

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNSANSIZ KARA ARAÇLARININ HAREKET SİSTEMLERİNİN
KAVRAMSAL TASARIMI

Cüneyd DEMİR

HAZİRAN 2017

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalında Cüneyd DEMİR tarafından hazırlanan İNSANSIZ KARA ARAÇLARININ HAREKET SİSTEMLERİNİN KAVRAMSAL TASARIMI adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa BOZDEMİR
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER _____
Üye (Danışman) : Doç. Dr. Mustafa BOZDEMİR _____
Üye : Yrd. Doç. Dr. Zühtü Onur PEHLİVANLI _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Rahmetli dayım Yrd. Doç. Dr. Zübeyir BARUTÇU'ya

ÖZET

İNSANSIZ KARA ARAÇLARININ HAREKET SİSTEMLERİNİN KAVRAMSAL TASARIMI

DEMİR, Cüneyd

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Mustafa BOZDEMİR

Haziran 2017, 145 sayfa

İnsansız kara araçları arazide her koşulda görev yapabilmesi için araca uygun intikal konfigürasyonları tespit edilmek istenmiştir. Bu tespit işlemi sistematik tasarım yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sistematik tasarımda kullanılmak üzere geliştirilen tasarım işlem modeli; problemin tanımı, karar verme ve sonuç aşamalarından meydana gelmektedir. Problemin tanımı yapılırken ihtiyaçların isteklerin ve sınırlamaların ayrıntılı olarak tespit edildiği şartname bölümü oluşturularak amaca uygun insansız kara aracının tasarlanabilmesi için tüm fonksiyon yapısının ve alt fonksiyon yapısının bulunduğu kavramsal tasarım işlemi yapılmıştır. Alt fonksiyon parametreleri insansız kara aracı hareket sistemlerinin çalışma mantığını ortaya koymaktadır. Sistematik tasarım işleminin daha verimli yapılabilmesi için söz konusu parametrelerin bulunduğu tasarım katalogu oluşturulmuştur. Tasarım kataloğundaki parametrelerin graf karar verme yöntemi ile uygun çözüm yolları ortaya çıkarılmıştır. Çözüm yollarının çalışma mantığına uygun olanlarının seçilebilmesi için hazırlanan şartname aşamasından faydalanılmıştır. Ortaya çıkarılan çözüm yolları ağırlık oranı metodu ile matematik ifadelerle dönüştürülmüştür. Amaca uygun tasarlanan insansız kara araçları arasında en iyi alternatif bulunarak işlem sonuçlandırılmıştır.

Anahtar kelimeler: İnsansız Kara Araçları, İKA Hareket Sistemleri,
İKA Sistematik Tasarım, İKA Kavramsal Tasarım

ABSTRACT

CONCEPTUAL DESIGN OF MOTION SYSTEMS OF UNMANNED GROUND VEHICLES

DEMİR, Cüneyd

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Defense Technologies, MSc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa BOZDEMİR

June 2017, 145 pages

Unmanned land vehicles are required to identify appropriate transition configurations so that they can function in any circumstances on the land. This determination process was realized by the systematic design method. The design processing model being developed for be in used design processing and in case of process models such as; description of problem, make a decision and stages of result were an effective. While the description of problem is constituted that request, requirement and as it in explained in detail restrictions of specification department. All function structure and bottom function structure was done to containing design process for devisable to expedient unmanned ground vehicles. Bottom function parameters are revealed why is operation logic the mobility systems of unmanned ground vehicles. Systematic design process can be done more efficiently for parameters ought to be created whereabouts to design catalog. The parameters in the design catalog will be revealed graff making decision method with suitable solutions. The solutions could be chosen to be suitable operation logic for it take advantage of prepared specification department. The resulting solutions have been converted to mathematical expressions by the weight ratio method. The objective was to find the best alternative among the appropriately designed unmanned ground vehicles and conclude the transaction.

Key Words: Unmanned Ground Vehicles, UGV Drive Systems
UGV Systematic Design, UGV Conceptual Design

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Doç. Dr. Mustafa BOZDEMİR'e teşekkür ederim.

Ayrıca, tecrübeleri ile hayatıma yön veren, kendime rol model edindiğim, tez dönemimde hayatını kaybeden rahmetli dayım Yrd. Doç. Dr. Zübeyir BARUTÇU'nun ruhaniyetine őükranlarımı sunar ve Yüce Allah'tan rahmetler ihsan etmesini dilerim.

Keza, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman üzerimden eksik etmeyen annem Kevser DEMİR'e ve babam Mehmet DEMİR'e sevgi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. İNSANSIZ ARAÇLAR	7
2.1. Sivil ve Askeri Alanda İnsansız Araçlar	9
2.1.1. Sivil Alanda İnsansız Araçlar	9
2.1.2. Askeri Alanda İnsansız Araçlar	10
2.2. İnsansız Sistemlerin Teknolojileri.....	14
2.2.1. İnsansız Araçların Birbiriyle İş Birliği Ağı Kurması.....	15
2.3. İnsansız Kara Araçları	18
2.3.1. İnsansız Kara Araçlarının Hareket Kabiliyeti.....	25
2.3.2. Yönlendirme Sistemleri	38
2.4. İnsansız Kara Araçlarının Kinematığı	44
2.4.1. Kinematik Modeller ve Kısıtlamalar	45
2.4.2. Hareketli Bir İnsansız Kara Aracının Mobilitesi	67
2.4.3. İnsansız Kara Aracı Çalışma Alanı.....	76
2.4.4. Serbestlik Dereceleri.....	77

3. SİSTEMATİK TASARIM	79
3.1. Kavramsal Tasarım.....	82
3.1.1. Kavramsal Tasarımın Mühendislik Tasarımındaki Önemi.....	82
3.1.2. Kavramsal Tasarım Adımları.....	83
3.1.3. Ürün Tasarım Sürecine Kavramsal Tasarım Etkisinin Sonucu	85
3.2. Ağırlık Oranı Metodu	86
4. İNSANSIZ KARA ARACI SİSTEMATİK TASARIMI	89
4.1. Geliştirilen Tasarım İşlem Modeli	89
4.1.1. Problemin Tanımı Aşaması	90
4.1.2. Karar Verme Aşaması.....	90
4.1.3. Sonuç Aşaması.....	91
4.2. İnsansız Kara Araçları İçin Şartname Hazırlama	94
4.2.1. Amaçların Listelenmesi	95
4.2.2. Amaçların Analiz Edilmesi.....	98
4.2.3. Amaçların Düzenlenmesi.....	98
4.3. İnsansız Kara Aracı Kavramsal Tasarımı.....	99
4.4. Tasarım Katalogu Oluşturma	101
4.4.1. Tasarım Katalogu Parametreleri	103
4.5. İnsansız Kara Aracı Tasarımında Alt Sistem Elemanlarının Graf Yöntemi İle Belirlenmesi	110
4.5.1. Ağırlık Oranı Metodu İle En İyi Alternatif Belirleme	125
4.6. Örnek Uygulamalar	127
5. SONUÇ	137
KAYNAKLAR	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. İnsansız kara araçlarının hareket kabiliyetine göre karşılaştırılması [29].....	26
2.2. Tekerlek-palet karşılaştırması [31]	26
2.3. Tekerlek konfigürasyonları [34]	31
3.1. Ağırlık oranı örneği için kaynak çizelge [51]	86
3.2. Ağırlık oranı elde edilen sonuçlar [51]	87
4.1. Tasarım katalogu.....	102
4.2. Enerji parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri.....	103
4.3. Eyleyici parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri	104
4.4. İntikal konfigürasyonu parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri.....	106
4.5. Faydalı yük parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri	107
4.6. Süspansiyon sistemi parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri.....	108
4.7. Yönlendirme sistemi parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri.....	109
4.8. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı mikro ve minyatür)	125
4.9. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı mikro ve minyatür) ($\lambda 1$ Seti)	125
4.10. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı küçük-hafif, k-orta ve k-ağır).....	126
4.11. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı k-hafif, k-orta ve k-ağır) ($\lambda 2$ Seti)	126
4.12. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı orta ve büyük)	126
4.13. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı orta ve büyük) ($\lambda 3$ Seti).....	126
4.14. Tasarım katalogu.....	128
4.15. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı mikro-minyatür).....	129
4.16. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı mikro-minyatür) ($\lambda 1$ Seti).....	129
4.17. Tasarım katalogu	131
4.18. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı k-hafif, k-orta, k-ağır)	132
4.19. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı k-hafif, k-orta, k-ağır) ($\lambda 2$ Seti)	132
4.20. Tasarım katalogu.....	134
4.21. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı orta-büyük).....	135
4.22. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı orta-büyük) ($\lambda 3$ Seti)	135

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Askeri bir bilginin yayımlanması.....	16
2.2. İnsansız kara aracında yer alan temel teknolojiler [27]	19
2.3. Çeşitli hareket mekanizmalarının erişilebilir hızına karşı spesifik güç [32].....	27
2.4. a) Standart tekerlek b) Kastor tekerlek c) Swedish tekerlek mekanizması d) Küresel tekerlek [33]	28
2.5. Evde vakum ile temizlik yapabilen ve servis edebilen bir İKA [36]	33
2.6. Uranüs isimli insansız kara aracı [36].....	33
2.7. Ackerman yönlendirme sistemi tekerlek açıları [39].....	39
2.8. Diferansiyel sürüş yönteminde motorların hareket verme prensibi [31]	40
2.9. Diferansiyel aracın hareketi [43].....	41
2.10. Senkron yönlendirme sistemi (Eş zamanlı tahrik) [36]	42
2.11. Senkron yönlendirme sistemi a.Alttan görünüş b.Üstten görünüş [31]	42
2.12. 4WS yönlendirme sisteminin hıza göre dönüş şekli [46].....	43
2.13. Genel referans şasi ve İKA kısmi referans şasi [36].....	46
2.14. İnsansız kara aracının küresel bir eksene hizalanması [36]	47
2.15. Genel referans şasideki diferansiyel tahrikli insansız kara aracı [36].....	48
2.16. Sabit bir standart tekerlek ve parametreleri [36].....	52
2.17. Yön veren bir standart tekerlek ve parametreleri [36]	54
2.18. Bir kastor tekerleği ve parametreleri [36]	55
2.19. Beş kastor tekerleği olan ofis koltuğu [36]	56
2.20. Swedish tekerleği ve parametreleri [36]	57
2.21. Küresel tekerlek ve parametreleri [36].....	59
2.22. Üç tekerlekli çok yönlü tahrikli (Omnidrive) insansız kara aracı [36]	64
2.23. Kısmi referans şasi ve tekerlek-1 için ayrıntılı parametreler [36]	65
2.24. a) Ackerman yönlendirme sistemli 4 tekerlekli araç, b) Bisiklet [36].....	68
2.25. a) Ayrı ayrı motoru olan iki tekerlek ve tek kastor tekerlekli diferansiyel tahrikli robot b) İki sabit standart tekerleği ve bir tane yön belirleyen standart tekerleği olan üç tekerlekli araç [36]	69
2.26. Üç tekerlekli konfigürasyonun beş temel türü [36]	75

3.1. Ürün tasarımı aşamaları [54].....	81
3.2. Kavramsal tasarım süreci [55]	83
3.3. Kara kutu modeli [57]	84
4.1. Geliştirilen tasarım işlem modelinin genel yapısı.....	92
4.2. İnsansız kara aracına ait tüm fonksiyon yapısı	99
4.3. İnsansız kara aracına ait alt sistem fonksiyonları yapısı	100
4.4. Enerji boyut değiştirici ek parametresinin fonksiyonel gösterimi	100
4.5. Enerji parametresinin fonksiyonel gösterimi	103
4.6. Eyleyici parametresinin fonksiyonel gösterimi.....	104
4.7. İntikal konfigürasyonu parametresinin fonksiyonel gösterimi	105
4.8. Faydalı yük parametresinin fonksiyonel gösterimi.....	107
4.9. Süspansiyon sistemi parametresinin fonksiyonel gösterimi	108
4.10. Yönlendirme sistemi parametresinin fonksiyonel gösterimi.....	109
4.11. Ağırlık sınıflandırması, gürültü sesi, çekiş gücü, ivmelenme ve maksimum hız ile eyleyici tipini ilişkilendirme grafiği	111
4.12. Eyleyici tipi ve görev süresi ile enerji tipi ilişkilendirme grafiği.....	113
4.13. Ağırlık sınıflandırması ile intikal konfigürasyonunu çeşitlendirme grafiği....	114
4.14. Arazi tipi ve süspansiyon sistemi tipi ile intikal konfigürasyonu tipi ilişkilendirme grafiği	118
4.15. İntikal konfigürasyonu ve manevra kabiliyeti ile yönlendirme sistemi tipi ilişkilendirme grafiği	119
4.16. Kullanım ortamı, ağırlık sınıflandırması ve intikal konfigürasyonu ile süspansiyon sistemi tipi ilişkilendirme grafiği	121
4.17. Kullanım amacı ve intikal konfigürasyonu ile faydalı yük ilişkilendirme grafiği	123
4.18. Uygulama-1 için tasarım şartname bilgileri seçimi	127
4.19. Uygulama-1 için seçilen en iyi alternatifin şekil olarak gösterimi	129
4.20. Uygulama-2 için tasarım şartname bilgileri seçimi	130
4.21. Uygulama-2 için seçilen en iyi alternatifin şekil olarak gösterimi	132
4.22. Örnek bir tasarım için şartname bilgileri seçimi	133
4.23. Uygulama-3 için seçilen en iyi alternatifin şekil olarak gösterimi	136

SİMGELER DİZİNİ

$\{X_I, Y_I\}$	Genel referans şasi hareketi
$\{X_R, Y_R\}$	Kısmi referans şasi hareketi
$\dot{\xi}_I$	Genel referans şasi matrisi
$\dot{\xi}_R$	Kısmi referans şasi matrisi
$R(\theta)$	Anlık dönme matrisi
$\dot{\phi}$	Tekerlek dönme hızı
$\varphi(t)$	Tekerleğin zamana bağlı dönme hızı
$\dot{\phi}_{sw}$	Swedish tekerlek dönme hızı
\dot{x}	x hız vektörü
\dot{y}	y hız vektörü
r	Tekerlek yarıçapı
l	Her bir tekerleğin P 'ye olan uzaklığı
ω	Tekerlek açısız hızı
$\hat{\theta}$	Genel ve kısmi referans arasındaki açı
α	P noktası ile tekerlek arasındaki açı
$\hat{\beta}$	Tekerlek ile şasi arasındaki açı
γ	Silindirle teker dönme arasındaki açı
β_f	N_f tekerlek açısı
$\beta_s(t)$	N_s tekerlek açısı
N	$N_f + N_s$
N_f	Sabit standart tekerlek sayısı
N_s	Yönlendirilebilir standart teker sayısı
J_{1f}	Sabit standart teker iz düşüm matrisi
$J_1(\beta_s)$	Bireysel tekerlek iz düşüm matrisi
J_2	Tüm standart tekerleklerin matrisi
C_{1s}	Tüm yönlendirilebilir teker $N_s \times 3$ matrisi
C_{1f}	Tüm sabit standart tekerlek $N_f \times 3$ matrisi
δ_M	Toplam manevra kabiliyeti derecesi
δ_m	Hareket kabiliyeti derecesi

δ_s	Yönlendirilebilirlik derecesi
$\text{poz}(x, y, \theta)$	Konum
A_i	Alternatif ürün i , $i = 1, \dots, n$;
C_j	Ölçüt j , $j = 1, \dots, m$;
x_{ij}	A_i alternatifinin özelliği
e_{ij}	A_i alternatifinin özelliği C_j ölçütü yönünden etkisi
$V(A_i)$	Ölçütlerin tamamı etkisinde A_i 'in değeri
λ_i	C_j ölçütlerinin önem göstergesi

KISALTMALAR DİZİNİ

RPV	Remote Piloted Vehicle (Uzaktan Kumandalı Araç)
GPS	Global Positioning System (Küresel Konum Belirleme Sistemi)
INS	Inertial Navigation System (Ataletsel Navigasyon Sistemi)
İHA	İnsansız Hava Araçları
İDA	İnsansız Deniz Araçları
İUA	İnsansız Uzay Araçları
İKA	İnsansız Kara Araçları
NASA	National Aeronautics and Space Administration (ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
JPL	Jet Propulsion Laboratory (Jet Tahrik Laboratuvarı)
COM	Center of Gravity (Ağırlık Merkezi)
ICR	Instantaneous Center of Rotation (Anlık Dönme Merkezi)

1. GİRİŞ

Buhar gücünün 1800'lü yıllarda kullanılması ile başlayan sanayileşme süreci, beraberinde makineleşme sürecini getirmiştir. İnsan kontrolüyle çalışan makineler birçok alanda büyük kolaylıklar sağlamıştır. Gerek sivil sektörde, gerekse askeri alanda kullanılan makineler 20. yüzyıla girildiğinde ise giderek yaygınlaşmaya başlamıştır. 1960'lı yıllarda uzay çalışmalarında kullanılmaya başlanan bilgisayar teknolojisi, makineleşme sürecini derinden etkilemiştir. Makineler ile bilgisayarlar birbirini tamamlayan bir sistem içerisinde kullanılmaya başlanmıştır [1]. Günümüzde sadece verilen komutları yapabilen bilgisayarların yerini, gelecekte yapay zekanın gelişmesi ile birlikte öğrenebilen ve uygulayabilen bilgisayarlar alacaktır. İşlemcilerin fiziksel boyutunun küçülmesi ve kapasitelerinin artırılması, askeri alanda da kendini hissettirmeye başlamış, en basit silah sistemlerinin bile akıllı teknolojiye sahip olmasına olanak sağlamıştır. Bununla birlikte savaşların gitgide şehirlerde icra edilmeye başlanması, görevlerin karmaşıklığı ve ülke kamuoylarının insan zayıfatını karşı çıkması, devletleri askeri alanda insansızlaşmaya yöneltmiştir. Asıl amacı hayatı kolaylaştırmak olması gereken bilimsel araştırmalar, çoğunlukla askeri teknolojileri geliştirmek amacıyla kullanılmış, silahın veya sistemin üretim maliyetini düşürmek isteyen devletler de, ilgili askeri teknolojinin bir bölümünü sivil sektörün ihtiyacına yöneltmişlerdir [2].

İnsansız araçların genel özellikleri şu şekildedir: Gözetleme kapasitesi insanlardan üstündür, insan hayatını korurlar, kendilerini korumaya ihtiyaçları yoktur, herhangi bir durumda kendilerini feda edebilirler, insanın yaşadığı stres ve psikolojik rahatsızlıklar robotlarda görülmez, herhangi bir duyguya sahip olmadıkları için korkusu duyguları bulunmaz, bir seferde birçok iş yapabilirler, işgücü ihtiyacını düşürürler, önceden belirlenmiş veya rutin operasyonları icra edebilirler, uzun zaman geçse dahi aynı operasyonu aynı şekilde icra edebilirler, düşman bölgesinde daha rahat hareket edebilirler [3, 4].

İnsansız araçlarının en önemli özelliği insansız hava araçları üzerinden gösterilecek olursa; insanlı uçaklardan daha ucuz olmaları ve bakım masraflarının oldukça düşük olmasıdır. İnsansız hava araçları pilotlu uçakların ihtiyaç duyduğu birçok sisteme

ihtiyaç duymamaktadırlar. Bir F-22 uçağının yerine 4.2 milyon dolar mal olan 40 adet Predator isimli insansız hava aracı üretilebilmektedir [5]. Uçuş pilotunun 1 saatlik eğitiminin maliyeti 2108 dolarken, insansız hava aracı operatörünün 1 saatlik maliyeti 150 dolardır. Sonuç olarak bir pilotun maliyeti operatörün maliyetinin yaklaşık 14 katıdır [6]. Operatör; klimalı bir ortamda ve rahat koltuğunda, kilometrelerce uzaklıktaki düşman ile stres yaşamadan savaşılabılırken, insanlı uçağın pilotu ise hem uçağı kullanmakta, hem de karşısındaki düşman ile savaşmaktadır.

Çalışmalarının ışığında gelişen ve sürekli geliştirilen bilgisayar teknolojisi birçok alanı etkilediği gibi insansızlaşmanın gelişmesine önemli katkılarda bulunmuştur. Robot teknolojisinin insan hayatına girmesiyle insansız kara araçlarına duyulan ihtiyaç gittikçe artmaktadır. Her geçen gün insansız kara araçları üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. İnsansız kara araçları; keşif, gözetleme ve istihbaratta, taarruz ve geri emniyet desteğinde, terörizme karşı savaş, mayın temizleme, bomba imhada, sınır devriyesinde, rutin ve tekrar edilen görevlerde, lojistikte, uzay araştırmalarında, bilimsel uygulamalarda kullanımı mevcuttur.

İnsansız kara araçlarına genel maksatlı bakılacak olursa, insansız kara araçlarının; tasarımından simülasyonuna, yazılımdan donanımına, deney niteliğindeki analiz yöntemlerinden test ve muayene yöntemlerinin kullanılmasına kadar mevcut teknolojilerin saptanarak gerekli yatırım alanları belirlenmeli, ihtiyaç duyulan teknolojilerin geliştirilmesine yönelik üniversiteler ile çalışmalar başlatılmalıdır. Özellikle sisteme otonom özelliği sağlayan yazılım ve donanıma yönelik çalışmaların detaylandırılarak ilgili kuruluşlarla işbirliği yapılması, ulusal ve uluslararası projeler üretilmesi gerekmektedir. Ülkede hazırlanan ana plan dahilinde, öncelikle gelecek nesil insanlı muharebe araçlarına ve insansız kara araçlarına yönelik çalışmalar başlatılmalı ve ivedi olarak bu tip sistemler envantere koyulmalıdır. Uluslararası arenada rekabete dahil olabilmek için savunma alanında bulunan askeri teknolojilerle donatılmış insansız kara araçlarının tasarlanıp, üretimi gerçekleştirilmelidir. İnsansız araç teknolojisi asla ülke güvenliği için ithal edilmemelidir. Belirtilen bu sebep ile birlikte dünyada halen gelişmekte olan savunma teknolojilerinde Millileşmenin önemi bir kez daha görülmektedir.

Uluslararası arenada söz sahibi olan gelişmiş ülkelerde insansız kara araçlarının tasarımı hususunda ileri seviyede tasarım metotları kullanıldığı yapılan araştırmalar sonucunda görülmüştür. Fakat ülkemizde insansız kara araçlarının tasarımı konusunda hep geleneksel metotların kullanıldığı fark edilmiştir. Geleneksel insansız kara aracı tasarımının temelinde, tasarımın icra edilmesi, kullanılması ve daha sonra yeni ürünün geliştirilmesi kaidesine dayanmaktadır. Fakat insansız kara aracı tasarımında, yeni ihtiyaç ve isteklere olan talepler ve yaşanan tasarım karmaşası yeni bir ürün için uzun zaman bekleme durumunu kesinlikle kabul etmemektedir. Bunun üzerine modern tasarım metotlarıyla çok karmaşık olan insansız kara aracı tasarımı üzerine çalışma yapılmıştır. Modern tasarım metotlarından sistematik tasarım yöntemi insansız kara aracı tasarımına uyarlanarak problem çözülmüştür.

Geleneksel tasarım olarak adlandırılan tekniklerde problemin çözümü için temel başlangıç noktası çoğunlukla mevcut ürünün geliştirilmesi şeklindedir. Mevcut ürünlerin geliştirilmesi prensibine dayanılarak yapılan tasarım tekniklerinin uygulamaları sırasında, belirli bir aşama sonrasında çözüm bulunamaması yada çözümün geliştirilememesi gibi sorunlarla karşılaşılır. Ürün veya sistem tasarımları üzerindeki hukuksal korumalar, patent yasaları vb., düzenlemeler nedeniyle kopyalama veya benzerini yapma gibi eylemler olumlu karşılanmamaktadır. Bu nedenle mevcut problemleri farklı yöntemlerle çözerek, ürün veya sistemler için alternatif çözümler ortaya koyabilmek amacıyla modern tasarım teknikleri geliştirilmiştir. Modern tasarım tekniklerinde, problemlerin tanımlanması ve çözümünde kullanılan yöntemin özelliğine bağlı olarak sistematik bir sıra izlenir ve genel olarak sistematik tasarım teknikleri olarak isimlendirilir. Sistematik tasarım tekniğine uygun gerçekleştirilen bir tasarım işleminde şartname hazırlama, kavramsal tasarım, karar verme ve detaylı tasarım gibi aşamalar mevcuttur. Sistematik tasarım teknikleri kullanılarak yapılan bilimsel çalışmalarda en çok kavramsal tasarım ve karar verme aşamaları üzerine çalışmalara rastlanmaktadır.

Bazı sistem yada ürünlerin tasarım işlemlerinde, belirli tasarım teknik ve metodolojilerinin kalıp olarak uygulanması, istenilen çözümlere ulaşabilmekte karmaşık yada sonuç alınmasını engelleyici durumlar ortaya çıkartabilir. Herhangi bir uygulamaya yönelik seçilen tasarım modelinin kullanımıyla, istenilen sonuca

ulaşılamadığı durumlarda, tasarımcılar kendi problemlerinin çözümüne yönelik uygun işlem modelleri geliştirebilmektedir.

Geliştirilen bir tasarım metodunun kullanım ve geçerliliğiyle ilgili bilgiler, tasarım modelinin kullanımıyla birlikte zaman içerisinde elde edilir. Geliştirilen tasarım metodlarının kullanımı sonrasında, özel sonuçlar veya orijinal tasarımlar bulunması veya bir amacı gerçekleştirmede tasarımcıya belirli işlem sırasının hazırlanması amaçlanır. Bu amaçlar doğrultusunda yeni geliştirilmiş bir tasarım metodunun öncelikle anlaşılabilir olması istenilen genel özellikler arasındadır. Kullanımı sonrasında tasarımcıları yeni çözümler bulmaya teşvik etmesi, en uygun çözümlerin taranması için değerlendirme teknikleri kullanabilmesi gibi özellikleri taşıması, tasarım işlem modelinin geçerlilik değerini artırmaktadır. Ayrıca, hazırlanan bir tasarım işlem modeli içerisinde ürün modelinin alt sistem yapılarına ait veri tabanı bilgileri kullanılması ve tasarım uygulamasında gerçekleştirilmesi gelişmiş özelliklerdir. Bu özellikleri bünyesinde bulunduran tasarım işlem modelleriyle yapılan uygulamalarda, tasarım düzenleme esnekliği ve geri besleme desteği kolaylıkla sağlanabilir.

Bu çalışmada, insansız kara araçlarının mekanik sistem yapılarının tasarımı ve geliştirilmesinde kullanılmak üzere oluşturulan, graf ağacına dayalı karar verme aşamasına sahip bir sistematik tasarım işlem modelinin tanımı yapılmaktadır. Bu tasarım işlem modelinin uygulanması esnasında, tasarımı yapılacak insansız kara araca uygun hazırlanmış tasarım katalogu kullanılır. Oluşturulan tasarım kataloguna ait bilgiler, şartname aşamasında tespit edilen sınırlandırmalara göre değerlendirilir ve graf ağacı karar verme mekanizması tarafından alternatiflerin oluşturulması sağlanır. Ortaya çıkan alternatifler insansız kara aracının ağırlığına göre belirlenmiş 3 farklı λ seti ve 3 farklı memnuniyet dereceleri ile ağırlık oranı metoduna göre en uygun insansız kara aracının seçimi yapılır.

Çalışmada konu alınan temel problem şu şekilde özetlenebilir:

İnsansız kara aracındaki karmaşık problem; kötü doğa koşulları ve zorlukları ile mücadele etmek, yumuşak ve engebeli zeminlerin üstesinden gelebilmek için hareket

yeteneği kazandırılan ve bu hareket yeteneğini uygun intikal konfigürasyonu ile gerçekleştiren, kullanım amacına göre üzerine bazı faydalı yükler alabilen, uzun görev süreleri sağlayabilen, manevra kabiliyeti artırılabilen, kapsama alanı yüksel yüksek, uzaktan kontrol yada otonomi yeteneği olan, tasarımcı veya kullanıcı belirleyeceği genel ve özel şartlar dikkate alınarak, dayanıklı ve fonksiyonel bir insansız kara aracı seçimi yapmaktır.

Çalışmadaki hedeflerin bazıları şunlardır:

- Özel ve genel amaçlı insansız kara aracı tasarımı sırasında yapılacak işlem sırasını belirleyebilen bir tasarım işlem modelinin geliştirilmesi
- Tasarımcı ve kullanıcı istek ve ihtiyaçlarının insansız kara aracı tasarımına etkili katılımını sağlamak amacıyla, kolay kullanımlı ve esnek bir şartname oluşturmak.
- Alternatif tasarım üretme ve şartname değerlendirme işlemlerinin yapılabildiği yapıyı oluşturmak
- Sistematik tasarım işlem modelinde, tasarlanan sisteme ait fonksiyon yapılarının fiziksel temsil ve ilişkilerinin sağlanabildiği grafiklerin oluşturulması.

Çalışmada kullanılan yöntem ve teknikler şunlardır:

- Geliştirilen sistematik tasarım işlem modelinin değişik aşamalarında kullanılmakta olan bilgilerde, tüm fonksiyonlar, alt fonksiyonlar, graflar, sembolik resimsel gösterimler gibi tasarım bilgi temsil modelleri kullanılmaktadır.
- Tasarım işlem modelinin karar verme aşamasında, alternatif çözüm önerilerinin üretilmesi amacıyla, graf karar verme yöntemi kullanılmıştır.
- Ortaya çıkarılan alternatifler matematik ifadelere dönüştüreceğ ağırlık oranı metodu kullanılmıştır.

Hazırlanan bu tez, "İnsansız Kara Araçlarının Hareket Sistemlerinin Kavramsal Tasarımı" adı altında incelenmektedir. Tez içerisinde oluşturulan bölümler ve içerikleri şu şekilde düzenlenmiştir.

1.Giriş: Çalışmadaki problemin açıklanması, tezin amacı, hedefleri ve gerçekleştirilmesinde kullanılan teknik ve metotlara ait özet bilgilerinin anlatılmıştır.

2. İnsansız araçlar: İnsansız araçların askeri ve sivil maksatları olarak üretildiklerini ilerleyen süreçte insansız sistem teknolojilerinin gelişmesi ile insansız araçların, insan desteği bulunmadan birbiri arasında bir iş birliği ağı kuracakları ile alakalı bilgiler verilmiştir. Ayrıca bu bölümde, insansız kara araçlarının mobilitesi, yönlendirme sistemleri ve kinematiği ile ilgili literatür verileri bulunmaktadır.

3. Sistematik tasarım: Sistematik tasarım ve kavramsal tasarım tekniğinin yapısını ve önem dereceli karar verme metotlarından olan ağırlık oranı metodu ile ilgili genel bilgileri kapsayan temel bir bilgi bölümüdür.

4. İnsansız kara araçları sistematik tasarımı: Bu bölümde, insansız kara araçlarının geliştirilen bir tasarım işlem modeline ile sistematik tasarımına yer verilmiştir. Yapılan çalışma ile insansız kara araçlarındaki bütün parametrelerinin birbiri ile ilişki halinde olduğu ortaya çıkarılmıştır. İnsansız kara aracının her türlü arazi şartında görev yapabilmesini sağlayan intikal konfigürasyonun oluşturulmasının gerçekte çok zor olduğu fark edilmiştir. Bir insansız kara aracının tasarımının tabandan başladığı ve mekanik sistem parametrelerine göre amaca en uygun insansız kara aracı tasarımının gerçekleştirilmesinin stratejik ve kompleks olduğu yapılan çalışma sonucunda anlaşılmıştır. Bu karmaşık tasarımın geleneksel metotlardan ziyade modern tasarım metotları ile çözümünün vuku bulacağı fikrine ulaşılmış ve çalışma yapılmıştır. İnsansız kara aracı gibi karmaşık yapıya sahip olan robotların tasarımı için, modern tasarım yöntemi olan sistematik tasarımın en uygun yöntem olduğu belirlenmiştir. Bahsedilen çalışma bu bölümde detaylıca anlatılmıştır.

5. Sonuç: Geliştirilen sistematik tasarım modelinin sağladığı faydalar, insansız kara aracı sistematik tasarım katalogunun kullanımı, geliştirilen sistematik tasarım işlem modeli ile karar verme işlemi sonucunda ortaya çıkan alternatiflerin değerlendirilmesine ait bilgilerin sonuçları ve ileride yapılacak çalışmalar için öneriler bu bölümde tartışılmaktadır.

2. İNSANSIZ ARAÇLAR

İnsansız araçların genel tanımı, içinde veya üstünde görev gerektirmedikçe insan bulundurmayan, uzaktan veya otonom olarak idare edilebilen ve öncesinde belirlenmiş görevleri yerine getiren kritik teknolojilerdir. Savaş alanında üstünlük, savaş öncesi üstünlük, tesis ve bina güvenliği, terörizme karşı savaş, uzay araştırmaları, bilimsel uygulamalar ve daha çok çeşitli diğer istek ve gereksinimler nedeni ile, ülkelerin insansız araçlara olan ihtiyaç teknolojiyle paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Bu durumdan ötürü insansız araçlara yapılan yatırımlar her yıl katlanarak artmakta ve yakalanan başarılar ile birlikte önemli üstünlük ve avantajları da beraberinde getirmektedir [7].

İnsansız teknolojilerin kullanımının yaygınlaşmasının altında, gelişen teknolojinin sağladığı imkân ile birlikte bazı maliyetli ya da sorunlu kalemleri aşabilmenin getirisi de bulunmaktadır. Örnek verilecek olursa, insansız hava araçlarının otonom veya bir yer istasyonu aracılığıyla kontrol edilebiliyor olması, insanlı uçakların idame için gerekli yaşamsal sistemler, kokpit için gerekli olan yer, mürettebatın sahip olduğu ağırlık vb. maliyetler, insanlı uçakların manevra ve operasyon kabiliyetinin insan kabiliyetleriyle sınırlanması gibi işlevsel kalemler, düşman tarafından fark edilme yahut vurulabilme olasılığının düşük olması gibi üstünlükler insansız hava araçlarını daha tercih edilir kılmıştır. Bunlardan en önemlisi, insansız hava araçlarının zayıf maliyetinin insanlı hava araçlarına göre daha düşük olmasıdır.

İnsansız araçlara olan büyük talep insanların güvenli bir şekilde gidip dönemeyecekleri her yere bu teknolojik araçların gönderilebilir olmasıdır ki insansız teknolojilerin üretilmesi, geliştirilmesi ve kullanıma başlamasında ana kaide budur. Diğer bir nokta ise bu araçların savaş ortamında savaş psikolojisine bürünmeden daha insani olabilmeleridir. Savaşta işlenen suçlar ve suçlular ile dolu dünya tarihi bu teknolojiye ihtiyaç duymaktadır. Önemli olan teknolojinin bu yönleriyle çok kritik bir teknoloji olduğudur. Kritik teknoloji kavramı şu şekilde tarif edilmektedir: "Bir ürün veya süreç teknolojisi, uzun dönemli ulusal güvenliğin ve ekonomik refahın geliştirilmesi için vazgeçilmez olarak tespit edilmişse, bu teknolojiye kritik teknoloji

denir.". Ulusal ve uluslararası ölçekteki sanayi rekabeti açısından ise kritik teknoloji kavramına önemli bir özelliğin daha eklenmesi gerekmiştir: Geliştirme çabaları sonunda geniş bir yelpazeye yayılmış ve getirisi olacağı düşünülen teknolojiler kritiktir [8].

Robotik alanının son yıllarda en popüler konularından bir tanesi de insansız otonom hareket eden taşıtlardır. Aynı zamanda bir çok alanda otonom araçları görülmektedir. Özellikle savunma sanayinde artık insansız araçlar vazgeçilmez olmuşlardır ve önemli bir caydırıcı güç konumundadırlar. Bir çok devlet insansız kara, hava ve deniz aracı geliştirmek için büyük yatırımlar yapmaktadırlar. Otonom insansız araçlar artık insan hayatında önemli bir yer edinmeye başladılar. Otonom robotlar kara, hava, deniz üstü, denizaltı ve uzay ortamlarında insanların hizmetine sunulmuş ve son yıllarda askeri ve araştırma amaçlı çalışmalarda kullanılmışlardır. Deniz üstünde kullanılan otonom insansız araçlar insan hizmetine ve ülke karasularının korunmasına destek sağlamak için tesis edilmiştir. Denizaltında kullanılan otonom insansız araçlar denizaltında sismik hareketleri kontrol etmek ve denizaltı yaşamını araştırmak; otonom araçları deprem, heyelan gibi karasal hareketleri veya kasırga, tsunami gibi afetleri havadan tespit edip içerisinden bilgi toplamak; otonom kara araçları da askeri amaçlı bomba ve mayın imha etmek, kütüphaneler ve hastanelerde insanlara kılavuzluk yapmak ve bilgi vermek, sanayide ise malzeme taşımak ve üretime katkıda bulunmak gibi çok geniş yelpaze de kullanılmaktadır. İnsansız kara araçları deprem, yangın ve kanalizasyon tıkanıklığı gibi durumlarda insanların ulaşamayacağı veya insanlar için tehlike arz eden yerlerde de kullanılmaktadır [3, 9].

Askeri alanda henüz çok yeni sistemlerden olan insansız araçlar, genel olarak kara, hava, deniz, ve uzay araçları şeklinde sınıflandırma yapılır. İnsansız araçlar görev yaptığı bölge itibariyle dört kategoride sınıflandırılmışlardır [3].

- i. İnsansız Kara Araçları (İKA)
- ii. İnsansız Hava Araçları (İHA)
- iii. İnsansız Deniz Araçları (İDA)
- iv. İnsansız Uzay Araçları (İUA)

2.1. Sivil ve Askeri Alanda İnsansız Araçlar

Endüstri Devrimi'nden yaklaşık bir buçuk asır sonra, belirlenmiş sınırlar dâhilinde verilen görevleri kendi başına yerine getirebilen makineler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bağımsız ve görev odaklı hareket eden bu makineler, gerçek anlamda insansızlaşmanın miladı kabul edilmişlerdir.

İnsansızlaşma terimiyle eş anlamlı olarak kullanılan bir diğer terim ise robotlaşmadır. Robot terimine günümüz anlamını getiren ve kanunlarla tanımlamaya çalışan kişi Isaac Asimov'dur. İfade ettiği üç robot kanunu şunlardır [10]:

- i. Robotlar insanları korumalıdır.
- ii. Robotlar insanları güvende tutmalıdır.
- iii. Robotlar insanlar tarafından verilen komutlara uymalıdır.

Revize edilmiş robot kanunları ise şunlardır [11]:

- i. Robot insanlara zarar vermemelidir.
- ii. Robot insanların komutlarına uymalıdır.
- iii. Bir robot, başka bir robota zarar vermemelidir.

Son yıllarda bilgisayar, iletişim ve elektronik sistemleri ile bilgisayar entegre edilmiş makineler, robotik sistemlerin gelişimine yol göstermiş ve robotların üretim maliyetlerini düşürmüştür. Robotik sistemlerdeki bu dönüşüm, tüketici piyasası, inşaat, tıp, eğitim sistemi, iş dünyası ve askeri alanda kendisini göstermiştir [12].

2.1.1. Sivil Alanda İnsansız Araçlar

İnsansız sistemlerin sivil amaçlı kullanım alanları şunlardır; atmosferik ve coğrafi araştırmalar, mineral keşfi, polis gözetlemeleri, sınır güvenliği, enerji hatlarının güvenliği, trafik güvenliği, felaketlerin gözetlenmesi, haritacılık, arama- kurtarma, tarımsal ilaçlama, yangın gözetlemesi ve daha niceleri.

Alanı sensörlerle çevrilmiş bir tarlayı ekip biçen insansız tarım aletlerinin kullanımı da büyük oranda yaygınlaşmaya başlamıştır. İnsansız tarım aletleri gelecek vadeden bir sivil insansızlaşma şeklidir. Tarımsal makinelerin insansızlaşmasıyla birlikte tohum atma sürecinden, sulama ve ürünleri hasat etme sürecine kadar bütün tarımsal faaliyetlerde insan faktörünün gelecekte önemini kaybedeceği rahatlıkla öngörülebilir [13]. İnsansız kara aracı sınıfında robot yemleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu yemleme sistemleri işgücü ve zamandan tasarruf edebilme imkânı tanıdığı rahatlıkla ifade edilebilir. Bir diğer robot kullanım alanı ise tıp sektörüdür. Gelecekte, uzaktan doktor tarafından yönetilen robotik cerrahi sistem ile tamamen steril bir ortamda saniyenin yüzde biri kadar bir gecikme ile cerrahi müdahale gerçekleştirilebilir [14].

Sonuç olarak insansızlaşmanın etkisi günlük hayatta pek hissedilmese de, önemi çok büyüktür. Hızlı ve sağlam adımlarla büyüyen insansızlaşma teknolojisi, gelecekte belki de hayatın hemen her anında insanların yanı başında kendini hissettirecek bir özellik gösterecektir. Tarımdan tıba, güvenlikten ulaştırmaya hayatın birçok alanında robotlar insanların iş arkadaşı konumuna gelebileceklerdir.

2.1.2. Askeri Alanda İnsansız Araçlar

Askeri alanda insansızlaşmanın tarihi her ne kadar 1900'lü yılların başı olarak gösterilse de, II. Dünya Savaşında ve sonrasında üretilen bazı basit model insansız sistemler dahil edilmezse, İsrail'in ürettiği ve daha sonralarında ABD ile 1980'lerde ortak kullandığı RQ serisi Pioneer model insansız hava aracı askeri alanda insansızlaşmanın miladı kabul edilebilir. Pioneer'in diğer insansız sistemlere oranla daha üstün olduğu durum, GPS teknolojisinin insansız sistemlerde kullanılmaya başlanmasıdır.

Lazer güdümlü bombaların beş metre doğrulukla hedefini vurabilmesi, hacimce küçülüp etkinliğinin artması ve uydu teknolojisinin bir saniye gibi kısa bir gecikme süresinde görüntüyü iletebilmesi, gelişmiş ülkelerin insansız araç üzerinde gelişimini ve kullanımını arttırmıştır. Uydu, GPS ve lazer güdümlü bomba üçgenini kendi

imkânıyla tamamlayabilen ülkeler, askeri alanda insansızlaşmanın öncüsü kabul edilmektedirler. Bu bağlamda dünyada söz sahibi ve Birleşmiş Milletlerin beş daimi üyesi olan ülkelere ABD, Rusya, Çin, Fransa ve İngiltere kendi aralarında kıyaslandığında ABD'nin askeri alanda insansızlaşma konusunda tartışmasız bir üstünlüğü göze çarpmaktadır. Fransa'nın yeterli ama öncü sayılamayacak bir teknolojiye sahip olması, İngiliz teknolojisinin ABD'ye bağımlı olması, Çin ve Rusya'nın tersine mühendislik ile bu insansızlaşmada yer edinme çabaları ABD'yi bu konuda öncü konuma getirmektedir. ABD'nin insansızlaşma için bütçesinden araştırma ve geliştirmeye ayırdığı pay diğer devletlerle kıyas dahi edilemeyecek bir büyüklüktedir [3].

Askeri alanda, robot teknolojisinin kullanımı çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Son yıllarda, askeri alanda en fazla dikkat çeken teknolojiler insansız araç teknolojileridir [15]. Robotların icat edilmesi ve kullanılmaya başlanması, barutun icadından bu yana muharebe alanında ortaya çıkan en büyük devrimlerden biridir [16]. Gelecekteki savaşların boyut, tasarım, yetenek ve otonomi açısından gelişmiş robotlar arasında geçeceğini şimdiden öngörmek yanlış olmayacaktır [17].

Robotların askeri alandaki önemini devletler de kavramaya başlamışlardır. Silahlı kuvvetlerdeki insansız araçlara ilgi dünya çapında artarak devam etmekte ve robotları bir an önce envanterlerinde görmek ve herhangi bir savaş tehlikesine karşı kullanıma hazır olmasını istemektedirler. Çünkü hem maliyet-etkinlik analizi yönünden uygundur, hem de savaş meydanında herhangi bir riskleri bulunmamaktadırlar [5]. ABD Kara Kuvvetleri AR-GE laboratuvarının bir öngörüsüne göre; robotların kullanımı ile ilgili sanayi, üniversite ve ordunun işbirliği sayesinde 2020 yılına kadar ABD ordusunun önemli bir olgunluğa ulaşabileceği değerlendirilmektedir [16].

İnsansız araçlar basitçe 3 tip askeri görevde kullanılmak üzere tasarlanmışlardır [18]:

- i. Tehlikeli görevler: İnsan hayatının büyük ölçüde tehlikeye girebileceği görevlerdir. Saldırı öncesi keşif operasyonları bu görevlere örnek olarak verilebilir.

- ii. Sıkıcı görevler: Uzun süre keşif ve gözetleme gerektiren, insanın yapması halinde belli bir süre sonra dikkatinin dağılacağı görevlerdir. Sınır güvenliği ve devriye görevleri bu görevlere örnek olarak verilebilir.
- iii. Kirli görevler: Nükleer, kimyasal yada biyolojik silahlarla kirletilmiş bölgelerde insanların keşif yapabilmesi zor ve tehlikelidir. Bu tip görevlere kirli görevler adı verilir. Nükleer, kimyasal yada biyolojik silah ile kirletilmiş savaş alanları ve nükleer tesislerin keşfi bu görevlere örnek olarak verilebilir.

İnsansız araçların yukarıda belirtilen görevleri dışında, mevcut iletişim cihazlarıyla iletişimin sağlanamadığı bölgelerde, iletişim ve haberleşme sağlama yeteneğini kullanılmaktadır. İnsansız kara araçlarının, ilerleyen yıllarda askeri kontrol noktalarındaki kimlik kontrolünü yapabilecek seviyeye ulaşabilmeleri muhtemeldir. Bu uygulama hayata geçirildiğinde, insansız kara araçlarının kontrolünden kaçan şüpheliler, insansız hava araçları vasıtasıyla takip edilip operasyon düzenlenebilecektir [19]. İnsansız sistemler ile bir yerden başka bir yere malzeme nakli de gerçekleştirmektedirler. Bu özelliğinin geliştirilmesiyle birlikte, örnek olarak, mini insansız hava araçları ile savaş alanına tıbbi malzeme ve ilaç gönderilebilecektir [20]. Ülkeler karasularında kontrol için bulunan deniz kuvvetleri, olası düşman saldırılarına karşı insan kaybı yaşanmaması için bu kontrollerde insansız deniz aracı ve insansız hava aracı kullanımına geçilmiştir.

Belli başlı ülkelerin askeri kuvvetlerinde insansız araç teknolojilerinin durumları;

- **Amerika Birleşik Devletleri**: İnsansız kara araçları, insansız hava araçları, insansız deniz araçları ve insansız uzay araçları teknolojilerinde kısaca bütün insansız araçlar sınıfında büyük bir fark ile dünyada birinci konumdadır. İnsansız araç gelişimine hem sivil hem askeri maksatta büyük bütçe ayırmaktadır. Dünyada teknolojisi en gelişmiş, insansız araç sayısı en çok olan ülke Amerika Birleşik Devletlerinde bulunmaktadır.
- **İngiltere**: Öncelerde insansız araçları pek önemsemeyen İngiltere daha sonralarında bu kritik teknolojilere yoğunlaşmış ve büyük yollar kat ederek uluslararası arenada büyük bir konuma gelmiştir. Özellikle kontrol edilebilirlik

ve araçların çalışma saatleri konusunda çalışmalarda bulunmaktadır. Çokça bilimsel ve askeri manada insansız araç envanterine sahiptir.

- **Almanya:** Ciddi bir şekilde insansız kara aracı ve insansız hava aracı teknolojisi üretme konusunda çalışmalarına devam etmektedir. İnsansız araç ara yüzü, planlama, akıllı kontrol, algılama ve otonom insansız araç platformları bu konudaki çalışmaları yürütmektedir. Son zamanlarda taşınabilen hafif insansız araç sistemlerine öncelik vermektedir.
- **Fransa:** Fransa'nın öncelikle üzerinde yoğunlaştığı konular arasında; sistem işbirliği, silah sistemleri ve otonominin geliştirilmesi bulunmaktadır. Ayrıca gece görüş ve elektronik sensörler üzerinde de çalışmaları devam etmektedir.
- **Avustralya:** Avustralya, platform bağlantılı teknolojiler ve silah sistemleri konuları üzerinde yoğunlaşmıştır. Kontrol teorileri ve kontrol sistemleri üzerinde de çalışmaları devam etmektedir.
- **Kanada:** Kanada'nın önceliği, sensör üretimi ve sensörlerin robotik sistemlere entegrasyonudur. Ayrıca ülkenin robotik araç platformları ve yapay zekâ üzerinde de çalışmaları devam etmektedir.
- **İsrail:** İnsansız hava araçları konusunda dünyada ciddi manada söz sahibi olan İsrail, Hindistan ile işbirliği yürütmektedir. Ayrıca tank sistemleri ve lazer silahları konusunda da çalışmalarına devam etmektedir.
- **Rusya:** Rusya, uzay araştırmaları programlarından edindiği tecrübelerle insansızlaşma konusunda belli bir bilgi birikimine sahiptir. İnsansız savaş uçağı konusundaki çalışmalarına tüm hızıyla devam etmektedir.
- **Çin:** Canlıların sürünme, yüzme, ayak ve el kullanma faaliyetleri üzerinde düşük bütçeli AR-GE programlarını sürdüren Çin, birkaç endüstrisiyle birlikte çalışmalarını genişletme kararı almıştır. Tsinghua Üniversitesi'nin robotik sistemler için akıllı sistemler geliştirme programı, AR-GE faaliyetlerinin merkezinde yer almaktadır. Pekin Üniversitesi ve Miken Poli Teknik Üniversitesi, "lider bir robotu takip eden dört robot" başlığı altında, multi-robotik sistemler konusundaki çalışmalara başlamıştır [4].
- **Güney Kore:** İnsansız ve otonom sistemler konusunda büyük bir alt yapıya sahip olan Güney Kore, dört ayaklı katır robot konusundaki çalışmalarına devam etmektedir. Kuzey Kore ile arasındaki askersiz bölgede kullanabileceği robotik sistemler konusunda da yoğunlaşmış bulunmaktadır.

- **Singapur:** Singapur, insansız hava aracı teknolojisinde, ABD ve İsrail'in ardından üçüncü sırada bulunmakta ve bu konudaki ihtisaslaşmasını sürdürmektedir [21].
- **Türkiye:** Ülkemiz insansız araçlar teknolojilerine çok geç katılmıştır. İnsansız araç teknolojilerin millileştirilmesi üzerine hem özel firmaların yaptığı çalışmalara hem üniversitelerin yaptığı akademik çalışmalara hem de savunma sanayimizdeki devlete bağlı kurumların yaptığı çalışmalara destek vermektedir. Savunma maksatlı kullanılacak bu teknolojilerin milli olması için büyük bir bütçe ayırmaktadır. İnsansız hava ve kara araçları sınıfında yapılan çalışmalarda Türkiye, söz konusu kritik teknolojilerde diğer ülkelerin standartlarını yakalasa da sayı ve çalışma bakımından hala büyük eksikleri bulunmaktadır.

2.2. İnsansız Sistemlerin Teknolojileri

İnsansız araç teknolojilerinin incelenmesi kısaca dört başlık altında yapılabilir:

- i. İletişim ve Sensörler: İletişim, insansız araçlar için kritik bir öneme sahiptir. İletişimin olmaması veya eksik olması, insansız sistemle iletişimin kaybedilmesine veya düşman eline geçmesine yol açabilir. Gelişmiş sensörler, insansız araçların ve operatörlerin çevreyi daha ayrıntılı olarak tanınmasına fırsat verir. Ayrıca iletişimin büyük bir bölümünü uydu aracılığıyla yapan insansız sistemin, uydu sinyali alamadığında da çalışabilmesi üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. İnsansız araçla iletişim sağlayan yer kontrol istasyonlarının, harp bölgesinde rahat hareket edebilmesi için seyyar olarak planlanmıştır [22, 23].
- ii. Yakıt ve Motor: İnsansız aracın daha uzun süre görev yapabilmesi için, yakıtının verimli ve uzun ömürlü, motorunun da az enerji tüketen bir nitelikte olması gerekmektedir. Yeni konseptte, küçük içten yanmalı motorların, küçük robotlar ve insansız hava araçlarında kullanılması öngörülmektedir [4].
- iii. Silahlar: İnsansız araçların sahip olması gereken silah sistemlerinin ve mühimmatların küçük, etkili ve öldürücü olması gerekmektedir. Ayrıca gelecekte

akıllı mühimmatlar klasik mühimmatlara oranla daha fazla tercih edileceği aşikârdır. İnsansız araçların küçülmesiyle silah sistemlerinin de aynı oranda küçülmesi ve daha fazla ateş gücüne sahip olması gerekmektedir [24]. Hacimce ve ağırlıkça büyük silah ve mühimmat, insansız sistemin daha fazla enerji tüketmesine sebep olabilmektedir. Sonuç olarak günümüzde her alanda kullanılan nano teknolojinin, silah sistemleri için de kullanılması önem arz etmektedir.

- iv. Kullanılan Malzeme: Yakıt tasarrufu sağlanması amacıyla insansız araçların mümkün olduğunca hafif üretilmesi gerekmektedir. Bununla beraber zırh kalınlıklarının da belli bir koruma sağlayacak niteliğin üzerinde ve aracın korunmasına yardımcı olması gerekmektedir.

Bu şartlarda insansız araçların yapımında göz önünde bulundurulacak temel kriterler şunlardır:

- Aracın ağırlığı,
- Çalışma süresi,
- Çalışma menzili,
- Enerji tüketimi,
- Aracın hızı,
- Aerodinamik yapısı,
- Kaynak kullanımı ve maliyetidir [25].

2.2.1. İnsansız Araçların Birbiriyle İş Birliği Ağı Kurması

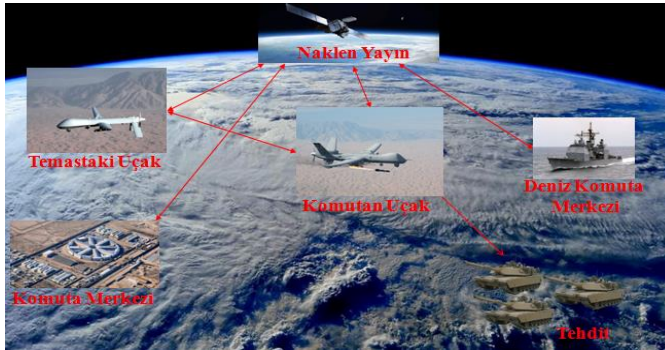
İlerleyen teknolojiyle birlikte gelecekte ki askeri sistemi; uzayda, havada, denizde ve karada operasyon yapabilme kapasitesine sahip çok sayıda iletişim düğümü ve kullanıcı ara yüzünden oluşması beklenmektedir. Kuvvetler arasındaki işbirliği sistemin ana hedefi olacaktır. Bu sistem ana bileşenlerden, ana fonksiyonlardan ve kapasitesinden oluşmaktadır [3].

a) Ana Bileşenler:

- i. İnsanlı araçlar
- ii. Yayın istasyonları
- iii. İnsansız araçlar
- iv. Uydular
- v. Profesyonel personel ve teknisyenler
- vi. Bilgisayar ağları
- vii. Komuta merkezleri

b) Ana Fonksiyonlar:

- i. Kendi Kendini Koruma: İnsanlı ve insansız sistemler, aralarında bağlantı kurarak birbirlerini koruyacaklardır.
- ii. Orta Mesafeli Naklen Yayın: Askeri bilginin uçaklardan denizaltılara kadar yayımlanması sağlanacaktır. Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Şekle göre harp bölgesinden kilometrelerce uzaklıkta bulunan komuta merkezi; deniz komuta merkezi ve insanlı veya insansız bir uçağın emir komutası altındaki temas edilen uçakları, uydu vasıtasıyla yönlendirebilecek ve tehdit bertaraf edilebilecektir.



Şekil 2.1. Askeri bir bilginin yayımlanması

- iii. Haberleşme Rölesi İşlevi: Sistem muharebe alanının herhangi bir yerindeki bilgiye anında ulaşabilecektir. İnsansız hava araçlarının verici olarak kullanılması buna örnek olarak gösterilmiştir. Böylece çok büyük yüksekliklerde görev verilecek insansız hava araçları vasıtasıyla yüksek irtifa istasyon platformları

oluşturulacak ve böylelikle askeri birliklerin haberleşmesini sağlamak amacıyla geniş bir kapsama alanı oluşturulacaktır.

- iv. Komutan İnsansız Araçlar: Herhangi bir insansız araç, diğer insansız araçların komutasını devralabilecek ve onları yönlendirebilecektir.
- v. Kendi Kendini Yönlendirebilen Ağlar: Sistemde veya iletişimde oluşabilecek herhangi bir arızada operasyon durmayacak, sistem kendini insansız olarak organize ederek operasyona devam edecektir.
- vi. Sensör Çeşitliliği: Sensörler, akustik ve manyetik çeşitliliğe sahip olacaklardır (termal, infrared, radyo frekansları gibi).
- vii. Çoğunluk Davranışı Gösterme: İnsansız araçlar yeteri kadar otonom hale getirilip, grup halinde operasyon yapabilmelerine olanak sağlanacak ve ağ sisteminin gereksiz bilgi ile yavaşlaması veya çökmesi engellenecektir.
- viii. Otonom ve Yapay İstihbaratın Derecelendirilmesi: Harp alanındaki otonom sistemler, ihtiyaca göre belirlenecek farklı kapasitelerdeki otonom seviyeleri ile çeşitlendirilebileceklerdir [3].

c) Kapasite:

- i. İletişim Kapasitesi: Ses ve bilgi paylaşımını canlı gerçekleştirebilecek şekilde olacaktır.
- ii. İstihbarat ve Keşif Kapasitesi: Sistemin ana unsurlarının durumsal farkındalıklarını arttıracak nitelikte olacaktır.
- iii. Saldırı Kapasitesi: Düşman sisteminin ana unsurlarına önleyici saldırıları yapabilecek nitelikte olacaktır.
- iv. Savunma Kapasitesi: Sistemin ana unsurları birbirlerini koruyabileceklerdir.
- v. Elektronik Harp Kapasitesi: Sistemin ana unsurları kendilerini elektromanyetik karıştırmaya, saldırıya ve anti-radyasyon silahlarına karşı koruyabileceklerdir.
- vi. Deniz Savaşları Kapasitesi: Sistem denizde üstünlüğü sağlayacaktır.
- vii. Kara Savaşları Kapasitesi: Sistem karada üstünlüğü sağlayacaktır.
- viii. Hava Savaşları Kapasitesi: Sistem havada ve uzayda üstünlüğü sağlayabilecektir.
- ix. Taşıma Kapasitesi: Sistemin ana unsurlarının bütün gereksinimlerini mekân gözetmeksizin sağlayabilecektir [3].

Gelecekte üretilecek insansız araçlar için belirlenen kriterler şunlardır;

- Yüksek derecede bağımsız hareket etme kabiliyetine sahip olma,
- Uzun görev şartlarına uyumlu olma,
- Radara ve diğer sensörlere yakalanmayacak gizliliğe sahip olma,
- Gelişmiş bir "ağ" içinde görevine devam eden insansız sistemlerden oluşmuş olmaktadır [16].

2.3. İnsansız Kara Araçları

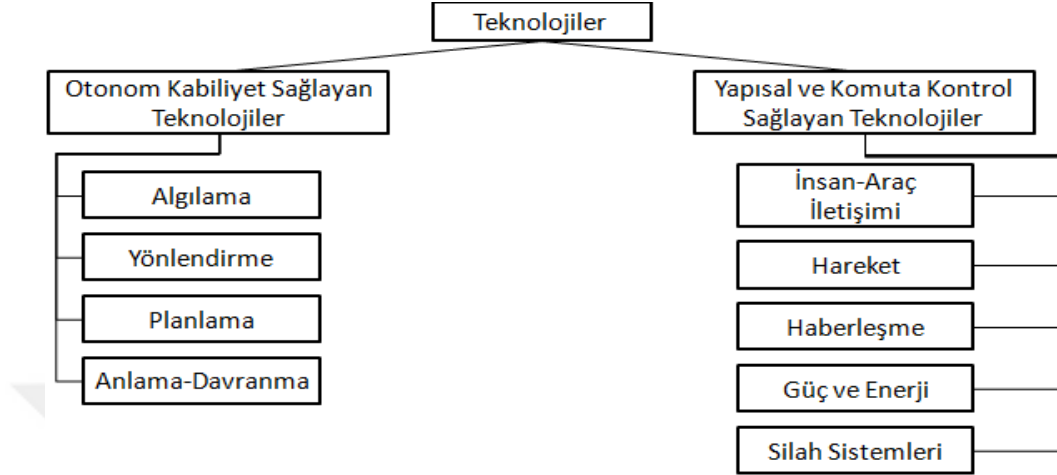
İnsansız kara aracı çalışmaları 1970 yıllarında, bacakları olan makinelerin yapılabileceğine yönelik çalışmalarla başlamıştır. Çalışmalar esnasında yürüyen bir makineden önce bir robot oluşturulmasının gerekli olduğu ve bu robotun belirli ekipmanlar ile donatılarak istenilen amaca uygun hale getirilebileceği ortaya çıkmıştır. İlerleyen süreçte yapılan çalışmalarda askeri sistemlere uygulanma anlayışı ortaya çıkmış ve insansız kara araçlarının oluşturulmasına yönelik çalışmalar başlatılmıştır [26].

İnsansız kara aracı genel olarak üzerindeki elektronik görüş sistemi, sensörler ve uzaktan kumandalı silah sistemi sayesinde savaş risklerini azaltmak ve herhangi bir tehdidi etkisiz kılmak amacıyla geleceğin ordularında yer alacak otonom sistemler olarak tanımlanabilir.

Ayrıca insansız kara aracının günümüz tanımını yapılmak istenirse; yüksek hareket yeteneğine sahip dayanıklı bir araç platformu üzerine göreve özel farklı faydalı yüklerin entegre edilebildiği, ayarlanabilir otonomi seviyesine sahip, modüler kontrol konsolu ile uzaktan komuta edilebilen zemine temas ederek intikalini sağlayan yeni nesil insansız araçlar, insansız kara aracı olarak adlandırılır.

Taktik ve teknik ihtiyaçlar doğrultusunda insansız kara araçlarının sahip olması gereken teknolojiler otonom davranış kabiliyeti sağlayan teknolojiler ile yapısal ve komuta kontrol teknolojiler olmak üzere iki ana grup altında incelenebilir. Yapılan çalışmalarda insansız kara araçlarına yönelik farklı teknolojik sınıflandırmalar

yapılsa da, insansız kara araçlarını genel hatları ile şekildeki gibi, birbirini tamamlayan ve her biri kendi içerisinde etkileşimli olan iki ana grupta toplamının sistem yapısını daha iyi tanımlamaktadır (Şekil 2.2.) [27].



Şekil 2.2. İnsansız kara aracında yer alan temel teknolojiler [27]

Otonom Yetenek Sağlayan Teknolojiler: İnsansız kara aracının çevreyi algılayabilme kabiliyeti kazanması ve otonom hareket yeteneğine sahip olması gereklidir. Otonom sistem yeteneği insansız kara araçlarının en kritik ihtiyaçlarının başında gelir. Sistemin kullanılacağı ortam dinamik ve sadece GPS yardımıyla hareketin sağlanamayacağı kadar komplekstir. Dolayısıyla sistem üzerinde bulunan sensörlerden sürekli veri gelmesi ve bu verinin çok kısa sürelerde değerlendirilmesi ve uygulanması gereklidir [26].

i. Algılama Yeteneği: İnsansız kara aracının her çeşit arazide görev yapması beklenir. Bu sebeple bulunduğu çevreyi en iyi biçimde algılaması otonom hareket yeteneği açısından sistemden istenen en önemli özelliktir. Aracın çevreyi algılama yeteneğinde yer alan bazı etkenler aracın yakın çevresi ve uzak çevresi olarak iki kategoride toplanabilir. Aracın yakın çevresi, aracın yakınında bulunan herhangi bir engel ve farklı bir arazi yapısı gibi algılaması gereken etkenlerle buna göre ayarlaması gereken bir hız vardır. Aracın uzak çevresi ise, yakın çevresindekilere ek olarak aracın bulunduğu alana göre, tepelik, dağlık ya da düz alan, yokuş, iniş, ormanlık, uçurum, duvar gibi etkenleri belirleyebilmesi ve hızını ayarlayabilmesi

gereklidir. Her iki çevre için farklı algoritmalar oluşturulmalıdır. Yakın çevresi için algıladıkları ve algılama yöntemleri ile uzak çevresi için algılama yöntemleri ve algıladıkları farklı olacağından bunların değerlendirilmesi için gereken sistemler ve karar algoritmaları da farklı olacaktır.

- ii. Yönlenme Yeteneği: Yönlenme bulunduğu noktanın tespiti, varış noktasının belirlenmesi ve bu noktaya ulaşmak için rotanın seçilmesi, rota üzerinde durum değerlendirmelerinin yapılarak gerektiğinde değişikliklerin yapılması gibi birçok belirsizliği içinde bulunduran kazanılması gereken önemli bir yetenektir. Yönlenme yeteneğinde kullanılan GPS, INS, gibi sistemler olmasına rağmen bu sistemlerin insansız kara araçları anlayışında mevcut halleri ile yeterli değildir. Söz konusu sistemlerin, özellikle çok ayrıntılı verilerin yer aldığı coğrafik veri bankası gereklidir. Bu veri bankasının devamlı güncellenmesinin gerekeceği gibi, sistemin bilgileri, algılama yeteneği ile temin edilen verilerle kıyaslayarak kontrol etmesi, herhangi bir değişiklik varsa kendini güncellemesi ve merkezi bilgilendirmesi, bunlara göre gerekirse yeni yön tayini yapması gibi birçok işlem ve kararın, kısa sürede yerine getirilmesi gerekmektedir.
- iii. Planlama Yeteneği: Yönlenmeyle yakından alakalı olan planlama yeteneği, insansız kara araçlarında yazılımın en çok öne çıktığı alandır. Planlama yeteneği operasyondan lojistik desteğe kadar geniş bir alanı kapsamaktadır. Yol planlaması özellikle görev dahilinde olan hareket alanında, daha önceden planlanan ya da hareket esnasında meydana gelebilecek yeni duruma göre hareketi planlayacak yetenekte olmalıdır. Askeri operasyonlarda, operasyon esnasında birçok değişikliğin olabileceği dikkate alındığında, söz konusu planlamaya yönelik algılayıcılardan gelecek verilerin çok iyi şekilde işlenerek, mevcut veri deposuyla da karşılaştırılarak karar verme algoritmalarının hazırlanması gereklidir. Bunlara ek olarak, görev planlaması için, askeri bilgi birikiminin aktarılması, savaş taktik ve tekniklerinin sisteme kazandırılması, standart operasyon prosedürlerinin işlenmesi, diğer birliklerden gelen verilerin değerlendirilmesine yönelik yeteneklerin kazandırılması, düşmanla temas olması durumunda davranış şekillerine, iletişime, önceliklere, protokollere yönelik birçok verinin sisteme

girilmesi ve bu verilerin işlenmesi gibi yeteneklerin sisteme kazandırılması gerekmektedir.

- iv. Anlama ve Davranış Yeteneği: Anlama ve davranış yeteneği, otonom sistemin bir ürünü gibi düşünülebilir. Algılanan, yönlendirilen ve planlanan taktik ihtiyaçları karşılayacak görev ve yetenekler anlama ve davranış yeteneği ile devreye alınacaktır. Görev sisteme yüklenebilmeli, öğretilerbilmeli ve çok kısa sürede doğru biçimde tepki verilmesi sağlanmalıdır. Dolayısıyla algılama, yönlendirme ve planlamadan gelen bilgiler bu sistemin girdisi olarak kabul edilebilir. Özetle savaş alanında, herhangi tehlide müdahale esnasında ya da diğer görevlerde, insansız kara aracı önceki davranışlarından yararlanarak, askeri protokoller içerisinde kendi hareket sistemini geliştirebilmeli ve farklı durumlar için de dışarıdan yapılacak müdahalelere açık olmalıdır. Söz konusu gereksinimlerin karşılanması için anlama kabiliyetinin yapay zeka kullanılarak biyolojik bir sinir sisteminin modellenmesiyle alakalı algoritmaların oluşturulması vasıtasıyla, sistemin öğrenmesinin ve uygulama kabiliyetinin kazandırılması gereklidir.

Yapısal ve komuta kontrol sağlayan teknolojiler: İnsansız kara aracının otonom yapısını karşılayacak olan teknolojilerin yanı sıra sistemin işlemlerini sağlayacak mekatronik donanımdan oluşan, bazılarında yazılım desteği bulunan donanımlara yönelik teknolojiler; insan-robot etkileşimi, hareket yeteneği, haberleşme yeteneği, güç ve enerji, silah ve beka olarak tanımlanabilir. Bunlar ayrıca destekleyici teknolojiler olarak adlandırılmaktadır [26].

- i. İnsan-Robot Etkileşimi: İnsan-robot etkileşimi, araçlar üzerine akıllı sistemlerin uygulanması ve uygulama neticesinde, sistem ile insan arasında bağlantı kurulması ve dolayısıyla hangi arayüzlerin kullanılacağına yönelik bir alandır. Söz konusu sistemler, personel tarafından kumandalı ya da uzaktan kumandalı olarak kullanılacağı durumlarda gerekli arayüzlerin tasarımı ve geliştirme çalışmalarını kapsamaktadır. Bu sistemler prensip olarak yarı otonom, insan merkezli hesaplama sistemi ya da tasarımı olup, insan-robot etkileşim sistemlerinde uygulanmaktadır.

- ii. Hareket Yeteneği: Hareket yeteneği, insansız kara aracının ihtiyaçlarla tanımlanan veryüzünde hareket etme yeteneğiyle alakalıdır. İnsansız kara aracının üstleneceği görevler ve otonom yapısı ve bunların gerekleri dikkate alındığında, mobilitesinin yüksek olması istenmektedir. İnsansız kara aracının hareketi, görevini yerine getirmek için en uygun yolu aramasından ziyade görevin yerine getirilmesinde kısıtlayıcı bir unsur olmaktadır. Bu sebeple hareketi kolaylaştıracak en uygun yoldan ziyade, en kısa sürede görevi gerçekleştirebilecek yol üzerinde hareket etme yeteneği önemlidir. Sistemin algılama kabiliyetinden oluşan yanlış algılamalarda, belirsiz durumlarda ya da hareketi kolaylaştıracak kısa bir yol bulunamaması halinde, zaman kaybetmeden hareketi gerçekleştirmesi amaçlanmaktadır. Bu amaca hizmet edebilecek hareket yeteneğine sahip bir sistem, görev esnasında operasyon dışı kalmadan ve insan desteğine ihtiyaç duymadan görevini yerine getirebilecektir. Hareket yeteneği, gerektiğinde elektronik ve yazılımla desteklenen mekanik ağırlıklı bir donanımla karşılanmaktadır.
- iii. Haberleşme Yeteneği: Haberleşme konsepti, insanlı ve insansız araçlar arasındaki haberleşmeye yönelik protokolleri kapsamaktadır. Zaman olarak, hızlı işlem yapabilen sistemler vasıtasıyla yüksek kapasitelere ihtiyaç olan haberleşme formatları sistemde yerini almaktadır. Bilgisayarlarla haberleşme protokolleri, cep telefonları, telsiz telefonlar gibi yaşanan teknolojik gelişmelerin, yalnızca askeri alana değil, sivil alana da hitap etmektedir. Haberleşme yeteneği insansız kara araçlarında gerekli gizlilik derecelerini sağlayacak destekleyici yazılım ve arayüzlere yönelik özel yazılımlar ve donanımlar kullanılmaktadır.
- iv. Güç ve Enerji: Enerjinin öneminin giderek arttığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı çalışmalar hızla artmaktadır. Geleceğin muharebe araçlarından olan insansız kara araçlarında da bu durum kendisini göstermektedir. Lojistik desteğe ihtiyaç olmadan uzun süre görev yapabilmek en önemli noktalardan birisidir. Dolayısıyla, enerji kaynakları iyi seçilmeli ve enerjiyi güç çevirecek yüksek verimli sistem tasarımları yapılmalıdır. Günümüzde melez güç grubu sistemine yönelik çalışmalar, hidrojen enerjisi kullanımıyla araçlara hareket verilmesi, yakıt pilleri gibi üzerinde birçok çalışma sürdürülmekte ve bunlardan

çoğunluğu olumlu sonuçlar vermektedir. İnsansız kara aracının görevine uygun güç sistemlerinin ve enerji kaynaklarının seçilmesi gelişen teknolojilerin kullanılmasıyla yapılabilecektir. Güç sistemlerinin seçilmesinde önemli faktörler, sistemin hafif olması, sessiz olması, yüksek güvenilirlikte olması, düşük yakıt tüketimi ve bulunacak yakıt deposunun ağırlık ve boyutlarının azaltılması, emisyon yaymaması, termal iz yaymaması gibi faktörlerdir.

- v. Silah ve Beka Teknolojileri: İnsansız kara araçlarında içinde bir personel taşımayacak olsa dahi tasarım amacına göre belirli bir seviyede personel korumasında kullanılabilir. Silahlı bir platformun uzaktan kumandalı ve gerçek zamanlı çalışabilen olması ya da tam otonom olması gereklidir. Bu yönlerden bakıldığında gelecekte savaşların günümüze nazaran çok daha acımasız olacağı öngörülmektedir. Bunun yanı sıra öldürücü silah sistemlerinin yerine, canlıları geçici olarak felç eden, hareketsiz bırakan caydırıcı nitelikte olan silah sistemleri de kullanılabilir.

İnsansız kara araçlarının yetenekleri şunlardır: Her türlü hava koşulunda gece ve gündüz kesintisiz çalışabilme, her türlü arazide kesintisiz çalışabilme, su geçirmezlik ve amfibi harekât kabiliyeti, yüksek manevra, mobilite ve stabilite yeteneği, darbelere karşı dayanım, merdivenlere tırmanabilme, enkaz tipi engelleri aşabilme, insan tarafından taşınabilme, uzun çalışma süresi, otonom kontrol ve navigasyona sahip olma, tak ve çalıştır modüler donanım entegrasyon kabiliyeti, haberleşme ve kontrol sistemi, hızlı veri aktarım yeteneği, kolay kullanım ve kısa operatör eğitim süresi, düşük maliyet ve seri üretim, kolay güncellenebilir yazılım mimarisi, bakım ve idame kolaylığı, havadan indirilebilme, bir duvar üzerinden veya araçtan atılabilmeye, düşük tespit edilebilirlik, hava ve kara saldırılarına karşı personel için zırh koruması, diğer insanlı ve insansız araçlarla iletişim, sessiz izleme ve hareket, silah platformu rolü, kendi arızasını tespit edebilme [28, 29].

İnsansız kara araçlarının görevi şunlardır: Keşif ve gözetleme, savaş alanı desteği, anayurt güvenliği, taarruz harekâtları, mayın temizleme, bomba imha, sınır devriyesi, lojistik, silah platformu olarak, muharebe alanında ve muharebe öncesi üstünlük, tespit edilen hedefleri ateş altına alabilme, terörizme karşı savaş, tesis-bina güvenliği, uzay araştırmaları, bilimsel uygulamalar, veri saklama ve yayma kabiliyeti, rutin ve sıkıcı işlerde kullanım, yetkili veya güvenilir olmayan personel tespit edebilme, karanlıkta ve aydınlıkta görüntü toplayabilme, tekrar eden görevleri hızlı ve doğru bir şekilde yapabilme, kaybedilmelerinin insan kaybından daha önemsiz olması, iletişim rölesi olarak hareket edebilme, konuşma tanınması ve üç boyutlu ses algılama yeteneği, muharebe ortamında daha insani olabilmeleri, güvenlik birliklerinin ilk önce görmesini, ilk önce anlamasını, ilk önce harekete geçmesini ve ilk önce kesin sonuca ulaşma, otonom, uzaktan komuta ve gerektiğinde araç üzerinden denetim, otonom yer değiştirme, engel tanıma, aşma ve yol izleme, göreve uygun seçilebilen faydalı yükler [28, 29].

İnsansız kara araçlarının çeşitli sınıflandırmaları vardır [30]. Bunlar:

- i. Operatör müdahalesine göre: Uzaktan kumandalı, otonom.
- ii. Hareket kabiliyetine göre: Tekerlekli, paletli, ayaklı, müteferrik.
- iii. Aldığı göreve göre: Ayaklı, taşıyıcı, silahlı keşif aracı.
- iv. Yetkin olma durumuna göre: Telsiz operatörlü, yarı-otonom, platform merkezli otonom, ağ merkezli otonom.
- v. ABD Savunma Bakanlığı bu kategorileri ağırlığa göre sınıflandırmıştır [3].

İnsansız kara araçlarının geliştirmesi iki kategoride toplanabilir. Mevcut güvenlik birimlerinin yerine geçerek, stratejik yada taktik hareket gerçekleştirebilecek insansız kara araçları ve bu birimlere her türlü operasyonda hava ve arazi şartlarında destek sağlayacak insansız kara araçlarıdır. Güvenlik temelli askeri konseptler; asayiş, taarruz, savunma, meskun mahalde ya da arazide antiterör operasyonları ile her türlü savaş dışı hareketleri kapsamaktadır.

Geleceğin savaş sistemlerinde hafif unsurların taktik sistemi, birleşik bir komuta ve kontrol unsuruyla personelli ve personelsiz unsurlardan oluşacaktır. Söz konusu

unsurlar günümüzdeki birliklerden daha küçük ve daha hafif, taktik olarak daha iyi düzenlenmiş, fakat daha güçlü ve dayanıklı olacaktır. Geleceğin savaş sistemlerinde bir diğer temel konsept öldürücü olmayan silahları insansız sistemlere entegre ederek etkinliği artırmak, operasyon süresini kısaltmak ve başarıyı daha kısa sürede yakalamaktır. Öldürücü olmayan silahlar ölüm olaylarını, personelin yaralanmasını ve mülk ya da çevrenin istenmeyen biçimde hasar görmesini önlemek amacıyla personeli veya materyali en az zayıf ve hasarla tesirsiz hale getirmek için tasarlanan ve kullanılan silahlardır. Bu silahlar, hedeflerini patlama ve parçalama yoluyla imha eden konvansiyonel öldürücü silahların aksine hedefin faaliyetlerini önlemeye yöneliktir ve toplu fiziksel imha yerine personel veya malzeme üzerinde nispeten geri çevrilebilir etkilere sahiptirler [28].

2.3.1. İnsansız Kara Araçlarının Hareket Kabiliyeti

İnsansız kara araçlarının yapısında tekerlekli, paletli ve ayaklı sistemler olmak üzere üç kategori öne çıkmaktadır. Ayrıca müteferrik (tekerlekli-paletli, tekerlekli-ayaklı) sistemlerin bir arada olduğu insansız kara aracı, dünyadaki birçok kara bölgesinde görev yapabilecek yetenektedir [28].

- Tekerlekli
 - Paletli
 - Ayaklı
 - Müteferrik (Tekerlekli-Paletli, Sürünme Kabiliyetli vs.)
- i. Tekerlekli insansız kara aracında bulunan özellikler: Düşük derecede kompleks yapı, iyi derecede ivmelenme, iyi derecede çeşitli arazilerde hareket edebilme, kolay bakım-onarım, yüksek hıza çıkabilme, yüksek enerji ihtiyacı.
 - ii. Paletli insansız kara aracında bulunan özellikler: Orta derecede kompleks yapı, zayıf ivmelenme, iyi derecede çeşitli arazilerde hareket edebilme, orta derecede bakım-onarım, yüksek hıza çıkabilme, yüksek enerji ihtiyacı.

- iii. Ayaklı insansız kara aracında bulunan özellikler: Yüksek derecede kompleks yapı, zayıf derecede ivmelenme, mükemmel derecede çeşitli arazilerde hareket edebilme, zayıf derecede bakım-onarım, düşük hızla hareket, az enerji ihtiyacı.

İnsansız kara araçlarının hareket yeteneğine göre intikal edebilmelerinin karşılaştırılması Çizelge 2.1.'de gösterilmiştir. Çizelgeye göre insansız kara araçlarının özellikleri şunlardır [29]:

Çizelge 2.1. İnsansız kara araçlarının hareket kabiliyetine göre karşılaştırılması [29]

PARAMETRELER	TEKERLEKLİ	PALETLİ	AYAKLI
Kompleks Yapı	Düşük	Orta	Yüksek
İvmelenme	İyi	Zayıf	Zayıf
Çeşitli Arazi Hareketi	İyi	İyi	Mükemmel
Bakım-Onarım	İyi	Orta	Zayıf
Hız	Yüksek	Yüksek	Alçak
Enerji İhtiyacı	Yüksek	Yüksek	Alçak

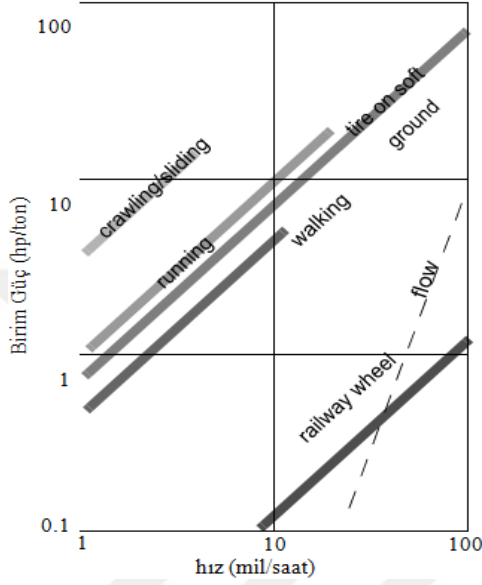
Tekerlekli ve paletli sistemlerin önemli parametrelere göre karşılaştırılması Çizelge 2.2.'de gösterilmektedir [31].

Çizelge 2.2. Tekerlek-palet karşılaştırması [31]

Özellikler	Stabilite	Manevra Kabiliyeti	Kontrol Edilebilirlik	Sağlamlık	Maliyet	Bakım	Araziye Uyum Sağlama
Tekerlekli	Yüksek	Orta	Orta	Düşük	Düşük	Kolay	Orta
Paletli	Yüksek	Yüksek	Zor	Yüksek	Yüksek	Zor	Yüksek

2.3.1.1. Tekerlekli Hareket

Tekerlek genel olarak insanlı araçlarda ve insansız araçlarda açık ara en popüler hareket mekanizması olmuştur. Şekil 2.3.'de gösterildiği gibi, çok iyi bir verimlilik elde eder ve bunu basit bir mekanik uygulama ile yapar [32].



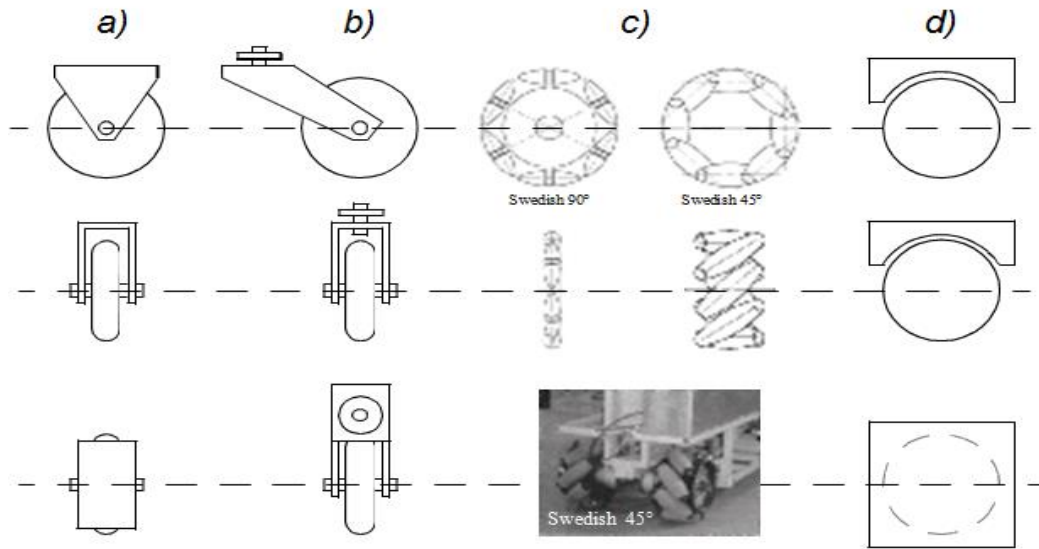
Şekil 2.3. Çeşitli hareket mekanizmalarının erişilebilir hızına karşı spesifik güç [32]

Denge genellikle tekerlekli insansız kara aracı tasarımlarında bir tasarım problemi değildir. Çünkü bütün tekerlekler zeminle temas halinde olduklarından tekerlekli insansız kara araçlarının tasarlanmasında sorun yaşanmamaktadır. Tekerlek sayısı dikkate alındığında, iki tekerlekli insansız kara araçları stabil olabilirken, üç tekerlekli insansız kara araçları da durağan dengeyi sağlayabilmektedirler. Tekerlekli insansız kara aracı tasarımlarında dengeden ziyade; çekiş ve stabilite, manevra kabiliyeti ve kontrol problemine odaklanılması gerekmektedir. İnsansız kara aracı tekerlekleri istenen arazinin tümünü kapsayacak biçimde yeterli çekiş ve stabilite sağlaması araç için en önemli unsurlardır.

Ayrıntılı olarak tekerlek ele alınırsa spesifik kuvvetli yönleri ve zayıf yönleri ile farklı tekerlek tipleri olduğundan bir insansız kara aracının hareket kabiliyeti için belirli formlar verdiği bütün tekerlek konfigürasyonları vardır.

İnsansız kara araçlarında kullanılan tekerlek cinsi kapalı ortam ve açık ortam olmak üzere birbirinden ayrılır. Kapalı ortam yani bina içinde, standart, kastor, küresel ve Swedish tekerlekleri olmak üzere temel 4 tekerlek cinsi kullanılır. Kapalı ortama ait tekerlek bilgisi ilerleyen kısımlarda detaylıca anlatılmıştır. Açık ortam da kullanılan tekerlekler insansız kara aracının büyüklüğüne göre diğer sivil ve zırhlı araçların kullanılabildiği tekerlek cinslerini kullanmaktadır.

Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi kapalı alanlarda kullanılan dört temel tekerlek sınıfı vardır. Kinematikleri oldukça farklıdır ve bu nedenle tekerlek tipi seçimi insansız kara aracının genel kinematiği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [33]. Standart tekerlek ve kastor tekerlek tek dönme eksenine sahiptir ve dolayısıyla çok yönlülüğü bulunmaktadır. Bu iki tekerlek arasındaki temel fark, yön belirleme hareketi sırasında standart tekerlek zemin ile etkileşim halinde bulunan dönme merkezinin kayması gibi yan etkilere maruz kalmaz, ancak kastor tekerlek dönme merkezinden etkilenir ve yön belirleme hareketi boyunca insansız kara aracının gövdesine etki eden kuvvetin sahip olduğu eksen boyunca döner. Standart tekerleğin, motorlu tekerlek aksı ve temas noktasının etrafında dönme olmak üzere iki serbestlik derecesi vardır. Kastor tekerleğin de yön belirleme ekleminin etrafında dönme ve temas noktasının etrafında dönme olmak üzere iki serbestlik derecesi vardır [34].



Şekil 2.4. a) Standart tekerlek b) Kastor tekerlek c) Swedish tekerlek mekanizması d) Küresel tekerlek [33]

Çok yönlü tekerlekler insansız kara araçlarında sıkça kullanılan bir mekanizmadır. Çok yönlü tekerlekleri sahip oldukları serbestlik derecelerine göre, birçok farklı gruplar oluşturmaktadırlar. Çok yönlü insansız kara araçlarının en önemli özelliklerinden birisi tekerlek doğrultuları değiştirilmeden farklı doğrultularda hareket edebilir olmasıdır. Tekerleğin çok yönlü bir mekanizma olması, üzerine yerleştirilen pasif hareket yapan silindirik küçük tekerlerdir [33].

Swedish tekerlek mekanizması ve küresel tekerleğin her ikisi de standart tekerlekten sonra yönlülüğü daha az sınırlandırılmış tasarımlardır. Swedish tekerlek mekanizması, silindirik rulolu tekerlekler insansız kara aracı tekerleği üzerine tekerleğin dönme eksenine göre farklı açılarda yerleştirilerek istenilen amaca yönelik tekerleğe çok yönlülük kazandıran özellikteki tekerleklere swedish mekanizmalı tekerlekler denilmektedir. Silindirik rulolu tekerleklerin, insansız kara aracı tekerleğinin dönme eksenine göre yerleştirildikleri açılara bağlı olarak isim verilmektedir. Küçük silindirik rulolu tekerlek İKA tekerleğinin dönme eksenine göre oluşturduğu açı 90^0 ise buna swedish 90^0 tekerlek mekanizması, oluşturduğu açı 45^0 ise buna swedish 45^0 tekerlek mekanizması olarak isimlendirilmektedir. Bu tasarımın en önemli avantajı, tekerleğin tekerlek kinematik olarak sadece ileriye ve geriye doğru değil birçok olası yörüngede çok az sürtünme ile hareket edebiliyor olmasıdır. Küresel tekerlek çok yönlü bir tekerlek olup, çoğu zaman herhangi bir yönde dönmesi için aktif olarak güçlendirilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Küresel tekerleğe benzeyen bir mekanizma bilgisayarda kullanılan farelerde görülür ve kürenin üst yüzeyine dayanan ve dönme kuvveti kazandıran aktif olarak çalışan güçlü silindirler tarafından sağlanır. Swedish tekerlek mekanizmasının; motorlu tekerlek aksı çevresinde, silindirlerin çevresinde ve temas noktasının etrafında dönme olmak üzere üç serbestlik derecesi vardır. Küresel tekerlek ise teknik olarak zorlanmayı gerçekleştirir [34, 35].


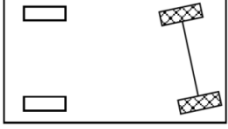
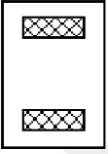
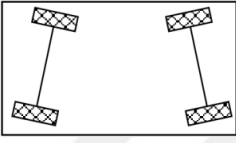
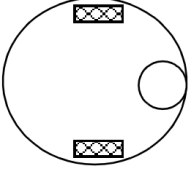
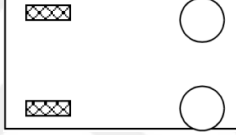
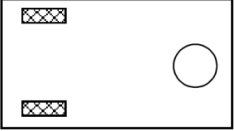
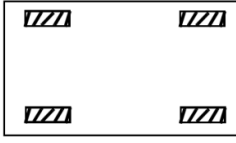
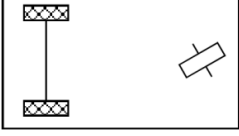
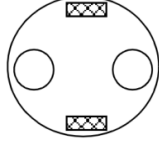
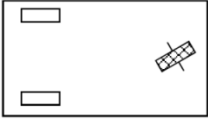
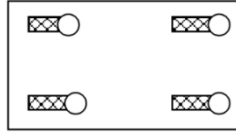
Hangi tekerleğin kullanıldığına bakılmaksızın, tüm araziler için tasarlanmış insansız kara araçlarında ve üçten fazla tekerlek bulunan insansız kara araçlarında zemine tekerlek temasını sağlamak için genellikle bir süspansiyon sistemi gereklidir. Süspansiyon için en basit yaklaşımlardan biri, tekerleğin kendisine esneklik naksetmesidir. Örneğin, kastor tekerlek kullanan dört tekerlekli kapalı alan insansız

kara aracında, üreticiler ilkel bir süspansiyon oluşturmak için deforme olabilen yumuşak kauçuğu tekerleğin üzerine uyguladılar. Bu sınırlı çözüm, insansız kara aracının düz olmayan araziler için daha gelişmiş bir süspansiyon sisteminin önüne geçemedi.

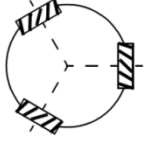
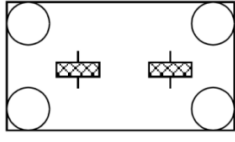
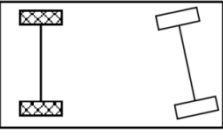
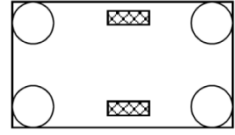







İnsansız kara araçları, standart bir karayolu şebekesi için tasarlanmış otomobillerin aksine, çok çeşitli şartlardaki uygulamalar için tasarlanmıştır. Otomobillerin hepsi benzer tekerlek konfigürasyonlarını paylaşır çünkü tasarım ortamında standart çevre için manevra kabiliyetini, kontrol edilebilirliği ve stabiliteyi en üst düzeye çıkaran asfalt ile kaplı bir karayolu bölgesi vardır. İnsansız kara araçlarının karşılaştığı çeşitli ortamlar için bu nitelikleri en üst düzeye çıkaran tek bir tekerlek konfigürasyonu yoktur. Dolayısıyla insansız kara araçlarının tekerlek konfigürasyonlarında büyük bir çeşitlilik görülmektedir. Nitekim, karayolu şebekesinde kullanılmak üzere tasarlanmış insansız kara araçları hariç, zayıf manevra kabiliyeti nedeniyle otomobilin Ackerman tekerlek konfigürasyonu çok az sayıda insansız kara aracında kullanır [36].

Çizelge 2.3.'de, tekerlek sayısına göre tekerlek konfigürasyonlarına genel bir bakış sunmaktadır. Belirli tekerlek tiplerinin seçimini ve insansız kara aracı şasideki geometrik konfigürasyonlarını göstermektedir. Gösterilen konfigürasyonların bazılarının insansız kara araçları uygulamalarında çok az kullanıldığına dikkat edilmelidir. Bununla birlikte, bu tablo, insansız kara araçları tasarımında mümkün olan çok çeşitli tekerlek konfigürasyonlarının bir göstergesidir [34].

Çizelge 2.3. Tekerlek konfigürasyonları [34]

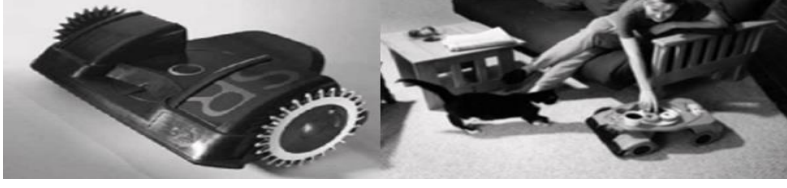
Düzen	Açıklama	Düzen	Açıklama
	Ön tarafta bir yön belirleyen tekerlek, arkada bir çekiş tekerleği.		Önde iki motorlu ve yön veren tekerlek, arka kısımda 2 serbest tekerlek; Yön belirleyen 2 tekerleğin kaymayı önlemek için farklı olmak zorundadır.
	İki tekerlekli diferansiyel tahrik; mil ile birbirine bağlıdır ve kütle merkezi aksın ortasındadır.		Dört yön veren ve motorlu tekerlek.
	Üçüncü bağlantı yeri olan iki tekerlekli merkezi diferansiyel tahrik		Arka / ön iki çekiş tekerleği (diferansiyel), ön / arka iki çok yönlü tekerlek.
	Arkada / önde, bağımsız olarak tahrik edilen tekerlek, önde / arkada bir adet çok yönlü tekerlek.		Dört tane çok yönlü tekerlek.
	Arka tarafta iki adet bağlı çekiş tekerleri (diferansiyel), önlerinde bir adet yön veren serbest tekerlek.		İki tekerlekli diferansiyel tahrik ile 2 ek bağlantı yeri vardır.
	Arkada iki serbest tekerlek, önünde 1 yön veren çekiş tekerleği.		Dört adet motorlu ve yön belirleyen kastor tekerlekler vardır.

Çizelge 2.3. Tekerlek konfigürasyonları [34] (Devam)

Düzen	Açıklama	Düzen	Açıklama
	Üçgen halinde düzenlenmiş üç motorlu İsveç veya küresel tekerlek ile çok yönlü hareket mümkündür.		İki motorlu ve yön veren tekerlek merkeze ve her köşeye de bir çok yönlü tekerlek hizalanmıştır.
	Arkada iki motorlu tekerlek, önde 2 yön veren tekerlek; Yön belirleyen 2 tekerleğin kaymayı önlemek için farklı olmak zorundadır.		İki çekiş tekerleği (diferansiyel), her köşede 1 çok yönlü tekerlek
	Güç verilmemiş çok yönlü tekerlek (küresel, nakliye, swedish)		
	Motorlu swedish tekeri		
	Güç verilmemiş standart teker		
	Motorlu standart teker		
	Motorlu ve yön belirleyen nakliye tekeri		
	Yön belirleyen standart teker		
	Bağlı tekerler		

Bir insansız kara aracı için tekerlek tipinin seçimi, tekerlek dizilişinin seçimi veya tekerlek geometrisi ile ilişkilendirilir. Tasarımcı, tekerlekli bir insansız kara aracının hareket mekanizmasını tasarlarken bu iki meseleyi aynı anda düşünmelidir. Bir insansız kara aracının; manevra kabiliyeti, kontrol edilebilirlik ve stabilite özellikleri bu seçimlerle yönetilir. Aynı zamanda stabilite, manevra kabiliyeti ve kontrol edilebilirlik eğilimleri her konfigürasyonun avantaj ve dezavantajlarının anlaşılmasına yardımcı olur [36].

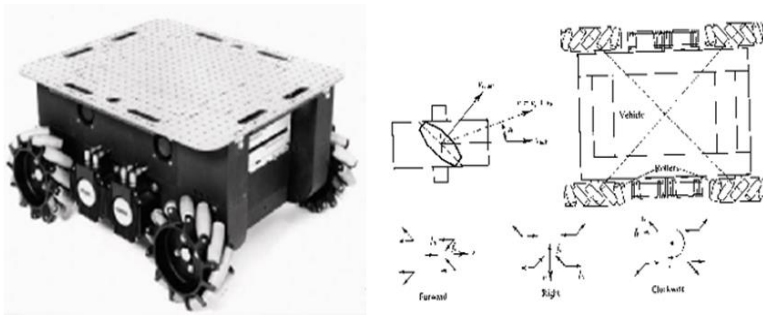
- i. **Stabilite:** Statik stabilite için gereken minimum tekerlek sayısı ikidir. Şekil 2.5.'de gösterildiği gibi, iki tekerlekli diferansiyel tahrikli bir insansız kara aracı, kütle merkezi tekerlek aksının altındaysa statik kararlılık elde edebilir.



Şekil 2.5. Evde vakum ile temizlik yapabilen ve servis edebilen bir İKA [36]

Sıradan koşullar altında böyle bir çözüm, mümkün olmayacak kadar büyük tekerlek çaplarına ihtiyaç duyar. Statik stabilite, ağırlık merkezinin tekerleklerin zemin temas noktaları tarafından oluşturulan üçgene dahil edilmesi gerektiği ek uyarı ile minimum üç tekerlek gerektirir. Stabilite, daha fazla tekerlek eklenerek daha da geliştirilebilir; ancak bir kez temas noktalarının sayısı üçten fazla olduğunda, geometrinin hiperstatik yapısı, engebeli arazide bir çeşit esnek süspansiyona ihtiyaç duyacaktır [36].

- ii. **Manevra Kabiliyeti:** Bazı insansız kara araçları çok yönlüdür; başka bir deyişle, insansız kara aracının dikey eksenini etrafında yönlendirilmesine bakılmaksızın, zemin düzlemi (x, y) boyunca herhangi bir yönde hareket edebildikleri anlamına gelir. Manevra kabiliyeti seviyesi tek yönden fazla hareket edebilen tekerlekler gerektirir ve bu yüzden çok yönlü insansız kara araçları da genellikle Swedish veya küresel tekerlekler kullanılır. İyi bir örnek, Şekil 2.6.'da gösterilen Uranüs isimli insansız kara aracıdır. Uranüs Carnegie Mellon Üniversitesi'nin yapmış olduğu dört motorla tahrik edilen Swedish 45° tekerleği olan çok yönlü bir insansız kara aracıdır. Uranüs bağımsız olarak, kısıtlamalar olmadan döndürmek ve çevirmek için dört tane Swedish tekerlek mekanizması kullanmaktadır.



Şekil 2.6. Uranüs isimli insansız kara aracı [36]

Genel olarak Swedish ve küresel tekerlekli insansız kara araçlarının yerden yüksekliği, çok yönlü tekerleklerin yapımının mekanik kısıtlamaları nedeniyle biraz sınırlıdır. Bu yerden yükseklik problemini çözerken çok yönlü navigasyon problemine ilginç bir çözüm olarak her taşıyıcı tekerleğe aktif şekilde yön verildiği ve aktif olarak çevrildiği konfigürasyondur. Bu konfigürasyonda, insansız kara aracı tam anlamıyla çok yönlüdür, çünkü taşıyıcı tekerlekler istenen hareket yönüne dik bir yönde dönse dahi, araç bu tekerleklerin yön belirlemesiyle halen istenen yönde hareket edebilir. Dikey eksen, zemin ile temas etmesiyle dengelendiğinden, bu yön belirleme hareketinin sonucu insansız kara aracının hareketidir.

Yüksek manevra yeteneği gerçekleştiren, ancak çok yönlü konfigürasyonlardan daha aşağı nitelikte olan diğer insansız kara aracı sınıfları çok popülerdir. Bu tür insansız kara araçlarında, belirli bir yöndeki hareket başlangıçta dönme hareketi gerektirebilir. Yuvarlak bir şasi ve merkezinde bir dönme eksenini bulunan bir İKA, zemindeki kapladığı alanı değiştirmeden dönüş yapabilmektedir. Bu tür bir insansız kara aracı, iki tekerleği aracın merkez noktası etrafında döndüğü iki tekerlekli diferansiyel tahrikli bir insansız kara aracıdır. Uygulama özelliklerine bağlı olarak stabilite için bir veya iki ek zemin temas noktaları kullanılabilir.

Yukarıdaki konfigürasyonların aksine, otomobillerde yaygın olarak kullanılan Ackerman yön belirleme konfigürasyonunu göz önünde bulundurulur ise böyle bir araç tipik olarak, arabadan daha büyük bir dönme çapına sahiptir. Dahası, böyle bir aracın yan tarafa doğru hareket etmesi için ileri ve geri yönde tekrarlanan değişikliklerden oluşan bir park manevrası gerekir. Buna ek olarak, Ackerman yönlendirmesinin sınırlı manevra kabiliyeti önemli bir avantaja sahiptir: yönlülük ve yön belirleme geometrisi, yüksek hızlı dönüşlerde çok iyi yanal stabilite sağlar [36].

- iii. Kontrol Edilebilirlik: Kontrol edilebilirlik ve manevra kabiliyeti arasında genellikle ters korelasyon vardır. Örneğin, dört taşıyıcı tekerlek konfigürasyonu gibi çok yönlü tasarımlar, bireysel tekerlek komutları istenen dönme ve öteleme hızlarını dönüştürmek için önemli işlem gerektirir. Ayrıca, bu tür çok yönlü

tasarımlarda, tekerlekte genellikle daha fazla serbestlik derecesi bulunur. Örneğin, Swedish tekerleği, tekerlek çevre boyunca bir dizi serbest silindir içerir. Çok yönlü bir insansız kara aracını belirli bir hareket yönü için kontrol etme, daha az manevra kabiliyetine sahip tasarımlarla karşılaştırıldığında daha zordur ve çoğu kez daha az doğrudur. Örneğin, bir Ackerman yön belirleme aracı sadece yönlendirilebilir tekerleri kilitleyip tahrik tekerlerini sürmek suretiyle düz gidebilir. Diferansiyel sürürlü bir araçta, iki tekerleğe bağlanan iki motor aynı hız profili boyunca sürülmelidir; tekerlekler, motorlar ve çevresel farklılıklar arasındaki varyasyonlar dikkate alınırsa çetrefilli olabilir. Dört Swedish tekerlek mekanizması olan Uranüs gibi çok yönlü tahrik daha da zordur çünkü araç dört tekerleğini tamamen doğru bir çizgide ilerlemesi için aynı hızda sürülmelidir.

Özetle, aynı anda stabilitesini, manevra kabiliyetini ve kontrol edilebilirliği en üst düzeye çıkaran "ideal" sürüş konfigürasyonu yoktur. Her insansız kara aracı uygulaması, insansız kara aracı tasarımı probleminde benzersiz kısıtlamalar getirir ve tasarımcının görevi, mümkün olan en uygun tahrik konfigürasyonunu seçmektir [36].

İnsansız kara aracı araştırmaları olgunlaştıkça daha karmaşık mekanik sistemler tasarlanabilir. Aynı zamanda, ters kinematik ve dinamiklerin kontrol problemleri ve karmaşık mekaniğin genel olarak kontrol edilebilmesi kolayca sağlanmış olacaktır. Bu nedenle, yakın gelecekte, birkaç temel hareket mekanizmasının avantajlarını bir araya getiren çok sayıda benzersiz, hibrit insansız kara araçlarının üretilmesi düşünülmektedir. Her biri teknolojik açıdan etkileyici olacak ve her biri kendi çevresel mevkilerine uygun uzman insansız kara aracı olarak tasarlanacaktır.

En çok kullanılan hareket sistemi olan tekerlek, insansız kara araçlarında 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli ve çok tekerlekli olmak üzere 4 çeşide bölünebilir.

- i. İki Tekerlekli İKA: Tekerlekleri birbirlerine paralel veya arkalı önlü dizilebilirler ve statik açıdan dengede olmasalar da dengede durabilmek için hareketlerine devam etmek zorundadırlar. Araç devrildiği tarafa doğru hareketlendikçe dengede kalmaya devam eder. Tekerleklerini tahrik eden motorlar arasındaki hız

farkıyla yönlerini kontrol ederler. Kontrolü basit olduğundan sıkça tercih edilirler [37]. İki tekerlekli İKA'ların dengede kalmasını sağlamak için tasarımda dikkat edilecek bazı hususlar vardır. İlki İKA'nın dengede kalmasına yardımcı olmak amacıyla ağırlık merkezinin tekerleklerin dingilinin altında olmasını sağlamaktır. Dolayısıyla batarya ve motor gibi ağır elemanlar aracın alt tarafına yerleştirilirler. Diğeri ise teker çaplarını mümkün olduğunca yüksek tutmaktır. Teker çapı ne kadar büyük olursa İKA'nın devrilmesi o kadar zorlaşacaktır [38].

ii. Üç Tekerlekli İKA: Üç tekerlekli İKA iki tipte olabilir. Birincisi iki tahrikli tekerlek ve dengede tutmak için bir serbest teker şeklinde bir sistemle bulunabilirler. Arkadaki iki teker aynı kaynaktan beslenmekte öndeki teker dönüş sağlayabilmek için bir dönüş mekanizması ile kontrol edilmektedir. İkincisi diferansiyel dönen araçlarda, aracın yönü iki ayrı kaynaktan beslenen motorların arasındaki hız farkı ile ayarlanabilir. Eğer iki teker de aynı hızda hareket ederse İKA düz hareket etmektedir. İki teker de aynı hızda hareket etmezse dönüş hızına ve yönüne bağlı olarak dönüş merkezi iki tekeri birbirine birleştiren doğru üzerinde herhangi bir noktada olabilir. Aracın ağırlık merkezi üç tekerleğin oluşturduğu üçgenin içerisinde olmalıdır. Eğer İKA'nın kenarlarına çok büyük ağırlıkta bir kütle eklenirse İKA devrilebilir [38].

iii. Dört Tekerlekli İKA: Tekerlekli İKA'lar içerisinde denge problemini en kolay aşabilenidir. Statik denge için üç tekerlek yeterli olsa bile, üç tekerlekli İKA'lar hareket halinde dengelerini kaybedebilirler fakat dört tekerlekli İKA'larda bu duruma çok nadir rastlanır. Dört tekerlekli İKA'larda yön belirleme temelde iki farklı şekilde kontrol edilir. Birincisi, iki tekerlekli İKA'larda olduğu gibi yan tekerlekler arasındaki hız farkıdır. Aynı kenarda bulunan tekerlere aynı hızlar verilir ise iki kenarın hareket hızları arasındaki fark İKA'nın yönünde bir değişime sebep olmaktadır. Bu tip bir kontrol yöntemi dört tekerlekli İKA'ların paletli İKA'lar gibi hareket edebilmesini sağlar. Fakat palet yerine tekerlek kullanıldığından tekerlerde bir kayma ve konumunda bir sapma oluşur. Bu sapmayı engellemek için dört tekerlekli İKA'lar simetrik olarak tasarlanır. Ön ve arka tekerlekler arasındaki mesafe mümkün olduğunca düşük tutulmaya çalışılır. İkincisi, bir diferansiyelle ön veya arka tekerleklerin yönlerinin değiştirilmesidir.

Bu uygulamada genel olarak sabit kalan tekerlekler motorlar ile tahrik edilseler de her tekerleğin motorlara bağlandığı uygulamalar da vardır [37].

- iv. Çok Tekerlekli İKA: Çok tekerlekli İKA'lar, tahrikli tekerlek sayıları arttıkça tasarımları karmaşıklaşan İKA'lardır. Özellikle İKA'nın düz ilerleyebilmesi için bütün tahrikli tekerleklerin aynı hızda dönmesi gerektiğinden, bu kontrolü sağlamak oldukça zordur. Farklı taraftaki tekerleklerin farklı hızlarda dönmesi İKA'nın düz gitmek yerine yavaş giden tekerin tarafına dönmesine neden olmaktadır. Aynı taraftaki motorlar arasında hız farkı oluşması da en yavaş tekerleğin kaymasına sebep olmaktadır. Genellikle dünya dışı kullanılan İKA'lar altı tekerlekli dir. Diğer gezegenlerde yüzey araştırmaları ve keşfi için kullanılırlar. Bütün tekerlerin zemin ile temas halinde olmasını sağlayan bir süspansiyon sistemine sahiptirler. Bu sayede kumlu ve eğimli yüzeylerde daha rahat hareket ederler [38].

2.4.1.2. Paletli Hareket

Yukarıda ele alınan tekerlek konfigürasyonlarında, tekerleklerin yüzeye karşı kızıklamasına izin verilmediği varsayımı yapıldı. Kayma/kızak adı verilen alternatif bir yön belirleme yöntemi, insansız kara aracını aynı yönde farklı hızlarda veya karşıt yönlerde dönen tekerleklerle döndürmek için kullanılmaktadır. Tank bu şekilde çalışır. Tırtıklı tekerlek kullanılan insansız kara araçları çok daha büyük zemin temas yüzeyine sahiptir ve bu, geleneksel tekerlekli tasarımlara kıyasla gevşek arazideki manevra kabiliyetlerini önemli ölçüde artırabilir. Ancak bu büyük zemin temas yüzeyine bağlı olarak, aracın yönünü değiştirmek genellikle patinaj yaparak dönüş gerektirir, bu da paletin büyük bir bölümünün araziye doğru kaymasına neden olur. Bu tür konfigürasyonların dezavantajı, kayma / kızak yön belirlemesine bağlıdır. Bir dönüş esnasında büyük miktarda kaymanın olması nedeniyle, insansız kara aracının tam dönme merkezini tahmin etmek zordur. Pozisyon ve yönelimdeki tam değişim, zemin sürtünmesine bağlı olarak değişime tabidir. Bu, engebeli ve gevşek arazi üzerinde son derece iyi manevra kabiliyeti ve çekiş gücü karşılığında yapılan ödünleşimdir. Ayrıca, yüksek sürtünmeli bir yüzey üzerinde kayma / kızak

yaklaşımı, kullanılmış olan motorların tork kabiliyetini hızla üstesinden gelebilir. Güç verimliliği açısından, bu yaklaşım gevşek arazide oldukça verimli ancak aksi takdirde son derece verimsizdir [36].

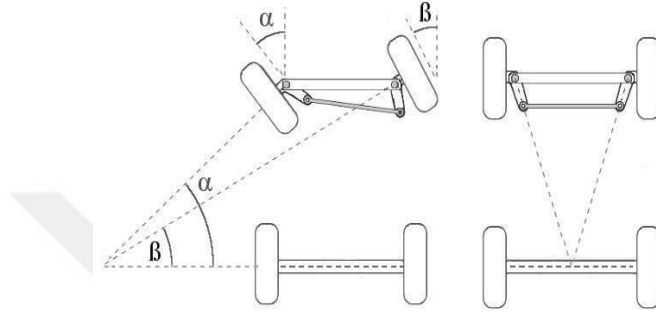
Paletler yerle temas alanını genişlettiği için aracın ağırlığı daha geniş bir yüzeye dağılır böylece karlı ve çamurlu zeminlerde tekerlekli alternatifleri gibi saplanmasını engeller. Dolayısıyla ağırlık toleransları tekerlekli alternatiflerine göre daha yüksektir. Paletli İKA'ların avantajlarının yanında dezavantajları da vardır. Palet mekanizması tekerleklere göre maliyeti daha yüksek bir elemandır. Bu sebeple maliyetleri tekerlekli alternatiflerine göre daha yüksektir. Ayrıca palet mekanizması oldukça karmaşık bir mekanizma olmakla birlikte düzenli olarak bakımının yapılması gereklidir. Tekerlek gibi basit bir mekanizma olmadığından paletlerde tekerleklere göre daha sık bozulmalar gerçekleşir. Paletli İKA'lar yön kontrollerini dört tekerlekli İKA'lara benzer şekilde paletlerin arasındaki hız farkı ile sağlarlar. Fakat kayma ve pozisyon sapması gibi durumlar dört tekerlekli İKA'lara oranla daha az görülür çünkü paletlerin yüzey alanları çok daha geniştir [37].

2.3.2. Yönlendirme Sistemleri

- i. Ackerman Yönlendirme Sistemi: Ackerman yönlendirme sistemi, her ne kadar modern araçların hepsi Ackerman modelini kullanmamış olsalar da temelde bu modeli baz alarak kendi modellerini oluşturmuşlardır. Ackerman modelinde tahrik ön taraftaki iki tekerlekten olabileceği gibi arka iki tekerlekten de olabilmektedir. Günümüzde, otomobillerde kullanılan Ackerman yönlendirme sistemi, aracın dönüşü esnasında iç kısımda bulunan tekerleğin dıştaki tekerleğe göre daha keskin bir dönüş yapmasıdır ya da bir başka deyişle aynı dingile ait iki tekerleğin ayrı iki açı ile aşağı yukarı hareket ettirilmesine denir. Taşıtlarda dönme hareketi bir dönme merkezi etrafında yapılır. Dönme sırasında tekerlek aks uzantılarının dönme merkezinden geçmesi iyi bir dönüş için gereklidir. Bununla ilgili olarak tekerleklerin dönme sırasında saptırılması gereklidir. Bu ihtiyacı da Ackerman prensibi sağlar. Böylesi bir sistemde aks uzantılarının dönme merkezinden geçmesi için ön tekerlekler mafsallı bir aks başlığına

bağlanmıştır. Ön aks başları birer başlık pimi üzerinden veya küresel mafsallar ile şasiye bağlanmıştır. Bu şekilde tekerleklerin kendi eksenleri etrafında beraberce dönmeleri sağlanmıştır [39].

Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi α ve β açıları farklıdır. Bu açılara Ackerman açısı denir. Görüldüğü gibi α açısı, β açısından büyüktür.

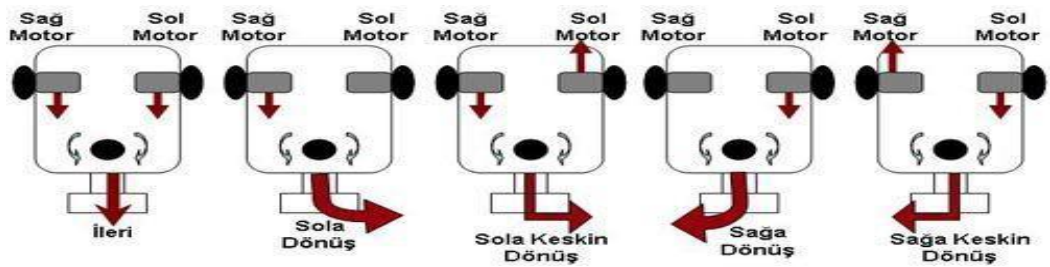


Şekil 2.7. Ackerman yönlendirme sistemi tekerlek açıları [39]

Araçlarda manevra yeteneği yada dönebilme kabiliyeti, tekerleklerin dönebildiği minimum yarı çaptır. Bu çap küçültülmek istenir ise arka tekerleklere de dönme kabiliyeti verilmesi gerekir. Araçta dönüş esnasında iç kısımda bulunan tekerlek ile dış kısımda bulunan tekerleğin dönme yarıçapları farklıdır. Ancak dönme merkezleri aynıdır böylece dönüşün yapılmasını sağlar. Eğer Ackerman prensibi kullanılmazaydı güvenli bir dönüş sağlanamazdı ve aynı zamanda lastik aşınımları gözle görünür bir oranda artardı [39].

- ii. Diferansiyel Yönlendirme Sistemi: Düz yolda ilerleyen bir aracın sol ve sağ tekerlekleri hemen hemen aynı hızda dönerken, dönüşlere dış ve iç tekerleklerin kat ettikleri yol farklıdır. Tahrik edilmeyen tekerlekler için sorun oluşturmayan bu durum, tahrik edilen tekerlekler için sorun olmaktadır. Tekerleklerin farklı hızlarda dönmeleri ve motordan gelen torku paylaşmaları gerekmektedir. İşte diferansiyel dış ve iç tekerlekler arasındaki bu farklı dönüşü gerçekleştiren ve torku paylaştıran organdır [40].

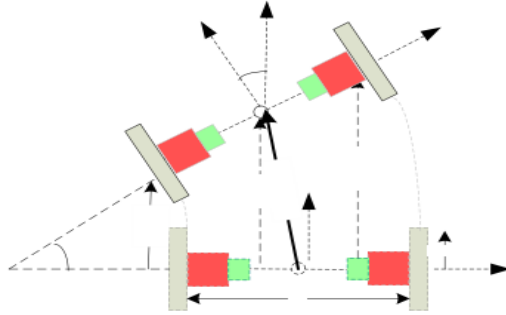
Diferansiyel sürüş tekniği, otomotiv mühendisliğinde "differential drive system" olarak kullanılmaktadır. Robotik de, diferansiyel sürüş tekniği için "differential steering system" kullanılmaktadır [41]. Bina içi gezgin insansız kara aracı uygulamalarında en çok kullanılan sürüş tekniklerinin başında gelir. Tekerlekli sandalyelerde uygulanan mantık ile aynıdır. İki adet birbirlerinden bağımsız tekerlek aynı aks üzerine oturtulmuştur. Diferansiyel sürüş tekniğinde insansız kara aracının iki tarafında birbirinden bağımsız olarak hareket ettirilen iki motor bulunmaktadır. Bu motorların bağlı olduğu tekerlekler dışında, stabiliteyi sağlamak amacı ile ön ya da arka kısımlara motorsuz tekerlek yerleştirilebilir [42]. Birbirinden bağımsız olan iki ayrı motora bağlı yan tekerlekler ile insansız kara aracının hızı ve yönü belirlenir. Tekerlekler ayrı hızlarda dönebildikleri için; iki tekerleğin aynı hızda aynı yöne dönmesiyle düz ilerleme hareketi gerçekleştirilir. Bu hız sağ ve sol motor hızlarının toplamının yarısı kadardır. Sağ ve sol motor hızlarının farklı değerlerde olması durumunda ise, insansız kara aracının hızı aracın orta noktasına göre yine sağ ve sol motorların toplamının yarısına eşit olduğu halde, insansız kara aracının yönünde değişiklik meydana gelecektir. Bu yön değişimi Şekil 2.8.'de görüldüğü üzere, daha az dönen motor yönündedir ve iki motor arasındaki hız farkıyla orantılıdır. Bu teknik dar alanlarda manevra yeteneğini artırmaktadır [31].



Şekil 2.8. Diferansiyel sürüş yönteminde motorların hareket verme prensibi [31]

Diferansiyel tekerlek yapısı, Ackerman ve birçok tekerlek yapılarına göre kontrolü karmaşık ve zor olsa da birçok uygulama da hareket yapısının esnek olması, dönme, geri geri gelme, engellere karşı hızlı bir şekilde yön değiştirebilme gibi istenilen hareketleri rahatlıkla yapabilme kabiliyetlerinden

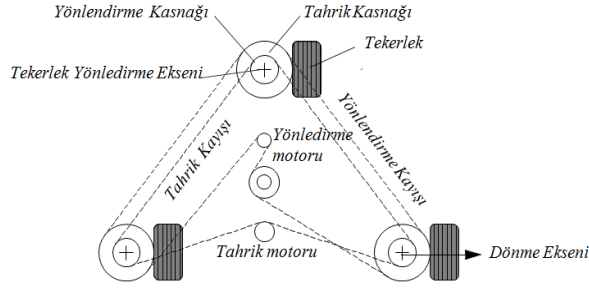
dolayı tercih edilmektedir. Diferansiyel tekerlek yapısı gerek üç tekerlekli, gerek dört tekerlekli gerekse de altı tekerlekli yapıda olabilmektedir [43]



Şekil 2.9. Diferansiyel aracın hareketi [43]

- iii. Senkron Yönlendirme Sistemi: Bu yönlendirme sisteminde, insansız kara aracının üç ya da daha fazla tekerleğinin bulunması gerekir. Tekerlekler aynı hızda ve aynı yönde dönebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bütün tekerlekler aynı hız ve yönde döndüğü için kayma hataları azalmış olur. Bu nedenle kapalı alan tercih edilen bir sürüş tekniğidir [31].

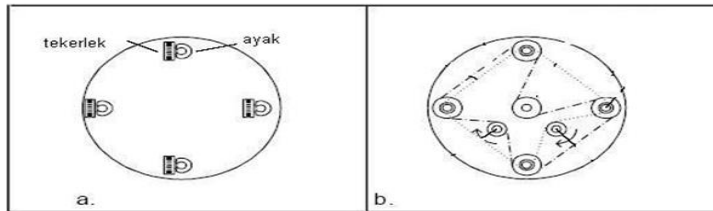
Senkron sürüş konfigürasyonu, bina içi insansız kara aracı uygulamalarında tekerleklerin düzenlenmesinde popülerdir. İlginç bir konfigürasyondur, çünkü tahrikli ve yön veren üç tekerlek olmasına rağmen toplamda sadece iki motor kullanılmaktadır. Bir öteleme motoru, üç tekerleğin hızını birlikte ayarlar ve bir tekerlek yön belirleme motoru, bütün tekerlekleri kendi dikey yön belirleme eksenlerinin her biri için hiç durmadan döndürür. Ancak tekerleklerin İKA şasisine göre yönlendirildiğini ve bu nedenle İKA şasisini yeniden yön vermenin doğrudan bir yolu olmadığına dikkat edilmelidir. Senkron tahrikte insansız kara aracı herhangi bir yönde hareket edebilir, ancak şasinin yönlendirilmesi kontrol edilemez [36].



Şekil 2.10. Senkron yönlendirme sistemi (Eş zamanlı tahrik) [36]

Senkron tahrik özellikle çok yönlülüğün istendiği durumlarda avantajlıdır. Her dikey yön belirleme eksenini her tekerleğin temas yolu ile aynı hizada olduğu zaman, insansız kara aracı daima tekerleklerini yeniden yönlendirebilir ve kapladığı alanı değiştirmeden yeni bir yörünge boyunca hareket edebilir [36].

Senkron tahrik sistemleri genel olarak gerçek çok yönlü konfigürasyonlardan daha üstün ancak diferansiyel tahrik ve Ackerman yönlendirici sistemlerine göre daha düşüktür. Bunun iki temel nedeni vardır. Birincisi ve en önemlisi, öteleme motoru genellikle üç tekerleği tek bir kayış kullanarak yönlendirir. Tahrik zincirindeki eğiklik ve gerilme nedeniyle, tahrik motoru devreye girdiğinde en yakın tekerlek, en uzaktaki tekerlekten önce dönmeye başlar ve şasinin yönünde küçük bir değişiklik meydana getirir. Motor hızında ek değişiklikler yapıldığında, bu küçük açısal kaymalar yani yer değiştirmeler yönlendirmede büyük bir hata oluşturur. İkincisi, insansız kara aracının şasinin yönlendirilmesi üzerinde doğrudan bir kontrolü yoktur [36].

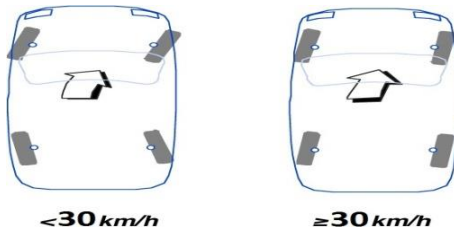


Şekil 2.11. Senkron yönlendirme sistemi a. Alttan görünüş b. Üstten görünüş [31]

Senkron yönlendirme sistemi incelendiğinde Şekil 2.11.'de gösterildiği gibi hareket kontrol sistemi üstte yerleştirilmiştir. Merkezde bir adet kayış gergi,

motorun bulunduğu merkez makara ve tekerlek sayısı kadarda hareket iletim makarası mevcuttur. Makaralar iki adet destek makarasıyla desteklenebilir veya bu destek makaralarına motorlar entegre edilebilir [42]. Senkron yönlendirme sistemi kapalı alanlarda maksimum hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Fakat mekanik olarak tasarımları zordur, tekerlek mekanizmalarının ve kayış mekanizmalarının yük taşıma için çok uygun değildirler ve otonom çalışma için zor programlanabilirler [31].

- iv. Dört Tekerlekli Yönlendirme Sistemi(4WS): Dört tekerlekli yönlendirme sistemi stabilitesi, yüksek manevra yeteneği ve yüksek hız kontrolü ile düşük hızlarda dar alanlarda dönebilme ve park edebilme kolaylığı sağlamaktadır. Bazı araçlarda kullanılan tasarımlarda hidrolik ve elektronik sistemlerin yardımıyla aracın arka tekerleri ön tekerlerin ters yönde çevrilmesidir. Dönüş anındaki alan böylelikle önemli ölçüde azaltılmış olur. Yüksek hızlarda ise, aracın arka tekerlekleri ile ön tekerlekleri aynı yönde dönerler. Tekerleklerin aynı yönde dönmesi ile şerit değiştirme gibi hareketlerin çok çabuk ve daha az kayma olabilecek şekilde yapılması 4WS sistemi ile sağlanmaktadır. Arka tekerleklerin açısında oluşabilecek çok küçük bir değişiklik dahi aracın viraj alma özellikleri üzerinde büyük etki meydana getirir. İş makinelerinde daha çok kullanılan bu sistem, otomobillerde de yerini almıştır. Sisteminin temel görevlerinden bir diğeri araçların arkasının viraj dışına taşmasını engellemesidir [44, 45]. Dönüş yarı çapının azalmasını ve direksiyon döndürülme çapının % 15 oranında küçülebilmesine olanak sağlar. 30 km/h hıza kadar ön tekerleklerin aksi yönüne ve 30 km/h üzerindeki hızlarda aynı tarafa yönelen arka tekerleklerin dönme açısının % 8'i kadar dönerek görev yapar ve her iki durumda da hız arttıkça azalmaktadır (Şekil 2.12.) [46].



Şekil 2.12. 4WS yönlendirme sisteminin hıza göre dönüş şekli [46]

2.4. İnsansız Kara Araçlarının Kinematığı

Kinematik, mekanik sistemlerin nasıl hareket ettiğinin en temel çalışmasıdır. İnsansız kara araçlarında, görevlere uygun insansız karacı tasarlanmasında ve insansız kara aracı donanımında kontrol yazılımının nasıl oluşturulacağını anlamak için insansız kara aracının mekanik davranışının anlaşılması gerekir [36].

İnsansız kara araçları bu tür analizi gerektiren ilk karmaşık mekanik sistemler değildir. Robot manipülatörleri otuz yılı aşkın bir süredir yoğun bir çalışma konusu olmuştur. Bazı açılardan robot manipülatörleri, ilk insansız kara araçlarına göre çok daha karmaşıktır. Standart bir kaynak robotu beş veya daha fazla eklemlili kompleks bir yapıdayken, ilk insansız kara araçları basit diferansiyel tahrikli makinelerdi. Son yıllarda, robotik bilimi topluluğu robot manipülatörlerinin kinematığı ve dinamikleri ile ilgili oldukça kapsamlı bir anlayışa ulaşmışlardır [47].

İnsansız kara araçları, robot manipülatörle kinematik soruların çoğu aynıdır. Manipülatör robotun çalışma alanı çok önemlidir çünkü çevreye olan fikstürüne göre kendi bitiş efektörü tarafından elde edilebilecek olası pozisyonların aralığını tanımlar. Bir insansız kara aracının çalışma alanı da eşit derecede önemlidir çünkü araç çevreden elde edebileceği olası pozisyon aralığını tanımlar. Robot kolunun kontrol edilebilirliği, motorların aktif olarak devreye girmesiyle çalışma alanındaki pozisyondan pozisyona hareketi için kullanılabilirdiği biçimi tanımlanır. Benzer şekilde, bir insansız kara aracının kontrol edilebilirliği de çalışma alanındaki olası yolları ve yörüngeleri tanımlar. Robot dinamikleri, kütle ve kuvvet gerekçelerinden dolayı çalışma alanına ve yörüngeye ilave kısıtlamalar koyar. İnsansız kara araçlarında da dinamiklerle kısıtlıdır; Örneğin, yüksek bir ağırlık merkezi, araba benzeri bir insansız kara aracının yuvarlanma tehlikesinden dolayı hızlı olarak pratik dönme yarıçapını kısıtlar [48].

Ancak bir insansız kara aracı ile bir manipülatör kolu arasındaki en büyük fark, pozisyon tahminindeki zorluktur. Manipülatörün bir ucu çevreye sabitlenmiştir. Kolun son efektörünün konumunu ölçmek, basitçe, robotun kinematığını anlama ve bütün ara eklemlerin konumunu ölçme meselesidir. Manipülatörün konumu bu

nedenle güncel sensör verisine bakarak daima hesaplanabilir. Fakat bir insansız kara aracı, tamamen çevreye göre hareket edebilen kendi kendine yeten bir robottur. Bir insansız kara aracının konumunu anında ölçmenin doğrudan bir yolu yoktur. Bunun yerine, araç hareketi zamanla bütünleştirmelidir. Buna kayma nedeniyle hareket tahmini hataları eklenir ve bir insansız kara aracının konumunun tam olarak ölçülmesi son derece zor olduğu ortaya çıkar.

Bir insansız kara aracının hareketlerini anlama süreci, her bir tekerleğin hareket için sağladığı katkıyı tanımlama süreci ile başlar. Her tekerleğin aracın hareket etmesini sağlamada rolü vardır. Aynı sebeple, her tekerlek aynı zamanda aracın hareketine kısıtlamalar getirir; Örneğin, yana doğru kaymaya karşı koyma.

İlerleyen bölümde İKA'nın kısmi referans şasisinin yanı sıra genel referans şasisinde İKA hareketinin ifadesini veren bir gösterim sunulmaktadır. Daha sonra, bu gösterim kullanılarak, İKA'nın bir bütün olarak geometrisinin ve bireysel tekerlek hareketinin bir işlevi olarak nasıl hareket ettiğini anlatan basit ileri kinematik hareket modelleri oluşturularak gösterilecektir. Böylece insansız kara aracı manevra kabiliyetini tanımlayan yolları ve yörüngeleri değerlendirilebilecektir.

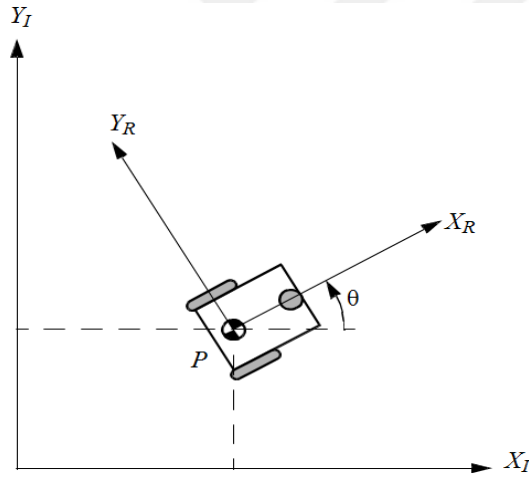
2.4.1. Kinematik Modeller ve Kısıtlamalar

İnsansız kara aracının hareketi için bir model oluşturmak aşağıdan yukarıya doğru bir işlemdir. Her bir tekerlek, aracın hareketine katkıda bulunur ve aynı zamanda aracın hareketine kısıtlamalar getirir. Tekerlekler İKA şasi geometrisine yerleşik olarak birbirine bağlıdır ve bu nedenle kısıtları, İKA şasinin genel hareketi üzerinde kısıtlamalar oluşturmak üzere birleşmektedir. Ancak her tekerleğin kuvvetleri ve kısıtlamaları açık ve tutarlı bir referans şasisine göre ifade edilmelidir. Bu kendi kendine yeten ve hareketli yapısı nedeniyle insansız kara aracı teknolojisinde özellikle önemlidir. Genel ve kısmi referans şasiler arasında net bir haritalama gereklidir. Önce bu referans şasilerini biçimsel olarak tanımlayarak, ardından bireysel tekerleklerin ve bütün insansız kara araçlarının kinematığı üzerine notalar

vermek için ortaya çıkan formalizm kullanılarak başlanır. Bu süreç boyunca formül ve terminolojiye yoğun bir şekilde yer verilir [49].

2.4.1.1. İnsansız Kara Aracı Pozisyonunu Gösterme

Bu analiz boyunca insansız kara aracı yatay bir düzlem üzerinde çalışan tekerlekler üzerinde rijit bir gövde olarak modellenir. Bu İKA şasinin düzlemdeki toplam boyut sayısı üç tanedir, düzlemdeki pozisyon için iki tane, düzlemle dik açılı olan dikey eksenle yönlendirme için bir tanedir. Elbette, tekerlek aksları, yön belirleyen tekerlek eklemleri ve taşıyıcı tekerlek eklemlerinden dolayı fazladan serbestlik ve esneklik vardır. Bununla birlikte, İKA şasisi ile yalnızca insansız kara aracının rijit gövdesinden bahsedilebilir, insansız kara aracının ve tekerleklerin içindeki eklemlerin serbestlik dereceleri dikkate alınmaz.



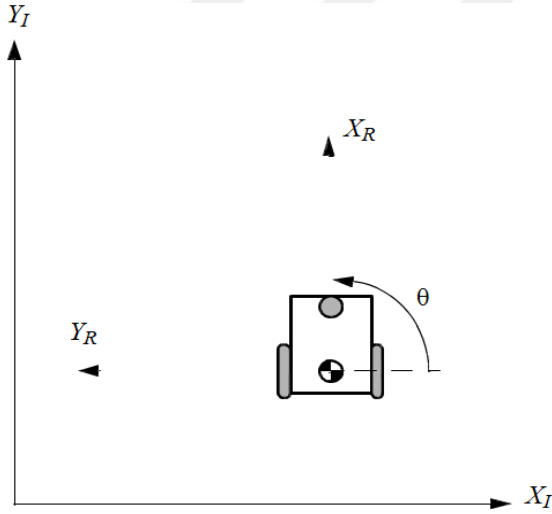
Şekil 2.13. Genel referans şasi ve İKA kısmi referans şasi [36]

İnsansız kara aracının düzlemdeki konumunu belirlemek için, Şekil 2.13. deki gibi, düzlemin genel referans şasisi ile İKA'nın kısmi referans şasisi arasında bir ilişki kurulur. X_I ve Y_I eksenleri, bazı orijin $O: \{X_I, Y_I\}$ 'dan genel referans şasisi olarak düzlem üzerinde keyfi bir atalet temelini tanımlar. İnsansız kara aracının konumunu belirtmek için, İKA şasideki bir P noktası, referans noktası olarak seçilir. Temel $\{X_R, Y_R\}$, insansız kara aracı gövdesi üzerindeki P 'ye göre iki eksen tanımlanır ve bu

tanımlanan insansız kara aracının kısmi referans şasisidir. P 'nin genel referans şasisindeki konumu x ve y koordinatları ile belirtilir. Genel ve kısmi referans şasi arasındaki açısal fark θ ile verilir. Bu üç faktör ile insansız kara aracının konumu bir vektör olarak tanımlanabilir. Bu konumun temelini kısmi referans şasisi olarak açıklığa kavuşturmak için alt simge I 'in kullanımına dikkat edilmelidir:

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

İnsansız kara aracı hareketini bileşen hareketleri cinsinden tanımlamak için, hareketin genel referans şasinin eksenleri boyunca haritalandırılması İKA'nın kısmi referans şasinin eksenleri boyunca harekete geçirilmesi gerekli olacaktır. Haritalama, insansız kara aracının mevcut konumunun bir işlevidir. Bu haritalama, dik açılı döndürme matrisi kullanılarak gerçekleştirilir:



Şekil 2.14. İnsansız kara aracının küresel bir eksene hizalanması [36]

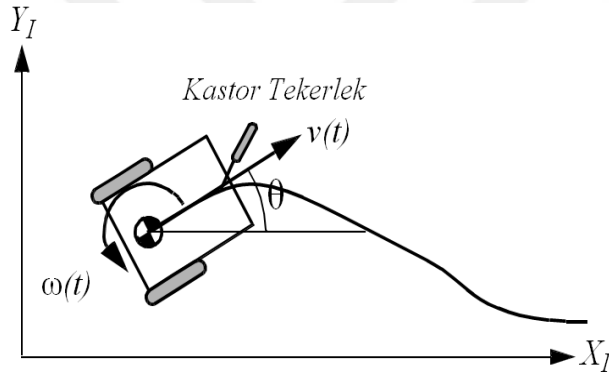
$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Bu matris, $\{X_I, Y_I\}$ genel referans şasının hareketi, kısmi referans şasının $\{X_R, Y_R\}$ bakımından hareketi haritalamak için kullanılabilir. Bu işlem $R(\theta)\dot{\xi}_I$ ile gösterilir çünkü bu işlemin hesaplanması θ değerine bağlıdır:

$$\dot{\xi}_R = R\left(\frac{\pi}{2}\right)\dot{\xi}_I \quad (2.3)$$

Örneğin, şekil 2.14.'da ki insansız kara aracı dikkate alındığında bu insansız kara aracı için, $\theta = \pi / 2$ olduğundan anlık dönme matrisi kolayca hesaplanabilir:

$$R\left(\frac{\pi}{2}\right) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$



Şekil 2.15. Genel referans şasideki diferansiyel tahrikli insansız kara aracı [36]

Genel referans şasideki bazı hız vektörü $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$ göz önüne alındığında, İKA'nın kısmi eksenleri X_R ve Y_R boyunca hareket bileşenleri hesaplanabilir: Bu durumda, İKA'nın belirli açısı nedeniyle, X_R boyunca hareket \dot{y} 'ye eşittir ve Y_R boyunca hareket $-\dot{x}$ 'dir:

$$\dot{\xi}_R = R\left(\frac{\pi}{2}\right)\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y} \\ -\dot{x} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.4.1.2. İleri Kinematik Modeller

En basit durumlarda, denklem (2.3) ile tanımlanan haritalama, insansız kara aracının ileri kinematiklerini yakalayan bir formül oluşturmak için yeterlidir. Geometrisi ve tekerleklerinin hızları göz önüne alındığında, aracın nasıl hareket edeceği şekil 2.15.'de verilen örnek dikkate alınarak anlaşılabilir.

Bu diferansiyel tahrikli insansız kara aracının her birinin yarıçapı r olan iki tekerleği vardır. İki tahrik tekerleği arasında ortalanmış olan bir P noktası göz önüne alındığında, her tekerleğin P 'ye olan uzaklığı l 'dir. r, l, θ ve her bir tekerleğin döndürme hızı $\dot{\phi}_1$ ve $\dot{\phi}_2$ ile verilen ileri kinematik model genel referans şaside insansız kara aracının toplam hızını tahmin eder:

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(l, r, \theta, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2) \quad (2.6)$$

Denklem (2.3)'ten, İKA'nın kısmi referans şasideki hareketinden genel referans şasideki aracın hareketinin hesaplanabileceği biliniyor: $\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} \dot{\xi}_R$. Bu nedenle, strateji ilk olarak kısmi referans şasideki $\dot{\xi}_R$ 'deki her iki tekerleğin katkısını hesaplamak olacaktır. Bu diferansiyel tahrikli şasi örneği için, bu problem bilhassa kolaydır. Şekil 2.13.'de gösterildiği gibi, İKA'nın kısmi referans şasisi, insansız kara aracının $+X_R$ boyunca ilerleyecek şekilde hizalandığı varsayılırsa, öncelikle, her tekerleğin döndürme hızının $+X_R$ yönünde P deki ötelenme hızına olan katkısı dikkate alınır. Bir tekerlek döndüğünde diğer tekerleğin hiçbir katkısı yoksa ve hareketsizse P iki tekerlek arasında ortada yer aldığı için anlık olarak yarı hızla hareket edecektir: $\dot{x}_{r1} = 1/2 r \dot{\phi}_1$ ve $\dot{x}_{r2} = 1/2 r \dot{\phi}_2$. Diferansiyel tahrikli insansız kara aracında bu iki katkı, $\dot{\xi}_R$ 'nin \dot{x}_R bileşenini hesaplama basitçe eklenebilir. Örneğin, her bir tekerleğin eşit hızla ancak zıt yönlerde döndüğü diferansiyel bir insansız kara aracı düşünülürse sonuç; hareketsiz, patinaja düşen insansız kara aracıdır. Beklendiği gibi, bu durumda \dot{x}_R sıfır olacaktır. \dot{y}_R 'in değerini hesaplamak daha kolaydır. Hiçbir tekerlek İKA'nın referans şaside yan tarafa doğru hareket etmesine katkıda bulunamaz ve bu nedenle \dot{y}_R daima sıfırdır. Son olarak, $\dot{\xi}_R$ 'in

dönme bileşeni $\dot{\theta}_R$ hesaplamalıdır. Tekrar, her tekerleğin katkıları bağımsız olarak hesaplanabilir ve eklenebilir. Sağ tekerlek düşünülürse (Bu tekerlek-1 olarak adlandırılacaktır), bu tekerleğin ileri dönüşü, P noktasında saat yönünün tersine döndürme ile sonuçlanır. Eğer tekerlek-1 tek başına dönerse, tekerlek-2 mil etrafında döner. Tekerlek yarıçapı $2l$ olan bir dairenin yayı boyunca anlık hareket ettiği için P deki dönüş hızı ω_1 hesaplanabilir:

$$\omega_1 = \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} \quad (2.7)$$

Aynı hesaplama, sol tekerlek için de geçerlidir ancak ileriye dönüşün P noktasında saat yönünde dönme ile sonuçlanması istisnai bir durumdur:

$$\omega_2 = \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l} \quad (2.8)$$

Tek tek bu formüllerin birleştirilmesi, diferansiyel tahrikli örnek bir insansız kara aracı için kinematik model oluşturur:

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{r\dot{\phi}_1}{2} + \frac{r\dot{\phi}_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} + \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Bu kinematik modeli bir örnekte kullanılacak olursa, öncelikle $R(\theta)^{-1}$ hesaplanmalıdır. Genel olarak, bir matrisin tersini hesaplamak zor olabilir. Fakat bu durumda kolaydır, çünkü basitçe $\dot{\xi}_R$ 'den $\dot{\xi}_I$ 'ye doğru değil, tersine bir dönüşümdür:

$$R(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

İnsansız kara aracının $\theta = \pi / 2$, $r = 1$ ve $l = 1$ olacak şekilde konumlandırıldığı varsayılırsa, eğer araç tekerleklerine düzensizce, hızları $\dot{\phi}_1 = 4$ ve $\dot{\phi}_2 = 2$ ise, hızı genel referans şaside hesaplanabilir:

$$\xi_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Dolayısıyla bu insansız kara aracı hız 1 ile dönerken hız 3 ile genel referans şasinin y eksenini boyunca anında hareket edecektir. Kinematik modellemeye olan bu yaklaşım, bir insansız kara aracının bileşen tekerlek hızları göz önüne alındığında, basit bir şekilde hareketinin rolü hakkında bilgi sağlayabilir. Bununla birlikte, her bir insansız kara aracı gövdesi tasarımı için olası hareketlerin alanını belirlemek istenir. Bunu yapmak için, her bir tekerleğin uyguladığı insansız kara aracı hareketi üzerindeki kısıtlamaları biçimsel olarak açıklamaktan daha da ileri gitme gerekir. Kısım 2.4.1.3.'de, çeşitli tekerlek tipleri için kısıtlamalar tanımlanarak bu işlemi başlatır; bu bölümün geri kalanında, bu kısıtlamalar göz önüne alınarak bir insansız kara aracının özelliklerini ve çalışma alanını analiz etmek için araçlar bulunmaktadır.

2.4.1.3. Tekerlek Kinematik Kısıtlamaları

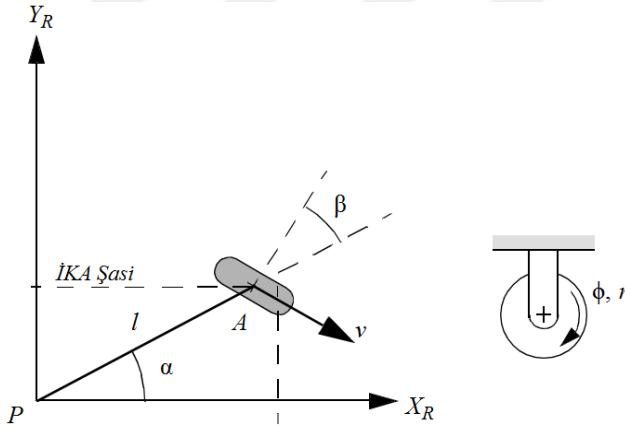
İnsansız kara aracının kinematik bir modeline ilk adım, bireysel tekerleklerin hareketleri üzerindeki kısıtlamaları ifade etmektir. Bireysel tekerleklerin hareketleri insansız kara aracının bir bütün olarak hareketini hesaplamak için daha sonrasında birleştirilebilir. Değişken kinematik özelliklere sahip dört temel tekerlek türü vardır. Bu nedenle, her tekerlek türüne özgü kısıtlama dizileri gösterilecek ve birkaç önemli varsayımlar ile bu konu basitleştirecektir. Tekerleğin düzleminin daima dikey kaldığını ve her durumda tekerlek ve zemin düzlemi arasında tek bir temas noktası olduğu varsayılır. Ayrıca, bu tek temas noktasında kaymanın olmadığı varsayılır. Yani, tekerlek, yalnızca saf yuvarlanma ve temas noktası boyunca dikey eksen etrafında dönme koşulları altında harekete geçer.

Bu varsayımlar altında, her tekerlek tipi için iki kısıt oluşturulur. İlk kısıtlama, yuvarlanan temas kavramını uygular, hareket uygun yönde gerçekleştiğinde tekerlek dönmelidir. İkinci kısıtlama, yanal (yana doğru) kayma olmayan kavramı uygular, tekerleği, tekerlek düzlemine dik açılı olarak kaydırmamalıdır.

i. Sabit Standart Tekerlek

Sabit standart tekerlek yön belirlemek için dikey dönüş eksenine sahip değildir. Şasiye olan açısı bu nedenle sabitlenmiştir ve tekerlek düzlemi boyunca ileri geri hareket ve zemin düzlemiyle temas noktası etrafında dönme ile sınırlıdır. Şekil 2.16.'de, sabit bir standart tekerlek A 'yı gösterilmektedir ve İKA'nın kısmi referans şasiye $\{X_R, Y_R\}$ göre pozisyon duruşunu gösterir. A 'nın konumu kutupsal koordinatlarda l ve α açısına göre ifade edilir. Tekerlek düzleminin şasiye göre açısı β ile gösterilir, sabit standart tekerlek yönlendirilebilir olmadığından sabittir. Yarıçapı r olan tekerlek, zamanla dönebilir ve böylece yatay aksı etrafındaki dönme konumu, t zamanının bir fonksiyonudur: $\phi(t)$. Bu tekerleğin yuvarlanma kısıtı tekerlek düzlemi boyunca hareketin tekerleğin dönüşünün uygun miktarda sağlanmasını uygular; böylece temas noktasında saf yuvarlanma olur:

$$[\sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)(-l)\cos\beta]R(\theta)\dot{\xi}_I - r\dot{\phi} = 0 \quad (2.12)$$



Şekil 2.16. Sabit bir standart tekerlek ve parametreleri [36]

Toplamın ilk terimi, tekerlek düzlemi boyunca toplam hareketi belirtir. Soldaki vektöre ait üç unsur \dot{x} , \dot{y} ve $\dot{\theta}$ 'nin her birinden, tekerlek düzlemi boyunca hareket için olan katkılarına karşılık gelen eşlemeleri temsil eder. $R(\theta)\dot{\xi}_I$ terimi, $\{X_I, Y_I\}$ genel referans şasideki $\dot{\xi}_I$ hareket parametrelerini, örnek denklem (2.5) de gösterildiği gibi kısmi referans şaside $\{X_R, Y_R\}$ hareket parametrelerine dönüştürmek için kullanılır. Denklemdaki diğer parametrelerin hepsi α, β, l

İKA'nın kısmi referans şasiye göre olduğundan bu gereklidir. Tekerlek düzlemi boyunca bu hareket, bu kısıtlamaya göre, tekerleğin döndürülmesiyle elde edilen harekete $r\dot{\varphi}$ eşit olmalıdır.

Bu tekerlek için kayma kısıtlaması, tekerleğin düzlemine dik tekerleğin hareketinin bileşeninin sıfır olması gerektiğini uygular:

$$[\cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \beta) l\cos\beta]R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (2.13)$$

Örneğin, A tekerleğinin $\{(\alpha = 0), (\beta = 0)\}$ gibi bir konumda olduğunu varsayılırsa, bu, tekerleğin temas noktasını X_I 'e, tekerleğin düzlemi Y_I 'ye paralel olarak yerleştirir. $\theta = 0$ ise, kayma kısıtı (denklem (2.13)) şu şekilde olur:

$$[1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.14)$$

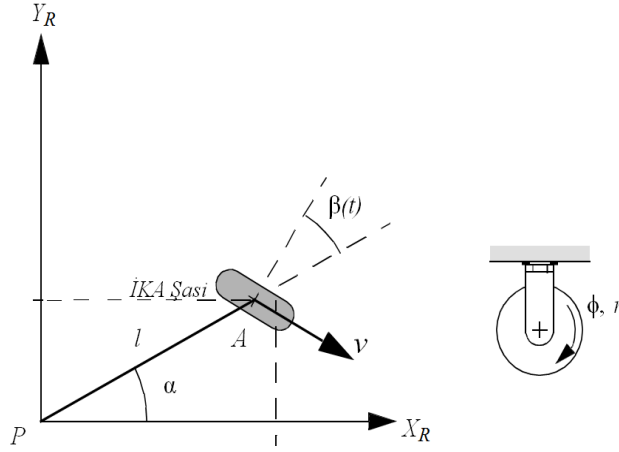
Bu, X_I boyunca hareket bileşeninin sıfır olarak kısıtlar ve bu örnekte X_I ve X_R paralel olduğundan, tekerlek beklendiği gibi yan tarafa kaymadan kısıtlanmıştır.

ii. Yön Veren Standart Tekerlek

Yön veren standart tekerlek, sabit bir standart tekerleğin sadece ek bir serbestlik derecesi ile farklılık gösterir. Tekerlek, tekerleğin merkezinden ve yere temas noktasından geçen dikey bir eksen etrafında dönebilir. Yön veren standart tekerlek (Şekil 2.17.) için konum denklemleri, bir istisna dışında şekil 2.16.'da gösterilen sabit standart tekerlekle aynıdır. Tekerleğin İKA şasisine yön belirlemesi artık tek bir sabit değer β değil, bunun yerine zamanın bir fonksiyonu olarak değişir: $\beta(t)$. Yuvarlanma ve kayma kısıtlamaları:

$$[\sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)(-l)\cos\beta]R(\theta)\dot{\xi}_I - r\dot{\varphi} = 0 \quad (2.15)$$

$$[\cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \beta) l\sin\beta]R(\theta)\dot{\xi}_I - r\dot{\varphi} = 0 \quad (2.16)$$



Şekil 2.17. Yön veren bir standart tekerlek ve parametreleri [36]

Bu kısıtlamalar sabit standart tekerleğinkiler ile özdeştir, çünkü $\dot{\varphi}$, $\dot{\beta}$ 'in aksine bir insansız kara aracının ani hareket kısıtlamaları üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur. Yön belirleme açısındaki değişikliklerin bir aracın hareketliliğini etkileyebileceği yalnızca zaman içerisinde tamamlanır. Bu çok ince gözükabilir, ancak yön belirleme konumundaki değişim β ve tekerlek dönüşünde değişim φ arasında çok önemli bir fark vardır.

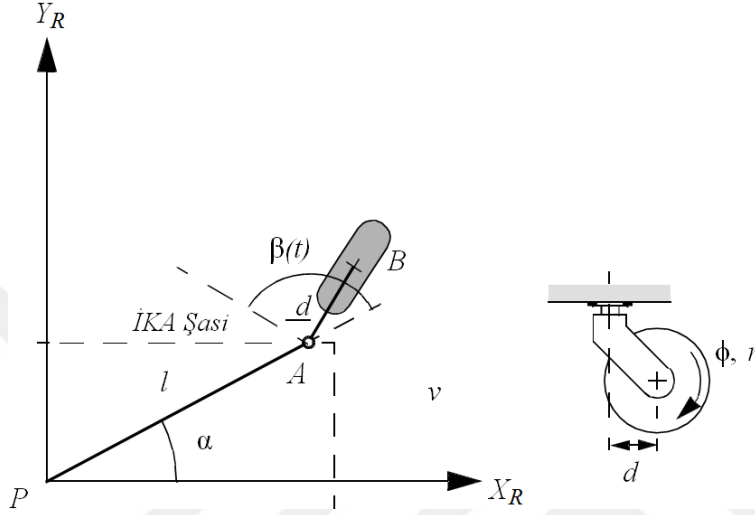
iii. Kastor Tekerlek

Kastor tekerlekleri dikey bir eksen etrafında dönebilirler. Bununla birlikte, yön veren standart tekerleğin aksine, kastor tekerleklerdeki dikey dönme eksenini, zemin temas noktasından geçmez. Şekil 2.18.'de, bir kastor tekerleğini göstermekte olup, kastor tekerleklerin pozisyonunun biçimsel teknik özelliklerinin ek bir parametre gerektirdiğini göstermektedir.

Tekerlek temas noktası, A noktasına sabit uzunluk d sert bir çubuk AB ile bağlanan B konumunda, B'nin yönlendirdiği dikey eksenin konumunu sabitler, ve bu A noktasının, şekil 2.18.'deki gibi, İKA'nın referans şaside belirtilen bir konumu vardır. Tekerleğin düzleminin her zaman AB ile hizalandığı varsayılır. Yön veren standart tekerleğe benzer şekilde, kastor tekerlek zamanın bir fonksiyonu olarak değişen iki parametreye sahiptir. $\varphi(t)$, zamanla tekerlek

dönüşünü temsil eder. $\beta(t)$ zamanla AB 'nin yön belirleme açısını ve yönelimini belirtir.

Nakliye tekerlekler için, yuvarlanma kısıtı denklem (2.13) ile özdeşdir, çünkü ofset eksenini, tekerlek düzlemiyle hizalanan hareket sırasında hiçbir rol oynamaz:



Şekil 2.18. Bir kastor tekerleği ve parametreleri [36]

$$[\sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)(-l)\cos\beta]R(\theta)\dot{\xi}_l - r\dot{\phi} = 0 \quad (2.17)$$

Bununla birlikte, nakliye tekeri geometrisi kayan kısıtlama üzerinde önemli etkiye sahiptir. Kritik sorun, yanal kuvvetin tekerlek üzerinde A noktasında gerçekleşmesidir, çünkü bu tekerleğin şasiye bağlandığı noktadır. A'ya göre ofset eksenini zemin temas noktası nedeniyle sıfır yanal hareket olmasının kısıtlılığı yanlış olur. Bunun yerine, kısıtlama, dikey eksenin uygun rotasyonunun gerçekleşmesi gerektiği için yuvarlanan bir kısıtlamaya çok benzer:

$$[\cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \beta)d + l\sin\beta]R(\theta)\dot{\xi}_l - d\dot{\beta} = 0 \quad (2.18)$$

Denklem (2.18) 'de, tekerlek düzlemine dik açılı olan herhangi bir hareket, kastor tekerlek yön belirleme hareketi eşdeğer ve zıt miktarı ile dengelenmiş olmalıdır. Bu sonuç, kastor tekerleklerinin başarısı için kritik önem taşır, çünkü $\dot{\beta}$ değerinin

ayarlanmasıyla herhangi bir keyfi yanal hareket uygun olabilir. Yön veren bir standart tekerlekte, yön belirleme eylemi tek başına İKA şasisinin hareketine neden olmaz. Ancak bir nakliye tekerleğinde, yön belirleme hareketinin kendisi, ofset eksenini zemin temas noktası ile dikey dönme eksenini arasındaki uzaklık nedeniyle İKA şasiyi hareket ettirir.



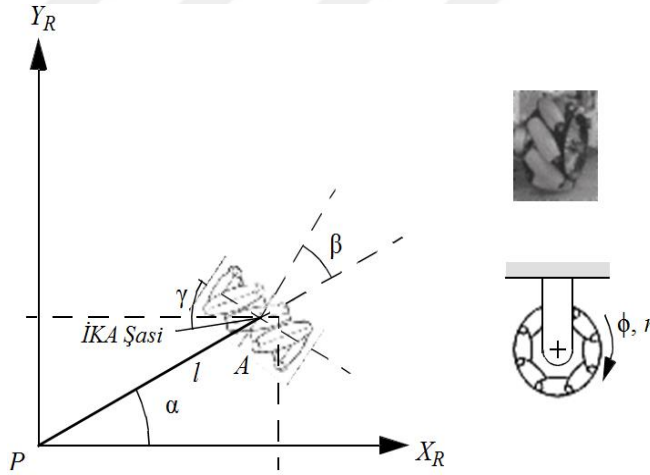
Şekil 2.19. Beş kaster tekerleği olan ofis koltuğu [36]

Daha kısa bir şekilde, herhangi bir İKA şasi hareketi ξ_I göz önüne alındığında verilen dönme hızı $\dot{\phi}$ ve yön belirleme hızı $\dot{\beta}$ için kısıtlamalar karşılanacak şekilde bazı değerlerin bulunduğu (2.17) ve (2.18) denklemlerinden tahmin edilebilir. Bu nedenle, sadece kaster tekerleği olan bir insansız kara aracı, olası araç hareketleri alanında herhangi bir hızla hareket edebilir. Böylesi sistemlere çok yönlü adı verilir. Böyle bir sistemin gerçek dünyadaki bir örneği şekil 2.19.'da gösterilen beş kaster tekerlekli ofis koltuğudur. Tüm eklemlerin serbestçe hareket edebildiği göz önüne alınırsa, sandalyenin düzlem üzerinde herhangi bir hareket vektörü seçilebilir ve elle itilebilir. Kaster tekerlekler, temas noktası kayması olmadan bu hareketi gerçekleştirmek için gerektiğinde dönecek ve yönlendirilecektir. Keza, sandalyenin kaster tekerleklerinin her biri döndürme ve yön belirleme için iki motor içeriyorsa, bir kontrol sistemi sandalyeyi düzlemdeki herhangi bir yörünge boyunca hareket ettirebilir. Dolayısıyla, kaster tekerleklerinin kinematiği biraz karmaşık olsa da, bu tür tekerlekler bir İKA şasisinin kinematiği üzerinde herhangi bir gerçek kısıtlama koymazlar.

iv. Swedish Tekerlek

Swedish tekerlekleri hiçbir dikey eksene sahip değildir, ancak kastor tekerlek gibi çok yönlü hareket edebilmektedir. Bu, sabit standart tekerleğe bir derece serbestlik ekleyerek mümkündür. Swedish tekerlekleri, sabit tekerlek bileşeninin ana eksene ters paralel olan eksenlerle tekerlek çevresine tutturulmuş silindirler ile sabit bir standart tekerlekten oluşur. Silindir eksenleri ve ana eksen arasındaki tam açı γ , şekil 2.20.'de gösterildiği gibi değişebilir.

Örneğin, bir Swedish 45° tekerleği göz önüne alındığında, ana eksenin hareket vektörleri ve silindir ekseni şekil 2.20.'deki gibi çizilebilir. Her eksen saat yönünde veya saat yönünün tersine dönebildiğinden, biri bir eksen boyunca herhangi bir vektörü diğer eksen boyunca herhangi bir vektörle birleştirebilir. Bu iki eksenler bağımsız olmalıdır (Swedish 90° tekerlek hariç). Bununla birlikte, uygun iki vektör seçilerek herhangi bir istenen hareket yönünün elde edilebileceği görsel olarak açıktır.



Şekil 2.20. Swedish tekerleği ve parametreleri [36]

Swedish tekerleğinin pozu, ana tekerlek düzlemi ile küçük çevresel silindirlerin dönme ekseni arasındaki açıyı temsil eden γ terimi eklenerek sabit bir standart tekerlek deki gibi tam olarak ifade edilir. Bu, İKA'nın referans şasi Şekil 2.20.'de gösterilmektedir.

Bir Swedish tekerlek için kısıtlamanın açık ve kesin ifade edilmesi biraz incelik gerektirir. Ani kısıtlama, küçük silindirlerin spesifik olarak yönlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu silindirlerin dönen eksen etrafında, temas noktasında hızın sıfır bileşenidir. Yani, ana eksenini döndürmeden o yönde hareket etmek kayma olmaksızın mümkün değildir. Elde edilen hareket kısıtı, denklem (2.12) de sabit standart tekerlek için yuvarlanma kısıtlamasıyla özdeş görünmekte, ancak yuvarlanma kısıtının üzerinde tuttuğu etkin yön boyunca, tekerlek düzleminden ziyade bu sıfır bileşeni boyunca olduğu şekilde γ ekleyerek formülü değiştirir:

$$[\sin(\alpha + \beta + \gamma) - \cos(\alpha + \beta + \gamma)(-l)\cos(\beta + \gamma)]R(\theta)\dot{\xi}_I - r\dot{\phi}\cos\gamma = 0 \quad (2.19)$$

Bu yönden dik olarak, küçük silindirlerin serbest dönüşü $\dot{\phi}_{sw}$ nedeniyle hareket kısıtlanmamıştır.

$$[\cos(\alpha + \beta + \gamma) \sin(\alpha + \beta + \gamma) l \sin(\beta + \gamma)]R(\theta)\dot{\xi}_I - r\dot{\phi}\sin\gamma - r_{sw}\dot{\phi}_{sw} = 0 \quad (2.20)$$

Bu kısıtlamanın davranışı ve dolayısıyla Swedish tekerleği, γ değeri değiştikçe önemli ölçüde değişir. $\gamma = 0$ kabul edilsin. Bu, Swedish 90° tekerleği temsil eder. Bu durumda, hızın sıfır bileşeninin tekerlek düzlemi ile aynı eksenlidir ve bu nedenle (2.19) denklemi, sabit standart tekerlek yuvarlanma kısıtı olan tamamen denklem (2.12) 'ye indirgenir. Fakat silindirler nedeniyle, tekerlek düzlemine dik olarak kayma kısıtlaması yoktur (denklem (2.20)). $\dot{\phi}$ değerini değiştirerek, denklem (2.19)'u karşılamak için herhangi bir hareket vektörü yapılmak istenebilir ve bu yüzden tekerlek çok yönlüdür. Gerçekte, Swedish tasarımının bu özel durumu, makaraların ve ana tekerleğin dik hareket yönlerini sağlaması açısından tamamen ayrıştırılmış hareketle sonuçlanır.

Diğer uçta, $\gamma = \pi / 2$ olduğu kabul edilirse, bu durumda, silindirler, ana tekerlek dönme eksenine paralel olan dönme eksenlerine sahiptir. İlginç bir şekilde, eğer bu değer denklem (2.19)'un γ değeri ile değiştirilirse, sonuç, sabit standart tekerlek kayma kısıtıdır, denklem (2.13) olur. Diğer bir deyişle, silindirler, yanal hareket özgürlüğü açısından ana tekerlekle hizalanmadığından fayda sağlamazlar.

Bununla birlikte, bu durumda ana tekerlek asla dönmeye ihtiyaç duymaz ve bu nedenle dönme kısıtı kaybolur. Bu, Swedish tekerleğinin dejenere bir şeklidir ve bu nedenle bu bölümün geri kalanında $\gamma \neq \pi / 2$ olarak kabul edilecektir.

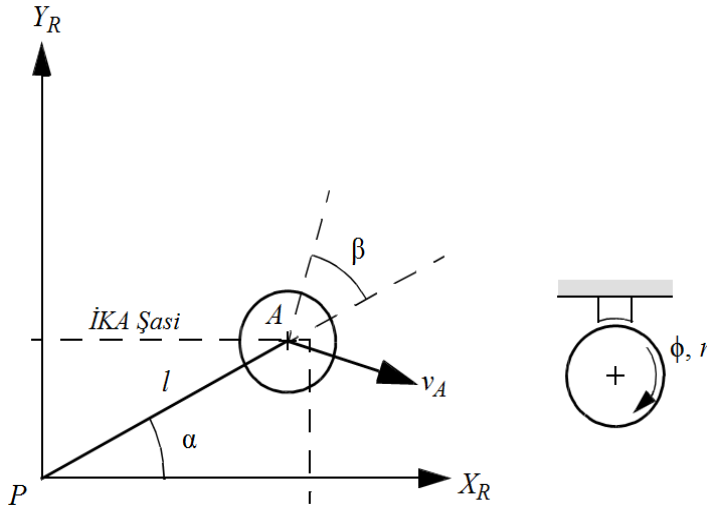
v. Küresel Tekerlek

Son tekerlek tipi olan küresel tekerlek, harekete direkt olarak kısıtlamalar koymaz (Şekil 2.21.). Böyle bir mekanizmanın ana dönüş eksenini yoktur ve bu nedenle uygun yuvarlanma veya kayma kısıtlamaları yoktur. Kastor tekerlekleri ve Swedish tekerlekleri gibi, küresel tekerlekte net bir şekilde çok yönlüdür ve İKA şasi kinematiği üzerinde hiçbir kısıtlama koymaz. Dolayısıyla, denklem (2.21), v_A insansız kara aracının A noktasının hareketi yönünde küresel tekerleğin hızını tanımlamaktadır.

$$[\sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)(-l)\cos(\beta)]R(\theta)\dot{\xi}_I - r\dot{\phi} = 0 \quad (2.21)$$

Tanım gereği, bu yönde dik olan tekerlek dönüşü sıfırdır.

$$[\cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \beta) l \sin\beta]R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (2.22)$$



Şekil 2.21. Küresel tekerlek ve parametreleri [36]

Görüldüğü gibi, küresel tekerlek için denklemler sabit standart tekerlekle tamamen aynıdır. Bununla birlikte, denklemin (2.22) yorumlanması farklıdır. β ile verilen hareket yönünün denklem (2.22)'den çıkarılmış serbest değişken olduğu yerde çok yönlü küresel tekerlek herhangi bir keyfi hareket yönüne sahip olabilir. İnsansız kara aracının Y_R yönünde kusursuz ötelemede olduğu durum varsayılırsa, o halde denklem (2.22)'de $\sin(\alpha + \beta) = 0$ olur, dolayısıyla $\beta = -\alpha$, bu özel durum için mantıklı olur.

2.4.1.4. İnsansız Kara Aracı Kinematik Kısıtlamaları

M tekerlekli bir insansız kara aracı göz önüne alındığında, artık İKA şasinin kinematik kısıtlamaları hesaplanabilir. Temel fikir, her tekerleğin insansız kara aracı hareketi üzerinde sıfır veya daha fazla kısıtlama oluşturmasıdır ve bu yüzden işlem basit olarak tekerleklerin tümünden kaynaklanan tüm kinematik kısıtlamaları İKA şasisine yerleştirilen tekerleklerin uygun bir şekilde birleştirilmesidir. Tüm tekerlekler beş kategoriye ayrılır: (1) sabit ve (2) yönlendirilebilir standart tekerlek, (3) kastor tekerlekleri, (4) Swedish tekerlekleri ve (5) küresel tekerlekler. Ancak, denklem (2.17), (2.18) ve (2.19)'da ki tekerlek kinematik kısıtlamalardan, kastor tekerleğinin, Swedish tekerleğinin ve küresel tekerleğin, İKA şasisi üzerinde hiçbir kinematik kısıtlama yüklenmediğine dikkat edilmelidir, çünkü ξ_I , iç tekerlek serbestlik derecelerine bağlı olarak, tüm bu durumlarda bağımsız olarak değişebilir.

Bu nedenle sadece sabit standart tekerlekler ve yönlendirilebilir standart tekerlekler İKA şasi kinematiği üzerinde etkiye sahiptir ve bu yüzden insansız kara aracının kinematik kısıtlamalarını hesaplanırken göz önüne alınması gerekir. İnsansız kara aracının N_f sabit standart tekerleklerden ve N_s yönlendirilebilir standart tekerleklerden oluşan toplam N adet standart tekerleğin olduğu varsayılınsın. N_s yönlendirilebilir standart tekerleklerin değişken yön verme açılarını göstermek için $\beta_s(t)$ kullanılır. Buna karşılık β_f , şekil 2.17.'de gösterildiği gibi N_f sabit standart tekerleklerin yönlendirmesini ifade eder. Tekerlek dönüşünde hem sabit hem de yönlendirilebilir tekerlekler, yatay eksen etrafında, zamanın bir fonksiyonu olarak değişen dönüş pozisyonlarına sahiptir. Sabit ve yönlendirilebilir olguları ayrı ayrı

$\varphi_f(t)$ ve $\varphi_s(t)$ olarak gösterilir ve her iki değeri birleştiren bir toplam matris olarak $\varphi(t)$ kullanılır:

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_f(t) \\ \varphi_s(t) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Tüm tekerleklerin yuvarlanma kısıtlamaları artık tek bir ifadeyle toplanabilir:

$$J_1(\beta_s)R(\theta)\ddot{\xi}_I - J_2\dot{\varphi} = 0 \quad (2.24)$$

Bu ifade tek bir tekerleğin yuvarlanma kısıtlamasına güçlü bir benzerlik getirir ancak tek değerler yerine matrisleri değiştirir, böylece tüm tekerlekler hesaba katılır. J_2 , tüm standart tekerleklerin yarıçapı r olan girdileri bululan sabit bir diyagonal $N \times N$ matrisidir. $J_1(\beta_s)$, tüm tekerleklerin bireysel tekerlek düzlemleri boyunca hareketlerine göre izdüşümleri olan bir matrisi gösterir:

$$J_1(\beta_s) = \begin{bmatrix} J_{1f} \\ J_{1s}(\beta_s) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$J_1(\beta_s)$ 'in, yalnızca β_f 'nin değil β_s 'in de bir fonksiyonu olduğu unutulmamalıdır. Bunun nedeni, sabit standart tekerleklerin yönelimleri sabitken, yönlendirilebilir standart tekerleklerin yönelimleri zamanın bir fonksiyonu olarak değişmesidir. J_{1f} , bu yüzden tüm sabit standart tekerlekler için değişmez bir iz düşüm matrisidir. Her bir sabit standart tekerlek için denklem (2.12) 'den alınan üçlü matristeki üç terimi oluşan dizinin her birinin boyutu $(N_f \times 3)$ matristir. $J_{1s}(\beta_s)$, her yönlendirilebilir standart tekerlek için denklem (2.15)'ten alınan üçlü matristeki üç terimden oluşan dizinin her birinin boyutu $(N_s \times 3)$ matristir.

Özet olarak, denklem (2.24), tüm standart tekerleklerin, yatay ekseninde, tekerlek düzlemi boyunca hareketlerine dayanarak uygun bir miktarda döndürülmesi gereken kısıtlamayı temsil eder, böylece yuvarlanma, zemin temas noktasında gerçekleşir.

Aynı tekniği, tüm standart tekerleklerin kayma kısıtlamaları denklem (2.13) ve (2.16) ile aynı yapıya sahip tek bir ifadeye toplamak için kullanılır:

$$C_1(\beta_s)R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (2.26)$$

$$C_1(\beta_s) = \begin{bmatrix} C_{1f} \\ C_{1s}(\beta_s) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

C_{1f} ve C_{1s} , tüm sabit ve yönlendirilebilir standart tekerlekler için (2.13) ve (2.16) denklemlerinin üçlü matrisindeki üç terim olan dizilerden ($N_f \times 3$) ve ($N_s \times 3$) matrisleridir. Dolayısıyla, denklem (2.26), tüm standart tekerlekler üzerinde tekerlek düzlemlerine dik olan hareket bileşenleri sıfır olması gereken bir kısıtlamadır. Bir sonraki kısımda açıklandığı üzere, tüm standart tekerlekler üzerinde bu kayma kısıtlaması, İKA şasinin genel manevra kabiliyetini tanımlamada en önemli etkiye sahiptir.

2.4.1.5. Örnekler: İnsansız Kara Aracı Kinematik Modelleri ve Kısıtlamaları

Kısım 2.4.1.2.'de, her bir tekerleğin insansız kara aracı hareketine olan katkısını birleştirerek, basit bir diferansiyel tahrik insansız kara aracında $\dot{\xi}_I$ için ileri kinematik bir çözüm ortaya konulmaktadır. Artık, her tekerlek türüne ilişkin yuvarlanma kısıtlamalarını doğrudan uygulayarak aynı kinematik ifadeyi oluşturmak için yukarıda sunulan araçlar kullanılabilir. Bu tekniği tekrar diferansiyel tahrik insansız kara aracına uygulayarak, Kısım 2.4.1.2.'nin sonuçları karşılaştırılırken yöntemin doğrulanması sağlanıp devam edilir. Sonra üç tekerlekli çok yönlü insansız kara aracı olayına geçilir.

i. Bir Diferansiyel Tahrik İnsansız Kara Aracı Örneği

İlk olarak, (2.24) ve (2.26) denklemleri dikkate alınır ve bu denklemler, insansız kara aracı hareketini, yuvarlanma ve kayma kısıtlamaları $J_1(\beta_s)$ ve $C_1(\beta_s)$ ile ilişkilendirir ve insansız kara aracı tekerleklerinin dönme hızı $\dot{\varphi}$ 'dir. Bu iki denklemin kaynaştırılması aşağıdaki ifadeyi verir:

$$\begin{bmatrix} J_1(\beta_s) \\ C_1(\beta_s) \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} J_2\dot{\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Tekrardan, şekil 2.18.'deki diferansiyel tahrik insansız kara aracı göz önüne alınarak $J_1(\beta_s)$ ve $C_1(\beta_s)$ direkt olarak her tekerleğin yuvarlanma kısıtlamaları oluşturulur. Kastor tekerlek enerjiye sahip değildir ve herhangi bir yönde hareket etmede özgürdür, bu yüzden bu üçüncü temas noktası tamamen göz ardı edilir. Kalan iki tahrik tekerleği yönlendirilemez ve bu nedenle $J_1(\beta_s)$ ve $C_1(\beta_s)$ sırasıyla J_{1f} ve C_{1f} ile sadeleştirilir. Sabit standart tekerleğinin yuvarlanma kısıtı formülünü, denklem (2.12)'i kullanmak için, önce her tekerleğin α ve β değerleri belirlenmelidir. Şekil 2.14.'da gösterildiği gibi, İKA'nın kısmi referans şasisi aracın $+X_R$ boyunca ilerleyecek şekilde hizalandığı varsayılırsa, bu durumda, sağ tekerlek için $\alpha = -\pi / 2, \beta = \pi$ ve sol tekerlek için $\alpha = \pi / 2, \beta = 0$ olur. Pozitif dönüşün $+X_R$ yönünde harekete neden olmasını sağlamak için sağ tekerlek için β değerinin gerekli olduğuna dikkat edilmelidir (Şekil 2.16.). Artık (2.12) ve (2.13) denklemlerinden matris terimleri kullanılarak J_{1f} ve C_{1f} matrisini hesaplanabilir. İki sabit standart tekerlek paralel olduğu için, denklem (2.13) yalnızca bir bağımsız denklemlerle sonuçlanır ve denklem (2.28)'i verir.

$$\begin{bmatrix} [1 & 0 & l] \\ [1 & 0 & -l] \\ [0 & 1 & 0] \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} J_2\dot{\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

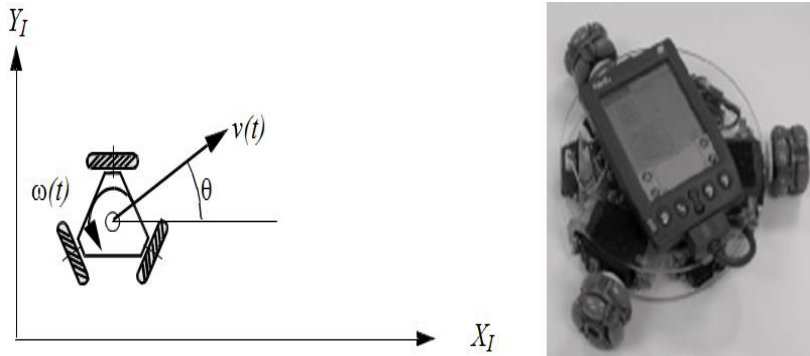
Denklem (2.29) tersi, diferansiyel tahrikli insansız kara aracına özgü kinematik denklemleri verir:

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & l \\ 1 & 0 & -l \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} J_2 \dot{\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2l} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_2 \dot{\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

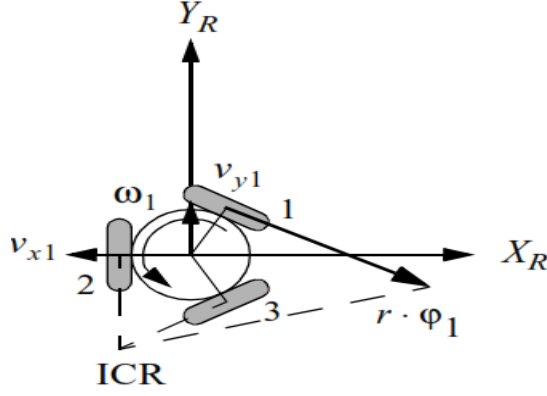
Bu, basit diferansiyel tahrik durumu için tekerlek yuvarlanma ve kayma kısıtlamaları kombinasyonunun, kısım 2.4.1.2. de elle hesaplamasına dayanan kinematik hareketin tanımladığını göstermektedir.

ii. Çok Yönlü Bir İnsansız Kara Aracı Örneği

Şekil 2.23.'de gösterilen her yöne hareket edebilen tekerlekli insansız kara aracı göz önüne alınırsa, bu insansız kara aracının üç adet Swedish 90⁰ tekerleği, radyal olarak simetrik bir biçimde ayarlanmış olup, silindirler her ana tekerleğe diktir. Önce, insansız kara aracı üzerine belirli bir kısmi referans şasisi koyulur. Ardından aracın merkezinden P noktası seçip daha sonra İKA'yı kısmi referans şasi ile hizalayarak X_R , tekerlek-2'nin eksenini ile aynı çizgide olacak şekilde uygulanır. Şekil 2.22., insansız kara aracı ve bu şekilde düzenlenmiş kısmi referans şasisi göstermektedir. Her bir tekerlekle P arasındaki mesafenin l olduğu ve üç tekerleğin de aynı yarıçap r 'ye sahip olduğu varsayılırsa, bir kez daha, $\dot{\xi}_I$ değeri, denklem (2.28)'deki gibi insansız kara aracının üç adet çok yönlü tekerleğin yuvarlanma kısıtlamalarının kombinasyonu olarak hesaplanabilir. Diferansiyel tahrikli insansız kara aracında olduğu gibi, bu insansız kara aracının da yönlendirilebilir tekerlekleri olmadığından $J_1(\beta_s)$, J_{1f} ile sadeleştirilir:



Şekil 2.22. Üç tekerlekli çok yönlü tahrikli (Omnidrive) insansız kara aracı [36]



Şekil 2.23. Kısmi referans şasi ve tekerlek-1 için ayrıntılı parametreler [36]

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} J_{1f}^{-1} J_2 \dot{\phi} = 0 \quad (2.31)$$

J_{1f} , denklem (2.19) ile verilen Swedish tekerleği için yuvarlanma kısıtlamaları matris elemanları kullanarak hesaplanır. Fakat bu değerleri kullanmak için her bir tekerleğin α, β, γ değerlerini belirlenmelidir. Şekil 2.23.'e bakıldığında, Swedish 90° tekerleği için $\gamma = 0$ olduğu görülür. Derhal denklem (2.19) 'un denklem (2.12)' ye, sabit bir standart tekerleğin yuvarlanma kısıtlamaları sadeleştirilir. Kısmi referans şasinin belirli yerleşimi göz önüne alındığında, her bir tekerlek için α değeri kolayca hesaplanır: $(\alpha_1 = \pi / 3), (\alpha_2 = \pi), (\alpha_3 = -\pi / 3)$. Ayrıca, tekerlekler insansız kara aracının dairesel gövdesine teğet olduğundan, tüm tekerlekler için $\beta = 0$ 'dır. Denklem (12) kullanılarak J_{1f} 'in oluşturulması ve sadeleştirilmesi verim sağlar.

$$J_{1f} = \begin{bmatrix} \sin \frac{\pi}{3} & -\cos \frac{\pi}{3} & -l \\ 0 & -\cos \pi & -l \\ \sin -\frac{\pi}{3} & -\cos -\frac{\pi}{3} & -l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -l \\ 0 & 1 & -l \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -l \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Bir kez daha, $\dot{\xi}_I$ 'nin değerinin hesaplanması, denklem (2.31) de ihtiyaç duyulduğu gibi J_{1f} tersinin hesaplanmasını gerektirir. İlk yaklaşım, 3×3 kare matrisinin tersini hesaplamak için alışılmış yöntemler uygulamak olacaktır. İkinci bir yaklaşım, kısım 2.4.1.2. gösterildiği gibi her bir Swedish tekerleğinin şasi hareketine olan katkısını hesaplamaktadır. Ters elde edildiğinde $\dot{\xi}_I$ izole edilebilir:

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3l} & -\frac{1}{3l} & -\frac{1}{3l} \end{bmatrix} J_2 \dot{\phi} \quad (2.33)$$

Tüm tekerlekler için $l = 1$ ve $r = 1$ olan spesifik bir çok yönlü tahrikli şasi düşünülecek olursa, İKA'daki kısmi referans şasi ve genel referans şasi hizalanır, böylelikle $\theta = 0$ olur. Yukarıdaki denklem kullanarak, 1., 2. ve 3. tekerlekler ($\varphi_1 = 4$), ($\varphi_2 = 1$), ($\varphi_3 = 2$) hızlarında dönerse, tüm aracın nihai hareketi denklem (2.34)'deki gibi hızlıca hesaplanabilir:

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3l} & -\frac{1}{3l} & -\frac{1}{3l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} \\ -\frac{4}{3} \\ -\frac{7}{3} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Dolayısıyla bu insansız kara aracı x eksenini boyunca pozitif hızda ve y eksenini boyunca negatif hızda, saat yönünde dönerken anında hareket edecektir. Yukarıdaki örneklerden, bireysel tekerleklerin yuvarlanma kısıtlamalarını birleştirerek insansız kara aracı hareketinin tahmin edilebileceğini görülmektedir.

$C_1(\beta_s)$ 'yi içeren kayma kısıtlamaları daha da ileri gitmek için kullanılabilir, tahmin edilen hareketten ziyade insansız kara aracının hareket kabiliyetini ve çalışma alanını değerlendirilmesi sağlanır. Sonra, İKA şasi hareket kabiliyetini güçlü bir şekilde analiz etmek için, kayma kısıtlamaları bazen yuvarlanma kısıtlamaları ile birlikte kullanmaya yönelik yöntemler incelenir.

2.4.2. Hareketli Bir İnsansız Kara Aracının Mobilitesi

Bir İKA şasinin kinematik mobilitesi, ortamda doğrudan hareket etme yeteneğidir. Mobiliteyi sınırlayan temel kısıtlama, her tekerleğin kayma kısıtlamasını yerine getirmesi gereken kuraldır. Dolayısıyla, denklem (2.26) 'dan başlayarak insansız kara aracı mobilitesi biçimsel olarak türetilebilir.

Anlık kinematik harekete ek olarak, hareketli bir insansız kara aracı, yönlendirilebilir tekerlekleri yön belirleyerek zamanla daha da kendi konumunu manipüle edebilir. Bir insansız kara aracının genel manevra kabiliyeti, standart tekerleklerin kinematik kayma kısıtlamaları ve ayrıca yönlendirilebilir standart tekerleklerin yön belirlemesi ve döndürülmesiyle sağlanan ek serbestlik temelinde hareket kabiliyetinin bir kombinasyonudur.

2.4.2.1. Mobilite (Hareket Kabiliyeti) Derecesi

Denklem (2.26), her tekerleğin yanal kaymayı önlemesi gereken kısıtlamayı getirir. Tabii ki, bu, her bir ve her tekerleğin başına ayrı olarak geçer ve bu nedenle, sabit ve yönlendirilebilir standart tekerlekler için bu kısıtlamayı ayrı ayrı belirtmek mümkün olur:

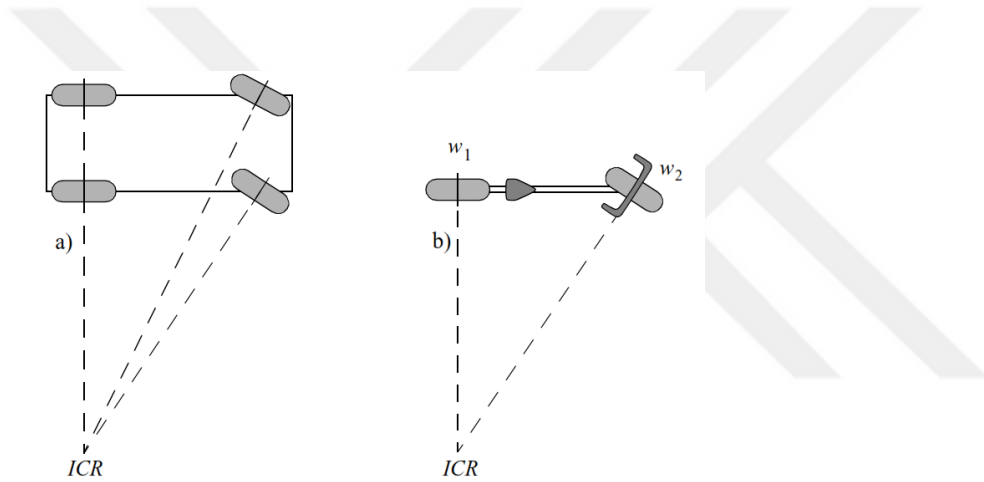
$$C_{1f}R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (2.35)$$

$$C_{1s}(\beta_s)R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (2.36)$$

Bu kısıtlamaların her ikisinin de sağlanması için, hareket vektörü $R(\theta)\dot{\xi}_I$, basitçe C_{1f} ve C_{1s} 'in bir kombinasyonu olan iz düşünüm matrisinin $C_1(\beta_s)$ sıfır uzayına ait olmasıdır. Matematiksel olarak $C_1(\beta_s)$ 'in sıfır uzayı, N deki herhangi bir vektör n için $C_1(\beta_s)n = 0$ olacak şekilde N uzayıdır. Kinematik kısıtlamalara uyulması gerekiyorsa, insansız kara aracının hareketi daima bu N uzayı içinde olmalıdır.

Kinematik kısıtlamalar (denklem (3.35) ve (3.36)) bir insansız kara aracının ani dönme merkezi (ICR) kavramını kullanarak geometrik şekilde de gösterilebilir.

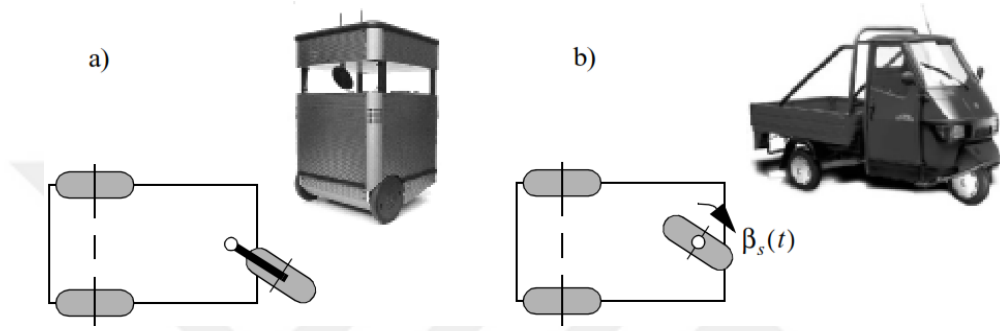
Tek bir standart tekerlek dikkate alınır, kayma kısıtlaması tarafından sıfır yanıl harekete zorlanır. Yatay eksenini tekerlek düzlemine dik olmasına rağmen sıfır hareket çizgisi çizerek geometrik olarak gösterilebilir (Şekil 2.24.). Herhangi bir anda, sıfır hareket çizgisi süresince tekerlek hareketi sıfır olmalıdır. Başka bir deyişle, tekerlek yarıçapı R olan bir daire boyunca anında hareket etmelidir, öyle ki o dairenin merkezi sıfır hareket çizgisinin değerini alır. Ani dönme merkezi olarak adlandırılan bu merkez noktası sıfır hareket çizgisi boyunca herhangi bir yerde olabilir. R sonsuzda olduğunda, tekerlek düz bir çizgi üzerinde hareket eder.



Şekil 2.24. a) Ackerman yönlendirme sistemli 4 tekerlekli araç, b) Bisiklet [36]

Şekil 2.24.'deki Ackerman aracı gibi bir insansız kara aracı birbirinden farklı tekerlekleri olabilir, ancak daima tek bir ICR'ye sahip olmalıdır. Sıfır hareket çizgilerinin hepsi tek bir noktada bulunduğu için insansız kara aracı hareketi için ICR'yi bu buluşma noktasına yerleştiren tek bir çözüm vardır. Bu ICR geometrik yapısı, insansız kara aracı hareketliliğinin, tekerleklerin sayısı ile değil, insansız kara aracının hareketindeki kısıtlamaların sayısının bir fonksiyonu olduğunu gösterir. Şekil 2.24.'de gösterilen bisiklet iki tekerleği, w_1 ve w_2 'ye sahiptir. Her tekerlek bir kısıtlama veya sıfır hareket çizgisine katkıda bulunur. Birlikte ele alındığında, iki sınırlama, ICR için kalan tek çözüm olarak tek bir noktada sonuçlanır. İşte bu sebeple, iki kısıtlamanın bağımsız olması ve dolayısıyla insansız kara aracının hareketinin her birinin daha da kısıtlanmasıdır.

Şekil 2.25.'deki diferansiyel tahrikli insansız kara aracı durumunda, iki tekerlek aynı yatay eksen boyunca hizalanır. Dolayısıyla ICR, belirli bir noktada değil, bir çizgi boyunca uzanmaya mahkumdur. Nitekim ikinci tekerlek, sıfır hareket çizgisi ilk tekerleğiinkiyle özdeş olduğundan, insansız kara aracı hareketi üzerinde ek kinematik kısıtlamalar getirmez. Bisiklet ve diferansiyel tahrik şasesi, aynı sayıda çok yönlü olmayan tekerleğe sahip olmasına rağmen ilkinde iki bağımsız kinematik kısıtlama bulunurken ikincisinde sadece bir tane vardır.



Şekil 2.25. a) Ayrı ayrı motoru olan iki tekerlek ve tek kastor tekerlekli diferansiyel tahrikli robot b) İki sabit standart tekerleği ve bir tane yön belirleyen standart tekerleği olan üç tekerlekli araç [36]

Şekil 2.25.'deki Ackerman yönlendirme sistemli araç, tekerleğin insansız kara aracı kinematiği için bağımsız bir kısıtlamaya katkıda bulunamayacağını başka bir yolunu göstermektedir. Bu aracın iki yönlendirilebilir standart tekerleği vardır. Bu yönlendirilebilir tekerleklerden yalnızca birinin anlık konumu ve sabit arka tekerleklerin konumu göz önüne alındığında, ICR için sadece tek bir çözüm var. İkinci yönlendirilebilir tekerleğin konumu tamamen ICR tarafından sınırlandırılmıştır. Bu nedenle, insansız kara aracı hareketine bağımsız kısıtlamalar getirmez.

İKA şasi kinematiği, bu nedenle, tüm standart tekerleklerden kaynaklanan bağımsız kısıtlamaların bir fonksiyonudur. Bağımsızlığın matematiksel yorumu bir matrisin derecesi ile ilgilidir. Bir matris derecesi bağımsız satır veya sütunların en küçük sayısıdır. Denklem (2.26), insansız kara aracının tekerlekleri tarafından uygulanan

tüm kayma kısıtlamalarını temsil eder. Dolayısıyla $rank[C_1(\beta_s)]$, bağımsız kısıtlamaların sayısıdır.

Bağımsız kısıtlamaların sayısı artması sonucu $C_1(\beta_s)$ derecesi ne kadar büyük olursa, insansız kara aracının hareketliliği daha da kısıtlanır. Örneğin, tek bir sabit standart tekerlekli bir insansız kara aracı dikkate alınır, sadece standart tekerlekler dikkate alınmalıdır. Bu insansız kara aracı bir tekerlekli bisiklet olabilir veya birkaç Swedish tekerleğine sahip olabilir; bununla birlikte, kesinlikle bir tane sabit standart tekerleği vardır. Tekerlek, İKA'nın kısmi referans şasiye ait α, β, l parametreleriyle belirtilen bir konumdadır. $C_1(\beta_s)$, C_{1_f} ve C_{1_s} 'den oluşur. Bununla birlikte, yönlendirilebilir bir standart tekerlek olmadığından, C_{1_s} boştur ve bu nedenle $C_1(\beta_s)$ sadece C_{1_f} içerir. Bir sabit standart tekerlek olduğu için, bu matris bir dereceye sahiptir ve dolayısıyla bu insansız kara aracının hareket kabiliyeti üzerinde tek bağımsız bir kısıtlama vardır:

$$C_1(\beta_s) = C_{1_f} = [\cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \beta) l \sin\beta] \quad (2.37)$$

Artık, ikinci tekerleği, orijinal tekerleğin yatay eksenini ile aynı hizaya getirmek için kısıtlayarak, bir diferansiyel tahrik insansız kara aracı oluşturmak için ek bir sabit standart tekerlek eklemesine izin verilir. Belirsizlik kaybı olmaksızın, iki tekerleğin merkezleri arasındaki orta noktaya P noktasını yerleştirilebilir. Tekerlek w_1 için α_1, β_1, l_1 ve tekerlek w_2 için α_2, β_2, l_2 verildiğinde geometrik olarak $\{(l_1 = l_2), (\beta_1 = \beta_2 = 0), \alpha_1 + \pi = \alpha_2\}$ tutar. Bu takdirde, $C_1(\beta_s)$ matrisinin iki kısıtlaması vardır, ancak bunlardan birinin derecesi vardır:

$$C_1(\beta_s) = C_{1_f} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \sin(\alpha_1) & 0 \\ \cos(\alpha_1 + \pi) & \sin(\alpha_1 + \pi) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Tekrar iki tekerlek merkezi arasında P noktası yerleştirilir ve tekerlekleri x_1 ekseninde olacak şekilde yönlendirilir. Bu geometri, $\{(l_1 = l_2), (\beta_1 = \beta_2 = \frac{\pi}{2}), (\alpha_1 = 0), (\alpha_2 = \pi)\}$ anlamına gelir ve bu nedenle $C_1(\beta_s)$ matrisi iki bağımsız kısıtlamayı da elinde tutar ve iki derecesi vardır:

$$C_1(\beta_s) = C_{1f} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{\pi}{2}) & l_1 \sin(\frac{\pi}{2}) \\ \cos(\frac{3\pi}{2}) & \sin(\frac{3\pi}{2}) & l_1 \sin(\frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & l_1 \\ 0 & -1 & l_1 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Genel olarak, derecesi $[C_{1f}] > 1$ ise, araç en iyi ihtimalle sadece bir daire boyunca veya düz bir çizgi boyunca ilerleyebilir. Bu konfigürasyon, insansız kara aracının aynı yatay dönüş eksenini paylaşmayan sabit standart tekerleklerden dolayı iki veya daha fazla bağımsız kısıtlamaya sahip olduğu anlamına gelir. Bu tür konfigürasyonların düzlemde yalnızca dejenere bir hareket kabiliyetine sahip olmaları nedeniyle, bu bölümün geri kalanında bunlar dikkate alınmaz. Bununla birlikte, dört tekerlekli kayma / kızak yön belirleyen sistemi gibi bazı dejenere konfigürasyonların kayma kısıtlamaları bekleneni verememesine rağmen, gevşek toprak ve kum gibi belirli ortamlarda yararlı olduğuna dikkat edilmelidir. Sürpriz olmayan bu tür kayma kısıtlamalarını ihlal ettiği için güç verimliliği önemli ölçüde azalır.

Genel olarak, bir insansız kara aracı sıfır veya daha fazla sabit standart tekerleğe ve sıfır veya daha fazla yönlendirilebilir standart tekerleğe sahip olacaktır. Dolayısıyla, herhangi bir insansız kara aracı için mümkün olan derecenin aralık değerleri belirlenebilir: $0 \leq \text{rank}[C_1(\beta_s)] \leq 3$. Durum derecesi $C_1(\beta_s) = 0$ olması düşünülürse, bu, ancak $C_1(\beta_s)$ de sıfır bağımsız kinematik kısıtlamalar varsa mümkün olur. Bu durumda, İKA şasiye sabit veya yönlendirilebilir standart tekerleklerden hiçbiri takılı değildir: $N_f = N_s = 0$.

Diğer uç göz önüne alındığında, $\text{rank}[C_1(\beta_s)] = 3$. Bu, kinematik kısıtlamaların üç serbestlik derecesi boyunca belirtilmesinden beri (yani kısıtlama matrisi üç sütun genişliğindedir) mümkün olan en üst derecedir. Bu yüzden, üçten fazla bağımsız kısıtlama olamaz. Aslına bakılırsa, $\text{rank}[C_1(\beta_s)] = 3$ olduğunda, insansız kara aracı tüm yönlerde tamamen kısıtlanır ve dolayısıyla, düzlemdeki hareket tamamen imkansız olduğu için dejenere olur.

Artık, bir insansız kara aracının hareket kabiliyeti derecesi δ_m resmen tanımlanabilir:

$$\delta_m = \text{dim}N[C_1(\beta_s)] = 3 - \text{rank}[C_1(\beta_s)] \quad (2.40)$$

$[C_1(\beta_s)]$ matrisinin boş alanının boyutluluğu ($\dim N$), tekerlek hızındaki değişikliklere rağmen hemen manipüle edilebilen İKA şasisinin serbestlik derecesi sayısının bir ölçüsüdür. Dolayısıyla δ_m 'nin 0 ile 3 aralığında seyretmesi mantıklıdır. Sıradan bir diferansiyel tahrik şasisi göz önüne alınırsa, böylesi bir insansız kara aracı üzerinde ortak bir yatay ekseni paylaşan iki sabit standart tekerlek vardır. Yukarıda da bahsedildiği gibi, ikinci tekerlek sisteme bağımsız kinematik kısıtlamalar eklememektedir. Bundan dolayı, $rank[C_1(\beta_s)] = 1$ ve $\delta_m = 2$.

Diferansiyel tahrikli bir insansız kara aracı, tekerlek hızlarını kolayca manipüle ederek hem yönlendirmede ki değişim oranını hem de ileri / geri hızını kontrol edebilir. Başka bir deyişle, ICR, tekerleklerinin yatay eksenden uzanan sonsuz çizgide uzanmak zorundadır.

Buna karşılık, bir bisiklet şasisi düşünülürse, bu konfigürasyon, sabit bir standart tekerlekten ve bir yönlendirilebilir standart tekerlekten oluşur. Bu durumda, her bir tekerlek $C_1(\beta_s)$ 'ye bağımsız bir kayma kısıtlaması oluşturmaktadır. Dolayısıyla $\delta_m = 1$. Bisikletin diferansiyel tahrik şasisi gibi aynı toplam sayıda çok yönlü olmayan tekerleğe sahip olduğunu ve aslında tekerleklerinden birinin de yönlendirilebilir olduğu dikkate alınmalıdır. Yine de daha az bir hareket kabiliyeti derecesi vardır. Bir bisiklet sadece tekerlek hızının doğrudan manipülasyonu ile ileri / geri hız üzerinde kontrole sahiptir. Yön belirleme tarafından yalnızca bisiklet ICR'sini değiştirebilir. Beklendiği gibi, denklem (2.40) baz alınarak, sadece Swedish veya küresel tekerlekler gibi çok yönlü tekerleklerden oluşan herhangi bir insansız kara aracı maksimum hareket kabiliyetine sahip olacaktır, $\delta_m = 3$. Böylesi bir insansız kara aracı, üç serbestlik derecesini doğrudan manipüle edebilir.

2.4.2.2. Stabilite Derecesi

Yukarıda tanımlanan mobilite derecesi, tekerlek hızındaki değişikliklere bağlı olarak kontrol edilebilir serbestlik derecelerini nicelendirir. Yön belirleme bir İKA şasinin pozu ξ üzerinde olası bir etkiye de sahip olabilir, etki dolaylı olmasına rağmen, yönlendirilebilir bir standart tekerleğin açısını değiştirdikten sonra, insansız kara aracı poz (konum) üzerinde etkili olması için yön belirleme açısındaki değişim için hareket etmelidir.

Mobilitede olduğu gibi, yönlendirilebilirlik derecesini δ_s tanımlarken bağımsız olarak kontrol edilebilir yön belirleme parametrelerinin sayısı ile ilgilenilir:

$$\delta_s = \text{rank}[C_1(\beta_s)] \quad (2.41)$$

Mobilite durumunda, $C_1(\beta_s)$ derecesindeki bir artışın daha fazla kinematik kısıtlamaya ve dolayısıyla daha az hareketli bir sistemi kast ettiğine dikkat edilmelidir. Yönlendirilebilirlik durumunda, $C_{1_s}(\beta_s)$ derecesindeki bir artış daha fazla yön belirleme özgürlüğü derecesi ve bu nedenle daha büyük olası manevra kabiliyetini kast etmektedir. $C_1(\beta_s)$, $C_{1_s}(\beta_s)$ içerdiğinden, yön veren bir standart tekerleğin hareketliliği azaltacağı ve yönlendirilebilirliği artırdığı anlamına gelir: herhangi bir anda belirli yönlendirme kinematik bir kısıtlamayı uygular, ancak bu yönlendirme değişme kabiliyeti ek yörüngelere neden olabilir.

δ_s 'in aralığı belirtilebilir: $0 \leq \delta_s \leq 2$. $\delta_s = 0$ durumunda, insansız kara aracının yönlendirilebilir standart tekerlekleri, $N_s = 0$ olmadığı anlamına gelir. $\delta_s = 1$ durumunda, bir insansız kara aracı konfigürasyonunda bir veya daha fazla yönlendirilebilir standart tekerlek bulunan en yaygındır. Örneğin sıradan bir otomobil dikkate alınır, bu durumda $N_f = 2$ ve $N_s = 2$. Fakat sabit tekerlekler ortak bir aks paylaşır ve dolayısıyla $\text{rank}[C_{1_f}] = 1$. Sabit tekerlekler ve yönlendirilebilir tekerleklerden herhangi biri, ICR'yi arka akstan uzanan çizgi boyunca bir nokta olarak kısıtlar. Bu nedenle, ikinci yönlendirilebilir tekerlek

herhangi bir bağımsız kinematik kısıtlama yükleyemez ve $rank[C_{1_s}(\beta_s)] = 1$ olur. Bu durumda $\delta_m = 1$ ve $\delta_s = 1$.

$\delta_s = 2$ durumunda, ancak sabit tekerlekleri olmayan insansız kara araçlarında mümkündür: $N_f = 0$. Bu koşullar altında, her iki tekerleğin de yönetilebileceği bir psödo bisikleti gibi iki ayrı yönlendirilebilir standart tekerlek bulunan bir şasi oluşturmak mümkündür. Bu takdirde, tek tekerleğin yönlendirilmesi, ICR'yi bir çizgiye kısıtlarken ikinci tekerlek, ICR'yi bu çizgi boyunca herhangi bir noktaya kısıtlayabilir. İlginç şekilde, bu $\delta_s = 2$, insansız kara aracının ICR'sini zemin düzleminin herhangi bir yerine yerleştirebileceği anlamına gelir.

2.4.2.3. İnsansız Kara Aracı Manevra Kabiliyeti

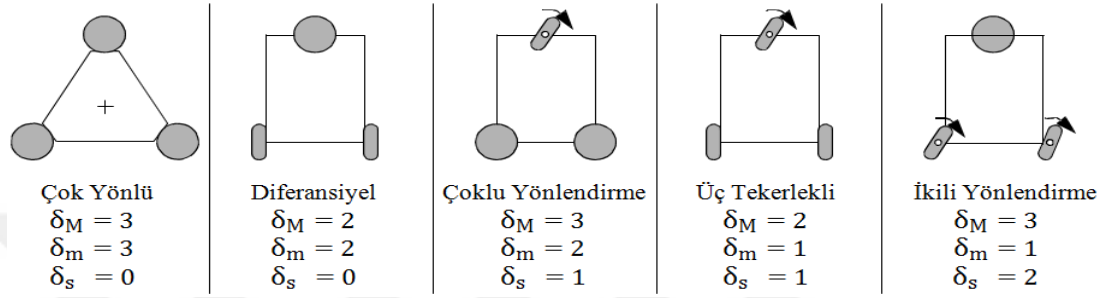
Bir insansız kara aracının manipüle edebileceği tüm serbestlik dereceleri, manevra kabiliyeti derecesi δ_M olarak adlandırılır, mobilite ve yönlendirilebilirlik açısından kolayca tanımlanabilir:

$$\delta_M = \delta_m + \delta_s \quad (2.42)$$

Bu nedenle, manevra kabiliyeti, insansız kara aracının tekerlek hızı sayesinde doğrudan manipüle ettiği serbestlik derecelerini ve yön belirleme konfigürasyonunu değiştirerek ve hareket ettirerek dolaylı olarak manipüle ettiği serbestlik derecelerini içerir. Önceki bölümlerin incelemelerine dayanarak, tekerlek konfigürasyonlarının temel tipleri çizilebilir. Şekil 2.26.'da gösterilmiştir.

Aynı δ_M 'ye sahip iki insansız kara aracının mutlaka eşdeğer olmadığını unutmamalıdır. Örneğin, diferansiyel tahrikli ve üç tekerlekli geometrileri (Şekil 2.26.) eşit manevra kabiliyeti $\delta_M = 2$ 'ye sahiptir. Diferansiyel tahrikte tüm manevra kabiliyeti doğrudan mobilitenin bir sonucudur, çünkü $\delta_m = 2$ ve $\delta_s = 0$. Bir üç tekerlekli durumda manevra kabiliyeti de yön belirleyen yardımcıyla elde edilir: $\delta_m = 1$ ve $\delta_s = 1$. Bu konfigürasyonlardan hiçbiri, ICR'nin düzlemdeki herhangi bir yere kadar uzanmasına izin vermez. Her iki durumda da ICR, İKA referans şasiye

göre önceden tanımlanmış bir çizgide olmalıdır. Diferansiyel tahrik durumunda, bu çizgi, iki sabit standart tekerleğin ortak aksından uzanır, diferansiyel tekerlek hızları ile bu çizgide ICR noktasını ayarlar. Bir üç tekerleklide, bu çizgi sabit tekerleklerin paylaşılan ortak aksından uzanır ve yönlendirilebilir tekerlek bu çizgi boyunca ICR noktasını ayarlar. Şekil 2.26.'da küresel tekerlekler manevra kabiliyetini etkilemeksizin kastor veya Swedish tekerlekleri ile değiştirilebilir.



Şekil 2.26. Üç tekerlekli konfigürasyonun beş temel türü [36]

Daha genel olarak, $\delta_M = 2$ olan herhangi bir insansız kara aracı için, ICR her zaman bir çizgiye uzanıp kısıtlanır ve $\delta_M = 3$ olan herhangi bir insansız kara aracı için ICR düzlemdeki herhangi bir noktaya ayarlanabilir.

Son bir örnek, yukarıda geliştirmiş olan araçların kullanımını gösterecektir. Kapalı ortam insansız kara aracı araştırması için ortak bir insansız kara aracı konfigürasyonu senkron tahrik konfigürasyonudur. Böyle bir insansız kara aracının iki motoru ve üç tekerleği vardır. İlk motor, tüm üç tekerleği de döndürmek için güç sağlarken, ikinci motor tüm üç tekerleği de yön belirleme için güç sağlar. Üç tekerlekli bir senkron tahrik insansız kara aracında $N_f = 0$ ve $N_s = 3$. Bu nedenle, $rank[C_{1_s}(\beta_s),]$ hem δ_m hem de δ_s belirlemede kullanılabilir. Üç tekerlek ortak bir aks paylaşmaz, dolayısıyla üçün ikisi bağımsız kayma kısıtlamasına katkıda bulunur. Üçüncüsü, hareketin mümkün olması için bu iki kısıtlamaya bağımlı olmalıdır. Bu nedenle $rank[C_{1_s}(\beta_s),] = 2$ ve $\delta_m = 1$. Bu sezgisel olarak doğrudur. Yön belirleyeni donmuş olan bir senkron tahrik insansız kara aracı, düz bir çizgi üzerinde ileri ve geri yol almayı içeren sadece bir serbestlik derecesini manipüle eder.

Bununla birlikte, δ_s dikkate alınırken ilginç bir komplikasyon meydana gelir. Denklem (2.41)'e dayanarak insansız kara aracının $\delta_s = 2$ olması gerekir. Doğrusu, senkron tahrikli bir insansız kara aracının geometrik konfigürasyonuna sahip üç tekerlekli bir insansız kara aracı için bu doğru olacaktır. Bir senkron tahrik konfigürasyonunda tek bir motor, üç tekerleği bir kayış tahriki kullanarak yönlendirir. Bu nedenle, ideal olmasına rağmen, tekerlekler bağımsız olarak yönlendirilebilirse, sistem $\delta_s = 2$ 'ye ulaşır, senkron tahrik durumunda tahrik sistemi ayrıca kinematiği gerçekte $\delta_s = 1$ olacak şekilde kısıtlar. Son olarak, manevra kabiliyetini şu değerlere dayanarak hesaplanabilir: Bir senkron tahrikli insansız kara aracı için $\delta_M = 2$.

Bu sonuç, senkron tahrikli bir insansız kara aracı toplamda sadece iki serbestlik derecesini manipüle edebileceği anlamına gelir. Aslında, senkron tahrikli bir insansız kara aracının tekerlek konfigürasyonu düşünülürse, şasi yönlendirmesinin değiştirilmesi için herhangi bir yol bulunmadığı anlaşılacaktır. Şasinin sadece $x - y$ konumu manipüle edilebilir ve bu nedenle, senkron tahrikli bir insansız kara aracının matematiksel sonuca göre, sadece iki serbestlik derecesi vardır.

2.4.3. İnsansız Kara Aracı Çalışma Alanı

Bir insansız kara aracı için, manevra kabiliyeti, kontrol serbestlik derecelerine eşdeğerdir. İnsansız kara aracının, kendisini çevrede konumlandırmak için kontrol serbestlik derecelerini kullanabileceği yollar önemsenmektedir. Örneğin, Ackerman yönlendirme sistemli araç veya otomobil dikkate alınır, böylesi bir araç için kontrol serbestlik derecesi toplam sayısı, $\delta_M = 2$, birincisi yön belirleyen için ve ikincisi tahrik tekerleklerinin harekete geçirilmesi için. Aracın çevredeki toplam serbestlik derecesi üçtür: araba kendisini herhangi bir x, y noktasında ve herhangi bir θ açısı ile düzlemde konumlandırabilir.

Dolayısıyla bir insansız kara aracının muhtemel konfigürasyon alanını belirlemek önemlidir, çünkü şaşırtıcı şekilde δ_M 'i aşabilir. Çalışma alanına ek olarak, insansız kara aracının çeşitli konfigürasyonlar arasında nasıl hareket edebileceğini de

düşünülünce; takip edebilen yol türlerin neler olduğu ve ayrıca bu konfigürasyon alanı boyunca olası yörüngeleri neler olduğu incelenmektedir.

2.4.4. Serbestlik Dereceleri

Bir insansız kara aracının çalışma alanı tanımlanırken, ilk olarak kabul edilebilir hız alanını incelemek yararlı olacaktır. İnsansız kara aracının kinematik kısıtlamaları göz önüne alındığında, hız uzayı aracın kontrol edebileceği bağımsız araç hareket bileşenlerini tanımlar. Örneğin, tek tekerleklinin hız uzayı iki eksenle temsil edilebilir, birincisi tek tekerleklinin anlık ilerleme hızını temsil eder ve ikincisi tek tekerleklinin yönelimindeki anlık değişimi (θ) temsil eder.

Bir insansız kara aracının hız uzayındaki boyutların sayısı, bağımsız olarak ulaşılabilen hızların sayısıdır. Buna da diferansiyellenebilir (türevlenebilir) serbestlik dereceleri (*DDOF*) denir. Bir insansız kara aracının *DDOF*'si daima mobilite derecesi δ_m 'e eşittir. Örneğin bir bisiklet manevra kabiliyeti:

$$\delta_M = \delta_m + \delta_s = 1 + 1 = 2 \text{ ve } DDOF = 1 \text{ 'dir.}$$

Bisikletin aksine, üç swedish tekerleğe sahip bir insansız kara aracı olan bir omnibot düşülecek olursa, bu durumda sıfır standart tekerlek olduğunu ve bu nedenle $\delta_M = \delta_m + \delta_s = 3 + 0 = 3$ olur. Yani, omnibotun üç farklı serbestlik derecesi vardır. Bu, böyle bir insansız kara aracının kinematik hareket kısıtlamaları olmadığı için her üç poz değişkenini bağımsız olarak ayarlayabilmesi nedeni göz önüne alındığında uygundur: $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$.

Bisiklet ve omnibot arasındaki *DDOF* farkı göz önüne alındığında, her konfigürasyonun çalışma alanındaki genel serbestlik derecelerini göz önünde bulundurulmalıdır. Omnibot, ortamında herhangi bir poz(x, y, θ) elde edebilir ve *DDOF* = 3 olduğu için aynı anda üç eksenin hedef pozisyonlarına doğrudan elde ederek bunu yapabilir. Açıkçası, *DOF* = 3 olan bir çalışma alanı vardır.

Bisiklet ortamında herhangi bir poz(x, y, θ) elde edebilir, ancak bazı hedef noktalarına ulaşmak, eş değer omnibottan daha fazla zaman ve enerji gerektirebilir.

Örneğin, bir bisiklet konfigürasyonu yana doğru 1 metre ilerlemeliyse, en basit başarılı manevra, otomobillerin paralel park edilmesine benzer şekilde bir yay şeklinde ya da ileri ve geri hareket gerektirmektedir. Buna rağmen, bir bisiklet herhangi bir (x, y, θ) elde edebilir ve bu nedenle bir bisikletin çalışma alanının bile $DOF = 3$ 'ü vardır.

Açık bir biçimde, çalışmada bir eşitsizlik ilişkisi vardır: $DDOF \leq \delta_m \leq DOF$. Her ne kadar bir insansız kara aracının çalışma alanının boyutluluğu önemli bir özellikse de, yukarıdaki örnekte, bir insansız kara aracının da kullanabileceği özel yolların da olduğu açıktır. DOF çalışmainsansız kara aracının çeşitli pozlara yeteneğini yönettiği gibi, insansız kara aracının $DDOF$ da çeşitli yollar bulma yeteneğini yönetir.

3. SİSTEMATİK TASARIM

Asırlar boyunca oluşturulmuş bir tasarım ürününün geliştirilmesi ihtiyacının ortaya çıkması durumunda, ürün formunun tamamen değişmesi ihtimalinde oluşabilmektedir. Geleneksel tasarım yöntemlerinde, başlangıç seviyedeki tasarımcıların başarılı ürünler ortaya çıkarabilmeleri için uzun süre çalışmaları gerekir. Geleneksel tasarım yöntemlerinde, yeni keşfedilen bir ihtiyacı karşılayabilecek tasarım yapılabilme olanağı yoktur. Geleneksel tasarımın temelinde, tasarımın icra edilmesi, kullanılması ve daha sonra yeni ürünün geliştirilmesi kaidesine dayanmaktadır. Fakat yeni ihtiyaç ve isteklere olan talepler, yeni bir ürün için uzun zaman bekleme durumunu kesinlikle kabul edemez [50].

Eski uygulamaların geliştirmesi ilkesine dayanan eski tasarım yöntemlerinin yetersiz kalması durumunda, yeni tasarım yöntemleri aranmaya başlanmıştır. Sürekli varyans ve inovasyon, tasarlama yöntemlerinin belirgin ortak karakterleridir. Tasarım yöntemlerinin araştırılması ve geliştirilmesi, tasarımın bulunduğu bütün alanların ortak noktasıdır. Dolayısıyla tüm mühendislik disiplinlerinde ve bilhassa endüstriyle ilgili tasarım konularında yöntemlerin kullanımı ve geliştirilmesi çok önemlidir [51].

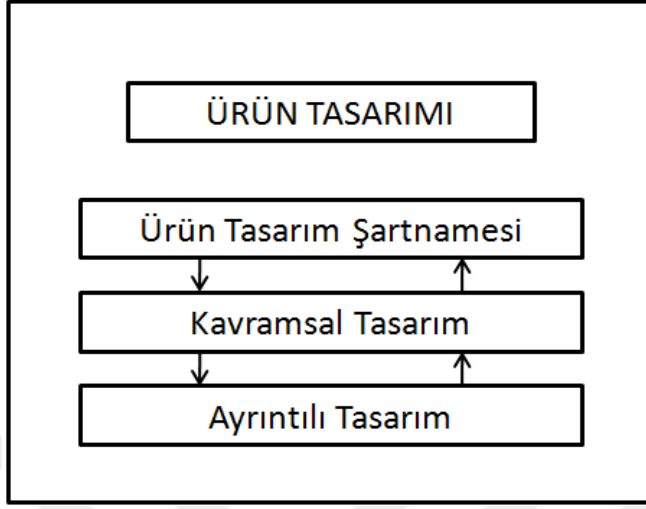
Bir tasarımda en kolay karar verilebilen konular tasarımcının denediği, gözlemleyebildiği ve üzerinde deneme yapabildiği konulardır. Fakat insanlar ile alakalı konular ele alınca ve tasarlama yöntemleri insanlara uygulanmaya çalışılınca, durum değişmektedir. İnsanların çevreyi algılaması, tepkileri hususunda duygu ve düşünceleri ile bir değerlendirme gerçekleştirir. İnsanın çevreyi algılaması bir input (girdi) ve output (çıkıtı) sorunudur. Bir makineye verilen girdiyi tam olarak ölçme imkanı vardır, çıktıda ilişkili olarak elde edilir ayrıca bu durum fiziksel bir metot kullanılarak ölçümü gerçekleştirilebilir. Fakat iki insanın yeni bir nesne karşısında tepkisinin ne olacağını tahmin etmek zordur. İki insanın aynı nesneye gösterdikleri davranışlar aynı olabilir yada bütünüyle tam tersi de olabilir [52, 53].

Nesne algısında yanıltıcı durumlar ile karşılaşmak normaldir. Gözün kolayca bazı durumlarda yanılabildiğini algı problemleri üzerine çalışan uzmanlar da kabul etmektedir. Tüm bu sebepler, insanlar ile alakalı büyük bir belirsizliğin olduğunu

açığa çıkarmaktadır. Böylesi belirsizlikleri en aza indirmek yada ortadan kaldırmak maksadıyla, tasarım sürecini iyileştirecek yöntemlere ihtiyaç duyulur. Yeni tasarım yöntemleri, modern tasarlama sorunlarına bazı parçacı çözümler getirebilecek yetenektedir. Dolayısıyla geleneksel yöntemlerin tamamen terk edilmesi imkansızdır. Daha yenisi uygulanmaya başlanmadan eskisinin kullanılmaya devam etmesi gerekir. Geleneksel tasarımda konu değiştirebilme ve eskiz yapma elverişliliği vardır. Tasarım sorununun seviyesi arttıkça, tasarımcı tarafından kolaylaştırma derecesi artırılır ve tasarım sorunu idrak edilebilir ilişki düzeyine indirgenir. Bu nedenle, tasarım sorununu farklı parçalara bölüp, üzerinde yoğunlaşarak, türlü alternatifler ve optimum çözüm arama olanağı bulunur. Bu basitleştirme ve idrak edilebilir düzeye indirgeme çabası zarfında, faktörlerin en önemli olanları üzerinde yoğunlaştırılır. Tasarım aşamalarında alınacak kararların sayısı idrak edilebilmeye sınırlanarak en aza indirgenir. En büyük zorluk, bu noktada meydana gelmektedir. Basitleştirmenin çok ileriye götürülmesi durumunda, bireysel ve toplumsal kısıtlayıcıların da etkileri altında değinilen tasarım sorunlarının bazı temel özellikleri yok sayılmakta veya değişim göstermektedir. Yeni tasarım yöntemleri, geleneksel tasarım yöntemlerinden daha kompleks görülmektedir. Bunun sebebi olarak, tasarım fonksiyonunu etkileyen ve günden güne artan teknik veya çevresel faktörlerdir [50].

Endüstriyel bir ürünün tasarımı, kompleks işlemler neticesinde karar verilerek yapılan mühendislik işlemidir. Ekseriyetle ihtiyacın tanımı ile başlayan bir dizi işlem sırası içinde sorunun ideal çözümü aranırken tüm bu işlemlerin neticesinde kapsamlı bir biçimde ürünün tasarımına karar verilir. Ana hatlarıyla, tasarım işlemi üç aşamadan oluşur. Ürün tasarımında, ilk aşama şartname aşamasıdır. Bu aşamada ürün hakkında veriler toplanır ve istenen şartlar kesin olarak belirlenir. Tipik bir ürün tasarımı şartnamesi içerisinde güvenilirlik, emniyet, kullanım ömrü, performans, kalite, estetik ve ergonomi belirtilebilir. İkinci aşamada, ürün için kavramsal tasarım aşaması uygulanmaktadır. Kavramsal tasarımın temel görevi, tasarım şartnamesini karşılayan bütün fiziksel çözümlerin aranmasıdır. Ürün tasarımının üçüncü ve son safhası ayrıntılı tasarım aşamasıdır. Ayrıntılı tasarım aşamasında ürün için gerekli olan düzenlemeler yapılır ve nihai kararlar verilir. İlgili veriler değerlendirilip ürünün boyutları belirlenir. Ürünü oluşturacak olan bütün bileşenlerin şekillendirilmesi

tamamlanıp bunlara ait malzeme seçimi ve imalat yöntemlerine karar verilir. Şekil 3.1’de ürün tasarımının aşamaları sırasıyla gösterilmiştir [54].



Şekil 3.1. Ürün tasarımı aşamaları [54]

Kavramsal tasarım aşamasına, şartnameler aşaması oluşturulduktan sonra başlanır. Kavramsal tasarım aşamasında ürünün tasarımı için oluşturulabilecek bütün alternatif çözümlerin bulunması hedeflenir. Bulunan tüm alternatif çözümler içerisinde bir seçim yapılarak, uygun olan en iyi çözümler ayrıntılı tasarım aşaması için belirlenir. Mekanik sistemler ve ürünlerin tasarımına etkisi olabilecek çok sayıda unsur bulunduğu için, kavramsal tasarım aşamasında bulunan alternatif çözümler içerisinde en iyi ürünün seçimi nihai derece zor ve komplekstir.

Mekanik bir ürünün karar verme aşamasına istinaden, alternatiflerin fonksiyon, davranış ve yapısı ayrıntılı olarak bilinmelidir. Fonksiyonlar, tasarımcının istekleri ve planları üzerine oluşturulur. Davranışlar, istenilen fonksiyonu gerçekleştirebilmek için belirlenmiş araçların izledikleri bir dizi sıralı durumlardır. Yapılar, istenen hareketlere ve davranışlara ulaşılmasına yardımcı olan fiziksel bileşenler veya biçimlerdir. Bir mekanik sistem yada ürünün tasarımını etkileyen çokça sebep bulunmaktadır. Bu sebepler arasındaki etkileşimin çok iyi bilinmesi gereklidir. Böylece kavramsal tasarım aşamasında yeni çözümler üretilebilir ve söz konusu çözümlerden en uygun olanları ayrıntılı tasarım veya üretim için seçilebilirler [51].

3.1. Kavramsal Tasarım

Kavramsal tasarım aşamasında, fonksiyon yapılarının belirlenmesi kavramsal tasarımın en önemli ve kritik safhalarından birini oluşturmaktadır. Bu aşamada tasarımcıların, ekseriyetle zorda ve yetersiz kaldığı kısım fonksiyon yapılarını standart ve doğru bir dille tanımlayamamalarıdır [55].

Kavramsal tasarım aşaması tasarım işleminin belirli bir kısmını içerir. Bu aşamada temel ifadelerle indirgeme yoluyla önemli problemleri belirlemek, fonksiyon yapıları belirlemek, uygun çalışma kurallarını araştırmak ve bunları bir çalışma yapısında birleştiren bir çözüm kaidesi oluşturmak sebebiyle temel bir çözüm meydana getirilir. Kavramsal tasarım, temel bir çözümü kapsamlı bir biçimde tanımlar.

3.1.1. Kavramsal Tasarımın Mühendislik Tasarımındaki Önemi

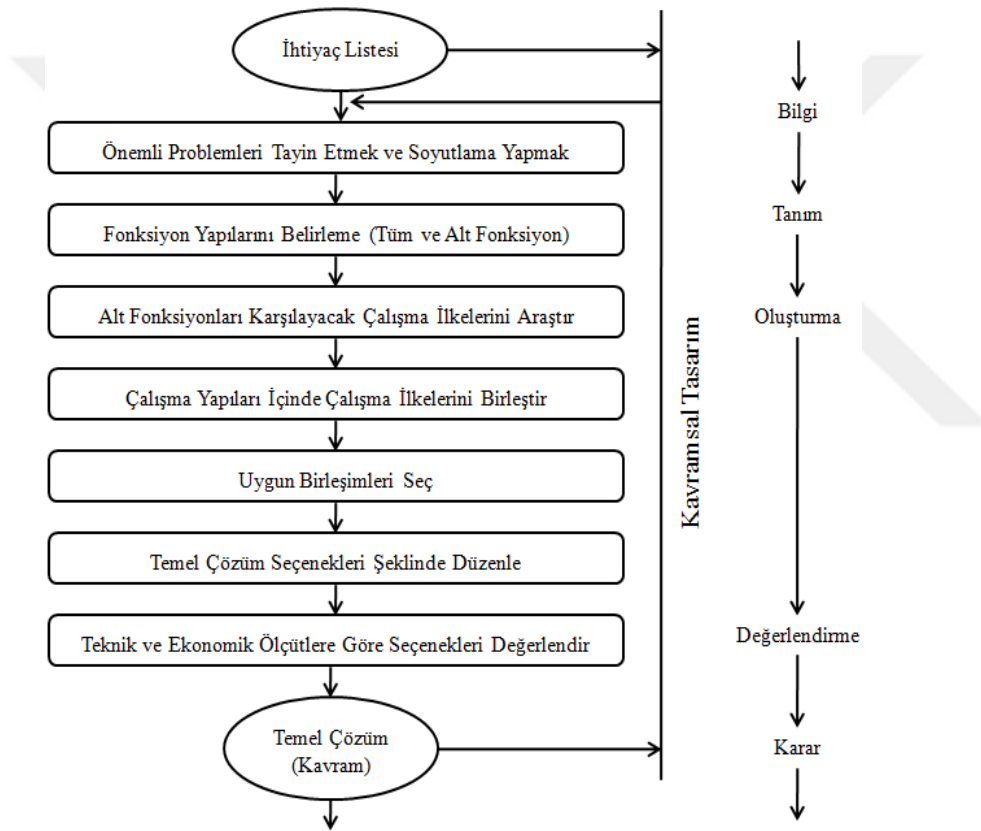
Kavramsal tasarım aşaması, Türkiye'de pek çoğu profesyonel olmayan firmalar ve hatta bir kısım profesyonel olan şirketlerce ürünün geliştirilmesi sürecinde ne yazık ki gereksiz ve önemsiz bir işlem gibi görülmektedir. Kavramsal tasarım aşaması gereken bir ürüne kavramsal tasarım süreci uygulanmadan geliştirilen ürünler, belli bir süre piyasada bulunduktan sonra diğer profesyonel seviyedeki piyasa lideri firmalara göre ürünlerinin pahalı ve gereksiz alt fonksiyonları içerdiği ya da gerekli olan bazı kritik alt fonksiyonları içermediğini uzun süren pazar ve maliyet analizleri sonucu mühendislik veya Ar-Ge departmanlarınca ortaya çıkarılmaktadır.

Başta, boşa zaman ve maliyet harcaması veya gereksiz olarak gördükleri kavramsal tasarım süreci için gerekli olan zamandan ve maliyetinden daha fazlasını ileride harcamak zorunda kalırlar ve çabalarını piyasanın güncel ihtiyaçlarına yönelik yeni ürünler geliştirmek yerine piyasada mevcut olarak bulunan ürünleri hem maliyet hem de fonksiyonel olarak iyileştirmek için harcarlar. Kavramsal tasarım işlemi için gerekli eğitimi almış profesyonel bir mühendislik kadrosu bulunan firmalar ve söz konusu işlemi gereksiz bir aşama olarak görmeyen firmalar buldukları piyasada

hem karlılık olarak hem de müşterinin ihtiyaçlarını eksiksiz ve net bir biçimde karşılayan ürünleriyle piyasanın güçlü liderleri olmaya devam edeceklerdir [55].

3.1.2. Kavramsal Tasarım Adımları

Kavramsal tasarım, müşterinin isteklerine uygun bir ihtiyaç listesi oluşturma ile başlayarak ideal bir çözüm bulunmasıyla son bulur. Şekil 3.2’te kavramsal tasarım sürecindeki basamakları göstermektedir.



Şekil 3.2. Kavramsal tasarım süreci [55]

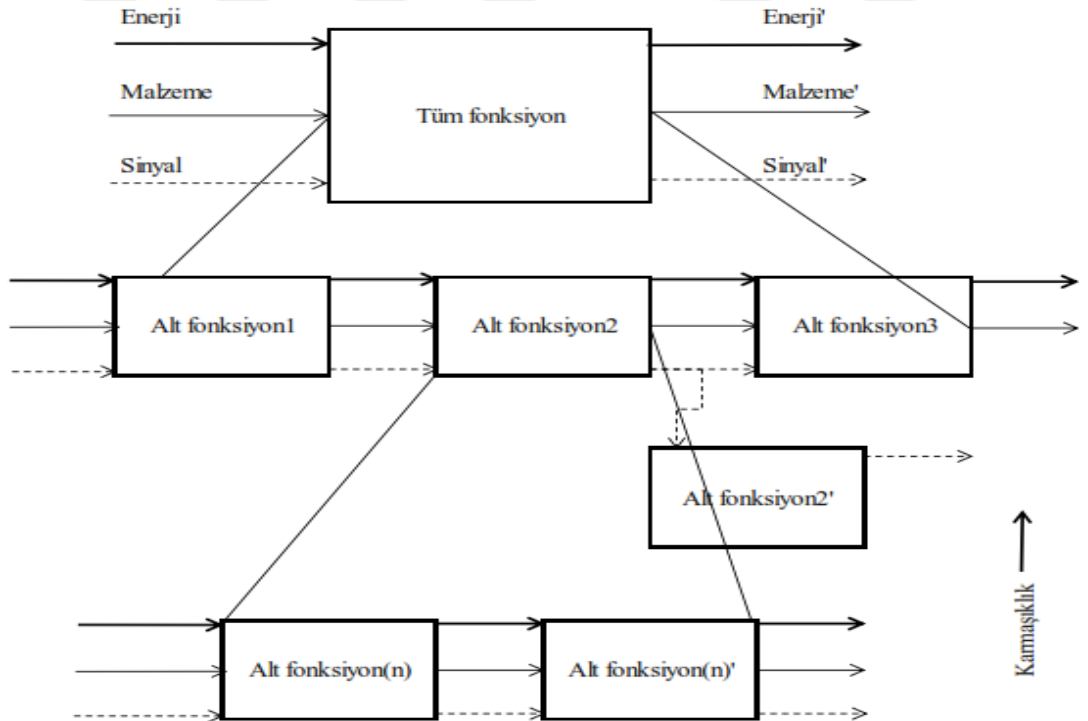
Fonksiyon Yapıları Belirleme

İhtiyaçlar, girdi (input) ve çıktıları (output) arasındaki hedeflenen bütün ilişkiyi ifade eden fonksiyonu belirlemedir. Genelleme ile temin edilen problem formülasyonu neredeyse aynı şeyi yapmaktadır. Böylelikle, tasarım problemine bağlı en önemli

nokta formülasyonu elde edildiği vakit, bir tüm (genel) fonksiyonu saptama imkanı doğar. Bu; enerji, malzeme ve sinyaller akışı üzerine kurulmuş olarak, blok diyagramı kullanımıyla girdi ve çıktılar arasındaki çözüm-bağımsız ilişkiyi ifade edebilir [56].

Sorunun komplekslik seviyesine bağlı olarak meydana gelen tüm fonksiyon, buna paralel az çok kompleks olacaktır. Komplekslik ile girdi ve çıktılar arası ilişkilerin oldukça az belirgin olduğu kastedilir.

Tüm fonksiyon daha az alt fonksiyonlara bölünebilir. Bireysel alt fonksiyonlar birleşimi, tüm fonksiyonu temsil eden bir fonksiyon yapısı oluşturur. Şekil 3.3'de tüm fonksiyonu alt fonksiyonlara bölünerek elde edilen bir fonksiyon yapısı şematik olarak gösterilmektedir. Bu model, keza kara kutu (blackbox) modeli olarak da isimlendirilir. Kompleks fonksiyonları bölmedeki amaç, sonraki çözümü aramayı kolaylaştıracak olan alt fonksiyonları saptama ve basit ve anlaşılması zor olmayan bir fonksiyon yapısında bu fonksiyonları birleştirmektir [57].



Şekil 3.3. Kara kutu modeli [57]

Tüm fonksiyonlar bireysel alt fonksiyonlardan daha kompleksler ve özellikle söz konusu durum, hangi alt fonksiyonun çözümleri aramaya en uygun başlama noktası olacağını netleştirecektir. Bir fonksiyon yapısı, mevcut ürün analiz edilerek sağlanır. İhtiyaç listesi özel isteklerine bağlı olarak bu fonksiyon yapısı, özel alt fonksiyonları değiştirme, ekleme veya ihmal etme veya bunları birleştirme yolunu değiştirmek suretiyle farklı yapılabilir. Fonksiyon yapısı hazırlamanın diğer bir avantajı ise bunun mevcut veya yeni geliştirilen sistemleri açık tanımlamaya izin vermesidir.

3.1.3. Ürün Tasarım Sürecine Kavramsal Tasarım Etkisinin Sonucu

Kavramsal tasarıma bağlı olan bir ürün geliştirme aşamasında; zayıf parametrelerin şekillendirme ve ayrıntılı tasarımdan önce net olarak belirlenip gerekli önlemlerin prototip üretim yada seri üretim öncesi alınabileceği açık bir şekilde görülmektedir.

Özetle firmalar kavramsal tasarım sürecini ürün geliştirme süreçlerine dahil etmeleri sonucunda, geliştirilecek olan ürüne ait pek çok zayıf ve pozitif parametreleri sistematik bir yolla kavramsal tasarım süzgecinden geçirerek tahmin edebilirler [58].

Geliştirilecek olan ürüne ait zayıf parametreler, kavramsal tasarım aşamasında öngörülebilir olup zayıf parametreler üzerine ürün hala tasarım aşamasındayken gerekli aksiyonlar alınıp ürünün tasarımı iyileştirilebilir. Söz konusu süreci kullanan firma, zamanında uygun ürün geliştirebilmede, diğer rakip firmalara göre bir adım önde olacaktır.

Kavramsal tasarım aşamasının ürün tasarım işlemine sağladığı bir diğer avantaj ise; geliştirilecek ürünün pozitif yönlerinin tasarım sürecindeyken tahmin edilebiliyor olmasıdır. Geliştirilecek ürünün, piyasada kendini hangi pozitif yönleri ile göstereceği hakkında satış ve sipariş kısımlarına daha ürün kavramsal tasarım sürecindeyken ipucu verecektir [55].

3.2. Ağırlık Oranı Metodu

Önem dereceli karar verme yöntemlerinde alternatif çözümlere etkide bulunan ölçüt değerlerine, seçim önceliğini belirleyecek şekilde ağırlık oranları verilir. Böylece, karar verici ölçütlerin alternatifler üzerindeki etkilerini saptayarak istenen ölçek aralığı içerisinde alternatif üzerindeki toplam etki miktarını belirleyebilir. Önem dereceli metotlarda en güncel ve geçerli hesaplama tekniği Ağırlık Oran Metodu'dur.

Alternatif ürünlerin ölçütlerine ait niteliksel ve sayısal bütün değerlerin hesaplanabilir ifadelerle dönüştürülmesinde, ölçekleme teknikleri kullanılır. Alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılacak çok iyi, fena değil, orta, kötü vb. niteliksel değerlendirmeler ilgili ölçekleme sistemleri kullanılarak tamamen ölçülebilir ifadelerle dönüştürülebilir. Kullanılan örnek bir (1-9) ölçeğine ait yapı şu şekilde oluşturulabilir [59]:

- 9 = Çok iyi memnuniyet derecesi
- 8,7,6 = İyi memnuniyet derecesi
- 5 = Orta memnuniyet derecesi
- 4,3,2 = İlimli memnuniyet derecesi
- 1 = Kötü/Çok kötü memnuniyet derecesi

Ağırlık oranı metodu ile üç alternatif ürün içinden en iyisi bulunmaktadır (Çizelge 4.2.). Çizelge 3.2.'deki veriler kaynak olarak, Çizelge 3.1.'den alınmıştır. Çizelge değerleri arasındaki niteliksel farklılıklar 1-9 ölçek aralıklı düzenlemeye bağlı olarak yenilenmiştir. Elde edilen düzenlenmiş ve aynı ölçek aralığına sahip ölçüt değerleri Çizelge 3.2.'de görülmektedir [51].

Çizelge 3.1. Ağırlık oranı örneği için kaynak çizelge [51]

	C ₁ Maliyet	C ₂ Rahat Kullanım	C ₃ Ağırlık (kg)	C ₄ Aletsiz Ayarlanma	C ₅ Bileşenlere Uygunluğu	C ₆ Ortalama Ömür (Yıl)
A ₁	100.-	++	10	Hayır	Orta	4
A ₂	75.-	+	13	Hayır	Kötü	7
A ₃	125.-	+++	20	Evet	İyi	5

A_i = Alternatif ürün i , $i = 1, \dots, n$;

C_j = Ölçüt j , $j = 1, \dots, m$;

x_{ij} = A_i alternatifinin özelliği

e_{ij} = A_i alternatifinin özelliği C_j ölçütü yönünden etkisi

$V(A_i)$ = Ölçütlerin tamamı etkisinde A_i 'in değeri

λ_i = C_j ölçütlerinin önem göstergesi

Çizelge 3.2. Ağırlık oranı elde edilen sonuçlar [51]

	C_1 Maliyet	C_2 Rahat Kullanım	C_3 Ağırlık (kg)	C_4 Aletsiz Ayarlanma	C_5 Bileşenlere Uygunluğu	C_6 Ortalama Ömür(Yıl)	
λ_i	20	40	12	5	15	8	$\Sigma\lambda_i e_{ij}$
A_1	8	6	9	1	6	3	627
A_2	9	4	7	1	2	8	523
A_3	3	9	3	88	8	6	664

Ölçek aralıkları ayarlandıktan sonra, ağırlık faktörü λ_i ölçütlere uygulanır. Ölçütlerin ağırlık değeri oranları aynı olmayabilir. Belirlenen ölçüte en büyük ağırlık oranı en önemli olana verilmesi gerekir. C_1 ölçütünün ağırlık oranı C_2 ölçütünün tahmini olarak %50'si, C_4 ölçütü ise C_1 ölçütünün %25 gibi oranlar kullanılarak, 1, 10 veya 100 gibi ölçeklere toplam ağırlık oranı belirlenebilir [59].

Çizelge 4.2.'de verilen A_1 , A_2 , A_3 alternatif ürünleri içerisinde $\Sigma\lambda_i e_{ij}$ toplam ağırlık oranı en yüksek A_3 olduğu için, alternatif çözüm olarak seçilebilir. Alternatifin toplam ağırlık oranı;

$$V(A_i) = \sum_{j=1}^m \lambda_i e_{ij} \quad (4.1)$$

denklemini sayesinde hesaplanır. Hesaplanan $V(A_i)$ değerleri arasından en yüksek değere sahip olan, en iyi alternatif ürün olarak seçilir.

Niteliksel değerlendirme metotlarından çoğu, karar verme işleminde bu yöntemi kullanmaktadır. Kullanılan λ_i ve e_{ij} ölçeklerini karar verici bağımsız olarak belirlenebileceği gibi bazı durumlarda standartlaşmada yapılabilir [60].

Ölçek aralığı değerini 0,0-1,0 arasında belirlendiği durumda, ölçütlerin alacağı değerler;

0,0 = Tamamen memnuniyetsiz lt

.

.

0,5 = Orta düzey memnuniyet lt

.

.

1,0 = En iyi memnuniyet ölçütü

şeklinde belirlenmiştir. Ağırlık lek değer de bağımsız olarak seçilebilmesine rağmen, 1-100 ölçek aralığından seçilmesi önerilir [59]. Herhangi bir ölçek değeri kullanıldığı durumda, alternatiflerin toplam değeri;

$$V(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_i e_{ij}}{\sum_{j=1}^m \lambda_i} \quad (4.2)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır.

4. İNSANSIZ KARA ARACI SİSTEMATİK TASARIMI

4.1. Geliştirilen Tasarım İşlem Modeli

İnsansız kara araçlarının genel tasarımının yapılması işleminde, tasarımı direkt olarak etkileyen çok sayıda alt sistemler ve söz konusu sistemler arasında karmaşık ilişkiler ağı bulunmaktadır. Gerçekleştirilecek tasarım ile ilgili istekler, mevcut sistem ilişkilerine dayanarak değerlendirilip en uygun olacak çözüme karar verilebilmesi için, sistematik tasarımda alternatif çözümler üretilmesi ve bu üretilen alternatif çözümlerin şartname ihtiyaçları açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Oluşturulan sistematik tasarım işleminden sonra, insansız kara aracı için harcanan tasarım süresi, maliyeti, kalitesi gibi unsurlarda olumlu yönde gelişmeler görülmektedir. İnsansız kara araçlarının üretiminde kullanıcı ihtiyaçları hesaba katılarak gerçekleştirilecek doğru bir sistematik tasarım işleminden sonra, üretimi yapılacak insansız kara aracının maliyetinde büyük bir oranda düşüş sağlanabilir.

İnsansız kara aracı gibi kompleks yapıya sahip olan robotların, sistematik tasarım yöntemleri kullanılarak alternatif tasarım ile çözülmesi ve alt fonksiyonlarına uygun fiziksel sistemlerin graf karar verme sistemleriyle seçimi gerçekleştirilebilir. Sistematik tasarım işleminin verimli yapılabilmesi için tasarım katalogu hazırlanır. İnsansız kara araçlarının sistem bileşenlerine ait alternatif çözüm önerilerini gösteren tasarım katalogları ya da tasarım kataloglarındaki elemanların genel özelliklerinin bulunduğu tasarım veri tabanları, graf sistemi ile karar vermede odak noktasını oluşturur. İnsansız kara araçlarının alternatif tasarım çözümleri için hazırlanmış veri tabanlarının en etkili biçimde kullanımı, üzerinde çalışılan amaca uygun insansız kara aracının tüm fonksiyon ve alt fonksiyon yapı ilişkilerinin en açık bir biçimde belirlenmesi ve tasarım işlemine ait bileşenlerin seçim sıralarının kontrol edilebilmesi ile sağlanır.

Geliştirilen tasarım işlem modelinin temel yapıları problemin tanımı, karar verme, ve sonuç olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır.

4.1.1. Problemin Tanımı Aşaması

Geliştirilen sistematik tasarım modelinin ilk aşaması olan şartname bilgileri, bu aşamada tasarımı gerçekleştirilecek olan insansız kara aracına ait tanımlama, kısıtlama ve ihtiyaçlar belirlenip hazırlanır. Tasarım şartnamesinde belirlenen sorunun tasvirinin yapılmasından sonra, sistematik tasarım tekniğine bağlı olan fonksiyon yapıları kullanılarak, sorunun çözümüne başlanır. Kullanıcı istekleri, tasarım kısıtlamaları verilerine bakılarak, insansız kara aracına ait tüm fonksiyon yapısı belirlemek sorunun genel amacıdır. Tüm fonksiyon yapısı oluşturulurken, istenilen insansız kara aracına ait özellikler belirtilir. Sistemin girdisi olan enerjinin biçimi, sinyal gibi verilerle sistemin çıktısı olan veriler tüm fonksiyon üzerinde belirtilmelidir. Bu biçimde hazırlanan tüm fonksiyon yapısı, kara kutu sistem yapısındadır.

Tüm fonksiyon yapıları sorunun çözümü ile ilgili ayrıntılı açıklamalar içermez. Dolayısıyla tüm fonksiyon yapısının içeriği bozulmaması koşuluyla, alt fonksiyon yapılarına bölünür. Alt fonksiyonların düzenlenmesi esnasında enerji iletimi, sinyal gibi özelliklere bağlı yön bilgileri ve ilişkilerine yer verilir. Oluşturulacak olan alt fonksiyonların her birinin, tasarım katalogundaki fiziksel temsillerden yada fonksiyonlardan birine gelecek şekilde bölünmeleri, tercih edilen gösterim biçimidir. İnsansız kara araçlarının fonksiyon yapıları kullanılarak, yapıların oluşturulması ve temsil edilmesi diğer yöntemlerdeki uygulamalara nazaran daha kolay, anlaşılır ve katalog çözümleri yada veri tabanı için uyumludur. Ayrıca sistem ilişkilerinin belirlenmesinde daha açık tanımlama ifadesi sağlamaktadır.

4.1.2. Karar Verme Aşaması

Şartnamede belirlenen istekler, ihtiyaçlar ve kısıtlamalar sonrasında fonksiyon yapıları kullanılarak en uygun çözüm için karar verme aşamasında bir değerlendirme yapılır. Verilen karar sonrasında, insansız kara aracı tasarımı için uygun alt sistem elemanlarının seçimi bu aşamada gerçekleşir. Kullanılan tasarım modelinin karar verme aşamasında, sistematik tasarım tekniğinde verilerin temsilinde kullanılan graf

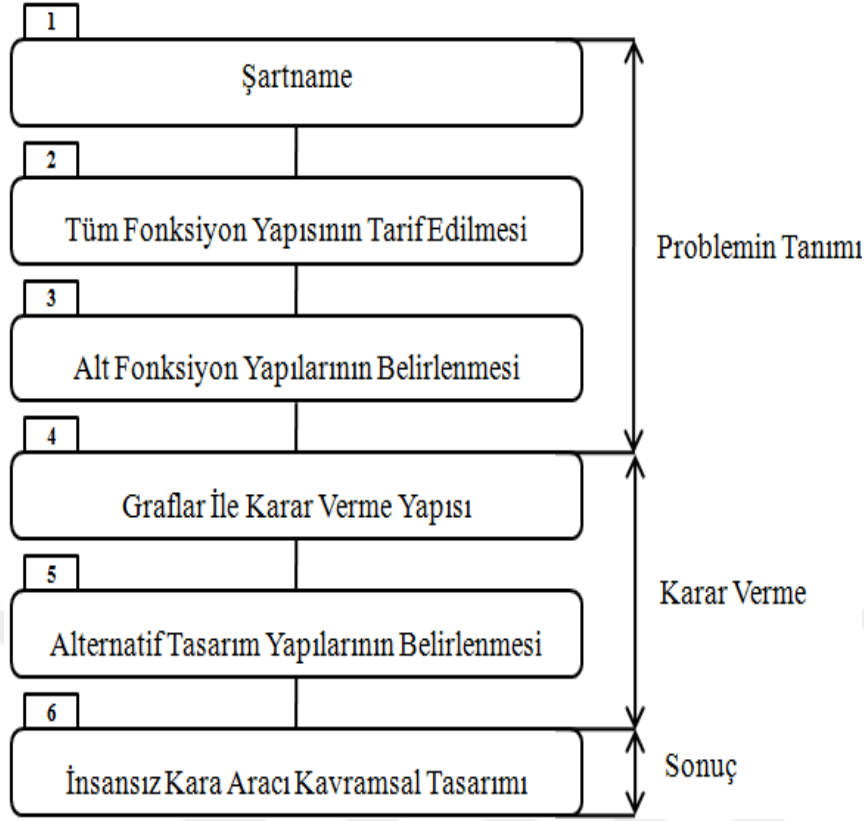
karar verme yapısı kullanılmaktadır. İnsansız kara aracı tasarımında kullanılacak olan fonksiyon ve ihtiyaç ilişkileri, oluşturulan graf temsilleri ile tanımlanır. Graflar kullanılarak yapılacak tanımlamalardaki ağaç yapılarını, "Eğer - O Halde" kalıbı içerisinde kural cümleleri haline getirmek oldukça kolaydır. "Eğer - O Halde" kural cümleleri kullanılarak hazırlanan veri tabanının, sistematik tasarımında ihtiyaç duyulan, tasarım bilgi tabanının kurallarının oluşturulmasında kullanılır.

Geliştirilen sistematik tasarım işlem modelinde, alternatiflerin değerlendirilmesi için, ihtiyaç-fonksiyon ilişkilerine dayalı graf temsilleri kullanılmıştır. Hazırlanan bu karar sistemi ile tasarımcının bütün ölçütler eşliğinde alternatif çözümleri değerlendirmek için harcayacağı zaman kısalarak, tasarım maliyeti de azalmaktadır. Kullanılacak olan bu yöntem ile sorunun fonksiyon ile ifadesi, ihtiyaç-fonksiyon yapılarının belirlenmesi, tasarım katalogu kullanımı, alternatif ürün türlerinin oluşturulması, graf temsilli karar verme tekniklerinin kullanımı ile sağlanmaktadır.

4.1.3. Sonuç Aşaması

Seçilen alternatif tasarım çözümünün, ayrıntılı tasarım aşamasına geçilmeden önce tasarımın sonlandırıldığı bölümdür.

İnsansız kara aracının sistematik tasarımı için geliştirilen tasarım modeli ile tasarım yapılarak sonuca bağlandığı aşamadır. Sistem yapılarının bir kataloga bağlı kalınarak oluşturulması sonucunda, katalogda yer alan yapılardan uygun olanlarının seçimi yapılarak insansız kara aracının fiziksel olarak alt sistemi belirlenebilir.



Şekil 4.1. Geliştirilen tasarım işlem modelinin genel yapısı

Şekil 4.1'de gösterilen insansız kara aracı sistematik tasarım modeli işlem aşamaları sırasıyla şu şekilde özetlenebilir:

1. Şartname: İnsansız kara aracı tasarımının başlangıç aşamasıdır. Tasarımcı ve kullanıcı istekleri, ihtiyaçlar ve sınırlamalar belirlenir. Şartname aşamasında, sistematik tasarımının modelinin çözüm aramada kullanabileceği her türlü veri temin edilmelidir. Kullanıcı isteklerini kapsayan verilerin, müşteri yada tasarımcıdan istenmesi esnasında, özel olarak düzenlenmiş şartname formları üzerindeki onay kutularının işaretlemesi yeterli olabilir. Sistematik tasarımda şartname ihtiyaçlarının eksiksiz bir şekilde belirtilmesi ile sorunun tarif edilmesi mümkündür. Dolayısıyla şartname hazırlama evresi sistematik tasarımın en önemli bölümlerinden birisidir.

2. Tüm fonksiyon yapısının belirlenmesi: Belirlenen şartname isteklerinin amaçlarını anlatan, sisteme giren ve çıkan verileri göstermek için hazırlanmış, genel bir fonksiyon yapısı gösterimidir. Tasarımı gerçekleştirilecek olan insansız kara aracının sistem girdileri ve çıktıları, belirlenen bir fonksiyon üzerine işaretlenir.
3. Alt fonksiyon yapılarına ayrıştırma: Tüm fonksiyon yapılarının açık bir şekilde anlatılması, sistemlerin birbirleriyle olan ilişkilerinin belirlenmesi, veri tabanından yada katalogdan fiziksel ilişkilerin sağlanması gibi işlemler alt fonksiyon yapılarına parçalanarak tanımlanır.
4. Karar verme: Oluşturulan tasarım alternatifleri içerisinde, tasarım ihtiyaçlarını, saptanan önem derecelerine göre değerlendirerek, en uygun olan çözüm tipinin seçim işlemi karar verme aşamasının vazifesidir. Karar verme aşaması için, kurallara dayalı bir veri tabanı oluşturulması önerilmektedir.
5. Tasarım alternatiflerinin üretilmesi: Aynı tür tasarım isteklerini karşılayan, farklı fiziksel yapılarda farklı çözümler üretilebilir. Alternatif çözümleri ortaya çıkarmaya yönelik çalışmalar, sistematik tasarım yöntemlerinin geliştirilmesinde ki önemli nedenlerin başında gelir.
6. Kavramsal tasarım sonu: Sistematik tasarım modeli işlem sırası takip edilerek, insansız kara aracının kavramsal tasarımı sonlandırılır. Kullanılan tasarım modelinde aranılan yapıların kavramsal olarak modellenmesi yeterli olmaktadır. Oluşturulan kavramsal tasarımın ayrıntılı bir tasarıma dönüştürülmesi, bazı mühendislik hesapları ile sağlanabilir.

4.2. İnsansız Kara Araçları İçin Şartname Hazırlama

Geliştirilen tasarım modelinde ilk aşama problemin tanımlanmasıdır. Probleminin ayrıntılı bir şekilde incelenerek, gerekli olan tasarım şartnamesinin hazırlanması ile sistematik tasarım süreci başlamış sayılmaktadır.

İnsansız kara aracı sistematik tasarımında, hazırlanacak şartname aşamasının ana görevlerinden bir diğeri de, karar verme aşamasında seçici ve sınırlandırıcı bir biçimde kullanılacak olan verilerin belirlenmesidir. İnsansız kara aracı tasarımı için hazırlanacak şartname aşamasının başlangıç noktası, tasarımı istenilen insansız kara aracının hangi amaçlı kullanılacak olmasıdır. Yapılacak olan işlemler genel olarak teorikte bilinmesine rağmen, problemin tanımı, amaçların listelenmesi, kontrol listelerinin oluşturulması gibi aşamaların başlangıçta doğru olarak yapılması büyük önem taşımaktadır. İnsansız kara aracı tasarımında mevcut probleminin kısa bir tanımının yapılmasıyla şartname hazırlama aşamasına başlanabilir.

İnsansız kara aracı ile ilgili problem kısaca şu şekilde özetlenebilir:

İnsansız kara aracı kötü doğa koşulları ve zorlukları ile mücadele etmek, yumuşak ve engebeli zeminlerin üstesinden gelebilmek için hareket yeteneği kazandırılan ve bu hareket yeteneğini uygun intikal konfigürasyonu ile gerçekleştiren, kullanım amacına göre üzerine bazı faydalı yükler alabilen, uzun görev süreleri sağlayabilen, manevra kabiliyeti artırılabilen, kapsama alanı yüksek, uzaktan kontrol yada otonomi yeteneği olan, kullanıcı veya müşterinin belirleyeceği genel ve özel şartlar dikkate alınarak, dayanıklı ve fonksiyonel bir insansız kara aracı seçimi yapmaktır.

4.2.1. Amaçların Listelenmesi

4.2.1.1. Ürün Fonksiyon İşlemi Tanımlanması

Tasarımı yapılacak insansız kara aracının faydalı yük ve aracın idaresinin seçimi tasarımcının isteğine göredir. Tasarım, tasarımcının insansız kara aracını kullanmayı düşündüğü sektörün ihtiyaçlarına mümkün olan her türlü katkıyı sağlayabilmelidir.

İnsansız kara aracında, alt bileşenlerin seçiminde gerekli fonksiyonu icra edebilenler tercih edilir. Tasarımcı istekleri hususunda, fonksiyonel özellikleri daha gelişmiş insansız kara aracı tasarımı yapılır.

4.2.1.2. Kontrol Listesi Düzenlenmesi

İnsansız kara aracı için oluşturulacak şartname aşamasında parça bileşenlerinin seçimi için Kısım 4.4’de anlatılan “Tasarım katalogu” referans alınmaktadır. Düzenlenecek olan kontrol listeleri için tasarımcı istekleri, tasarım özellikleri vs. kontrol elemanları kullanılabilir.

İnsansız kara aracı tasarımına etkiyecek nedenlerin başında, insansız kara aracının kullanım amacının, eyleyicisinin ve intikal konfigürasyonunun belirlenmesi gelir. Kontrol yönteminin belirlenmesi, süspansiyon sisteminin seçimi, yönlendirme sisteminin belirlenmesi, ortalama ağırlığının kaç kilogram aralığında olacağını saptanması, insansız kara aracının çalışma süresinin ve çekiş gücünün hangi seviyede olacağını belirlenmesi, dayanıklılığı ve çalışacağı arazi tipinin belirlenmesi vb. bütün seçimler insansız kara aracının kullanım amacına eyleyicisine ve intikal konfigürasyonuna bağlı olarak belirlenecek alt sistemlerdir.

İnsansız kara aracı sistematik tasarımında karar verme yapısı olan graf sistemiyle uygun alternatiflerin oluşturulabilmesi için, şartname aşamasında tasarımcıdan yada müşteriden bazı cevaplar istenmektedir. Tasarımcı yada müşteriden karar verme sisteminin çıkarım geliştirmede kullanacağı bazı sorular şu şekilde düzenlenebilir:

1. Tasarımı yapılacak İKA'nın idaresi nasıl sağlansın?
 - Uzaktan Kontrol
 - Otonom
2. Oluşturulacak İKA'nın kullanım kapsama alanı ne durumda olsun?
 - Düşük ($x < 10 \text{ km}^2$)
 - Orta ($10 \leq x < 25 \text{ km}^2$)
 - Yüksek ($25 \leq x \text{ km}^2$)
3. Tasarlanacak İKA'nın dayanıklılık durumu ne derece olsun?
 - Düşük
 - Orta
 - Yüksek
4. Tasarlanacak İKA'nın ortalama ağırlığı ne kadar olsun?
 - Mikro Sınıf ($x < 5 \text{ Kg}$)
 - Minyatür Sınıf ($5 \leq x < 15 \text{ Kg}$)
 - Küçük-Hafif Sınıf ($15 \leq x < 200 \text{ Kg}$)
 - Küçük-Orta Sınıf ($200 \leq x < 1000 \text{ Kg}$)
 - Küçük-Ağır Sınıf ($1000 \leq x < 10000 \text{ Kg}$)
 - Orta Sınıf ($10000 \leq x < 15000 \text{ Kg}$)
 - Büyük Sınıf ($15000 \leq x \text{ Kg}$)
5. İKA'nın gürültü seviyesi ne durumda olsun?
 - Sessiz ($0 < x < 70 \text{ dB}$)
 - Normal ($70 \leq x < 100 \text{ dB}$)
 - Gürültülü ($100 \leq x \text{ dB}$)
6. İKA'nın çekiş gücü ne seviyede olsun?
 - Orta ($0 < x < 250 \text{ HP}$)
 - Yüksek ($250 \leq x < 750 \text{ HP}$)
 - Çok Yüksek ($750 \leq x < 1500 \text{ HP}$)
7. Tasarlanacak İKA'nın ivmelenmesi hangi kademedede olsun?
 - Düşük ($0 < x < 2 \frac{\text{km}}{\text{h}^2}$)
 - Orta ($2 \leq x < 4 \frac{\text{km}}{\text{h}^2}$)
 - Yüksek ($4 \leq x < 6 \frac{\text{km}}{\text{h}^2}$)

8. İKA'nın maksimum hızı hangi seviyede olsun?

- Düşük ($x < 80$ km/h)
- Orta ($80 \leq x < 100$ km/h)
- Yüksek ($100 \leq x < 150$ km/h)

9. Oluşturulması istenilen İKA'da görev süresi nasıl olsun?

- Kısa ($x < 4$ h)
- Orta ($4 \leq x < 30$ h)
- Uzun ($30 \leq x < 50$ h)

10. İKA sahada hangi arazi tipinde kullanılacaktır?

- Düz Sert Zemin
- Düz Yumuşak Zemin
- Engebeli Sert Zemin
- Engebeli Yumuşak Zemin

11. İKA'nın manevra kabiliyeti ne düzeyde olsun?

- Düşük
- Orta
- Yüksek
- Çok Yüksek

12. Tasarımı yapılacak İKA temel olarak nerede kullanılmak isteniyor?

- Kapalı Ortam
- Açık Ortam

13. Tasarımı istenilen İKA'nın kullanım amacı nedir?

- Keşif, gözetleme ve istihbarat
- Lojistik
- Bomba İmha
- Saldırı veya Geri Emniyet
- Yangın Söndürme

Şartname aşamasında sorulan 13 sorudan 1. ve 2. sorular insansız kara aracı seçimde kullanılmasının gerekli olduğu düşünölmüş fakat alt fonksiyon yapılarının oluşturulmasında işleme dahil edilmemiştir. Çünkü burada yapılan sistematik tasarım insansız kara araçlarındaki yazılımdan ziyade donanımsal manadadır.

Aynı şekilde malzeme seçimi de alt fonksiyonlara dahil edilmemiştir. 3. soruda dayanımdan kaynaklı malzeme seçimi için 3 tür belirlenmiştir. Bunlar; metal, polimer ve kompozit malzemeleridir. Tasarlanmak istenen insansız kara aracında dayanıma göre seçim yapılacaktır. Metaller; yüksek dayanım, yüksek mukavemet, yüksek süneklik, yüksek darbe direnci ve sıcaklığa karşı dayanıklıdırlar. Polimerler; düşük dayanım, düşük mukavemet, yüksek süneklik, düşük darbe direnci, ve sıcaklığa karşı dayanıklı değildirler. Kompozit malzemeler; yüksek dayanım, yüksek mukavemet, yüksek darbe direnci ve sıcaklığa karşı dayanıklılıkları yüksektir.

Şartname aşamasında sorulan diğer 10 soru kullanılarak fiziksel manadaki insansız kara aracı sistematik tasarımını ortaya çıkarmaktadır.

4.2.2. Amaçların Analiz Edilmesi

İnsansız kara aracı tasarımı için belirlenen amaçların analiz edilerek, benzer olanların elenmesi, gereksiz bulunanların tespit edilip çıkarılması gerekir. Amaçların belirlenmesinde tasarımcı yada kullanıcı cevapları dikkate alınır.

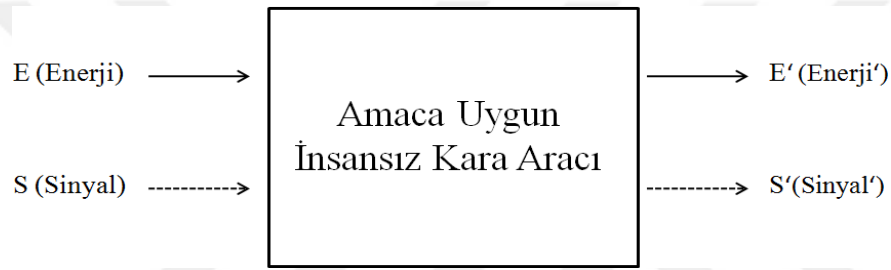
4.2.3. Amaçların Düzenlenmesi

Kullanıcı tarafından belirlenen tasarım istekleri, ihtiyaçları ve sınırlandırıcıları geliştirilen tasarım işlem modeline uygun olarak sistematik bir şekilde işlenebilmesi için, söz konusu istekler ile tasarım sisteminin amaçları birlikte analiz edilmelidir. Yapılan amaç analizinden sonra istekler ile amaçlar arasında uygun olanlar belirlenir.

4.3. İnsansız Kara Aracı Kavramsal Tasarımı

Kavramsal tasarım aşamasında, tasarımı yapılan sistem yapısının fonksiyon olarak temsili yapılır. İlgili fonksiyon yapısında sistemin girdisi olan enerji ve sinyal bileşenleriyle sistemin çıktıları olan enerji ve sinyaller belirlenir.

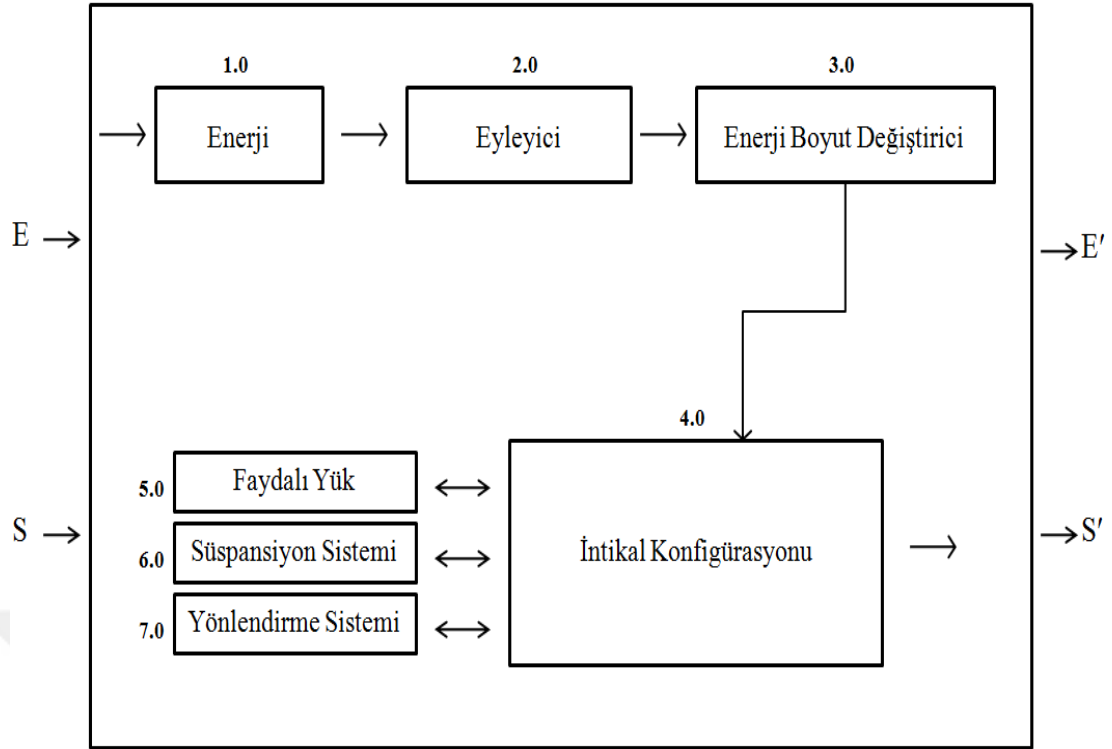
İnsansız kara aracının tüm fonksiyon yapısı Şekil 4.2.'de görülmektedir. İnsansız kara aracının tüm fonksiyon yapısında girdi olarak kullanılacak enerji ve sinyal bileşenlerinden, insansız kara aracına gelen sinyaller doğrultusunda gücünü sistemdeki enerji kaynağından alarak harekete geçip araziyi aşması istenmektedir.



Şekil 4.2. İnsansız kara aracına ait tüm fonksiyon yapısı

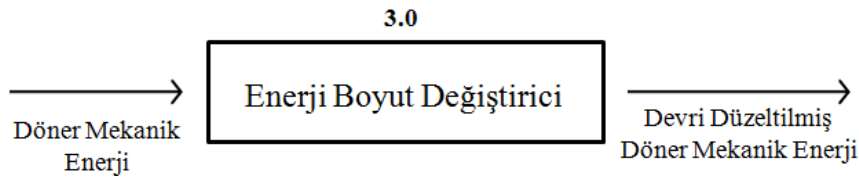
Tüm fonksiyon yapısı tasarım temsiline ilk aşamadır. Oluşturulan tüm fonksiyon yapısı, alt sistemleri içeren fonksiyonlara parçalanır. Ortaya çıkan alt sistem fonksiyonları, tüm fonksiyon yapısına bağlı kalmak şartıyla alt sistem ilişkileri ve bağlantıları açıklanır.

Şekil 4.3'deki insansız kara aracına ait alt fonksiyon yapısında sistem girdisi olarak enerji gösterilmiştir. Bu enerji, eyleyici ile mekanik enerjiye çevrildikten sonra, enerji iletim sistemi sayesinde enerji boyut değiştiriciye gönderilerek devri ayarlanır. Gelen sinyaller doğrultusunda belirlenen devir sayısındaki mekanik enerji, enerji iletim sistemi sayesinde intikal konfigürasyonuna nakledilir. İnsansız kara aracı, adapte edilen yönlendirme sistemi ve süspansiyon sistemi ile faydalı yükünde entegre edilmesiyle birlikte intikal konfigürasyonu sayesinde harekete geçer.



Şekil 4.3. İnsansız kara aracına ait alt sistem fonksiyonları yapısı

Enerji boyut değiştiricisi ek parametresi tork ve hız kontrolü yapan elemandır. Motoru türüne göre dişli kutusu veya motor sürücüsü olarak seçimi yapılır.



Şekil 4.4. Enerji boyut değiştirici ek parametresinin fonksiyonel gösterimi

Kavramsal tasarımın başlangıç noktasını, sistem yapılarının ve ilişkilerinin saptanması oluşturur. Ulaşılan alt sistem yapılarını pratikte sağlayabilecek bütün mekanik yapılar bilinmelidir. Böylece farklı yapı biçimleri kullanılarak alternatif çözümler ortaya çıkarılabilir. Bulunan tüm bu alternatif çözümler farklı muhakeme yöntemleri kullanılarak en uygun seçim yahut seçimler bulunacak şekilde değerlendirilir. Üretilen çözümlerle şekillendirme tasarımdaki son aşamadır.

Kavramsal tasarımda uygun olan çözümün sembolik bir resmi yeterli olmaktadır. İlgili tasarım boyutlandırma, mukavemet hesapları ve ayrıntılı tasarım şekillendirmesinin yapılması mühendislik işlemleridir.



















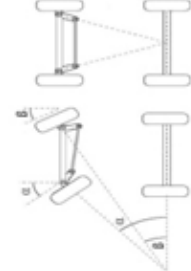
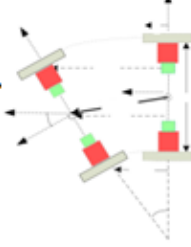

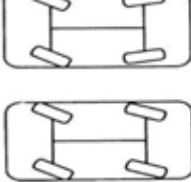
4.4. Tasarım Katalogu Oluşturma

Sistematik tasarımda, tasarımın alternatiflerinin üretilmesi, düzenlenmesi ve fonksiyonel yapılarda oluşturulacak değişim işlemlerinin yapılmasında kullanılmak için, mümkün olan en geniş sayıda çözüm sayısı ortaya koyabilen tasarım katalogları kullanılmıştır. Hazırlanan tasarım kataloglarında insansız kara aracı parametrelerinin özellikleri hakkında bilgiler, resimsel açıklamalar ve özel tanımlama bilgilerini içermektedir. Sistematik tasarımda kullanılacak genel çözüm çizelgelerinin biçiminin belirlenmesi, yapılacak insansız kara aracı tasarımının alt sistem yapısının işlem sırası uygun bir şekilde düzenlenmiştir.

Çizelge 4.1.'de insansız kara aracı tasarımında belirlenmiş alt sistem yapılarına ait, farklı varyasyonlarının çözümünün yapılabileceği, genel çözüm çizelge yapısı görülmektedir. Genel çözüm çizelgesi incelendiği zaman görüleceği gibi, alt fonksiyon sistemleri insansız kara aracı tasarımında alternatif üretmede kullanılmıştır. Aracın idaresi (kontrol yöntemi), kapsama alanı, ağırlık, malzeme, ve arazi şartları gibi tasarım alternatifi üretmede kullanılan yardımcı elemanlara çizelgede yer verilmemiştir.

Çizelgeyi oluşturan düşey çözüm önerilerindeki değişkenlerin sayılarının artırılması, oluşturulacak insansız kara aracı sistematik tasarımı alternatif sayısının artmasına neden olacaktır.

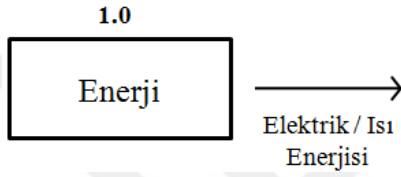
Çizelge 4.1. Tasarım katalogu

Parametre	Çözüm	1	2	3	4	5
Eyleyici	1	Elektrik Motoru 	İçten Yanmalı Motor 	Hidrolik Motor 		
Enerji	2	Pil CELL 	Batarya BATTERY 	Yakıt FUEL 		
İndikal Konfigürasyonu	3	2 Tekerlekli 	3 Tekerlekli 	4 Tekerlekli 	Çok Tekerlekli 	Paletli 
Faydalı Yük	4	Gözetleme Ekipmanları 	Taşıyıcı 	Silah Sistemi 	Manipülatör 	Su Topu 
Süspansiyon Sistemi	5	Kauçuk Esaslı Süspansiyon 	Diğer Süspansiyon 			
Yönlendirme Sistemi	6	Ackerman 	Diferansiyel 	Senkron 	4WS 	

4.4.1. Tasarım Katalogu Parametreleri

1. Enerji

İnsansız kara aracında enerji, seçilecek olan eyleyiciye göre değişim gösterir. Eyleyici parametresinde verilen, elektrik motorunda besleyici olarak pil veya batarya kullanılır. İçten yanmalı motorlar ve hidrolik motorlarda beslemesi motora gerekli olan yakıttır. Enerji parametresinin fonksiyonel gösterimi Şekil 4.5.'de gösterilmiştir. Çizelge 4.2.'de de enerji parametresinin çeşitleri ve teknik özellikleri gösterilmiştir.



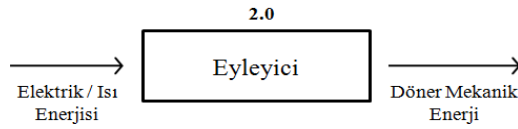
Şekil 4.5. Enerji parametresinin fonksiyonel gösterimi

Çizelge 4.2. Enerji parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri

1.0 Enerji	Şekil	Teknik Özellikler
Pil		<ul style="list-style-type: none">Elektrik enerjisini elektrokimyasal enerjiye dönüştürerek depolar. İstenilen anda depolanan enerjiyi elektrik enerjisi olarak geri verebilir.Elektrik motorlarına enerji verir.Görev süresi olarak 4 saate kadar kullanım gerçekleştirebilir.
Batarya		<ul style="list-style-type: none">Birden çok pilin birbirlerine bağlanması ile meydana gelir.Elektrik motorlarına enerji verir.Görev süresi olarak 30 saate kadar kullanım gerçekleştirebilir.
Yakıt		<ul style="list-style-type: none">İçten yanmalı motor ve hidrolik motorlara enerji verirler.Görev süresi olarak yakıt tankının büyüklüğüne göre 50 saate kadar kullanım gerçekleştirebilir.

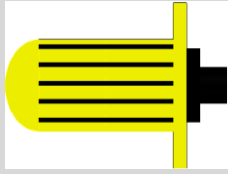
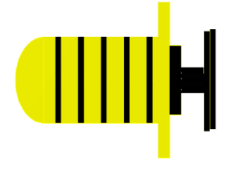
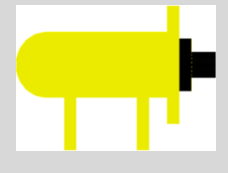
2. Eyleyici

Sistematik tasarımda insansız kara aracında kullanılmak üzere; elektrik enerjisini kullanan elektrik motoru, ısı enerjisini kullanan içten yanmalı motor ve hidrolik motor, eyleyici parametresi altında seçenekler olarak belirlenmiştir. Eyleyici parametresinin fonksiyonel gösterimi Şekil 4.6.'da gösterilmiştir. Çizelge 4.3.'de de eyleyici parametresinin çeşitleri ve teknik özellikleri gösterilmiştir.



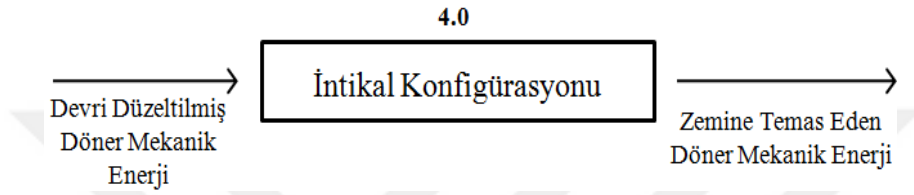
Şekil 4.6. Eyleyici parametresinin fonksiyonel gösterimi

Çizelge 4.3. Eyleyici parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri

2.0 Eyleyici	Şekil	Teknik Özellikler
Elektrik Motoru		<ul style="list-style-type: none">Ağırlığı 10 tona kadar çıkan araçlarda kullanılabilirler.70 dB altında sessiz olarak çalışırlar.Araç ağırlığına göre 80 km/h hıza ulaşabilir.250 HP'a kadar güç verebilecek seviyede motor cinsleri bulunur.%80-90 verimde çalışırlar.
İçten Yanmalı Motor		<ul style="list-style-type: none">Araç ağırlığı 200 kg'dan ağır bütün araçlarda kullanılabilirler.70-100 dB arasında ses çıkarırlar.Araç ağırlığına göre 100 km/h hıza ulaşabilir.250-750 arasında HP'a kadar güç verebilecek seviyede motor cinsleri bulunur.%40-45 verimde çalışırlar.
Hidrolik Motor		<ul style="list-style-type: none">Araç ağırlığı 10 ton'dan ağır bütün araçlarda kullanılabilirler.100 dB üzerinde ses çıkarırlar.Araç ağırlığına göre 150 km/h hıza ulaşabilirler.750-1500 arasında HP'a kadar güç verebilecek seviyede motor cinsleri bulunur.

3. İntikal Konfigürasyonu

Sistematik tasarım yaparken en çok kullanılan ve en genel olan tekerlekli ve paletli sistemler göz önünde bulundurulacaktır. Tekerlekli sistemlerde; 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli ve çok tekerlekli insansız kara araçları dahil edilecektir. İntikal konfigürasyonu parametresinin fonksiyonel gösterimi Şekil 4.7.'de gösterilmiştir. Çizelge 4.4.'de de intikal konfigürasyonu parametresinin çeşitleri ve teknik özellikleri gösterilmiştir.

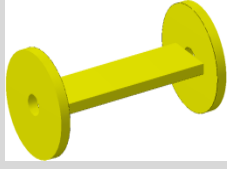
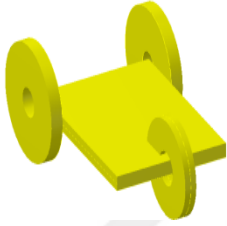
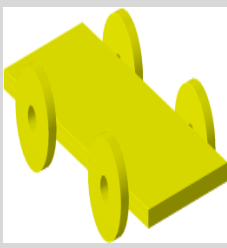
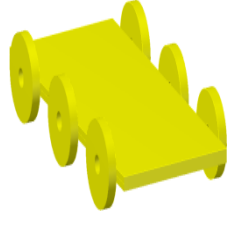
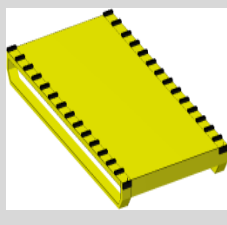


Şekil 4.7. İntikal konfigürasyonu parametresinin fonksiyonel gösterimi

İnsansız kara aracının ortalama ağırlığı; 5 kg altında ise mikro sınıf, 5-15 kg arasında ise minyatür sınıf, 15-200 kg arasında ise küçük-hafif sınıf, 200-1000 kg arasında ise küçük-orta sınıf, 1000-10000 kg arasında ise küçük-ağır sınıf, 10000- 15000 kg arasında ise orta sınıf, 15000 kg üzerinde ise büyük sınıf olmak üzere 7 sınıfta incelenmiştir.İnsansız kara araçlarının intikal konfigürasyonu çeşitlendirilmesi aracın ağırlığı hesaba katılarak stabilite esaslı olarak yapılmıştır.

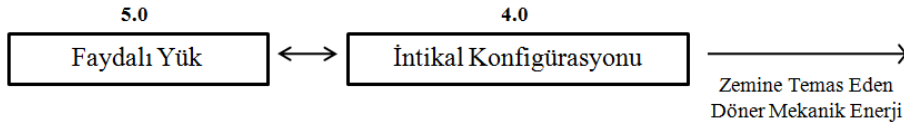
- İnsansız kara aracı mikro ve minyatür sınıfına 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitlerinin hepsi uygulanabilir.
- İnsansız kara aracı küçük-hafif sınıfına 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitleri uygulanabilir.
- İnsansız kara aracı küçük-orta ve küçük-ağır sınıfına 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitleri uygulanabilir.
- İnsansız kara aracı orta ve büyük sınıfına 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitleri uygulanabilir.

Çizelge 4.4. İntikal konfigürasyonu parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri

4.0 İntikal Konfigürasyonu	Şekil	Teknik Özellikler
2 Tekerlek		<ul style="list-style-type: none"> Motor tipi olarak elektrik motoru uygundur. Diferansiyel yönlendirme sistemi ile sürüş sağlanır. Kauçuk esaslı süspansiyon sistemi kullanılır. Keşif-gözetleme-istihbarat ve lojistik amaçlı kullanılabilir.
3 Tekerlek		<ul style="list-style-type: none"> Motor tipi olarak elektrik motoru uygundur. Diferansiyel ve senkron yönlendirme sistemleri ile sürüş sağlanır. Kauçuk esaslı ve diğer süspansiyon sistemleri kullanılabilir. Keşif-gözetleme-istihbarat, lojistik, bomba imha ve yangın söndürme amaçlı kullanılabilir.
4 Tekerlek		<ul style="list-style-type: none"> Motor tipi olarak elektrik motoru ve içten yanmalı motor uygundur. Ackerman, diferansiyel senkron ve 4WS yönlendirme sistemleri ile sürüş sağlanır. Kauçuk esaslı ve diğer süspansiyon sistemleri kullanılabilir. Keşif-gözetleme-istihbarat, lojistik, bomba imha yangın söndürme ve geri emniyet-taarruz amaçlı kullanılabilir.
Çok Tekerlek		<ul style="list-style-type: none"> Motor tipi olarak elektrik motoru, içten yanmalı motor ve hidrolik motor uygundur. Ackerman, diferansiyel senkron ve 4WS yönlendirme sistemleri ile sürüş sağlanır. Kauçuk esaslı ve diğer süspansiyon sistemleri kullanılabilir. Keşif-gözetleme-istihbarat, lojistik, bomba imha yangın söndürme ve geri emniyet-taarruz amaçlı kullanılabilir.
Palet		<ul style="list-style-type: none"> Motor tipi olarak elektrik motoru, içten yanmalı motor ve hidrolik motor uygundur. Diferansiyel yönlendirme sistemi ile sürüş sağlanır. Kauçuk esaslı ve diğer süspansiyon sistemleri kullanılabilir. Keşif-gözetleme-istihbarat, lojistik, bomba imha yangın söndürme ve geri emniyet-taarruz amaçlı kullanılabilir.

4. Faydalı Yük

Amaca en uygun insansız kara aracı tasarımında en önemli olan parametredir. Faydalı yük parametresinin fonksiyonel gösterimi Şekil 4.8.'de gösterilmiştir. Çizelge 4.5.'de de enerji parametresinin çeşitleri ve teknik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Faydalı yük parametresinin fonksiyonel gösterimi

Çizelge 4.5. Faydalı yük parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri

5.0 Faydalı Yük	Şekil	Teknik Özellikler
Gözetleme Ekipmanları		<ul style="list-style-type: none">Keşif-gözetleme ve istihbarat amaçlı kullanılır.2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli intikal konfigürasyonlarında kullanılır.
Taşıyıcı		<ul style="list-style-type: none">Lojistik maksatlı personel ve ekipman taşımacılığın da kullanımı bulunur.3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli intikal konfigürasyonlarında kullanılır.
Su Topu		<ul style="list-style-type: none">Yangın söndürme ve şüpheli paket bomba imhasında tetikleyici olarak kullanılır.3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli intikal konfigürasyonlarında kullanılır.
Manipülâtör		<ul style="list-style-type: none">Bomba imhada ve malzeme taşınmasında kullanımı mevcuttur.3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli intikal konfigürasyonlarında kullanılır.
Silah Sistemi		<ul style="list-style-type: none">Geri emniyet ve taarruzda kullanılmak üzere kullanılır.3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli intikal konfigürasyonlarında kullanılır.Yan destek ayaklı geri tepme mekanizması kullanımı yaygındır.

5. Süspansiyon Sistemi

Süspansiyon sistemi, aracın ağırlığını desteklemek, yol sarsıntılarını emmek ve sönümlemek ve doğru tekerlek şasi ilişkisi gibi lastik temasını sağlamaya yardımcı olmak için kullanılır. Süspansiyon sistemi aracın ağırlığını taşıdığı gibi lastiklerin yola tutunmasını da sağlar. Tekerleklerin araca bağlantısını yapan parçaların bütününe süspansiyon sistemi veya askı sistemi denir. Kauçuk esaslı ve diğer süspansiyon sistemi bu analizde kullanılacaktır. İKA'nın ağırlığına ve kullanılacak olan arazi sistemine göre bu ana süspansiyon sistemlerinden faydalanılacaktır. Süspansiyon sistemi parametresinin fonksiyonel gösterimi Şekil 4.9.'da gösterilmiştir. Çizelge 4.6.'da da enerji parametresinin çeşitleri ve teknik özellikleri gösterilmiştir.



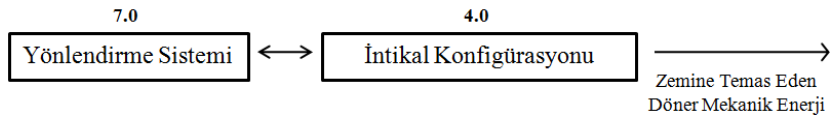
Şekil 4.9. Süspansiyon sistemi parametresinin fonksiyonel gösterimi

Çizelge 4.6. Süspansiyon sistemi parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri

6.0 Süspansiyon Sistemi	Şekil	Teknik Özellikler
Kauçuk Esaslı Süspansiyon Sistemi		<ul style="list-style-type: none">Genel olarak kapalı alan (bina içi) insansız kara araçlarında kullanılan hafif ve basit yapılı kauçuk esaslı süspansiyon sistemidir.2 tekerlekli ve 3 tekerlekli uygulamalar için uygundur.Araç ağırlığı 15 kg altında olan araçlara takılırlar.Düz-sert zeminde kullanımı uygundur.
Diğer Süspansiyon Sistemi		<ul style="list-style-type: none">Yaygın olarak açık alan (saha) insansız kara araçlarında kullanılan kompleks yapılı ve gelişmiş diğer süspansiyon sistemleridir.Tekerlekli ve paletli sınıflar için uygundur.Ağır araçlara takılırlar.Her türlü araziye uygundur.

6. Yönlendirme Sistemi

Bahsedilen yönlendirme sistemleri hareket edecekleri çevre ve çevre şartları, sahip oldukları güç depolama birimleri, yapacakları iş ve kontrol mekanizmaları dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Yönlendirme sistemi parametresinin fonksiyonel gösterimi Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. Çizelge 4.7.'de de yönlendirme sistemi parametresinin çeşitleri ve teknik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Yönlendirme sistemi parametresinin fonksiyonel gösterimi

Çizelge 4.7. Yönlendirme sistemi parametresi çeşitleri ve teknik özellikleri

7.0 Yönlendirme Sistemi	Şekil	Teknik Özellikler
Ackerman		<ul style="list-style-type: none"> 4 tekerlekli ve çok tekerlekli uygulamalar için uygundur. 4 farklı yönlendirme sistemleri arasında en düşük seviye manevra kabiliyetine sahiptir. Her türlü ortamda kullanılabilir.
Diferansiyel		<ul style="list-style-type: none"> 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli uygulamalarda kullanılabilirler 4 farklı yönlendirme sistemleri arasında en yüksek seviye manevra kabiliyetine sahiptir. Bina içi İKA uygulamalarında yaygındır. Sahada da kullanımı mevcuttur.
Senkron		<ul style="list-style-type: none"> 3 tekerlekli, 4 tekerlekli ve çok tekerlekli uygulamalarda kullanılabilirler. 4 farklı yönlendirme sistemleri arasında orta seviye manevra kabiliyetine sahiptir. Bina içi İKA uygulamalarında yaygındır. Sahada da kullanımı mevcuttur. Çok yönlülüğün istendiği durumlarda avantajlıdır.
4WS		<ul style="list-style-type: none"> 4 tekerlekli ve çok tekerlekli uygulamalar için uygundur. 4 farklı yönlendirme sistemleri arasında yüksek seviye manevra kabiliyetine sahiptir. Her türlü ortamda kullanılabilirler.

4.5. İnsansız Kara Aracı Tasarımında Alt Sistem Elemanlarının Graf Yöntemi İle Belirlenmesi

İnsansız kara araçlarının sistematik tasarımında, karar verme aşamasında graf yöntemi kullanılarak alternatifler oluşturmaya yoluna girilmiştir. Alternatiflerin oluşturulması tasarım katalogundan seçilerek gerçekleştirilmiştir. Tasarım katalogundaki parametrelerin insansız kara aracı sistemine uygunluğu için şartname aşamasından faydalanılmaktadır. Şartnamede sorulan sorular karşılığında seçim yapılacak böylece tasarlanacak insansız kara aracı sorunsuz bir şekilde hareketini gerçekleştirmiştir. Tasarım katalogu parametreleriyle oluşturulacak çözüm uzayındaki alternatifler, şartname aşaması sayesinde elekten geçirilerek 1800 alternatiften sistemin çalışmasını sağlayacak olanlar meydana çıkarılmıştır. Ağırlık oranı metodu ile de seçilen alternatifler arasından en iyi alternatifin seçimi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.11.'de şartname aşamasındaki, kontrol listelerinin düzenlenmesinde sorulan sorulardan tasarlanacak insansız kara aracının ortalama ağırlığın, gürültü sesi seviyesinin, çekiş gücünün, ivmelenmesinin ve maksimum hızının hangi seviyede olmasının istenmesiyle seçilecek eyleyici tipi karara bağlanır.

Tasarlanmak istenen insansız kara aracı basit ilişki ağı için örnek kural cümleleri ilişkilendirme grafiklerine göre oluşturulmuştur. Her grafiğin kendine özel kural cümleleri bulunur.

Kural 1

Eğer

Ortalama ağırlık olarak mikro, minyatür, küçük-hafif, küçük-orta veya küçük-ağır sınıflardan herhangi birinde ***ise***

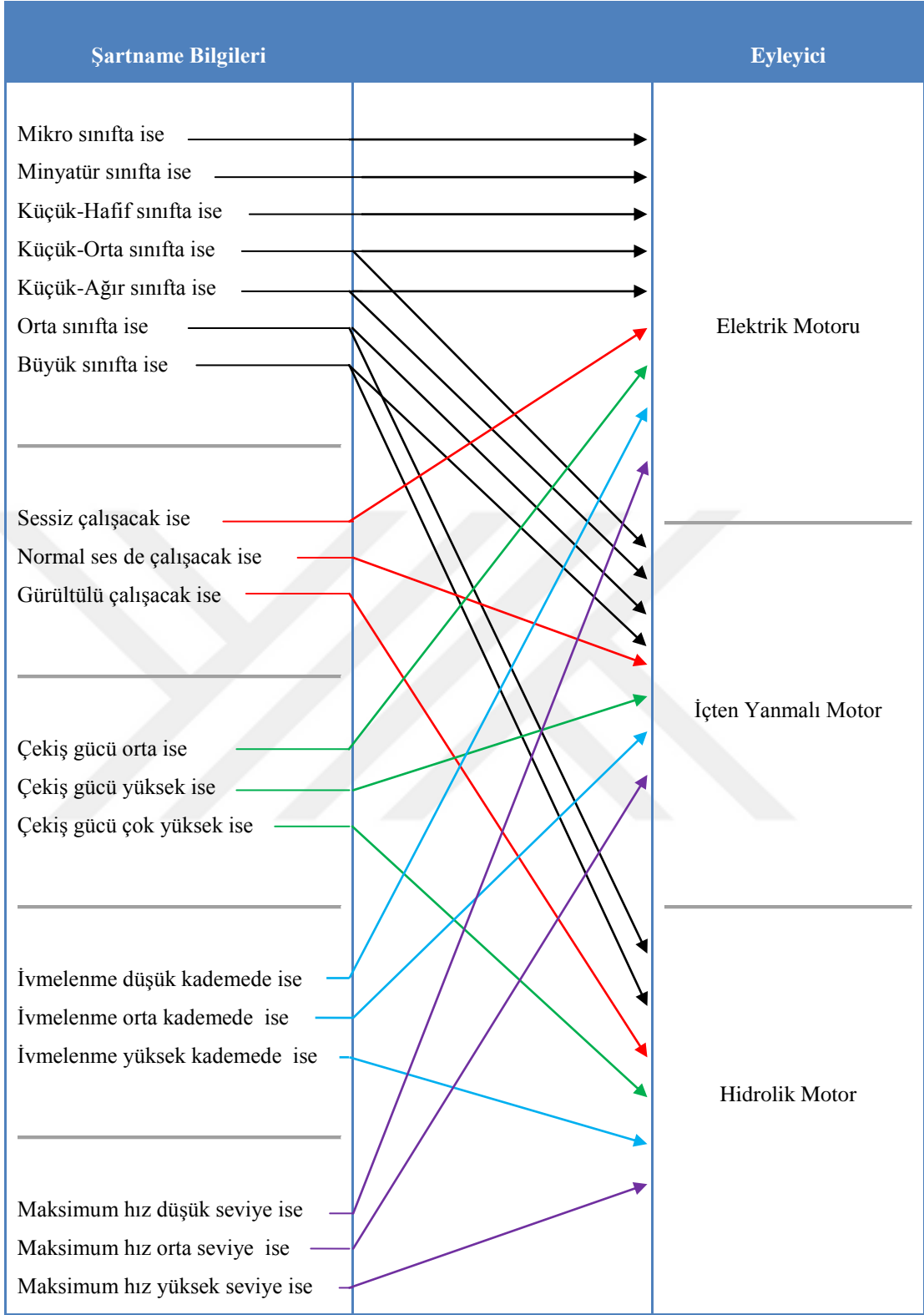
ve Eyleyici tipinin sessiz bir şekilde çalışması isteniyor ***ise***

ve Çekiş gücünün orta seviyede olması isteniyor ***ise***

ve İvmelenmesinin düşük kademedede olması isteniyor ***ise***

ve Maksimum hızının düşük seviyede olması isteniyor ***ise***

O Halde Eyleyici tipi olarak elektrik motoru seçilmesi uygundur



Şekil 4.11. Ağırlık sınıflandırması, gürültü sesi, çekiş gücü, ivmelenme ve max hız ile eyleyici tipini ilişkilendirme grafiği

Kural 2

Eğer

Ortalama ağırlık olarak küçük-orta, küçük-ağır, orta veya büyük sınıflardan herhangi birinde *ise*

ve Eyleyici tipinin ses olarak normal ses de çalışması sorun değil *ise*

ve Çekiş gücünün yüksek seviyede olması isteniyor *ise*

ve İvmelenmesinin orta kademedede olması isteniyor *ise*

ve Maksimum hızının orta seviyede olması isteniyor *ise*

O Halde Eyleyici tipi olarak içten yanmalı motor seçilmesi uygundur

Kural 3

Eğer

Ortalama ağırlık olarak orta veya büyük sınıflardan herhangi birinde *ise*

ve Eyleyici tipinin gürültülü bir şekilde çalışması sorun değil *ise*

ve Çekiş gücünün çok yüksek seviyede olması isteniyor *ise*

ve İvmelenmesinin yüksek kademedede olması isteniyor *ise*

ve Maksimum hızının yüksek seviyede olması isteniyor *ise*

O Halde Eyleyici tipi olarak hidrolik motor seçilmesi uygundur.

Şekil 4.12.'de eyleyici tipi ve görev süresi ile seçilecek enerji tipi ilişkilendirmesi yapılır.

Kural 1

Eğer

Eyleyici tipi elektrik motoru *ise*

ve Görev süresi kısa seviyede olması isteniyor *ise*

O Halde Enerji tipi olarak pil seçilmesi uygundur

Kural 2

Eğer

Eyleyici tipi elektrik motoru *ise*

ve Görev süresinin orta seviyede olması isteniyor *ise*

O Halde Enerji tipi olarak batarya seçilmesi uygundur

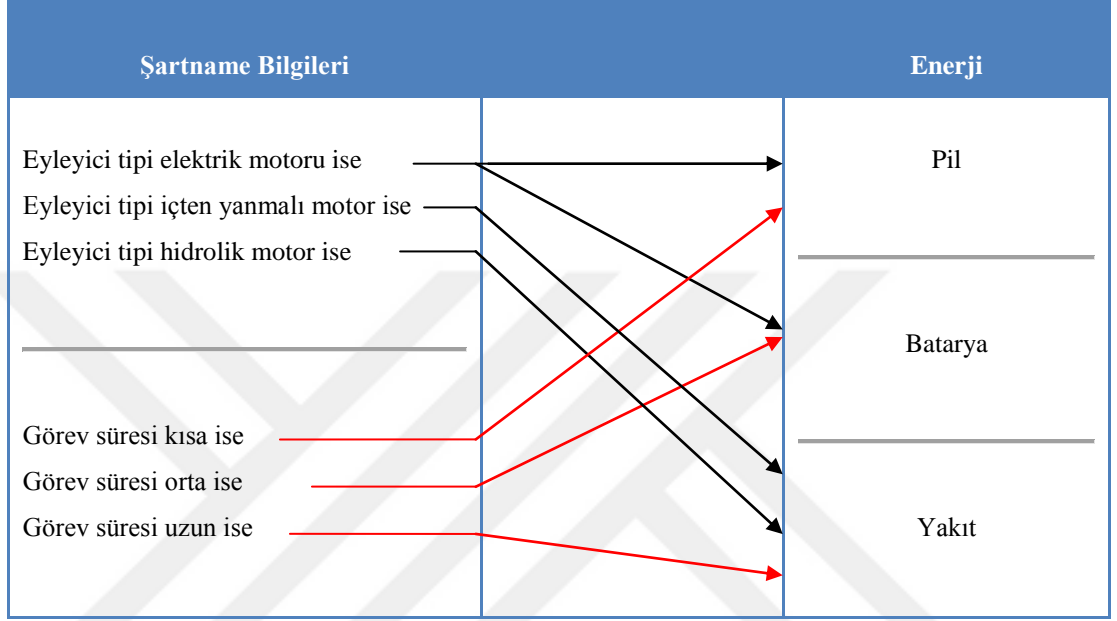
Kural 3

Eğer

Eyleyici tipi içten yanmalı motor veya hidrolik motor *ise*

ve Görev süresinin uzun olması isteniyor *ise*

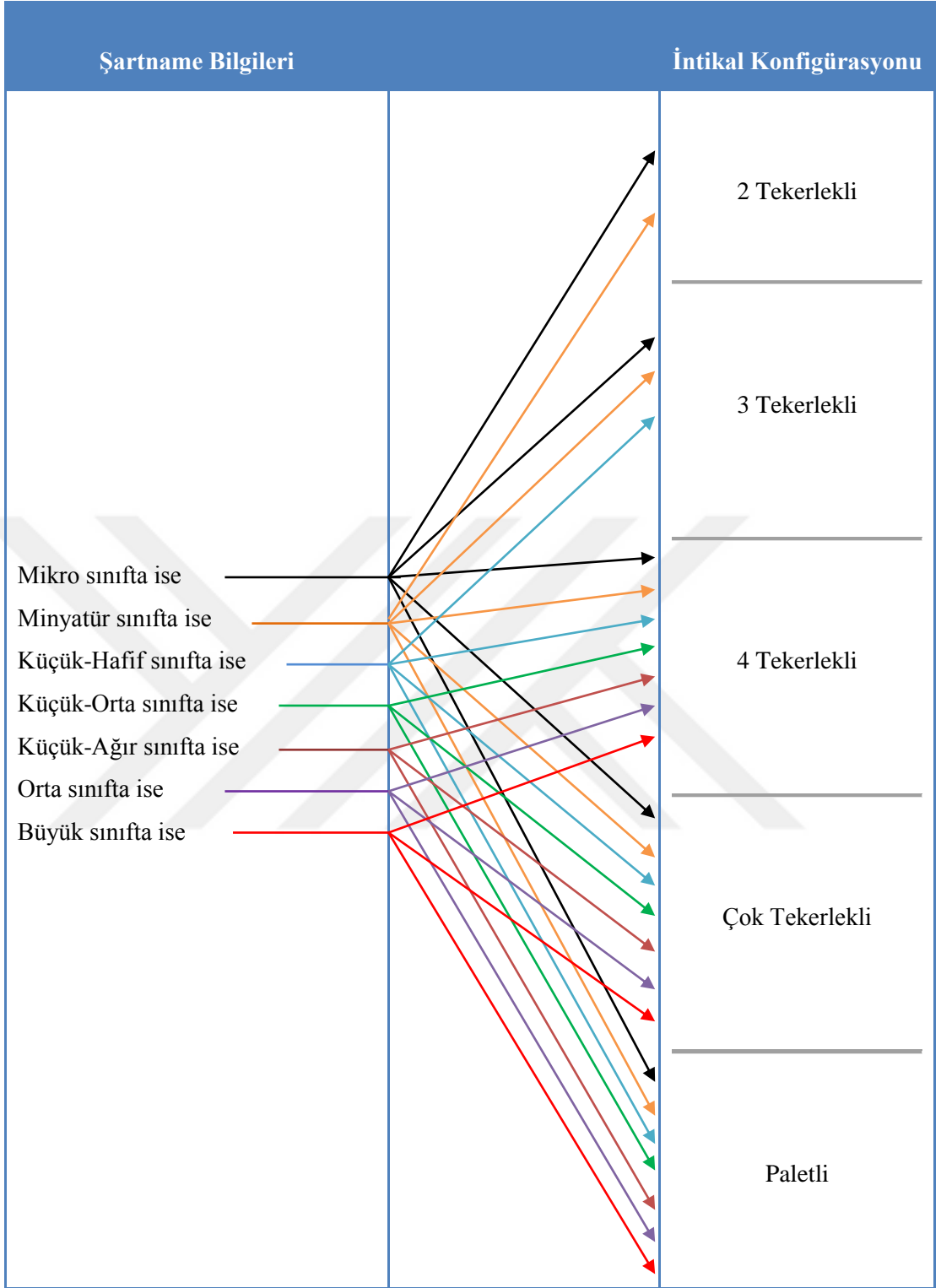
O Halde Enerji tipi olarak yakıt seçilmesi uygundur



Şekil 4.12. Eyleyici tipi ve görev süresi ile enerji tipi ilişkilendirme grafiği

Şekil 4.13.'de insansız kara aracının ortalama ağırlığının sınıfına göre intikal konfigürasyonları belirlenmiştir. Ağırlık sınıfına göre adlandırılacak olan intikal konfigürasyonları çeşitleri oluşturularak, graf ağacı yapısı şekil 4.14.'de gösterilmiştir. İlk olarak insansız kara araçlarının ağırlık sınıflarına göre çeşitleri oluşturulmalıdır.

İnsansız kara araçları, intikal konfigürasyonu olarak 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır. Aracın istenen ortalama ağırlığına göre stabiliteye uyacak biçimde graf ağacı oluşturulmuştur.



Şekil 4.13. Ağırlık sınıflandırması ile intikal konfigürasyonunu çeşitlendirme grafiği

İnsansız kara aracının ortalama ağırlığının 5 kg altında olması isteniyorsa mikro sınıf seçilir. Mikro sınıf; 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitlerinin hepsine uygulanabilir.

İnsansız kara aracının ortalama ağırlığının 5 kg ile 15 kg arasında olması isteniyorsa minyatür sınıf seçilir. Minyatür sınıf; 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitlerinin hepsine uygulanabilir.

İnsansız kara aracının ortalama ağırlığının 15 kg ile 200 kg arasında olması isteniyorsa küçük-hafif sınıf seçilir. Küçük-hafif sınıf; 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitlerine uygulanabilir. 2 tekerlekli statik olarak stabil olmayıp dinamik olarak stabil olduğu için belli bir ağırlıktan sonra seçimi uygun değildir.

İnsansız kara aracının ortalama ağırlığının 200 kg ile 1000 kg arasında olması isteniyorsa küçük-orta sınıf seçilir. Küçük-orta sınıf; 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitlerine uygulanabilir. 3 tekerlekli insansız kara aracının belli bir ağırlıktan seçimi uygun değildir.

İnsansız kara aracının ortalama ağırlığının 1000 kg ile 10000 kg arasında olması isteniyorsa küçük-ağır sınıf seçilir. Küçük-ağır sınıf; 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitlerine uygulanabilir.

İnsansız kara aracının ortalama ağırlığının 10000 kg ile 15000 kg arasında olması isteniyorsa orta sınıf seçilir. Orta sınıf; 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitlerine uygulanabilir.

İnsansız kara aracının ortalama ağırlığının 15000 kg üzerinde olması isteniyorsa büyük sınıf seçilir. Büyük sınıf; 4 tekerlekli, çok tekerlekli ve paletli intikal konfigürasyon çeşitlerine uygulanabilir.

Şekil 4.14.'de gösterilen graf ağacı yapısı belirlenir. İnsansız kara aracının görev yapacağı arazi tipi ve kullanılacak süspansiyon sistemi çeşidi ile ağırlığa göre sınıflandırılmış intikal konfigürasyonları arasında ilişkilendirme yapılır. Arazi tipi olarak düz-sert zemin, düz-yumuşak zemin, engebeli-sert zemin ve yumuşak-engebeli zemin belirlenmiştir. Süspansiyon sistemi çeşidi olarak da basit yapıda ve belirli ağırlıklara kadar dayanabilen kauçuk esaslı süspansiyon sistemi ve diğer süspansiyon sistemi seçimi yapılmaktadır.

Kural 1

Eğer

Arazi tipi olarak düz-sert zeminde görev yapacak ***ise***

ve Süspansiyon sistemi olarak kauçuk esaslı süspansiyon sistemi tipi kullanılacak ***ise***

O Halde İntikal konfigürasyonu olarak 2 tekerlekli mikro, 2 tekerlekli minyatür, 3 tekerlekli mikro, 3 tekerlekli minyatür, 4 tekerlekli mikro, 4 tekerlekli minyatür, çok tekerlekli mikro ve çok tekerlekli minyatür seçilmesi uygundur

Kural 2

Eğer

Arazi tipi olarak düz-sert zeminde veya düz-yumuşak zeminde görev yapacak ***ise***

ve Süspansiyon sistemi olarak kauçuk esaslı süspansiyon sistemi tipi kullanılacak ***ise***

O Halde intikal konfigürasyonu olarak paletli mikro ve paletli minyatür seçilebilmesi uygundur

Kural 3

Eğer

Arazi tipi olarak düz-sert zeminde, düz-yumuşak zeminde veya engebeli-sert zeminde görev yapacak *ise*

ve Süspansiyon sistemi olarak diğer süspansiyon sistemi tipi kullanılacak *ise*

O Halde İntikal konfigürasyonu olarak 3 tekerlekli küçük-hafif, 4 tekerlekli küçük-hafif, 4 tekerlekli küçük-orta, 4 tekerlekli küçük-ağır, 4 tekerlekli orta, 4 tekerlekli büyük, çok tekerlekli küçük-hafif, çok tekerlekli küçük-orta, çok tekerlekli küçük-ağır, çok tekerlekli orta, çok tekerlekli büyük, paletli küçük-hafif, paletli küçük-orta, paletli küçük-ağır, paletli orta ve paletli büyük seçilmesi uygundur

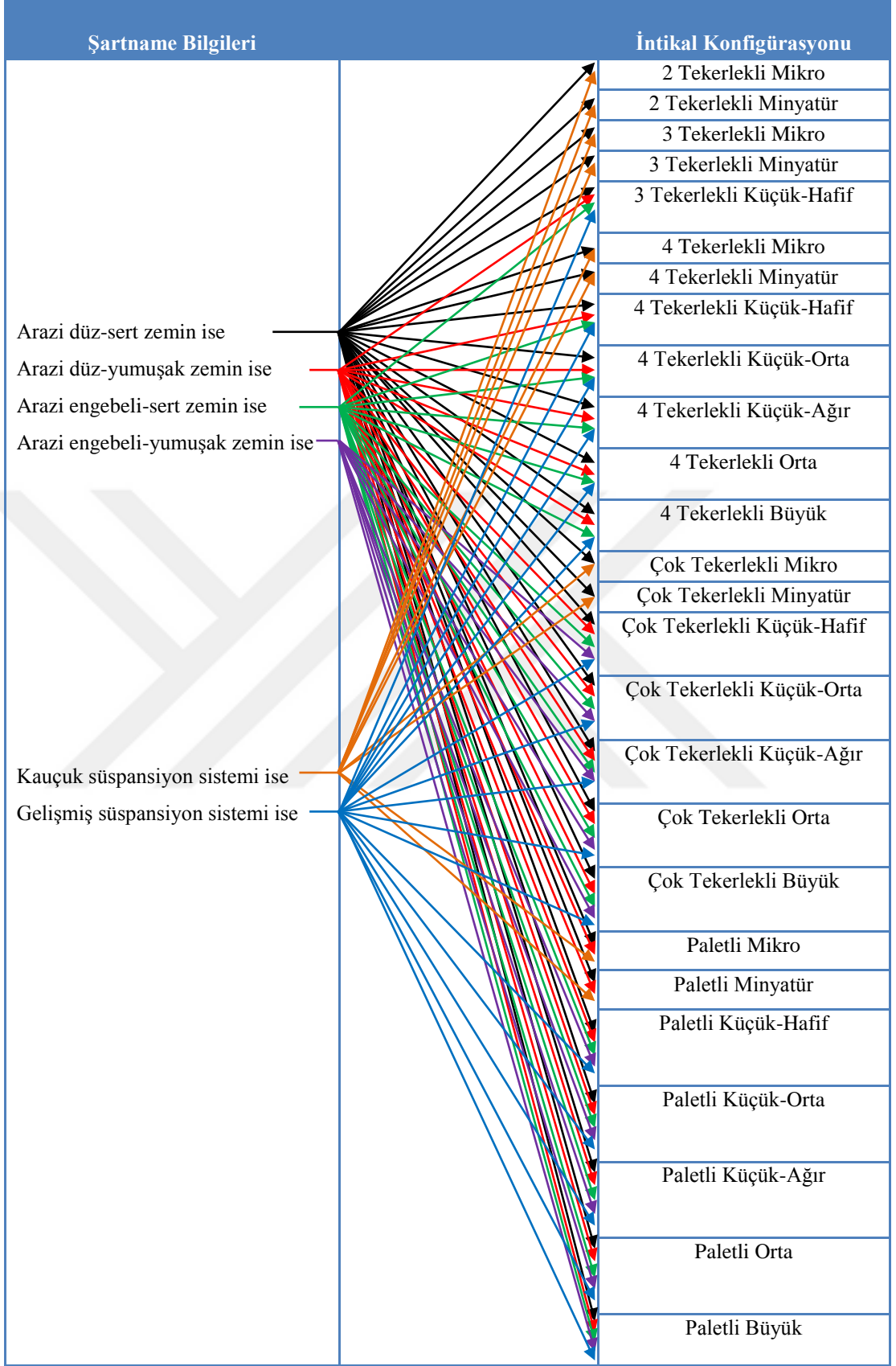
Kural 4

Eğer

Arazi tipi olarak düz-sert zeminde, düz-yumuşak zeminde, engebeli-sert zeminde ve yumuşak-engebeli zeminde görev yapacak *ise*

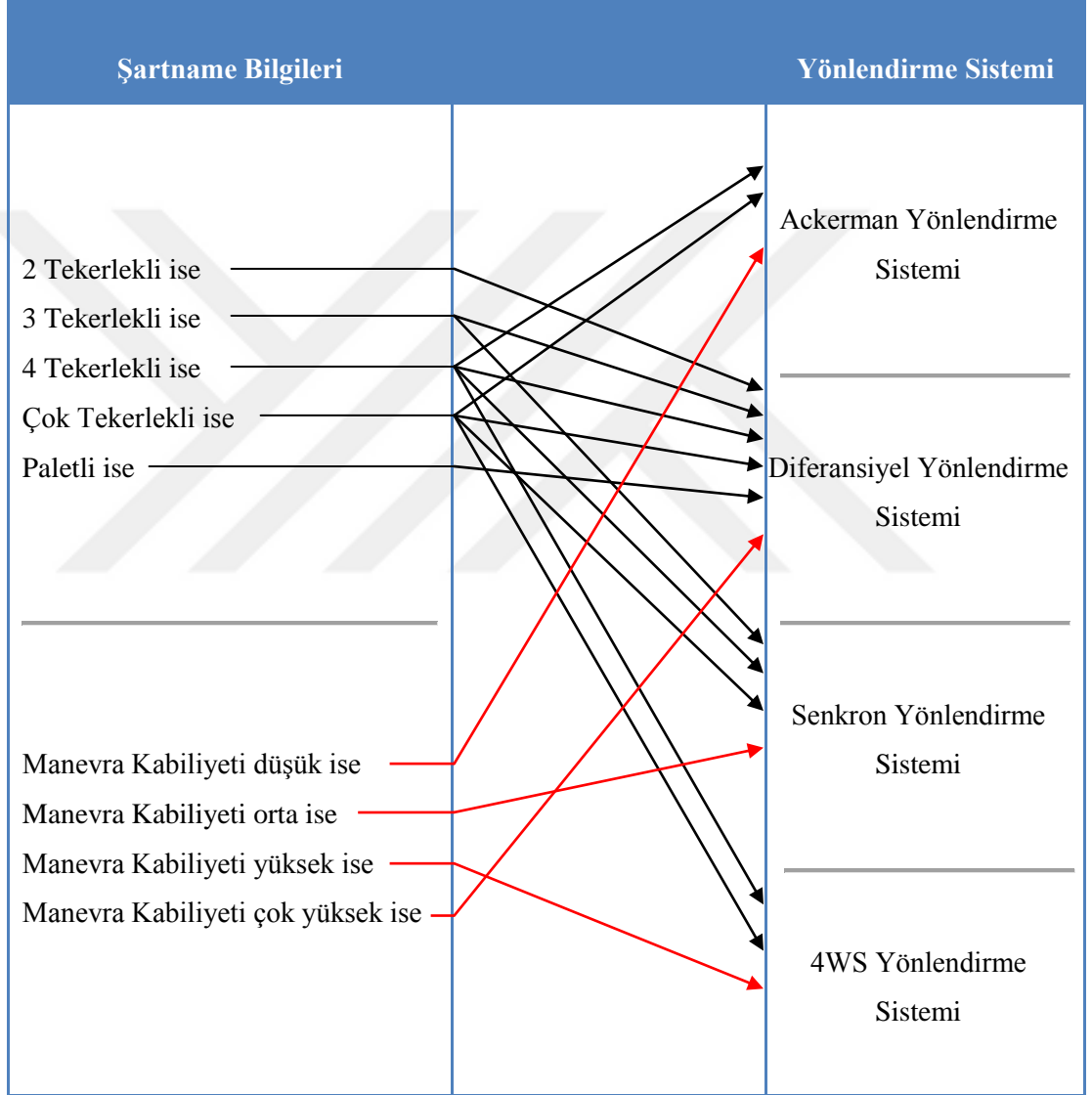
ve Süspansiyon sistemi olarak diğer süspansiyon sistemi tipi kullanılacak *ise*

O Halde İntikal konfigürasyonu olarak çok tekerlekli küçük-hafif, çok tekerlekli küçük-orta, çok tekerlekli küçük-ağır, çok tekerlekli orta, çok tekerlekli büyük, paletli küçük-hafif, paletli küçük-orta, paletli küçük-ağır, paletli orta ve paletli büyük seçilmesi uygundur



Şekil 4.14. Arazi tipi ve süspansiyon sistemi tipi ile intikal konfigürasyonu tipi ilişkilendirme grafiği

Şekil 4.15.'de intikal konfigürasyonundaki istenen manevra kabiliyeti seviyesine göre seçilecek yönlendirme sistemi tipi seçimi görülmektedir. Yönlendirme sistemi olarak en yüksek manevra kabiliyetine sahip olan diferansiyel yönlendirme sistemi, yüksek manevra kabiliyetine sahip olan 4WS yönlendirme sistemi, orta seviye manevra kabiliyetine sahip olan senkron yönlendirme sistemi ve düşük seviyede yönlendirme sistemine sahip olan Ackerman yönlendirme sistemi belirlenmiştir.



Şekil 4.15. İntikal konfigürasyonu ve manevra kabiliyeti ile yönlendirme sistemi tipi ilişkilendirme grafiği

Kural 1

Eğer

İntikal konfigürasyonu olarak 4 tekerlekli veya çok tekerlekli ***ise***

ve Manevra kabiliyetinin düşük olması isteniyor ***ise***

O Halde Yönlendirme sistemi olarak Ackerman yönlendirme sistemi seçilmesi uygundur

Kural 2

Eğer

İntikal konfigürasyonu olarak 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli ***ise***

ve Manevra kabiliyetinin çok yüksek olması isteniyor ***ise***

O Halde Yönlendirme sistemi olarak diferansiyel yönlendirme sistemi seçilmesi uygundur

Kural 3

Eğer

İntikal konfigürasyonu olarak 3 tekerlekli, 4 tekerlekli veya çok tekerlekli ***ise***

ve Manevra kabiliyetinin orta olması isteniyor ***ise***

O Halde Yönlendirme sistemi olarak senkron yönlendirme sistemi seçilmesi uygundur

Kural 4

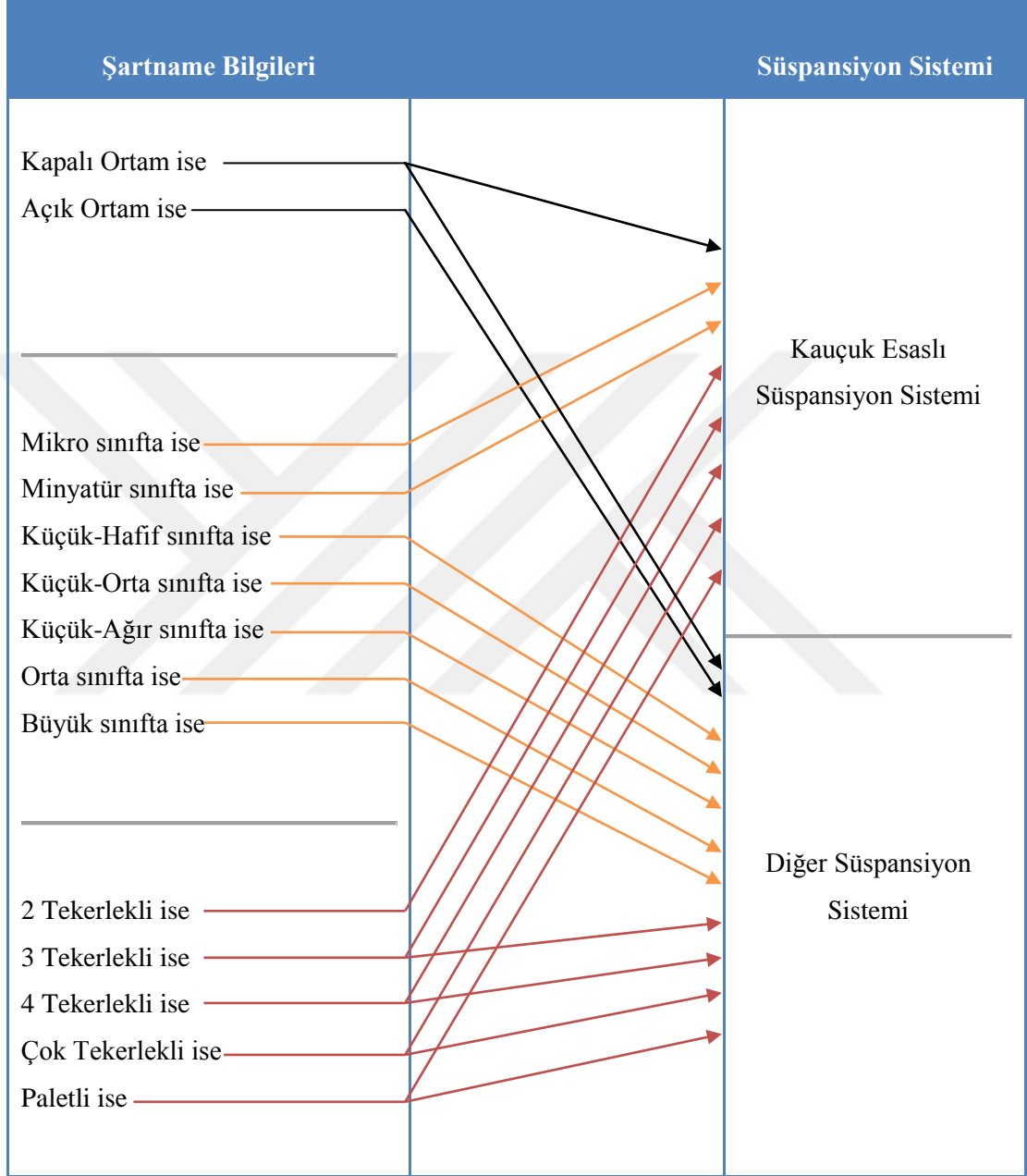
Eğer

İntikal konfigürasyonu olarak 4 tekerlekli veya çok tekerlekli ***ise***

ve Manevra kabiliyetinin yüksek olması isteniyor ***ise***

O Halde Yönlendirme sistemi olarak 4WS yönlendirme sistemi seçilmesi uygundur

Şekil 4.16.'da insansız kara aracının kullanılacağı ortam, ortalama ağırlığı ve intikal konfigürasyonları kullanılarak süspansiyon sistemi seçimi yapılmıştır. Ortam olarak kapalı ortam ve açık ortam belirlenmiştir.



Şekil 4.16. Kullanım ortamı, ağırlık sınıflandırması ve intikal konfigürasyonu ile süspansiyon sistemi tipi ilişkilendirme grafiği

Ağırlık olarak mikro ve minyatür sınıflarda kauçuk esaslı süspansiyon sistemi kullanılır. Çünkü kauçuk esaslı süspansiyon sistemi minyatür sınıf üzerindeki ağırlıkları tartamaz. Geriye kalan ağırlık sınıflarında diğer süspansiyon sistemi daha uygundur.

Kural 1

Eğer

Kapalı ortamda çalışacak *ise*

ve Ortalama ağırlık olarak mikro veya minyatür sınıflarda *ise*

ve İntikal konfigürasyonu olarak 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli *ise*

O Halde Süspansiyon sistemi olarak kauçuk esaslı süspansiyon sistemi seçilmesi uygundur

Kural 2

Eğer

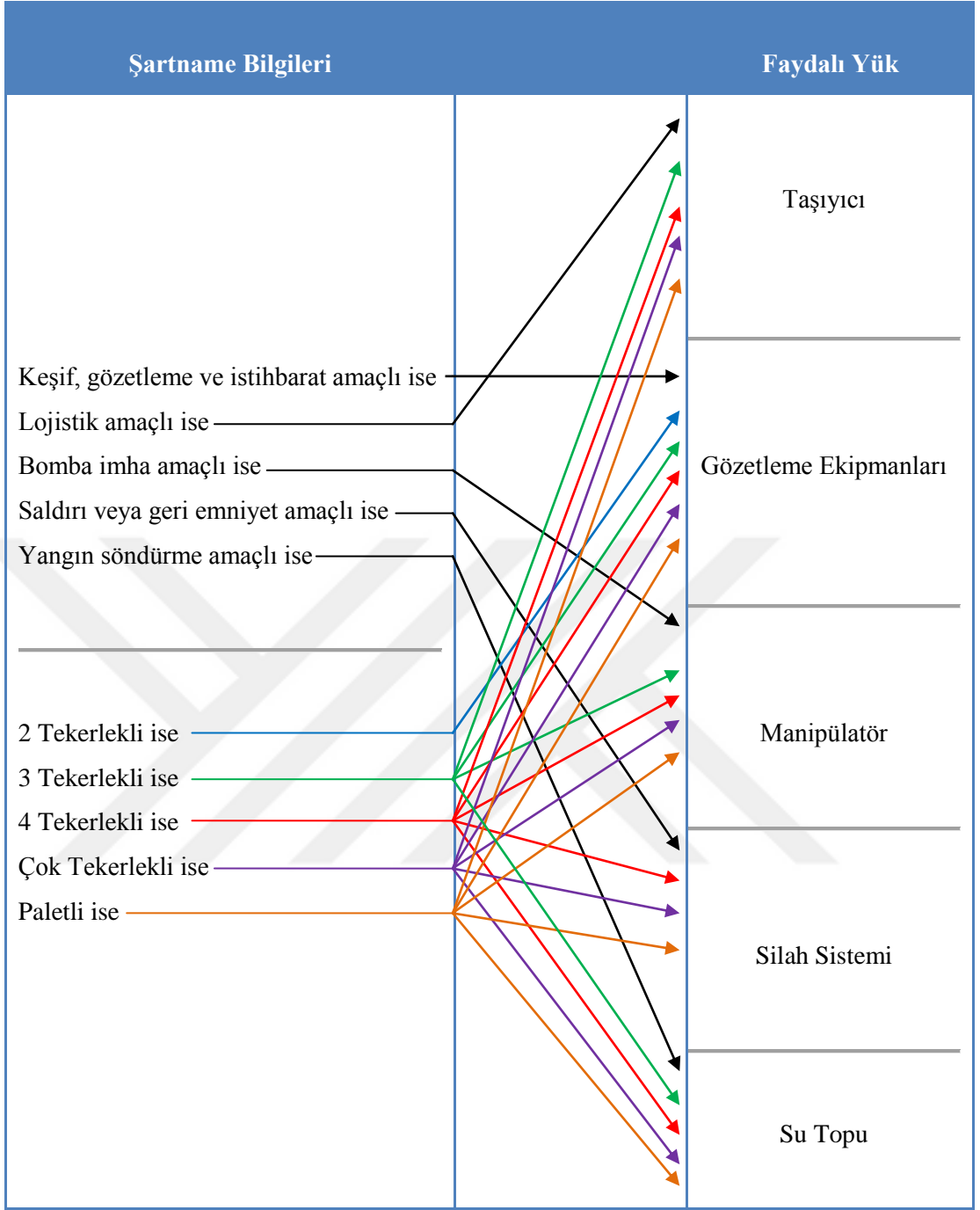
Kapalı veya açık ortamda çalışacak *ise*

ve Ortalama ağırlık olarak küçük- hafif, küçük-orta, küçük-ağır, orta veya büyük sınıflarda *ise*

ve İntikal konfigürasyonu olarak 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli *ise*

O Halde Süspansiyon sistemi olarak diğer süspansiyon sistemi seçilmesi uygundur

Şekil 4.17.'de insansız kara aracının kullanım amacı ve intikal konfigürasyonu ile ilişkilendirilen faydalı yük seçimi yapılır. Şartname aşamasında da sorulan insansız kara aracının kullanım amacı ile ilgili sorudan yola çıkmıştır.



Şekil 4.17. Kullanım amacı ve intikal konfigürasyonu ile faydalı yük ilişkilendirme grafiği

Kural 1

Eğer

Lojistik amaçlı kullanılacak *ise*

ve İntikal konfigürasyonu olarak 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli *ise O Halde* Faydalı yük olarak üst kısmı ekipman ve personel taşımaya yönelik tasarlanmış bir biçimde olan taşıyıcı seçilmesi uygundur

Kural 2

Eğer

Keşif, gözetleme ve istihbarat amaçlı kullanılacak *ise*

ve İntikal konfigürasyonu olarak 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli *ise*

O Halde Faydalı yük olarak gözetleme ekipmanları seçilmesi uygundur

Kural 3

Eğer

Bomba imha amaçlı kullanılacak *ise*

ve İntikal konfigürasyonu olarak 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli *ise*

O Halde Faydalı yük olarak manipülatör seçilmesi uygundur

Kural 4

Eğer

Saldırı veya geri emniyet amaçlı kullanılacak *ise*

ve İntikal konfigürasyonu olarak 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli *ise*

O Halde Faydalı yük olarak silah sistemi seçilmesi uygundur

Kural 5

Eğer

Yangın söndürme amaçlı kullanılacak *ise*

ve İntikal konfigürasyonu olarak 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, çok tekerlekli veya paletli *ise*

O Halde Faydalı yük olarak su topu seçilmesi uygundur

Şartname aşamasında kontrol listesi düzenlemesindeki şartname sorularından ve insansız kara aracı kavramsal tasarım aşamasındaki alt fonksiyonlardan ve tasarım katalogundan yararlanılarak graf yöntemi ile karar verme işlemi yapılmıştır.

4.5.1. Ağırlık Oranı Metodu İle En İyi Alternatif Belirleme

Ağırlık oranında ölçütlerin önem göstergesini (λ_i) tasarımcı özel olarak belirler. Tasarımcı aynı şekilde memnuniyet derecelerini de özel olarak belirler. İnsansız kara aracının ağırlığına göre 3 çeşit ölçüt önem göstergeli ağırlık oranı metot çizelgesi ve 3 çeşit memnuniyet dereceleri çizelgesi ortaya çıkarılmıştır. Bunlar:

- i. Ağırlık sınıfı mikro ve minyatür olan ağırlık oranı metodu (λ_1 Seti)
- ii. Ağırlık sınıfı küçük-hafif, küçük-orta ve küçük-ağır olan ağırlık oranı metodu (λ_2 Seti)
- iii. Ağırlık sınıfı orta ve büyük olan ağırlık oranı metodu (λ_3 Seti)

Çizelge 4.8. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı mikro ve minyatür)

Parametreler	Memnuniyet Dereceleri								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eyleyici	Hidrolik Motor	İçten Yanmalı Motor							Elektrik Motoru
Enerji	Yakıt					Batarya			Pil
İntikal Konfigürasyonu					Çok T.	Paletli	4 T.	3 T.	2 T.
Faydalı Yük									Faydalı Yük
Süspansiyon Sistemi		Diğer S.S.					Kauçuk S.S.		
Yönlendirme Sistemi		Ackerman Y.S.			4WS Y.S.		Senkron Y.S.		Diferansiyel Y.S.

Çizelge 4.9. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı mikro ve minyatür) (λ_1 Seti)

	C ₁ Eyleyici	C ₂ Enerji	C ₃ İntikal Konfigürasyonu	C ₄ Faydalı Yük	C ₅ Süspansiyon Sistemi	C ₆ Yönlendirme Sistemi	
λ_1	18	22	30	10	8	12	$\Sigma \lambda_i e_{ij}$

Çizelge 4.10. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı küçük-hafif, k-orta ve k-ağır)

Parametreler	Memnuniyet Dereceleri								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eyleyici					Hidrolik Motor		İçten Yanmalı Motor		Elektrik Motoru
Enerji					Yakıt		Pil		Batarya
İntikal Konfigürasyonu				2 T.	3 T.		4 T.	Çok T.	Paletli
Faydalı Yük									Faydalı Yük
Süspansiyon Sistemi				Kauçuk S.S.				Diğer S.S.	
Yönlendirme Sistemi				Ackerman Y.S.	Senkron Y.S.		4WS Y.S.		Diferansiyel Y.S.

Çizelge 4.11. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı k-hafif, k-orta ve k-ağır) (λ_2 Seti)

	C ₁ Eyleyici	C ₂ Enerji	C ₃ İntikal Konfigürasyonu	C ₄ Faydalı Yük	C ₅ Süspansiyon Sistemi	C ₆ Yönlendirme Sistemi	
λ_2	22	16	30	10	8	14	$\Sigma \lambda_i e_{ij}$

Çizelge 4.12. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı orta ve büyük)

Parametreler	Memnuniyet Dereceleri								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eyleyici							Elektrik Motoru	İçten Yanmalı Motor	Hidrolik Motor
Enerji					Pil		Batarya	Yakıt	
İntikal Konfigürasyonu		2 T.		3 T.		4 T.		Paletli	Çok T.
Faydalı Yük									Faydalı Yük
Süspansiyon Sistemi				Kauçuk S.S.				Diğer S.S.	
Yönlendirme Sistemi				Ackerman Y.S.	Senkron Y.S.		4WS Y.S.		Diferansiyel Y.S.

Çizelge 4.13. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı orta ve büyük) (λ_3 Seti)

	C ₁ Eyleyici	C ₂ Enerji	C ₃ İntikal Konfigürasyonu	C ₄ Faydalı Yük	C ₅ Süspansiyon Sistemi	C ₆ Yönlendirme Sistemi	
λ_3	20	11	30	10	13	16	$\Sigma \lambda_i e_{ij}$

4.6. Örnek Uygulamalar

Geliştirilen tasarım işlem modeli ile ortaya çıkarılan alternatifler için 3 farklı ağırlık oranı seti ve 3 farklı memnuniyet dereceleri ile en iyi alternatifin bulunması 3 farklı uygulama ile gösterilmiştir.

Uygulama-1

Geliştirilen sistematik tasarım işlem modeli uygulama yapılacak olursa; ilk olarak oluşturulan şartname soruları ile insansız kara aracının hangi özelliklerde olması istendiği şartname üzerinde belirlenir (Şekil 4.18.).

1. Tasarımı yapacak İKA'nın idaresi nasıl sağlansın? <input checked="" type="checkbox"/> Uzaktan Kontrol <input type="checkbox"/> Otonom	5. İKA'nın gürültü seviyesi ne durumda olsun? <input checked="" type="checkbox"/> Sessiz ($0 < x < 70$ dB) <input type="checkbox"/> Normal ($70 \leq x < 100$ dB) <input type="checkbox"/> Gürültülü ($100 \leq x$ dB)	10. İKA sahada hangi arazi tipinde kullanılacaktır? <input checked="" type="checkbox"/> Düz Sert Zemin <input type="checkbox"/> Düz Yumuşak Zemin <input type="checkbox"/> Engelbeli Sert Zemin <input type="checkbox"/> Engelbeli Yumuşak Zemin
2. Oluşturulacak İKA'nın kullanım kapsamı alanı ne durumda olsun? <input checked="" type="checkbox"/> Düşük ($x < 10$ km ²) <input type="checkbox"/> Orta ($10 \leq x < 25$ km ²) <input type="checkbox"/> Yüksek ($25 \leq x$ km ²)	6. İKA'nın çekiş gücü ne seviyede olsun? <input checked="" type="checkbox"/> Orta ($0 < x < 250$ BG) <input type="checkbox"/> Yüksek ($250 \leq x < 750$ BG) <input type="checkbox"/> Çok Yüksek ($750 \leq x < 1500$ BG)	11. İKA'nın manevra kabiliyeti ne düzeyde olsun? <input type="checkbox"/> Düşük <input type="checkbox"/> Orta <input type="checkbox"/> Yüksek
3. Tasarlanacak İKA'nın dayanıklılık durumu ne derece olsun? <input type="checkbox"/> Düşük <input checked="" type="checkbox"/> Orta <input type="checkbox"/> Yüksek	7. Tasarlanacak İKA'nın ivmelenmesi hangi kademede olsun? <input checked="" type="checkbox"/> Düşük ($0 < x < 2 \frac{km}{sa^2}$) <input type="checkbox"/> Orta ($2 \leq x < 4 \frac{km}{sa^2}$) <input type="checkbox"/> Yüksek ($4 \leq x < 6 \frac{km}{sa^2}$)	12. Tasarımı yapacak İKA temel olarak nerede kullanılmak isteniyor? <input checked="" type="checkbox"/> Kapalı Ortam <input type="checkbox"/> Açık Ortam
4. Tasarlanacak İKA'nın ortalama ağırlığı ne kadar olsun? <input type="checkbox"/> Mikro Sınıf ($x < 5$ Kg) <input checked="" type="checkbox"/> Minyatür Sınıf ($5 \leq x < 15$ Kg) <input type="checkbox"/> Küçük-Hafif Sınıf ($15 \leq x < 200$ Kg) <input type="checkbox"/> Küçük-Orta Sınıf ($200 \leq x < 1000$ Kg) <input type="checkbox"/> Küçük-Ağır Sınıf ($1000 \leq x < 10000$ Kg) <input type="checkbox"/> Orta Sınıf ($10000 \leq x < 15000$ Kg) <input type="checkbox"/> Büyük Sınıf ($15000 \leq x$ Kg)	8. İKA'nın maksimum hızı hangi seviyede olsun? <input checked="" type="checkbox"/> Düşük ($x < 80$ km/sa) <input type="checkbox"/> Orta ($80 \leq x < 100$ km/sa) <input type="checkbox"/> Yüksek ($100 \leq x < 150$ km/sa)	13. Tasarımı istenilen İKA'nın kullanım amacı nedir? <input checked="" type="checkbox"/> Keşif, gözetleme ve istihbarat <input type="checkbox"/> Lojistik <input type="checkbox"/> Bomba İmha <input type="checkbox"/> Saldırı veya Geri Emniyet <input type="checkbox"/> Yangın Söndürme
	9. Oluşturulması istenilen İKA'da görev süresi nasıl olsun? <input checked="" type="checkbox"/> Kısa ($x < 4$ sa) <input type="checkbox"/> Orta ($4 \leq x < 30$ sa) <input type="checkbox"/> Uzun ($30 \leq x < 50$ sa)	

Şekil 4.18. Uygulama-1 için tasarım şartname bilgileri seçimi

Sonrasında kavramsal tasarım aşamasına geçilir. Tüm fonksiyon yapısından yola çıkılarak ortaya çıkarılan alt fonksiyon yapısındaki parametrelerden oluşan tasarım katalogundan alternatif seçimi yapılır (Çizelge 4.14.).

Çizelge 4.14. Tasarım katalogu

Parametre	Cözüm	1	2	3	4	5
Eyleyici	1	Elektrik Motoru	İçten Yanmalı Motor	Hidrolik Motor		
Enerji	2	Pil CELL	Batarya	Yakıt		
İntikal Konfigürasyonu	3	2 Tekerlekli	3 Tekerlekli	4 Tekerlekli	Çok Tekerlekli	Paletli
Faydah Yük	4	Gözetleme Ekipmanları	Taşıyıcı	Silah Sistemi	Manipulator	Su Topu
Süspansiyon Sistemi	5	Kauçuk Süspansiyon	Diğer Süspansiyon			
Yönlendirme Sistemi	6	Ackerman	Diferansiyel	Senkron	4WS	

A_T					
1.1					
2.1					
3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	
4.1					
5.1					
6.2					

$A_T = 1 \times 1 \times 5 \times 1 \times 1 \times 1 = 5$ şartname sorularına verilen cevaplar doğrultusunda tasarım katalogu ve graf ağaçları eşliğinde toplamda 5 adet alternatif belirlenmiştir.

$$A_1 = 1.1 + 2.1 + 3.1 + 4.1 + 5.1 + 6.2$$

$$A_4 = 1.1 + 2.1 + 3.4 + 4.1 + 5.1 + 6.2$$

$$A_2 = 1.1 + 2.1 + 3.2 + 4.1 + 5.1 + 6.2$$

$$A_5 = 1.1 + 2.1 + 3.5 + 4.1 + 5.1 + 6.2$$

$$A_3 = 1.1 + 2.1 + 3.3 + 4.1 + 5.1 + 6.2$$

Öncelikle parametrelerin %100 üzerinden etkisinin ne durumda olacağı gösterilip ardından parametrelere göre memnuniyet dereceleri belirlenerek mesele matematik ifadeler haline dönüştürülerek sonuca ulaşılmıştır (Çizelge 4.15.). Matematik ifadeler haline dönüştürme λ_1 seti değerleri ile memnuniyet değerleri çarpılıp ardından toplanarak gerçekleştirilmektedir (Çizelge 4.16.). Yapılan bu işlemler sonucunda ortaya çıkan alternatif örnek şekil olarak gösterilmiştir (Şekil 4.19.).

Çizelge 4.15. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı mikro-minyatür)

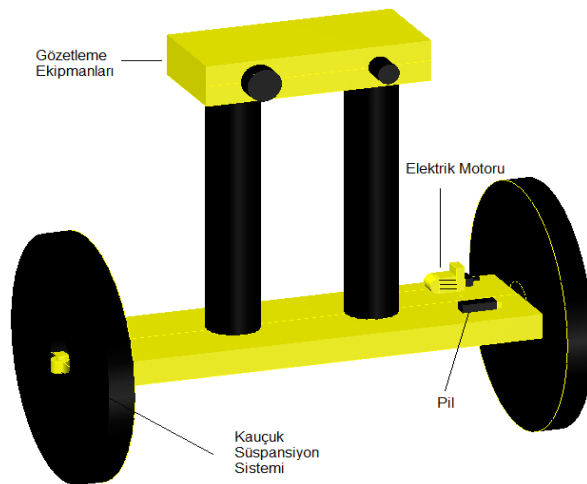
Parametreler	Memnuniyet Dereceleri								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eyleyici	Hidrolik Motor	İçten Yanmalı Motor							Elektrik Motoru
Enerji	Yakıt					Batarya			Pil
İntikal Konfigürasyonu					Çok T.	Paletli	4 T.	3 T.	2 T.
Faydalı Yük									Faydalı Yük
Süspansiyon Sistemi		Diğer S.S.					Kauçuk S.S.		
Yönlendirme Sistemi		Ackerman Y.S.			4WS Y.S.		Senkron Y.S.		Diferansiyel Y.S.

Çizelge 4.16. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı mikro-minyatür) (λ_1 Seti)

	C ₁ Eyleyici	C ₂ Enerji	C ₃ İntikal Konfigürasyonu	C ₄ Faydalı Yük	C ₅ Süspansiyon Sistemi	C ₆ Yönlendirme Sistemi	
λ_1	18	22	30	10	8	12	$\Sigma \lambda_i e_{ij}$
A ₁	9	9	9	9	7	9	884
A ₂	9	9	8	9	7	9	854
A ₃	9	9	7	9	7	9	824
A ₄	9	9	5	9	7	9	764
A ₅	9	9	6	9	7	9	794

$$\Sigma \lambda_i e_{ij} = (9 \times 18) + (9 \times 22) + (9 \times 30) + (9 \times 10) + (8 \times 7) + (9 \times 12) = 884$$

Ağırlık oranı metodu ile en iyi alternatif A₁ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.19. Uygulama-1 için seçilen en iyi alternatifin şekil olarak gösterimi

Uygulama-2


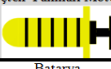
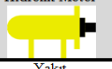

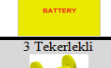









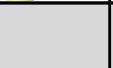






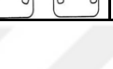
Geliştirilen sistematik tasarım işlem modeli ile ilk olarak oluşturulan şartname soruları ile insansız kara aracının hangi özelliklerde olması istendiği şartname üzerinde belirlenir (Şekil 4.19.).

1. Tasarımı yapılacak İKA'nın idaresi nasıl sağlansın?
 - Uzaktan Kontrol
 - Otonom
2. Oluşturulacak İKA'nın kullanım kapsama alanı ne durumda olsun?
 - Düşük ($x < 10 \text{ km}^2$)
 - Orta ($10 \leq x < 25 \text{ km}^2$)
 - Yüksek ($25 \leq x \text{ km}^2$)
3. Tasarlanacak İKA'nın dayanıklılık durumu ne derece olsun?
 - Düşük
 - Orta
 - Yüksek
4. Tasarlanacak İKA'nın ortalama ağırlığı ne kadar olsun?
 - Mikro Sınıf ($x < 5 \text{ Kg}$)
 - Minyatür Sınıf ($5 \leq x < 15 \text{ Kg}$)
 - Küçük-Hafif Sınıf ($15 \leq x < 200 \text{ Kg}$)
 - Küçük-Orta Sınıf ($200 \leq x < 1000 \text{ Kg}$)
 - Küçük-Ağır Sınıf ($1000 \leq x < 10000 \text{ Kg}$)
 - Orta Sınıf ($10000 \leq x < 15000 \text{ Kg}$)
 - Büyük Sınıf ($15000 \leq x \text{ Kg}$)
5. İKA'nın gürültü seviyesi ne durumda olsun?
 - Sessiz ($0 < x < 70 \text{ dB}$)
 - Normal ($70 \leq x < 100 \text{ dB}$)
 - Gürültülü ($100 \leq x \text{ dB}$)
6. İKA'nın çekiş gücü ne seviyede olsun?
 - Orta ($0 < x < 250 \text{ BG}$)
 - Yüksek ($250 \leq x < 750 \text{ BG}$)
 - Çok Yüksek ($750 \leq x < 1500 \text{ BG}$)
7. Tasarlanacak İKA'nın ivmelenmesi hangi kademe de olsun?
 - Düşük ($0 < x < 2 \frac{\text{km}}{\text{sa}^2}$)
 - Orta ($2 \leq x < 4 \frac{\text{km}}{\text{sa}^2}$)
 - Yüksek ($4 \leq x < 6 \frac{\text{km}}{\text{sa}^2}$)
8. İKA'nın maksimum hızı hangi seviyede olsun?
 - Düşük ($x < 80 \text{ km/sa}$)
 - Orta ($80 \leq x < 100 \text{ km/sa}$)
 - Yüksek ($100 \leq x < 150 \text{ km/sa}$)
9. Oluşturulması istenilen İKA'da görev süresi nasıl olsun?
 - Kısa ($x < 4 \text{ sa}$)
 - Orta ($4 \leq x < 30 \text{ sa}$)
 - Uzun ($30 \leq x < 50 \text{ sa}$)
10. İKA sahada hangi arazi tipinde kullanılacaktır?
 - Düz Sert Zemin
 - Düz Yumuşak Zemin
 - Engebeli Sert Zemin
 - Engebeli Yumuşak Zemin
11. İKA'nın manevra kabiliyeti ne düzeyde olsun?
 - Düşük
 - Orta
 - Yüksek
 - Çok Yüksek
12. Tasarımı yapılacak İKA temel olarak nerede kullanılmak isteniyor?
 - Kapalı Ortam
 - Açık Ortam
13. Tasarımı istenilen İKA'nın kullanım amacı nedir?
 - Keşif, gözetleme ve istihbarat
 - Lojistik
 - Bomba İmha
 - Saldırı veya Geri Emniyet
 - Yangın Söndürme

Şekil 4.20. Uygulama-2 için tasarım şartname bilgileri seçimi

Sonrasında kavramsal tasarım aşamasına geçilir. Tüm fonksiyon yapısından yola çıkılarak ortaya çıkarılan alt fonksiyon yapısındaki parametrelerden oluşan tasarım katalogundan alternatif seçimi yapılır (Çizelge 4.17.).

Çizelge 4.17. Tasarım katalogu

Parametre	Cözüm	1	2	3	4	5
Eyleyici	1	Elektrik Motoru 	İçten Yanmalı Motor 	Hidrolik Motor 		
Enerji	2	Pil CELL 	Batarya BATTERY 	Yakıt FUEL 		
İntikal Konfigürasyonu	3	2 Tekerlekli 	3 Tekerlekli 	4 Tekerlekli 	Çok Tekerlekli 	Paletli 
Faydalı Yük	4	Gözetleme Ekipmanları 	Taşıyıcı 	Silah Sistemi 	Manipulator 	Su Topu 
Süspansiyon Sistemi	5	Kauçuk Süspansiyon 	Diğer Süspansiyon 			
Yönlendirme Sistemi	6	Ackerman 	Diferansiyel 	Senkron 	4WS 	

A_T	
1.2	
2.3	
3.3	3.4 3.5
4.2	
5.2	
6.4	

$A_T = 1 \times 1 \times 3 \times 1 \times 1 \times 1 = 3$ şartname sorularına verilen cevaplar doğrultusunda tasarım katalogu ve graf ağaçları eşliğinde toplamda 3 adet alternatif belirlenmiştir.

$$A_1 = 1.2 + 2.3 + 3.3 + 4.2 + 5.2 + 6.4$$

$$A_2 = 1.2 + 2.3 + 3.4 + 4.2 + 5.2 + 6.4$$

$$A_3 = 1.2 + 2.3 + 3.5 + 4.2 + 5.2 + 6.4$$

Öncelikle parametrelerin %100 üzerinden etkisinin ne durumda olacağı gösterilip ardından parametrelere göre memnuniyet dereceleri belirlenerek mesele matematik ifadeler haline dönüştürülerek sonuca ulaşılmıştır (Çizelge 4.18.). Matematik ifadeler haline dönüştürme λ_3 seti değerleri ile memnuniyet değerleri çarpılıp ardından toplanarak gerçekleştirilmektedir (Çizelge 4.19.). Yapılan bu işlemler sonucunda ortaya çıkan alternatif örnek şekil olarak gösterilmiştir (Şekil 4.21.).

Çizelge 4.18. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı k-hafif, k-orta, k-ağır)

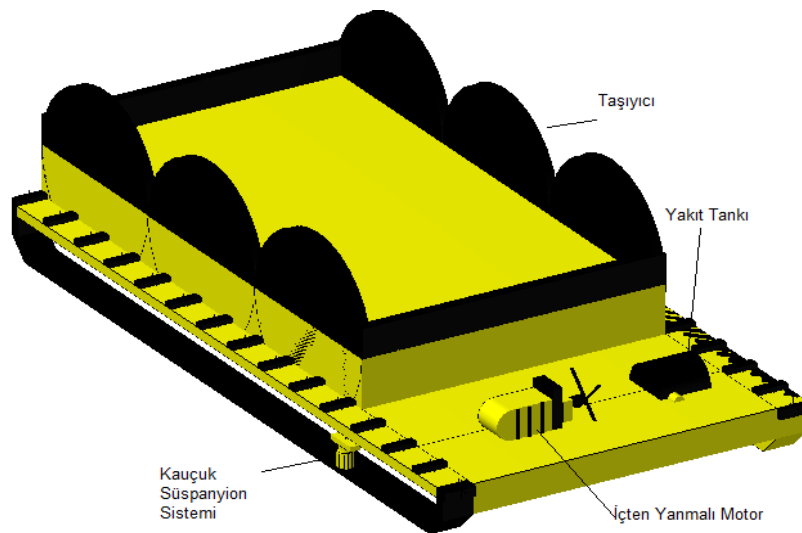
Parametreler	Memnuniyet Dereceleri								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eyleyici					Hidrolik Motor		İçten Yanmalı Motor		Elektrik Motoru
Enerji					Yakıt		Pil		Batarya
İntikal Konfigürasyonu				2 T.	3 T.		4 T.	Çok T.	Paletli
Faydalı Yük									Faydalı Yük
Süspansiyon Sistemi				Kauçuk S.S.				Diğer S.S.	
Yönlendirme Sistemi				Ackerman Y.S.	Senkron Y.S.		4WS Y.S.		Diferansiyel Y.S.

Çizelge 4.19. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı k-hafif, k-orta, k-ağır) (λ_2 Seti)

	C_1 Eyleyici	C_2 Enerji	C_3 İntikal Konfigürasyonu	C_4 Faydalı Yük	C_5 Süspansiyon Sistemi	C_6 Yönlendirme Sistemi	
λ_2	22	16	30	10	8	14	$\Sigma \lambda_i e_{ij}$
A_1	7	5	7	9	8	7	696
A_2	7	5	8	9	8	7	726
A_3	7	5	9	9	8	7	756

$$\Sigma \lambda_i e_{ij} = (7 \times 22) + (5 \times 16) + (9 \times 30) + (9 \times 10) + (8 \times 8) + (7 \times 14) = 756$$

Ağırlık oranı metodu ile en iyi alternatif A_3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.21. Uygulama-2 için seçilen en iyi alternatifin şekil olarak gösterimi

Uygulama-3
















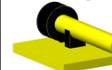


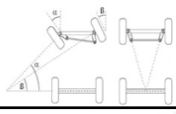
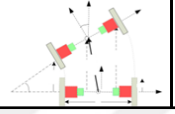
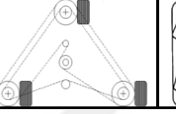
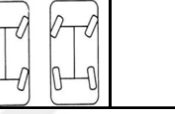
Geliştirilen sistematik tasarım işlem modeli bir uygulama yapılacak olursa; ilk olarak oluşturulan şartname soruları ile insansız kara aracının hangi özelliklerde olması istendiği şartname üzerinde belirlenir (Şekil 4.20.).

1. Tasarımı yapacak İKA'nın idaresi nasıl sağlansın?
 - Uzaktan Kontrol
 - Otonom
2. Oluşturulacak İKA'nın kullanım kapsama alanı ne durumda olsun?
 - Düşük ($x < 10 \text{ km}^2$)
 - Orta ($10 \leq x < 25 \text{ km}^2$)
 - Yüksek ($25 \leq x \text{ km}^2$)
3. Tasarlanacak İKA'nın dayanıklılık durumu ne derece olsun?
 - Düşük
 - Orta
 - Yüksek
4. Tasarlanacak İKA'nın ortalama ağırlığı ne kadar olsun?
 - Mikro Smf ($x < 5 \text{ Kg}$)
 - Minyatür Smf ($5 \leq x < 15 \text{ Kg}$)
 - Küçük-Hafif Smf ($15 \leq x < 200 \text{ Kg}$)
 - Küçük-Orta Smf ($200 \leq x < 1000 \text{ Kg}$)
 - Küçük-Ağır Smf ($1000 \leq x < 10000 \text{ Kg}$)
 - Orta Smf ($10000 \leq x < 15000 \text{ Kg}$)
 - Büyük Smf ($15000 \leq x \text{ Kg}$)
5. İKA'nın gürültü seviyesi ne durumda olsun?
 - Sessiz ($0 < x < 70 \text{ dB}$)
 - Normal ($70 \leq x < 100 \text{ dB}$)
 - Gürültülü ($100 \leq x \text{ dB}$)
6. İKA'nın çekiş gücü ne seviyede olsun?
 - Orta ($0 < x < 250 \text{ BG}$)
 - Yüksek ($250 \leq x < 750 \text{ BG}$)
 - Çok Yüksek ($750 \leq x < 1500 \text{ BG}$)
7. Tasarlanacak İKA'nın ivmelenmesi hangi kademede olsun?
 - Düşük ($0 < x < 2 \frac{\text{km}}{\text{sa}^2}$)
 - Orta ($2 \leq x < 4 \frac{\text{km}}{\text{sa}^2}$)
 - Yüksek ($4 \leq x < 6 \frac{\text{km}}{\text{sa}^2}$)
8. İKA'nın maksimum hızı hangi seviyede olsun?
 - Düşük ($x < 80 \text{ km/sa}$)
 - Orta ($80 \leq x < 100 \text{ km/sa}$)
 - Yüksek ($100 \leq x < 150 \text{ km/sa}$)
9. Oluşturulması istenilen İKA'da görev süresi nasıl olsun?
 - Kısa ($x < 4 \text{ sa}$)
 - Orta ($4 \leq x < 30 \text{ sa}$)
 - Uzun ($30 \leq x < 50 \text{ sa}$)
10. İKA sahada hangi arazi tipinde kullanılacaktır?
 - Düz Sert Zemin
 - Düz Yumuşak Zemin
 - Engebeli Sert Zemin
 - Engebeli Yumuşak Zemin
11. İKA'nın manevra kabiliyeti ne düzeyde olsun?
 - Düşük
 - Orta
 - Yüksek
 - Çok Yüksek
12. Tasarımı yapacak İKA temel olarak nerede kullanılmak isteniyor?
 - Kapalı Ortam
 - Açık Ortam
13. Tasarımı istenilen İKA'nın kullanım amacı nedir?
 - Keşif, gözetleme ve istihbarat
 - Lojistik
 - Bomba İmha
 - Saldırı veya Geri Emniyet
 - Yangın Söndürme

Şekil 4.22. Örnek bir tasarım için şartname bilgileri seçimi

Sonrasında kavramsal tasarım aşamasına geçilir. Tüm fonksiyon yapısından yola çıkılarak ortaya çıkarılan alt fonksiyon yapısındaki parametrelerden oluşan tasarım katalogundan alternatif seçimi yapılır (Çizelge 4.20.).

Çizelge 4.20. Tasarım katalogu

Çözüm		1	2	3	4	5
Parametre						
Eyleyici	1	Elektrik Motoru 	İçten Yanmalı Motor 	Hidrolik Motor 		
Enerji	2	Pil CELL 	Batarya BATTERY 	Yakıt FUEL 		
İntikal Konfigürasyonu	3	2 Tekerlekli 	3 Tekerlekli 	4 Tekerlekli 	Çok Tekerlekli 	Paletli 
Faydalı Yük	4	Gözetleme Ekipmanları 	Taşıyıcı 	Silah Sistemi 	Manipülör 	Su Topu 
Süspansiyon Sistemi	5	Kauçuk Süspansiyon 	Diğer Süspansiyon 			
Yönlendirme Sistemi	6	Ackerman 	Diferansiyel 	Senkron 	4WS 	

A _T		
1.2	1.3	
2.3		
3.3	3.4	3.5
4.3		
5.2		
6.2	6.4	

$A_T = 2 \times 1 \times 3 \times 1 \times 1 \times 2 = 12$ şartname sorularına verilen cevaplar doğrultusunda tasarım katalogu ve graf ağaçları eşliğinde toplamda 12 adet alternatif belirlenmiştir.

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 1.2 + 2.3 + 3.3 + 4.3 + 5.2 + 6.2 & A_7 &= 1.3 + 2.3 + 3.3 + 4.3 + 5.2 + 6.2 \\
 A_2 &= 1.2 + 2.3 + 3.3 + 4.3 + 5.2 + 6.4 & A_8 &= 1.3 + 2.3 + 3.3 + 4.3 + 5.2 + 6.4 \\
 A_3 &= 1.2 + 2.3 + 3.4 + 4.3 + 5.2 + 6.2 & A_9 &= 1.3 + 2.3 + 3.4 + 4.3 + 5.2 + 6.2 \\
 A_4 &= 1.2 + 2.3 + 3.4 + 4.3 + 5.2 + 6.4 & A_{10} &= 1.3 + 2.3 + 3.4 + 4.3 + 5.2 + 6.4 \\
 A_5 &= 1.2 + 2.3 + 3.5 + 4.3 + 5.2 + 6.2 & A_{11} &= 1.3 + 2.3 + 3.5 + 4.3 + 5.2 + 6.2 \\
 A_6 &= 1.2 + 2.3 + 3.5 + 4.3 + 5.2 + 6.4 & A_{12} &= 1.3 + 2.3 + 3.5 + 4.3 + 5.2 + 6.4
 \end{aligned}$$

Öncelikle parametrelerin %100 üzerinden etkisinin ne durumda olacağı gösterilip ardından parametrelere göre memnuniyet dereceleri belirlenerek mesele matematik

ifadeler haline dönüştürülerek sonuca ulaşılmıştır (Çizelge 4.21.). Matematik ifadeler haline dönüştürme λ_3 seti değerleri ile memnuniyet değerleri çarpılıp ardından toplanarak gerçekleştirilmektedir (Çizelge 4.22.). Yapılan bu işlemler sonucunda ortaya çıkan alternatif örnek şekil olarak gösterilmiştir (Şekil 4.23.).

Çizelge 4.21. Memnuniyet dereceleri (Ağırlık sınıfı orta-büyük)

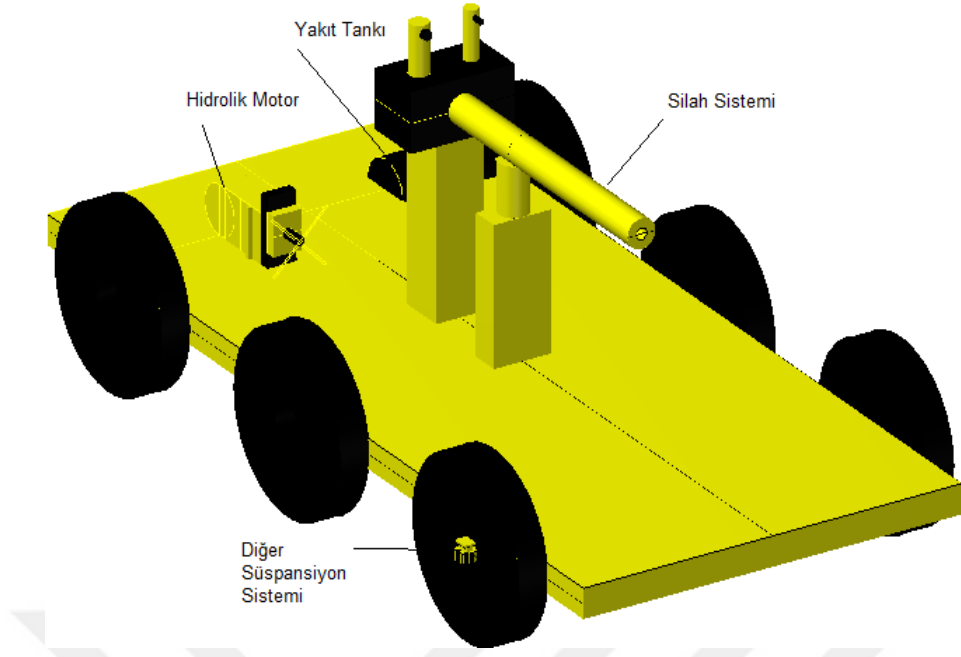
Parametreler	Memnuniyet Dereceleri								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eyleyici							Elektrik Motoru	İçten Yanmalı Motor	Hidrolik Motor
Enerji					Pil		Batarya	Yakıt	
İntikal Konfigürasyonu		2 T.		3 T.		4 T.		Paletli	Çok T.
Faydalı Yük									Faydalı Yükler
Süspansiyon Sistemi				Kauçuk S.S.				Diğer S.S.	
Yönlendirme Sistemi				Ackerman Y.S.	Senkron Y.S.		4WS Y.S.		Diferansiyel Y.S.

Çizelge 4.22. Ölçüt önem göstergesi (Ağırlık sınıfı orta-büyük) (λ_3 Seti)

	C ₁ Eyleyici	C ₂ Enerji	C ₃ İntikal Konfigürasyonu	C ₄ Faydalı Yük	C ₅ Süspansiyon Sistemi	C ₆ Yönlendirme Sistemi	
λ_3	20	11	30	10	13	16	$\sum \lambda_i e_{ij}$
A ₁	8	8	6	9	8	9	766
A ₂	8	8	6	9	8	7	734
A ₃	8	8	9	9	8	9	856
A ₄	8	8	9	9	8	7	844
A ₅	8	8	8	9	8	9	826
A ₆	8	8	8	9	8	7	X
A ₇	9	8	6	9	8	9	786
A ₈	9	8	6	9	8	7	754
A ₉	9	8	9	9	8	9	876
A ₁₀	9	8	9	9	8	7	824
A ₁₁	9	8	8	9	8	9	846
A ₁₂	9	8	8	9	8	7	X

$$\sum \lambda_i e_{ij} = (9 \times 20) + (8 \times 11) + (9 \times 30) + (9 \times 10) + (8 \times 13) + (9 \times 16) = 876$$

Ağırlık oranı metodu ile en iyi alternatif A₉ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.23. Uygulama-3 için seçilen en iyi alternatifin şekil olarak gösterimi

5. SONUÇ

Yapılan çalışma ile insansız kara araçlarındaki bütün parametrelerinin birbiri ile ilişki halinde olduğu ortaya çıkarılmıştır. İnsansız kara aracının her türlü arazi şartında görev yapabilmesini sağlayan intikal konfigürasyonun oluşturulmasının gerçekte çok zor olduğu fark edilmiştir. Bir insansız kara aracının tasarımının tabandan başladığı ve mekanik sistem parametrelerine göre amaca en uygun insansız kara aracı tasarımının gerçekleştirileceği yapılan çalışma sonucunda anlaşılmıştır. Bu karmaşık tasarımın geleneksel metotlardan ziyade modern tasarım metotları ile çözümünün vuku bulacağı fikrine ulaşılmış ve çalışma başarı ile sonuçlandırılmıştır. İnsansız kara aracı gibi kompleks yapıya sahip olan robotların tasarımı için, modern tasarım yöntemi olan sistematik tasarım en uygun yöntem olarak belirlenmiştir.

- Stratejik ve kompleks olan insansız kara aracı tasarımı, geliştirilen tasarım işlem modeli ile daha kolay anlaşılır hale getirilmiştir.
- İnsansız kara aracındaki ihtiyaçlar, istekler ve kısıtlamalar belirlenerek şartname oluşturulup sorunun tasviri gerçekleştirilmiş ve isteğe göre insansız kara aracı tasarımı yapılmıştır.
- Kavramsal tasarım aşamasına geçişin yapılmasıyla birlikte insansız kara aracına ait tüm fonksiyon yapısı oluşturularak amaca en uygun insansız kara aracı tasarımı fonksiyonel bir şekilde gösterilmiştir.
- Karmaşık olan tüm fonksiyon yapısı bölünerek çözümü aramayı kolaylaştıracak olan alt fonksiyonlar saptanmış ve anlaşılması zor olmayan bir fonksiyon yapısıyla bu fonksiyonlar birleştirilmiştir.
- Alt fonksiyon yapısı oluşturulurken, insansız kara aracı fiziksel çalışma prensibinden yola çıkılmış ve aracın harekete geçmesindeki birbiriyle etkileşimde olan 6 parametre tespit edilmiştir. Böylece çok karmaşık tüm fonksiyon yapısı 6 parametreye ayrıştırılarak daha kolay anlaşılır hale getirilmiş ve her parametre üzerinde yoğunlaşıp problemin çözümü rahatlatılmıştır.

- Enerji, eyleyici, intikal konfigürasyonu, faydalı yük, süspansiyon sistemi ve yönlendirme sistemi olarak belirlenen parametreler için tasarım alternatiflerinin üretilmesinde mümkün olan en geniş sayıda çözüm sayısı ortaya koyabilen tasarım katalogu kullanılmıştır. Tasarım katalogu parametrelerin şekilleri ve teknik özellikleri ile geliştirilmiştir.
- Kurallara dayalı bir veri tabanı oluşturularak graf ağacı metodu ile karar verme işlemi gerçekleştirilmiştir.
- Graf ağaç yapısındaki belirlenen alternatifler insansız kara araçlarının ağırlığına göre tasarımcı inisiyatifine bağlı olan 3 farklı λ seti ve 3 farklı memnuniyet dereceleri bulunan ağırlık oranı metodu ile matematik ifadelerine dönüştürülerek en uygun alternatifin seçimi gerçekleştirilmiştir. Böylece insansız kara araçlarına adapte edilen sistematik tasarım içerisindeki kavramsal tasarım sonlandırılmıştır.
- İnsansız kara aracı sistematik tasarım sürecini ürün geliştirme süreçlerine dahil edilmesi sonucunda, geliştirilecek olan ürüne ait pek çok zayıf ve pozitif parametreleri sistematik bir yolla şartname süzgecinden geçirilerek kavramsal tasarım ile tahmin edilmiştir. Böylece ürün hala tasarım aşamasındayken ürünün tasarımını iyileştirilebilir hale gelmiştir.
- Hazırlanan bu karar sistemi ile tasarımcının bütün kriterler eşliğinde alternatifleri değerlendirmek için harcayacağı zaman kısalmış, tasarım maliyeti azalmıştır.
- İnsansız kara aracı sistematik tasarımının ticarileştirilmesi durumunda, müşteri isteğine göre çeşit çeşit insansız kara aracı tasarımının gerçekleştirilebileceği geliştirilen bu tasarım işlem modeli ile açık bir şekilde gösterilmiştir.
- Geliştirilen tasarım işlem modeli ile veri tabanı oluşturulmuş sistematik tasarım, yapay zeka kullanımına uygun hale gelmiştir. İnsansız kara araçları sistematik tasarımında yapay zeka kullanılarak mühendislik tasarımı yani ayrıntılı tasarım işlemine geçişi yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Nader C. E., An Analysis of Manpower Requirements for the United States Marine Corps Tiers II&III Unmanned Aerial Systems Family of Systems Program. The Master Thesis. Naval Postgraduate School, California, USA, s. 3-16, 25-33, 44-53, 62-64, 2007.
- [2] Sonmezocak E., Kurt S., Optimum Route Planning and Scheduling for Unmanned Aerial Vehicles. The Master Thesis. Naval Postgraduate School, California, USA, s. 7, 2008.
- [3] Buckley O. D., Johnson J. J. et al., An Integrated Command and Control Architecture Concept for Unmanned Systems in the Year of 2030. The Master Thesis. Naval Postgraduate School, California, USA, s. 2, 25-38, 49-85, 91-115, 195-200, 240-243, 2010.
- [4] Quintana E., The Ethics and Legal Implications of Military Unmanned Vehicles. Royal United Services Institute for Defense and Security Studies, United Kingdom, s. 3-26, 2008.
- [5] Guest J., Advancing Weapons Technology and the Future of Warfare: Strategic, Legal and Ethical Perspectives. The Master Thesis. University of Canterbury, England, s. 2-7, 15, 23-66, 2011.
- [6] SAB (Scientific Advisory Board), "Operating Next-Generation Remotely Piloted Aircraft for Irregular Warfare", US. Air Force, USA, s. 10-32, 2011.
- [7] Anonim, İnsansız araçlar, <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/ugv.htm> (Erişim tarihi: 02.01.2017).
- [8] Anonim, Robotik, Boğaziçi Üniversitesi, <http://robot.cmpe.boun.edu.tr/593/> (Erişim tarihi: 02.01.2017).
- [9] Ö. Yalçın, İnsansız Kara Araçlarında 2D Lidar Kullanarak Yol Sınırları Tespiti. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2014.

- [10] Reddiar J., A Simulation of Autonomous and Cooperative Behaviours using LEGO MINDSTORMS NXT. The Doctorate Thesis. Murdoch University, Australia, s. 7-18, 26, 2011.
- [11] Sklar E., "Exploring Robotics", The Coursepack, Brooklyn College of the City University of New York, USA, s. 3, 166, 2010.
- [12] Tsourveloudis N.C., Doitsidis L., Valavanis K.P., "Autonomous Navigation of Unmanned Vehicles: A Fuzzy Logic Perspective". In: V. Kordic, A. Lazinica, M. Merdan, "Cutting Edge Robotics", InTech, s. 306, 2005.
- [13] Jones J. P., Cooperative Area Surveillance Strategies Using Multiple Unmanned Systems. The Doctorate Thesis. Georgia Institute of Technology, USA, s. 1-3, 2009.
- [14] Chiang E., Wrightson P., "Intelligent Human-Machine Collaboration: Summary of a Workshop", Technical Report ISBN: 0-309-66123-4, Board on Global Science and Technology, Policy and Global Affairs, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 3-23, 2012.
- [15] Gündoğdu K., Çalhan A., "İnsansız Askeri Kara Aracı Tasarımı", İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi. 2 (1):36-45, 2013.
- [16] ARLTAB (Army Research Laboratory Technical Assessment Board), "2009-2010 Assessment of the Army Research Laboratory", Technical Report ISBN: 978-0-309-21140-6, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 20-109, 2011.
- [17] Larkin M. S., Brave New Warfare: Autonomy In Lethal UAVs. The Master Thesis. Naval Postgraduate School, California, USA, s. 2, 12-13, 44-47, 2011.
- [18] Neal P. J., "From Unique Needs to Modular Platforms", The Future of Military Robotics, s. 1-10, 2010.

- [19] Wallace J. A., Integrating Unmanned Aircraft Systems into Modern Policing in an Urban Environment. The Master Thesis. Naval Postgraduate School, California, USA, s. 2-65, 2012.
- [20] Kaya F. A., Development of A Receiver Processor for UAV Video Signal Acquisition and Tracking Using Digital Phased Array Antenna. The Master Thesis. Naval Postgraduate School, California, USA, s. 1, 126, 2010.
- [21] DEPS (Division on Engineering and Physical Sciences), "Nanophotonics: Accessibility and Applicability", Technical Report ISBN: 0-309-10723-7, Committee on Nanophotonics Accessibility and Applicability, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 137-179, 2008.
- [22] Pereira E. T., Cooperative Control of Teams of Unmanned Air Vehicles. The Master Thesis. Universidade do Porto, Portugal, s. 7-8, 14, 37, 2009.
- [23] NSB (Naval Studies Board), "2003 Assessment of the Office of Naval Research's Marine Corps Science and Technology Program", Technical Report ISBN: 0-309-52625-6, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 8-9, 12-21, 25-27, 30-46, 50-61, 2004.
- [24] Kurkcu C., Oveyik K., U.S. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Network Centric Warfare (NCW): Impacts on Combat Aviation Tactics from Gulf War I Through 2007 Iraq. The Master Thesis. Naval Postgraduate School, California, USA, s. 4-85, 2008.
- [25] Valjaots E., Sell R., "Dynamic Motion Energy Efficiency Measurement of Ground Vehicles", 8th International DAAAM Baltic Conference, Estonia, April 19-21, s. 3, 2012.
- [26] Karel A., "İnsansız Kara Araçları" Savunma Sanayi Gündemi Dergisi. (12) s. 27-33, 2010.
- [27] National research Council, Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles, Washington, D.C., USA, 2002.

- [28] Aksoy R., Kurnaz S., "İnsansız Kara Araçları ve Muharebe Gereksinimleri" Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi. 4 (1): s. 1-10, 2009.
- [29] Yuqiao Z., AM 17 Field Ruggedized UGV. The Master Thesis. National University of Singapore, Singapore, s. 1-5, 2009.
- [30] BAST (Board on Army Science and Technology), "Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles", Technical Report ISBN: 0-309-50365-5, Committee on Army Unmanned Ground Vehicle Technology, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 1-135, 2002.
- [31] K. İren, Endüstriyel Çizgi Takip Eden Robot Cihazı Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi. Ankara, 2013.
- [32] Todd, D.J, Walking Machines, an Introduction to Legged Robots. Kogan Page Ltd, 1985.
- [33] Byun, K.S., Song J.B., "Design and construction of continuous alternate wheels for an omnidirectional mobile robot", J Robot Syst. 20(9): s. 569-579, 2003.
- [34] Z. Kurt, Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalamaya Yönelik Akıllı Algoritmaların Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2007.
- [35] West, M., Asada, H., "Design of ball wheel mechanism for omnidirectional vehicles with full mobility and invariant kinematics". J Mech Des. 119(2): s. 153-161, 1997.
- [36] Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D., Introduction to Autonomous Mobile Robots. Massachusetts Institute of Technology, London, England, 2011.
- [37] Anonim, Robotlarda Tekerlek ve Palet, <https://www.smashingrobotics.com/an-overview-of-wheeled-mobile-platform-systems/> (Erişim tarihi: 12.02.2017).
- [38] Anonim, İnsansız Kara Araçlarında Tekerlek ve Palet <http://www.robotpark.com.tr> (Erişim tarihi: 20.02.2017).

- [39] Anonim, Ackerman Prensipleri, <https://www.muhendisbeyinler.net/ackerman-prensipleri-nedir> (Erişim tarihi: 05.03.2017).
- [40] Çetinkaya, S., Taşıt mekaniği. s. 101-104, 302-310. Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 2015.
- [41] Anonim, Lucas, G.W., A Tutorial and Elementary Trajectory Model for the Differential Steering System of Robot Wheel Actuators, 2001, <http://rosum.sourceforge.net/papers/DiffSteer/> (Erişim tarihi: 10.03.2017).
- [42] Jones, J., L., Flynn, A., M., Seiger, B., Mobile Robots Inspiration to implementation, AK Peters, Natick, s. 486, 1998.
- [43] D. Kavak, İnsansız Kara Araçları Navigasyonun da Genişletilmiş Kalman (GKF) ve Sıkıştırılmış Genişletilmiş Kalman Filtre (SGKF) Tabanlı Slam Yöntemlerinin Geliştirilmesi ve Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 2008.
- [44] Anonim, Milli Eğitim Bakanlığı Mesleki Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, <http://megep.meb.gov.tr> (Erişim tarihi: 25.03.2017) Motorlu Araçlar Teknolojisi, Direksiyon Sistemleri, s. 47, Ankara, 2007.
- [45] Anonim, Gümüş, M., “Elektronik Taşıt Hareket Kontrol Sistemleri”, Ders Notları, 2010.
- [46] Anonim, 4WS Yönlendirme Sistemi, <http://www.otoguncel.com/teknik-bilgiler/dort-tekerlekten-yon-kontrol-sistemleri-4ws-four-wheel-steering/> (Erişim tarihi: 25.03.2017).
- [47] Craig, J.J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 2nd edition. Boston, Addison-Wesley, 1989.
- [48] Sciavicco, L., Siciliano, B., Modeling and Control of Robot Manipulators. New York, McGraw-Hill, 1996.

- [49] Campion, G., Bastin, G., D'Andréa-Novel, B., "Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots." IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12 (1): s. 47–62, 1996.
- [50] Bayazıt, N., Endüstri ürünlerinde ve mimarlıkta tasarlama metotlarına giriş. 1-255. Literatür yayıncılık, İstanbul, 1994.
- [51] M. Bozdemir, Takım Tezgahlarının Yapay Zeka Tekniklerine Dayalı Sistematik Tasarımı. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2003.
- [52] Murrel K.F.H., "Ergonomics man in his working environment", Chapman & Hall, London, s. 1-100, 1965.
- [53] Chapanis A., "Research techniques in human engineering", The John Hopkins Press, Baltimore, s. 1-95, 1965.
- [54] Hsu W. and Woon M., "Current research in the conceptual design of mechanical products", Computer Aided Design, 30(5): s. 377-389, 1998.
- [55] S. Sivri, Kavramsal Tasarımda Fonksiyonel Model Oluşturma. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2013.
- [56] Pahl, G., Beitz, W., "Engineering Design: A Systematic Approach", Springer Verlag, London, 1988.
- [57] Börklü, H. R., Mühendislik Tasarımı-Sistemik Yaklaşım. 1-3, 6-8, 89-101, 155-221. Hatiboğlu Basım ve Yayım, Ankara, 2010.
- [58] B. M. O. Halloran, R. B. Stone, I. Y. Tumer, "A Method to Compute Early Design Risk Using Customer Importance and Function-Flow Failure Rates", Oregon State University, Corvallis, United States, s. 1-9, 2000.
- [59] Roozenburg N.F.M and Eekels j., "Product Design: Fundamental and methods", John Willey & Sonns, England, s. 10-40, 1995.

[60] Archer L.B., "Technological innovation; A methodology", Frimley Survey:
Inforlink, New York, s. 1-50, 1971.

