

yazılır. Böylece (4.2) ve (4.3) denklemlerinden θ_3 ve θ_4 bulunur.



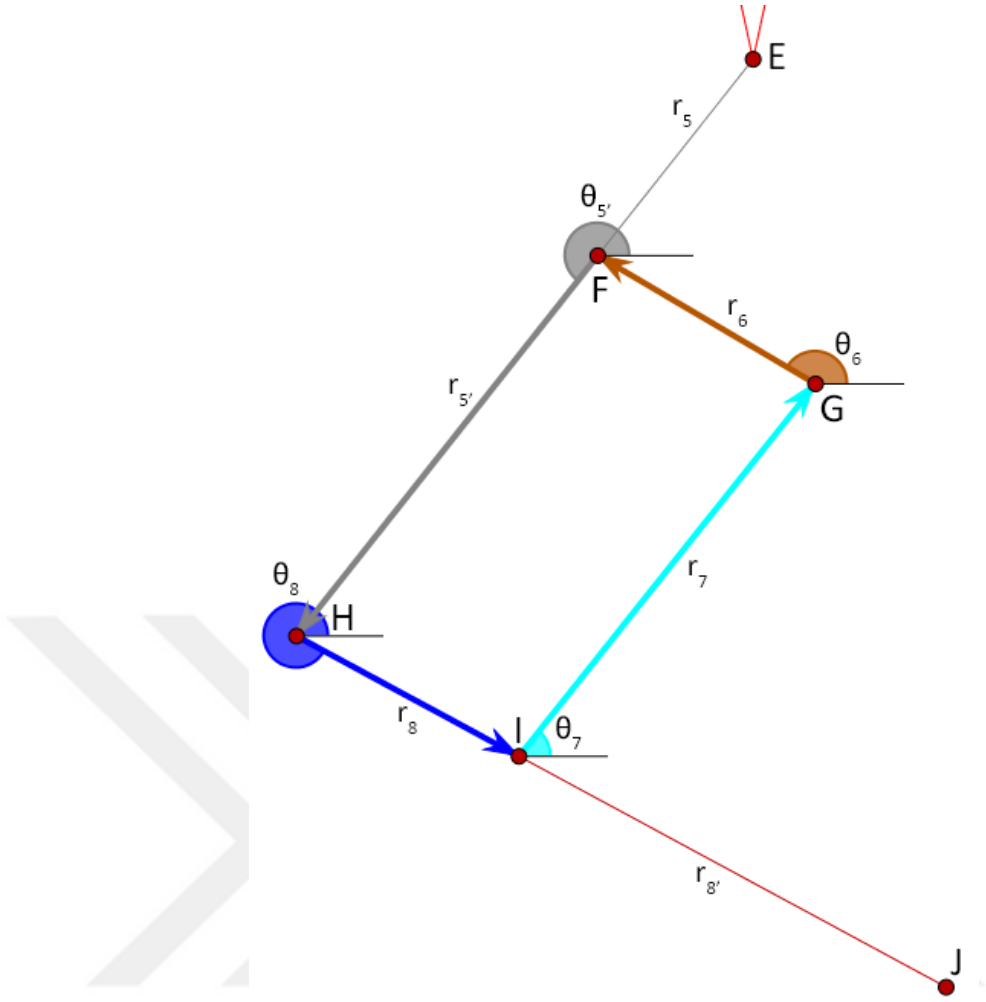
Şekil 4.4. 1, 3, 4, 5 ve 6 nolu uzuvların oluşturduğu poligon

Şekilde görülen vektör poligonuna göre r_1, $r_{3'}$, r_4, r_5, r_6, θ_1, $\theta_{3'}$ ve θ_4 parametreleri biliniyor. Buradan vektörlerin yatay ve dikey bileşenleri,

$$r_1.\cos\theta_1 + r_4.\cos\theta_4 + r_{3'}.\cos\theta_{3'} + r_5.\cos\theta_5 + r_6.\cos\theta_6 = 0 \qquad (4.4)$$

$$r_1.\sin\theta_1 + r_4.\sin\theta_4 + r_{3'}.\sin\theta_{3'} + r_5.\sin\theta_5 + r_6.\sin\theta_6 = 0 \qquad (4.5)$$

olur. Böylece (4.4) ve (4.5) denklemlerinden θ_5 ve θ_6 bulunur.



Şekil 4.5. 5, 6, 7 ve 8 nolu uzuvların oluşturduğu poligon

Şekilde görülen vektör poligonuna göre $r_{5'}$, r_6, r_7, r_8, θ_5 ve θ_6 biliniyor. Bu parametreler kullanılarak vektörlerin yatay ve dikey bileşenler denklemleri,

$$r_{5'}.\cos\theta_{5'} + r_8.\cos\theta_8 + r_7.\cos\theta_7 + r_6.\cos\theta_6 = 0 \quad (4.6)$$

$$r_{5'}.\sin\theta_{5'} + r_8.\sin\theta_8 + r_7.\sin\theta_7 + r_6.\sin\theta_6 = 0 \quad (4.7)$$

olarak yazılır. (4.6) ve (4.7) denklemleri kullanılarak θ_7 ve θ_8 bulunur. Tahrik uzvunun herhangi bir konumunda J noktasının konumu için,

$$X_J = X_A + r_1.\cos\theta_1 + r_{1'}.\cos(\theta_{1'} + 180°) + r_7.\cos(\theta_7 + 180°) + r_{8'}.\cos\theta_8 \quad (4.8)$$

$$Y_J = Y_A + r_1.\sin\theta_1 + r_{1'}.\sin(\theta_{1'} + 180°) + r_7.\sin(\theta_7 + 180°) + r_{8'}.\sin\theta_8 \quad (4.9)$$

dneklemleri yazılır. Mekanizmanın varsayılan durumu için EK-1'deki Mathematica kodlarındaki uzuv boyları geçerlidir. Bu uzunluklara göre vektörel eşitliklerin, değişken uzuv açıları olan teta2 (θ_2) göre sembolik olarak çözülmesi mümkün olmakla birlikte çok

uzun sonuçlar ortaya çıkar. Ayrıca her vektör poligonu denkleminden, poligonu oluşturan vektörlerin düz veya ters tertip olma durumuna göre de birden çok sonuç ortaya çıkmaktadır. Wolfram Mathematica'da, EK-1'de yer alan kodlar yazılarak herhangi bir teta2 (θ_2) açısı ve AD, AB, AG ve FG değeri için sayısal sonuçlar elde edilir. Birinci teta3 (θ_3) ve teta4 (θ_4) için iki çözüm, teta5 (θ_5) ve teta6 (θ_6) için dört sonuç (ikisi imajiner), teta7 (θ_7) ve teta8 (θ_8) için de sekiz sonuç (dördü imajiner) bulunur. Mekanizmanın tertibine uygun olan çözüm First[], Part[] ve Last[] fonksiyonları ile elde edilmiştir. J noktasının konumu ise,

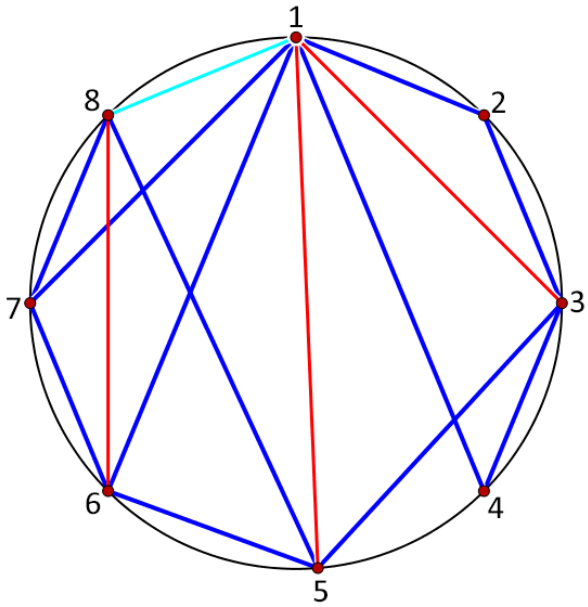
```
v=Solve[{a,b,c,d,e,f},{teta3,teta4,teta5,teta6,teta7,teta8}];
(*KONUM ANALİZİ*)
Jx=Ax+AD*Cos[Pi+(teta1 Degree)]+DG*Cos[Pi+(teta11
Degree)]+GI*Cos[Pi+teta7]+IJ*Cos[teta8]/.v[[2]]
Jy=Ay+AD*Sin[Pi+(teta1 Degree)]+DG*Sin[Pi+(teta11
Degree)]+GI*Sin[Pi+teta7]+IJ*Sin[teta8]/.v[[2]]
```

kodu ile bulunur. Bu sonuçlardan sonra yine aynı vektör poligonlarından hız ve ivme değerleri de elde edilebilir.

4.2. Mekanizmanın Hız Analizi

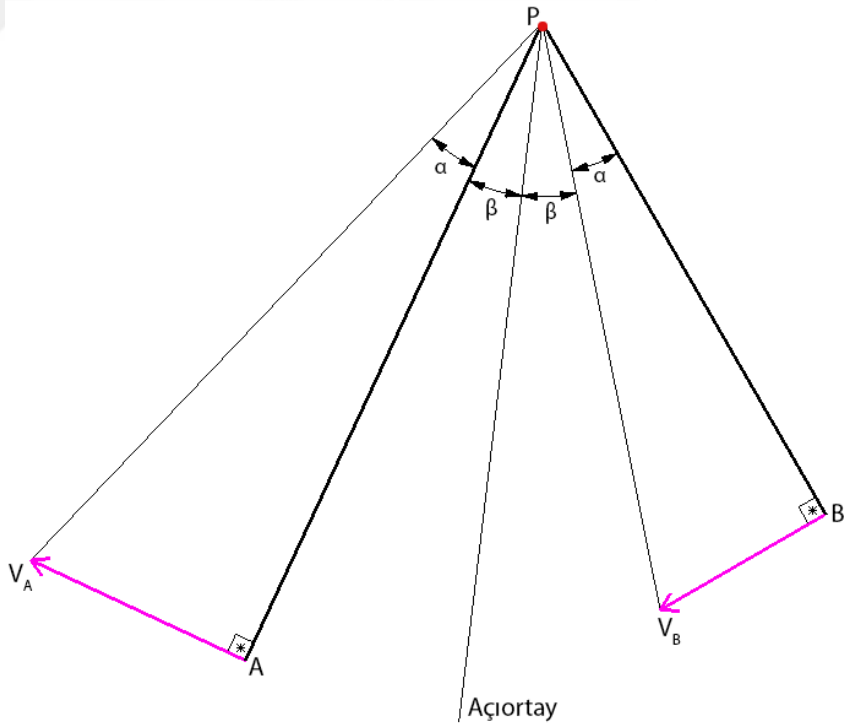
4.2.1. Grafik yöntem

Mekanizmanın 8 nolu uzvu üzerindeki herhangi bir noktaya ait hız vektörünün bulunabilmesi için 8'in 1 numaralı uzva göre ani dönme merkezinin (P_{18}) bulunması gereklidir. Şekildeki pol çokgeninde mevcut çiftlerin oluşturduğu pol noktaları mavi, yardımcı poller kırmızı ve hedef pol noktası turkuaz renkte çizgi ile belirtilmiştir.



Şekil 4.6. P_{18} noktası için bulunması gereken diğer pol noktalarını gösteren daire

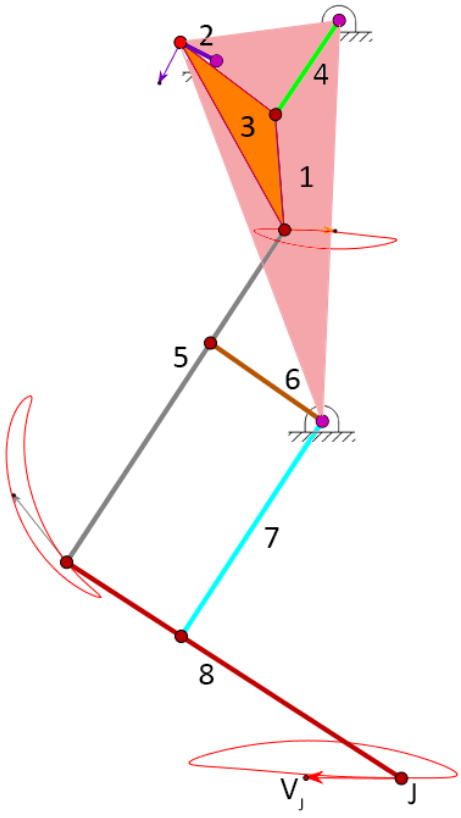
Şekil 4.6'da da görüldüğü gibi P_{18}, mekanizmayı oluşturan çiftlerden direkt olarak elde edilemez. Bu nedenle P_{18}'in bulunabilmesi için önce P_{68} ve P_{15} bulunmalıdır. P_{15} de mekanizmadan direkt olarak bulunamaz. P_{15}'in de bulunabilmesi için P_{13}'ün bulunması gerekir. P_{13} ise mekanizma çiftlerinden elde edilebilir.



Şekil 4.7. Bir noktasına ait hız vektörü ve ani dönme merkezi bilinen bir uzva ait başka bir noktanın hızının bulunması

Bir uzuv üzerindeki noktalar, o uzva ait ani dönme noktasına göre aynı açısal hızda hareket ederler. Buna göre uzva ait bir noktanın hız vektörü ve ani dönme polü biliniyorsa, bu uzuv üzerindeki herhangi bir noktanın hızı da elde edilebilir. Bu durum Şekil 4.7'de görülmektedir.

Böylece önce 3 nolu uzva ait hız, sonra 5 ve buradan da 8 nolu uzva ait hız vektörü bulunur (Shigley ve ark., 1988).



Şekil 4.8. J noktasının hız vektörünün (V_J) grafik yöntemle bulunması

Şekil 4.8'de görülen J hızının büyüklüğünü gösteren V_J hız vektörü yatay ve dikey bileşenden meydana gelmektedir. Bu nedenle robotun ilerleme hızının bulunması için vektör uzunluk değerinin, yatay eksenle yaptığı açının kosinüsü ile çarpılması gereklidir.

4.2.2. Vektörel yöntem

Şekil 4.3'teki vektör poligonu için,

$$\left(\vec{A}\right) = r_1.\hat{\mu}(\theta_1) + r_2.\hat{\mu}(\theta_2) + r_3.\hat{\mu}(\theta_3) + r_4.\hat{\mu}(\theta_4) = 0 \quad (4.10)$$

$$\left(\dot{\vec{A}}\right) = r_2.\omega_2.\hat{\sigma}(\theta_2) + r_3.\omega_3.\hat{\sigma}(\theta_3) + r_4.\omega_4.\hat{\sigma}(\theta_4) = 0 \quad (4.11)$$

$$\left(\dot{\vec{A}}\right).\hat{\mu}(\theta_4) = r_2.\omega_2.\sin(\theta_4 - \theta_2) + r_3.\omega_3.\sin(\theta_4 - \theta_3) = 0 \quad (4.12)$$

$$\left(\dot{\vec{A}}\right).\hat{\mu}(\theta_3) = r_2.\omega_2.\sin(\theta_3 - \theta_2) + r_4.\omega_4.\sin(\theta_3 - \theta_4) = 0 \quad (4.13)$$

denklemleri yazılır. Burada $r_1, r_2, r_3, r_4, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ bilindiğinden ω_3 ve ω_4 bulunabilir. Ayrıca $\omega_3 = \omega_{3'}$ olur. Şekil 4.4'teki vektör poligonundan,

$$\left(\vec{B}\right) = r_1.\hat{\mu}(\theta_1) + r_4.\hat{\mu}(\theta_4) + r_{3'}.\hat{\mu}(\theta_{3'}) + r_5.\hat{\mu}(\theta_5) + r_6.\hat{\mu}(\theta_6) = 0 \quad (4.14)$$

$$\left(\dot{\vec{B}}\right) = r_4.\omega_4.\hat{\sigma}(\theta_4) + r_{3'}.\omega_{3'}.\hat{\sigma}(\theta_{3'}) + r_5.\omega_5.\hat{\sigma}(\theta_5) + r_6.\omega_6.\hat{\sigma}(\theta_6) = 0 \quad (4.15)$$

$$\left(\dot{\vec{B}}\right).\hat{\mu}(\theta_6) = r_4.\omega_4.\sin(\theta_6 - \theta_4) + r_{3'}.\omega_{3'}.\sin(\theta_6 - \theta_{3'}) + r_5.\omega_5.\sin(\theta_6 - \theta_5) = 0 \quad (4.16)$$

$$\left(\dot{\vec{B}}\right).\hat{\mu}(\theta_5) = r_4.\omega_4.\sin(\theta_5 - \theta_4) + r_{3'}.\omega_{3'}.\sin(\theta_5 - \theta_{3'}) + r_6.\omega_6.\sin(\theta_5 - \theta_6) = 0 \quad (4.17)$$

denklemleri yazılır. r_1, $r_{3'}$, r_4, r_5, r_6, θ_1, $\theta_{3'}$, θ_4, θ_5, θ_6, ω_3 ve ω_4 bilindiğinden dolayı ω_5 ve ω_6 bulunabilir. $\omega_5 = \omega_{5'}$ olur. Şekil 4.5'teki poligondan ise,

$$\left(\vec{C}\right) = r_6.\mu(\theta_6) + r_{5'}.\mu(\theta_{5'}) + r_8.\mu(\theta_8) + r_7.\mu(\theta_7) = 0 \quad (4.18)$$

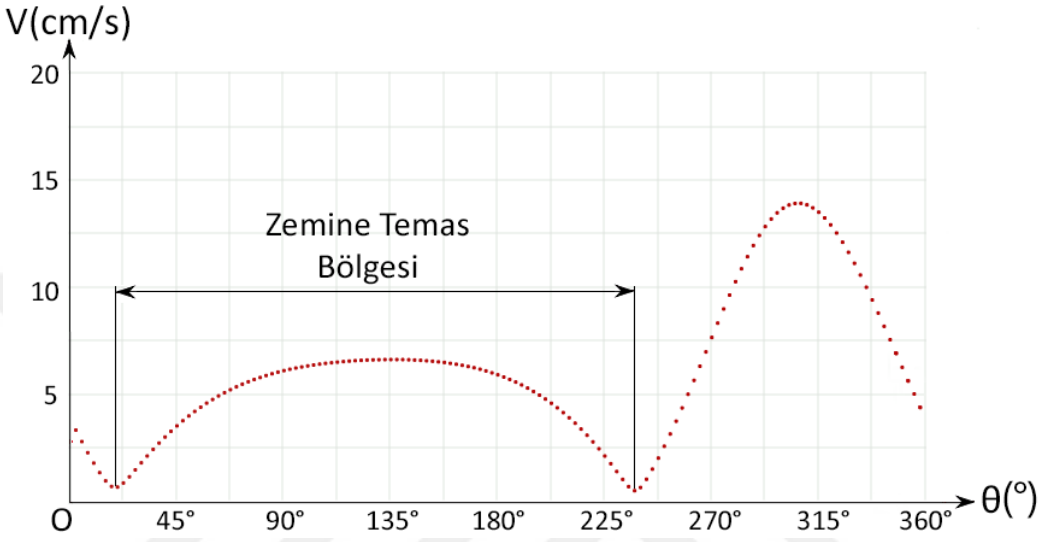
$$\left(\dot{\vec{C}}\right) = r_6.\omega_6.\sigma(\theta_6) + r_{5'}.\omega_{5'}.\sigma(\theta_{5'}) + r_8.\omega_8.\sigma(\theta_8) + r_7.\omega_7.\sigma(\theta_7) = 0 \quad (4.19)$$

$$\left(\dot{\vec{C}}\right).\hat{\mu}(\theta_8) = r_6.\omega_6.\sin(\theta_8 - \theta_6) + r_{5'}.\omega_{5'}.\sin(\theta_8 - \theta_{5'}) + r_7.\omega_7.\sin(\theta_8 - \theta_7) = 0 \quad (4.20)$$

$$\left(\dot{\vec{C}}\right).\hat{\mu}(\theta_7) = r_6.\omega_6.\sin(\theta_7 - \theta_6) + r_{5'}.\omega_{5'}.\sin(\theta_7 - \theta_{5'}) + r_8.\omega_8.\sin(\theta_7 - \theta_8) = 0 \quad (4.21)$$

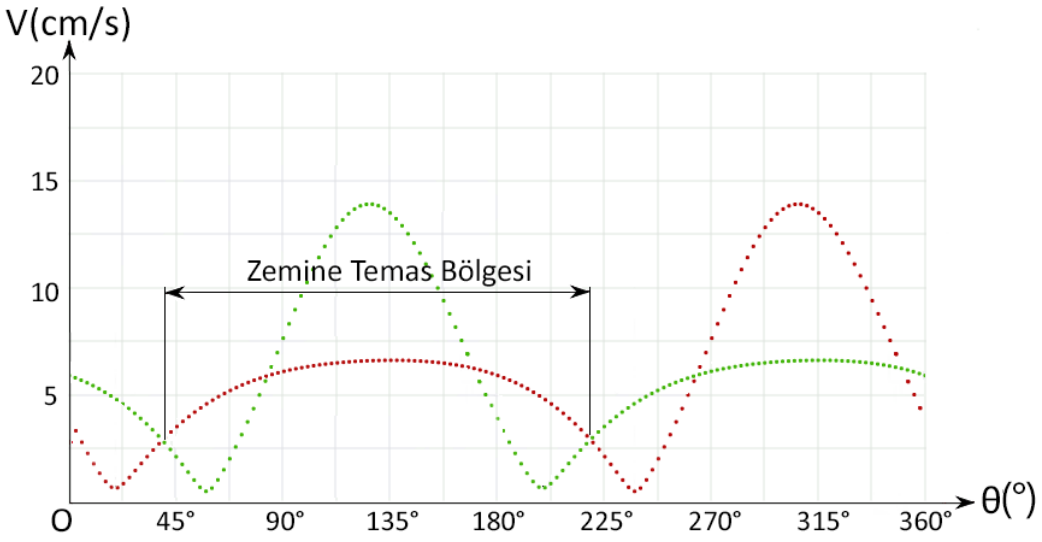
elde edilir. $r_{5'}$, r_6, r_7, r_8, $\theta_{5'}$, θ_6, θ_7, θ_8, $\omega_{5'}$ ve ω_6 bilindiğinden dolayı ω_7 ve ω_8 bulunabilir. Bu denklemlerin çözümü için Mathematica kodları EK-2'de verilmiştir.

Buna göre J noktasının çizgisel ve teğetsel hız grafiği Şekil 4.9'da görülmektedir. Zemine temasın başladığı ve sonlandığı bölgelerde hız değeri düşüktür. Bu bölgeler robotun ilerleme hızında değişimlere neden olmaktadır ki bu istenmeyen bir durumdur.



Şekil 4.9. J noktasına ait hız vektörünün krank açısına göre değişimi

Hız dalgalanmasını önlemek için aynı milden tahrik alan ve aralarında $360/n$ (Buradaki n yürüme mekanizması adedidir.) kadar faz farkı bulunan ayak mekanizması kullanılabilir. Böylece yalnızca hız değeri robotun ilerleme hızına yakın değerde olan ayağın zemine teması sağlanarak hız düzgünsüzlüğü azaltılmış olunur. Anlatılan bu durum Şekil 4.10'da, iki eşlenik yürüme mekanizması kullanılarak örneklenmiştir.



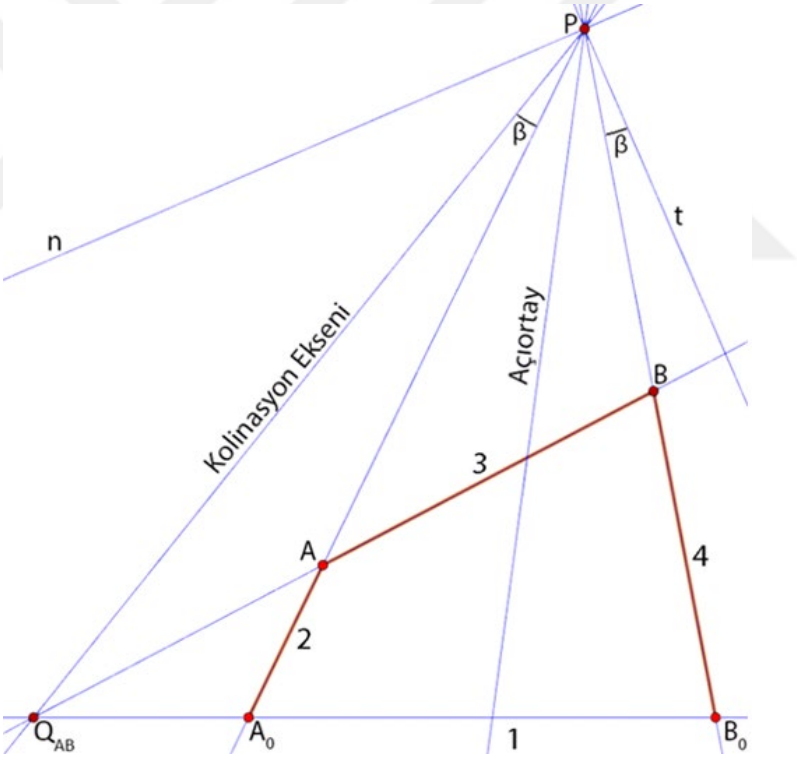
Şekil 4.10. $n = 2$ eşlenik yürüme mekanizması kullanılması durumunda zemine temas bölgesindeki meydana gelen daralma

Bir diğer çözüm tahrik motoru devrinde değişiklik yapılarak hız dalgalanmasının önlenmesidir. Fakat bu durum krank motorunda fazladan zorlanmaya neden olur. Ayrıca ayak uzvuna eklenen topuk veya ökçe mekanizması gibi geliştirmeler ile de bu sorun çözülebilir. Bu tip eklemeler, Bölüm 7.3 "Geliştirmeler ve Tasarım Zorlukları" kısmında anlatılmıştır.

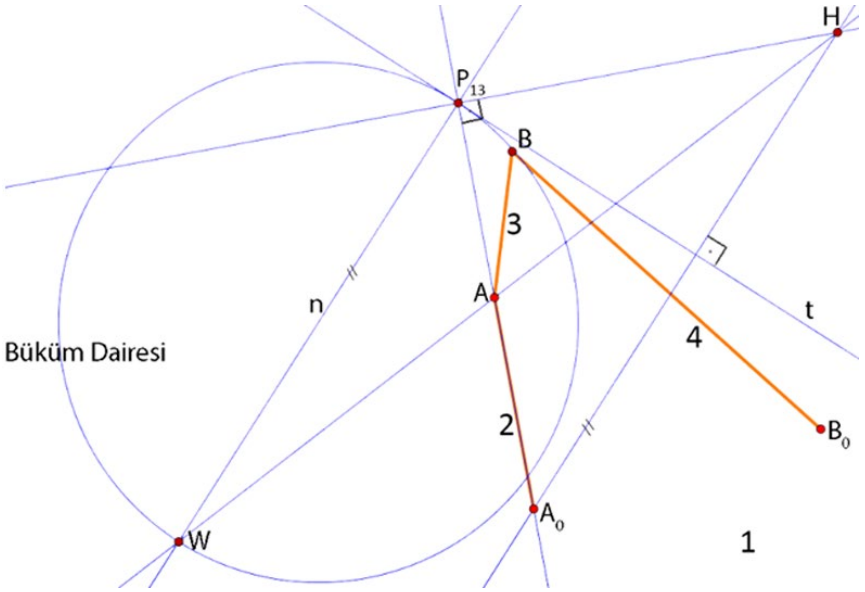
4.3. Mekanizmanın İvme Analizi

4.3.1. Grafik yöntem

8 nolu ayak uzvundaki herhangi bir noktanın ivmesini bulabilmek için ivme merkezinin (G), ivme merkezinin bulunabilmesi için ise büküm dairesinin bulunması gerekir. G'nin bulunması için de kolinasyon ekseni ve büküm dairesinin bilinmesi gereklidir. Şekil 4.11'de kolinasyon ekseninin, Şekil 4.12'de de büküm dairesinin bulunuş yöntemi görülmektedir.

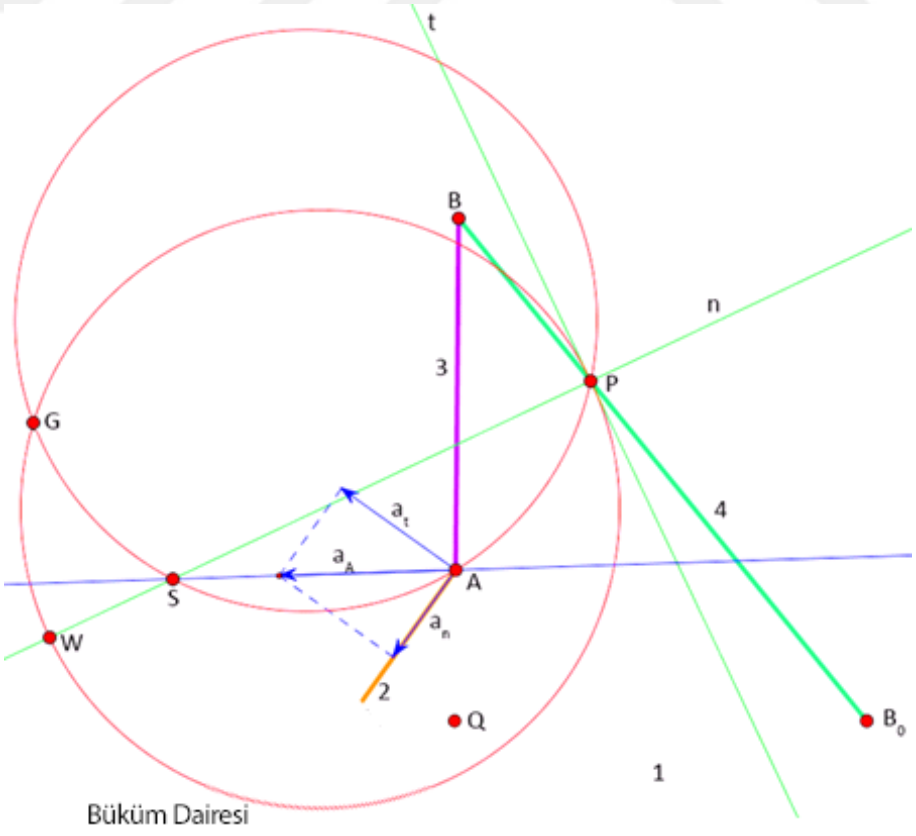


Şekil 4.11. 4 çubuk mekanizmasında Q noktası, kolinasyon ekseni ve ani dönme polünün (P) teğet ve normalinin bulunması

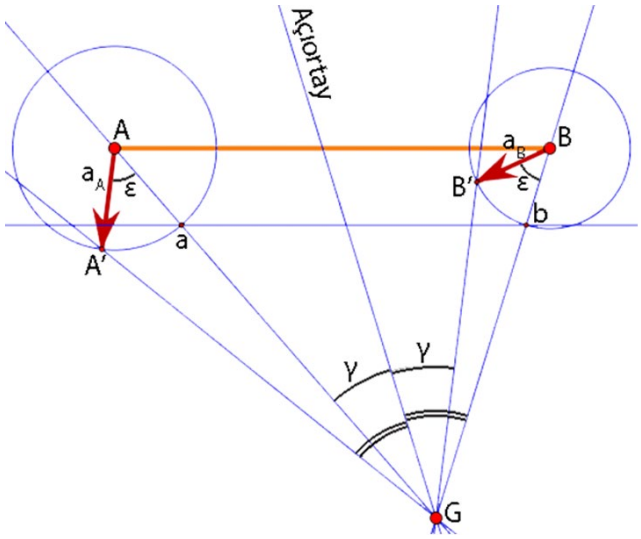


Şekil 4.12. 4 çubuk mekanizmasında W noktası ve büküm dairesinin bulunması

Büküm dairesi bulunduktan sonra uzva ait ivme merkezi elde edilebilir. Bir uzva ait ivme merkezi ve uzuv üzerindeki herhangi bir noktanın ivmesi biliniyorsa, o uzvun üzerindeki bir başka noktanın da ivmesi bulunabilir. Şekil 4.13'de ivme merkezinin (G), Şekil 4.14'te de bir noktasının ivmesi ve G noktası bilinen uzuv üzerindeki bir başka noktanın ivmesinin bulunuş yöntemi görülmektedir (Erdman ve Sandor, 1984).



Şekil 4.13. 4 çubuk mekanizmasında G noktasının bulunması



Şekil 4.14. 4 çubuk mekanizmasında bir noktasının ivmesi ve G noktasının bilinen uzuvdaki başka bir notaya ait ivmenin bulunması

Mekanizmanın ivme analizinde bu yöntemler sırasıyla 3, 5 ve 8 numaralı uzuvlar için ayrı ayrı uygulanmıştır.

4.3.2. Vektörel yöntem

Vektörel yöntemle hız analizinde elde edilen sonuçları, (4.10) ve (4.11) denklemlerini kullanarak,

$$(\vec{\ddot{A}}) = -r_2.(\omega_2^2).\hat{\mu}(\theta_2) + r_3.\alpha_3.\hat{\sigma}(\theta_3) - r_3.(\omega_3^2).\hat{\mu}(\theta_3) + r_4.\alpha_4.\hat{\sigma}(\theta_4) - r_4.(\omega_4^2).\hat{\mu}(\theta_4) = 0 \quad (4.22)$$

$$\left(\vec{\ddot{A}}\right).\hat{\mu}(\theta_4) = -r_2.(\omega_2^2).\cos(\theta_4 - \theta_2) + r_3.\alpha_3.\sin(\theta_4 - \theta_3) - r_3.(\omega_3^2).\cos(\theta_4 - \theta_3) - r_4.(\omega_4^2) = 0 \quad (4.23)$$

$$\left(\vec{\ddot{A}}\right).\hat{\mu}(\theta_3) = -r_2.(\omega_2^2).\cos(\theta_3 - \theta_2) - r_3.(\omega_3^2) + r_4.\alpha_4.\sin(\theta_3 - \theta_4) - r_4.(\omega_4^2).\cos(\theta_3 - \theta_4) = 0 \quad (4.24)$$

bulunur. Bu denklemlerden r_2, r_3, r_4, θ_3, θ_4, ω_3 ve ω_4 bilindiğinden α_3 ve α_4 bulunur. $\theta_3 = \theta_{3'}$, $\omega_3 = \omega_{3'}$ ve $\alpha_3 = \alpha_{3'}$ olur. (4.14) ve (4.15) denklemlerinden ise,

$$(\vec{\ddot{B}}) = r_4.\alpha_4.\hat{\sigma}(\theta_4) - r_4.(\omega_4^2).\hat{\mu}(\theta_4) + r_{3'}.\alpha_{3'}.\hat{\sigma}(\theta_{3'}) - r_{3'}.(\omega_{3'}{}^2).\hat{\mu}(\theta_{3'}) + r_5.\alpha_5.\hat{\sigma}(\theta_5) - r_5.(\omega_5^2).\hat{\mu}(\theta_5) + r_6.\alpha_6.\hat{\sigma}(\theta_6) - r_6.(\omega_6^2).\hat{\mu}(\theta_6) \quad (4.25)$$

$$(\vec{\ddot{B}}).\hat{\mu}(\theta_6) = r_4.\alpha_4.\sin(\theta_6-\theta_4) - r_4.(\omega_4^2).\cos(\theta_6-\theta_4) + \mathrm{r}_{3'}.\alpha_{3'}.\sin(\theta_6-\theta_{3'}) - \mathrm{r}_{3'}.(\omega_{3'}{}^2).\cos(\theta_6-\theta_{3'}) + r_5.\alpha_5.\sin(\theta_6-\theta_5) - r_5.(\omega_5^2).\cos(\theta_6-\theta_5) - r_6.(\omega_6^2) \quad (4.26)$$

$$(\vec{\ddot{B}}).\hat{\mu}(\theta_5) = r_4.\alpha_4.\sin(\theta_5-\theta_4) - r_4.(\omega_4^2).\cos(\theta_5-\theta_4) + r_{3'}.\alpha_{3'}.\sin(\theta_5-\theta_{3'}) - \mathrm{r}_{3'}.(\omega_{3'}{}^2).\cos(\theta_5-\theta_{3'}) - r_5.(\omega_5^2) + r_6.\alpha_6.\sin(\theta_5-\theta_6) - r_6.(\omega_6^2).\cos(\theta_5-\theta_6) \quad (4.27)$$

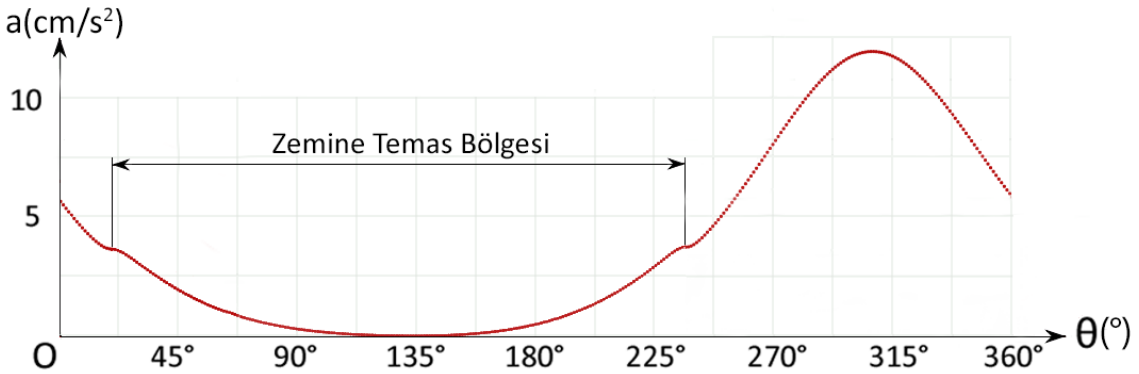
Bu denklemlerden ise r_1, $\mathrm{r}_{3'}$, r_4, r_5, r_6, θ_1, $\theta_{3'}$, θ_4, θ_5, θ_6, ω_3, ω_4, $\alpha_{3'}$ ve α_4 bilindiğinden dolayı α_5 ve α_6 bulunur. Ayrıca $\theta_5 = \theta_{5'}$, $\omega_5 = \omega_{5'}$ ve $\alpha_5 = \alpha_{5'}$ olur. (4.18) ve (4.19) denklemlerinden de,

$$(\vec{\ddot{C}}) = r_6.\alpha_6.\hat{\sigma}(\theta_6) - r_6.(\omega_6^2).\hat{\mu}(\theta_6) + r_{5'}.\alpha_{5'}.\hat{\sigma}(\theta_{5'}) - \mathrm{r}_{5'}.(r_{5'}{}^2).\hat{\mu}(\theta_{5'}) + r_8.\alpha_8.\hat{\sigma}(\theta_8) - r_8.(\omega_8^2).\hat{\mu}(\theta_8) + r_7.\alpha_7.\hat{\sigma}(\theta_7) - r_7.(\omega_7^2).\hat{\mu}(\theta_7) \quad (4.28)$$

$$(\vec{\ddot{C}}).\hat{\mu}(\theta_8) = r_6.\alpha_6.\sin(\theta_8-\theta_6) - r_6.(\omega_6^2).\cos(\theta_8-\theta_6) + r_{5'}.\alpha_{5'}.\sin(\theta_8-\theta_{5'}) - \mathrm{r}_{5'}.(r_{5'}{}^2).\cos(\theta_8-\theta_{5'}) - r_8.(\omega_8^2) + r_7.\alpha_7.\sin(\theta_8-\theta_7) - r_7.(\omega_7^2).\cos(\theta_8-\theta_7) \quad (4.29)$$

$$(\vec{\ddot{C}}).\hat{\mu}(\theta_7) = r_6.\alpha_6.\sin(\theta_7-\theta_6) - r_6.(\omega_6^2).\cos(\theta_7-\theta_6) + r_{5'}.\alpha_{5'}.\sin(\theta_7-\theta_{5'}) - \mathrm{r}_{5'}.(\omega_{5'}{}^2).\cos(\theta_7-\theta_{5'}) + r_8.\alpha_8.\sin(\theta_7-\theta_8) - r_8.(\omega_8^2).\cos(\theta_7-\theta_8) - r_7.(\omega_7^2) \quad (4.30)$$

denklemleri bulunur. Bu denklemlerden ise $r_{5'}$, r_6, r_7, r_8, $\theta_{5'}$, θ_6, θ_7, θ_8, $\omega_{5'}$, ω_6, α_5 ve α_6 bilindiğinden α_7 ve α_8 bulunur. İvme değerleri EK-3'te yer alan Mathematica kodları ile elde edilmiştir.

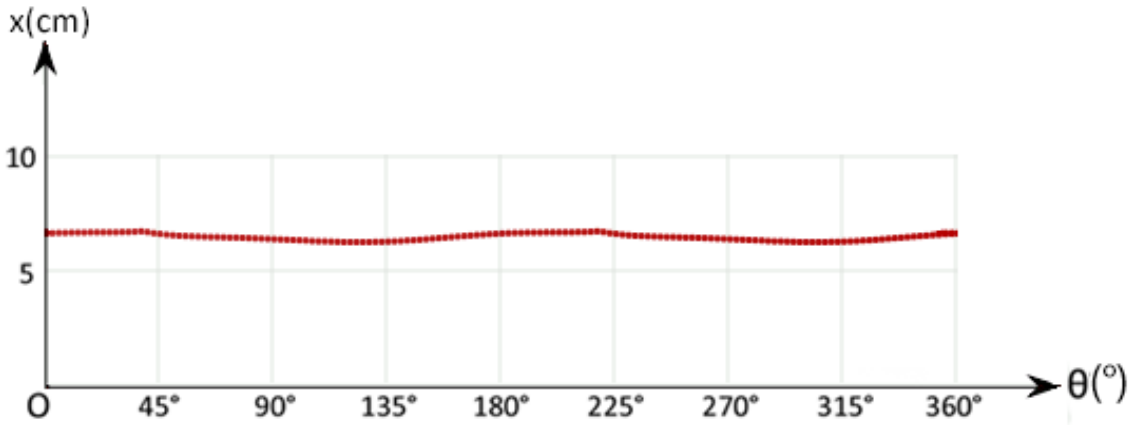


Şekil 4.15. J noktasına ait ivme vektör uzunluğunun krank açısına göre değişimi

Şekil 4.15'te, yukarıdaki denklemlerde teta2 açısına sonlu sayıda değer verilerek elde edilen ivme grafiği görülmektedir. Buna göre zemine temas bölgesindeki ivme değeri, hızın artıyor oluşunu göstermektedir. Oysa temas bölgesinde ivmenin sıfıra yakın bir değerde olması beklenmekteydi. Bu nedenle Şekil 4.12'deki ivme değeri, ivmenin teğetsel ve normal bileşeninin toplamı olduğundan kısmen yanıltıcıdır.

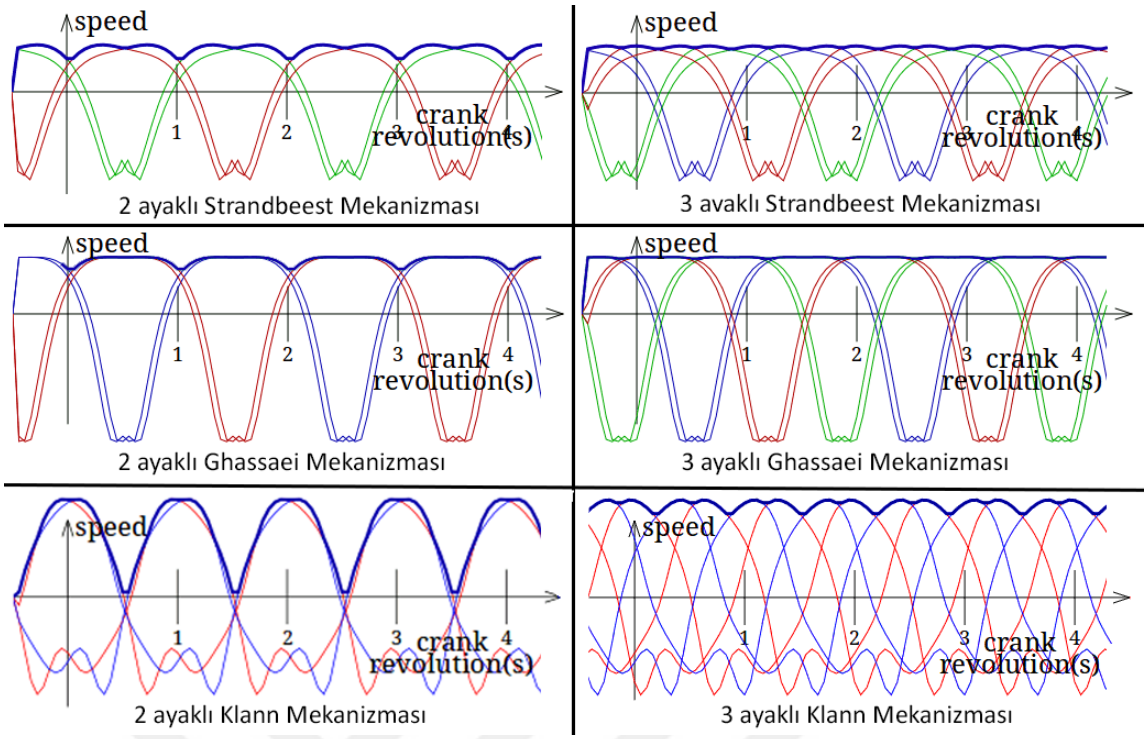
4.4. Seviye Değişimi ve Sarsıntı

Robot, tek ayak ile yürüme yapamadığından bu durum için seviye değişiminin incelenmesi anlamlı değildir. Mevcut çalışmada iki veya daha fazla ayak için seviye değişimi ele alınmıştır. Şekil 4.16'da belirlenen bir düzleme göre iki eşlenik mekanizma içeren robotun seviye değişimi görülmektedir. Burada x(seviye) değerinin ne olduğundan çok x'teki değişimin ne kadar olduğu önemlidir. Seviyedeki değişim, robotun ayak mekanizmasındaki eşlenik sayısı artırılarak azaltılabilir fakat bu, robotun engel atlama yeteneğini oldukça azaltır.



Şekil 4.16. İki eşlenik ayak mekanizması kullanılması durumunda robotta meydana gelen seviye değişimi

Sarsıntıya sebep olan bir diğer önemli faktör de robotun ilerleme hızındaki değişimlerdir. Hareket eğrisinin yere temas bölgesinde düzlemsel kısmın ortasında hız değeri fazlayken başlangıcı ve sonunda hız daha azdır. Bu durum, robotun hızlanıp yavaşlamasına neden olur. Mekanizmanın kinematik yapısı hız dalgalanmasını belirleyen en önemli unsurdur. Şekil 4.17'de iki ve üç ayaklı farklı tip mekanizmaların krank açısına göre hız eğrileri görülmektedir. Ayak sayısının artırılmasının hız dalgalanmasını azaltıcı yönde de etkide bulunduğuna dikkat edilmelidir.



Şekil 4.17. Çeşitli mekanizmaların iki ve üç ayaklı versiyonlarının krank açısı-hız eğrileri. İnce çizgiler her bir ayağa ait hızı, kalın mavi çizgiler ise robota ait ilerleme hızını göstermektedir (Anonymous, 2019).

5. SATIH TEMASLI ARAÇLARDA İKİ BOYUTTA ARAZİ VE ENGEL TİPLERİ

Bu bölümde arazi ve engel tiplerinin sınıflandırılması ile ilgili çalışmalar da açıklanmıştır. Mobil aracın ilerlediği arazi çeşidinin belirlenmesi konusunda muhtelif kuruluşlar tarafından, ilgilenilen branşta dokümanlar ve aracın yeteneklerini açıklayan veri belgeleri (datasheetler) düzenlenmektedir. Yine de mobil araçlar, ilerleme ve hareket kabiliyetlerine göre paletli robotlar, magnet sürüngenler, vatoz yüzücüler, otomobiller, hava araçları vb. gruplar halinde ayrılmaktadır. Örneğin gemilerin veya metal bacaların temizlenmesi, boyanması, ultrasonik test vb. işlemler için geliştirilmiş robot (MaggUT, MINOAS) (Anonymous, 2019), (Eich ve Vögele, 2011) , off-road aracı, yüksek gerilim telleri onarım robotu gibi tanımlamalar nicel ifadeler olmamakla birlikte, o aracın hareket yeteneğini açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Oysa engel tiplerinin sınıflandırılarak engel parametrelerinin belirlenip, aracın hangi engel tipinde hangi parametre aralığında ilerleyebildiğinin bildirilmesi daha somut ve kesin bir anlatım olacaktır. Bu amaçla tez kapsamında incelenen konulardan biri de arazi ve engel tiplerinin sınıflandırılması olmuştur.

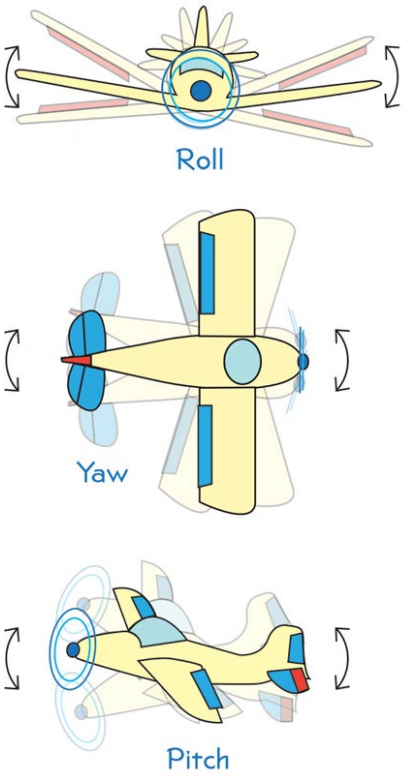
5.1. Genel Tanımlamalar

Bu güne kadar mobil bir robotun ilerlediği arazi özelliklerini belli sınıflandırma içinde tanımlayabilen çalışma ortaya konulmamıştır. Bunun yerine genellikle robotlar amaçları bakımından sınıflandırılmaktadır.

Arazi ve engellerin sınıflandırılmasından önce bazı belirlemelerde bulunmak gerekir. Bir engelin, aracın hareketine tesir edebilmesi için engel ile araç arasındaki etkileşim şartının sağlanması gerekir. Örneğin yoldaki bir kasis, yere temas eden bir aracın hareketini etkilerken uçan bir aracın hareketine etkide bulunmaz. Bu bakımdan araçlar katı (satıh) temaslı, akışkan temaslı ve boşlukta hareket edenler olmak üzere üç kategoride değerlendirilir. Mevcut çalışmada yalnızca katı temaslı araçlar için arazi ve engel tipleri incelenmiş, akışkan temas durumu ihmal edilmiştir.

6 serbestlik dereceli gemi, rover, füze, uçak gibi hava araçlarının hareketini tanımlamak için 3 eksen takımı tanımlanır. Bunlar yaw, pitch ve roll eksenleridir. Bu eksenler Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Buna göre aracın önden görünüş (ilerleme doğrultusuna dik) düzlemine göre dönmesi roll, üstten görünüş düzlemine göre dönmesi yaw ve yandan görünüş düzlemine göre dönmesi ise pitch dönmesi olarak adlandırılır.

Arazinin sınıflandırılmasında da, arazi unsurunun aracı ne şekilde bir harekete mecbur ettiği konusunda bu eksen tanımlamaları kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Bir uçak için dönme eksenleri (Anonymous, 2019)

Satıh temaslı araçlar, hareket kontrolünü katı bir yüzey teması ile yapan araçlardır. Aracın ilerleme yönündeki itme kuvvetinin yüzey teması ile sağlanması zorunlu değildir.

İki boyutta arazi; arazinin, roll ve yaw eksenlerinin oluşturduğu düzlemde belirtilen özelliğinin pitch ekseni boyunca sabit kabul edildiği engel biçimidir. Yani arazi biçimi ve özellikleri, en azından aracın hareketini etkileyen bölge boyunca sabit kalmalıdır. İki boyutta arazide aracın yaw-roll eksen hareketi ve sadece pitch dönmesi mümkündür.

Satıh, aracın serbestlik derecesini temas sayesinde en az bir derece azaltan sabit uzuv bölgesidir. Dehliz tipi satıhta da anlatıldığı gibi, bir aracın örneğin kare kesitli boru içinde ilerlemesi söz konusu ise hareket serbestliği iki eksende de kısıtlanmıştır ve yalnızca roll ekseninde ileri-geri hareket mümkündür. Yani dört adet hareket serbestliği engellenmiştir.

Engel, aracın ilerleme hareketine zorluk veya imkânsızlık oluşturan, aşılması için uygun tertibat veya donanım gerektiren arazi unsurlarıdır. Satıh tipleri, aracın ilerleme doğrultusunda genellikle ani değişikliklere neden olmazken engel tipleri ilerleme hızında duraksama, ani yavaşlama gibi hareket düzensizliklerine neden olur. Engelin atlanması sırasında aracın genellikle satıh teması kesilir. Buna ek olarak satıh, araca temas yoluyla destek sağlarken engeller için böyle bir gereklilik bulunmaz.

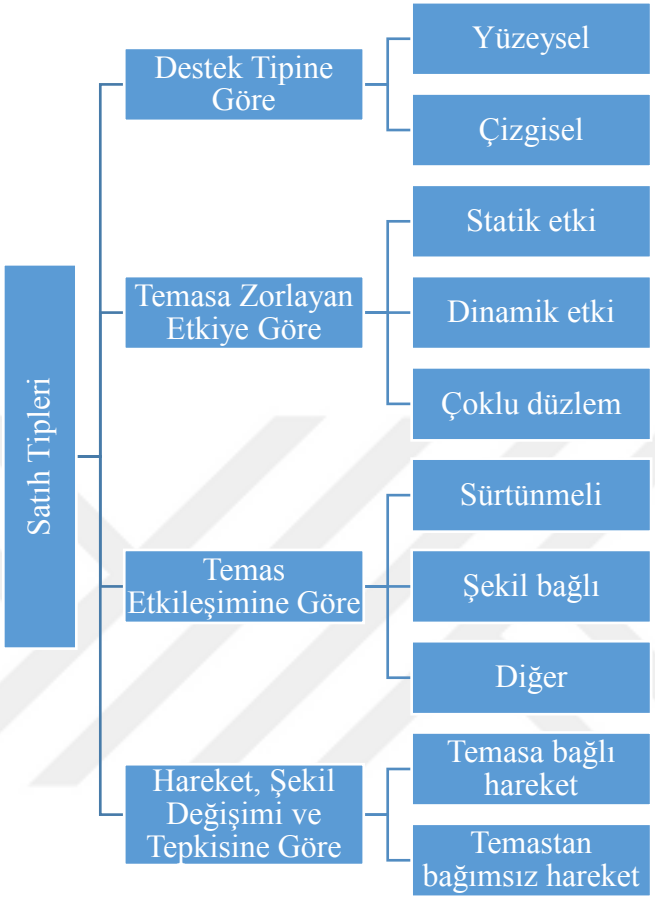
Arazi özelliklerinin sınıflandırılması sırasında bazı hallerde birden fazla kategoriye ait olma durumuyla karşılaşılmaktadır. Arazi unsurları ile araç büyüklüğünün birbiriyle mukayesesi bu noktada önem arz eder. Örneğin büyük bir araç için satıh pürüzlülükleri şeklinde değerlendirilen bir arazi buna nazaran daha küçük bir araç için set tipi, basamak tipi vb. engel olarak değerlendirilebilir. Bu belirsizliği ortadan kaldırmak için tanımlanan büyüklük faktörü, aracın satıh ve engel ölçülerine nazaran geometrik büyüklüğünü belirtir. Her ne kadar mevcut çalışmada katı temaslı araçlar için arazi ile ilgili sınıflandırmadan bahsediliyorsa da konu, her türlü arazi şartının kategorizasyonunu kapsamaktadır. Bu yaklaşım, akışkan içinde hareket eden nesneler için boyutu belirleyen Reynolds Sayısı'nın[1)] hesaplanmasından farksızdır. Mevcut çalışmada büyüklük faktörü matematiksel bir eşitlikle ifade edilmese de satıh ve engel tipleri açıklamalarında bu durumdan bahsedilmiştir.

Satıh ve engel sınıflandırılmasındaki bir diğer karmaşa, bazı satıh tiplerinin engel olarak da değerlendirilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Sonraki bölümlerde anlatıldığı gibi, örnek olarak değişken eğimli çizgisel bir satıh, aynı zamanda çizgisel engel özelliği de taşımaktadır. Bu gibi durumların tasnifi konusunda, çizgisel unsur mobil araca destek sağlayacak özellikte ise satıh, aksi halde engel olarak ele alınması doğru bir yaklaşım olacaktır.

[1)] $Re = \rho.V.L/\mu$ (ρ akışkan yoğunluğu, V akışkan ile cisim arasındaki bağıl hız, L karakteristik uzunluk ve μ akışkanın dinamik viskozitesidir.)

5.2. Satıh Temaslı Araçlarda İki Boyutlu Arazi Özellikleri

5.2.1. Satıh tipleri



Şekil 5.2. Satıh tiplerinin sınıflandırılması

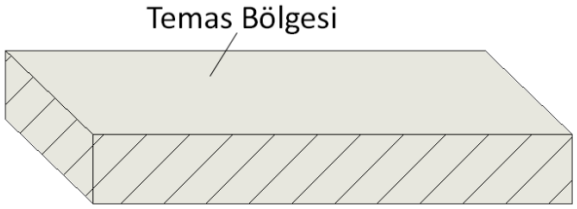
Satıh temaslı araçların hareket kararlılığı için katı bir yüzeyden destek aldığı daha önce açıklanmıştı. Bazı özel durumlarda satıh teması var olmasa da satıh aracın hareketine temas şartı sağlanıyormuş gibi etki edebilir. Sürtünmeyi azaltmak için kullanılan yağlayıcılar, aralarında mesafe bulunan ve elektriksel zıt kutuplu iki levhanın, yüklü bir parçacıkta oluşturduğu kuvvet bu duruma örnek olarak verilebilir. Parçacığa uzak levha çekme yönünde kuvvetli, parçacığa yakın levha itme yönünde zayıf elektriksel yüke sahipse parçacık belli bir denge uzaklığında kilitli kalır. Sonuç olarak bu gibi durumlarda temas sağlanmasa bile satıh temaslı olarak kabul edilmiştir.

Satıh temaslı mobil aracın statik ve dinamik davranışına tesir eden etkiye göre satıh tiplerinin sınıflandırılması Şekil 5.2'deki gibidir.

5.2.1.1. Destek tipine göre

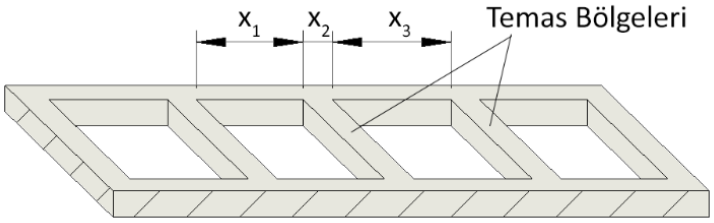
Destek tipi, aracın temas ettiği (destek aldığı) bölgenin yüzeysel veya çizgisel olma durumunu tanımlar. Arazi iki boyutta analiz edildiğinden yüzeysel ve çizgisel destekler için üçüncü eksen açıları ve noktasal destek tipi incelenmemiştir.

Yüzeysel destek (Şekil 5.3), aracın denge için ihtiyaç duyduğu mesnedi herhangi bir noktadan sağlayabilir. Ayrıca basıncı azaltmak için yüzey temas alanının artırılmasında herhangi bir sınırın bulunmadığı kabul edilebilir.



Şekil 5.3: Yüzeysel Destek

Çizgisel destek (Şekil 5.4), aracın denge için ihtiyaç duyduğu mesnedi belirli düzendeki çizgiler sayesinde sağlayan satıh tipidir. Bu nedenle aracın destek temas bölgesi sınırlıdır.

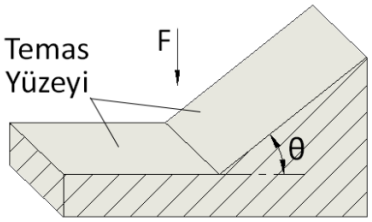


Şekil 5.4. Çizgisel Destek

5.2.1.2. Temasa zorlayan etkiye göre

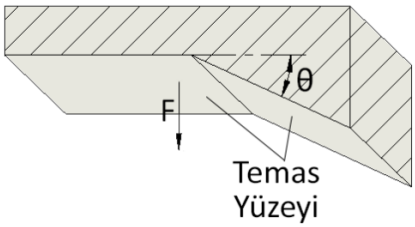
Temasa zorlayan etki çeşitli etkenlerden kaynaklanabilir. Genel olarak bu etki statik, dinamik ve dehliz tipi olarak gruplandırılabilir.

Statik etki, aracın hareketine bağlı olmaksızın belirli bir yönde kuvvet meydana getiren harici etkidir. Bu etki yerçekimi, manyetik, elektriksel, aerodinamik baskı etkisi (ground effect) vb. kaynaklı olabilir. Etki, aracın yüzeye baskı yapması yönünde katkı sağlıyorsa pozitif etki (Şekil 5.5), yüzeyden ayırma yönünde katkı sağlıyorsa negatif etki (Şekil 5.6) olarak adlandırılmıştır.



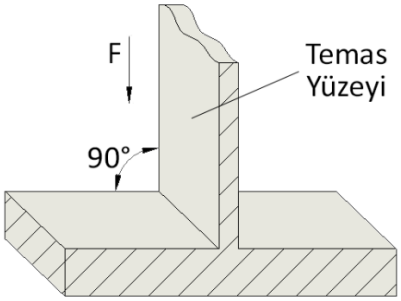
Şekil 5.5. Pozitif etki

Sadece negatif etkinin var olduğu, yüzey etkileşimi veya dinamik etki gibi yüzey temasına katkıda bulunacak herhangi bir etkenin olmadığı hallerde aracın yüzey ile teması kesilir. Bu durum ise mevcut sınıflandırmanın kapsamı dışında kalmaktadır. Statik etki için temel parametreler statik etki kuvveti (F) ve kuvvet ile yüzey arasındaki açı değeridir (θ).



Şekil 5.6. Negatif etki

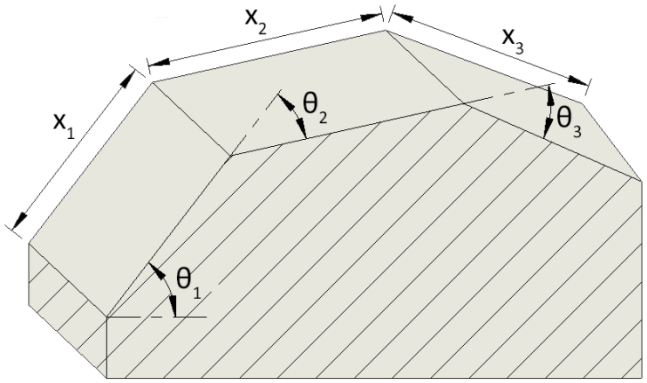
Yüzey doğrultusu ile harici etki doğrultusunun paralel olması özel bir durum meydana getirir. Bu durumda dış etki, aracın yüzeye yaptığı baskıya pozitif veya negatif yönden bir katkı sağlamaz yani temasa zorlayan etkinin değeri önemsizdir. Eğim açısının 90° olması halinde ($\cos 90° = 0$ olduğundan) bu durum meydana gelir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Harici etki doğrultusu ile yüzey doğrultusunun paralel olması

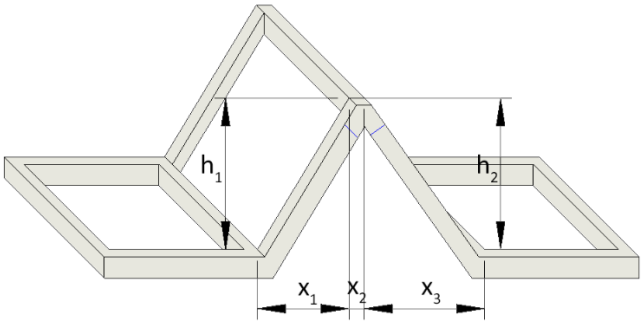
Yüzey eğiminin sürekli veya süreksiz değişimi varsa satıh, değişken eğimli olarak adlandırılır. Bu tip satıh dinamik etki kategorisinde incelenmiştir. Eğer aracın hızı yeterince düşük ise aracın yüzey ile temasının kesilmemesi için satıh şekline uyum sağlaması gerekir. Şekil 5.8'de süreksiz eğimli satıh görülmektedir. Bu sathın temel değişkenleri x_1, x_2, x_3 ve θ_1, θ_2, θ_3'tür. Eğer istisnai bir durum yoksa eğim değişim

bölgelerinin her biri için θ değeri vermek yerine en büyük eğim değişim açısı ve en büyük eğim açısının verilmesi daha doğru olur. Ayrıca x mesafeleri yeterince (aracın süreksiz engeli atladıktan sonra tekrar denge durumuna gelmesine kadarki mesafe) uzunsa temel değişkenler sadece açı değerleridir. Aksi halde en küçük x mesafesi de belirtilmelidir. Şekil 5.10'daki gibi eğim sürekli ise bu durumda temel değişkenler minimum eğrilik yarıçapı (r) ve maksimum eğim açısı (θ) değeridir.



Şekil 5.8. Süreksiz eğimli satıh

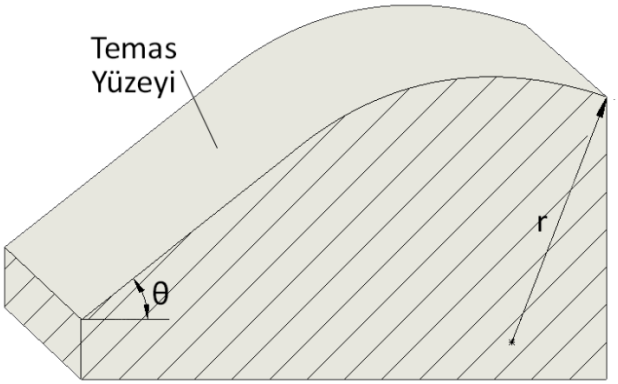
Açıklama kolaylığı açısından, temasa zorlayan etkinin farklı durumları için yüzeysel satıhtan bahsedilmiş olsa da bu durumlar çizgisel satıha da tatbik edilebilir. Şekil 5.8'de eğimli çizgisel satıh tipi görülmektedir. Bu satıh çeşidi, çizgisel satıhta çizgisel engel olması gibi de düşünülebilir. Çünkü arazi kondisyonu, aracın satıhta nasıl ilerlediği, engelleri nasıl geçtiğinden bağımsız olarak değerlendirilir. Satıh destek tipi çizgisel ise eğimin süreksiz olması mümkün değildir. Şekil 5.9'daki eğimli çizgisel satıh için değişkenler x_1, x_2, x_3, h_1, h_2 mesafeleridir. Sathın tanımlanması durumunda ise h ve x mesafelerinin hem en küçük, hem de en büyük değerlerinin verilmesi gereklidir.



Şekil 5.9. Eğimli Çizgisel Satıh

Dinamik etki, aracın hız vektöründe değişiklik meydana getirerek araç ataleti nedeniyle geçici etki meydana getiren arazi çeşididir. Dolayısıyla bu etki, aracın hız

vektörüne bağlı bir fonksiyondur. Üç boyutta arazi için örnek verilirse, satıhtaki virajlar aracın yaw ekseninde dönmesine neden olur ki bu da dinamik etki kategorisinde değerlendirilir. İki boyutta dışbükey (konveks) yüzeyler pozitif, içbükey (konkav) yüzeyler ise negatif yönde yüzey baskısı oluşturur. Aracın düşük hızlarda ilerlemesi durumunda dinamik etkiler ihmal edilebilir ancak yine de temel değişkenler belirtilmelidir.

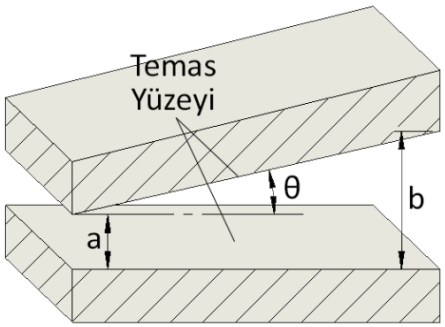


Şekil 5.10. Sürekli eğimli konveks yüzey

Şekil 5.10'da sürekli eğimli konveks satıh görülmektedir. Süreksiz eğimli konveks yüzeyde de dinamik etki meydana gelmekle birlikte bu durumda aracın yüzey teması kesilebilir. En küçük eğrilik yarıçapı (r) sürekli eğimli yüzeyler için temel değişken olarak kabul edilebilir. Ayrıca ilerlemekte olan bir aracın karşılaşacağı sıralı destekler arasındaki mesafeler kendilerini belli bir düzende yeniliyorsa bu durum belli bir frekans ile genlikte titreşim etkisi oluşturacaktır ve mesnet ikazlı sistemler olarak değerlendirilmelidir (Botsalı, 2010). Bu durumda genliğin bulunabilmesi için çukur ile tepe arasındaki yüzeye dik mesafe ve frekansın bulunabilmesi için de iki tümsek veya çukur arasındaki yüzeye paralel mesafenin belirtilmesi gerekir.

Karşılıklı ve birbirine paralele yakın açılardaki iki yüzeyin oluşturduğu durum çoklu düzlem tipi olarak tanımlanmıştır. Kapalı çift düzlem için engel tipi dehliz olarak adlandırılmıştır. İki boyutta dehliz tipi satıh, Şekil 5.11'de görülmektedir. Dehliz tipi satıh, aracın ilerleme şekline göre statik ve dinamik tipteki özelliklerin her ikisini birden barındırılabilir. İki yüzeyin arasında ilerlemekte olan bir araç herhangi bir anda alt veya üst yüzey, ya da her yüzeyle etkileşim halinde bulunabilir. Araç kendini iki yüzeye

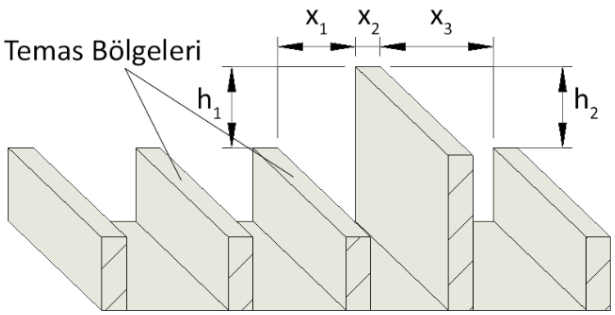
sıkıştırmak yoluyla statik etki, her iki yüzey arasında sekme hareketi yaparak ise dinamik etki meydana getirerek yüzey teması sağlayabilir.



Şekil 5.11. Kapalı dehliz tipi satıh

Çoklu düzlem tipi satıhta, her iki yüzeyde de farklı engel tipleri var olabilir. Bu durumda sathı tanımlayan parametre sayısı çok artar. Ancak genel bir tanımlama açısından yüzeyler arasındaki en küçük (a) ve en büyük (b) açıklık ve yüzeyler arasındaki açı (θ) temel parametreler olarak kabul edilebilir.

Dehliz tipi sathın bir diğer çeşidi Şekil 5.12'de görülmektedir. Bu satıhta ilerleyen araç şekilde görülen dikey temas bölgelerinin hem ön hem arka yüzeyine aynı anda temas eder. Temel değişkenler x_1, x_2, x_3, h_1 ve h_2 mesafeleridir.



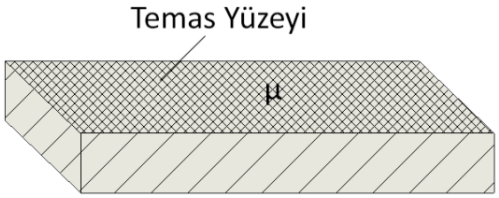
Şekil 5.12. Açık çoklu düzlem tip satıh

5.2.1.3. Temas etkileşimi

Temas etkileşimi, satıh ile araç arasındaki izafi harekete direnç oluşturan etkidir. Bu tesir, aracı yüzey ile temasa zorlayan etkinin neticesi olabileceği gibi başka faktörler sonucu da ortaya çıkabilir. Diğer taraftan yapışma gibi durumlarda temasa zorlayan kuvvet, yüzey etkileşiminin bir fonksiyonudur.

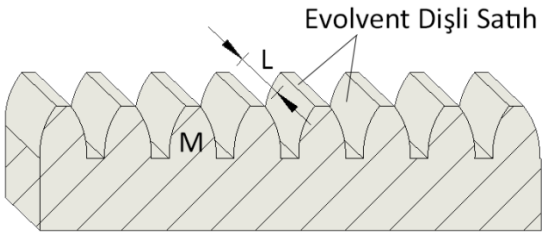
Sürtünme kuvveti hareketin tersi yönde oluşur. Çoğu zaman rijit katı-katı sürtünmesi için kuru sürtünme durumu kabul edilebilir. Kuru sürtünme, aracı temasa

zorlayan kuvvetin yüzeye dik bileşenine bağlıdır. Şekil 5.13'de görülen kuru sürtünme tipi satıh için temel değişken sürtünme katsayısıdır (μ). Eğer yüzeyde ezilme vb. şekilde oluşan deformasyon ihmal edilebilirliğin ötesinde ise yuvarlanma sürtünmesi gibi durumlar göz önünde bulundurulmalıdır (Meriam ve ark., 2013).



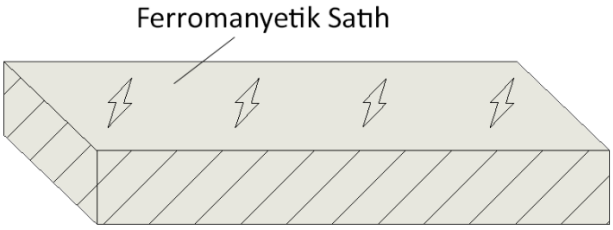
Şekil 5.13. Sürtünme tipi yüzey etkileşimi

Şekil bağlı temas etkileşimi, yüzey şeklinin ve araç temas bölgesinin birbirine uygun özel bir formda olması nedeniyle araç ile yüzey arasında izafi hareketin engellenmesi durumudur. Formlu yüzey, çok farklı geometrik yapıda olabileceği için çeşitleri konusunda özel bir gruplandırma yapılmasa da yüzey formu satıh özelliklerinde belirtilmelidir. Örneğin Şekil 5.14'teki evolvent dişli satıh için diş genişliği (L) ve modül (M), temel parametreler olarak kabul edilebilir. Yüzey profillerindeki çeşitlilik nedeniyle diğer form türlerine ait parametrelere burada yer verilmemiştir.



Şekil 5.14. Özel formlu yüzey

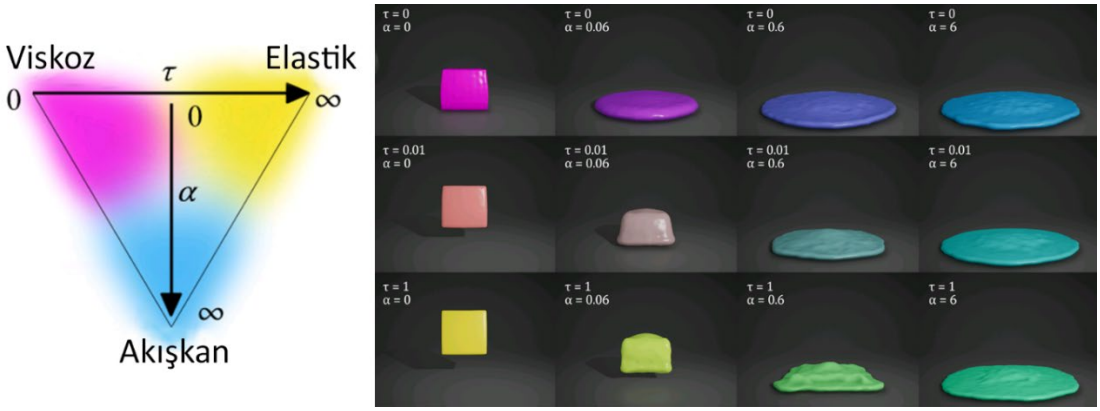
Hidrofobi, kapilarite, Van Der Vaals (Autumn ve Peattie, 2002), manyetizma gibi etkiler, sürtünmeye ek olarak aracın yüzeye tutunma kuvvetine de etki ederler. Bunlar diğer temas etkileşimleri olarak incelenmiştir. Bu durumda araç ile yüzey arasındaki sürtünme katsayısı birden büyük olabilir. Cam temizleme (Zhang ve ark., 2004), gemi boyama robotları, MAGLEV trenleri bu tür satıha örnek olarak verilebilir. Şekil 5.15'te manyetik ortamda çekim etkisi oluşturan ferromanyetik yüzeyin temsili resmi görülmektedir.



Şekil 5.15. Ferromanyetik satıh

5.2.1.4. Hareket, şekil değişimi ve tepkisine göre

Aracın teması nedeniyle deforme olan, yani temasa bağlı hareket oluşturan satıh esnek/gömülgen/heyelan tipi satıh olarak değerlendirilir. Her gerçek malzeme kuvvet etkisi altında şekil değişimi gösterse de bu değişim çok az ise malzeme rijit kabul edilebilir. Metaller vb. bazı malzemeler lineer elastisite modülüne sahipken, kauçuk gibi malzemelerin elastisite modülü nonlineerdir. Kuvvet kaldırıldıktan sonra ilk şekline geri dönen malzemeler esnek olarak nitelendirilir. Öte yandan viskoelastik malzemeler, hem akışkan hem esneklik özelliği gösterir. Çamur, kum, lav gibi gömülgen malzemeler genel olarak Bingham plastik, sanki plastik (pseudoplastik), dilatant, viskoelastik vb. şekilde modellenebilir (Zhang ve ark., 2017), (Livescu, 2012). Şekil 5.16'da τ ve α değerlerine göre akışkan davranış simülasyonu görülmektedir.



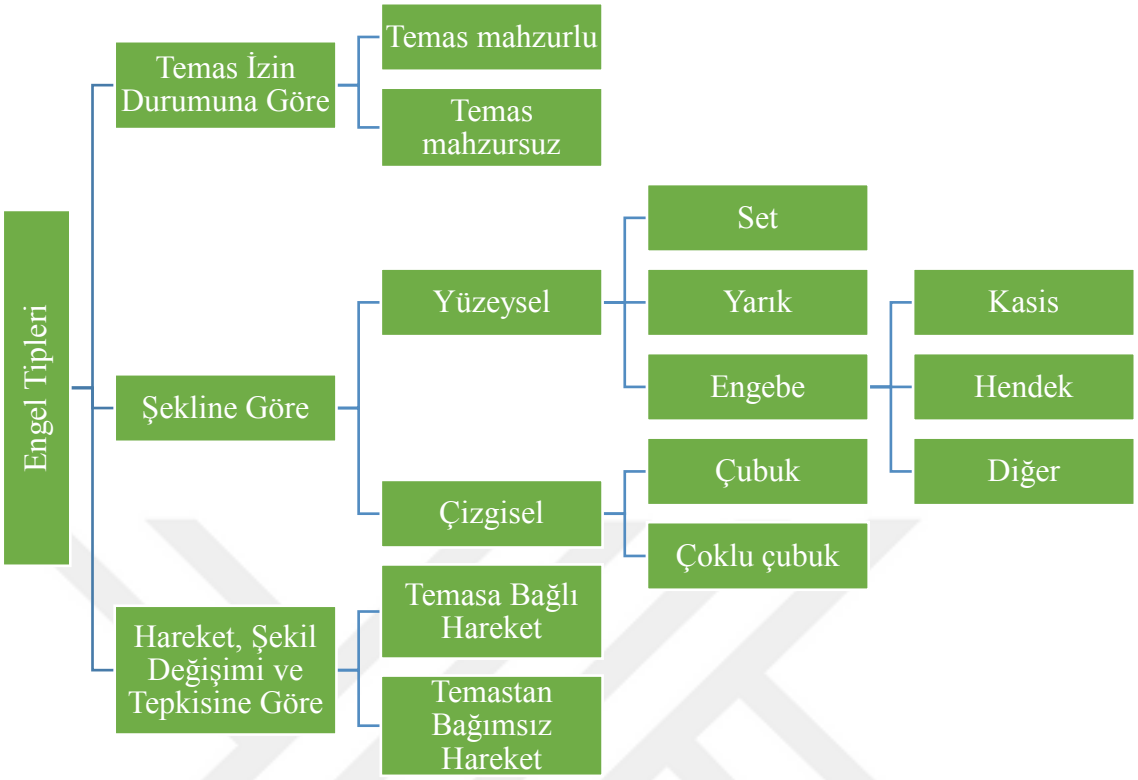
Şekil 5.16. Malzemelerin τ-α özelliklerinin katı-elastik ile sıvı özelliğe etkileri ve simülasyonu (Bareiro ve ark., 2017)

Titreşim gibi pek çok durumda ise satıh hareketi araç temasından bağımsızdır. Gemi, tren gibi bir aracın üzerinde hareket etmekte olan robotlar için böyle bir hareket söz konusudur. Temasa bağlı olarak değerlendirilen heyelan tipi satıhta heyelan, aracın yüzey baskısı nedeniyle gerçekleşmiyorsa temastan bağımsız olarak değerlendirilmelidir.

Burada temasa bağlılık veya bağımsızlıkta konu edilen temel ayrım, hareketin ne zaman başlayacağı ve nasıl devam edeceğine dair tahmindir. Temasa bağlı harekette hareketin başlangıç zamanı aracın yüzey temasından belli bir süre sonra başlar. Yani satıh hareketinin başlangıç zamanı bellidir. Titreşim tipinde ise hareketin başlangıcı bilinmese bile belli bir andan itibaren hareketin devamına dair konum, hız değişimi gibi nicelikler konusunda tahmin yürütülebilir.

Satıh hareketini daha ileri bir seviyede değerlendirmek için artistik trapez atlama örnek olarak verilebilir. Trapez göstericisi sallanan iki trapezin (salıncak) birinden diğerine atlar. Bu, basit harmonik hareket yapan iki sarkacın birinden diğerine geçmekle aynı şeydir. Salınım frekansı hem trapeze hem de göstericiye bağlıdır. Böyle bir sathın değerlendirilmesinde sathın hareket sınırlılığı, trapez ipinin uzunluğu gibi çok sayıda değişken hesaba katılmalıdır. Engel tipleri konusunda da arazi unsurunun hareket ve tepki durumlarından bahsedilmiş olsa da bu konu daha ileriki makale ve yayınlarda ayrıntılı olarak incelenecektir.

5.2.2. Engel tipleri



Şekil 5.17. Engel tiplerinin sınıflandırılması

Daha önce de ifade edildiği gibi engeller, aşılması için özel tertibat veya düzenleme gerektiren arazi unsurlarıdır. Satıhtan farklı olarak genellikle aracın ilerlemesi için destek sağlamazlar. Aracın ilerleyebilmesi için satıh türleri sürekli, engeller ise genellikle geçici adaptasyonu gerektirirler. Engel aşma sırasında aracın satıh teması kesilebilir.

Şekil 5.17'de engel tiplerinin sınıflandırılması ve buna ait alt maddeler yer almaktadır.

5.2.2.1. Temas izin durumuna göre

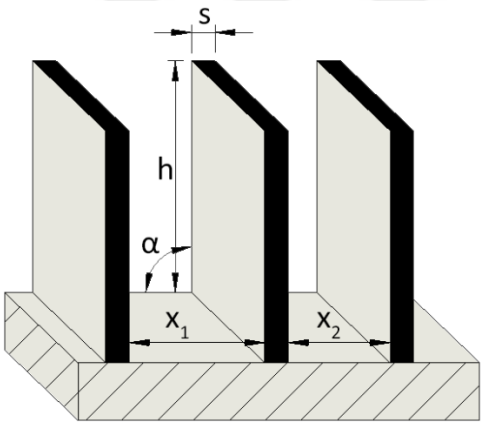
Bazı hallerde aracın engel ile temas etmesi mahzurludur veya istenmeyen bir durum meydana getirir. Engelin çok sıcak olması gibi araca zarar verecek özellikler, aracın engelin yapı veya şeklini bozacak olması gibi nedenlerden dolayı böyle bir mahzur belirlenebilir. Yol çizgilerini çeken robotlar gibi bazen aracın kendisi de engel meydana getirebilir.

Engele temasın izin verilebilir olduğu durum teması mahzursuz, izin verilebilir olmadığı engel tipleri teması mahzurlu engel olarak sınıflandırılmıştır.

5.2.2.2. Şekline göre

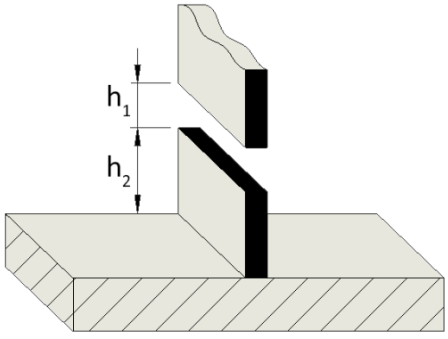
İki boyutta arazi için engeller şekil yönünden yüzeysel ve çizgisel olmak üzere iki kategoride incelenmiştir.

Yüzeysel engeller, engel yüzeyinin sonlandığı bölge (açıklık) dışında geçişe mani olan engel tipleridir. Set tipi engellerde bu açıklık belli bir yükseklikten sonra başlar ve sonu yok kabul edilir. Yarık tipi engelde ise belli yükseklikten sonra başlayan açıklık daha yüksek bir sınırda sona erer. Genel bir yaklaşımla Şekil 5.18'de de görülen düzlemsel set tipi engel için h, s, x_1, x_2 mesafeleri ve α açısı değeri temel değişkenlerdir.



Şekil 5.18. Düzlemsel set tipi engel

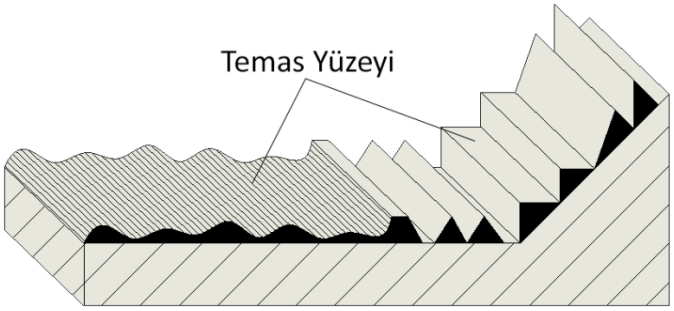
Yarık tipi engel, set tipi engele benzemekle birlikte bu engeli aşabilmek için aracın kendini engel bölgesindeki açıklığa adapte etmesi gerekir. Şekil 5.19'da görülen bu engel için temel değişkenler h_1 ve h_2 mesafeleridir.



Şekil 5.19. Yarık tipi engel

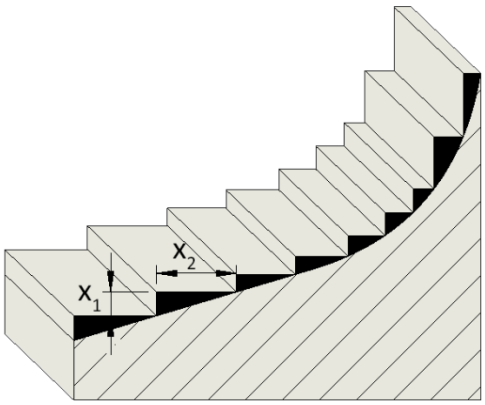
Engebe tipi engeller satıh üzerinde kesiklik veya düzensizlik oluşturmakla birlikte bazı yüzeyleri sathın bir parçası olarak kabul edilebilir.

Kasis tipi engeller değişken eğimli satıh tipi ile önemli benzerlikler içerir. Kasis tipi engel, değişken eğimli sathın ölçülerinin küçültülmüş şekli olarak düşünülebilir (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. Farklı çeşitte kasis tipi engeller

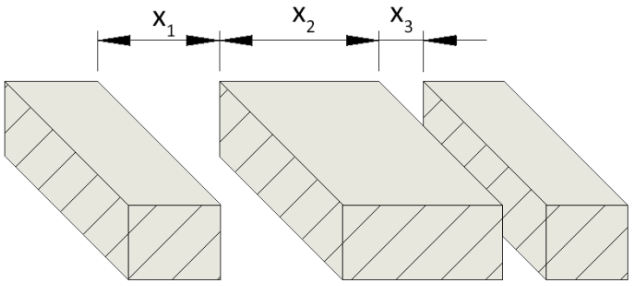
Basamak (stair) tip engel (Şekil 5.21), kasis tipin özel bir şeklidir. Basamak tipi, sabit eğimli satıha yerleştirilmiş zikzak kasis tipi engellerden oluşur. Zikzak kenarlarından biri temas kuvvetine dike yakın, diğer kenar ise paralelliğe yakın açıdadır. İnsan kullanımı için tasarlanmış merdivenlerde rampa açısı $5° - 50°$ arasındadır (Anonymous, 1910). Gemi merdivenlerinde ise tırabzanlı olmak kaydıyla bu açı 75°'ye kadar çıkabilir. Basamağın bulunduğu satıh eğimi sabit ise basamağın dikey ve yatay mesafeleri arasındaki oran (x_1 ve x_2 oranı) sabit kalır. Şayet eğim sabit değilse x_1 ve x_2'nin en küçük ve en büyük değerleri verilmelidir.



Şekil 5.21. Basamak tipi engelde temel değişkenler

Hendek tipi engeller, arazinin belli bir bölümünde kesiklilik oluştururlar. Sathın engel bulunan bölümünde seviye aynı veya daha düşüktür. Hendek bölgesinde, araç için yüzey temas bölgesi bulunmaz. Eğer satıhtaki bir bölgede temas mahzuru varsa bu durum sınıflandırmada hendek tipi engel olarak değerlendirilir. Şekil 5.22'de görüldüğü gibi

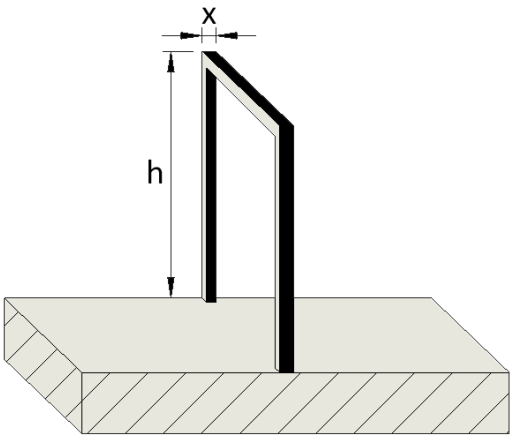
hendek tipi engel için temel parametreler x_1 ve x_3'ün en büyük ve x_2'nin en küçük değeridir.



Şekil 5.22. Hendek tipi engel

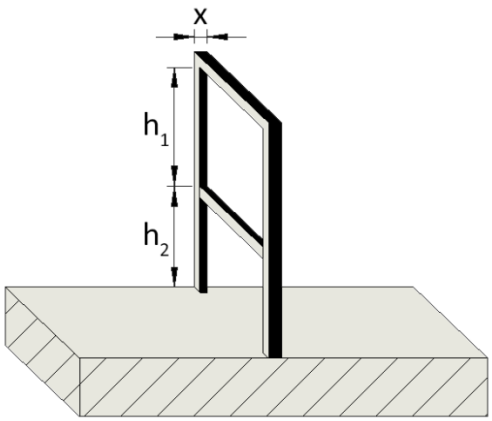
Çizgisel engeller, yapı bakımından yüzeysel engelle aynı olmasına karşın yüzey genişliğinin çok az olması nedeniyle çizgisel kabul edilen engel çeşididir.

Çubuk (bar) tipi çizgisel engeller belli bir yükseklikte çizgisel olarak geçiş imkansızlığı oluştururlar. Şekil 5.23'de çubuk tipi engel görülmektedir. Satıh ve engelin tanım bölümünden de hatırlanacağı gibi çubuk tipi engel araç için destek sağlamaz. Yani örneğin yatay merdiven (horizontal ladder veya step beam) (Anonymous, 2000) engel değil satıh sınıfında değerlendirilmelidir. Çubuk tipi engel için temel parametreler x uzunluğu ve h yüksekliğidir.



Şekil 5.23. Çubuk tipi çizgisel engel

Çoklu çubuk tipi engelde belli bir yükseklikte bulunan çizgisel engelin daha yukarısında bir veya daha fazla çizgisel engel bulunur. Bu durumda araç yarık tipi engeldeki gibi engeller arası boşluktan geçmeye mecbur bırakılır. Şekil 5.24'de çoklu çubuk tipi engel örneği görülmektedir. Bu tip engel için temel parametreler x, h_1 ve h_2 mesafeleridir.



Şekil 5.24. Çift çubuk (geçit) tipi çizgisel engel

5.2.2.3. Hareket ve tepkisine göre

Satıh tiplerinde olduğu gibi engellerin sınıflandırılmasında da hareket ve tepki durumu dikkate alınır. Aracın geçişi sırasında temasa bağlı olarak engelde kırılma, esneme, yırtılma gibi deformasyonlar meydana gelebilir. Yüzey temaslı olmaması nedeniyle mevcut çalışmanın konu kapsamı dışında kalsa da örneğin balistik jeller aracın geçerken şekil değişikliğine uğrattığı engel tiplerindendir.

Engelin araç temasından bağımsız olduğu durumlar da vardır. Engel hareketinde de satıh hareketinde olduğu gibi temel ölçü hareketin tahmin edilebilirliğidir. Örneğin titreşim hareketi yapan engel için hareket öngörülebilir özelliktedir. Trafikte ilerleyen araç sürücüleri diğer araçların konum, hız ve ivmelerinin sabitliği gibi varsayımlarda bulunur. Bu tahminlerin dışında bir durum gerçekleştiğinde sürücü dinamik algılarından yararlanarak çözüme gitmeye çalışır.

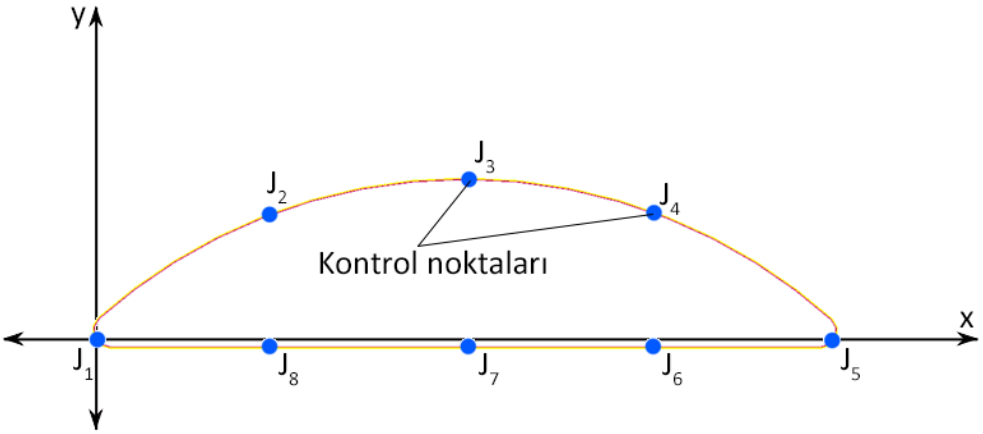
Bazı durumlarda engel hareketi öğrenme yoluyla tanımlıdır. Bir bina girişlerindeki otomatik açılır-kapanır kapı için öğretme yapılmamış robot, kapının kapanma anında duraklama hareketi yapacaktır. Oysa çoğu kez insanlar kapının açılacağı tecrübesini kullanarak duraklamak yerine ihtiyati yavaşlama yaparlar.

Tamamen kuralsız ve öngörülemeyen satıh ve engel hareketlerinde robotlar tepki süresi (intikal zamanı) bakımından genellikle insanlara nazaran daha üstündürler. Harmonik olmayan hareket kuralının tatbiki ve uygun çözümün geliştirmesi konusunda ise günümüzde insan daha üstün bir durumdadır.

6. UZUV BOYLARI DEĞİŞİMİNİN BİYEL EĞRİSİNE ETKİSİ

6.1. Kontrol Noktaları ile Biyel Eğrisinin Analizi

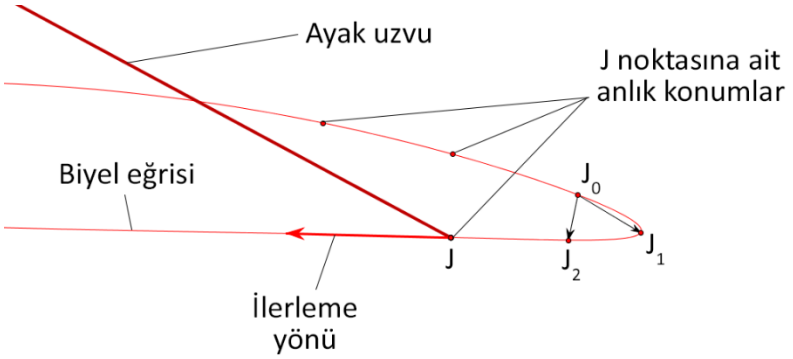
Literatürde yer alan tek serbestlik dereceli yürüme mekanizmaları, uzuvlarının mafsal noktaları arasındaki mesafeler değiştirilebilir yapılarak çok serbestlik dereceli hale getirilebilir. Hangi uzuvların mesafelerinin değiştirilebilir yapılacağının kararı ise biyel eğrisinde J_1J_5, J_3J_7 uzunlukları gibi temel değişkenlere lineer etki yapanların belirlenmesinden sonra verilmiştir.



Şekil 6.1. İdeal yürüme eğrisi ve eğri üzerindeki kontrol noktaları

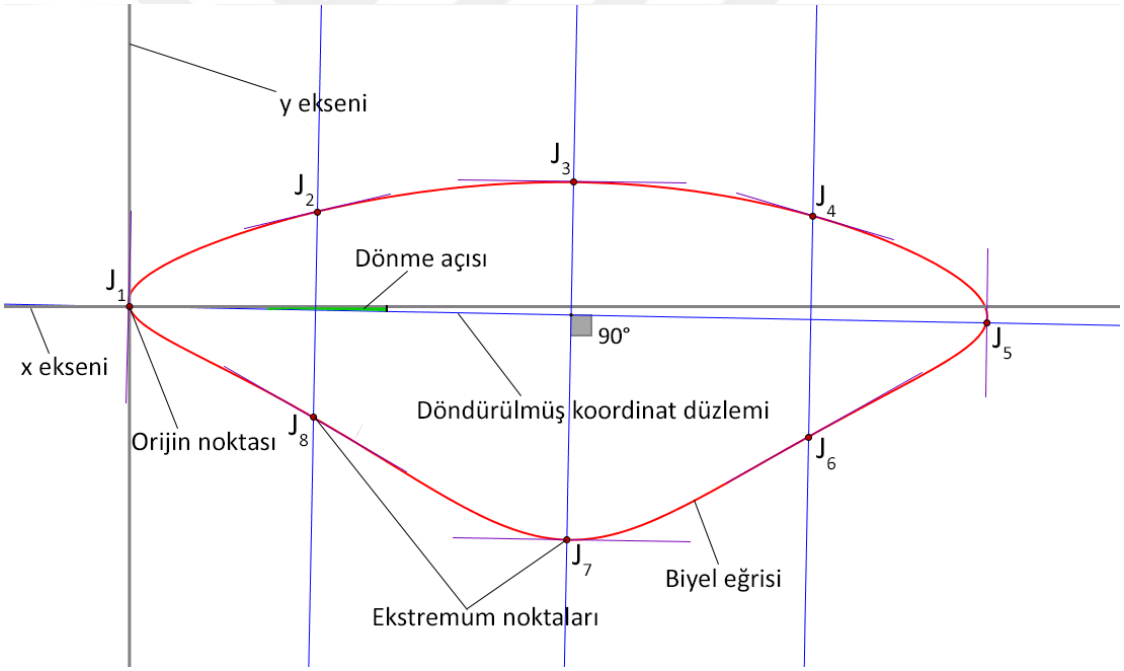
Uzuv boyları değişiminin J noktasının çizdiği biyel eğrisine etkisinin incelenmesinde, bu eğriye ait sekiz adet nokta referans olarak alınmıştır. J_1, J_3, J_5 ve J_7 noktaları döndürülmüş eksene göre maksimum noktalar; J_2, J_4, J_6 ve J_8 ise eğriye ait ekstremum noktalarıdır. İlk olarak bu biyel eğrisi üzerinde x koordinatı en küçük ve en büyük olan noktalar yani J_1 ve J_5 noktaları belirlenmiştir. Daha sonra y koordinatı en büyük olan J_3 ve en küçük olan J_7 noktası bulunmuştur.

Ekstremum noktalarının bulunmasında Cinderella yazılımındaki bir özellikten yararlanılmıştır. Yazılım, mekanizmanın çeşitli konumlarına ait çerçeveleri (frames) belli bir sıklıkta göstererek sürekliymiş gibi hissedilen animasyonlar meydana getirmektedir. Buna göre sıralı olarak üç çerçeveye ait J noktası koordinatı incelenebilir. Bu üç nokta, Şekil 6.2'de J_0, J_1 ve J_2 olarak görülmektedir.



Şekil 6.2. Ekstremum noktalarının bulunması

Buna göre J_0J_1 noktaları ile tanımlı vektör, J_0J_2 noktaları ile tanımlı vektöre göre pozitif yönde (saat yönünün tersi) dönüktür. Bu şart sağlandığı sürece yörünge konvekstir. Eğer J_0J_1 vektörü, J_0J_2 vektörüne göre negatif yönde (saat yönünde) açı yaparsa bu biyel eğrisi için bir dönüm noktasını ifade eder. Sonuçta eğriye ait kontrol noktaları belirlenmiş olunur.



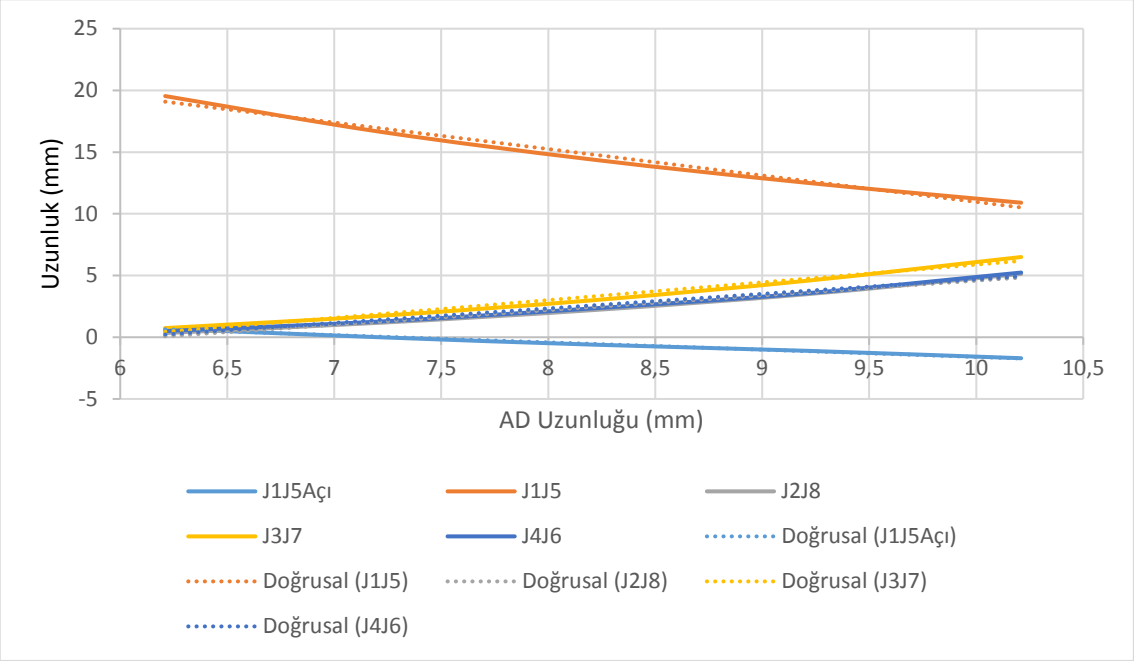
Şekil 6.3. Yürüme biyel eğrisi üzerindeki kritik noktalar

Şekil 6.3'te görüldüğü gibi biyel eğrisinde J_1J_5, J_2J_8, J_3J_7 ve J_4J_6 uzaklığı; J_1J_5 açısı (dönme açısı); J_1, J_2, J_3 ve J_4'ün x ve y koordinatları incelenmektedir. Bu J_x noktalarının açı, konum ve birbirlerine göre uzaklık değerlerinin tek tek okunması çok zahmetli olacağından mekanizmanın çizildiği Cinderella'nın dili olan CindyScript kodları yazılarak bu değerler kolayca elde edilebilir. Örneğin herhangi iki nokta arasındaki açı ve uzaklığın bulunması için CindScript'de Draw bölümüne,

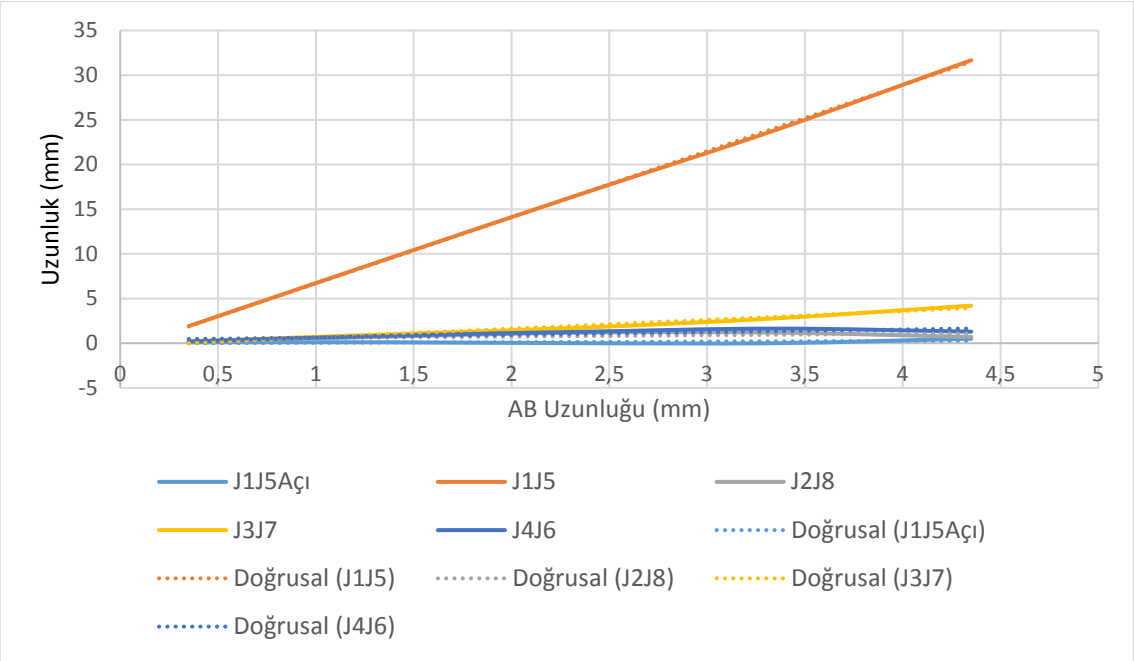
```
J1J5_Dist=((J1.x-J5.x)^2+(J1.y-J5.y)^2)^(1/2);
J1J5_Ang=arctan((J1.y-J5.y)/(J1.x-J5.x));
Print(J1J5)
```

yazılarak konsol ekranında mesafe ve açı hesaplatılmıştır. Böylece herhangi bir uzuv uzunluğunun değişimine göre, bu iki noktanın arasındaki mesafe ve açı değişimi grafiği de elde edilmiştir. Bütün J noktalarının birbirlerine göre konumlarını veren CindyScript kodu EK-4'te verilmiştir.

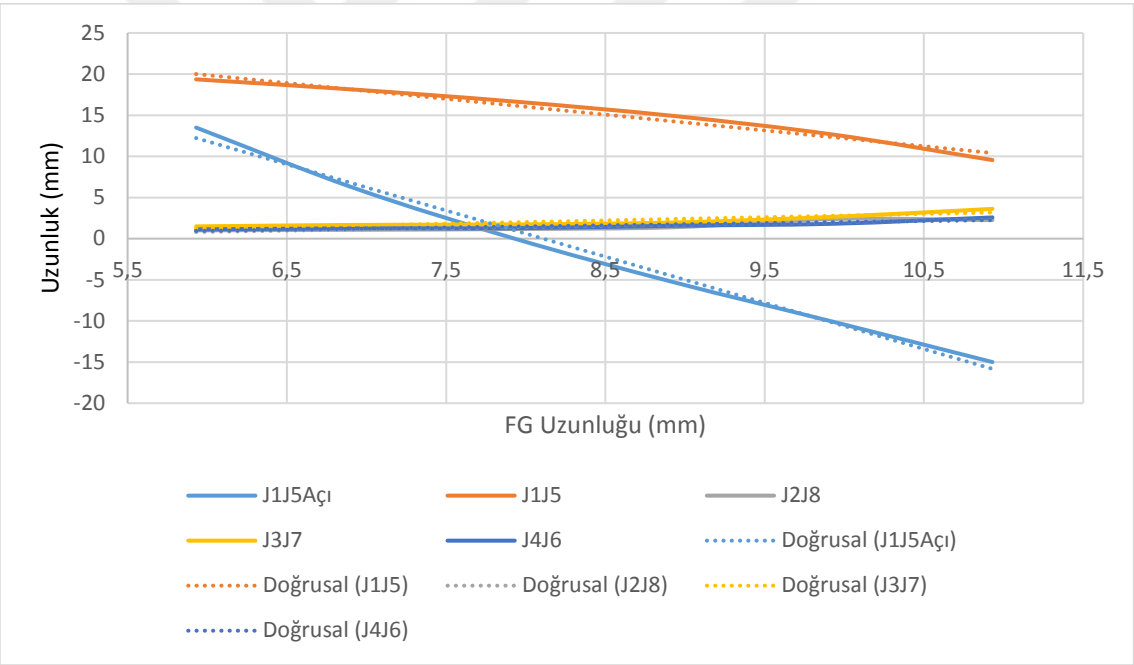
Mekanizmanın bütün uzuv mesafe değişimleri için bulunan grafikler burada verilmemiştir. Bazı uzuvların mesafe değişimleri, bir başkasının biyel eğrisi üzerinde oluşturduğu etkiye çok benzer bir etki oluşturmaktadır. Bu nedenle grafiklerden uzuv mesafesi değişimi, biyel eğrisindeki parametre değişimine yaklaşık lineer etkide bulunan dört adet mesafe incelenmiştir. Dört adet uzuv değişimi için komutlarda bahsedilen $J_1..J_8$ ekstremum noktalarından ulaşılan verilerle aşağıdaki grafikler çizilmiştir.



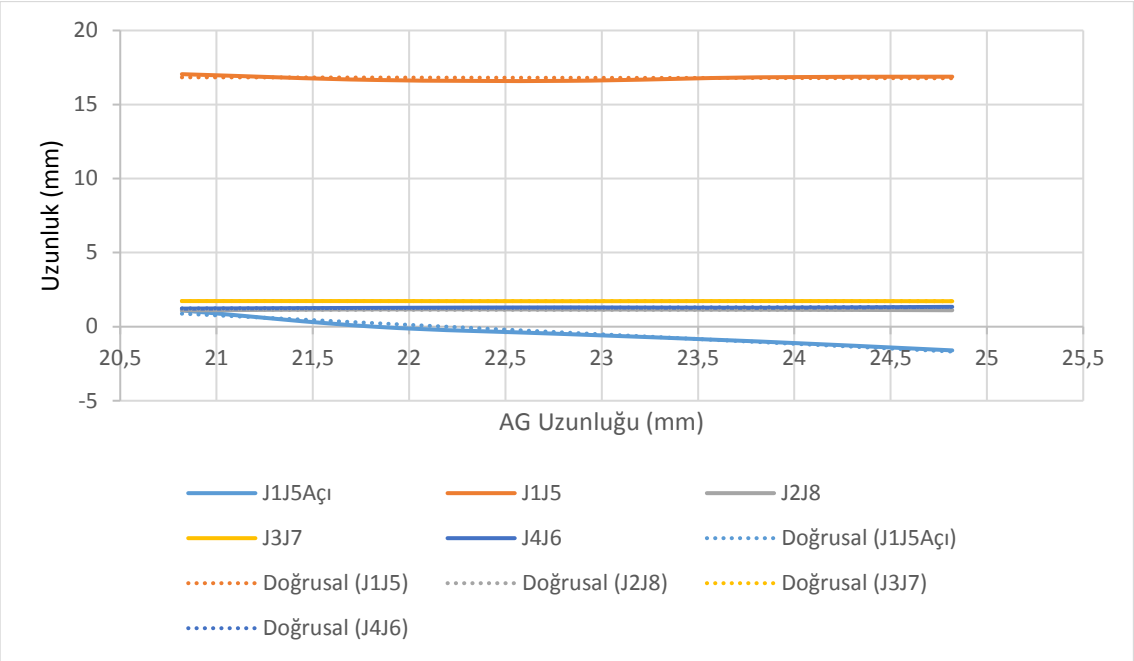
Şekil 6.4. AD mesafesi değişiminin biyel eğrisi değişkenlerine etkisi



Şekil 6.5. AB mesafesi değişiminin biyel eğrisi değişkenlerine etkisi



Şekil 6.6. FG mesafesi değişiminin biyel eğrisi değişkenlerine etkisi



Şekil 6.7. AG mesafesi değişiminin biyel eğrisi değişkenlerine etkisi

Yukarıdaki Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'deki değerler, Mathematica'dan çıkarılan konum fonksiyonlarının bir sonucudur. Fonksiyona ait değerler, PC bilgisayarda bile Mathematica yazılımıyla birkaç saniyelik işlem süreleri ile elde edilebilmektedir. Bunun sebebi bu fonksiyonlardaki terim sayısının fazla ve karmaşık olması ile konum analiz fonksiyonlarının nonlineer ifade içermesidir.

Yürüme hareketi yapan robotu kontrol eden mikrokontrolör, çevre şartlarına karşılık gerçek zamanlı tepki vermek zorundadır. Ayrıca matematiksel işlem kapasiteleri yazılımsal ve donanımsal yönden PC'lere göre yetersizdir. Bu yetersizliğin üstesinden FPGA (Field Programmable Gate Array) vb. devrelerin MCU'ya (Microcontroller Unit) modüle edilmesi yoluyla bir ölçüde gelinse de mevcut çalışmada böyle bir çözüme başvurulmamıştır. Bunun yerine daha önce açıklandığı gibi, değişimi biyel eğrisi parametrelerindeki değişimle geniş bir aralıkta lineere yakın şekilde etki oluşturan uzuvlar seçilmiştir. Seçilen bu uzuvlar AB, AD, FG ve AG'dir. Böylece elde edilen sadeleştirme, karmaşık fonksiyonların düşük mertebeli polinomlar ile ifade edilmesini sağlamıştır. Polinomlara ait katsayıları bulabilmek için Mathematica'dan fonksiyonlara ait seri değerler elde edilmiş, bu değerler bir veri tabanına aktarılmış ve yukarıdaki grafikler oluşturulmuştur. Grafiklerdeki eğriler belli değer aralıklarının dışına çıkıldığında doğrusallıktan büyük ölçüde sapmaktadır ki bu, eğriye uydurulmaya çalışılan polinomun mertebesinin yükseleceği anlamına gelir. Bu nedenle pek çok fizik uygulamasında olduğu gibi burada da mekanizma uzuvlarının değişim aralığı, biyel

eğrisinde yaklaşık lineer değişimin olduğu bölge ile sınırlandırılmıştır. Gerçekten de grafikler incelendiğinde, eğrilerin belirli değer aralıklarında yaklaşık doğrusal kabul edilebileceği görülmektedir.

Yukarıdaki grafiklerde noktalı çizgiler, ilgili eğrinin doğrusal fonksiyon uydurularak ifade edilmiş şeklidir. Sürekli çizgi, kesikli çizginin görünmesine ne kadar mani oluyorsa o çizgi lineerliğe o kadar yakındır. Eğer her uzva ait açı ve uzunluk değişkeni, fonksiyon çıkış değerine toplam olarak etki ediyorsa, uzuvlardaki mesafe değişimlerinin biyel eğrisine toplam etkisi de bu etkilerin enterpolasyonu ile bulunabilir.

Örnek olarak,

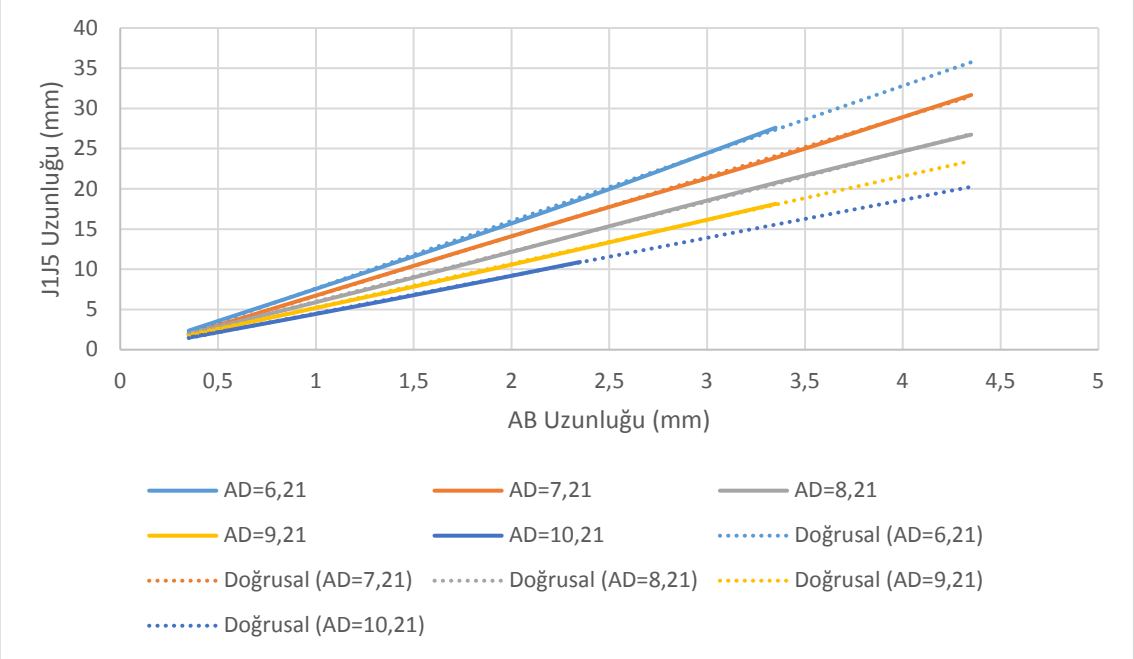
$$|AB| = v, \qquad |AD| = w, \qquad |FG| = x, \qquad |AG| = y, \qquad |J_1J_5| = z \tag{6.1}$$

olsun. z'nin v, w, x ve y'ye bağımlılığı lineer ise,

$$\frac{\partial z}{\partial v} = a, \qquad \frac{\partial z}{\partial w} = b, \qquad \frac{\partial z}{\partial x} = c, \qquad \frac{\partial z}{\partial y} = d \tag{6.2}$$

$$av + bw + cx + dy + e = z \tag{6.3}$$

olur. Burada e, integral sabitidir.



Şekil 6.8. Farklı AD uzunluk değerleri için AB mesafesi değişiminin J_1J_5'e etkisi

Şekil 6.8'de mekanizmadaki AD uzunluğunun farklı değerleri için AB uzunluğunun biyel eğrisindeki J_1J_5mesafesine olan etkisi incelenmiştir. Değişken olan

AB, AD, FG ve AG mesafeleri için de birbirleri arasındaki ilişkiyi analiz etmek için kombinasyonel olarak çok sayıda değer elde edilmiştir. Ancak gerekli görülmediği için buradan çıkan 21 tablo görseline çalışmada yer verilmemiştir. Değerlerin analizi neticesine göre a, b, c ve d değerleri v, w, x ve y'ye yaklaşık lineer bağımlı kabul edilebilir. Bu durum, Şekil 6.8'den de görülmektedir. Optimal durumda $|AB|_0 = 2.35$ mm, $|AD|_0 = 7.21$ mm, $|FG|_0 = 7.93$ mm ve $|AG|_0 = 21.82$ mm değerleri geçerlidir. Değer analizleri sonucunda aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} J_{1_X} = {} & (0.42|AD| - 0.16|FG| + 0.05|AG| - 5.66)|\boldsymbol{AB}| \\ & + (0.5|AB| - 0.1|FG| - 1.15|AG| + 27.18)|\boldsymbol{AD}| \\ & + (0.18|AB| + 0.04|AD| - 0.56|AG| + 10.78)|\boldsymbol{FG}| \\ & + (0.07|AB| - 1.15|AD| - 0.56|FG| + 22.09)|\boldsymbol{AG}| - 214.63 \end{aligned} \tag{6.4}$$

$$\begin{aligned} J_{1_Y} = {} & (0.42|AD| - 4.67)|\boldsymbol{AB}| + (0.33|AB| - 0.13|AG| + 2.54)|\boldsymbol{AD}| \\ & + (-0.06|AB| + 0.12|AD| - 0.07|AG| + 3.68)|\boldsymbol{FG}| \\ & + (-0.13|AD| - 0.07|FG| + 2.26)|\boldsymbol{AG}| - 109.79 \end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned} J_1J_5 = {} & (-0.84|AD| - 0.22|FG| + 0.18|AG| + 11.07)|\boldsymbol{AB}| \\ & + (-0.98|AB| + 0.16|FG| - 1.24)|\boldsymbol{AD}| \\ & + (-0.54|AB| - 0.04|AD| + 0.27|AG| - 6.08)|\boldsymbol{FG}| \\ & + (-0.04|AD| + 0.27|FG| - 1.86)|\boldsymbol{AG}| + 120.70 \end{aligned} \tag{6.6}$$

$$\begin{aligned} J_1J_5Ang = {} & (-0.10|FG| + 0.70|AG| - 14.48)|\boldsymbol{AB}| \\ & + (0.1|AB| - 0.30|FG| - 0.1|AG| + 3.85)|\boldsymbol{AD}| \\ & + (0.3|AB| - 1.12|AD| - 3.8|AG| + 84.98)|\boldsymbol{FG}| \\ & + (0.5|AB| - 0.37|AD| - 3.8|FG| + 31.09)|\boldsymbol{AG}| + 57.22 \end{aligned} \tag{6.7}$$

$$\begin{aligned} J_{2_X} = {} & (0.31|AD| + 0.25|FG| + 0.04|AG| - 4.69)|\boldsymbol{AB}| \\ & + (0.06|AB| - 0.5)|\boldsymbol{AD}| + (-0.33|AG| + 6.9)|\boldsymbol{FG}| \\ & + (-0.33|FG| - 2.54)|\boldsymbol{AG}| + 124.96 \end{aligned} \tag{6.8}$$

$$\begin{aligned} J_{2_Y} = {} & (0.61)|\boldsymbol{AB}| + (-0.02|AB| + 0.11)|\boldsymbol{AD}| \\ & + (0.22|AB| + 0.26|AD| - 1.97)|\boldsymbol{FG}| - 4.07 \end{aligned} \tag{6.9}$$

$$\begin{aligned} J_2J_8 = {} & (0.40|AD| - 0.13|FG| - 0.05|AG| - 0.76)|\boldsymbol{AB}| \\ & + (0.38|AB| + 0.06|FG| - 0.07|AG| + 1.18)|\boldsymbol{AD}| \\ & + (0.36|AD| - 0.14|AG| + 0.68)|\boldsymbol{FG}| \\ & + (0.10|AB| - 0.14|FG| + 0.82)|\boldsymbol{AG}| - 6.57 \end{aligned} \tag{6.10}$$

$$J_{3_X} = (-0.59|AD| + 0.08|FG| + 0.49|AG| - 3.20)|\boldsymbol{AB}| + (-0.68|AB| + 0.09|FG| + 0.17|AG| - 4.10)|\boldsymbol{AD}| + (-0.51|AB| - 0.15|AD| + 0.12|AG| - 1.30)|\boldsymbol{FG}| + (-0.31|AB| - 0.16|AD| - 0.12|FG| + 2.85)|\boldsymbol{AG}| + 16.07 \quad (6.11)$$

$$J_{3_Y} = (-0.23|AD| + 0.34|FG| - 0.07|AG| + 1.98)|\boldsymbol{AB}| + (-0.07|AB| - 0.07|FG| + 0.69)|\boldsymbol{AD}| + (0.39|AB| + 0.40|AD| - 0.09|AG| - 1.22)|\boldsymbol{FG}| + (-0.09|FG| + 0.71)|\boldsymbol{AG}| - 6.44 \quad (6.12)$$

$$J_3J_7 = (0.68|AD| + 0.07|FG| - 4.41)|\boldsymbol{AB}| + (0.57|AB| + 0.17|FG| - 1.48)|\boldsymbol{AD}| + (0.06|AB| + 0.06|AD| + 0.53)|\boldsymbol{FG}| + (-0.07|AD| + 0.06|FG| + 0.10)|\boldsymbol{AG}| - 19.74 \quad (6.13)$$

$$J_{4_X} = (-1.00|AD| - 0.24|FG| + 15.76)|\boldsymbol{AB}| + (-0.87|AB| + 0.13|FG| + 0.82)|\boldsymbol{AD}| + (-0.56|AB| - 0.06|AD| + 0.25)|\boldsymbol{FG}| + (-0.13)|\boldsymbol{AG}| + 13.33 \quad (6.14)$$

$$J_{4_Y} = (0.09|FG| - 0.15|AG| + 3.30)|\boldsymbol{AB}| + (-0.04|AB| + 0.12)|\boldsymbol{AD}| + (0.21|AB| + 0.18|AD| - 0.2|AG| + 2.98)|\boldsymbol{FG}| + (-0.2|FG| + 1.51)|\boldsymbol{AG}| - 2.24 \quad (6.15)$$

$$J_4J_6 = (0.31|AD| - 0.18|FG| - 0.10|AG| + 1.73)|\boldsymbol{AB}| + (0.49|AB| - 0.08)|\boldsymbol{AD}| + (0.08|AB| + 0.23|AD| - 0.2|AG| + 2.82)|\boldsymbol{FG}| + (0.11|AB| - 0.2|FG| + 1.33)|\boldsymbol{AG}| - 9.74 \quad (6.16)$$

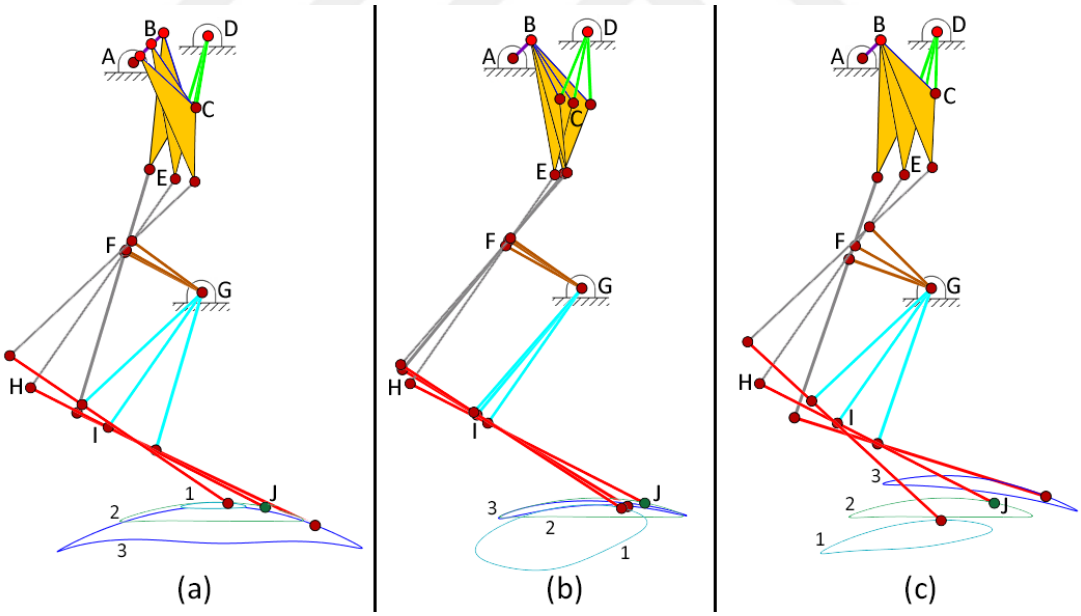
Bütün denklemlerde bilinmeyen sayısı dörttür. Dolayısı ile bu denklemlerden herhangi dört tanesine (örneğin J_1J_5, J_2J_8, J_3J_7 ve J_4J_6) değer verilerek uzuv boyları elde edilir. Eğriye ait diğer mesafeler ise bulunan bu dört değerin yerine konulması ile bulunabilir.

Burada J_{1_X}, J_{1_Y} değerleri mutlak koordinat sistemine göre bulunmuşken J_{2_X}, J_{2_Y}, J_{3_X}, J_{3_Y}, J_{4_X}, J_{4_Y} değerleri döndürülmüş koordinat düzlemine göre bulunmuştur. Bu denklemler pek çok mikrokontrolörün çözebileceği basitliktedirler. Neredeyse bütün denklemlerde AB ve AD mesafe değişimlerinin etkisi FG ve AG'ye göre daha fazladır. Çünkü AB ve AD, mekanizmaya tahrik sağlayan temel dört çubuk mekanizmasına ait mesafelerdir.

Yukarıdaki eşitlikler elde edildikten sonra; mekanizmanın farklı engellere dinamik olarak uyum sağlayabilmesi için nasıl bir yürüme eğrisinin gerektiği ve buna bağlı olarak uzuv mesafelerinde ne kadarlık değişim yapılması gerektiği hesaplanmıştır.

Özellikle mekanizma bütünlüğünün bozulduğu eşik değerlerin yakınında, mekanizma uzuv boylarındaki artış veya azalmalar, biyel eğrisinde lineer değişimlere sebep olmazlar. Bu nedenle uzuv boyundaki değişim, yaklaşık lineer değişimin meydana geldiği bölgede tutulmuştur.

Şekil 6.7 ve Şekil 6.13 arasındaki şekillerde mekanizmaya ait bütün uzuv boyu değişimlerinin J noktasının çizdiği biyel eğrisine etkileri görülmektedir. Daha önceden de açıklandığı gibi A, D ve G noktaları 1 numaralı (sabit) uzva mafsallı sabit noktalardır. Verilen şekillerin tamamında 2 numaralı (yeşil renkli) eğri optimum uzuv boyları durumundaki biyel eğrisini, 1 numaralı (turkuaz renkli) eğri alınan mesafenin azalması durumunda ortaya çıkan eğriyi ve 3 numaralı (mavi renkli) eğri ise mesafenin artması durumunda ortaya çıkan eğriyi göstermektedir.



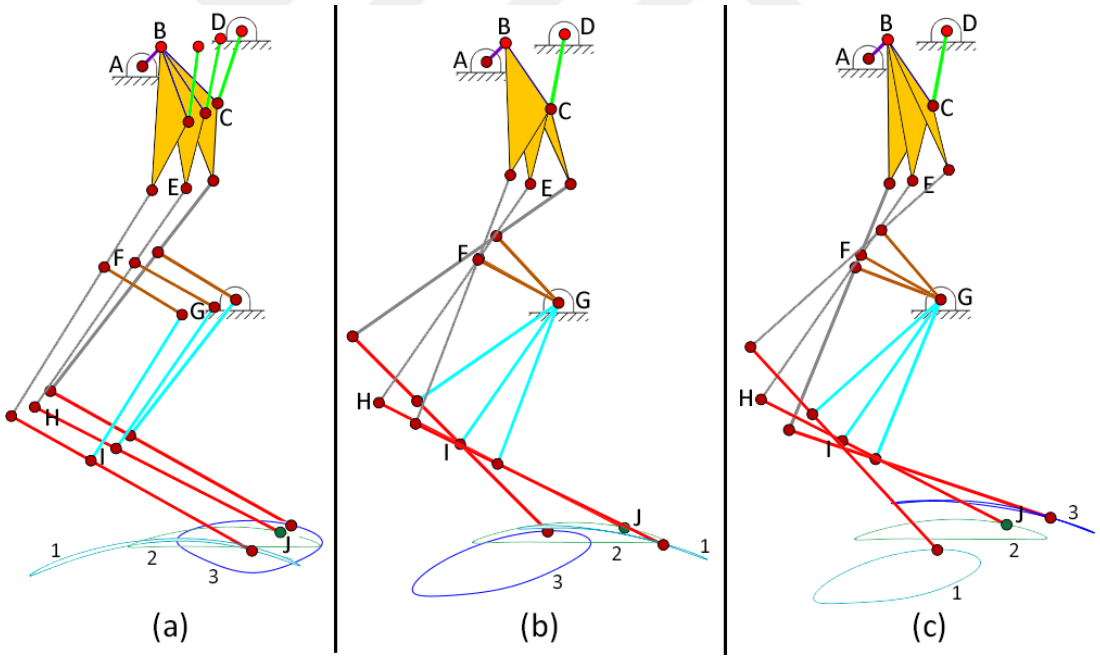
Şekil 6.9. AB (a), BC (b) ve CD (c) mesafesi değişiminin biyel eğrisine etkisi

Şekil 6.9 (a)'da görüldüğü gibi AB mesafesinin azalması halinde J_3 ve J_5 noktalarının x koordinat değeri yaklaşık sabit kalmakta; bütün J noktalarının y koordinatı değerleri artmakta; biyel eğrisi genel olarak yukarı yönlü fotokopik olarak daralmaktadır. Robotun yere temas bölgesindeki doğrusallık bir miktar bozulmakta olup J_6 ve J_8 noktaları, J_1J_5 noktalarını birleştiren doğrudan ayrılarak yukarıya çıkmaktadır. Bunun sebebi J_2J_8 ve J_4J_6 mesafesinin J_1J_5 mesafesi ile orantılı olmamasıdır. AB parametresi

adım uzunluğu ve yüksekliğinin artırılıp azaltılması amacı ile kullanılabilir. Yine ilerleme hızının artırılıp azaltılması motor devrinin değiştirilmesiyle sağlanabileceği gibi, AB uzunluğu değiştirilerek de elde edilebilir.

BC mesafesinin azalması halinde J_1J_5 açısı artmakta; J_1J_5 uzunluğu yaklaşık sabit kalmakta; J_2J_8 uzunluğu J_4J_6'dan daha fazla olmak kaydıyla artmakta ve biyel eğrisi ovalleşmektedir. BC değişiminin biyel eğrisine etkisi Şekil 6.9 (b)'de görülmektedir. BC parametresinde değişiklik yapılarak engel atlama için adım yüksekliği ayarlanabilir ve J noktası için izafi olarak dik hareket elde edilebilir.

CD değişiminin etkisi Şekil 6.9 (c)'de görülmektedir. CD mesafesinin artması biyel eğrisinin kendi ekseninde saat yönünde dönmesine ve (J_3 noktasının konumu döndürülmüş eksene göre yaklaşık sabitken) J_3J_7 mesafesinin azalmasına neden olmaktadır. Bu özellik sayesinde konveks veya konkav zeminde ayak uzvunun yere temas bölgesi artırılabilir.



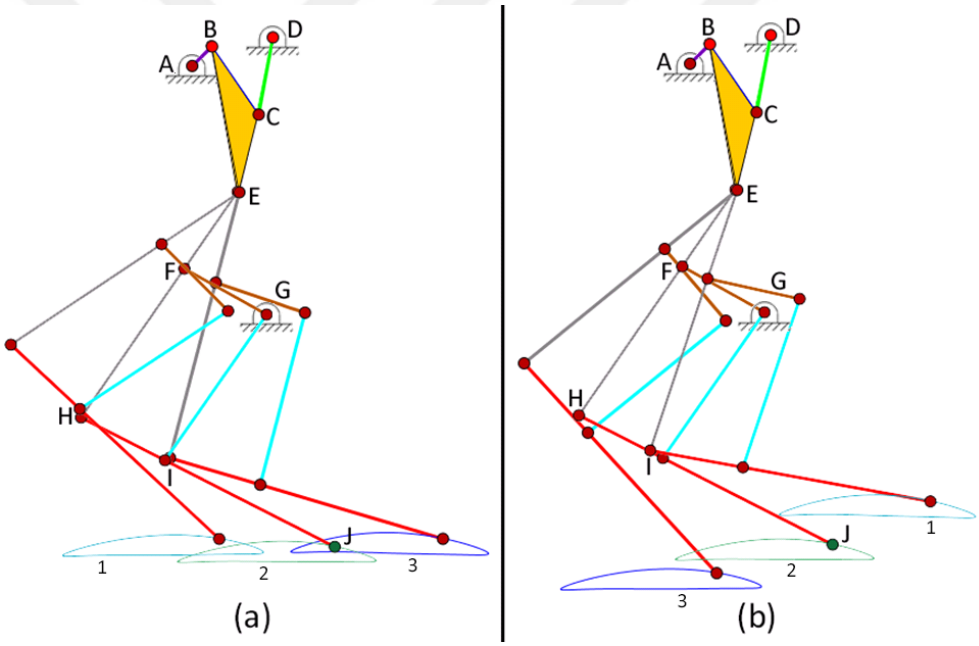
Şekil 6.10. AD (AD açısı sabit kalmak kaydıyla) (a), BE (b) ve CE (c) mesafesi değişiminin biyel eğrisine etkisi

AD açısının azalması (saat yönünün tersi) biyel eğrisini, diğer parametreler sabit kalmak kaydıyla A çevresinde saat yönünün tersi yönde döndürmektedir. AD açısının artması ise tam tersi etkiyi yapmaktadır. Şekil 6.10 (a)'ya göre AD mesafesinin azalması bütün J noktalarının X koordinatı değerinin azalması, J_6, J_7 ve J_8 noktalarının Y koordinatı değerinin artması; $J_2J_8, J_3J_7, J_3J_8, J_1J_5$ mesafelerinin azalması; J_1 ve J_5'in artması yönünde

bir etki meydana getirmektedir. Eğri düzleminin açısal dönmesi ise ihmal edilebilir. Bu nedenle AD parametresi diğer parametre değişimlerinden meydana gelen dönme faktörünün yok edilmesi amacıyla kullanılabilir.

Şekil 6.10 (b)'de de görüldüğü gibi BE mesafesinin değişimi, AD'nin değişimine benzer bir etki oluşturmakla birlikte, biyel eğrisinin şeklinde bir miktar çarpılma meydana getirmektedir. BE'nin artması ile oluşan çarpılma, biyel eğrisinde hücum kenarı olarak kullanılabilir.

CE'nin değişimi, BE mesafesinin değişimi ile yaklaşık olarak aynı etkiyi yapmaktadır. Bu etki Şekil 6.10 (c)'de görülmektedir. Ancak CE'nin azalması ile oluşan etki, BE'nin artması sonucu meydana gelen durum ile benzerdir. Yine CE'nin artması ile oluşan etki de BE'nin azalması sonucu meydana gelen durum ile benzerdir.

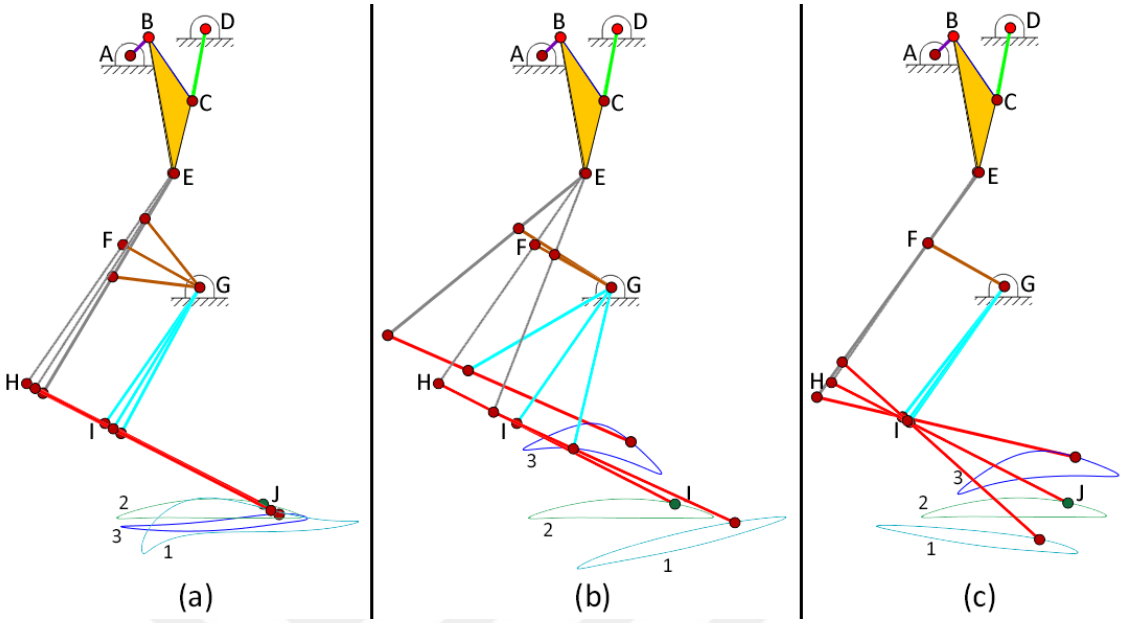


Şekil 6.11. AG (a) ve DG (b) mesafesi değişiminin biyel eğrisine etkisi

Şekil 6.11 (a)'ya göre AG mesafesinin artması neticesinde biyel eğrisi A noktası merkez olmak üzere saat yönü tersine dönme yapmakta, aynı zamanda kendi ekseninde saat yönünde dönme yapmaktadır. Bu iki hareketin toplamında biyel eğrisi örneğin yer düzlemine göre açısı değişmeksizin döndürülebilmektedir.

DG mesafesindeki değişimler AG değişiminin sonuçlarında olduğu gibi yer düzlemine göre açı sabit kalmak suretiyle biyel eğrisinin D noktası çevresinde dönmesine neden olmaktadır (Şekil 6.11 (b)). Ancak AG değişiminden farklı olarak DG'nin azalması sonucu biyel eğrisi D noktasına yaklaşmaktadır ve bu etki ihmal edilemeyecek

düzeydedir. Sonuç olarak robotun boyu ve ayak uzvunun yer düzlemine göre diklik-yataylık durumu kontrol edilebilmektedir.

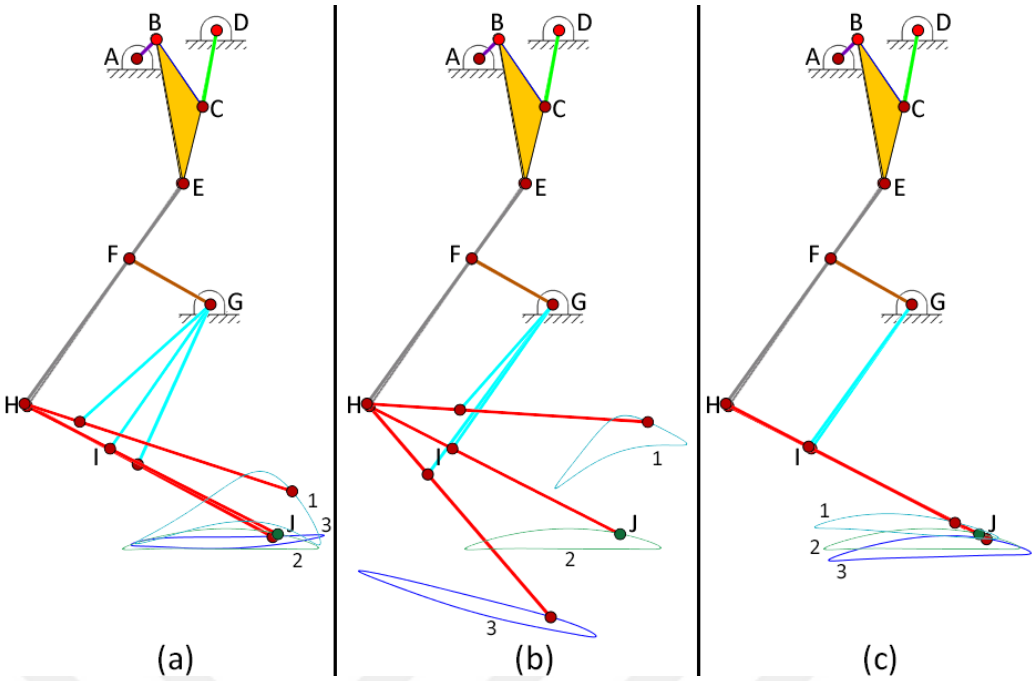


Şekil 6.12. EF (a), FG (b) ve EH (c) mesafesi değişiminin biyel eğrisine etkisi

EF mesafe değişimi J noktasının biyel eğrisinin ideal yürüme eğrisinden sapmasına neden olduğu için değiştirilmesine ihtiyaç görülmemiştir (Şekil 6.12 (a)).

FG mesafesinin değişimi genel olarak J_3J_7 uzaklığı, yani adım yüksekliğini etkilemektedir ve bu durumda biyel eğrisi, ideal yürüme eğrisi profilinden bir miktar sapmaktadır (Şekil 6.12 (b)). Bu etki, J_3 noktasının yukarı yöndeki yer değiştirmesinin J_7'den daha fazla olması nedeniyle oluşur. Biyel eğrisinin temas bölgesindeki doğrusallığının bozmasının önüne ise AD mesafesinin artırılması ile geçilebilir.

EH'nin değişimi, FG'nin değişimiyle oluşan duruma benzer etki oluşturmaktadır (Şekil 6.12 (c)). Buna rağmen FG değişimi ile robotun boyu değişmekte, EH değişiminde ise yaklaşık sabit kalmaktadır. Ayrıca FG'nin artması sonucu biyel eğrisi saat yönünde dönerken EH artışı ile dönme ters yönde gerçekleşmektedir.

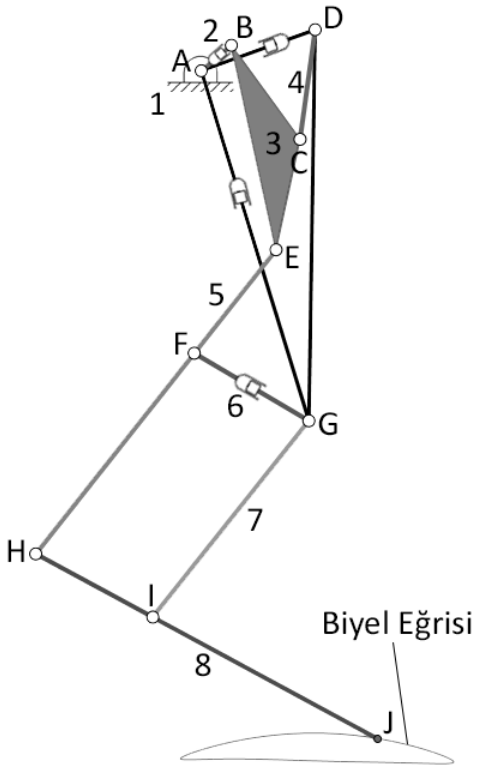


Şekil 6.13. HI (a), GI (b) ve HJ (c) mesafesi değişiminin biyel eğrisine etkisi

HI değişimi; J_1J_5 değeri yaklaşık sabitken J_3J_7 mesafesinin değişmesine neden olmaktadır (Şekil 6.13 (a)).

GI değişimi, biyelin şekli bakımından HI değişimi ile benzer etkide bulunmakta, ayrıca biyel eğrisini saat yönü tersine döndürmektedir (Şekil 6.13 (b)).

Şekil 6.13 (c)'de görüldüğü gibi HJ mesafe değişimi ile açısı ve şekli değişmeksizin biyel eğrisi konumu aşağı ve yukarı yönde kaydırılabilmektedir. Bu, robotun boyunun uzatılması veya kısaltılması amacıyla kullanılabilir. Çeşitli uzuv mesafe değişimleri neticesinde robot boyunda istenmeyen değişimler de meydana gelmektedir. HJ ile istenmeyen bu değişimler tolere edilebilir.

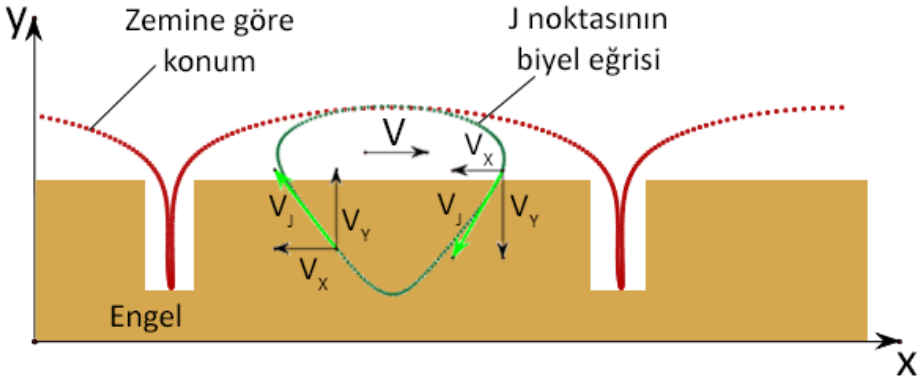


Şekil 6.14. Mekanizmanın uzuv boyları değişebilir hale getirilmiş gösterimi

Mevcut çalışmada AD uzunluk ve açısı, AB, FG ve AG mesafeleri değiştirilebilir olarak seçilmiştir. Mekanizmanın bu haldeki şematik çizimi Şekil 6.14'de görülmektedir. Hangi uzvun ayarlanabilir olacağının seçiminde, uzuv boyu değişimlerinin biyel eğrisinde lineer değişime sebep olanlar dikkate alınmıştır. Biyel eğrisi, parametre değişimleri sonucu genişleyip daralmakta, biçimi değişmekte, ayrıca dönmektedir. J noktaları analiz edilirken biyel düzlemi dönme açısı göz önünde bulundurulmuş ve döndürülmüş düzlem üzerinden mesafe değerleri ölçülmüştür.

6.2. Simülasyon Sonuçları

İncelenen engel tipine uygun yürüme eğrisini bulmak için önce bu engeli aşabilecek eğri bulunmaya çalışılmıştır. Örneğin Şekil 6.15'de eğri, J noktasının zemine göre konum eğrisi olarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi robotun ilerleme hızı (V), J noktasının hızının yatay bileşenine (V_X) eşit ve zıt yönlü ise zemine göre konum eğrisinde dikey iniş çıkış bölgeleri oluşur.



Şekil 6.15. Ayak uzvunun çizdiği yörüngenin araca göre (yeşil) ve ilerleme zeminine göre (kırmızı) oluşturduğu eğri

J noktası için ideal biyel eğrisi bulunduktan sonra mevcut mekanizma ile bu eğrinin nasıl elde edilebileceği araştırılmıştır. Bunun için uzuv mesafe değişimlerinin biyel eğrisine etkisi bölümündeki denklemlerden yararlanılmıştır. Sonuç olarak da mekanizma uzuv boyları tayin edilmiş ve simülasyon işlemine geçilmiştir. Simülasyonlarda bir değil, dört adet yürüme mekanizması ve gövdenin oluşturduğu robot deneye tabi tutulmuştur.

Denemelerin tamamında robotun aştığı engellere ait parametreler, robotun hareket yeteneğini belirleyici niteliktedir ancak robotun en uç ilerleyebilme sınırlarını ortaya koymaz. Bütün simülasyonlar Algadoo v2.1.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

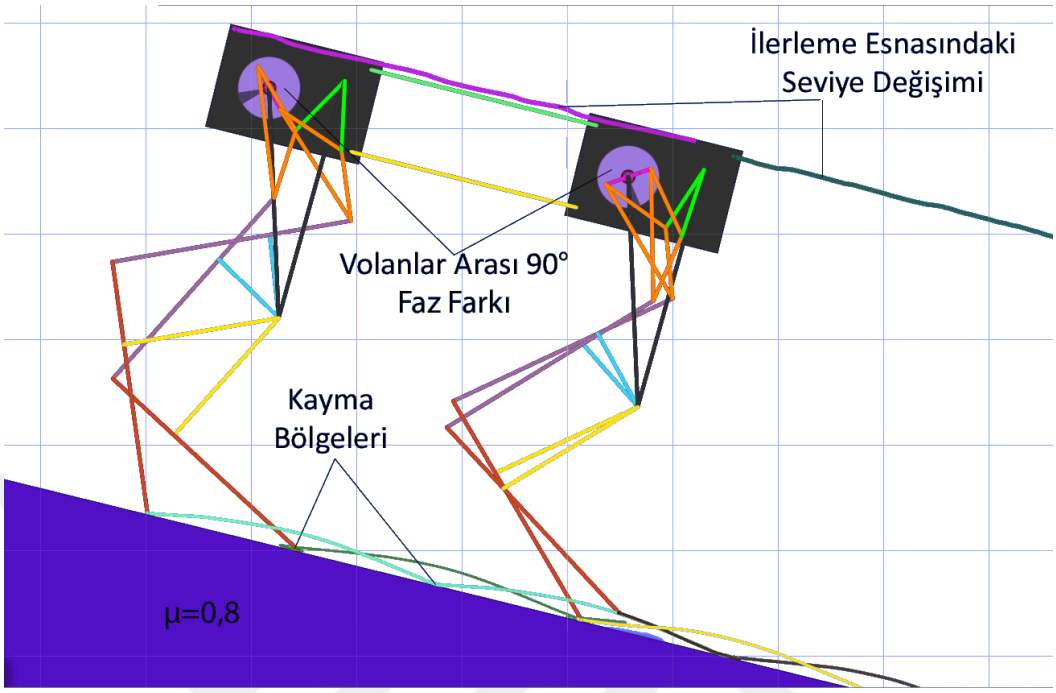
6.2.1. Rampa inme/çıkma durumu

Bu tip bir koşulda simülasyon yapılmasının nedeni, robotun ideal yürüme eğrisi ile düz zeminde ilerlemesinin incelenmesi ve en fazla ne kadarlık bir eğime rahatça tırmanabileceğinin test edilmesidir. Robot ayağının zemine temas bölgesinin kauçuk, yerin ise asfalt olduğu varsayımıyla statik sürtünme katsayısı değeri $\mu = 0.8$[1)] (Lorenz ve ark., 2013) alınmıştır.

Simülasyonlarda hava sürtünmesi de göz önünde bulundurulmuştur. Hava için sürtünme kuvveti (F) hesaplanırken[2)], ρ havanın yoğunluğu ($1.225\ kg/m^3$) (Anonymous, 1954), A cismin kesit alanı, C direnç katsayısı ve V ise bağıl hızdır. F değeri kesit alanı ve hızın sürekli değişmesinden dolayı değişkendir. Yerçekimi ivmesi

[1)] Kuru sürtünme kuvveti: $F_s = \mu.F$ (μ katı-katı teması için sürtünme katsayısı ve F temasa zorlayan normal kuvvettir.)
[2)] Akışkan sürtünme kuvveti: $F_s = \rho.C.A.V^2$

$g = 9.8\, m/s^2$ değerindedir. Şekil 6.16'daki arazi tipi yüzeysel, pozitif etkili sabit eğimli satıh olup rampa açısı 18°'dir.



Şekil 6.16. Robotun rampa tipi engele tırmanma simülasyonu

Yürüme dört ayak ile sağlanmaktadır ve simülasyondaki robotun uzuv mesafeleri ideal durumdaki ile aynıdır. Yürüme hareketinin zemine temas bölgelerinde ayaklar arasındaki görev devrinde ayakların hız farklılığının robotun ilerlemesinde karasızlık oluşturmaması için, ayak uzvu zemine basmaya başladığında 8 numaralı ayak uzuv dik açıda, zeminden ayrılmaya yakın bölgelerde ise daha düşük açılardadır. Böylece ayaklardan herhangi biri, zemine ilk temas etmeye başladığında zemin ile sürtünmesi fazla olup sonradan sürtünme, dolayısı ile itme kuvveti azalmaktadır.

Farklı sonuçları incelemek amacıyla yokuş tırmanma parkurunda robota ait arka ve ön ayakların krank açıları arasında 90° faz farkı oluşturularak deneme tekrarlanmıştır. Bunun yapılmasındaki amaç, ayaklar arasında faz farkı olmamasından kaynaklanan hız dalgalanmalarının rampa çıkarken düz zeminde ilerlemeye göre daha fazla istenmeyen sonuçlar ortaya çıkarmasıdır. İstenmeyen sonuçlar kayma, titreşim, ayakların satıh temasının kesilmesi gibi durumlardır.

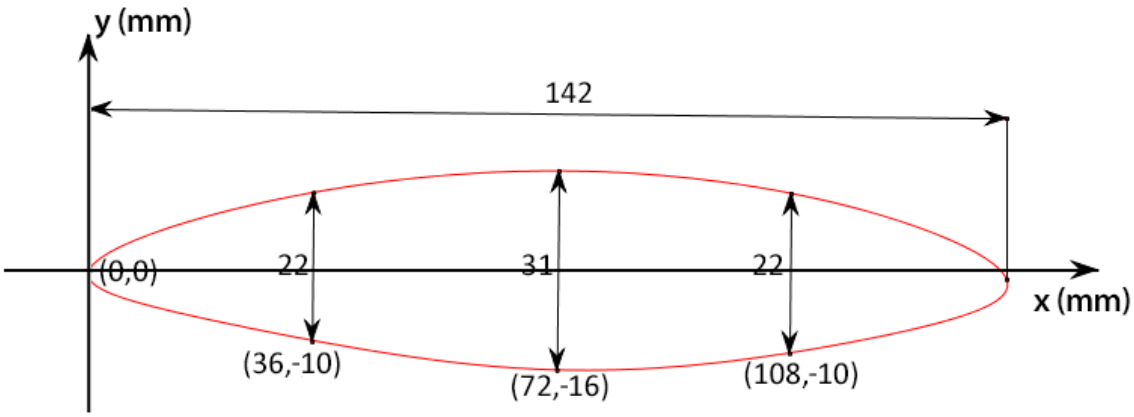
6.2.2. Değişken eğimli zeminde ilerleme durumu

Zeminin düzgün olmaması nedeniyle ayak uzuvlarının satıh teması kesilebilir. Bu durum, eğime uygun biyel eğrisinin çizilmesini gerekli kılar. Bu nedenle robotun ilerleme davranışı yüzeysel, pozitif etkili, sürekli değişken eğimli satıh tipi için simüle edilmiştir. Yer düzlemi ile ayaklar arasındaki sürtünme katsayısı değeri, kauçuk-asfalt değeri olan 0.8 seçilmiştir. Konveks ve konkav zemin için en küçük eğrilik yarıçapı değeri (R) 125 mm'dir. Dinamik kararlılığın bozulmaması için simülasyonda robotun ilerleme hızı sanki dengeli durumu bozmayacak mertebede tutulmuştur.

Robotun ilerlemesi sırasında negatif eğimlerde ileri kayma, pozitif eğimlerde geriye kayma oluşmaktadır. Belirtilen açı değerlerinde robotun ilerlemesinde kararlılık bozulmamaktadır. Sürekli temasın sağlanması için ön ve arka ayağın biyel eğrisi arasında bir miktar açı bulunur. Bu açı,

$$\alpha = 2.\sin^{-1}\left(\frac{L}{R-h}\right) \tag{6.17}$$

eşitliği ile bulunmuştur. Burada α açısı biyel eğrileri arasındaki açı, R zeminin eğrilik yarıçapı, h tahrik milinin yerden yüksekliği (mekanizmanın A noktasının yerden yüksekliği), L ise robotun uzunluğudur (ön ve arka tahrik milleri arasındaki mesafe).



Şekil 6.17. Konkav zemin için belirlenen yürüme eğrisi

Bu zeminde istenen biyel eğrisi için parametreler şu şekildedir:

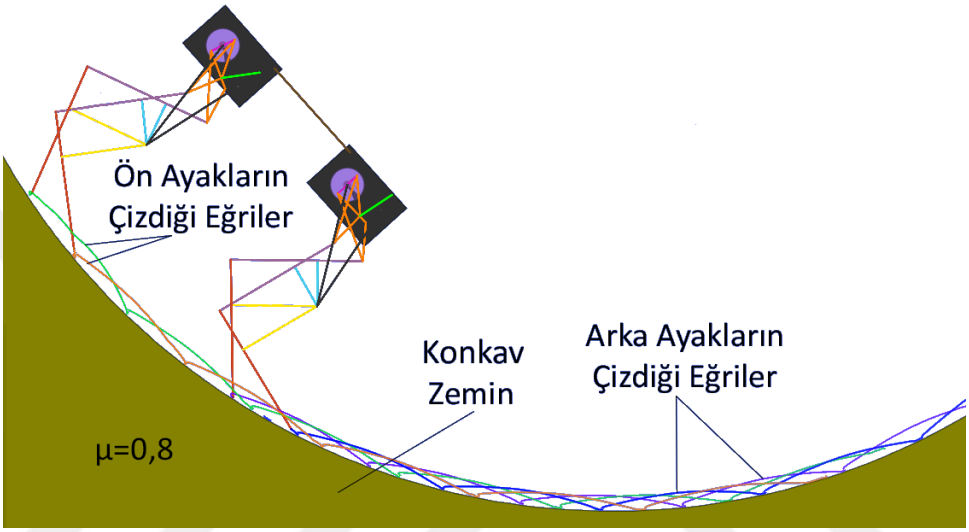
$\alpha = 4.8°$ $\quad AD\ Açısı = 2.4°$ $\quad J_1J_5 = 142\ mm$

$J_2J_8 = 22\ mm$ $\quad J_3J_7 = 31\ mm$ $\quad J_4J_6 = 24\ mm$

Buradaki dört mesafe değeri; (6.6), (6.10), (6.13) ve (6.16) denklemlerinde yerine konularak AB, AD, AG ve FG uzunlukları aşağıdaki gibi bulunur:

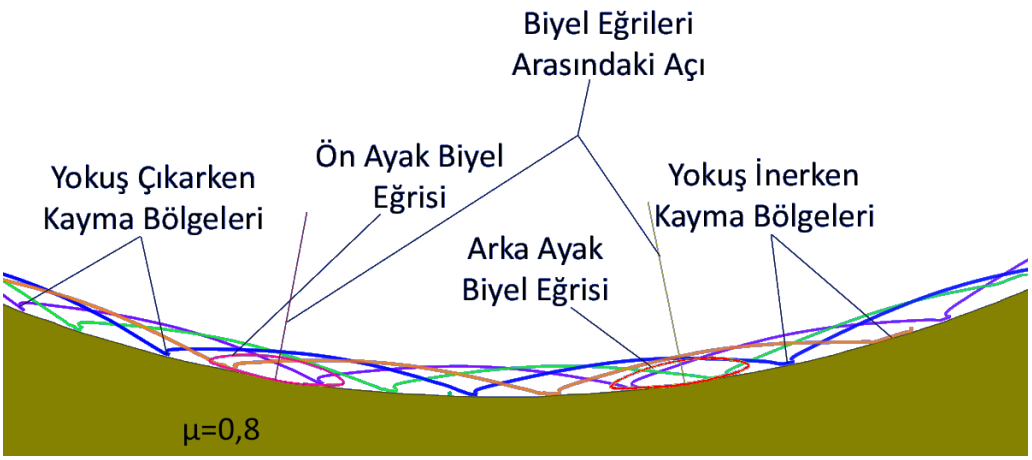
$AB = 23.5\ mm$	$BC = 69.4\ mm$	$CD = 66\ mm$
$AD = 83\ mm$	$BE = 124.7\ mm$	$CE = 67.3\ mm$
$AG = 218.2\ mm$	$DG = 233.1\ mm$	$EF = 78.6\ mm$
$FG = 79.3\ mm$	$FH = 151.4\ mm$	$HI = 79.3\ mm$
$GI = 149.5\ mm$	$IJ = 152.4\ mm$	

Bu değerler ile mekanizma çizilmiş ve Şekil 6.18'de görüldüğü gibi simüle edilmiştir.



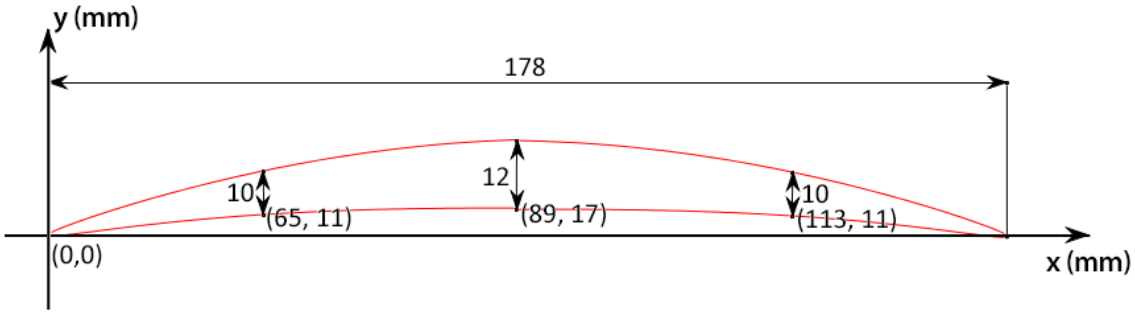
Şekil 6.18. Konkav zeminde robotun ilerlemesi ve ayaklara ait J noktalarının çizdiği eğriler

Robot, açıklanan eğrilikteki zeminde $-40°$ ve $40°$ eğim boyunca ilerleme yapmıştır. Daha dik tırmanma açılarında geriye devrilme hali, sürekli yüzey temasının ortadan kalkması, titreme gibi durumlar meydana gelmektedir. Robotun dengesi ve tırmanma açısı, robotun ön ve arka gövdeleri arasındaki mesafenin artırılması veya ağırlık merkezinin yere yaklaştırılması ile daha da artırılabilir.



Şekil 6.19. Konkav zemin için yürüme eğrileri ve robotun ilerlemesi sırasında oluşan durumlar

Konkav zeminde yapılan deneme, konveks zeminde yapılanla önemli derecede benzerlik gösterir. Engel ve çevre özellikleri daha önce belirtildiği gibidir. Simülasyon, robotun $-40°$ ve $40°$eğimde hareketi ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 6.20. Konveks zemin için belirlenen biyel eğrisi

Robotun bu satıhta hareketi istenen biyel eğrisi için parametreler şu şekildedir:

$\alpha = 4.8°$ $\quad ADAçısı = 4.8°/2 = 2.4°$ $\quad J_1J_5 = 178\ mm$

$J_2J_8 = 10\ mm$ $\quad J_3J_7 = 12\ mm$ $\quad J_4J_6 = 10\ mm$

Yine bu dört mesafe değeri; (6.6), (6.10), (6.13) ve (6.16) denklemlerinde yerine konularak AB, AD, AG ve FG uzunlukları aşağıdaki gibi bulunur:

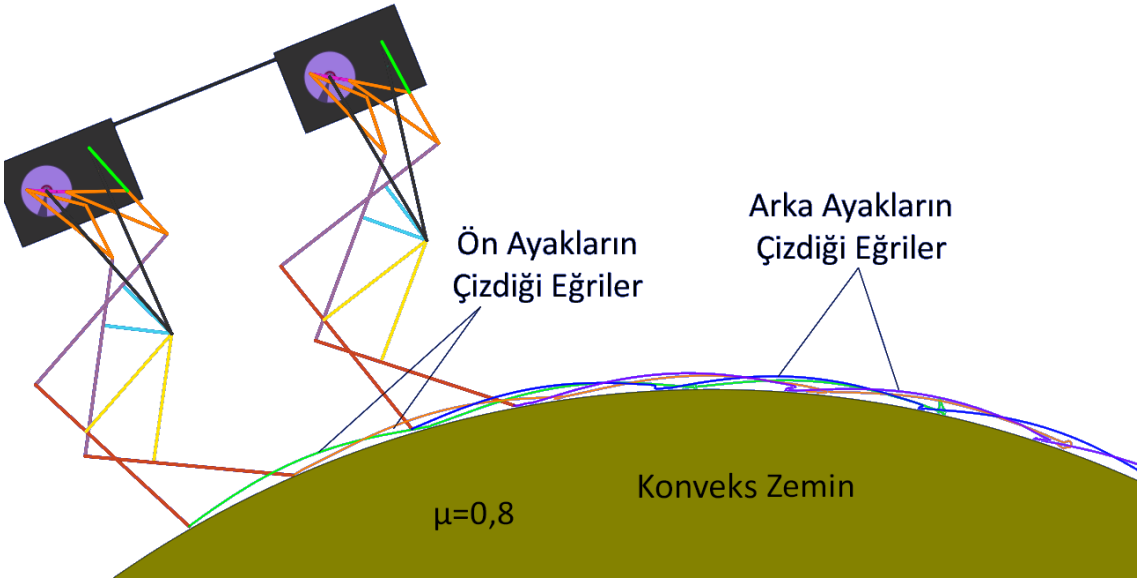
$AB = 23.5\ mm$ $\quad BC = 69.4\ mm$ $\quad CD = 66\ mm$

$AD = 68\ mm$ $\quad BE = 124.7\ mm$ $\quad CE = 67.3\ mm$

$AG = 218.2\ mm$ $\quad DG = 233.1\ mm$ $\quad EF = 78.6\ mm$

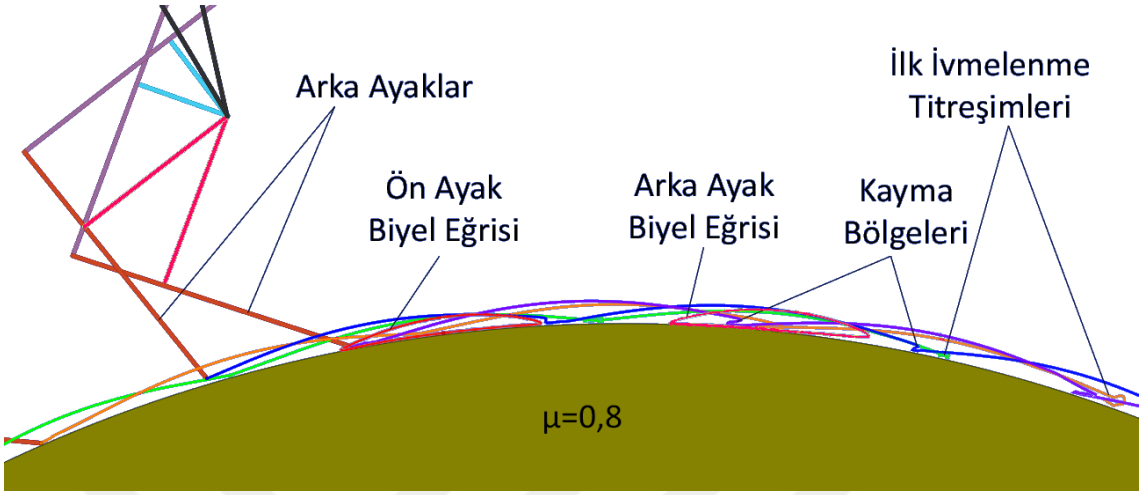
$FG = 79.3\ mm$ $\quad FH = 151.4\ mm$ $\quad HI = 79.3\ mm$

$GI = 149.5\ mm$ $\quad IJ = 152.4\ mm$



Şekil 6.21. Konveks zeminde robotun ilerlemesi ve ayaklara ait J noktalarının çizdiği eğriler

Robotun ilerlemesi sırasında meydana gelen dinamik etkiler Şekil 6.22'de görülmektedir. Burada görülen kırmızı eğri ön ayaklara, sarı eğri ise arka ayaklara ait biyel eğrisidir.

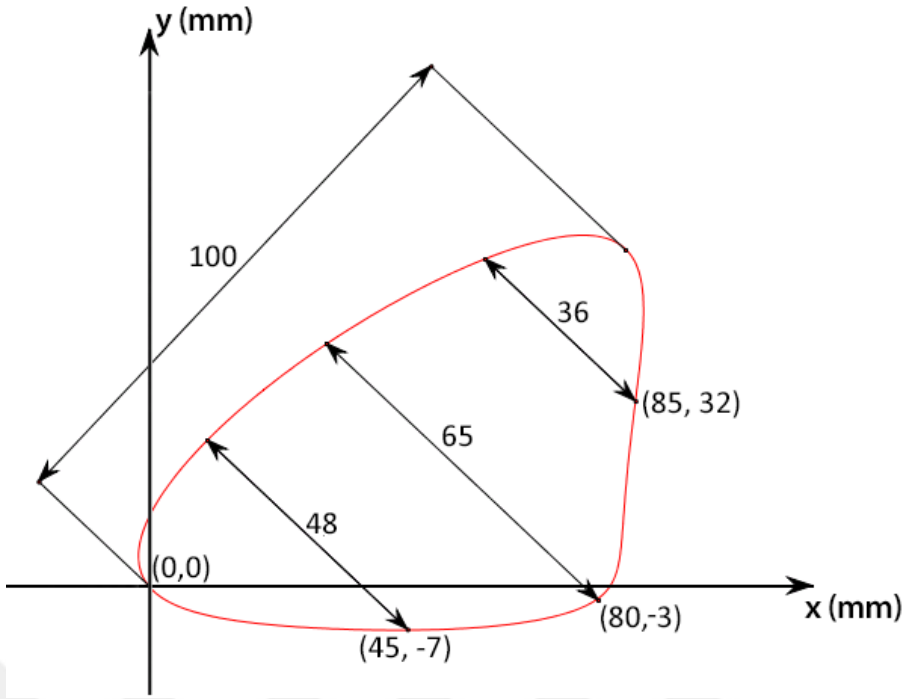


Şekil 6.22. Konveks zemin için yürüme eğrileri ve robotun ilerlemesi sırasında oluşan durumlar

Yüzeye tutunmayı artırmak için AD açısı daha önce hesaplanan α değeri kadar değiştirilmiştir. Bu değişim konkav zeminde ayaklar arasındaki mesafenin artmasına, konvekste ise azalmasına neden olur. Ayaklar arasındaki mesafe değişimi devrilme kararlılığını etkileyen faktörlerden olduğundan konkav zeminde hareket sırasındaki devrilme kararlılığı konveks zemindekine göre daha fazladır.

6.2.3. Basamak çıkma/inme durumu

Basamak, karşılaşılma durumu fazla olduğu için robotun simülasyona tabi tutulduğu bir diğer engel tipi olmuştur. Basamak yüksekliği 50 mm, basamak genişliği ise 70 mm'dir. Yani 35°'lik bir eğim söz konusudur ki bu değer mesken ve iş yerleri için belirlenen standart (Anonymous, 1954) kapsamındadır. Diğer denemelerde olduğu gibi $\mu = 0.8$ olarak kabul edilmiştir. Yerçekimi ivmesi, hava sürtünmesi ideal şartlardaki değerlerdedir.



Şekil 6.23. Basamak çıkma durumu için belirlenen döndürülmüş biyel eğrisi

Basamak çıkma ve inme için istenen hareket eğrisi tasarlanırken, Şekil 6.23'te görüldüğü gibi bir dik üçgene ait geometrik değişkenler esas alınmıştır. Basamak parametrelerinde $h = 50\ mm$ ve $l = 70\ mm$ olduğundan bu üçgen ikizkenar dik üçgen olmaz. AD uzuv açısına müdahale etmeksizin 8 uzuvlu yürüme mekanizması ile böyle bir eğri elde edilemez. Bu nedenle 20° olan AD uzuv açısı 52°'ye çıkarılmıştır, yani mekanizma saat tersi yönünde döndürülmüştür. Şekil 6.23'teki uzunlukların (6.6), (6.10), (6.13) ve (6.16) numaralı denklemlerde yerine konulması ile:

$J_1J_5 = 100\ mm$ $\quad$ $J_2J_8 = 48\ mm$

$J_3J_7 = 65\ mm$ $\quad$ $J_4J_6 = 36\ mm$

olarak elde edilir. Bu dört değer (6.6), (6.10), (6.13) ve (6.16) numaralı denklemlerde yerine konularak AB, AD, AG ve FG uzunlukları aşağıdaki gibi bulunur:

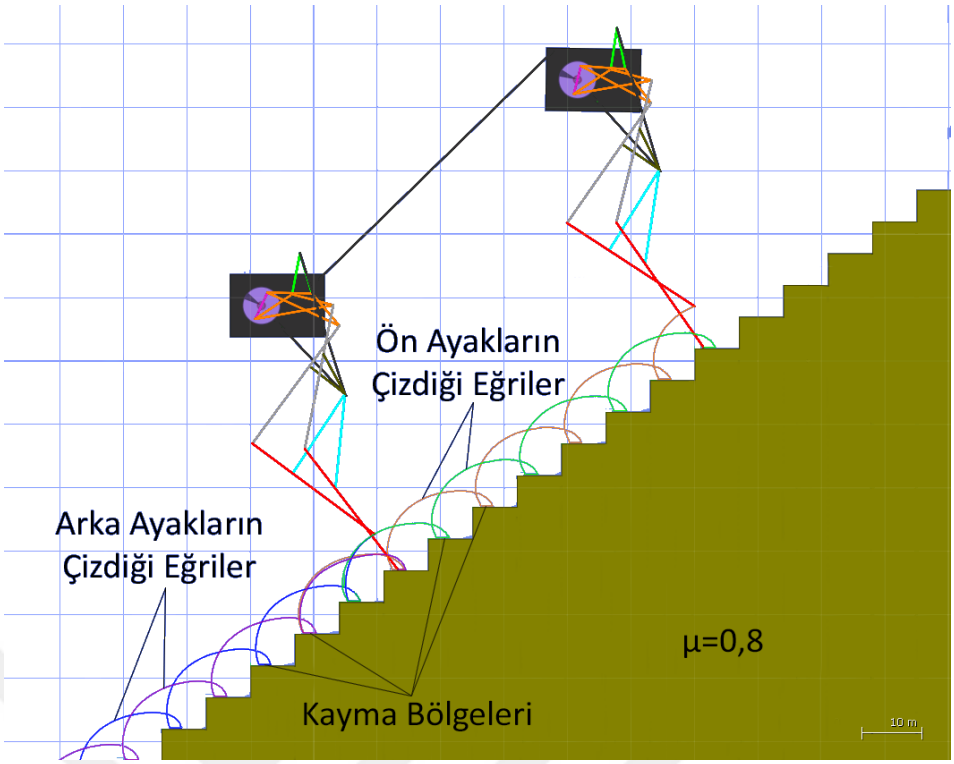
$AB = 23.5\ mm$ $\quad$ $BC = 69.4\ mm$ $\quad$ $CD = 66\ mm$

$AD = 100.2\ mm$ $\quad$ $BE = 124.7\ mm$ $\quad$ $CE = 67.3\ mm$

$AG = 200\ mm$ $\quad$ $DG = 233.1\ mm$ $\quad$ $EF = 78.6\ mm$

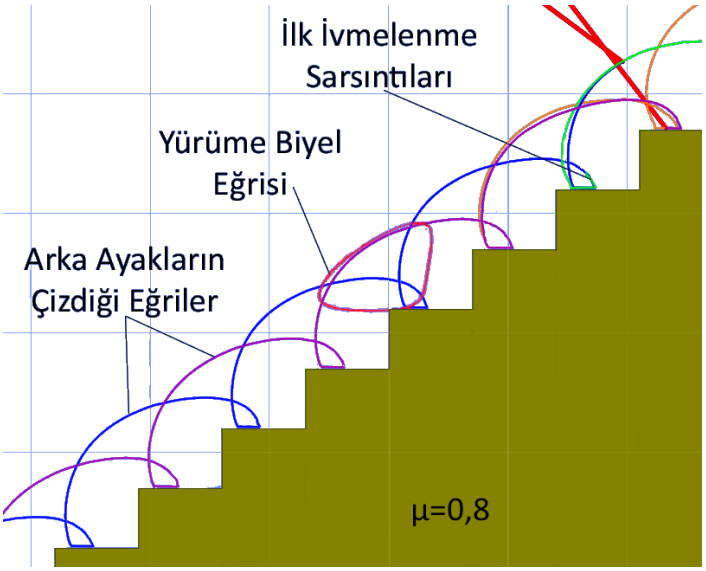
$FG = 71\ mm$ $\quad$ $FH = 151.4\ mm$ $\quad$ $HI = 79.3\ mm$

$GI = 149.5\ mm$ $\quad$ $IJ = 152.4\ mm$



Şekil 6.24. Robotun merdiven çıkma simülasyonu ve ayakların çizdiği biyel eğrileri

Şekil 6.24'te robotun; bu uzunluk değerlerine göre yeniden oluşturulup hareketinin kararlı hale gelmesinden sonraki durumunun simülasyon görüntüsü yer almaktadır. Bu andan itibaren robotun merdiven tırmanma ve inmesi sırasında titreşimi çok düşük değerlerdedir. Yani hareket dengesi tam olarak sağlanmıştır ve kalıcı durum davranışı gösterir (Yüksel, 2009).



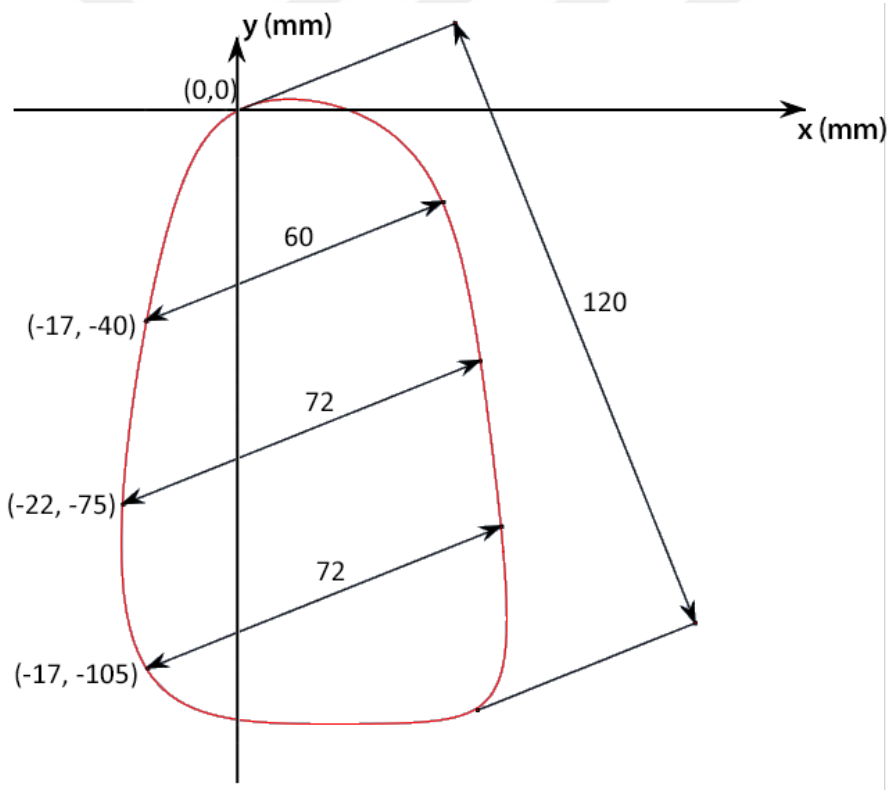
Şekil 6.25. Basamak çıkma esnasındaki ayak uzuvlarının biyel eğrileri ve düzensizlikler

Merdiven çıkma sırasında meydana gelen kayma ve titreşim, Şekil 6.25'te görülmektedir. Şekilde, kırmızı çizgi ile yürüme eğrisinin en sol kısmında (ayağın satıh

temasının kesilmesinden hemen önceki bölüm) yatay olmasından dolayı, havadaki diğer ayak yere temas etmeye başlayıncaya kadar gittikçe artan miktarda kayma meydana gelmektedir. Kayma nedeniyle bir miktar yavaşlayan robot, havadaki ayağın yere teması sonrası tekrar ivmelenmektedir ki bu, Şekil 6.25'te ilk hareket sarsıntıları olarak belirtilmiştir.

6.2.4. Engel atlama durumu

Bu denemede robotun girintili zeminde (düzlemsel satıh ve yüzeysel set tipi engel) ilerleme şartları incelenmiştir. Burada set yüksekliği 120 mm, set genişliği 10 mm ve setler arası mesafe 60 mm'dir. Diğer testlerde olduğu gibi satıh düzlemi ile ayaklar arasındaki sürtünme katsayısı 0.8 alınmıştır. Engel atlama durumu için Şekil 6.26'daki gibi bir eğri uygun görülmüştür.



Şekil 6.26. Engel atlama durumu için belirlenen döndürülmüş biyel eğrisi

$J_1J_5 = 120\ mm$ $J_2J_8 = 60\ mm$

$J_3J_7 = 72\ mm$ $J_4J_6 = 72\ mm$

Bu değerler (6.6), (6.10), (6.13) ve (6.16) denklemlerinde yerine konularak AB, AD, AG ve FG uzunlukları aşağıdaki gibi bulunur:

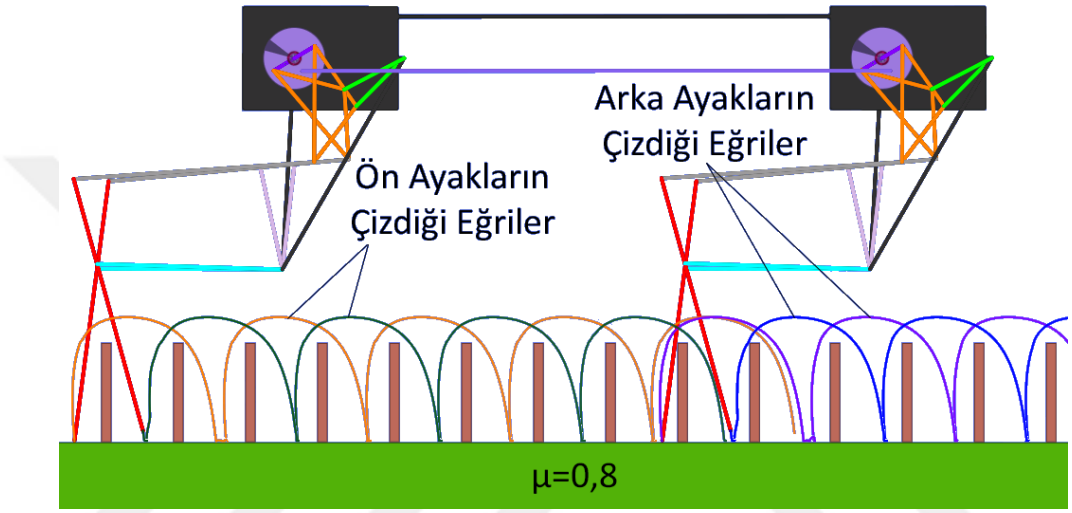
$AB = 23.5\ mm$ $BC = 69.4\ mm$ $CD = 66\ mm$

$AD = 100{,}2\ mm$ $BE = 124.7\ mm$ $CE = 67.3\ mm$

$AG = 200\ mm$ $DG = 233.1\ mm$ $EF = 78.6\ mm$

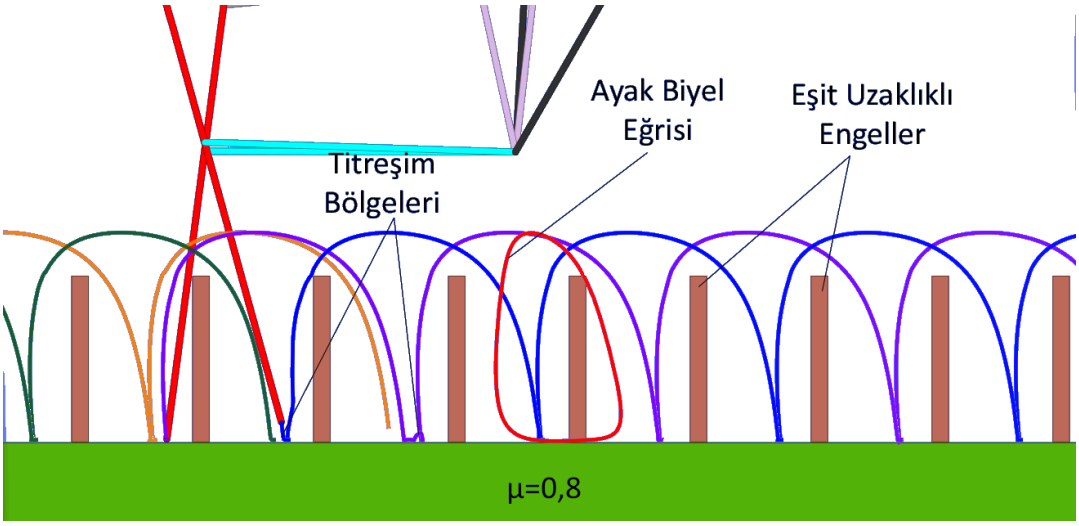
$FG = 71\ mm$ $FH = 151.4\ mm$ $HI = 79.3\ mm$

$GI = 149.5\ mm$ $IJ = 152.4\ mm$



Şekil 6.27. Robotun yüzeysel set tipi engel atlama durumunda simülasyonu ve ayakların çizdiği biyel eğrileri

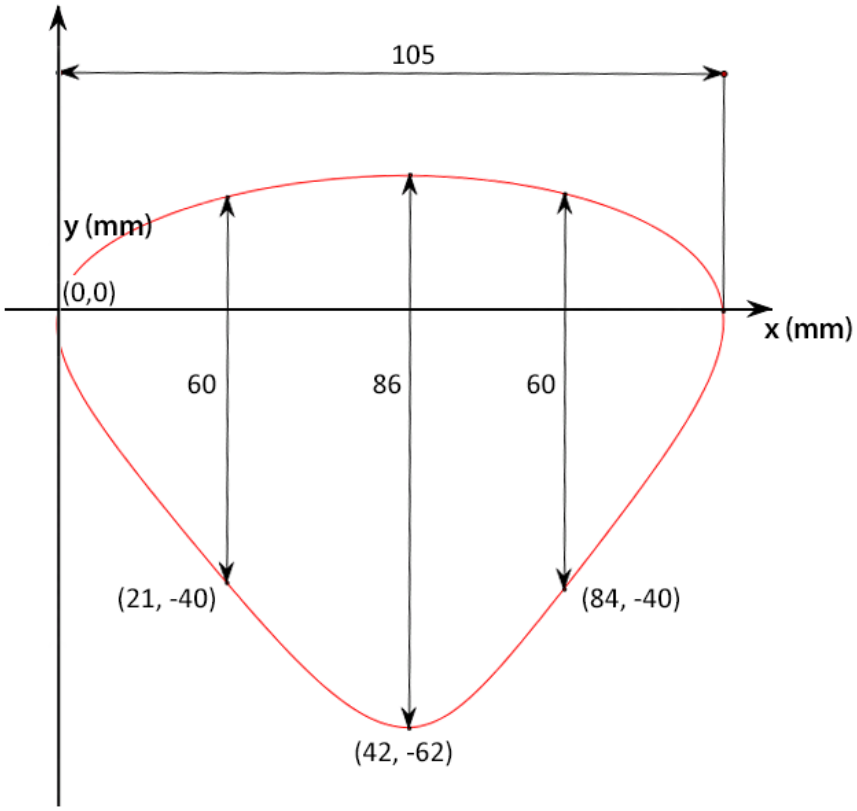
Şekil 6.27'de engel atlama sırasında robotun ayak uzuvlarının çizdiği biyel eğrileri görülmektedir. Buna göre hareket düzensizlikleri ve seviye değişimi, istenen düzeyde düşük bir değerdedir. Yürüme hareketini sağlayan biyel eğrisi, Şekil 6.28'de kırmızı olarak görülen eğriden daha ince ve uzun bir hale getirilebilmektedir. Bu tip engellerde uygun biyel eğrisinin bulunmasına ek olarak, ayak uzuvlarının yere göre dikliğe yakın açılarda hareket etmesi de önemlidir. Aksi durumda mekanizma Şekil 6.28'de belirtilen biyel eğrisini oluşturabilse bile herhangi bir ayak iki engel arasındaki dar bölüme giremeyebilir.



Şekil 6.28. Engel atlama esnasındaki ayak uzuvlarının biyel eğrileri ve düzensizlikler

6.2.5. Gevşek zeminde ilerleme durumu

Şekil 6.30'da gevşek satıha örnek olarak heyelan tipi engelde robotun yürümesi analiz edilmiştir. Gevşek ve kaygan satıhta ilerleme durumunda, satıha temas eden ayağın yere paralel hızının robotun hızı ile aynı olması beklenir. Çünkü robotun hızındaki ivmelenmeler heyelan oluşmasına veya ayaklarda öngörülemeyen kaymalara neden olmaktadır. Bu nedenle gevşek ve kaygan zemin tipinde ilerleme için Şekil 6.29'daki biyel eğrisi uygun görülmüştür.



Şekil 6.29. Gevşek zeminde ilerleme durumu için belirlenen döndürülmüş biyel eğrisi

$J_1J_5 = 105\ mm$ $J_2J_8 = 60\ mm$

$J_3J_7 = 86\ mm$ $J_4J_6 = 60\ mm$

Bu dört değer (6.6), (6.10), (6.13) ve (6.16) numaralı denklemlerde yerine konularak AB, AD, AG ve FG uzunlukları aşağıdaki gibi bulunur. Ayrıca AD açısı yine 20°'dir.

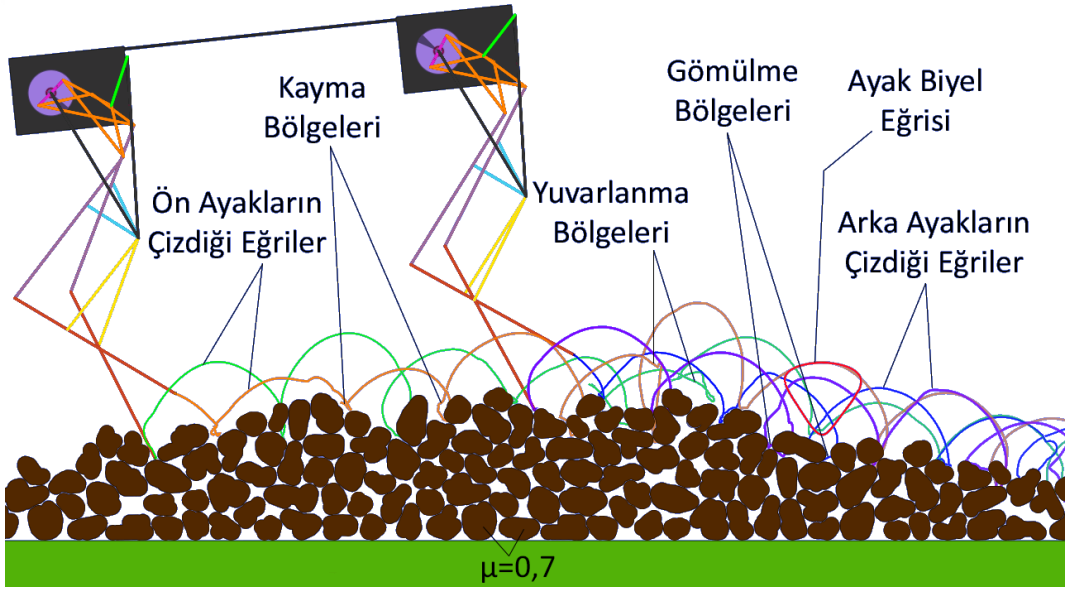
$AB = 23.5\ mm$ $BC = 69.4\ mm$ $CD = 66\ mm$

$AD = 106{,}1\ mm$ $BE = 124.7\ mm$ $CE = 67.3\ mm$

$AG = 200\ mm$ $DG = 233.1\ mm$ $EF = 78.6\ mm$

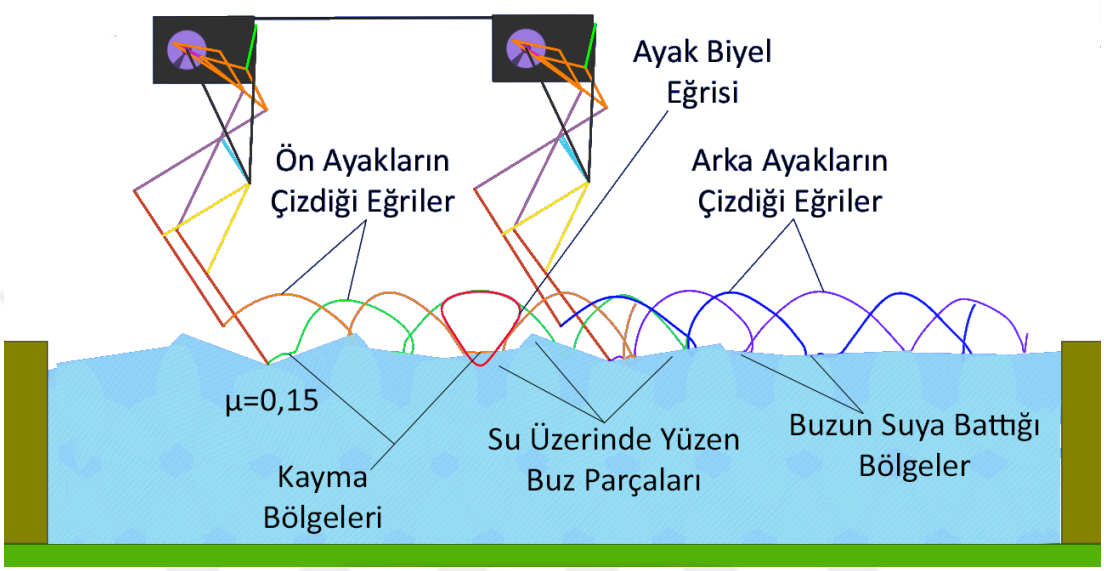
$FG = 79.3\ mm$ $FH = 151.4\ mm$ $HI = 79.3\ mm$

$GI = 149.5\ mm$ $IJ = 152.4\ mm$



Şekil 6.30. Heyelan tipi satıhta ayak uzuvlarının biyel eğrileri ve düzensizlikler

Diğer bir arazi koşulu olarak hem gömülgen, hem kaygan zemine örnek olan, su üzerinde yüzmekte olan buz kütleleri üzerinde yürüme durumu analiz edilmiştir. Hareket sırasında ayak uzvunun baskı kuvvetine bağlı olarak satıh eğimi de değişmektedir. Bu denemede de heyelan tipi ile aynı biyel eğrisi uygulanmış ve simülasyonda beklenen kalitede yürüme hareketi elde edilmiştir (Şekil 6.31).



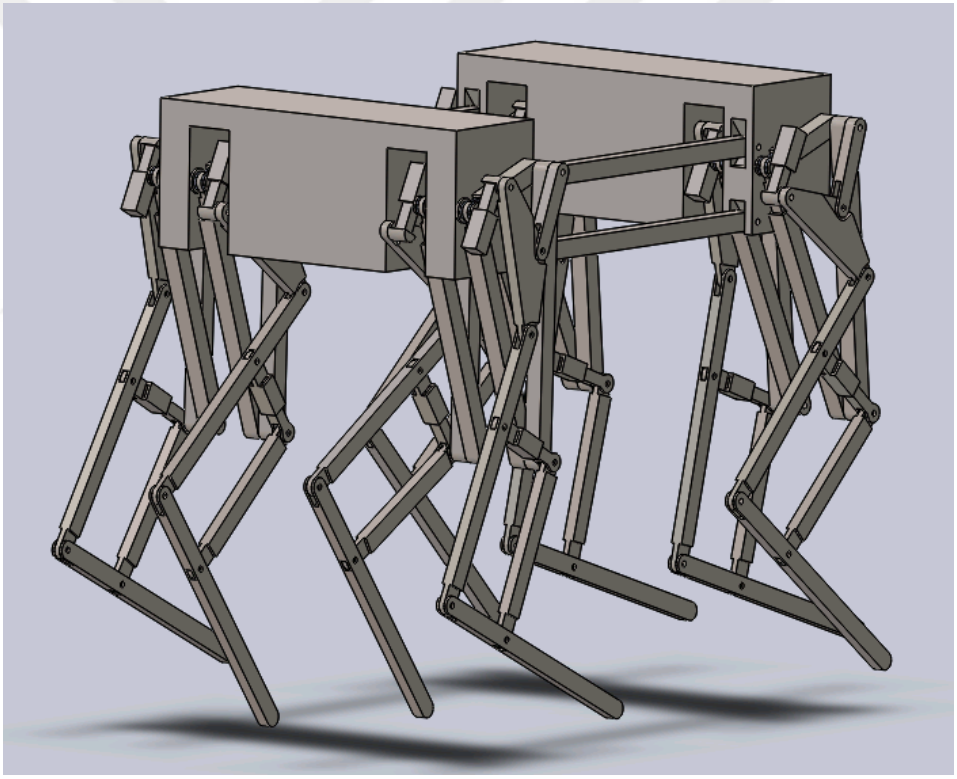
Şekil 6.31. Kaygan ve gömülgen satıhta ayak uzuvlarının biyel eğrileri ve düzensizlikler

7. KONSEPT TASARIM

7.1. Ana ve Yardımcı Parçalar

7.1.1. Uzuv ve mafsallar

Bugüne kadar yürüme mekanizmaları farklı amaçlar için kullanılmışlardır. Örneğin Strandbeest projesi Theo Jansen tarafından kinetik heykel olarak tasarlanmıştır. Jansen, bu heykelin iskelet ve eklemleri için PVC boru, yelkenleri için kumaş kullanmıştır. Amanda Ghassaei'nin yürüme mekanizması yine PVC'den imal edilmiştir. Mekanizma uzuvları için genellikle metal sac, pleksiglas, PVC, ahşap, çelik ve alüminyum profil; 3D baskı yönteminde ise ABS (akrilonitril bütadien stiren), PLA (poliaktik asit), PETG (polietilen tetrafalat glikol), PE (polietilen) gibi malzemeler kullanılmaktadır.



Şekil 7.1. Mekanizmanın 3B modellenmesi

Mekanizmada kayar ve yüksek uzuv bulunmaması nedeniyle uzuv çiftleri için kullanılan mafsallar düşük maliyetli ve kolay tedarik edilebilir özelliktedir. Mevcut çalışmada robotun; ağırlık merkezinin yere yakın bölgede olması için mekanizma uzuvları alaşımlı çelikten, gövde ise yüksek yoğunluklu polyesterden yapılması uygun görülmüştür. Simülasyonlarda da bu malzemelerin yoğunlukları dikkate alınmıştır. Şekil 7.1'de görülen konsept robot, Şekil 6.14'te gösterilen şematik çizimin 3B

modellenmesi sonucu elde edilmiştir. Şekil 7.2'de ise robotun yandan görünümü yer almaktadır.

7.1.2. Tahrik elemanları

Mobil robotlarda enerji genellikle harici enerji kaynağı yerine elektrokimyasal bataryadan temin edilir. Yürüme mekanizmalarında ana tahrik uzvunun dönme açısının kontrolü ve hassasiyeti çok önemli olmadığından ucuzluk, doğrultma devresine ihtiyaç duymaması gibi nedenlerle genellikle geri beslemesiz redüktörlü DC motorlar tercih edilir. Ayrıca dijital devreler de besleme gerilimi olarak DC'ye ihtiyaç duyarlar.

Mevcut çalışmadaki mekanizmanın uzuv boyu değişimlerinin lineer aktuatör ile sağlanması düşünülmektedir. Lineer aktuatör olarak, düşük devirlerde yüksek verim ve tork üretmeleri nedeniyle step motor kullanılabilir.

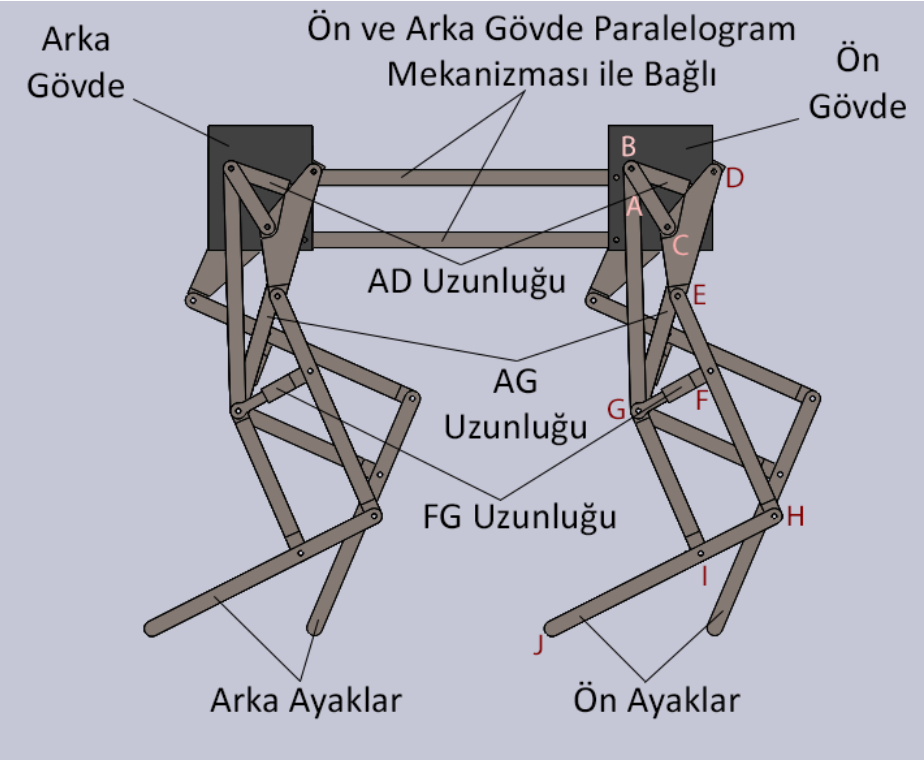
Çalışmada, Şekil 7.2'de görülen, ayak açısını, ön ve arka gövdeleri birleştiren paralelogram mekanizmasını tahrik etmek için mini servo motor kullanılması uygundur. Mini servo motorlar genellikle içlerinde tek devirlik potansiyometre bulundurduklarından tam devir atamazlar. Fakat açısal hassasiyetleri bu uygulama için yeterli sayılacak düzeydedir.

7.1.3. Kontrol, haberleşme birimi ve sensörler

Robotun kontrolcü birimi Raspberry, Arduino gibi kontrolörler tercih edilebilir. Haberleşme modülü olarak dipol antenli bir modül kullanılabilir.

Arazi yapısının ve engellerin saptanması için muhtelif sensör ve görüntü aygıtları gereklidir. Bu amaçla IR ışık yansıması yoluyla mesafe tayini yapan kızılötesi sensörler ve ultrasonik dalga yansıtma yoluyla ölçüm yapan ultrasonik mesafe sensörleri kullanılabilir. Görünür ışık algılayıcısı ve görüntü işleme içinse mini bir kamera kullanılabilir.

Engelin saptanması, kategorize edilip uzuvlarda gereken düzenlemenin yapılması görüntü işleme ve yapay zeka algoritmaları gibi işlemleri gerektirir ki bu kısım çalışma konusunun dışına çıkmaktadır.



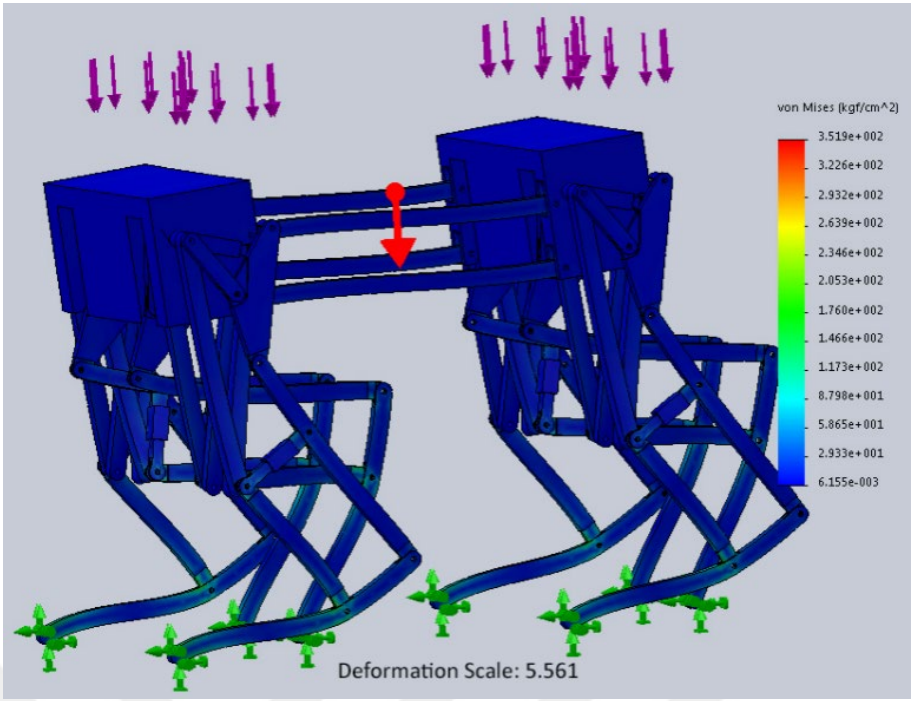
Şekil 7.2. 3B modellenmiş mekanizmanın yandan görünüşü

7.2. Mukavemet ve Modal Analiz

7.2.1. Mukavemet analizi

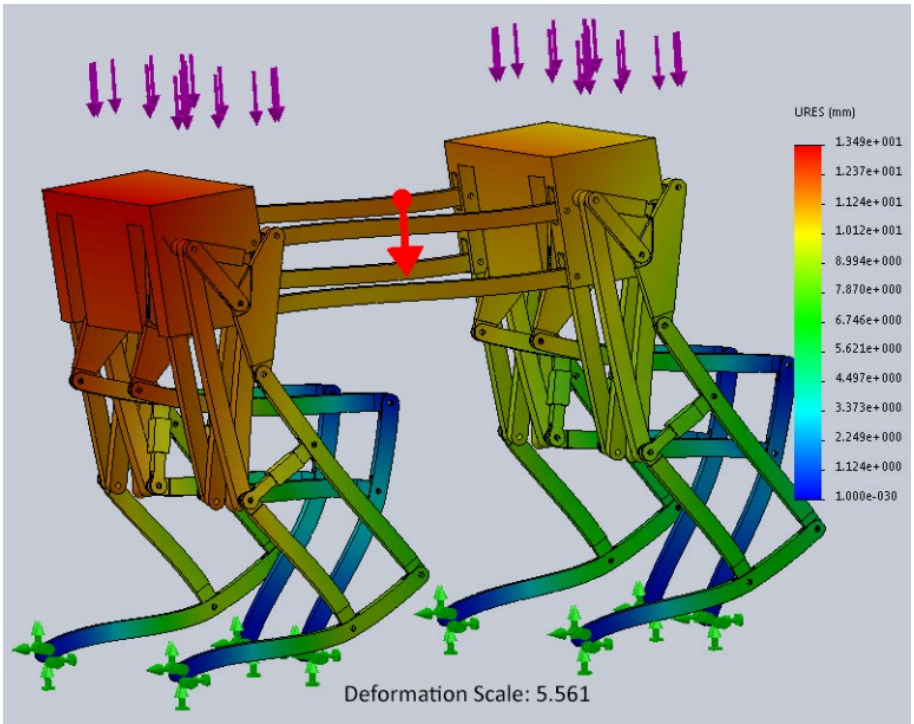
Tasarımın statik analizinde etki eden kuvvetler yalnızca gövde üzerine gelen kuvvetler ve parça ağırlıklarından meydana gelmektedir. Robotun mekanizma uzuvları alaşımlı çelikten, gövde bölümü ise yüksek yoğunluklu polyesterden seçilmiştir. Şekil 7.3'te görüldüğü gibi kırmızı ok ağırlık merkezinden etki eden yerçekimi kuvvetini (yaklaşık 23.8 kgf), mor oklar ise robotun üzerine konulan harici yükü gösterir. Her bir gövdeye etki eden harici yükün değeri 25 kgf'dir.

Birinci analizde, robotun hareketsiz ve sekiz ayak aynı anda yere temas etme durumu incelenmiştir. Şekil 7.3'teki gerilme dağılımında en büyük Von Misses eşdeğer gerilmesinin (σ) ön ve arka bacaklarda meydana geldiği görülmektedir. En büyük gerilme değeri yeşil görünen I mesnedindedir (Mesnetler Şekil 7.2'te görülmektedir.) ve değeri 3.45 MPa'dır.



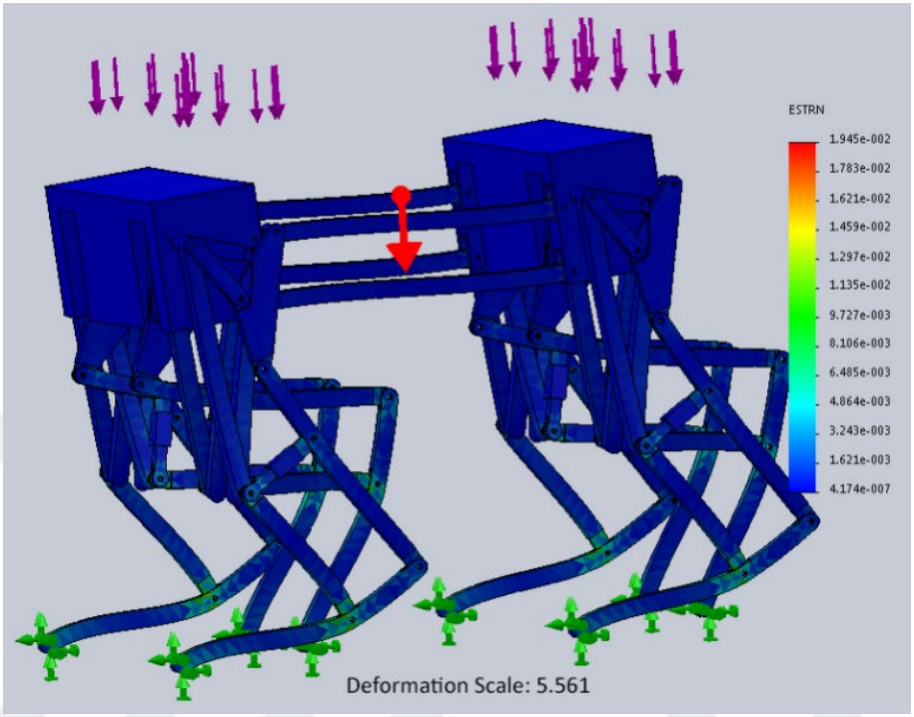
Şekil 7.3. Sekiz uzuvlu yürüme mekanizmasında gerilme dağılımı

Yine aynı şartlarda meydana gelen deformasyon (δ) Şekil 7.4'de görülmektedir. Oluşan deformasyon, daha önceki sonuçlarda görüldüğü gibi 8 numaralı yani bacak uzuvlarında meydana gelmektedir. Ancak robot yere temas ettiğinden dolayı deformasyonların enterpolasyonu nedeniyle en büyük deformasyon robotun üst kısmında görülür ve değeri 1.34 mm kadardır.



Şekil 7.4. Sekiz uzuvlu yürüme mekanizmasında deformasyon

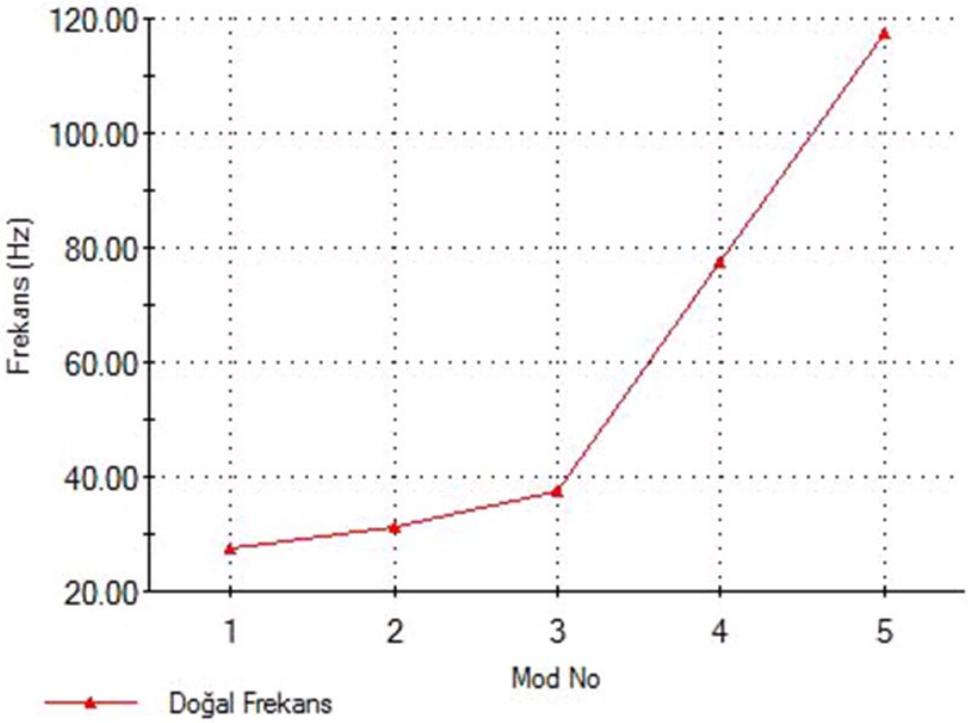
Parça başına düşen gerinme (ε) ise Şekil 7.5'te görülmektedir. Beklendiği gibi gerilmenin en fazla olduğu yerde gerinme en büyük değerini alır. Bu nedenle Şekil 7.4 ile Şekil 7.5 arasında büyük bir benzerlik görülür. Gerinme analizinde en büyük değer $1.94x10^{-2}$ (yaklaşık %2) kadardır.



Şekil 7.5. Sekiz uzuvlu yürüme mekanizmasında gerinme

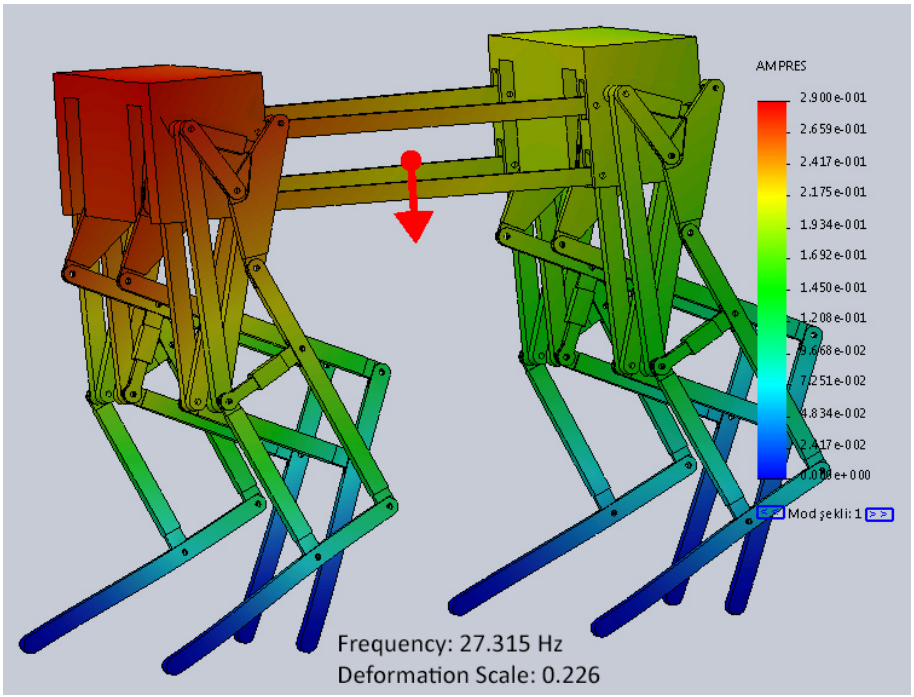
7.2.2. Frekans analizi

Tasarımın doğal frekansının belirlenmesi, robotun üzerine eklenen bileşen frekanslarının hangi aralıkta olacağını belirler. Bu bileşenler tahrik motoru ve diğer harici ekipmanlardır. Şekil 7.6'da doğal frekanslar görülmektedir. Buna göre $27.31\,Hz$, $31.24\,Hz$, $37.52\,Hz$, $77.69\,Hz$ ve $117.69\,Hz$ ilk beş mod şekli için rezonans frekanslardır. Kritik motor devirleri, saniyedeki titreşimi gösteren bu değerlerin 60 ($1\,min = 60\,s$) ile çarpılmasıyla $1638\,rpm$, $1874\,rpm$, $2251\,rpm$, $4461\,rpm$ ve $7020\,rpm$ olarak elde edilir. Bu devirlerin üzerindeki diğer mod şekilleri için devir sayıları mevcuttur. Motor devri olan $600\,rpm$, bu değerlerden uzak olduğundan tasarımda düzeltme yapılmasına gerek görülmemiştir.



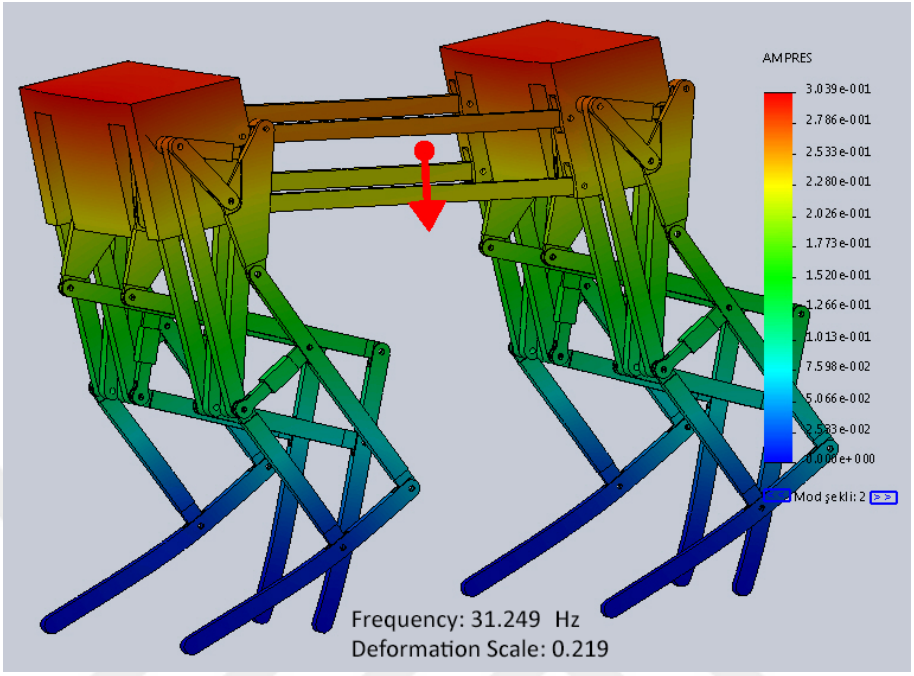
Şekil 7.6. Sekiz uzuvlu robotun frekans mod şekilleri

Şekil 7.6'daki frekanslara ait mod şekilleri Şekil 7.7 ile Şekil 7.11 arasında görülmektedir. Mod şekillerinin özelliği, hangi tip yüklemelerden uzak durulması gerektiğini belirtmesidir. Şekil 7.7'deki mod şekli 1, robotun sağa ve sola doğru titreşimi ile ortaya çıkar. Robotu yana yatırma yönündeki etkiler mod 1 ile aynı şekilde etki oluşturur.



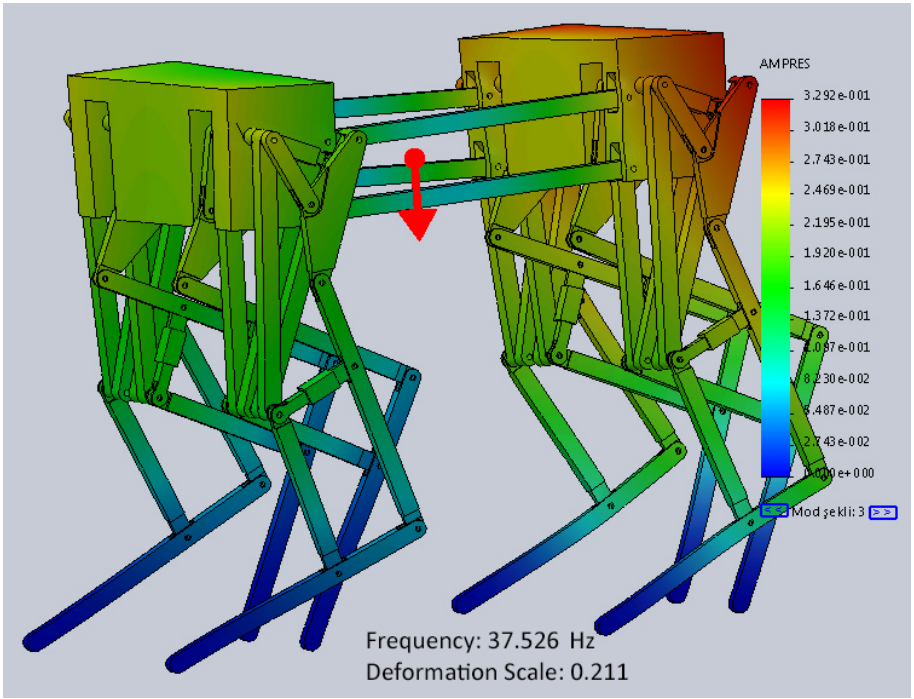
Şekil 7.7. Robota ait mod 1 şekli

Şekil 7.8'deki mod şekli 2, robotun öne ve arkaya doğru eğilmesi durumudur. Robotun ilerlemesi sırasında sabit frekansta hızlanma ve yavaşlama meydana gelmektedir ve bu, mod 2 şekli ile aynı şekilde etki oluşturur.



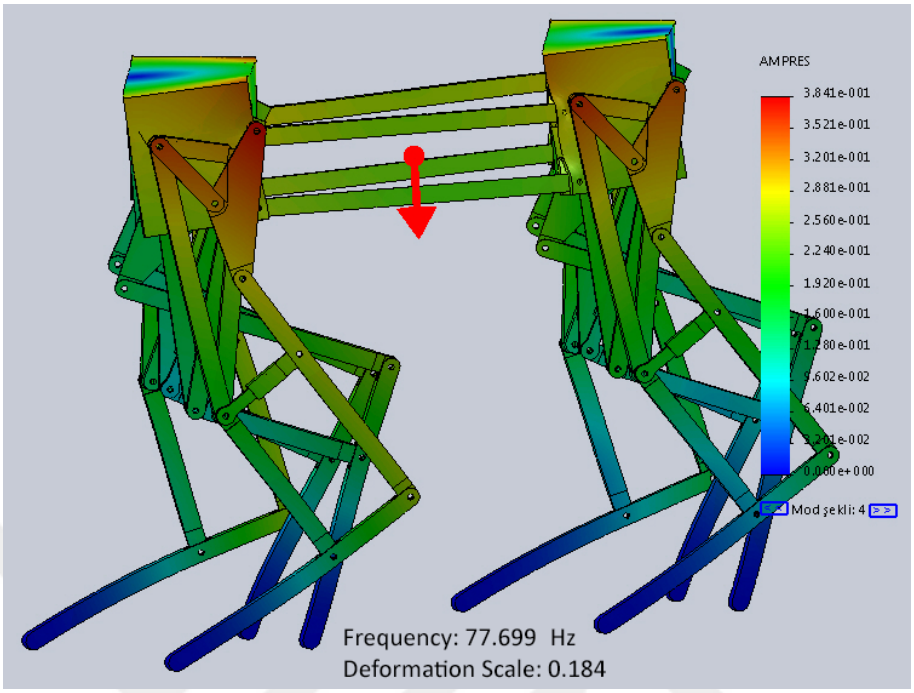
Şekil 7.8. Robota ait mod 2 şekli

Şekil 7.9'daki mod 3 şekli, robotun üst düzlemde dönmesi (yaw) şeklindedir. Robotun sağa ve sola doğru dönmesi durumunda meydana gelen titreşim, mod 3 şekli ile benzerdir.



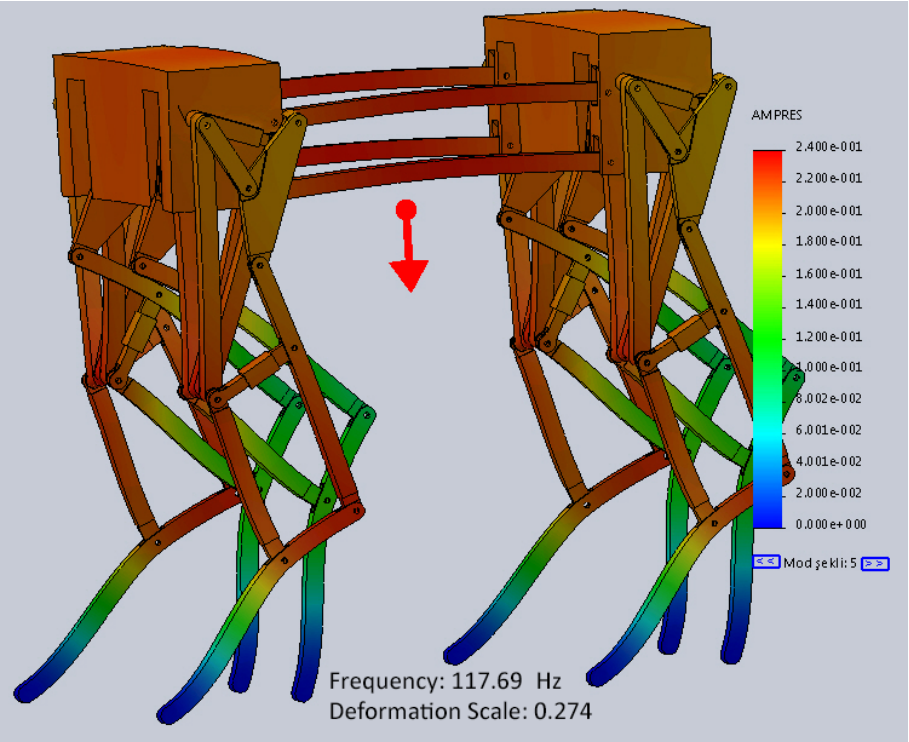
Şekil 7.9. Robota ait mod 3 şekli

Şekil 7.10'daki mod 4 şekli, her bir gövdenin yaw hareketi şeklindedir. Normal şartlarda bu şekilde bir titreşim oluşturacak etkenle nadiren karşılaşılır.



Şekil 7.10. Robota ait mod 4 şekli

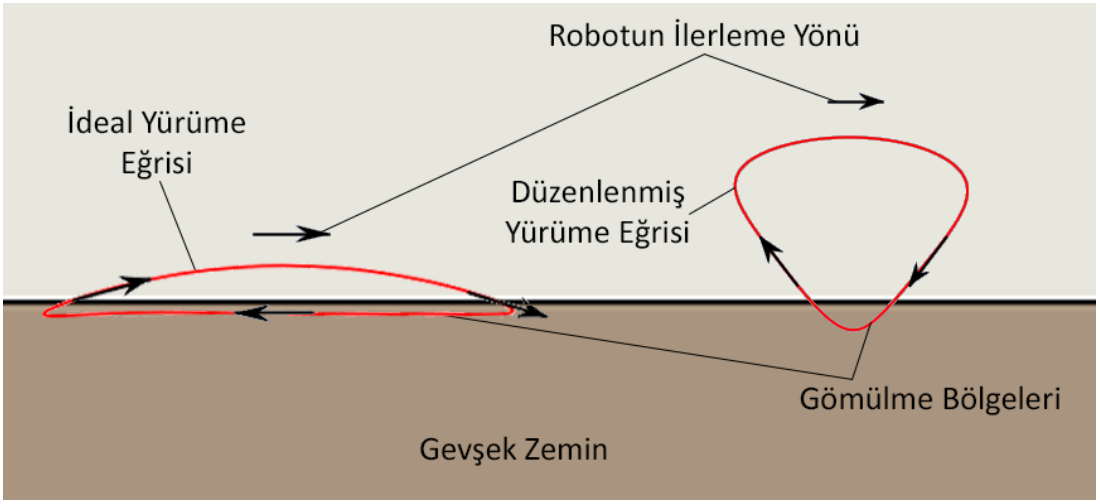
Şekil 7.11'deki mod 5 şekli ise ağırlığın neden olduğu deplasman şeklindedir. Robotun ilerlediği zemindeki ani seviye farklılıklarının sebep olduğu titreşim, mod 5'e benzer şekilde etki meydana getirir (Feyzullah ve Kavlak, 2018).



Şekil 7.11. Robota ait mod 5 şekli

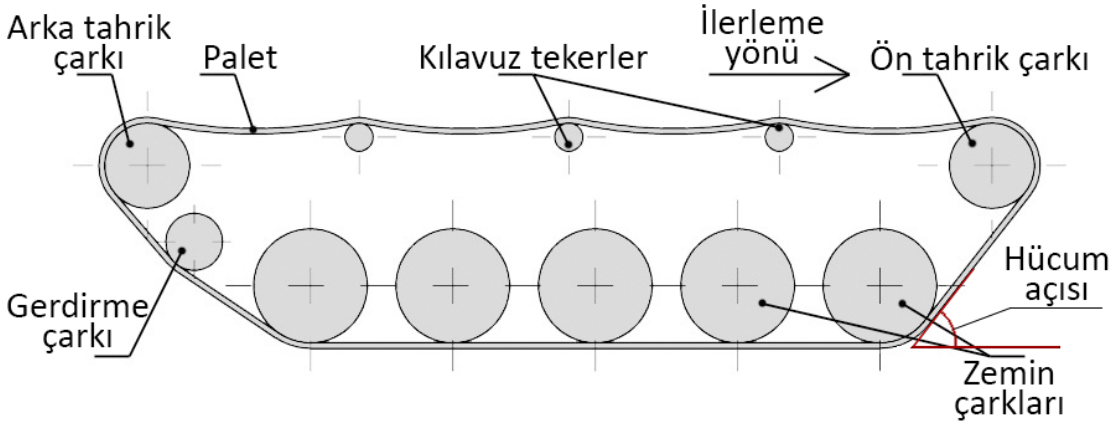
7.3. Geliştirmeler ve Tasarım Zorlukları

Literatürde bulunan pek çok araştırmada ideal biyel eğrisi incelenirken yalnızca adım yüksekliği ve adım uzunluğu dikkate alınmıştır. Açıklanan durum Şekil 7.12'de görülmektedir. Robotun düz bir zeminde ilerlemesi sırasında yalnızca bu iki değişkene göre mekanizma tasarımı yapılması geçerli bir yaklaşımdır. Ancak robotun ilerleme koşulunu tam düz bir zemin ile sınırlamak mantıklı değildir. Şekilden de anlaşıldığı gibi gömülgen satıh şartlarında ideal yürüme eğrisi için, eğrinin zemine temas bölgesinde ilerleme hareketine zıt yönde hız elde edilir. Bu durum robotun geriye doğru tepki vermesine neden olur ve vuruntu etkisi oluşturur. Oysa düzenlenmiş biyel eğrisinde gömülme halinde bile biyel eğrisindeki hız vektörü ilerleme yönündeki hız vektörü ile uyum sağladığından böyle bir durum meydana gelmez. Bu nedenle arazi şartlarının çeşitliliğine uyum ise adım yüksekliği ve genişliğinden çok, eğriye ait başka parametreler oluşturulmasını gerekli kılar. Bu nedenle mevcut çalışmada ideal biyel eğrisinde 8 nokta belirlenmiştir.



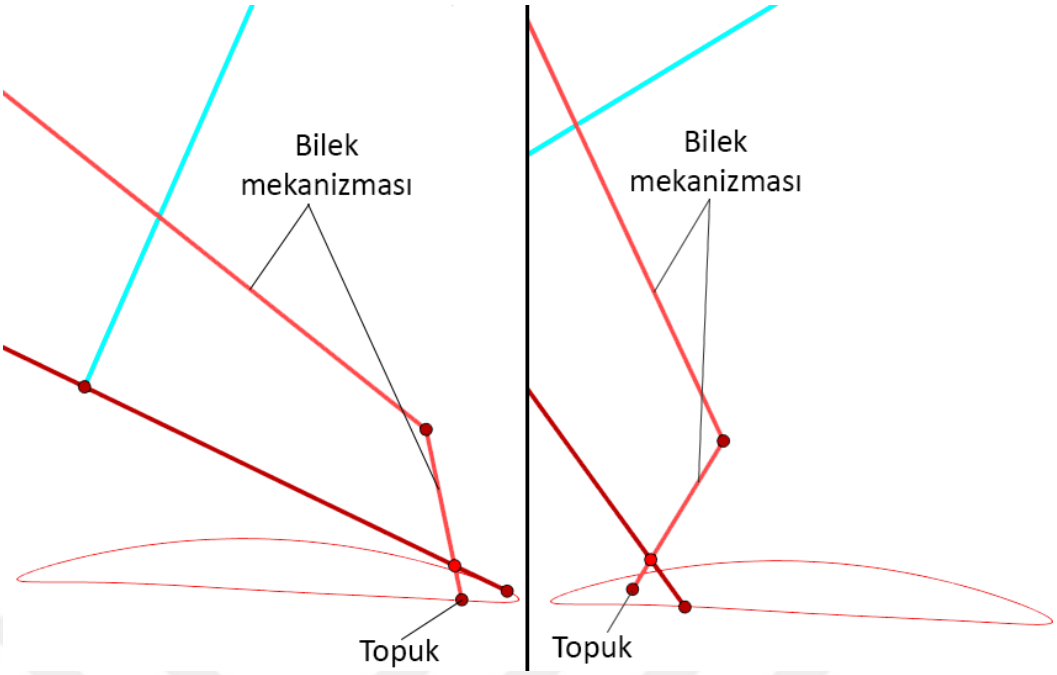
Şekil 7.12. Gömülgen satıhta hücum kenarının etkisi

Normal araçlara göre daha zor ve engebeli arazi şartlarında ilerleyebilen tank gibi paletli araçlarda palet zinciri şekli, açıklanan durumu desteklemektedir. Şekil 7.13'te görülen paletli aracın ön bölümündeki hücum açısı, arazideki taş, tepe, çukur gibi engellerin daha rahat aşılması için oluşturulmuştur. Ekskavatör gibi araçların paletinde böyle bir durum yoktur, çünkü genellikle bu tip araçlarda açıklanan engel tiplerini atlama niteliği aranmaz.



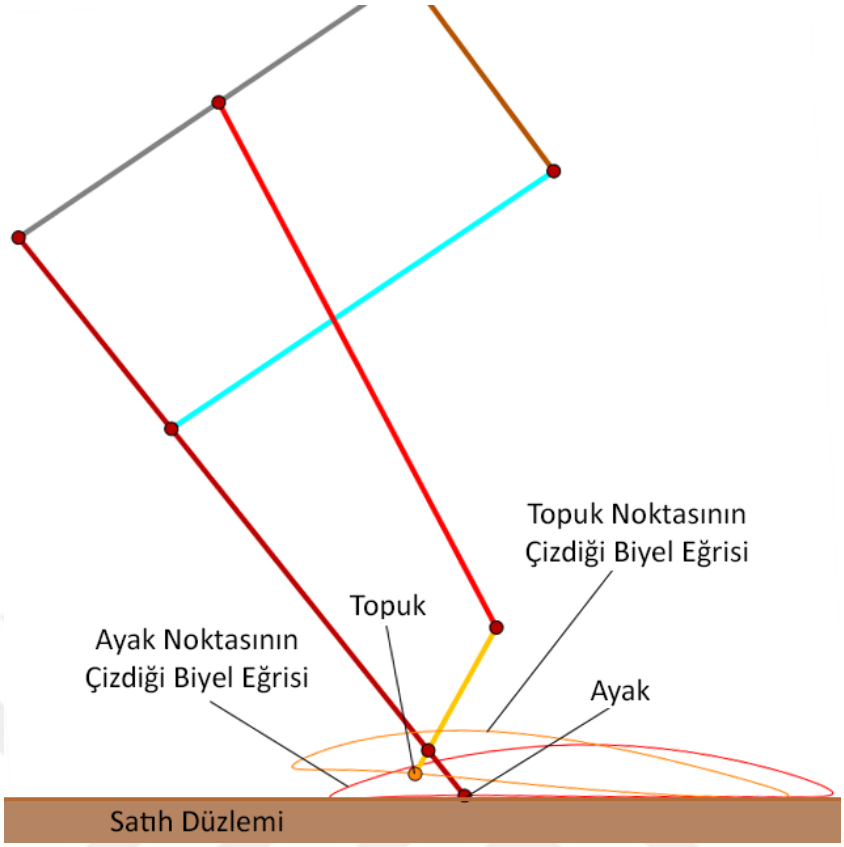
Şekil 7.13. Bir tank paletindeki tahrik, gerdirme çarkları ve hücum açısı

Robotun ilerlemesi esnasındaki seviye değişimine bağlı titreşimin ve hız değişimlerinin sebep olduğu vuruntunun önüne geçmek için çeşitli çözümler düşünülebilir. Bu çözümlerden biri, daha önce ifade edildiği gibi ayak uzvu sayısını artırmaktır. Fakat bu durum robotun engel atlama yeteneğini azaltmaktadır. Bir diğer çözüm ise ayak uzvuna ökçe veya topuk eklemektir.



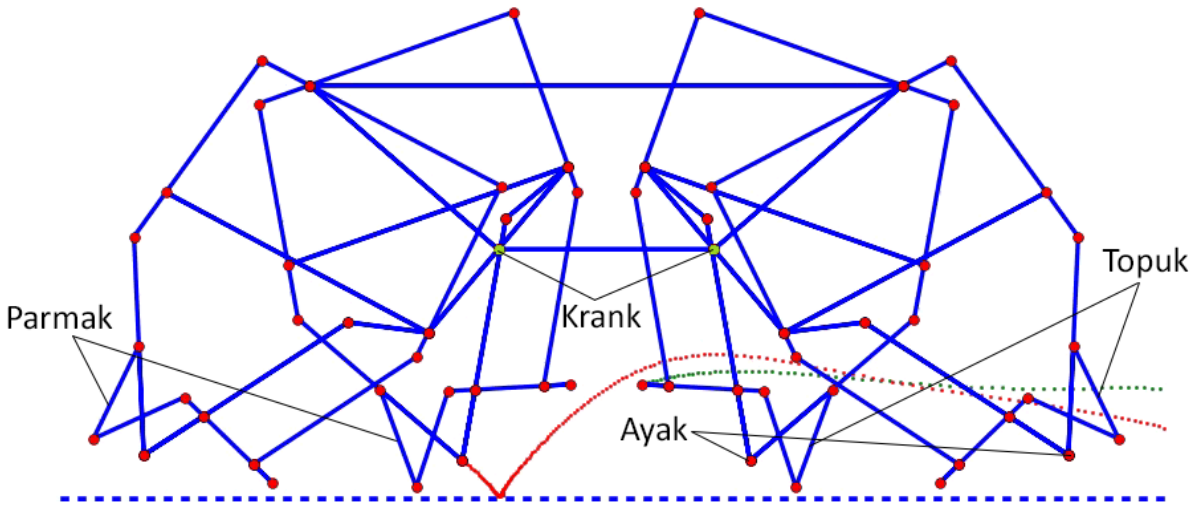
Şekil 7.14. Bilek mekanizmasının bacak uzvuna eklenmesi

Şekil 7.14'te bacak uzvuna eklenmiş bilek mekanizması görülmektedir. Bacak uzvu satha temas etmeden biraz önce topuk noktası satıha değmekte, ayak yere değdikten sonra ise topuk yukarı kalkmaktadır. Ayrıca topuk satıha değmeden önce bir miktar hız kazanmakta, böylece bacak uzvunun yere temas sırasındaki hız düzgünlüğü azaltılmaktadır. Şekil 7.15'te ayak ve topuk noktasının oluşturduğu biyel eğrileri görülmektedir.



Şekil 7.15. Topuk ve ayak noktasının çizdiği biyel eğrisi

Bilek mekanizmasının kullanılmasındaki mahzur, mevcut mekanizmada uzuv boyu değişimleri neticesinde çok farklı biyel eğrileri ortaya çıkması ve topuk noktasının isteneni her durum için verememesidir. Bu nedenle robotun konsept tasarım bölümünde bilek mekanizması kullanılmamıştır. Diğer taraftan bilek mekanizması, uzuv mesafeleri sabit tasarımlar için uygun bir çözümdür.



Şekil 7.16. Topuk ve parmak eklenmiş Trotbot Mekanizması (Anonymous, 2019)

Şekil 7.16'da topuk ve parmak eklenmiş Trotbot Mekanizması görülmektedir. Açıklandığı gibi bu iki ekleme ile hız düzgünsüzlüğü ve robotun ani seviye değişimleri bir ölçüde azaltılmıştır.

Şekil 7.1'deki konsept tasarımda 2 numaralı krank uzvunun uzunluğu değişebilir olmakla birlikte tam dönme yapmaktadır. Uzuv uzunluğu değişimi lineer motorla sağlandığı için elektrik bağlantısının tam dönmeye uygun hatlarla sağlanması gerekir. Bu sorun, swivel konnektör gibi elemanlar kullanılarak çözülebilir. Mekanizmadaki mesafesi değişebilir diğer uzuvların hiç biri tam dönme yapmadığı için bu uzuvlarda ise özel bir donanım kullanılması gerekmez.

8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada yürüme mekanizmalarının genel özelliklerinden bahsedilmiş, mevcut tasarımlara değinilmiş ve örnek bir mekanizma tasarımının nasıl yapılabileceği üzerinde durulmuştur. Ardından Win Bin Sheh'in çalışmasından esinlenilen tasarımın kinematik analizleri yapılmış, konum, hız ve ivme gibi özellikleri belirlenmiştir.

Çalışmayı özel yapan konulardan biri araziye ait satıh ve engel tiplerinin sınıflandırılmasıdır. Bu hususta farklı doküman ve literatür çalışmaları var olmakla birlikte çalışmada yer alan türde ve her arazi şartını tanımlayabilecek özellikte bir tasnif şekli bulunmamaktadır. Üç boyutta sınıflandırma çalışmasının tamamlanmaması ve mevcut çalışmadaki simülasyon testlerinde buna ihtiyaç duyulmaması nedeniyle arazi sınıflandırma iki boyutla sınırlı tutulmuştur. Üç boyutta arazi sınıflandırmasına ise ilerleyen zamanlardaki yayınlarda yer verilecektir.

Bu güne kadar yürüme mekanizmalarıyla ilgili makale ve yayınlarda; tasarım, var olan tasarımların geliştirilmesi veya uzuv boyu optimizasyonu ile ilgili konulara sıkça rastlanmaktadır. Mevcut çalışmada ise yürüme mekanizmalı bir robotun sınıflandırılmış arazi şartlarında ilerleyebilmesi için uzuv boylarının ne şekilde değiştirilmesi gerektiğine değinilmiştir. Arazi adaptasyonu için uzuv boyları değişebilir bir tasarım ortaya konulmuş, değişimlerin ayak biyel eğrisine etkisi ise lineerleştirme metodu kullanılarak formülize edilmiştir. Bu analizlerde ve hesaplamalarda Mathematica ve Cinderella yazılımları kullanılmıştır.

Teorik bulguların gerçek uygulamalarla ne derece uygunluk gösterdiğini anlamak için robotun arazideki hareketi Algadoo yazılımında simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre robotun statik denge, dinamik ve titreşim tipi davranışı incelenmiş ve sonuç olarak beklentinin üzerinde yakınlıkta bir netice alınmıştır.

Robotun imalatına dair tasarım ve çizimler yapılmıştır. Yine ilerleyen zamanlarda burada bahsedilen konsept tasarımın somut üretimi ile ilgili çalışmalar yapılacaktır. Ayrıca konsept tasarım ile ilgili zorluk ve önerilerde bulunulmuştur. Örnek bir tasarımın genel olarak mukavemet ve titreşim (modal) analizi yapılmıştır.

Mukavemet analizinde robotun belirtilen kuvvetlerin üzerinde yüklemeye maruz kalması durumunda en zayıf uzuv olması sebebiyle bacak uzuvlarında aşırı deformasyon meydana gelecektir. Bunu önlemek için kesit alanı artırımı veya uzuvda şekil değişikliği ile çözüme gidilebilir.

Modal analizde robotun yüksüz kütlesi esas alınmış ve kritik frekanslar çalışma aralığının dışında olduğundan herhangi bir düzenlemeye gerek görülmemiştir. Fakat robotun üzerine eklenen ekipmanlar kütleyi artıracak ve doğal frekans değerini azaltacağından (Rao, 2010) güvenlik açısından yeniden hesaplama yapmak gereklidir.

KAYNAKLAR

Akihiro, S. A., 2004, "Planar Hopping Robot with One Actuator: Design, Simulation and Experimental Results", MS Thesis, *Department of Mechanical Engineering, McGill University*, Montreal-Canada, 16.

Anonymous, 2017, ASME Student Design Competition, The Robot Pentathlon: Citius, Altius, Ingenious, Contest Design, The American Society of Mechanical Engineers, St. Louis, USA, 1-4.

Anonymous, AnyMal Autonomous Legged Robot - http://www.rsl.ethz.ch/robots-media/anymal.html (Resmî Fotoğraf) [Ziyaret Tarihi: 16 Şubat 2018].

Anonymous - Trotbot Mechanism - https://www.diywalkers.com/ [Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2018]

Anonymous, 1954, International Civil Aviation Organization; Montreal, Canada, National Advisory Committee for Aeronautics. Langley Aeronautical Lab.; Langley Field, VA, United State, Manual of the ICAO Standard Atmosphere Calculations by the NACA, USA.

Anonymous, 2000, Training Guide for Military Pentathlon, Obstacle Course, *CISM*, Vienna-Austria.

Anonymous, 2001, United States Patent and Trademark, Office Patent No: US 6,260,862 B1, USA.

Anonymous, 2009, Naval Pentathlon, Counseil International Du Sport Militarie(CISM) - Sports Regulatıons, Brussels-Belgium, 22-62.

Anonymous, Chebyshev's Plantigrade Mechanism - http://en.tcheb.ru (Fotoğraf) [Ziyaret Tarihi: 16 Şubat 2018].

Anonymous, Cognate Linkage - https://en.wikipedia.org/wiki/Cognate_linkage (Resim belirtilen kaynaktan alınıp düzenlenmiştir.) [Ziyaret Tarihi: 3 Ocak 2019].

Anonymous, Control Axes of A Plane - https://howthingsfly.si.edu/flight-dynamics/roll-pitch-and-yaw (Resim) [Ziyaret Tarihi: 8 Ocak 2019].

Anonymous, Leg Mechanism - https://en.wikipedia.org/wiki/Leg_mechanism (Resim belirtilen kaynaktan alınıp düzenlenmiştir.) [Ziyaret Tarihi: 3 Ocak 2019].

Anonymous, MaggUT™ Inuktun Miniature Magnetic Crawler, http://inuktun.com, [Ziyaret Tarhi 3 Ocak 2019]

Anonymous, Occupational Safety and Health Standards, Stairways, 1910, United States Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration, Standard Number: 1910.25, USA.

Anonymous, Walking Mechanism Designing Principles - http://dogfeatherdesign.com /engineering-projects/mechanisms-mechanical-walker (Resim) [Ziyaret Tarihi: 10 Mart 2018]

Autumn, K. and Peattie, A. M., 2002, Mechanisms of Adhesion in Geckos, *Integrative and Comparative Biology*, Vol. 42, Issue 6, Oxford-UK, 1081–1090.

Barreiro, H., Fernández, I. G., Alduan, I. and Otaduy, M. A., 2017, Conformation Constraints for Efficient Viscoelastic Fluid Simulation, *ACM Transasction on Graphics*, No: 6, Vol: 36, 1-11.

Best, G., Moghadam, P., Kottege, N. and Kleeman, L., 2013, Terrain Classification Using a Hexapod Robot, *Australian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2013)*, Sydney-Australia, 1-8.

Bidaud, P., Tokhi, M. O. and Grand, C., 2011, Field Robotics - Proceedings Of The 14th International Conference On Climbing And Walking Robots And The Support Technologies For Mobile Machines, *World Scientific*, Paris-France, 463-666.

Botsalı, F. M., 2010, Teori ve Problemlerle Makine Dinamiği, 2. Baskı, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara-Türkiye, 178-186.

Burns, S. A., 2015, Four-Legged Theo Jansen "Strandbeest" Walking Mechanism, http://scottburns.us/walking-mechanism [Ziyaret Tarihi: 15 Eylül 2018].

Chen, W. H., Lin, H. S. and Pei, C.L., 2014, TurboQuad: A leg-wheel transformable robot using bio-inspired control, *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 10.1109/ICRA.2014.6907143.

Daskalov, T., 2015 Concrete Skateparks Design and Construction of A Skateboarding Recreational Facility, MS Thesis, Thesis Degree Programme in Construction Engineering, *Häme University of Applied Sciences*, Häme-Finland, 61-88.

Depeyrot, G. and Märcher, M., 2015, Mints, Technology and Coin Production, Documents and Studies on 19th C. Monetary History, *Proceedings of the Round Table of The "Silver Monetary Depreciation and International Relations" Program*, Copenhagen-Denmark, 430.

Eich, M. and Vögele, T., 2011, Design and control of a lightweight magnetic climbing robot for vessel inspection, *19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, Corfu-Greece, 1200-1205.

Erdman, A. G. and Sandor, G. N., 1984, Advanced Mechanism Design: Analysis and Synthesis, Vol. 2, *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey-USA, 310-340.

Feyzullah, A. and Kavlak, K., 2018, Strength and Modal Analysis of 8 Membered Walking Mechanism, *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18)*, Konya-Turkey, 547-552.

Funabashi, H., Takeda, Y., Kawabuchi, I. and Higuchi M., 1999, Development of a Walking Chair With A Self - Attitude - Adjusting Mechanism for Stable Walking on Uneven Terrain. *10th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, Oulu - Finland, 1164-1169. (Resim belirtilen kaynaktan alınmış olup ayrıca düzenlenmiştir.)

Ghassaei, A., 2011, The Design and Optimization of a Crank-Based Leg Mechanism, *Pomona College Department of Physics and Astronomy*, Cleremont-USA, 45-54.

Heißing, B. and Ersoy, M., 2011, Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives, ATZ, *Vieweg+Teubner*, Berlin Germany, 26-88.

Hunt, K., 2018, Design Analysis of Roller Coasters, MSc Thesis, *Worcester Polytechnic Institute*, Massachusetts-USA, 33-54.

Hutter, M., Gehring, C., Jud, D., Lauber, A., Bellicoso, C. D., Tsounis, V., Hwangbo, J., Bodie K., Fankhauser, P., Bloesch, M., Diethelm, R., Bachmann, S., Melzer, A. and Hoepflinger, M. A., 2016, ANYmal - A Highly Mobile and Dynamic Quadrupedal Robot, *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon - South Korea, 38 - 44.

Koetsier, T. and Ceccarelli, M., 2012, Explorations in the History of Machines and Mechanisms, *Springer*, 424-530.

Li, Y., Wang, L., Liu, J. and Huang, Z., 2013, Applicability and generality of the modified Grübler-Kutzbach Criterion, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 26, Issue 2, 257–263.

Livescu, S., 2012, Mathematical Modeling of Thixotropic Drilling Mud and Crude Oil Flow in Wells and Pipelines - A Review, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 98–99, 174-184.

Lorenz, B., Persson, B. N. J., Fortunato, G., Giustiniano, M. and Baldoni, F., 2013, Rubber Friction For Tire Tread Compound on Road Surfaces, *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 25, 9.

Marden, D., Roller Coaster DataBase, www.rcdb.com [Ziyaret Tarihi: 5.1.2019].

Meriam, J. L. and Kraige, L. G., 2013, Apalak, M. K., Mühendislik Mekaniği Statik 7. Baskı, *Nobel Yayıncılık*, 378.

Mitchell, J.; Murnan, E.; and Wirtz, A., 2016, ASME Student Design Challenge" (2016), *Mechanical Engineering Design Project Class*, St. Luois, USA, 45.

Pendrill, A. M., 2005, Rollercoaster Loop Shapes, *Physics Education*, Vol. 40, No: 6, Göteborg - Sweden, 517-521.

Pop, F., Dolga, V., Ciontus, O. and Pop, C., 2011, CAD Design And Analytical Model Of A Twelve Bar Walking Mechanism, *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, Vol. 73, Issue 2, Bucuresti-Romania, 35-48.

Rao, S. S., 2010, Mechanical Vibrations, University of Miami, 5th Edition, *Prentice Hall-Pearson*, New Jersey-USA, 654-698.

Raymond, N. Y., Ezzat, A. F. and Nicolas S., 1984, Vehicle Traction Mechanics, Geotechnical Research Center, McGill University, *Elsevier*, Motreal-Canada, 9-40.

Sauder, J., Hilgemann, E., Johnson, M., Parness, A., Bienstock, B. and Hall, J., 2017, Automation Rover for Extreme Environments, *NASA Innovative Advanced Concepts (NIAC) Phase I, Final Report*, Jet Propulsion Laboratory , California Institute of Technology, California-USA, 11-12.

Shieh, W. B., 1996, Design And Optimisation of Planar Leg Mechanisms Featuring Symmetrical Foot Point Paths, PhD Thesis, *Institute for System Research*, The University of Maryland, Maryland-USA, 106-108.

Shigley, J. E., 1960, The Mechanics of Walking Vehicles, Land Locomotion Laboratory Research Division Research and Engineering Directorate, *U. S. Army Ordnance Tank-Automotive Command 1501 Beard Detroit 9*, Michigan-USA, 2-3.

Shigley, J. E., Uicker, J. J., 1988, Theory of Machines and Mechanisms, 5th Edition, *Mc Graw-Hill*, Singapore, 98-102.

Siciliano, B. and Khatib, O., 2016, Handbook of Robotics, 2nd Edition, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg-Germany, 422.

Söylemez, E., 1985, Mechanisms, *METU*, 2nd Edition, 237-238. (Resim belirtilen kaynaktan alınıp düzenlenmiştir.)

Takeda, Y., Higuchi, M., Funabashi, H., Oki, Y. and Shimizu, K., 2001, Development of a walking chair (Fundamental investigations for realizing a practical walking chair), *Proc. 4th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR2001)*, Karlsruhe-Germany, 1037-1044.

Tesar, D. and Vidosic, J. P., 1965, Analysis of Approximate Four-Bar Straight-Line Mechanisms, *Journal of Engineering for Industry*, Vol: 87(3), 291-296.

Tchebysheva, P., 1948, Theory of Machines, *Academy of Sciences of the Union of Soviet Socialist Republics*, Moscow-USSR (Теория Механизмов, ПчебышеваП., Академия Наук союза ССР, Москва), 161-166.

Väisänen, A., Design of Roller Coasters, 2018, MS Thesis, *Aalto University School of Engineering*, Espoo-Finland, 55-59.

Waggle, W. - Strider Linkage - https://www.diywalkers.com/strider-linkage-plans.html (Resmî fotoğraf) [Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2018].

Waggle, W., Strider Mechanism - Resim https://www.diywalkers.com/strider-builds.html adresinden alınıp düzenlenmiştir. [Ziyaret Tarihi: 8 Ocak 2019].

Weisenberger, N., 2015, Coasters 101: An Engineer's Guide to Roller Coaster Design, Fourth Edition.

Yin, L. R., Han, J. Y., Huang, J. and Yang T., 2012, A General Method for Synthesizing Straight-Line Linkage with Ball and Burmester Points, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 215-216, 138-141.

Yüksel, İ., 2009, Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri, 6. baskı, *Nobel Yayınevi*, Ankara, 177-183.

Zhang, H., Zhang, J., Zong, G., 2004, Realization of a Service Climbing Robot for Glass-Wall Cleaning, 2004 *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Shenyang - China, doi: 10.1109/ROBIO.2004.1521811.

Zhang, X. W., Kong, L. W., Yang, A. W. and Sayem H. M., 2017, Thixotropic Mechanism of Clay: A Microstructural Investigation, *Soils and Foundations*, 23-35.

EKLER

EK-1 Tasarlanan Mekanizmada J Noktasının Konumunu Veren Mathematica Kodları

```
ClearAll["Global`*"]
AB=2.35;
BC=6.94;
CD=6.6;
AD=7.21;
CE=6.73;
EF=7.86;
FG=7.93;
DG=23.31;
FH=15.14;
HI=7.93;
GI=14.95;
IJ=16;

teta1=199.1;
teta11=88.7;
teta2=46.45;
teta31=-48.4;

a=AB*Cos[teta2 Degree]+BC*Cos[teta3]+CD*Cos[teta4]+AD*Cos[teta1
Degree]==0;

b=AB*Sin[teta2 Degree]+BC*Sin[teta3]+CD*Sin[teta4]+AD*Sin[teta1
Degree]==0;

First[Solve[{a,b},{teta3,teta4}]]

c=DG*Cos[teta11 Degree]+CD*Cos[Pi+teta4]+CE*Cos[teta3+(teta31
Degree)]+EF*Cos[teta5]+FG*Cos[teta6]==0;

d=DG*Sin[teta11 Degree]+CD*Sin[Pi+teta4]+CE*Sin[teta3+(teta31
Degree)]+EF*Sin[teta5]+FG*Sin[teta6]==0;

First[Solve[{a,b,c,d},{teta3,teta4,teta5,teta6}]]

e=FG*Cos[Pi+teta6]+FH*Cos[teta5]+HI*Cos[teta8]+GI*Cos[teta7]==0;

f=FG*Sin[Pi+teta6]+FH*Sin[teta5]+HI*Sin[teta8]+GI*Sin[teta7]==0;

Part[Solve[{a,b,c,d,e,f},{teta3,teta4,teta5,teta6,teta7,teta8}],2]
```

EK-2 Tasarlanan Mekanizmada J Noktasının Hız Değerini Veren Mathematica Kodları

```
(*" HIZ ANALİZİ"*)

w2=2;

w3=(-AB*w2*Sin[teta2-teta4])/(BC*Sin[teta3-teta4])/.v[[2]]

w4=(-AB*w2*Sin[teta2-teta3])/(CD*Sin[teta4-teta3])/.v[[2]]

w5=(-CD*w4*Sin[teta4-teta6]+CE*Sin[teta3+(teta31 Degree)-
teta6])/(EF*Sin[teta5-teta6])/.v[[2]]

w6=(-CD*w4*Sin[teta4-teta5]+CE*Sin[teta3+(teta31 Degree)-
teta5])/(EF*Sin[teta5-teta6])/.v[[2]]

w7=(-FG*w6*Sin[Pi+teta6-teta8]+EF*Sin[teta5-teta8])/(GI*Sin[teta7-
teta8])/.v[[2]]

w8=(-FG*w6*Sin[Pi+teta6-teta7]+EF*Sin[teta5-teta8])/(GI*Sin[teta8-
teta7])/.v[[2]]
```

EK-3 Tasarlanan Mekanizmada J Noktasının İvme Değerini Veren Mathematica Kodları

*(*İVME ANALİZİ*)*

a2=0;

a3=(AB〖w2〗^2*Cos[teta4*(teta2Degree)]+BC*〖w3〗^2*Cos[teta4-teta3]+CD*〖w4〗^2)/(BC*Sin[teta4-teta3])/.v[[2]]a4=(AB*〖w2〗^2*Cos[teta3*(teta2Degree)]+BC*〖w3〗^2+CD*〖w4〗^2*Cos[teta3-teta4])/(CD*Sin[teta3-teta4])/.v[[2]]*

a5=(-CD*a4*Cos[teta6-teta4]+CD*〖w4〗^2*Sin[teta6-teta4]-CE*a31*Cos[teta6-teta3+(teta31Degree)]+CE*〖w31〗^2*Sin[teta6-teta3+(teta31Degree)]+(EF*〖w5〗^2*Sin[teta6-teta5]+FG*〖w6〗^2))/((EF*Cos[teta6-teta5]))/.v[[2]]

*a6=(-CD*a4*Cos[teta5-teta4]+CD*〖w4〗^2*Sin[teta5-teta4]-CE*a31*Cos[teta5-teta3+(teta31Degree)]+CE*〖w31〗^2*Sin[teta6-teta3+(teta31Degree)]+EF*〖w5〗^2+(FG*〖w6〗^2*Sin[teta5-teta6]))/((FG*Cos[teta5-teta6]))/.v[[2]]*

*a7=(-FG*a6*Cos[teta8-teta6]+FG*〖w6〗^2*Sin[teta8-teta6]-FH*a5*Cos[teta8-teta5+Pi]+FH*〖w5〗^2*Sin[teta8-teta5+Pi]+(HI*〖w8〗^2+GI*〖w7〗^2*Sin[teta8-teta7]))/((GI*Cos[teta8-teta7]))/.v[[2]]*

*a8=(-FG*a6*Cos[teta7-teta6]+FG*〖w6〗^2*Sin[teta7-teta6]-FH*a5*Cos[teta7-teta5+Pi]+FH*〖w5〗^2*Sin[teta7-teta5+Pi]+(HI*〖w8〗^2*Sin[teta7-teta8]+GI*〖w7〗^2))/((HI*Cos[teta7-teta8]/.v[[2]])*

EK-4 AB, AD, FG ve AG Mesnet Mesafe Değişimlerine Karşılık Biyel Parametrelerini Veren ve Dosyaya Yazdıran CindyScript Kodları

```
file=openfile("database.dat");

J1DeltaX=(AAG.x-A.x);
println(file,J1DeltaX);

J1DeltaY=(AAG.y-A.y);
println(file,J1DeltaY);

J1J5=((AAG.x-AAB.x)^2+(AAG.y-AAB.y)^2)^(1/2);
println(file,J1J5);

J1J5Ang=arctan((AAG.y-AAB.y)/(AAG.x-AAB.x));
println(file,J1J5Ang);

J2DeltaX=((P101.x-AAG.x)^2+(P101.y-AAG.y)^2)^(1/2);
println(file,J2DeltaX);

J2DeltaY=((P101.x-AAH.x)^2+(P101.y-AAH.y)^2)^(1/2);
println(file,J2DeltaY);

J2J8=((AAH.x-P94.x)^2+(AAH.y-P94.y)^2)^(1/2);
println(file,J2J8);

J3DeltaX=((P102.x-AAG.x)^2+(P102.y-AAG.y)^2)^(1/2);
println(file,J3DeltaX);

J3DeltaY=((P102.x-P90.x)^2+(P102.y-P90.y)^2)^(1/2);
println(file,J3DeltaY);

J3J7=((P90.x-P96.x)^2+(P90.y-P96.y)^2)^(1/2);
println(file,J3J7);

J4DeltaX=((P103.x-AAG.x)^2+(P103.y-AAG.y)^2)^(1/2);
println(file,J4DeltaX);

J4DeltaY=((P103.x-AAA.x)^2+(P103.y-AAA.y)^2)^(1/2);
println(file,J4DeltaY);

J4J6=((AAA.x-P98.x)^2+(AAA.y-P98.y)^2)^(1/2);
println(file,J4J6);

closefile(file);
```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Ali FEYZULLAH
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Konya - 1988
Telefon	**:**	+90 505 861 98 94
Faks	**:**	-
E-Posta	**:**	alifeyzullah@hotmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı**	**İlçe**	**İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Meram Anadolu Lisesi	Meram	KONYA	2006
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi Müh. ve Mim. Fak. Makine Müh. Böl.	Selçuklu	KONYA	2013
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	Selçuklu	KONYA	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2015-2019	Kozak Makine	Yönetici

UZMANLIK ALANI

Robotik Kinematik ve Dinamik, Otomatik Kontrol, CAD ve CAE, Mekanizma Sentezi, Cinderella, Mekatronik Sistemler, C#, VB.NET, ASP.NET, SQL, Solidworks API, Gömülü Sistemler, Verilog, Devre Tasarımı ve Proteus.

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Feyzullah, A. ve Kavlak, K., 2018, Strength and Modal Analysis of 8 Membered Walking Mechanism, *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18),* Konya-Türkiye, 547-552 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).