

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

6 SERBESTLİK DERECELİ ASİMETRİK PARALEL
ROBOTLARIN ÇALIŞMA UZAYI ENİYİLEMESİ VE
BENZETİM YAZILIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

METİN TOZ

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

6 SERBESTLİK DERECELİ ASİMETRİK PARALEL
ROBOTLARIN ÇALIŞMA UZAYI ENİYİLEMESİ VE
BENZETİM YAZILIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

METİN TOZ

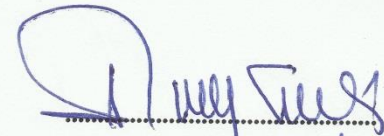
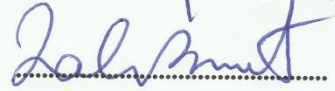
Doç.Dr. Serdar KÜÇÜK
Danışman, Kocaeli Üniv.

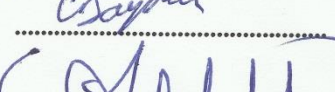
Prof.Dr. Zafer BİNGÜL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. İsmail ERTÜRK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Cüneyt BAYILMIŞ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Sedat ATMACA
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.




Tezin Savunulduğu Tarih: 27.09.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Paralel robot mekanizmaları iki platformun birbirinden bağımsız en az iki kinematik zincirle birbirine bağlandığı mekanizmalardır. Bu mekanizmalar tasarlandıkları ilk günden günümüze kadar birçok bilimsel araştırmaya konu edilmişler ve uçuş benzetiminden uzay araştırmalarına, sağlıkta hassas konumlandırma gerektiren uygulamalardan deprem benzetimine kadar birçok alanda kullanılmışlardır. Bu kadar yaygın kullanım alanına sahip olmaları bu mekanizmaların tasarımlarının da amaca uygun olmasını zorunlu kılmaktadır. Paralel robot mekanizmaları için tip sentezleme yeni mekanizma tipleri bulmanın yöntemlerini ve bu yöntemlerle geliştirilen yeni mekanizmaları sınıflandırmayı amaçlar. Bu tez çalışmasında X.S. Gao ve arkadaşları [1] tarafından önerilen altı serbestlik derecesine (SD) sahip ve Genelleştirilmiş Stewart Platform (GSP) mekanizmaları ismi verilen mekanizmalar üzerinde durulmuştur. Bu çalışmada ortaya konulan mekanizmalar arasından yeni paralel robot mekanizmaların bulunması amaçlanmıştır. Tez çalışmasında GSP'ler arasından 195 tanesi belirlenen iki kıstasa göre seçilmiştir. Bu mekanizmalar arasından belirlenen iki tane simetrik olmayan mekanizmanın geometrik en iyilemesi Parçacık Sürü Eniyileme (PSO) algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sunulan tüm mekanizmaların tasarım, ters kinematik, sembolik ve sayısal Jacobian matrisi, çalışma uzayı, tekil nokta analizi, dexterity analizi ve animasyonunun yapılabildiği GSP-DAP isimli bir yazılım geliştirilmiştir.

Tez çalışması boyunca gösterdiği destek ve yönlendirmeleriyle çalışmamın tamamlanmasında büyük emeği olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Serdar KÜÇÜK'e şükranlarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmalarım sırasında kritik noktalarda bana doğru yolu gösteren ve doktora tez izleme jürisinde bulunan hocalarım Prof. Dr. Zafer BİNGÜL ve Prof. Dr. İsmail ERTÜRK'e, tez ile ilgili birçok konuda tartışma imkânı bulduğum ve ilerlememde değerli katkıları olan Arş. Gör. Dr. A. Burak İNNER'e ve bana tez çalışması için gerekli izinleri sağlayan Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Bilgisayar Eğitimi bölümünde bulunan tüm değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, bu süreçte vermiş olduğu destek ve göstermiş olduğu sabır ve anlayış için sevgili eşim Güliz'e teşekkürlerimi, biricik kızım Berra'ya ve sevgili oğlum Muhammed Kayra'ya sevgilerimi sunarım.

Eylül – 2013

Metin TOZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Sebepleri	3
1.2. Önceki Çalışmalar	5
1.2.1. Tip sentezleme	5
1.2.2. Geometrik eniyileme.....	10
1.2.3. PSO algoritması	12
1.2.4. Benzetim	14
1.3. Tez Çalışmasının Katkıları.....	15
1.4. Tez Düzeni	16
2. TİP SENTEZLEME	17
2.1. Giriş	17
2.2. Graf Teorisi Temelli Yaklaşım	19
2.3. Grup Teorisi Temelli Yaklaşım.....	19
2.4. Vida Teorisi Temelli Yaklaşım	20
2.5. 6 SD'ne Sahip GSP Mekanizmaları İçin Tip Sentezleme.....	22
2.5.1. Düzlem geometrik nesnesi neden hesaplama dışında bırakıldı.....	24
2.5.2. İsimlendirme.....	26
2.5.3. Muhtemel tüm GSP sayısının bulunması.....	26
2.5.4. GSP mekanizmaların Simetrik Olma Durumu	29
2.6. Sonuçlar.....	33
3. GSP MEKANİZMALARI	34
3.1. Giriş	34
3.2. Serbeslik Derecesi	34
3.3. Ters Kinematik.....	38
3.3.1. D_1 tipi kısıt için ters kinematik denklemi.....	38
3.3.2. D_2 tipi kısıt için ters kinematik denklemi.....	39
3.3.3. D_3 tipi kısıt için ters kinematik denklemi.....	42
3.3.4. D_4 tipi kısıt için ters kinematik denklemi.....	44
3.3.5. A_1 tipi kısıt için ters kinematik denklemi.....	46
3.4. Jacobian Matrisi	47
3.4.1. D_1 tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi	48
3.4.2. D_2 tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi.....	49
3.4.3. D_3 tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi.....	52
3.4.4. D_4 tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi.....	53
3.4.5. A_1 tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi.....	55

3.4.6. Jacobian matrisinin oluşturulması.....	56
3.5. Sonuçlar.....	56
4. GSP MEKANİZMALARININ GEOMETRİK ENİYİLEMESİ	58
4.1. Giriş	58
4.2. Homojen Jacobian Matrisi	59
4.3. Dexterous Çalışma Uzayı.....	62
4.4. GSP Mekanizmalarının Geometrik Tasarım Parametreleri	65
4.5. PSO Algoritması	72
4.6. $D_1^3D_3$ Tipi Bir GSP'nin Geometrik Eniyilemesi	74
4.6.1. Geometrik tanımlama	75
4.6.2. Ters kinematik.....	76
4.6.3. Jacobian matrisi.....	77
4.6.4. Dexterous çalışma uzayının hesaplanması	79
4.6.5. Eniyileme parametreleri ve amaç fonksiyonu.....	80
4.6.6. Eniyileme sonuçları.....	84
4.7. $D_4^3A_1^3$ Tipi ve 3 Bacaklı Bir GSP'nin Geometrik Eniyilemesi	93
4.7.1. Geometrik tanımlama.....	93
4.7.2. Ters kinematik.....	95
4.7.3. Jacobian matrisi.....	95
4.7.4. Dexterous çalışma uzayının hesaplanması.....	97
4.7.5. Eniyileme parametreleri ve amaç fonksiyonu.....	98
4.7.6. Eniyileme sonuçları.....	101
4.8. Sonuçlar.....	106
5. GSP TASARIM VE ANALİZ PLATFORMU	107
5.1. GSP-DAP Açılış Ekranı	108
5.2. Tasarım.....	109
5.2.1. Mekanizma tip seçimi	109
5.2.2. Koordinat tanımlama.....	110
5.2.3. Tasarım ana menüsü.....	112
5.3. Analiz	115
5.3.1. Mekanizma	115
5.3.2. Çerçeve koordinat değişiklikleri	117
5.3.3. Çizim alanı	117
5.3.4. Analiz ana menüsü	117
5.4. SP Mekanizmasının GSP-DAP Uygulaması.....	129
5.5. Sonuçlar.....	133
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	134
6.1. Öneriler.....	136
KAYNAKLAR	137
EKLER.....	145
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	147
ÖZGEÇMİŞ	148

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	SP mekanizması	1
Şekil 2.1.	Farklı yapısal özelliklere sahip robot mekanizmaları	17
Şekil 2.2.	Örnek bir paralel robot mekanizma yapısı	18
Şekil 2.3.	3 SD'ne sahip bir seri ve bir paralel robotun eşdeğer grafikleri	19
Şekil 2.4.	Birim vida	20
Şekil 2.5.	Reciprocal vidalar	21
Şekil 2.6.	Örnek bir düzlemsel eklem çizimi	25
Şekil 2.7.	Farklı kısıt tiplerinin gerçekleştirilmesi için örnek bacak yapıları	31
Şekil 2.8.	Simetrik olan ve olmayan örnek GSP mekanizmaları	32
Şekil 3.1.	D_1^6 tip GSP mekanizması	36
Şekil 3.2.	D_3^6 tip GSP mekanizması	37
Şekil 3.3.	$D_1^2 D_2 D_3 D_4 A_1$ tip GSP mekanizması	37
Şekil 3.4.	SPS tipi bacak ve bağlantı şekli	38
Şekil 3.5.	SPC tipi bacak ve bağlantı şekli	40
Şekil 3.6.	SPC bacak yapısı	40
Şekil 3.7.	CPS tipi bacak ve bağlantı şekli	42
Şekil 3.8.	CPS bacak yapısı	43
Şekil 3.9.	CCC tipi bacak ve bağlantı şekli	44
Şekil 3.10.	CCC bacak yapısı	45
Şekil 3.11.	CCC bacak açısal kısıt gösterimi	46
Şekil 4.1.	İki bacak arasındaki uzaklık	64
Şekil 4.2.	Küresel eklem sınırı	66
Şekil 4.3.	Silindirik eklem sınırları	67
Şekil 4.4.	Silindirik eklem konum tespiti	67
Şekil 4.5.	İki silindirik eklem konum tespiti	69
Şekil 4.6.	PSO algoritması akış şeması	73
Şekil 4.7.	$D_1^5 D_3$ tipi GSP mekanizması	76
Şekil 4.8.	P için kübik arama uzayı	79
Şekil 4.9.	L_{p1} ve L_{p2} için silindirik arama uzayı	81
Şekil 4.10.	Bacakların çapraz yerleşimi	82
Şekil 4.11.	$D_1^5 D_3$ mekanizması geometrik eniyileme akış şeması	84
Şekil 4.12.	Ulaşılabilir çalışma uzayı hacimleri	90
Şekil 4.13.	Dexterous çalışma uzayları ve LCI değerleri	90
Şekil 4.14.	$D_1^5 D_3$ tip 8 GSP mekanizması için karakteristik uzunluğun dexterous çalışma uzayı üzerine olan etkisi	92
Şekil 4.15.	5. tip bacak boyu ile elde edilen SP mekanizması için karakteristik uzunluğun dexterous çalışma uzayı üzerine olan etkisi	92

Şekil 4.16. $D_4^3A_1^3$ tipi bir GSP mekanizması.....	94
Şekil 4.17. TDW için eniyilenmesi yapılan $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması.....	101
Şekil 4.18. $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması için elde edilen eniyi TDW	102
Şekil 4.19. ODW için eniyilenmesi yapılan $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması.....	102
Şekil 4.20. $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması için elde edilen eniyi ODW	102
Şekil 4.21. Tablo 4.10'da yer alan veriler ile çizdirilen SP mekanizması	105
Şekil 4.22. SP mekanizması için elde edilen TDW	105
Şekil 4.23. SP mekanizması için elde edilen ODW	105
Şekil 5.1. GSP-DAP açılış ekranı	108
Şekil 5.2. GSP-DAP tasarım ekranı	109
Şekil 5.3. GSP-DAP mekanizma tip seçimi.....	110
Şekil 5.4. GSP-DAP koordinat girişi	111
Şekil 5.5. Temel çerçeve	111
Şekil 5.6. Uç işlevci çerçevesi	112
Şekil 5.7. GSP-DAP tasarım kısmı ana menüsü	112
Şekil 5.8. GSP-DAP ile oluşturulan D_3^6 mekanizması	113
Şekil 5.9. Görüntüsü değiştirilen D_3^6 tip GSP.....	114
Şekil 5.10. D_3^6 tip GSP mekanizması için elde edilen sembolik Jacobian matrisi	114
Şekil 5.11. GSP-DAP analiz kısmı ana formu	115
Şekil 5.12. GSP-DAP ters kinematik analizi	118
Şekil 5.13. Konum değişkenleri yörünge grafikleri.....	119
Şekil 5.14. Yönelim değişkenleri yörünge grafikleri.....	119
Şekil 5.15. Jacobian matrisi menüsü.....	120
Şekil 5.16. D_3^6 mekanizması için üretilen Jacobian matrisi.....	121
Şekil 5.17. Çalışma uzayı menüsü	122
Şekil 5.18. D_3^6 mekanizması için hesaplanan çalışma uzayı	123
Şekil 5.19. D_3^6 mekanizması çalışma uzayı raporu.....	124
Şekil 5.20. Tekil nokta analizi menüsü	125
Şekil 5.21. D_3^6 mekanizması için tekil nokta analizi	125
Şekil 5.22. D_3^6 mekanizması için dexterity analizi	126
Şekil 5.23. Animasyon menüsü	126
Şekil 5.24. Örnek bir yörünge.....	127
Şekil 5.25. a) Yörünge belirleme formu b) Yörünge noktası seçim işlemi	128
Şekil 5.26. D_3^6 mekanizması için yapılan animasyon.....	129
Şekil 5.27. a) SP mekanizması çerçeve koordinatları b) SP mekanizması.....	130
Şekil 5.28. a) SP mekanizması sembolik Jacobian matrisi b) Aktif ve pasif eklem parametreleri	130
Şekil 5.29. SP mekanizması çalışma uzayı analiz parametreleri	131

Şekil 5.30. a) SP mekanizması çalışma uzayı	
b) Çalışma uzayı raporu	131
Şekil 5.31. a) SP mekanizması analiz parametreleri (α , β)	
b) Tekil nokta analizi c) Dexterity analizi	132
Şekil 5.32. a) SP mekanizması için örnek yörünge	
b) SP mekanizmasının anlık görüntüsü	132

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Seri ve paralel robot mekanizmalarının karşılaştırılması	4
Tablo 2.1. GSP tip sentezlemesi için kullanılacak geometrik kısıt tanımları	25
Tablo 2.2. 3D3A sınıfında yer alan muhtemel GSP tipleri	27
Tablo 2.3. 4D2A sınıfında yer alan muhtemel GSP tipleri	27
Tablo 2.4. 5D1A sınıfında yer alan muhtemel GSP tipleri	28
Tablo 2.5. 6D sınıfında yer alan muhtemel GSP tipleri	29
Tablo 3.1. Pasif SD içeren eklem çiftleri	35
Tablo 4.1. Endüstride üretilmiş uzaklık kısıtı oluşturabilecek bacak yapıları	74
Tablo 4.2. 10 farklı bacak yapısı için en kısa ve en uzun bacak boyları	75
Tablo 4.3. Örnek paralel robot mekanizmalarının parametreleri	80
Tablo 4.4. PSO parametreleri	83
Tablo 4.5. 1. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	85
Tablo 4.6. 2. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	85
Tablo 4.7. 3. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	86
Tablo 4.8. 4. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	86
Tablo 4.9. 5. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	86
Tablo 4.9. (Devam) 5. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	87
Tablo 4.10. 6. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	87
Tablo 4.11. 7. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	87
Tablo 4.12. 8. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	88
Tablo 4.13. 9. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	88
Tablo 4.14. 10. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	88
Tablo 4.14. (Devam) 10. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları	89
Tablo 4.15. SP eniyileme sonuçları	89
Tablo 4.16. $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizmasının TDW için eniyilenmesi sonucu elde edilen parametreler	101
Tablo 4.17. $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizmasının ODW için eniyilenmesi sonucu elde edilen parametreler	101
Tablo 4.18. Lou ve diğ. 'nin SP için yaptığı en iyileme sonucu elde edilen parametreler	106
Tablo 4.19. Lou ve diğ. 'nin SP için yaptığı eniyileme sonucu elde edilen mekanizma boyutları	104
Tablo 4.20. $D_4^3A_1^3$ tip GSP ve SP mekanizmaları için en küçük ve en büyük LCI değerleri	106

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	: Açısal kısıt
A_1	: Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir doğru ile temel çerçevede yer alan bir doğru arasındaki açısal kısıt
A_i	: Temel çerçeve üzerinde herhangi bir nokta
B_i	: Uç işlevci çerçevesi üzerinde herhangi bir nokta
D	: Uzaklık kısıtı
D_1	: Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir nokta ile temel çerçevede yer alan bir nokta arasındaki uzaklık kısıtı
D_2	: Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir doğru ile temel çerçevede yer alan bir nokta arasındaki uzaklık kısıtı.
D_3	: Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir nokta ile temel çerçevede yer alan bir doğru arasındaki uzaklık kısıtı.
D_4	: Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir doğru ile temel çerçevede yer alan bir doğru arasındaki uzaklık kısıtı.
d_i	: Bacak uzunluğu
DJ	: Birimsel Jacobian matrisi
DJ_{D_1}	: D_1 tipi kısıtın birimsel Jacobian vektörü
DJ_{D_2}	: D_2 tipi kısıtın birimsel Jacobian vektörü
DJ_{D_3}	: D_3 tipi kısıtın birimsel Jacobian vektörü
DJ_{D_4}	: D_4 tipi kısıtın birimsel Jacobian vektörü
DJ_{A_1}	: A_1 tipi kısıtın birimsel Jacobian vektörü
J	: Jacobian matrisi
J_{D_1}	: D_1 tipi kısıt içiren GSP mekanizmalarının Jacobian matrisine, bu kısıtı kullanan bacak için eklenecek olan 1x6 lık vektör
J_{D_2}	: D_2 tipi kısıt içiren GSP mekanizmalarının Jacobian matrisine, bu kısıtı kullanan bacak için eklenecek olan 1x6 lık vektör
J_{D_3}	: D_3 tipi kısıt içiren GSP mekanizmalarının Jacobian matrisine, bu kısıtı kullanan bacak için eklenecek olan 1x6 lık vektör
J_{D_4}	: D_4 tipi kısıt içiren GSP mekanizmalarının Jacobian matrisine, bu kısıtı kullanan bacak için eklenecek olan 1x6 lık vektör
J_{A_1}	: A_1 tipi kısıt içiren GSP mekanizmalarının Jacobian matrisine, bu kısıtı kullanan bacak için eklenecek olan 1x6 lık vektör
J_H	: Homojen Jacobian matrisi
K_i	: Temel çerçeve üzerinde herhangi bir doğru
L_i	: Uç işlevci çerçevesi üzerinde herhangi bir doğru
P	: Uç işlevci konum vektörü
R	: Dönme matrisi

v_p	: Uç işlevci çerçevesinin doğrusal hızı
ω_p	: Uç işlevci çerçevesinin açısal hızı
κ	: Durum sayısı
γ	: Yönelim açısı, gama
α	: Yönelim açısı, alfa
β	: Yönelim açısı, beta
λ	: Mekanizmanın çalışması öngörülen çalışma uzayının serbestlik derecesi
σ_{eb}	: Homojen Jacobian matrisinin en büyük tekil değeri
σ_{ek}	: Homojen Jacobian matrisinin en küçük tekil değeri

Kısaltmalar

C	: Cylindrical Joint (Silindirik Eklem)
GSP	: Generalized Stewart Platform (Genelleştirilmiş Stewart Platform)
GSP-DAP	: GSP Tasarım ve Analiz Platformu
LCI	: Local Condition Index (Bölgesel Durum Sayısı)
ODW	: Orientational Dexterous Workspace (Yönelimsel Dexterous Çalışma Uzayı)
P	: Prismatic Joint (Prizmatik Eklem)
PSO	: Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Eniyileme)
S	: Spherical Joint (Küresel Eklem)
SD	: Serbestlik Derecesi
SP	: Stewart Platform
TDW	: Translational Dexterous Workspace (Sabit Yönelimli Dexterous Çalışma Uzayı)

6 SERBESTLİK DERECELİ ASİMETRİK PARALEL ROBOTLARIN ÇALIŞMA UZAYI ENİYİLEMESİ VE BENZETİM YAZILIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında Gao ve diğ. [1]'nin elde ettiği 6 serbestlik derecesine sahip 3850 GSP mekanizması arasından 195 tanesi önerilen iki koşul göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Bu mekanizmalar dört farklı sınıf adı altında tablolar halinde sunulmuştur. Seçilen mekanizmalar için ters kinematik denklemleri ve Jacobian matrislerinin bulunmasını sağlayan genel denklemler elde edilmiştir.

Önerilen 195 GSP mekanizması arasından seçilen iki asimetrik paralel robot mekanizmasının geometrik eniyilemesi PSO algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki mekanizma da dexterous çalışma uzayları esas alınarak benzer şekilde geometrik eniyilemesi yapılan Stewart Platform mekanizması ile karşılaştırılmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre her iki mekanizmanın da Stewart Platform mekanizmasından daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Seçilen tüm GSP mekanizmalarının tasarımının ve analizinin yapılabilmesi amacıyla Matlab programı kullanılarak GSP-DAP isimli bir benzetim yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım kullanılarak herhangi bir GSP için boyutsal tasarım, mekanizmanın kısıt yapısına bağlı olmak üzere, 3, 4, 5 ve 6 bacaklı olarak gerçekleştirilebilmektedir. GSP-DAP yazılımı ile seçilen mekanizma için sembolik ve sayısal Jacobian matrisleri elde edilebilmektedir. Sembolik Jacobian matrisinin elde edilmesi GSP-DAP yazılımının benzer çalışmalara olan önemli bir üstünlüğüdür. GSP-DAP yazılımı kullanılarak GSP mekanizmaları için çalışma uzayı analizi, dexterity analizi, tekil nokta analizi, yörünge tasarımı ve hareket animasyonu yapılabilir.

Anahtar Kelimeler: 6 SD, Geometrik Eniyileme, GSP, Paralel Robot Mekanizmaları, PSO.

WORKSPACE OPTIMIZATION AND A SIMULATION SOFTWARE DEVELOPMENT FOR 6-DOF ASYMMETRICAL PARALLEL ROBOTS

ABSTRACT

In this thesis work, 195 6-DOF GSP mechanisms have been selected according to two proposed criteria from GSP mechanisms that their maximum number of types is proved as 3850 by Gao et al. [1]. These mechanisms presented in the tables under the name of four different classes. General equations that provide the construction of the equations for the inverse kinematics and Jacobian matrix of all the types of the mechanisms were obtained.

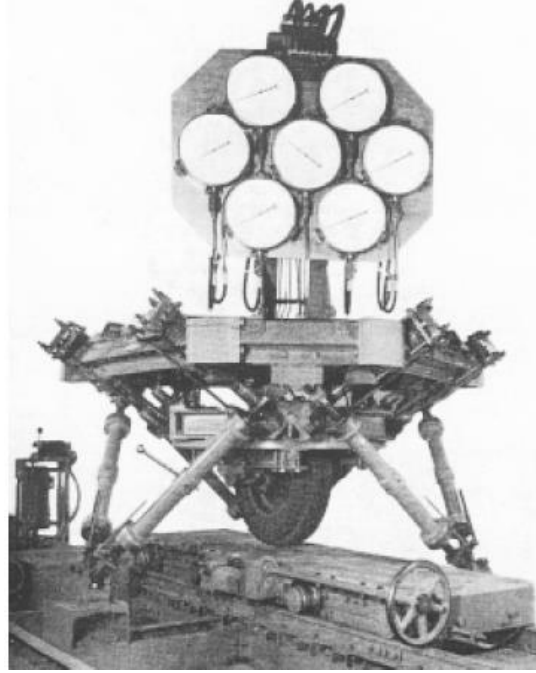
Geometrical optimization of the two asymmetrical parallel robot mechanisms selected from the proposed 195 GSP mechanisms have been performed by using PSO. Both of the mechanisms were compared with the Stewart Platform mechanism that optimized in same manner according to their dexterous workspaces. The obtained results shown that both of the mechanisms have superior performances than the Stewart Platform mechanism.

A simulation tool named as GSP-DAP was developed using Matlab in order to provide design and analysis of all the selected GSP mechanisms. Geometrical design of any GSP mechanism can be performed by using this tool for 3, 4, 5 and 6 number of legs according to the constraint structure of the mechanism. Symbolic and numerical Jacobian matrixes of the selected mechanism can be obtained by utilizing GSP-DAP. Creating the symbolic Jacobian matrix is a significant superiority of GSP-DAP to similar studies. GSP-DAP can be used to make workspace, dexterity and singularity analyses, trajectory planning and movement animation of GSP mechanisms.

Keywords: 6 DOF, Geometrical Optimization, GSP, Parallel Robot Mechanisms, PSO.

GİRİŞ

Paralel robot mekanizmaları, hareketli platform çerçevesinin temel çerçeveye en az iki bağımsız kinematik zincirle bağlandığı mekanizmalardır. Daha önceki yıllarda bazı örneklerine rastlanılsa da bu mekanizmaların en çok bilineni 1947 yılında otomotiv mühendisi Dr. Eric Gough tarafından geliştirilmiştir. Şekil 1.1’de sunulan ve Stewart Platform veya Stewart-Gough Platform mekanizması (SP) olarak isimlendirilen altı SD’li bu paralel robot mekanizması otomotiv lastiklerinin test edilmesi için kullanmıştır [2].



Şekil 1.1. SP mekanizması [3]

Paralel robot mekanizmaları sahip oldukları yüksek hız, yüksek yenilenebilirlik, yüksek hassasiyet gibi özellikleri nedeniyle birçok alanda kullanılmışlardır. Bu alanlara örnek olarak, radyo teleskop uygulamaları, uzay araştırmaları, yüksek konumlanma hassasiyeti gerektiren cerrahi operasyonlar ve birçok benzetim alanları (deprem benzetimi, uçuş benzetimi vb.) sayılabilir. Geniş kullanım alanı bu mekanizmaların tasarımlarının da amaca uygun olmasını zorunlu kılmaktadır. Örneğin bazı uygulamalar için yüksek konumlanma hassasiyeti gerekirken bir diğer

uygulama için geniş çalışma uzayı gerekebilmektedir. Bu şekilde amaca uygun tasarım ihtiyacı ve araştırmacıların muhtemel tüm paralel robot mekanizmalarını tespit etme arzusu “tip sentezleme” kavramının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Tip sentezleme en genel hali ile belirli kinematik özelliklere sahip olan tüm yapıların ortaya konulması demektir. Seri robotlar için bu sınıflandırma kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Örneğin [4]’de 3 SD’e sahip seri robotların sayısının 16 olduğu belirtilmiştir. Aynı durum paralel robotlar için geçerli değildir. Paralel robotlar için yapılan araştırmalar incelendiğinde bu konuda farklı yöntemlerin geliştirildiği ancak tam ve kesin bir yöntemin henüz ortaya konulamadığı görülmektedir [5].

Sunulan tez çalışması kapsamında; Gao ve diğ. [1] tarafından gerçekleştirilen çalışma temel referans olarak alınmıştır. Yazarlar bu çalışmalarında 6 SD’e sahip muhtemel tüm paralel robot mekanizma tiplerinin genel hallerini elde etmişler ve bu mekanizmalara GSP mekanizmaları ismini vermişlerdir.

GSP mekanizmaların iki farklı kısıta göre sınıflandırılması, isimlendirilmesi ve listelenmesi bu tez çalışmasının başlangıç hedefi olmuştur. Bu mekanizmaların ters kinematik ve Jacobian denklemlerinin elde edilmesi ve bu mekanizmalar arasından seçilecek örnek iki mekanizmanın geometrik eniyilemesinin yapılması tez çalışmasının orta düzey hedefleri olarak belirlenmiştir. Son olarak tez çalışması konu edilen tüm GSP mekanizmaları için tasarım ve analiz işlemlerinin yapılabildiği bir yazılım geliştirilmesi nihai hedef olarak belirlenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Sebepleri

Elektronik, bilgisayar, makine ve tasarım ile ilgili teknolojilerdeki hızlı gelişim, insanlar tarafından gerçekleştirilen ve çoğunlukla el becerisi, muhakeme ve karar verme yeteneği gerektiren birçok uygulamanın amaca yönelik olarak tasarlanmış robotların yardımı ile gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu hızlı gelişimle birlikte günümüzde robotlar, endüstriyel uygulamalardan [6] uzay araştırmalarına [7-8], tıbbi uygulamalardan [9-10] kurtarma faaliyetlerine [11-12] kadar hemen her alanda etkili ve verimli olarak kullanılmaktadırlar. Robotların kullanıldığı uygulama alanlarındaki bu çeşitlilik robotların tasarımlarının da aynı şekilde çeşitli olmasını gerektirmektedir. Bu çeşitlilik de doğası gereği sınıflandırma ihtiyacını doğurmaktadır. Robot mekanizmalarının sınıflandırılması en genel anlamda yapısal özelliklerine göre yapılmaktadır. Buna göre bağları birbirine seri olarak yerleşmiş ve birbirlerine dönel veya kayar eklemlerle bağlı olan mekanizmalara seri robot mekanizmaları, uç işlevcisi ile ana çerçevenin birden fazla seri bağlı kol kullanılarak birleştirilmesi ile oluşan mekanizmalar da paralel robot mekanizmaları olarak isimlendirilmektedir. Bunların dışında, kontrol yöntemlerine göre, serbestlik derecelerine göre, eyleyicilerinin kullandığı güç kaynağına göre de sınıflandırmalar yapılmaktadır [4]. Bu sınıflandırma çeşitliliği göstermektedir ki robot mekanizmaları arasında hem yapısal hem de performansa dayalı farklılıklar vardır. En temel örnek olarak seri ve paralel robot mekanizmaları arasındaki farklılıklar Tablo 1.1’de olduğu gibi özetlenebilir [4]. Tablo 1.1’de görüldüğü gibi her iki robot sınıfının birbirlerine göre farklı üstün yanları vardır. Benzer farklılıklar sadece seri ve paralel robotlar arasında değil, aynı sınıfa ait farklı mekanizma tipleri arasında da ortaya çıkmaktadır. Bütün bu farklılıklar nedeniyle herhangi bir amaç için bir robot tasarımı yapılırken bazı temel faktörlerin dikkate alınması gerekir [13]:

- Robot mekanizmasını kullanacak olan son kullanıcının ihtiyaçlarının belirlenmesi ve bu ihtiyaçları karşılayacak tasarım parametrelerinin tespit edilmesi.

- Belirlenen tasarım parametrelerini sağlayacak olan mekanizmanın seçilmesi. Örneğin uygun SD'ne sahip mekanizmanın tespit edilmesi.
- Seçilen mekanizmanın boyutlarının belirlenmesi. Örneğin mekanizmanın en az ve en çok bacak boyunun tespit edilmesi.

Tablo 1.1. Seri ve paralel robot mekanizmalarının karşılaştırılması

Seri robot mekanizmaları	Paralel robot mekanizmaları
Eklemler ve bağlardan oluşur.	Birbirine paralel birçok bağdan oluşur.
Çalışma uzayları geniştir	Çalışma uzayları küçük ve parçalıdır.
Az sayıda mekanik parçaya sahiptirler	Daha sağlam mekanik yapıya sahiptirler.
Basit kinematik denklemlere sahiptirler	Kinematik denklemler çok karmaşıktır.
Kaldırabilecekleri kütlenin mekanik yapılarının kütlesine oranı çok düşüktür.	Kaldırabilecekleri kütlenin mekanik yapılarının kütlesine oranı daha büyüktür
Eklemlerde oluşan hatalar robotun uç işlevcisine toplanarak yansır.	Eklemlerde oluşan hatalar robotun uç işlevcisine ayrı olarak yansır.

Amaca uygun robot mekanizmasına karar verildikten sonra öncelikle robotun benzetimi ve kontrolü açısından son derece önemli olan kinematik hesaplamalar ve mekanizmanın kinematik ve geometrik eniyilemesinin yapılması gerekir.

Bu tez çalışmasında Gao ve diğ. [1] tarafından 6 SD'e sahip paralel robot mekanizmalarının en genel hallerinin bulunması amacıyla gerçekleştirilen araştırma sonucunda önerilen mekanizmalar üzerinde durulmuştur. Buna göre tez çalışmasının amaçları şu şekilde sıralanabilir;

- Gao ve diğ. [1] tarafından önerilen GSP mekanizmaları arasından bu doktora tez çalışmasına konu edilecek mekanizmaların literatürde yaygın olarak kullanılan eklem çeşitleri dikkate alınarak seçilmesi.
- Seçilen 6 SD'e sahip tüm mekanizmalar için tanımlanma, isimlendirilme ve sınıflandırılma çalışmalarının yapılması ve yapılan çalışma sonucunda elde edilecek olan mekanizmaların tablolar halinde ifade edilmesi.
- Seçilen tüm mekanizmalar için ters kinematik ve Jacobian matrisi denklemlerinin elde edilmesini sağlayacak genel denklemlerin ifade edilmesi.
- Seçilen tüm mekanizmaları matematiksel olarak temsil edebilecek özellikte iki farklı mekanizmanın seçilmesi ve seçilen bu mekanizmalar için kinematik ve geometrik eniyileme yapılması.
- Seçilen mekanizmaların tasarımının ve analizinin gerçekleştirildiği bir benzetim programının yazılması.

6 SD'e sahip yeni mekanizmalar tasarlamak ve bu mekanizmaların performans analizlerini yapmak bu tez çalışmasının öncelikli başlatılma sebebini oluşturmaktadır.

1.2. Önceki Çalışmalar

Son yıllarda, genel olarak paralel robot mekanizmaları özel olarak ise 6 SD'ne sahip SP mekanizması ve bu mekanizmaların kullanım alanları oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Bu mekanizmalar konusunda literatürde yer alan çalışmalar genel olarak şu başlıklar altında toplanabilir: Yeni mekanizma tiplerinin bulunması, ileri ve ters kinematik ve dinamik analizler, çalışma uzayı analizleri, tekil nokta analizleri, kontrol uygulamaları ile kinematik ve geometrik eniyileme.

Bu bölümde doktora tez çalışmasına konu edinilen tip sentezleme, geometrik eniyileme, Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritması ve benzetim konularında literatürde yer alan çalışmalar tez konusu ile bağlantılı olarak sunulmuştur.

1.2.1. Tip sentezleme

Yeni mekanizma tipleri bulmayı amaçlayan çalışmalar literatürde yapısal sentez veya tip sentezleme olarak iki farklı şekilde isimlendirilmektedir [5]. Bu tez çalışmasında bu amaçla “tip sentezleme” tanımı kullanılacaktır. Paralel robot mekanizmaları için tip sentezlemesini konu edilen çalışmalara bakıldığında bu çalışmaların temel amacının yeni ve mevcutlardan daha iyi performans göstergelerine sahip mekanizma/mekanizmalar bulmak olduğu görülmektedir. Tip sentezleme amacıyla literatürde yaygın olarak grup teorisi, graf teorisi ve vida teorisi kullanılmaktadır [5].

Grup teorisi, cebirsel grup tanımlamasını temel alır ve bir katı cismin yer değiştirmesini tanımlarken “displacement group” adında özel bir grup tanımlar. Bu grup “Special Euclidian (SE(3)) matrix group” olarak isimlendirilen gruba bağlıdır, SE(3) matematiksel olarak “Lie grup” olarak da adlandırılmaktadır [5].

Herve [14], katı cisimlerin yer değiştirmesinin ifade edilmesi için kullanılan Lie grup teorisini mekanizma tasarımında bir köşe taşı olarak tanımladığı çalışmasında bu yöntemin detaylarını örneklerle sunmuştur. Karouia ve Herve [15] grup teorisini bacak yapıları birbirinden farklı olduğu için asimetric olarak tanımladıkları 3 SD'ne

sahip küresel paralel robot mekanizmalarının tip sentezlemesi için kullanmışlardır. Bu mekanizmaların tamamı için geçerli bir SD hesabı sundukları çalışmalarında elde ettikleri mekanizmaları SPM (3,3,6) ve SPM (4,5,6) ismini verdikleri iki kategori altında sınıflamışlardır. Salgado ve diğ. [16] çalışmalarında grup teorisini 4 SD'ne ve SCARA tipi hareket özelliklerine (üç eksenle öteleme ve bir eksen boyunca dönme hareketi) sahip paralel robot mekanizmalarının tip sentezlemesi için kullanmışlardır. Grup teorisinin kullanıldığı diğer çalışmalar şu şekilde sıralanabilir: Sparacino ve Herve [17], Meng ve diğ. [18], Liu ve diğ. [19] ve Herve ve Sparacino [20].

Graf teorisi matematik, kimya, inşaat mühendisliği ve bilgisayar teknolojisi gibi birçok alanda kullanılan bir teoridir [21]. Mekanizma tip sentezlemesi açısından bakıldığında ilk olarak Freudenstein tarafından önerilmiş bir yöntemdir [5]. Bu teori mekanizmaların bağlarını ve eklemlerini temsil eden bir grafiksel gösterimi temel alır.

Freudenstein ve Maki [22] çalışmalarında graf teorisinin genel anlamda mekanizma tasarımında nasıl kullanılacağını detayları ile açıklamışlardır. Yazarlar mekanizmalara özgü parametrelerin (Örneğin eklem tipi ve sayısı, bağ sayısı, SD vb.) bu teoride nasıl kullanıldığı, hem seri bağlı mekanizmalar hem de paralel bağlı mekanizmalar için graf gösteriminin nasıl yapıldığı gibi konuları örnekleri ile birlikte sunmuşlardır. Yan ve Hsu [23], yaptıkları çalışmada kinematik zincirlerin yapısal tasarımı için graf teorisini ve bu teoriden üretilen “contracted graph” (CG) isimli yöntemi kullanmışlardır. CG basitçe bütün bağlantı noktalarının derecesi ikiden daha fazla olan graf'lardır. Yazarlar bu yöntemle eklem sayısı ikiden fazla olan kinematik zincirlerin graf gösterimlerini elde etmişlerdir. Tsai ve Lee [24], “tendon-driven” mekanizmaları (güç aktarımında zincir, kayış vb.'nin kullanıldığı mekanizmalar) konu ettikleri çalışmalarında, kinematik analiz için graf teorisini kullanmışlardır. Çalışmalarında bu mekanizmaların yapısal tasarımları ve bu tasarımların graf teorisindeki karşılıklarını sunmuşlardır. Li ve diğ. [25], tarafından sunulan çalışmada metamorfik zincir şeklinde ifade edilen mekanizmalar üzerinde durulmuştur. Yazarlar hareket halindeyken efektif bağ ve eklem sayısı değişen mekanizmalar olarak tanımlanan bu yapılar için CG gösterimini elde etmişlerdir. Lu ve diğ. [26], çalışmalarında CG yaklaşımını paralel robot mekanizmalarının tip sentezlemesi için kullanmışlardır. Çalışmalarında basit yapılı CG'ları ve graf teorisinin temel

özelliklerini (örneğin izomorfizm) kullanarak daha karmaşık yapıları CG'lar elde etmişlerdir. Graf teorisinin kullanıldığı diğer çalışmalar şu şekilde belirtilebilir. Feng ve Liu [27], Simoni ve Doria [28] ve Lee [29].

Vida teorisi Chasles teoremine dayanır. Bu teori katı bir cismin üç boyutlu uzaydaki yer değiştirmesini, belirli bir eksene göre dönme ve aynı eksene paralel bir öteleme olarak açıklar. Harekete referans olan eksene vida ekseni, vida ekseni boyunca gerçekleşen ötelemenin aynı eksene göre meydana gelen dönme açısına oranı ise pitch olarak isimlendirilir [30].

Vida teorisi tip sentezleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Kong ve Gosselin bu teoriyi kullanarak önemli çalışmalar yapmışlardır. Yazarlar, [31, 32, 33]'de yer alan çalışmalarında, vida teorisini temel alarak 3 SD'ne sahip farklı yapılarıdaki paralel robot mekanizmalarının tip sentezlemesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında sanal zincir ismini verdikleri bir yaklaşım kullanmışlardır. Bu yaklaşım ile mekanizma tasarımı yaparken özel bir SD'si yerine, mekanizmanın uç işlevcinin bir konumdan istenilen diğer bir konuma hareket ederken sahip olması gereken tüm konum ve yönelim bilgileri olarak tanımladıkları hareket örüntüsünü (motion pattern) kullanmışlardır. Kong ve Gosselin [34] tip sentezleme ile ilgili çalışmalarını "Type Synthesis of Parallel Mechanisms" isimli kitapta bir araya getirmişlerdir. Bu kitapta sunulan tip sentezlemesi yöntemi ile yazarlar daha çok 3, 4 ve 5 SD'ne sahip mekanizmalar üzerinde durmuşlardır. Glazunov [35], çalışmasında "decoupled" paralel robot mekanizmalarının sentezi için vida teorisini kullanmıştır. Decoupled paralel mekanizmalarda uç işlevcisinin konum ve yönelimi birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Buna göre mekanizma hem doğrusal hem de açısal eyleyiciler içerir. Doğrusal eyleyiciler sadece uç işlevcisinin konumunu değiştirirken açısal eyleyiciler de sadece yönelimini değiştirirler. Doğrusal eyleyiciler kilitlendiğinde uç işlevci belli bir konumda sabit kalırken, açısal eyleyiciler kilitlendiğinde uç işlevci belli bir yönelimde sabit kalır [35]. Çalışmada 6 SD'ne sahip bu mekanizmalar için tip sentezleme yaklaşımı kapalı vida grupları temel alınarak sunulmuştur. Sentezlenen mekanizmalar üç kinematik zincirden oluşmaktadır ve bu zincirlerdeki öteleme hareketi için kullanılan prizmatik kinematik yapılar dört çubuk mekanizması şeklinde tasarlanmışlardır. Fang ve Tsai [36] çalışmalarında "overconstrained" mekanizmalar üzerinde durmuşlardır. Bu

mekanizmalar kısaca SD'leri Grübler/Kutzbach formülü olarak bilinen SD hesabına uymayan mekanizmalar olarak da ifade edilebilirler. Yazarlar vida teorisini kullanarak bu mekanizmaların yapısal sentezini gerçekleştirmişlerdir. Zeng ve Huang [37] çalışmalarında “decoupled” yönelimsel (rotational) paralel mekanizmaların tip sentezlemesi üzerinde durmuşlardır. Bu mekanizmaların bağ tasarımı ve aktif eklem seçimini de içeren bir yöntemi vida teorisini temel alarak geliştirmişlerdir. Vida teorisi kullanılarak gerçekleştirilen diğer çalışmalar şu şekilde sıralanabilir. Kong ve Gosselin [38-39], Checcacci ve diğ. [40] ve Dachang ve diğ. [41].

Paralel mekanizmaların tip sentezlemesi yukarıda sunulan yöntemler dışında bazı farklı yöntemler ile de gerçekleştirilmiştir. Jin ve diğ. [42], altı SD'ne sahip ve uç işlevcisinin konum ve yönelimi kısmi olarak birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen (partially decoupled) paralel robot mekanizmalarının tip sentezlemesini yapmışlardır. Bu çalışmalarında “group decoupling” ismini verdikleri bir yaklaşımla beş yeni mekanizma önermişler ve bu mekanizmalar için ileri ve ters kinematik, tekil nokta analizi ve statik analiz yapmışlardır. Briot ve diğ. [43] PAMINSA ismini verdikleri bir grup paralel robot mekanizması önermişlerdir. Bu mekanizmaların en önemli özelliği uç işlevcilerinin yatay ve dikey düzlemlerdeki hareketlerinin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesidir. Bunu sağlamak için yazarlar mekanizmalarında bazı bacakların yerinde dört çubuk mekanizmasının özel bir şekli olan pantograflar kullanmışlardır. Yazarlar PAMINSA'nın 3 SD'den 6 SD'e kadar olan farklı yapılarını incelemişlerdir. Ayrıca elde ettikleri mekanizmalar için Jacobian matrisi ve tekil nokta analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca PAMINSA-4D3L tipi için statik ve dinamik en iyileme işlemlerini yapmışlar ve aynı tip mekanizmanın prototipini de üretip elde ettikleri teorik sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Bonev [44] 6 SD'ne sahip paralel mekanizmaların özel bir şeklini yüksek lisans tezine konu etmiştir. Bu tez için seçilen mekanizmalar altı bacaklı ve her bir bacağı Prizmatik-Dönel-Dönel-Küresel (PRRS) şeklindeki eklem zincirinden oluşan mekanizmalardır. Her bir bacakta yer alan prizmatik eklem aktif eklem olarak belirlenmiştir. Bonev, bu mekanizmalar için ters ve ileri kinematik, ileri ve ters dinamik ve çalışma uzayı analizleri yapmıştır. Buraya kadar sunulan literatür çalışmaları göz önüne alındığında yapılan çalışmaların önemli bir kısmında tip sentezlemesi yapılırken cebirsel yaklaşımların kullanıldığı görülmektedir. Bu

yaklaşımların tip sentezleme açısından bazı önemli kısıtlılıkları vardır. Örneğin grup teorisi ile yapılan tip sentezlemesi çalışmalarında henüz tüm grup yapıları ortaya konulamamıştır [5]. Bunun sonucunda da bu teori ile muhtemel tüm paralel mekanizma sayısı henüz bulunamamıştır. Bu problem diğer bir teori olan graf teoride de farklı bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Buna göre bir graf bazen birden fazla mekanizmayı temsil edebilmektedir [5]. Bu durum da muhtemel tüm mekanizmaları bulmayı güçleştirmektedir. Sunulan literatür çalışmalarında karşılaşılan diğer önemli bir ayrım amaçlanan SD'sinde ortaya çıkmaktadır. Çalışmaların önemli bir kısmının altı SD'den daha az SD'ne sahip mekanizmalar için gerçekleştirildiği görülmektedir. Bazı yazarlar [16, 18, 32] bunun sebebini mekanizmanın üretim maliyetinin düşüklüğü, endüstride yapılan birçok uygulamalarda 6'dan daha az SD'ne ihtiyaç duyulması ve bu mekanizmaların tasarımı, analizi ve kontrolü için gerekli olan hesaplamaların karmaşıklığı ile açıklamaktadırlar. Bununla birlikte, araştırmacıları altı SD'ne sahip mekanizma tasarımına yönlendiren SD dışındaki bazı sebepler şu şekilde sıralanabilir.

- 6'dan daha az SD'ne sahip birçok mekanizmanın “overconstrained” olması nedeniyle ortaya çıkan hatalar [42].
- Teorik olarak hesaplanan SD'nin gerçek uygulamalarda sağlanabilmesi için gereken geometrik kısıtlılıklar [13].
- Mekanizma üretim maliyetine etki eden SD dışındaki diğer etkenler [13].

Bu tez çalışmasında özel olarak 6 SD'e sahip paralel robot mekanizmaları konu edilmiştir. Bu amaçla muhtemel en fazla altı SD'ne sahip mekanizma sayısını bulmak için geometrik bir yaklaşım kullanmış olan Gao ve diğ. [1] nin yaptığı çalışma referans olarak alınmıştır. Bu çalışmada yazarlar altı SD'ne sahip muhtemel en fazla mekanizma sayısını bulmak amacıyla paralel mekanizmaların en çok bilineni olan SP mekanizmasını ele almışlardır. Bu mekanizma için öncelikle yapısal tasarım problemini bir geometrik kısıtlılık problemi olarak görmüşler ve tanımlamalarını da bu çerçevede yapmışlardır. Buna göre; ilk olarak SP mekanizmasının temel ve uç işlevci çerçeveleri arasında 6 tane geometrik kısıt olmasını ön koşul olarak kabul etmişlerdir. Bunun nedeni SP mekanizmalarının 6 SD'ne sahip olmalarıdır. İkinci olarak iki temel geometrik kısıt tipi, uzaklık kısıtı ve açısal kısıt, tanımlamışlardır. Yazarlar son olarak da uygun bir kombinasyon formülü

kullanarak 2 kısıt tipi ve 6 kısıt sayısına göre en fazla kaç tane SP yapısının mümkün olacağını tespit etmişlerdir. Gao ve arkadaşları [1] çalışmalarında dört sınıfta toplam 3850 tane GSP'nin mümkün olabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca çalışmalarında elde ettikleri mekanizmalar için ileri kinematik denklem çözümlerini de yapmışlar ve 1120 tane GSP için bu çözümleri kapalı formda ifade etmişlerdir.

1.2.2. Geometrik eniyileme

Tip sentezlemesi sonucu elde edilen bir mekanizmanın teorik bir bilgi olmaktan çıkıp uygulanabilir bir nitelik kazanabilmesi için öncelikle bu mekanizmanın yapısal özelliklerinin (mekanizma boyutları, bağların bağlantı noktaları vb.) belirlenmesi gerekir. Paralel robot mekanizmalarının yapısal özelliklerinin belirlenmesi mekanizma için gerçekleştirilecek diğer tüm hesaplamalar (kinematik, dinamik, statik gibi) açısından oldukça önemlidir [45]. Çünkü bütün bu hesaplamalar yapılırken mekanizmanın yapısal parametreleri işlemlere dâhil edilmektedir. Yapısal parametreler tasarım hedefinin (örneğin en büyük çalışma uzayı) gerçekleşmesi için gereken geometrik yapıyı sağlayacak şekilde belirlenmelidirler [46]. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen yapısal parametreleri belirleme işlemi, literatürde birçok yazar tarafından da kullanılan “geometrik eniyileme” terimiyle isimlendirilmiştir. Eniyileme çalışmalarında amaç mekanizmanın kinematik performansını en üst seviyede tutacak şekilde bir boyutlandırma yapılmasıdır. Buna göre eniyileme işlemi bir tasarım parametreleri grubu ile tanımlanmış muhtemel tüm seçimler arasından en iyisinin bulunmaya çalışılması olarak tanımlanabilir. Paralel robot mekanizmalarının geometrik eniyilemesini konu alan çalışmalar şu şekilde ifade edilebilir. Gosselin [47], 1985 tarihli doktora tezinde paralel robot mekanizmalarının kinematik analizini, eniyilemesini ve programlanmasını ele almıştır. Gosselin paralel mekanizmaların eniyilemesi amacıyla, kendisinin önerdiği ve “global conditioning index” (GCI) ismini verdiği bir parametre ile birlikte mekanizmanın ulaşılabilir çalışma uzayını eniyileme kısıtları olarak kullanmıştır. Bu kısıtlara göre bazı örnek mekanizmaların eniyilemesini gerçekleştirmiştir. Kosinska ve diğ. [48], Delta robot mekanizmasının eniyilemesini özel bir çalışma uzayı için gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar en iyi çalışma uzayını elde etmek için sayısal bir yöntem olan “Monte Carlo” metodunu kullanmışlar ve bu yöntemle çalışma uzayını en büyük yapmayı amaçlamışlardır. Su ve diğ. [49], gerçek kodlu

genetik algoritma (GA) kullanarak altı SD'ne sahip SP mekanizmasının eniyilemesini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında amaç fonksiyon olarak Jacobian matrisinin durum sayısını (condition number) kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçları quasi-Newtonian yöntemi ile yapılan eniyileme ile karşılaştırmış ve GA'nın daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir. Jiang [50], paralel robot mekanizmalarının tekil noktalardan uzak çalışma uzayı analizini ve bu mekanizmaların geometrik eniyilemesini doktora tezine konu etmiştir. Yazar çalışmasında üç serbestlik derecesine sahip düzlemsel paralel mekanizma (3-RPR) ve geleneksel SP mekanizması olmak üzere iki mekanizmayı esas almıştır. Bu mekanizmalar için hem tekil nokta analizini detaylı sunmuş hem de bu mekanizmaların eniyilemesini Powell's metodu ismi verilen bir yöntemle gerçekleştirmiştir. Gao ve diğ. [46], çalışmalarında altı SD'ne sahip bir paralel robot mekanizması için geometrik eniyileme yapmışlardır. Yazarlar çalışmalarında eniyileme işleminin amaç fonksiyonu olarak mekanizmanın sistem katılığı (stiffness) ve dexterity'sini kullanmışlar ve eniyileme prosedürünü ise yapay sinir ağları (YSA) ve GA yı birlikte kullanarak oluşturmuşlardır. Hay ve Snyman [51], çalışmalarında düzlemsel 3 SD'ne sahip paralel robot mekanizmalarının eniyilemesini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, bu mekanizmaların eniyilemesi için daha önce aynı yazarlar tarafından geliştirilmiş olan ve "chord" metodu ismini verdikleri sayısal bir yöntem kullanmışlardır. Amaç fonksiyon olarak mekanizmanın belirli bir aralıkta tanımlanmış tüm yönelimler ile ulaşılabilirdiği noktalar olarak tanımladıkları "dexterous workspace" parametresini kullanmışlardır. Cha ve diğ. [52], üç SD'ne sahip bir seri robot mekanizması ile altı SD'ne sahip bir paralel robot mekanizmasını birleştirerek oluşturdukları hibrit ve redundant (SD'si verilen bir görevi gerçekleştirmesi için gerekenden daha fazla olan mekanizma) bir mekanizmanın eniyilemesini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar işlem yükünü azaltmak için eniyileme işlemini genel olarak yapmak yerine bölgesel olarak gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar bölgesel eniyilemede amaçlarının mekanizmanın bütün çalışma uzayı veya yörünge için eniyilemesini yapmak değil zamana bağlı olarak sadece bir anlık konum için en iyi parametreleri (aktif ve pasif eklem değişkenleri) bulmak olarak açıklamaktadırlar. Bu çalışmada eniyileme amacıyla sezgisel bir yöntem kullanılmıştır. Fattah ve Jazi [53], SP ve üç SD'ne sahip bir paralel robot mekanizması olmak üzere iki farklı paralel robot mekanizmasının

eniyilemesini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, eniyileme için ulaşılabilir en büyük çalışma uzayı ve en iyi GCI değerine sahip çalışma uzayı olmak üzere iki farklı amaç fonksiyon belirlemişler ve iki farklı eniyileme gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında eniyileme aracı olarak “Monte Carlo” metodunu kullanmışlardır. Mekanizmaların geometrik eniyilemesi ile ilgili diğer çalışmalar şu şekilde belirtilebilir. Gallant ve Boudreau [54], Modungwa ve diğ. [55], Mishra ve Omarkar [56] ve Kurtz ve Hayward [57]. Sunulan çalışmalar incelendiğinde geometrik eniyileme işlemlerinin önemli bir kısmının mekanizmanın çalışma uzayını iyileştirmek için yapıldığı görülmektedir. Çalışma uzayı genellikle dexterous çalışma uzayı olarak alınmış ve eniyileme işlemlerinin amaç fonksiyonunu teşkil etmiştir. Bunların dışında mekanizmanın katılığı ve dexterity’si de hesaba katılan diğer parametreler olarak öne çıkmaktadır. Bu veriler ışığında, tez çalışmasında gerçekleştirilen geometrik eniyilemenin temel amacı sunulan mekanizmaların dexterous çalışma uzayının en büyük olmasını sağlamak olarak belirlenmiştir. Geometrik eniyileme ile ilgili literatür çalışmalarında karşılaşılan diğer bir ayrım kullanılan yöntemlerde ortaya çıkmaktadır. Bazı yazarlar [48,50, 51] sayısal eniyileme yöntemlerini tercih ederken diğer bazı yazarlar [46, 49, 52] ise sezgisel eniyileme yöntemlerini tercih etmektedirler. Hem sayısal yöntemlerin hem de sezgisel yöntemlerin birbirlerine farklı üstünlükleri vardır. Bununla birlikte özellikle eniyileme işlemine tabi tutulacak parametre sayısı arttıkça bu parametrelerin bulunması için gereken arama uzayı da eksponansiyel olarak artmaktadır ve bu da problemin çözüm süresini uzatmaktadır [58]. Bu tez çalışmasında yapılacak geometrik eniyileme çalışmasında mekanizmalara ait sadece boyutsal parametreler (örneğin temel ve uç işlevci çerçeveleri ile ilgili parametreler) değil aynı zamanda aktif ve pasif eklemlere ait parametreler ve mekanizmanın dexterity’si de eniyileme işlemine dâhil edilecektir. Dolayısıyla muhtemel işlem süreleri de dikkate alınarak sezgisel bir eniyileme yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

1.2.3. PSO algoritması

PSO algoritması, Kennedy ve Eberhart [59-60] tarafından geliştirilmiş bir sezgisel eniyileme algoritmasıdır. Bu algoritma hayvan sürülerinin (örneğin kuş sürüleri) yiyecek bulmak için yaptıkları davranışları esas alan bir algoritmadır. PSO mühendislik ve robotik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Küçük [61],

çalışmasında 3 SD'ne sahip düzlemsel paralel robot mekanizmalarının güç tüketimlerini azaltmak için PSO'yu kullanmıştır. Yazar mekanizmaların ters kinematik ve dinamik analizleri ile kontrolünü gerçekleştirdiği çalışmasında ters kinematik sonuçlarına göre sekiz farklı çalışma biçimi belirlemiştir. Yazar ayrıca, çalışma biçimlerine göre mekanizmaların kütle (kol ve platform kütleleri) eniyilemesini yapmış ve WM2 olarak isimlendirdiği çalışma biçimi için en iyi sonuçları elde etmiştir. Bingül ve Karahan [62], çalışmalarında PSO'yu 2 SD'ne sahip bir düzlemsel robotun kontrol parametrelerinin ayarlanması için kullanmışlardır. Yazarlar, bulanık mantık ve PID tabanlı iki farklı kontrolör tasarlamış ve her iki kontrolör parametrelerinin ayarlanması için PSO'yu kullanmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre bulanık mantık tabanlı kontrolörün daha iyi sonuçlar ürettiğini ifade etmişlerdir. Alıcı ve diğ. [63], çalışmalarında Motoman SK120 tip bir robot manipülatörünün geometrik sebeplerden kaynaklanan konum hatalarının tahmin edilmesi ile ilgilenmişlerdir. Yazarlar deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında robot manipülatörünün konum hatalarını polinom temelli fonksiyonlarla ifade ettikten sonra polinom katsayılarını bulmak için PSO'yu kullanmışlardır. Chyan, ve Ponnambalam [64], 5 SD'ne sahip bir seri robot mekanizmasının sabit engelli bir ortamda engellere çarpmadan istenilen konuma ulaşılmasını sağlayacak bir araştırma yapmışlardır. Yazarlar bu amaçla dört farklı PSO türü tanımlamışlardır. Her bir PSO türü ile robot manipülatörünün başlangıç noktasında hedef konuma gitmesi için gereken konfigürasyonları hesaplayan yazarlar elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlar ve PSO-W olarak isimlendirdikleri algoritmanın en iyi sonuçları ürettiğini belirtmişlerdir. Bingül ve Karahan [65] deneysel olarak gerçekleştirdikleri diğer bir çalışmada, Staubli RX-60 tipi bir robotun dinamik modelinin ve parametrelerinin tahmin edilebilmesi için PSO'yu ve bir en küçük kareler metodu (LS)'nu ayrı ayrı kullanmışlar ve elde ettikleri sonuçlara karşılaştırmışlardır. Yazarlar PSO'nun LS'den daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Inner [66], GSP mekanizmalarının benzetimini ve boyutsal eniyilemesini konu edindiği doktora tez çalışmasında STEWOPT isimli bir yazılım geliştirmiştir. 3 ve 6 SD'ne sahip GSP lerin eniyilemesinin yapılabildiği bu yazılımda yazar eniyileme algoritması olarak temel PSO ve kuantum PSO olmak üzere iki farklı algoritma kullanmıştır. Toz ve diğ. [67], mobil robotların yol planlaması ve seri robotların ters

kinematik problemlerinin çözümü için GA ve PSO'yu kullanmışlardır. Yazarların eğitim amaçlı kullanılacak bir yazılım da geliştirdikleri bu çalışmada PSO'nun özellikle işlem süresi açısından GA'dan daha iyi olduğu gösterilmiştir. PSO'nun kullanıldığı diğer bazı çalışmalar şu şekilde belirtilebilir: Bingül ve Karahan [68], Lopes ve diğ. [69], Xu ve Li [70], Saputra ve diğ. [71] ve Yan ve Jiao [72]. Sunulan çalışmalara bakıldığında PSO'nun özellikle son zamanlarda robot mekanizmalarının eniyileme işlemlerinde başarı ile kullanıldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında da GSP mekanizmalarının geometrik eniyilemesinde PSO algoritması kullanılmıştır.

1.2.4. Benzetim

Benzetim kelimesi Türk Dil Kurumu'nun bilim ve sanat terimleri ana sözlüğündeki tanımına göre [73], “fiziksel ya da soyut bir dizgenin davranış özelliklerinin başka bir dizgenin davranışlarıyla gösterimi, örneğin fiziksel olayların bilgisayarca yapılan işlemlerle gösterimi” olarak tanımlanmaktadır. Robot mekanizma tasarımı açısından ise benzetim, mekanizmaların fiziksel olarak üretilmeden önce bilgisayar ortamında modellenmeleri anlamına gelmektedir. Literatürde yer alan paralel robot mekanizmaları ile ilgili çalışmalara bakıldığında, sadece bir mekanizmayı veya mekanizma tipini ele alan yazarlar çoğunlukla bu mekanizmalarının benzetimini yapmışlardır [58, 62, 68-70]. Bununla birlikte bir grup mekanizmayı ele alan ve sundukları bütün mekanizmalar için benzetim yazılımının geliştirildiği çalışmalar literatürde çok da fazla yer almamaktadır. Gosselin ve diğ. [74], küresel paralel robot mekanizmalarının tasarım ve benzetiminin yapılabildiği bir yazılım geliştirmişlerdir. Yazarların SMAPS ismini verdikleri bu yazılım ile mekanizmaların ileri ve ters kinematik analizleri ile tekil nokta, dexterity ve çalışma uzayı analizleri yapılabilmektedir. Wang [75], yüksek lisans tezinde SP mekanizmalarını temel ve uç işlevci çerçeve şekillerine göre beş ayrı kategoriye ayırmıştır. Buna göre mekanizmanın çerçeve şekilleri doğru, üçgen, dörtgen, beşgen ve altıgen olabilmektedir. Yazar bu şekilde elde ettiği bütün muhtemel mekanizmaları tablolar halinde sunmuştur. Tezinde sunduğu mekanizmaların benzetimini yapabilmek için daha önce Ding [76] tarafından seri robot mekanizmalarının benzetimi için geliştirilen UKMS isimli yazılımı esas almış ve bu yazılıma ek bir modül geliştirmiştir. Bu modül sayesinde tezde sunulan mekanizmalar için ters kinematik ve yörünge planlaması yapılabilmektedir. Küçük [77] düzlemsel paralel robot

manipülatörlerinin tasarımı ve benzetimi için kullanılacak SIDEPI isimli yazılımı Matlab programını kullanarak geliştirmiştir. Bu yazılım sayesinde farklı tasarım parametrelerine sahip düzlemsel paralel robotlar için, ileri ve ters kinematik, Jacobian matrisi, çalışma uzayı ve tekil nokta analizleri yapılabilmektedir. İ ner [66], Doktora tezinde GSP mekanizmaları için STEWSIM ismini verdiği Matlab tabanlı bir yazılım geliştirmiştir. Bu yazılım ile 3, 4, 5 ve 6 bacak sayısına sahip GSP mekanizmaları için ileri ve ters kinematik, Jacobian matrisi, çalışma uzayı ve tekil nokta analizleri yapılabilmektedir. STEWSIM yazılımı İ ner ve K     [78] tarafından bilimsel makale olarak da yayınlanmıştır.

Bu tez çalışmasında tip sentezleme sonucunda elde edilen 195 mekanizmanın benzetimi için GSP tasarım ve analiz platformu (GSP-DAP) ismi verilen bir yazılım Matlab programı kullanılarak geliştirilmiştir. GSP-DAP kullanılarak mekanizmaların tasarım, ters kinematik, sembolik ve sayısal Jacobian matrisi, çalışma uzayı, tekil nokta ve dexterity analizleri ile yörünge planlaması ve mekanizmanın hareket animasyonu yapılabilmektedir.

1.3. Tez  alışmasının Katkıları

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen ve 6 SD'ne sahip paralel robot mekanizmaları konu edilen çalışmaların  zg n katkıları şu şekilde özetlenebilir.

- Paralel robot mekanizmaların tip sentezlemesi ve sınıflandırılması ile ilgili olarak Gao ve diğ. [1] tarafından sunulan GSP'ler belirlenen iki kıstasa göre yeniden değerlendirilmiştir. Bu kıstaslara göre 195 GSP mekanizması 4 farklı sınıf adı altında tablolar halinde elde edilmiştir. Muhtemel tüm GSP'leri içeren bu tablolar literatüre ilk kez bu doktora tez çalışması sonucunda girmiştir.
- Ters kinematik ve Jacobian matrisi denklemleri paralel robot mekanizmalarının bütün hesaplamalarının temelini teşkil etmektedir. Bu tez çalışmasında sunulan tüm mekanizmaların ters kinematik ve Jacobian matrisi için genel denklemler elde edilmiştir.
- Benzetim paralel robot mekanizmaların tasarım ve performans analizlerinin bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilmesini sağlar. Bu tez çalışmasında sunulan tüm mekanizmaların hem tasarımının hem de performans analizlerinin yapıldığı GSP-DAP isimli yazılım geliştirilmiştir.

- Paralel robot mekanizmaların fiziksel olarak gerçekleştirilebilmesinin ilk aşaması geometrik boyutlandırma. Geometrik boyutlandırma mekanizmanın kinematik performansını en üst düzeyde olmasını sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Bu tez çalışmasında sunulan tüm mekanizmaları matematiksel olarak temsil edebilecek iki farklı mekanizmanın geometrik boyutlandırması PSO eniyileme algoritması ile gerçekleştirilmiştir.

1.4. Tez Düzeni

Bölüm 2’de, GSP’lerin tip sentezlemesi ile ilgili genel bilgiler sunulmuştur. Ayrıca Gao ve diğ. [1] tarafından gerçekleştirilen tip sentezleme çalışması esas alınarak yapılan sınıflandırma ve isimlendirme çalışmaları da bu bölümde yer almaktadır.

Bölüm 3’de, GSP’lerin ters kinematik ve Jacobian matrisi hesaplamaları için gereken denklemler elde edilmiştir.

Bölüm 4’de, tez çalışmasında sunulan GSP mekanizmalarının geometrik eniyilemesi detayları ile ele alınmıştır. Ayrıca iki farklı GSP mekanizmasının geometrik eniyileme çalışmaları sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca PSO eniyileme algoritması ile ilgili kısa bilgi de verilmiştir.

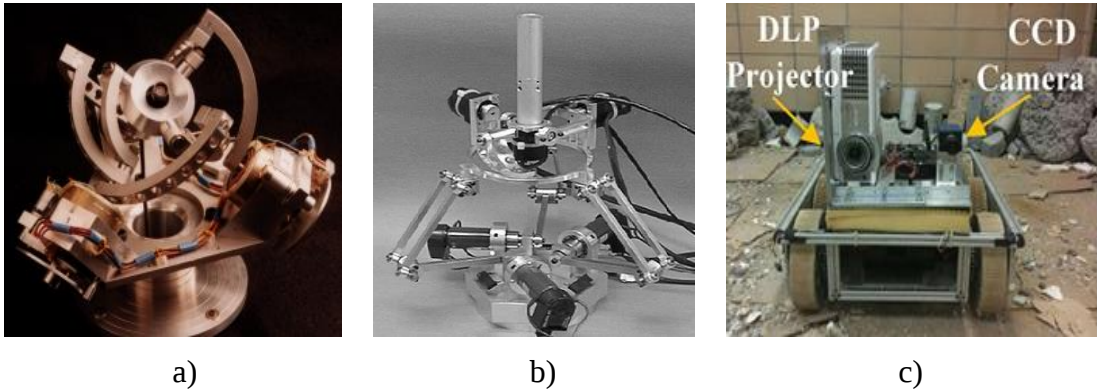
Geliştirilen GSP-DAP yazılımı beşinci bölümde tanıtılmıştır. Yapılan tanıtım örnek bir mekanizma üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Son olarak bölüm 6’da tez çalışmasının yenilikleri, bilime ve teknolojiye sunmuş olduğu katkılar, sonuçlar ve değerlendirmeler ifade edilmektedir.

2. TİP SENTEZLEME

2.1. Giriş

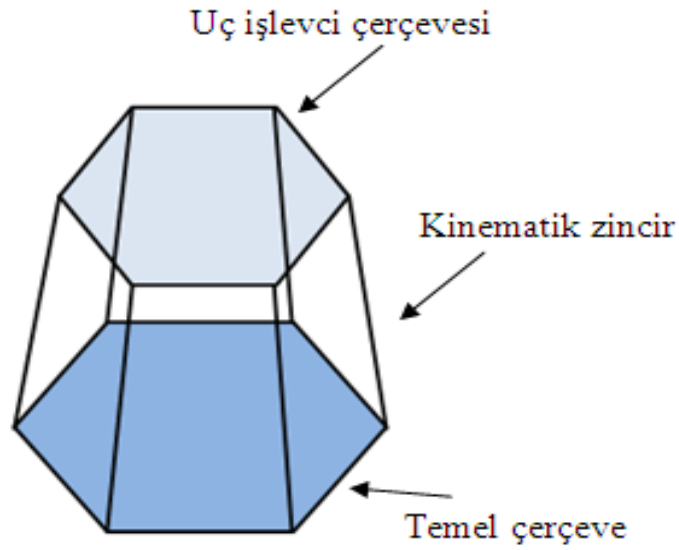
Günümüz teknolojisindeki hızlı gelişim hemen her gün farklı alanlarda robotların kullanılabilmesinin önünü açmaktadır. Daha önce fabrikaların üretim bandı ile sınırlı kullanım alanları olan robotlar günümüzde uzay araştırmalarından deniz altı araştırmalarına kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar. Kullanım alanlarındaki bu çeşitlilik robotların gerçekleştirdikleri uygulamaya göre farklı özelliklere sahip olmasını gerektirmektedir. Örneğin bir fabrikada paketleme amacıyla kullanılan bir robotun üretim bandına yetişebilecek bir hızda ve doğrulukta çalışması beklenir. Diğer taraftan tıbbi bir uygulamada robotun hızından çok mümkün olan en yüksek hassasiyette konumlanabilmesi önem kazanmaktadır. Robotların amaca uygun hareket edebilmelerinin temelinde ise sahip oldukları mekanizmanın yapısal özellikleri yer almaktadır. Bir robot ancak sahip olduğu mekanizma yapısının izin verdiği ölçüde hareket edebilir. Örneğin düzlemsel bir robot mekanizmasında üç boyutlu uzayda rastgele bir noktaya ulaşması beklenemez. Düzlemsel bir mekanizma ancak tanımlandığı düzlem üzerinde yer alan ve kendi geometrik sınırlamalarının izin verdiği noktalara erişebilir. Buna göre robot mekanizma tasarımı yaparken öncelikle mekanizmanın hangi yapısal özelliklere sahip olması gerektiğine karar verilmelidir. Şekil 2.1’de farklı yapısal özelliklere sahip robot mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 2.1. Farklı yapısal özelliklere sahip robot mekanizmaları a) 3 SD’li küresel paralel robot [79] b) 6 SD’li paralel robot c) Mobil robot [11]

Amaca uygun yapısal özelliklere sahip bir robot mekanizmasının seçilebilmesi ancak istenen özelliklere sahip hangi tür ve sayıda mekanizma tipinin var olduğunun bilinmesi ile mümkündür. Bu şekilde belirli kinematik amaçlara uygun tüm robot mekanizmalarının tespit edilmesi yapısal sentez, diğer bir deyişle tip sentezleme, olarak isimlendirilmektedir [5].

Bu tez çalışmasında paralel robot mekanizmaları üzerinde durulmuştur. Bu mekanizmalar iki platformun (uç işlevci çerçevesi ve temel çerçeve) en az iki bağımsız zincir ile bağlandığı mekanizmalardır. Bu mekanizmalar seri robotlara göre sahip oldukları yüksek konumlanma hassasiyeti, yenilenebilirlik ve yük taşıma kapasiteleri nedeniyle özellikle son yirmi yılda robot araştırmacıları tarafından oldukça fazla çalışılan bir konu haline gelmiştir [2]. Örnek bir paralel robot mekanizması Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Örnek bir paralel robot mekanizma yapısı

6 SD’ne sahip paralel robot mekanizmalarının tip sentezlemesi amacıyla doktora tez konusu olarak seçilen muhtemel tüm mekanizma tiplerinin bulunması, sınıflandırılması, isimlendirilmesi ve tablolar halinde ortaya konulması bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

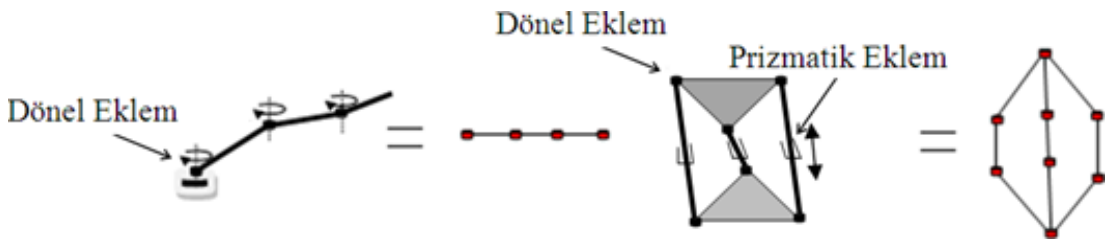
İlk olarak paralel robot mekanizmalarının tip sentezlemesi üzerinde durulmuştur. Paralel robot mekanizmaları için yapılan araştırmalar incelendiğinde bu amaçla farklı yöntemlerin geliştirildiği ancak tam ve kesin bir yöntemin henüz ortaya

konulamadığı görülmektedir [5]. Paralel mekanizmalar için tip sentezleme yaklaşımları temel olarak üç ana başlık altında incelenebilir. Bunlar, graf teorisi temelli yaklaşım, grup teorisi temelli yaklaşım ve vida teorisi temelli yaklaşımdır [5].

2.2. Graf Teorisi Temelli Yaklaşım

Graf teorisi matematik, kimya, inşaat mühendisliği ve bilgisayar teknolojisi gibi birçok alanda kullanılan bir teoridir [21]. Mekanizma tip sentezlemesi açısından bakıldığında ilk olarak Freudenstein tarafından önerilmiş bir yöntemdir [5]. Freudenstein mekanizmaların bağlarını ve eklemlerini temsil eden bir grafiksel gösterim önermiştir. Buna göre grafiksel şemada yer alan köşeler, mekanizmanın bağlarını simgelerken, kenar çizgileri ise eklemleri simgelemektedir. Şekil 2.3’de 3 SD’ne sahip bir seri ve bir paralel robotun eşdeğer grafikleri verilmiştir. Bu yaklaşım mekanizma tip sentezlemesi amacıyla birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Bununla birlikte şu iki nedenden dolayı paralel robot tip sentezlemesinde muhtemel tüm yapıların bulunması amacıyla kullanılması oldukça güçtür [5].

- İsomorfizim: Grafiksel gösterimde birebir eşleme mümkün olmamaktadır. Yani aynı mekanizma birden çok graf ile gösterilebilmektedir. Bu da tasarımın muhtemel mekanizma sayısını oldukça arttırmaktadır. Bu şekilde her bir mekanizmayı sadece bir grafın temsil etmesi problemi henüz tam olarak çözülebilmemiş değildir [5].
- Graf gösterimde SD analizi için Grübler formülünü kullanmaktadır. Ancak bu formül tasarımı muhtemel tüm mekanizmalar için geçerli değildir [5].



Şekil 2.3. 3 SD’ne sahip bir seri ve bir paralel robotun eşdeğer grafikleri

2.3. Grup Teorisi Temelli Yaklaşım

Bu yaklaşım cebirsel grup tanımlamasını temel alır ve bir katı cismin yer değiştirmesini tanımlarken “displacement group” adında özel bir grup tanımlar. Bu grup “Special Euclidian(SE(3)) matrix group” olarak isimlendirilen gruba bağlıdır. SE(3) şu şekilde tanımlanmaktadır [5].

$$SE(3) = \left\{ \begin{pmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\} \quad (2.1)$$

Denklemde R , 3×3 lük dönme matrisi, P 3×1 lik konum vektörüdür. Paralel mekanizmaların tip sentezlemesinde kullanılan ve “Displacement” gruba ait alt gruplar vardır. Örnek olarak aşağıdaki alt gruplar verilebilir [5].

- $\{T(u)\}$: u vektörüne paralel tüm öteleme hareketleri
- $\{T\}$: Tüm uzamsal öteleme hareketleri
- $\{X(w)\}$: w vektörü ile tanımlanan eksene paralel olan tüm eksenlere göre tanımlanan tüm öteleme ve dönme hareketleri.

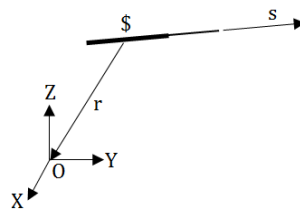
Paralel mekanizmaların tip sentezlemesi amacıyla bu alt grupların tek bir cisim üzerindeki seri bileşimleri ve kesişimleri kullanılmaktadır. Tip sentezleme, kesişimleri belirli bir hareket örüntüsünü gerçekleştirebilecek tüm alt grupların bulunmasını amaçlamaktadır. Grup teorisi yaklaşımının tüm grup yapıları henüz ortaya konulmamıştır [5, 80].

2.4. Vida Teorisi Temelli Yaklaşım

Chasles teoremine göre, bir cismin üç boyutlu uzaydaki yer değiştirmesi, belirli bir eksene göre dönme ve aynı eksene paralel bir ötelemeye karşılık gelir. Harekete referans olan eksene vida ekseni, eksen boyunca gerçekleşen ötelemenin aynı eksene göre meydana gelen dönme açısına oranı ise pitch olarak isimlendirilir [80].

$$d = h\theta \quad (2.2)$$

Denklemde, h : pitch, d : vida eksenine göre öteleme miktarı, θ ise aynı eksene göre meydana gelen dönme açısıdır. Sadece öteleme içeren hareketler için $h = \infty$ ve sadece dönme içeren hareketler için ise $h = 0$ dır [80]. Genel olarak bir birim vida Şekil 2.4’de görüldüğü gibi tanımlanır.



Şekil 2.4. Birim vida

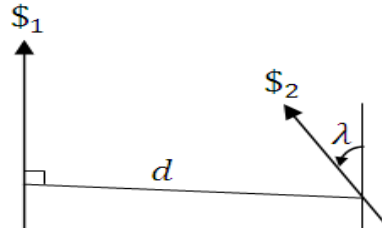
Şekilde bir (O_{XYZ}) koordinat sistemine göre yönlendirilmiş bir doğru parçası görülmektedir. Şekilde s vida eksenini boyunca tanımlanmış birim vektör, r , vida eksenini üzerindeki herhangi bir noktanın O_{XYZ} koordinat sistemine göre konum vektörü ve h pitch'dir. Buna göre bir birim vida şu şekilde tanımlanır [34];

$$\$_F = \begin{bmatrix} \$_F \\ \$_S \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} s \\ s \times r + hs \end{bmatrix} & \text{Eğer } h \neq \infty \text{ ise} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ s \end{bmatrix} & \text{Eğer } h = \infty \text{ ise} \end{cases} \quad (2.3)$$

Reciprocal vidalar: İki $\$_1$ ve $\$_2$ vidası aşağıdaki şartı sağlıyorsa reciprocal'dir denir.

$$\$_1 o \$_2 = [\prod \$_1]^T \$_2 = 0 \quad (2.4)$$

Denklemden $\prod = \begin{bmatrix} 0 & I_3 \\ I_3 & 0 \end{bmatrix}$ dir ve o operatörü iki vidanın "reciprocal" çarpımı olarak tanımlanır [34]. Reciprocal olma şartı geometrik olarak Şekil 2.5'de verildiği gibi ifade edilebilir.



Şekil 2.5. Reciprocal vidalar

Şekilde, $\$_1$ ve $\$_2$ iki ayrı vida, d iki vida arasındaki dik uzaklık, λ iki vida eksenleri arasında ortak dikmelerine göre sağ el kuralı kullanılarak $\$_1$ den $\$_2$ 'ye doğru ölçülen açıdır. Buna göre Denklem (2.4)'de verilen şart bu değişkenler kullanılarak şu şekilde yazılabilir [81];

$$(h_1 + h_2) \cos(\lambda) - d \sin(\lambda) = 0 \quad (2.5)$$

Reciprocal olma şartı ile ilgili olarak şu genellemeler yapılabilir [34]. Sonsuz pitch'e sahip iki vida daima reciprocal'dir. Sonsuz pitch'e sahip bir vida 0 pitch'e sahip bir vidaya ancak ve ancak eksenleri dik kesişirse reciprocal olur ve son olarak 0 pitch'e sahip iki vida ancak ve ancak her ikisinin eşdüzlemsel olması ile reciprocal olurlar.

Twist ve wrench: Bir \$ vidası eğer bir scalar ile çarpılır ve aynı zamanda bir katı cismin anlık hareketini temsil ederse bu vida twist olarak isimlendirilir. Aynı şekilde eğer bir katı cisim üzerine etkiyen kuvvetleri temsil ederse bu sefer wrench olarak adlandırılır [81].

Vida teorisini temel alan yaklaşımlar kullanılarak paralel mekanizmaların tip sentezi yapılırken genel olarak şu işlemler gerçekleştirilir [5].

- Uç işlevcinin sahip olması gereken twist sistemi ile reciprocal olma şartını sağlayan wrench sisteminin bulunması.
- Robotun kinematik zincirlerine ait wrench sistemlerinin bulunması. Bu sistemlerin bileşimi uç işlevci wrench sistemini oluşturur.
- Tanımlanan wrench sistemlerini gerçekleştirebilecek tüm kinematik zincirlerin tanımlanması.

Bu bölümde literatürde paralel mekanizma tip sentezlemesi amacıyla en sık kullanılan yöntemler kısaca sunuldu. Bir sonraki bölümde bu doktora tez çalışması için temel alınan altı SD'ne sahip mekanizmalar için Gao ve diğerlerinin [1] yaptığı çalışmada gerçekleştirilen tip sentezleme yöntemi sunulacaktır.

2.5. 6 SD'ne Sahip GSP Mekanizmaları İçin Tip Sentezleme

Gao ve arkadaşları [1] 6 SD'ne sahip paralel mekanizmaların en çok bilinenlerinden olan SP'nun en genel hali olarak tanımladıkları GSP'ler için muhtemel en fazla mekanizma sayısını bulmuşlardır. Bunun için öncelikle problemi bir geometrik kısıtlılık problemi olarak görmüşler ve tanımlamalarını da bu çerçevede yapmışlardır. Buna göre; ilk olarak GSP'nin temel ve uç işlevci çerçeveleri arasında 6 tane geometrik kısıtlılığının olması ön koşul olarak kabul edilmiştir. Bunun nedeni GSP'lerin 6 SD'ne sahip olmalarıdır. İkinci olarak da bu kısıtlılıkların nasıl tanımlanacağı belirtilmiştir ve son olarak uygun bir kombinasyon formülü kullanılarak en fazla kaç tane GSP yapısının mümkün olacağı tespit edilmiştir. Gao ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmayı açık olarak ifade etmek gerekirse şu şekilde bir yol izlenebilir. GSP'ler 6 SD'ne sahiptir. Bu nedenle mekanizmanın temel çerçevesi ile uç işlevci çerçevesinin arasında her biri bağımsız olarak kontrol edilebilen altı adet kısıtlılık tanımlanacaktır. Bunun için;

a) Öncelikle 3 tip temel geometrik nesne tanımlanmıştır. Bunlar; nokta, doğru ve düzlemdir [1].

b) Bir katı nesne 3 boyutlu uzayda, 3 tanesi konum 3 tanesi de yönelim belirtmek üzere 6 SD'ne sahiptir.

Buna göre GSP'nin temel ve uç işlevci çerçeveleri arasında tanımlanacak olan kısıtların en fazla 3 tanesi açısal kısıt olmak üzere 6 tane olacak şekilde tanımlanması gerekir. En fazla 3 tane açısal kısıtın seçilmesinin nedeni 3 boyutlu uzayda yönelimin 3 açı ile belirtilmesi ve 3'ten fazla açı ile yönelim belirtilmesi durumunda fazla olan açının gerçekte diğer açılarının bir fonksiyonu olmasıdır. Buna göre D, uzaklık kısıtı ve A, açısal kısıt olmak üzere GSP mekanizmalarını dört sınıfa ayrılabilir [1].

1. 3D3A GSP: Bu yapıdaki GSP mekanizmalarının temel ve uç işlevci çerçeveleri arasında 3 tane uzaklık kısıtı 3 tane de açısal kısıt bulunmaktadır.

2. 4D2A GSP: Bu yapıdaki GSP mekanizmalarının temel ve uç işlevci çerçeveleri arasında 4 tane uzaklık kısıtı 2 tane de açısal kısıt bulunmaktadır.

3. 5D1A GSP: Bu yapıdaki GSP mekanizmalarının temel ve uç işlevci çerçeveleri arasında 5 tane uzaklık kısıtı 1 tane de açısal kısıt bulunmaktadır.

4. 6D GSP: Bu yapıdaki GSP mekanizmalarının temel ve uç işlevci çerçeveleri arasında 6 tane uzaklık kısıtı bulunmaktadır. Açısal kısıtları yoktur.

GSP'nin uç işlevci çerçevesi ile temel çerçevesi arasında yer alacak altı tane kısıt, bu çerçeveler üzerinde yer alan geometrik nesneler (nokta, doğru ve düzlem) kullanılarak tanımlanmalıdır. Buna göre birinci geometrik nesne uç işlevci çerçevesi üzerinde ikincisi de temel çerçeve üzerinde olmak üzere 6 tane kısıt tanımlanacaktır. Örneğin Doğru/Nokta arasındaki uzaklık kısıtı, uç işlevci çerçevesi üzerinde yer alan bir doğru ile temel çerçeve üzerinde yer alan bir nokta arasında tanımlanmıştır. Muhtemel tüm kısıtlar aşağıdaki gibi olacaktır [1].

a) Uzaklık kısıtları 6 farklı şekilde belirlenebilir. Bunlar: Nokta/Nokta, Nokta/Doğru, Doğru/Nokta, Doğru/Doğru, Nokta/Düzlem ve Düzlem/Nokta arasındaki uzaklık kısıtlarıdır.

b) Açısal kısıtlar 4 farklı şekilde belirlenebilir. Bunlar: Doğru/Doğru, Doğru/Düzlem, Düzlem/Doğru ve Düzlem/Düzlem kısıtlarıdır.

Her bir grupta yer alan en fazla sayıdaki GSP sayısının tespit edilmesi gerekir. Bu amaçla bir kombinasyon formülü kullanılmaktadır. Bu formüle göre n tane farklı tipte nesne arasından (farklı kısıtlılık çeşitleri arasından) m tane nesne seçilecektir. Seçilecek nesnelerin tamamı bir tipte olabileceği gibi, farklı tiplerde de olabilirler. Kombinasyon formülü şu şekildedir [1];

$$C_{m+n-1}^m \quad (2.6)$$

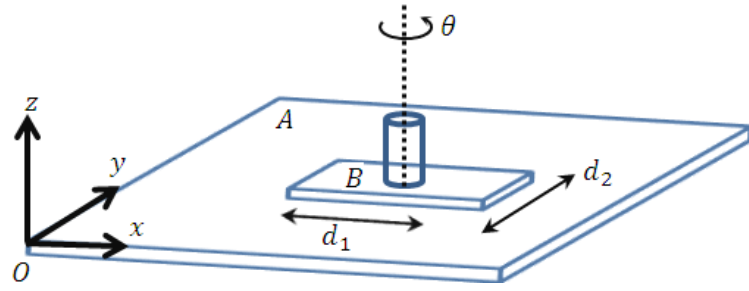
Denklemden, C kombinasyon, m seçilecek nesne sayısı n ise seçilecek nesne tip sayısıdır.

Gao ve diğ. [1] yukarıda sunulan üç temel adımdaki işlemleri gerçekleştirerek. Her bir GSP sınıfında bulunan muhtemel mekanizma sayısını hesaplamışlardır. Buna göre 3D3A sınıfında 1120, 4D2A sınıfında 1260, 5D1A sınıfında 1008 ve 6D sınıfında da 462 olmak üzere toplam 3850 tane GSP olduğunu göstermişlerdir.

Gao ve diğ. [1] yaptıkları çalışmada herhangi bir mekanizmayı hesaplamalar dışında bırakmamak için açısız ve uzaklık kısıtı tanımlamalarında kullanılabilecek muhtemel tüm geometrik nesneleri hesaba katmışlardır. Ancak bu doktora tez çalışmasında Gao ve arkadaşları [1]'nden farklı olarak "düzlem" geometrik nesnesi hesaplama dışında bırakılmış ve muhtemel GSP sayısı iki geometrik nesne nokta ve doğru kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.5.1. Düzlem geometrik nesnesi neden hesaplama dışında bırakıldı

Düzlem geometrik nesnesi kullanılarak tanımlanacak bir kısıtın gerçekleştirilebilmesi için tasarlanacak yapıda düzlemsel eklem yapısının kullanılması gerekir. Düzlemsel eklem yapısı iki katı cisim arasında hem öteleme hem de dönme hareketine izin verir. Bu yapıda bir eklem ancak iki prizmatik eklem ve bir dönel eklem kombinasyonları ile oluşturulabilir. Şekil 2.6'da örnek bir düzlemsel eklem çizimi sunulmuştur. Şekle göre A sabit katı cisim ile B hareketli katı cisim birbirlerine düzlemsel eklemle bağlanmıştır. Buna göre düzlemsel eklem O koordinat sistemine göre tanımlı olmak üzere; B katı cisminin x eksenine göre d_1 , y eksenine göre d_2 ve z eksenine göre de θ açısı ile hareket etmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.6. Örnek bir düzlemsel eklem çizimi

Düzlemsel eklem yapıları ile ilgili olarak literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında bu eklem yapılarının fazla tercih edilmedikleri görülmüştür. Bu durum Murray ve diğerlerinin [82] çalışmasında da vurgulanmıştır. Yazarlar çalışmalarında düzlemsel eklem yapısının robotik camiasında helezoni (helical) eklem yapısı ile birlikte en az tercih edilen eklem yapısı olduğunu belirtmektedirler. Düzlemsel eklem yapısı üç SD'ne sahiptir. Bununla birlikte bu eklemin hareket yapısı tanımlı olduğu düzlem ile sınırlandırılmıştır [82]. Diğer bir çalışmada da [83] düzlemsel eklemlerin hareket ettirilmesi için kullanılacak düzlemsel motorların yük taşıma kapasitelerinin düşük olduğu belirtilmiştir. Bu doktora tez çalışmasında altı SD'ne sahip yeni paralel robot mekanizmaları bulunması temel amaç olarak alınmıştır. Ayrıca bulunacak mekanizmaların teorik bilgiden çok uygulanabilir olmaları için literatürde yaygın olarak kullanılan eklem çeşitleri (dönel, prizmatik ve silindirik eklemler) dikkate alınarak seçilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçlar ve yukarıda belirtilen sebepler nedeniyle düzlemsel eklem yapısı hesaplamaların dışında tutulmuştur. Gao ve arkadaşlarının [1] çalışmasının tip sentezleme kısmını düzlem geometrik nesnesi olmadan gerçekleştirmek için ilk önce kullanılacak kısıt çeşitleri belirlenmelidir. Buna göre dört tane uzaklık kısıtı ve bir tane açısal kısıt çeşidi tanımlanır. Tablo 2.1'de bu tanımlamalar sunulmuştur.

Tablo 2.1. GSP tip sentezlemesi için kullanılacak geometrik kısıt tanımları

Kısıt İsmi	Kısıt Tipi	Kısıt Tanımı
D_1	Nokta/Nokta Uzaklık Kısıtı	Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir nokta ile temel çerçevede yer alan bir nokta arasındaki uzaklık kısıtı.
D_2	Doğru/Nokta Uzaklık Kısıtı	Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir Doğru ile temel çerçevede yer alan bir nokta arasındaki uzaklık kısıtı.
D_3	Nokta/Doğru Uzaklık Kısıtı	Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir Nokta ile temel çerçevede yer alan bir Doğru arasındaki uzaklık kısıtı.
D_4	Doğru/Doğru Uzaklık Kısıtı	Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir Doğru ile temel çerçevede yer alan bir Doğru arasındaki uzaklık kısıtı.
A_1	Doğru/Doğru Açısal Kısıtı	Uç işlevci çerçevesinde yer alan bir Doğru ile temel çerçevede yer alan bir doğru arasındaki açısal kısıtı.

Muhtemel tüm mekanizma sayısı bulunmadan önce elde edilecek mekanizmaların yapısal özelliğini tam olarak ifade edilebilecek bir isimlendirme yapılması gerekmektedir. Bir sonraki bölümde bu doktora tez çalışmasında kullanılacak isimlendirme prosedürü sunulacaktır.

2.5.2. İsimlendirme

Elde edilecek yapıların isimlendirilmesi bu mekanizmaların ait oldukları sınıfları ve sahip oldukları kısıtlılık tiplerini gösterebilecek bir şekilde yapılmalıdır. Buna göre bir GSP için kullanılacak isim bu mekanizmanın yapısal özelliklerinin anlaşılmasını sağlayacak yapıda olmalıdır. Sonuç olarak isimlendirme amacıyla mekanizmanın yapısını oluşturan kısıtları temsil eden ve Tablo 2.1'in ilk sütununda verilen kısıt isimleri yanyana getirilebilir. Örneğin: 2 D_1 , 1 D_3 , 2 D_4 ve 1 A_1 kısıtına sahip bir yapının kısıtsal gösterimi şu şekilde olur.

$$D_1 D_1 D_3 D_4 D_4 A_1 \quad (2.7)$$

Bu gösterimde, eğer bir mekanizma üzerinde aynı geometrik kısıttan birden fazla varsa bu durumda aynı kısıttan birden fazla yazmak yerine o kısıttan kaç tane olduğu ilgili kısıta üst bir indis tanımlanarak ifade edilebilir. Örneğin yukarıda verilen $D_1 D_1 D_3 D_4 D_4 A_1$ yapısı aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$D_1^2 D_3 D_4^2 A_1 \quad (2.8)$$

Bu şekilde yapılan isimlendirme bir sonraki kısımda sunulacak tablolarda yer alan yapıların anlaşılması ve bu yapılardan amaca uygun olanlarının seçilmesini kolaylaştıracaktır. 4 sınıfın herbiri için en fazla GSP sayısı aşağıdaki gibi bulunur.

2.5.3. Muhtemel tüm GSP sayısının bulunması

Bu bölümde muhtemel tüm GSP sayısının bulunması için Tablo 2.1'de verilen kısıt tipleri ve Denklem (2.6) kullanılmıştır. Gao ve diğ. [1]'nin belirlediği dört ayrı sınıf için muhtemel mekanizma sayıları ayrı ayrı bulunmuş ve bulunan sonuçlar toplanarak nihai sayı bulunmuştur. Aşağıda her bir sınıf için gerçekleştirilen hesaplamalar ayrı ayrı verilmiştir.

- 3D3A sınıfındaki GSP sayısının bulunması: Bu yapıdaki GSP'ler için 4 farklı tip uzaklık kısıtından ($D_1 \dots D_4$) 3 tane, 1 tip açılal kısıt (A_1)'tan da 3 tane seçilecek ve bulunan iki seçim sayısı çarpılarak sonuç bulunacaktır. 4 farklı tip uzaklık kısıtından 3 tanesi şu şekilde seçilir ($n=4, m=3$);

$$C_{m+n-1}^m = C_6^3 = \frac{6.5.4.3!}{3!.3!} = 20 \quad (2.9)$$

1 tip açılal kısıttan 3 tanesi de şu şekilde bulunur ($n=1, m=3$);

$$C_{m+n-1}^m = C_3^3 = 1 \quad (2.10)$$

Sonuç olarak 3D3A sınıfındaki en fazla GSP sayısı $20 \times 1 = 20$ olarak bulunur. Bulunan tüm GSP tipleri Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2. 3D3A sınıfında yer alan muhtemel GSP tipleri

$D_1D_2D_4A_1^3$	$D_1D_2D_3A_1^3$	$D_1D_2^2A_1^3$	$D_1^2D_4A_1^3$	$D_1^2D_3A_1^3$	$D_3D_4A_1^3$	$D_2^2D_4A_1^3$	$D_3^2D_4A_1^3$	$D_3^3A_1^3$	$D_2^3A_1^3$
$D_2D_3D_4A_1^3$	$D_1D_3D_4A_1^3$	$D_1^2D_2A_1^3$	$D_1D_3^2A_1^3$	$D_1D_4^2A_1^3$	$D_2^2D_3A_1^3$	$D_2D_3^2A_1^3$	$D_2D_4^2A_1^3$	$D_1^3A_1^3$	$D_4^3A_1^3$

- 4D2A sınıfındaki GSP sayısının bulunması: Bu yapıdaki GSP'ler için 4 farklı tip uzaklık kısıtından ($D_1 \dots D_4$) 4 tane, 1 tip açılal kısıt (A_1)'tan da 2 tane seçilecek ve bulunan iki seçim sayısı çarpılarak sonuç bulunacaktır. 4 farklı tip uzaklık kısıtından 4 tanesi şu şekilde seçilir ($n=4, m=4$);

$$C_{m+n-1}^m = C_7^4 = \frac{7.6.5.4!}{3!.4!} = 35 \quad (2.11)$$

1 tip açılal kısıttan 2 tanesi de Denklem (2.10)'da olduğu gibi 1 defa seçilebilir. Sonuç olarak 4D2A sınıfındaki en fazla GSP sayısı 35 olarak bulunur. Bulunan tüm GSP tipleri Tablo 2.3'de sunulmuştur.

Tablo 2.3. 4D2A sınıfında yer alan muhtemel GSP tipleri

$D_1D_2D_3D_4A_1^2$	$D_1^2D_2D_3A_1^2$	$D_1D_2^2D_4A_1^2$	$D_1D_2D_4^2A_1^2$	$D_1^3D_2A_1^2$	$D_1^2D_4^2A_1^2$	$D_3^2D_4^2A_1^2$	$D_1^2D_3A_1^2$	$D_4^4A_1^2$
$D_1^2D_2D_4A_1^2$	$D_2D_3D_4^2A_1^2$	$D_1^2D_3D_4A_1^2$	$D_2^2D_3A_1^2$	$D_1^3D_4A_1^2$	$D_1D_2^3A_1^2$	$D_3D_4^3A_1^2$	$D_1^2D_2A_1^2$	$D_1^4A_1^2$
$D_1D_2D_3^2A_1^2$	$D_2D_3^2D_4A_1^2$	$D_2^2D_3D_4A_1^2$	$D_2^2D_4^2A_1^2$	$D_1^2D_3^2A_1^2$	$D_1D_4^3A_1^2$	$D_2D_3^3A_1^2$	$D_2^2D_4A_1^2$	$D_2^4A_1^2$
$D_1D_3D_4^2A_1^2$	$D_1D_2^2D_3A_1^2$	$D_1D_3^2D_4A_1^2$	$D_2^3D_3A_1^2$	$D_1D_3^3A_1^2$	$D_2D_4^3A_1^2$	$D_3^3D_4A_1^2$	$D_3^4A_1^2$	***

- 5D1A sınıfındaki GSP sayısının bulunması: Bu yapıdaki GSP'ler için 4 farklı tip uzaklık kısıtından ($D_1...D_4$) 5 tane, 1 tip açılal kısıt (A_1)'tan da 1 tane seçilecek ve bulunan iki seçim sayısı çarpılarak sonuç bulunacaktır. 4 farklı tip uzaklık kısıtından 5 tanesi şu şekilde seçilir ($n=4, m=5$);

$$C_{m+n-1}^m = C_{5+4-1}^5 = C_8^5 = \frac{8.7.6.5!}{3!.5!} = 56 \quad (2.12)$$

1 tip açılal kısıttan 1 tanesi de Denklem (2.10)'da olduğu gibi 1 defa seçilebilir. Sonuç olarak 5D1A sınıfındaki en fazla GSP sayısı 56 olarak bulunur. Bulunan tüm GSP tipleri Tablo 2.4'de sunulmuştur.

Tablo 2.4. 5D1A sınıfında yer alan muhtemel GSP tipleri

$D_1D_2D_3D_4A_1$	$D_1^3D_3D_4A_1$	$D_1^3D_2D_4A_1$	$D_1^2D_3^2D_4A_1$	$D_2D_3^3D_4A_1$	$D_1^3D_4^2A_1$	$D_1^3D_3^2A_1$	$D_2^4D_3A_1$	$D_2D_3^4A_1$	$D_1^5A_1$
$D_1D_2^2D_3D_4A_1$	$D_1D_2^2D_4^2A_1$	$D_1D_3^3D_4A_1$	$D_1^2D_2^2D_3A_1$	$D_2^3D_3D_4A_1$	$D_1^4D_4A_1$	$D_3^3D_4^2A_1$	$D_3^3D_4^3A_1$	$D_2^3D_3^2A_1$	$D_3^5A_1$
$D_1^2D_2D_3D_4A_1$	$D_1^2D_2D_3^2A_1$	$D_1^2D_2^2D_4A_1$	$D_1^3D_2D_3A_1$	$D_1D_4^4D_4A_1$	$D_2D_4^4A_1$	$D_1^4D_2A_1$	$D_2^4D_4A_1$	$D_1^4D_3A_1$	***
$D_1D_2D_3D_4^2A_1$	$D_1D_2^3D_3A_1$	$D_1D_2D_4^3A_1$	$D_1D_2D_3^3A_1$	$D_1D_3D_4^3A_1$	$D_2^3D_4^2A_1$	$D_1D_3^4A_1$	$D_1D_2^4A_1$	$D_1^2D_3^4A_1$	***
$D_2^2D_3^2D_4A_1$	$D_1^2D_2D_4^2A_1$	$D_1D_2^2D_3^2A_1$	$D_1D_3^3D_4A_1$	$D_2D_3^2D_4^2A_1$	$D_1^2D_3^3A_1$	$D_1^3D_2^2A_1$	$D_2^2D_4^3A_1$	$D_4^5A_1$	***
$D_1D_2^3D_4^2A_1$	$D_1^2D_3D_4^2A_1$	$D_2^2D_3D_4^2A_1$	$D_2D_3D_4^3A_1$	$D_3^4D_4A_1$	$D_1^2D_2^3A_1$	$D_2^2D_3^3A_1$	$D_3D_4^4A_1$	$D_2^5A_1$	***

- 6D sınıfındaki GSP sayısının bulunması: Bu yapıdaki GSP'ler için 4 farklı tip uzaklık kısıtından ($D_1...D_4$) 6 tane seçilecek açılal kısıt seçilmeyecektir. 4 farklı tip uzaklık kısıtından 6 tanesi şu şekilde seçilir ($n=4, m=6$);

$$C_{m+n-1}^m = C_{6+4-1}^6 = C_9^6 = \frac{9.8.7.6!}{6!.3!} = 84 \quad (2.13)$$

Buna göre 6D sınıfındaki en fazla GSP sayısı 84 olarak bulunur. Bulunan tüm GSP tipleri Tablo 2.5'de sunulmuştur.

Yapılan bu hesaplamalar sonucu muhtemel GSP sayısı $20+35+56+84=195$ olarak bulunur. Bu şekilde yapılan sınırlandırma ile muhtemel GSP sayısı 3850'den 195'e indirilmiştir. Belirlenen GSP tipleri arasından seçim yapılmasını kolaylaştırmak amacıyla bu doktora tez çalışmasında ikinci bir kıstas olarak Tsai [30] tarafından önerilen simetrik olma koşulları GSP'lere uygulanmıştır. Bir sonraki bölümde bu kıstasın nasıl uygulandığı anlatılmıştır.

Tablo 2.5. 6D sınıfında yer alan muhtemel GSP tipleri

$D_1^2 D_2 D_3 D_4$	$D_1^2 D_2 D_3^2 D_4$	$D_1^2 D_3^2 D_4$	$D_1^2 D_3 D_4^3$	$D_1^3 D_3 D_4^2$	$D_1^3 D_2^2 D_4$	$D_1^2 D_2^2 D_3^2$	$D_2^3 D_3 D_4^2$	$D_1^5 D_2$	$D_1^3 D_2^3$	$D_1^3 D_3^3$	$D_2^3 D_3^3$
$D_1 D_2^2 D_3^2 D_4$	$D_1 D_2 D_3 D_4^3$	$D_2^4 D_3 D_4$	$D_1 D_2^4 D_3$	$D_1 D_2^4 D_4$	$D_2^3 D_3^2 D_4$	$D_1^2 D_2^2 D_4^2$	$D_1^5 D_3$	$D_1^5 D_4$	$D_2^2 D_3^4$	$D_3^3 D_4^3$	$D_2 D_3^5$
$D_1 D_2 D_3^3 D_4$	$D_1^3 D_2 D_3 D_4$	$D_1^2 D_2 D_3^3$	$D_1^3 D_3^2 D_4$	$D_1 D_2^2 D_4^3$	$D_2 D_3 D_4^4$	$D_1 D_2^3 D_3^2$	$D_1^4 D_2^2$	$D_2^4 D_3^2$	$D_2^5 D_3$	$D_3^2 D_4^4$	$D_2^3 D_4^3$
$D_1 D_2 D_3^2 D_4^2$	$D_2^2 D_3^3 D_4$	$D_1^4 D_2 D_4$	$D_1^4 D_3 D_4$	$D_1 D_2 D_3^4$	$D_2^2 D_3^2 D_4^2$	$D_1^4 D_2 D_3$	$D_2 D_4^5$	$D_1^2 D_2^4$	$D_3^4 D_4^2$	$D_3 D_4^5$	D_1^6
$D_1^2 D_2^2 D_3 D_4$	$D_2^2 D_3 D_4^3$	$D_1^2 D_2 D_4^3$	$D_1 D_2^2 D_4^2$	$D_1 D_2 D_4^4$	$D_1^2 D_3^2 D_4^2$	$D_1 D_3^3 D_4^2$	$D_1^4 D_3^2$	$D_1 D_4^5$	$D_2^2 D_4^4$	$D_1 D_3^5$	D_2^6
$D_1 D_2^3 D_3 D_4$	$D_1^3 D_2^2 D_3$	$D_1^2 D_3^3 D_4$	$D_1 D_2^2 D_3^3$	$D_1 D_3^4 D_4$	$D_1^2 D_3^2 D_3$	$D_2 D_3^4 D_4$	$D_1^4 D_4^2$	$D_1^2 D_4^4$	$D_1^3 D_4^3$	$D_2^4 D_4^2$	D_3^6
$D_1 D_2^2 D_3 D_4^2$	$D_1^3 D_2 D_3^2$	$D_2 D_3^3 D_4^2$	$D_1^3 D_2 D_4^2$	$D_1 D_3 D_4^4$	$D_1 D_3^2 D_4^3$	$D_2 D_3^2 D_4^3$	$D_1^2 D_3^4$	$D_1 D_2^5$	$D_3^5 D_4$	$D_2^5 D_4$	D_4^6

2.5.4. GSP mekanizmaların Simetrik Olma Durumu

Paralel robot mekanizmaları eğer aşağıdaki kıstasları sağlıyorsa simetrikdirler denilir [30].

1. Yapıda yer alan kinematik zincir sayısı uç işlevcinin serbestlik derecesi sayısına eşit olmalıdır.
2. Her bir kinematik zincirde yer alan eklemlerin sayıları, tipleri ve sıralanışları aynı olmalıdır.
3. Her bir kinematik zincirde yer alan aktif eklemler aynı tip ve sırada olmalıdır.

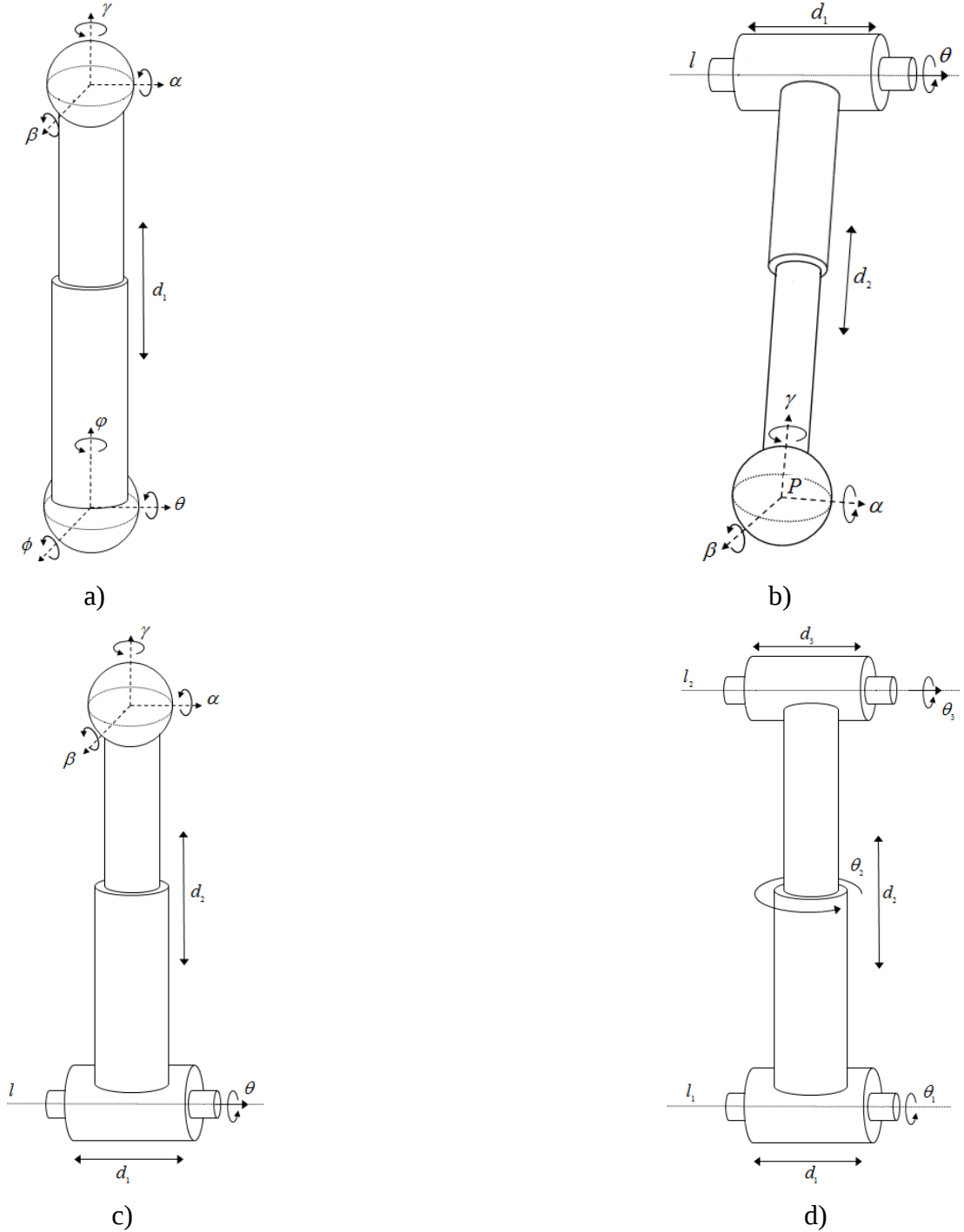
Yukarıda belirtilen kıstasları ele alarak GSP mekanizmalarını simetrik olma durumuna göre bir sınıflandırmaya tabi tutabilmek için öncelikle her kısıt tipinin nasıl bir bacak yapısı ile gerçekleştirilebileceğini ortaya koymak gerekir.

D_1 kısıtı her iki çerçeve üzerinde yer alan iki nokta arasında uzaklık kısıtı tanımlar. Bu şekilde bir kısıt, fiziksel olarak her iki ucunda iki pasif küresel eklem (S) ve bu iki eklemi birleştiren bir aktif prizmatik eklem (P) ile gerçekleştirilebilir. Buna göre D_1 kısıtı için kullanılabilecek bacağın yapısı SPS olarak belirlenebilir. Şekil 2.7'nin a şikkında örnek bir bacak yapısı verilmiştir. D_2 kısıtı uç işlevci çerçevesi üzerinde yer alan bir doğru ve temel çerçevede yer alan bir nokta arasında uzaklık kısıtı tanımlar. Bu şekilde bir kısıt, fiziksel olarak uç işlevci çerçevesine tarafında pasif bir silindirik eklem (C), temel çerçeve tarafında pasif bir küresel eklem ve bu iki eklem arasında aktif bir prizmatik eklem kullanılarak oluşturulan bir bacak yapısı ile gerçekleştirilebilir. Buna göre D_2 kısıtı için kullanılabilecek bacağın yapısı SPC olarak belirlenebilir. Şekil 2.7'nin b şikkında örnek bir bacak yapısı verilmiştir. D_3

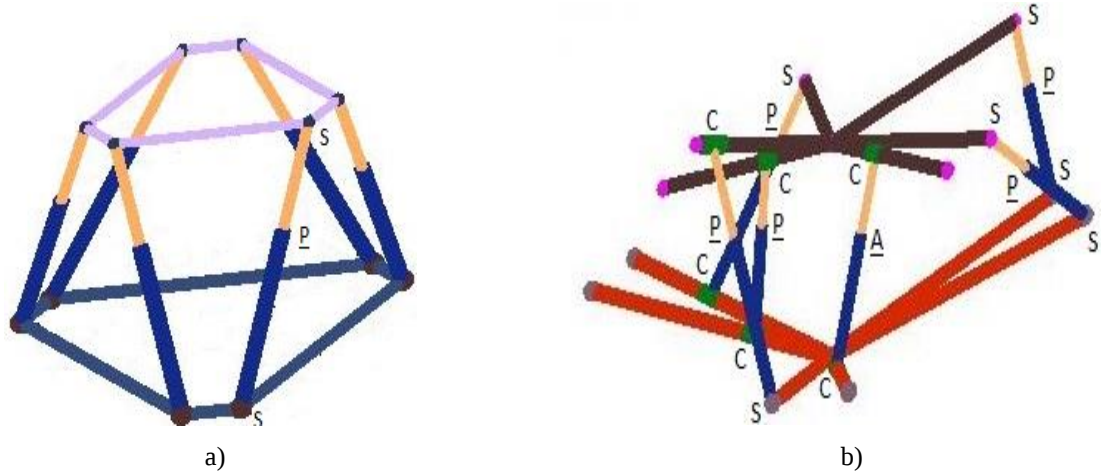
kısıtı uç işlevci çerçevesi üzerinde yer alan bir nokta ve temel çerçevede yer alan bir doğru arasında uzaklık kısıtı tanımlar. Bu şekilde bir kısıt, fiziksel olarak uç işlevci çerçevesine tarafında pasif bir küresel eklem (S), temel çerçeve tarafında pasif bir silindirik eklem ve bu iki eklem arasında aktif bir prizmatik eklem kullanılarak oluşturulan bir bacak yapısı ile gerçekleştirilebilir. Buna göre D_3 kısıtı için kullanılabilecek bacağın yapısı CPS olarak belirlenebilir. Şekil 2.7'nin c şikkında örnek bir bacak yapısı verilmiştir. D_4 kısıtı her iki çerçeve üzerinde yer alan iki doğru arasında uzaklık kısıtı tanımlar. Bu şekilde bir kısıt fiziksel olarak gerçekleştirilebilmek için, her iki çerçeve üzerinde yer alan pasif silindirik eklemler ve bu iki eklemi birleştiren üçüncü bir silindirik eklemden oluşan bir bacak yapısı kullanılabilir. Üçüncü silindirik eklemin prizmatik eklem kısmı aktif, dönel eklem kısmı ise pasif eklem olmalıdır. Buna göre D_4 kısıtı için kullanılabilecek bacağın yapısı CCC olarak belirlenebilir. Şekil 2.7'nin d şikkında örnek bir bacak yapısı verilmiştir. A_1 kısıtı her iki çerçeve üzerinde yer alan iki doğru arasında açısall bir kısıt tanımlar. Bu şekilde bir kısıt fiziksel olarak D_4 tipi kısıt için belirlenen CCC tipi bacak yapısı ile gerçekleştirilebilir. Tek fark üçüncü silindirik eklemden bulunan aktif eklem tipidir. Açısall kısıt sağlanabilmesi için silindirik eklemin dönel eklem kısmı aktif, prizmatik eklem kısmı ise pasif eklem olmalıdır. Şekil 2.7'nin d şikkında verilen bacak yapısı A_1 kısıtı için de kullanılabilir.

Kısıt tipine göre seçilen bacak yapıları ve Tsai [30] tarafından belirtilen simetrik olma şartları göz önüne alındığında açısall kısıt içeren 3D3A, 4D2A ve 5D1A sınıfları simetrik olmayan paralel mekanizmalar grubunda yer alacaklardır. Bunun nedeni yapılarında açısall kısıt içermeleridir. Açısall kısıt içeren GSP'lerde aktif eklem uzaklık kısıtı içerenlerden farklı olarak dönel eklemdir ve bu durum simetrik olma şartlarından 3. şarta uymayacaktır. Simetrik olma şartlarını sağlayacak yapılar sadece 6D kısıtına sahip yapılar arasında yer almaktadırlar. Ancak bu yapıların da tamamı simetrik değildir. Örnek olarak 6 uzaklık kısıtının 2 tanesi Doğru-Nokta uzaklık kısıtı diğer 4 tanesi de nokta-nokta uzaklık kısıtı olan bir yapı verilebilir. Bu yapıda yer alan farklı kısıtlar farklı bacak yapıları kullanılarak oluşturulacaktır. 2 tanesi CPS yapısına sahip bacaklarla diğer dört tanesi ise SPS yapıdaki bacaklarla gerçekleştirileceklerdir. Böyle bir tasarım simetrik olma şartlarından 2. şarta uymayacaktır. Bu durum dikkate alındığında sadece 4 adet yapının simetrik olma

şartını sağladığı görülür. Bu dört yapı tüm bacakları sadece bir tip uzaklık kısıtı için tasarlanmış mekanizmalardan oluşur. Şekil 2.8’de hem simetrik olan hem de simetrik olmayan yapılar için örnek çizimler sunulmuştur.



Şekil 2.7. Farklı kısıt tiplerinin gerçekleştirilmesi için örnek bacak yapıları [1] a) D₁ kısıtı için SPS bacak yapısı b) D₂ kısıtı için SPC bacak yapısı c) D₃ kısıtı için CPS bacak yapısı d) D₄ ve A₁ kısıtları için CCC bacak yapısı



Şekil 2.8. Simetrik olan ve olmayan örnek GSP mekanizmaları a) Simetrik yapılı ve D_1^6 tip kısıt yapısına sahip GSP mekanizması b) Simetrik olmayan ve $D_1^2 D_2 D_3 D_4 A_1$ tipi kısıt yapısına sahip GSP mekanizması

Şekilde bir eklemin altı çizili olması durumu o eklemin aktif eklem olduğunu göstermektedir. GSP mekanizmalarının simetrik olmaları bu mekanizmaların tek bir bacağı için yapılacak hesaplamaların kolayca diğer bacaklar için de uygulanabileceğini gösterir. Bu durum mekanizmanın kinematik ve dinamik hesapları, kontrolü ve üretim maliyeti açısından avantajlar sağlayacaktır. Bununla birlikte yukarıda da belirtildiği gibi sadece 4 çeşit simetrik yapı bulunmaktadır. Bunlardan D_1^6 yapıdaki mekanizma en çok bilinen GSP mekanizması olan SP'dur. Diğer ikisi D_2^6 ve D_3^6 bacak yapılarına sahip mekanizmalardır. Bu iki mekanizma da aslında matematiksel olarak birbirlerine eşdirlir. Çünkü her iki mekanizmada kullanılan bacak yapılarında sadece pasif eklemlerin sıralanışı değişmektedir. Diğer bir değişle, D_2^6 tipi bir mekanizmanın uç işlevci çerçevesi ile temel çerçevesi yer değiştirdiğinde D_3^6 mekanizması elde edilecektir. Bu durumda aslında temel simetrik mekanizma sayısının 3 olduğunu göstermektedir. Üçüncü simetrik mekanizma ise D_4^6 bacak yapısına sahip GSP mekanizmasıdır.

Simetrik mekanizma sayısının bu kadar az olması yeni GSP mekanizmaları bulunması konusunda önemli bir dezavantajdır. Simetrik olan GSP ler çıkarıldığında geriye 191 tane simetrik olmayan GSP mekanizması kalmaktadır. Bu durum simetrik olmayan mekanizmaların yeni mekanizmalar bulunması açısından önemini açıkça ortaya koymaktadır.

2.6. Sonuçlar

Bu bölümde doktora tez çalışmasına konu edilen GSP mekanizmaları için tip sentezleme, sınıflandırma ve isimlendirme çalışmaları örnek çizimlerle sunulmuştur. Yapılan alışmada Gao ve diğerkleri [1] tarafından nerilen GSP mekanizmaları iki kıstasa göre yeniden ele alınmış ve muhtemel 195 adet GSP tablolar halinde sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca literatürde yer alan tip sentezleme yöntemleri ile ilgili kısa özetler de yer almıştır.

Bir sonraki bölümde önerilen tüm GSP mekanizmaları için kullanılabilecek ters kinematik ve Jacobian denklemleri elde edilecektir.

3. GSP MEKANİZMALARI

3.1. Giriş

GSP mekanizmaları altı SD'ne sahip paralel robot mekanizmalarıdır. Bu mekanizmaların temel özelliği SD'ne karar verilirken mekanizmanın temel ve uç işlevci çerçeveleri arasında tanımlanmış kısıt sayısının dikkate alınmasıdır. Buna göre herbir kısıt bir SD anlamına gelmektedir. Bu yaklaşım mekanizma tip sentezleme probleminin bir geometrik kısıtlılık problemi olarak tanımlanmasının bir sonucudur. Bununla birlikte ortaya konulan bu SD hesabı robotik araştırmacılarının kullandığı diğer yöntemlerle de karşılaştırılmalı ve doğruluğu ispatlanmalıdır.

GSP mekanizmaları için diğer önemli bir konu bu mekanizmaların ters kinematik ve Jacobian matrisi ifadelerinin elde edilmesidir. Bu ifadeler mekanizmaların performans analizlerinin temelinde yer alan ve mekanizma için konum ve hız bilgileri içeren ifadelerdir.

Bu bölümde GSP mekanizmalarının matematiksel modellemesi gerçekleştirilmiştir. GSP mekanizmalarının SD'nin test edilmesi amacıyla robotik araştırmacılarının en çok kullandığı yöntemlerden biri olan Grübler formülü kullanılarak örnek mekanizmaların SD hesabı yapılmıştır. Ayrıca kısıt tiplerinin herbiri için bir önceki bölümde önerilen bacak yapıları kullanılarak ters kinematik ve Jacobian matris analizlerinde kullanılacak genel denklemler elde edilmiştir.

3.2. Serbestlik Derecesi

SD bir mekanizmanın konfigürasyonunu tam olarak tanımlayabilmek amacıyla kullanılacak bağımsız parametre sayısıdır [30]. SD'ni tanımlamak için kullanılan en genel formül Grübler formülü olarak bilinen formüldür [30] Denklem (3.1).

$$SD = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (3.1)$$

Denklemde; λ mekanizmanın çalışması öngörülen çalışma uzayının serbestlik derecesidir. Bu değer düzlemsel ve küresel mekanizmalar için 3, uzamsal (spatial) mekanizmalar için ise 6 dır [30]. Ayrıca n mekanizmayı oluşturan kinematik bağların sayısı, j eklem sayısı ve f_i i'nci eklemün sahip olduğu serbestlik derecesidir.

Grübler formülü kullanılırken dikkate edilmesi gereken önemli bir nokta, robotun kinematik zincirlerini oluşturan eklemlerin birleşmelerinden dolayı oluşacak pasif serbestlik dereceleri. Pasif bir serbestlik derecesi, hareket ve tork iletimi yapamaz bu nedenle bu serbestlik dereceleri grübler formülü kullanılırken genel toplamdan çıkarılmalıdır. Sonuç olarak Grübler formülünün son hali şu şekilde olmaktadır [30];

$$SD = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i - f_p \quad (3.2)$$

Denklemde f_p pasif serbestlik derecesi sayısıdır. Pasif SD içeren eklem çiftleri Tablo 3.1'de verilmiştir [13].

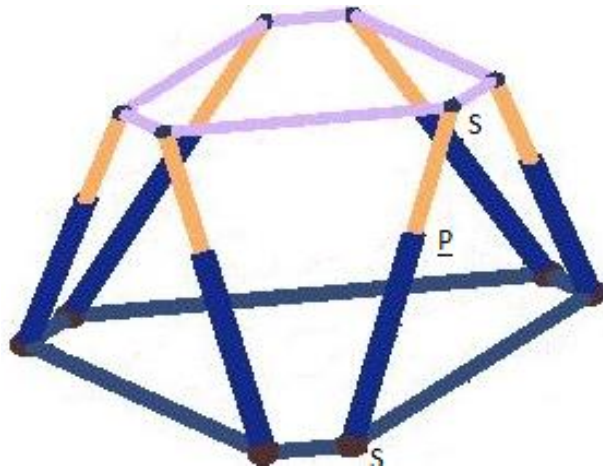
Tablo 3.1. Pasif SD içeren eklem çiftleri

Eklem çifti tipi	Pasif SD tanımı
Küresel-Küresel	Her iki küresel eklemün merkezinden geçen bir eksen etrafında dönel bir SD'dir.
Küresel-Düzlemsel	Küresel eklemün merkezinden geçen ve düzlemsel Eklem düzlemine dik bir eksene göre dönel bir SD'dir.
Düzlemsel-Düzlemsel	İki düzlemsel eklemün kesiştiğı düzleme paralel bir eksen boyunca bir kayar SD'dir. Eğer iki düzlem paralel ise 3 pasif SD oluşur.

Bu bölümde GSP mekanizmalarından SD test edilecek ilk mekanizma D_1^6 yapıdaki GSP'dir. Bu mekanizma literatürde en çok karşılaşılan paralel robot mekanizması olan SP'dur. Bir önceki bölümde bu mekanizmanın bacaklarını oluşturmakiçin SPS bacak yapısı önerilmişti. Bu önerideki bacak yapısında yer alan aktif prizmatik eklem sayesinde küresel eklemlerin bağı olduğu iki nokta arasında uzaklık kısıtı oluşturulur. Bu mekanizmanın örnek bir çizimi Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu mekanizmanın SD hesabı Denklem (3.2) kullanılarak şu şekilde gerçekleştirilebilir. Verilen mekanizmanın uç işlevci ve temel çerçeve platformları 6 tane küresel-prizmatik-küresel eklem yapısına sahip kinematik zincirle birbirine bağlanmıştır. Buna göre; seçilen mekanizma uzamsal bir mekanizma olduğu için $\lambda = 6$ 'dır.

Mekanizma toplam 14 bağdan oluşmaktadır ($n=14$, 1 temel çerçeve platformu, 1 uç işlevci çerçeve platformu ve 12 tane eklem bağı). Her bir bacakta 3 tane olmak üzere toplam 18 eklem ($j=18$) vardır. f_i , prizmatik eklemler için 1, küresel eklemler için 3'dür. Son olarak $f_p = 6$ (6 tane küresel-küresel eklem çifti var) olarak alınırsa SD aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$SD = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i - f_p = -30 + 42 - 6 = 6 \quad (3.3)$$

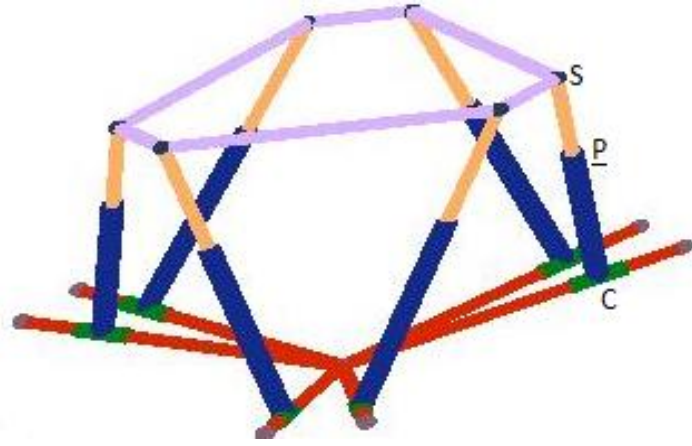


Şekil 3.1. D_1^6 tip GSP mekanizması

Diğer bir örnek olarak D_3^6 yapıdaki simetrik GSP mekanizmasının SD hesabı gerçekleştirilebilir. Bir önceki bölümde bu mekanizma için CPS tipi bacak önerilmişti. Bu bacak yapısında temel çerçeve üzerindeki bir doğru üzerine yerleştirilen silindirik eklem ile uç işlevci çerçevesi üzerindeki bir noktaya bağlanan küresel eklem arasında, aktif prizmatik eklem kullanılarak uzaklık kısıtı oluşturulur. Toplam 6 kısıt tanımlandığı için mekanizmanın SD 6'dır. Örnek bir mekanizma çizimi Şekil 3.2'de verilmiştir.

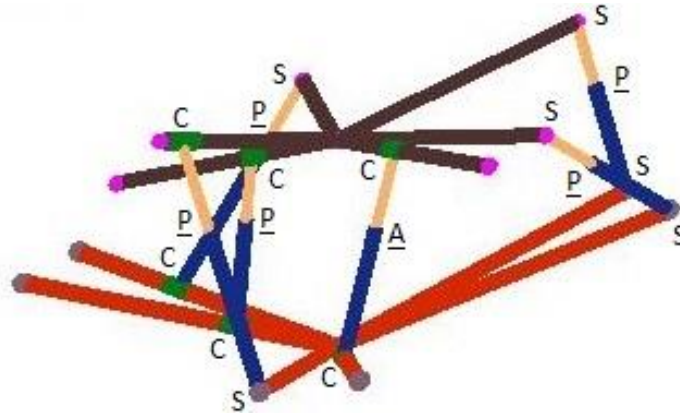
SD hesabının Grübler formülü ile gerçekleştirilmesi şu şekilde yapılabilir. Bu mekanizma için $\lambda = 6$, $n = 14$, $j = 18$, f_i , prizmatik eklemler için 1, silindirik eklemler için 2, küresel eklemler için 3 ve son olarak $f_p = 0$ (pasif SD içeren eklem çifti yok) olarak alınırsa SD aşağıdaki gibi bulunur.

$$SD = -30 + 36 = 6 \quad (3.4)$$



Şekil 3.2. D_3^6 tip GSP mekanizması

Son olarak ikinci bölümde önerilen tüm bacak yapılarını içeren simetrik olmayan $D_1^2 D_2 D_3 D_4 A_1$ GSP mekanizması için SD hesabı Gröbler formülü ile aşağıdaki gibi yapılabilir. Örnek bir mekanizma çizimi Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. $D_1^2 D_2 D_3 D_4 A_1$ tip GSP mekanizması

Bu mekanizma için değişkenler şu şekilde yazılabilir; $\lambda = 6$, $n = 14$, $j = 18$, f_i , prizmatik ve dönel eklemler için 1, silindirik eklemler için 2, küresel eklemler için 3 ve $f_p = 2$ (2 tane küresel-küresel eklem çifti var).

$$SD = -30 + 38 - 2 = 6 \quad (3.5)$$

Bu bölümde GSP mekanizmalarının SD’si hesabı yapılmıştır. Bu mekanizmaların geometrik kısıtlılık problemi temel alınarak hesaplanan SD’leri ile robotik araştırmacıları tarafından en çok kullanılan Gröbler formülü ile hesaplanan SD’leri üç farklı mekanizma örnek verilerek karşılaştırılmış ve eşit oldukları görülmüştür.

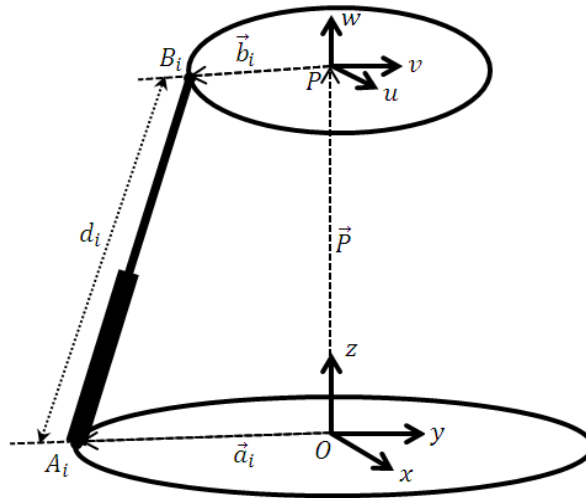
Dolayısıyla GSP mekanizmalarının SD hesabının sahip oldukları geometrik kısıt sayısına göre de hesaplanabileceği gösterilmiştir. Bir sonraki bölümde GSP mekanizmalarının ters kinematik denklemleri elde edilmiştir.

3.3. Ters Kinematik

Bu bölümde bu doktora tez çalışmasına konu edilen GSP mekanizmaları için genel ters kinematik denklemler elde edilmiştir. Elde edilen denklemler mekanizmaların temel ve uç işlevci çerçeveleri üzerinde rastgele seçilebilecek geometrik nesneler (nokta ve doğru) kullanılarak elde edilmiştir. Bu şekilde elde edilen denklemler bu tez çalışmasında önerilen 195 GSP mekanizmalarının herhangi biri için kullanılabilir. Denklemler her bir kısıt tipi için ayrı ayrı elde edilmiştir. Denklemler vektörel bir yaklaşımla elde edilmiştir. Vektörler ve vektörler arasındaki işlemlerle ilgili temel formüller Ek A’da verilmiştir. Son olarak işlemlerde kullanılan vektörler 3x1 boyutunda vektörlerdir.

3.3.1. D₁ tipi kısıt için ters kinematik denklemi

D₁ tipi kısıt iki nokta arasında uzaklık oluşturmak için tanımlanmıştır. İkinci bölümde bu kısıtı sağlamak için Küresel-Prizmatik-Küresel (SPS), bacak yapısı önerilmiştir. Bu yapıda aktif eklem iki küresel eklem arasında yer alan prizmatik eklemdir. Küresel eklemler ise pasiftirler. Bu bacak yapısının temel ve uç işlevci çerçeveleri ile olan bağlantısı için örnek bir çizim Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. SPS tipi bacak ve bağlantı şekli

Şekilde $O_{(x,y,z)}$ koordinat sistemi temel çerçeve üzerine, $P_{(u,v,w)}$ koordinat sistemi ise uç işlevci çerçevesi üzerine aynı yönelimle yerleştirilmişlerdir. A_i noktası temel çerçeve üzerinde seçilen ve O koordinat sistemine göre tanımlanmış rastgele bir nokta aynı şekilde B_i de P koordinat sistemine göre uç işlevci çerçevesi üzerinde rastgele seçilmiş bir noktadır. A_i ve B_i noktalarının kendi koordinat sistemlerine göre olan konum vektörleri ise sırasıyla $\vec{a}_i$ ve $\vec{b}_i$ dir. İki çerçeve arasındaki konum vektöründe O koordinat sistemine göre tanımlı $\vec{P}$ vektörüdür. Son olarak i bacak numarasını belirten bir indistir. Bacak temel ve uç işlevci çerçeveleri üzerindeki A_i ve B_i noktalarına küresel eklemlerle bağlanmıştır. Bu tanımlamalara göre d_i uzunluğunu bulmak için ilk önce $\vec{d}_i$ vektörü aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\vec{d}_i = \vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \quad (3.6)$$

Denklemde R uç işlevci çerçevesini temel çerçeveye göre olan 3x3 boyutunda yönelim matrisidir. Denklem (3.3)'de verilen $\vec{d}_i$ vektörünün normunun bulunması istenen d_i uzunluğunu verecektir. Bir vektörün normu vektörün kendisi ile noktasal çarpımı sonucu elde edilen sayının kareköküne eşittir. Buna göre d_i aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$d_i^2 = (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \quad (3.7)$$

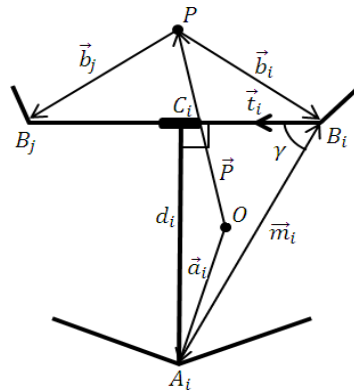
Denklemde $\cdot$ noktasal çarpımı işaret etmektedir. Elde edilen bu denklem mekanizmadan bağımsız olmak üzere D_1 tipi kısıt içeren herhangi bir GSP de ilgili bacağın ters kinematik denklemi olarak kullanılabilecektir.

3.3.2. D_2 tipi kısıt için ters kinematik denklemi

D_2 tipi kısıt uç işlevci çerçevesi üzerinde yer alan bir doğru ile temel çerçeve üzerinde yer alan bir nokta arasında uzaklık oluşturmak için tanımlanmıştır. İkinci bölümde bu kısıtı sağlamak için Küresel-Prizmatik-Silindirik (SPC) bacak yapısı önerilmişti. Bu yapıda aktif eklem küresel eklem ile silindirik eklem arasında yer

[illegible]

Şekil 3.4 için yapılan tanımlamalardan farklı olarak uç işlevci çerçevesi üzerinde bir L_i doğrusu tanımlanmıştır. Bu doğru çerçeve üzerinde yer alan B_i ve B_j noktalarından geçmektedir. B_j noktasının konum vektörü $\vec{b}_j$, i ve j ise indislerdir. t_i ise L_i doğrusuna paralel bir birim vektördür. Bacak temel çerçeve üzerindeki A_i noktasına küresel eklemle, uç işlevci çerçevesi üzerindeki L_i doğrusuna ise silindirik eklem ile bağlanmıştır. Silindirik eklem L_i doğrusu boyunca öteleme ve yine bu doğruya göre dönme hareketine izin verir. Son olarak prizmatik eklem silindirik eklemle dolayısıyla L_i doğrusuna daima diktir. Bu tanımlamalara göre d_i uzunluğunu bulmak için bacak yapısı basit olarak aşağıdaki gibi çizilebilir.



40

Şekle göre ilk olarak $\vec{t}_i$ birim vektörü P koordinat sistemine göre $\vec{m}_i$ vektörü ise O koordinat sistemine göre Denklemler (3.8) ve (3.9)'da verildiği gibi yazılabilir;

$$\vec{t}_i = \frac{\vec{b}_j - \vec{b}_i}{|\vec{b}_j - \vec{b}_i|} \quad (3.8)$$

$$\vec{m}_i = \vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \quad (3.9)$$

$\vec{t}_i$ birim vektörü O koordinat sistemine göre iki çerçeve arasındaki yönelim matrisi ile çarpılarak $R\vec{t}_i$ şeklinde ifade edilir. Denklem (3.9)'un her iki yönü bu birim vektör ile çarpaz çarpıma tabi tutulursa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\vec{m}_i \times R\vec{t}_i = (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times R\vec{t}_i \quad (3.10)$$

$\vec{m}_i \times R\vec{t}_i$ ifadesi iki vektör arasındaki γ açısı (Şekil 3.6) kullanılarak şu şekilde de yazılabilir;

$$\vec{m}_i \times R\vec{t}_i = |\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i| |R\vec{t}_i| \sin \gamma \quad (3.11)$$

Denklemde $||$ vektör normudur. Şekil 3.6'da yer alan $A_i B_i C_i$ üçgenine göre d_i uzunluğu şu şekilde yazılabilir;

$$d_i = |\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i| \sin \gamma \quad (3.12)$$

Denklem (3.12), Denklem (3.11)'de yerine konursa aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\vec{m}_i \times R\vec{t}_i = d_i |R\vec{t}_i| \quad (3.13)$$

$\vec{m}_i$ vektörü Denklem (3.13)'de yerine konulur ve her iki tarafın karesi alınırsa;

$$\left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times R\vec{t}_i \right) \cdot \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times R\vec{t}_i \right) = d_i^2 (|R\vec{t}_i|)^2 \quad (3.14)$$

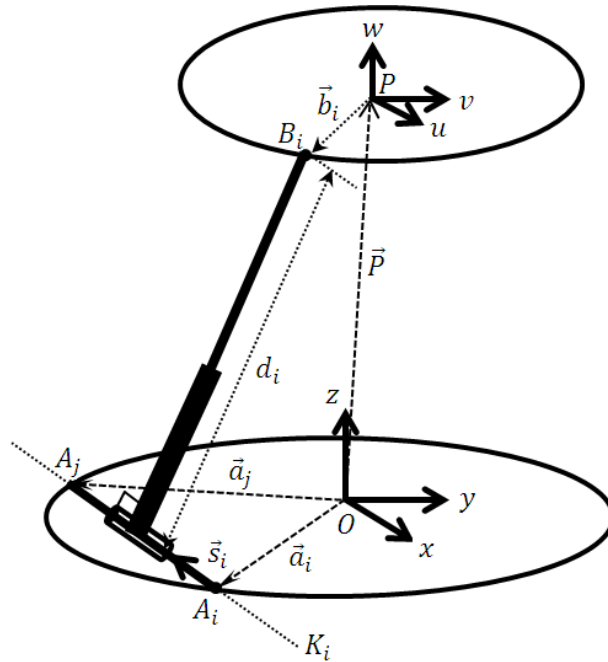
Denklem (3.14)'de yer alan $R\vec{t}_i$ birim vektörünün normunun karesi 1'e eşittir. Sonuç olarak d_i için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$d_i^2 = \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times R\vec{t}_i \right) \cdot \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times R\vec{t}_i \right) \quad (3.15)$$

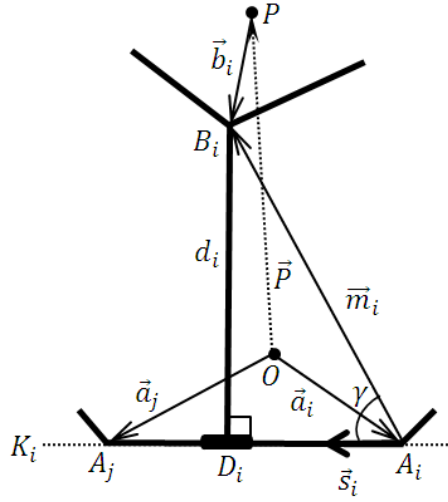
Elde edilen bu denklem mekanizmadan bağımsız olmak üzere D_2 tipi kısıt içeren herhangi bir GSP de ilgili bacağın ters kinematik denklemi olarak kullanılabilir.

3.3.3. D_3 tipi kısıt için ters kinematik denklemi

D_3 tipi kısıt uç işlevci çerçevesi üzerinde yer alan bir nokta ile temel çerçeve üzerinde yer alan bir doğru arasında uzaklık oluşturmak için tanımlanmıştır. İkinci bölümde bu kısıtı sağlamak için Silindirik-Prizmatik-Küresel (CPS) bacak yapısı önerilmişti. Bu yapıda aktif eklem küresel eklem ile silindirik eklem arasında yer alan prizmatik eklemdir. Diğer eklemler pasiftirler. Bu bacak yapısının temel ve uç işlevci çerçeveleri ile olan bağlantısı için örnek bir çizim Şekil 3.7’de verilmiştir. Şekilde temel çerçeve üzerinde bir K_i doğrusu tanımlanmıştır. Bu doğru çerçeve üzerinde yer alan A_i ve A_j noktalarından geçmektedir. A_j noktasının konum vektörü $\vec{a}_j$, i ve j ise indislerdir. $\vec{s}_i$ ise K_i doğrusuna paralel bir birim vektördür. Bacak uç işlevci çerçevesi üzerindeki B_i noktasına küresel eklemlerle, temel çerçeve üzerindeki K_i doğrusuna ise silindirik eklem ile bağlanmıştır. CPS bacak yapısı basit olarak Şekil 3.8’deki gibi çizilebilir.



Şekil 3.7. CPS tipi bacak ve bağlantı şekli



Şekil 3.8. CPS bacak yapısı

Şekle göre ilk olarak $\vec{s}_i$ birim vektörü ve $\vec{m}_i$ vektörü O koordinat sistemine göre aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\vec{s}_i = \frac{\vec{a}_j - \vec{a}_i}{|\vec{a}_j - \vec{a}_i|} \quad (3.16)$$

$$\vec{m}_i = \vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \quad (3.17)$$

Denklem (3.17)'nin her iki yönü $\vec{s}_i$ ile çapraz çarpıma tabi tutulursa;

$$\vec{m}_i \times \vec{s}_i = (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \quad (3.18)$$

$\vec{m}_i \times \vec{s}_i$ ifadesi iki vektör arasındaki γ açısı kullanılarak şu şekilde de yazılabilir;

$$\vec{m}_i \times \vec{s}_i = |\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i| |\vec{s}_i| \sin \gamma \quad (3.19)$$

Şekil 3.8'de yer alan $A_j B_i D_i$ üçgenine göre d_i uzunluğu şu şekilde yazılabilir;

$$d_i = |\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i| \sin \gamma \quad (3.20)$$

Denklem (3.20) ve $\vec{m}_i$, Denklem (3.19)'da yerine konulursa;

$$(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i = d_i |\vec{s}_i| \quad (3.21)$$

$$\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{s}_i \right) \cdot \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{s}_i \right) = d_i^2 \left(|\vec{s}_i| \right)^2 \quad (3.22)$$

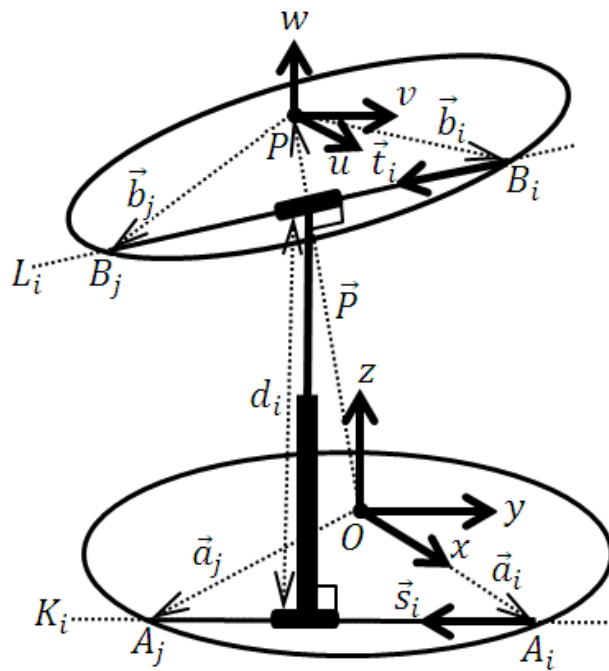
Denklem (3.23)'de yer alan $\vec{s}_i$ birim vektörünün normunun karesi 1'e eşittir. Sonuç olarak d_i için aşağıdaki ifade yazılabilir;

$$d_i^2 = \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) \cdot \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) \quad (3.23)$$

Elde edilen bu denklem mekanizmadan bağımsız olmak üzere D_3 tipi kısıt içeren herhangi bir GSP de ilgili bacağın ters kinematik denklemi olarak kullanılabilecektir.

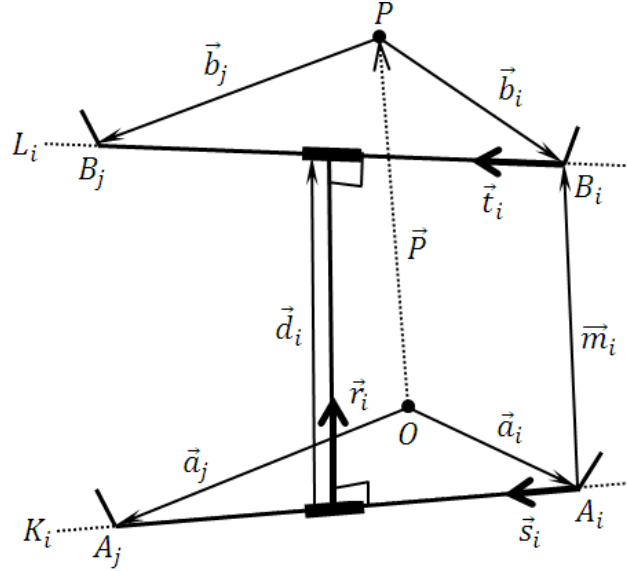
3.3.4. D₄ tipi kısıt için ters kinematik denklemleri

D₄ tipi kısıt her iki çerçeve üzerinde yer alan iki doğru arasında uzaklık oluşturmak için tanımlanmıştır. İkinci bölümde bu kısıtı sağlamak için Silindirik- Silindirik-Silindirik (CCC) bacak yapısı önerilmişti. Bu yapıda aktif eklem ortada yer alan silindirik eklemin öteleme yapan kısmıdır. Bu eklemin dönme yapan diğer kısmı ile diğer eklemler pasiftirler. Bu bacak yapısının temel ve uç işlevci çerçeveleri ile olan bağlantısı için örnek bir çizim Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. CCC tipi bacak ve bağlantı şekli

Şekil üzerinde yer alan değişkenler daha önce verilen Şekiller 3.5 ve 3.7’de tanımlanmıştı. CCC tipi bacak sırasıyla temel çerçeveye ve uç işlevci çerçevesi üzerinde bulunan K_i ve L_i doğrularına pasif silindirik eklemler ile bağlanmıştır. CCC bacak yapısı için D_4 kısıtına göre ters kinematik denklemi yazabilmek için Şekil 3.10’daki basit çizim kullanılabilir.



Şekil 3.10. CCC bacak yapısı

Şekil 3.10’da verilen $\vec{r}_i$ vektörü bacak boyunca uzanan bir vektördür. Bu vektör K_i ve L_i doğruları kullanılarak tanımlanabilir. Şöyleki, iki doğrunun ortak dikmesi her iki doğruda aynı anda dik olan bir vektördür. Bu vektör, basitçe bu iki doğruya paralel birim vektörlerin çapraz çarpımı ile bulunabilir. CCC tipi bacak yapısı gereği aynı anda hem K_i hem de L_i doğrularına diktir. Buna göre $\vec{r}_i$ vektörü aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\vec{r}_i = R\vec{t}_i \times \vec{s}_i \quad (3.24)$$

Şekil 3.10 da yer alan $\vec{m}_i$ vektörü de şu şekilde yazılabilir;

$$\vec{m}_i = \vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \quad (3.25)$$

d_i uzunluğunu bulmak için Şekil 3.10’da yer alan $\vec{d}_i$ vektörü ile $\vec{m}_i$ vektörü kullanılabilir. Buna göre d_i uzunluğu hem $\vec{d}_i$ vektörünün hem de $\vec{m}_i$ vektörünün

ortak dikme üzerine olan iz düşümlerine eşittir. Buradan Denklem (3.26)'daki gibi bir eşitlik yazılabilir. Denklem 3.26'da noktasal çarpımın özelliğinden faydalanılmıştır. İki vektörün noktasal çarpımı bu iki vektörden birinin diğerinin yönünde olan izdüşümüdür. Denklem (3.26)'nın her iki tarafının karesi alınır ve $\vec{m}_i$ ve $\vec{r}_i$ bu denklemde yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir.

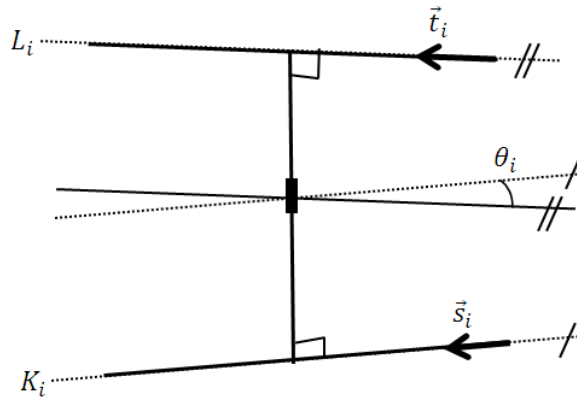
$$\vec{d}_i \cdot \vec{r}_i = \vec{m}_i \cdot \vec{r}_i \quad (3.26)$$

$$d_i^2 (\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i) \cdot (\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i) = \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i) \right)^2 \quad (3.27)$$

Denklem (3.27) mekanizmadan bağımsız olmak üzere D_4 tipi kısıt içeren herhangi bir GSP de ilgili bacağın ters kinematik denklemi olarak kullanılabilecektir.

3.3.5. A_1 tipi kısıt için ters kinematik denklemi

A_1 tipi kısıt her iki çerçeve üzerinde yer alan iki doğru arasında açısal kısıt oluşturmak için tanımlanmıştır. İkinci bölümde bu kısıtı sağlamak için Silindirik-Silindirik- Silindirik (CCC) bacak yapısı önerilmişti. Bu yapı bir önceki bölümde D_4 tipi kısıt için sunulan yapı ile aynıdır. Aralarındaki fark açısal kısıt oluşturmak için aktif eklem olarak ortada yer alan silindirik eklemün dönme hareketi sağlayan kısmının seçilmesidir. Bu eklemün öteleme yapan kısmı ile diğer eklemler pasiftirler. Bu bacak yapısının temel ve uç işlevci çerçeveleri ile olan bağlantısı için örnek bir çizim Şekil 3.9'da verildiği için tekrar olmaması açısından burada verilmemiştir. Ters kinematik denklemi yazmak için Şekil 3.10'un sadece açısal kısıtı gösteren hali aşağıdaki basit çizimde sunulmuştur.



Şekil 3.11. CCC bacak açısal kısıt gösterimi

Şekilde θ_i , K_i ve L_i doğruları arasındaki açıdır. Bu açı aynı zamanda bu iki doğruya paralel birim vektörler olan $\vec{s}_i$ ve $\vec{t}_i$ arasındaki açıdır. Bu açının bulunması A_1 tipi açısal kısıt ters kinematik denkleminin çözümü demektir. Bu amaçla ilk olarak aynı koordinat sistemine göre işlem yapabilmek adına P koordinat sistemine göre tanımlı olan $\vec{t}_i$ vektörünü O koordinat sistemine göre tanımlamak gerekir. Bunun için bu vektörü iki koordinat sistemi arasındaki yönelim matrisi R ile çarpmak yeterlidir. Bu durumda aranan açı $R\vec{t}_i$ birim vektörü ile $\vec{s}_i$ birim vektörü arasındaki açı olacaktır. Noktasal çarpım formülü iki birim vektör arasındaki açıyı verecek şekilde yazılabilir. Buna göre $R\vec{t}_i$ ile $\vec{s}_i$ vektörleri noktasal çarpıma tabi tutulursa bu iki vektör arasındaki açı aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\cos \theta_i = R\vec{t}_i \cdot \vec{s}_i \quad (3.28)$$

Denklem (3.28) mekanizmadan bağımsız olmak üzere A_1 tipi kısıt içeren herhangi bir GSP de ilgili bacağın ters kinematik denklemi olarak kullanılabilecektir.

3.4. Jacobian Matrisi

Bu tez çalışmasında incelenen GSP mekanizmalarının 6 SD'ni sağlamaları için bu mekanizmalar yine 6 kısıt kullanılarak tanımlanmışlardır. Kullanılan 6 kısıt bir GSP mekanizması için 6 tane ters kinematik denklemin çözülmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla herhangi bir GSP mekanizmasının Jacobian matrisi de bu 6 denklemin zamana göre birinci türevleri alınarak bulunabilir. 6 ayrı denklemin herbirinin türevi mekanizmanın Jacobian matrisinin bir satırını oluşturacaktır. Her bir ters kinematik denklem türevi, ait olduğu bacağın parametreleri ile mekanizmanın uç işlevcisinin açısal ve doğrusal hızları arasındaki ilişkiyi ifade edecektir. Sonuç olarak GSP mekanizmalarının genel Jacobian matrisi için aşağıdaki ifade yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} \dot{k}_1 \\ \vdots \\ \dot{k}_6 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} v_p \\ \omega_p \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Denklemde, $\dot{k}_1 \dots \dot{k}_6$ GSP mekanizmasının tanımında kullanılmış kısıtların hız değişkenlerini 1'den 6'ya kadar temsil ederken v_p ve ω_p ise mekanizmanın uç

işlevcisinin, sırasıyla doğrusal ve açısal hızlarıdır. v_p ve ω_p 3x1 boyutunda vektörlerdir. Son olarak J , GSP mekanizmasının 6x6 boyutunda Jacobian matrisidir. İlerleyen bölümlerde her bir kısıt denklemlerinin zamana göre türevleri alınmış ve elde edilen bu türev ifadeleri uç işlevcinin açısal ve doğrusal hız değişkenlerine göre yeniden düzenlenmiştir. Böylece bu denklemler herhangi bir GSP mekanizmasının Jacobian matrisini oluştururken kullanılabilecek yapıda sunulmuştur.

3.4.1. D₁ tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi

D₁ tipi kısıt için ters kinematik ifadesi Denklem (3.7)'de verilmişti. Bu denklem için zamana göre türev ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{d}{dt}(d_i^2) = \frac{d}{dt}((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)) \quad (3.30)$$

Türev alma işlemi Ek A'da verilen kurallara uygun olarak yapılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$2d_i\dot{d}_i = 2 \frac{d}{dt}((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)) \cdot (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \quad (3.31)$$

Denklemde değişken üzerinde nokta olması o değişken için birinci türev anlamındadır. Ayrıca $\frac{d}{dt}(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) = (\omega_p \times R\vec{b}_i + v_p)$ 'dir [30]. Bu ifade denklemde yerine konur ve denklem yeniden düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\dot{d}_i = \frac{1}{d_i}(\omega_p \times R\vec{b}_i + v_p) \cdot (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \quad (3.32)$$

Elde edilen denklem Jacobian matrisine uygun olarak yazılmalıdır. Buna göre ilk olarak denklem şu şekilde yazılabilir;

$$\dot{d}_i = \frac{1}{d_i}[(\omega_p \times R\vec{b}_i) \cdot (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) + v_p \cdot (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)] \quad (3.33)$$

Denklemde yer alan $(\omega_p \times R\vec{b}_i) \cdot (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)$ ifadesi noktasal çarpımın değişme özelliği kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$(\omega_p \times R\vec{b}_i) \cdot (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) = (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (\omega_p \times R\vec{b}_i) \quad (3.34)$$

Ek A 6. madde de verilen $A \cdot (B \times C) = B \cdot (C \times A)$ eşitliği bu ifade için yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (\omega_p \times R\vec{b}_i) = \omega_p \cdot (R\vec{b}_i \times (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)) \quad (3.35)$$

Sonuç olarak Denklem (3.35) yeniden düzenlenirse D_1 tipi kısıt için bütün GSP mekanizmalarında kullanılabilecek hız ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{d}_i = \frac{1}{d_i} \left[(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot v_p + (R\vec{b}_i \times (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)) \cdot \omega_p \right] \quad (3.36)$$

Bu hız ifadesi bir GSP mekanizmasının Jacobian matrisinde kullanılmak istendiğinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{d}_i = J_{D_1} \begin{bmatrix} v_p \\ \omega_p \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Denklemde J_{D_1} , D_1 tipi kısıt içiren GSP mekanizmalarının Jacobian matrisine, bu kısıtı kullanan bacak için eklenecek olan 1x6 lık bir vektördür. Denklem (3.33)'de verilen bu vektörün ilk 3 elemanı doğrusal hız çarpanları diğer 3 eleman ise açısal hız çarpanlarıdır.

$$J_{D_1} = \frac{1}{d_i} \left[(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)^T (R\vec{b}_i \times (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i))^T \right] \quad (3.38)$$

Denklemde T vektör transpozunu ifade etmektedir.

3.4.2. D_2 tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi

D_2 tip kısıt için ters kinematik ifadesi Denklem (3.15)'te verilmişti. Bu denklem için zamana göre türev ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{d}{dt}(d_i^2) = \frac{d}{dt} \left(((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times R\vec{t}_i) \cdot ((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times R\vec{t}_i) \right) \quad (3.39)$$

Bu denklemin türev alınması, sadeleştirilmesi ve doğrusal ve açısal hız ifadelerinin çarpanları şeklinde yazılması için gereken işlemler Ek A daki kurallara gerçekleştirilmiştir. Buna göre ilk olarak Denklem (3.39) aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$2d_i \dot{d}_i = 2 \left(\frac{d}{dt} \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times R\vec{t}_i \right) \right) \cdot \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times R\vec{t}_i \right) \quad (3.40)$$

Bu denklem yer alan $\frac{d}{dt} \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times R\vec{t}_i \right)$ ifadesi şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned} & \left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \frac{d}{dt} (R\vec{t}_i) + \frac{d}{dt} \left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times R\vec{t}_i \\ &= \left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times (\omega_p \times R\vec{t}_i) + (\mathbf{v}_p + \omega_p \times R\vec{b}_i) \times R\vec{t}_i \end{aligned} \quad (3.41)$$

Denklemde $\frac{d}{dt} (R\vec{t}_i) = (\omega_p \times R\vec{t}_i)$ 'dir. $\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times (\omega_p \times R\vec{t}_i)$ ifadesi Ek A 3. maddede verilen $(A \times (B \times C)) = B(A \cdot C) - C(A \cdot B)$ eşitliğine göre aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times (\omega_p \times R\vec{t}_i) = \omega_p \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot R\vec{t}_i \right) - R\vec{t}_i \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \omega_p \right) \quad (3.42)$$

Denklem 3.42'de yer alan $(\mathbf{v}_p + \omega_p \times R\vec{b}_i) \times R\vec{t}_i$ ifadesi de aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned} & (\mathbf{v}_p + \omega_p \times R\vec{b}_i) \times R\vec{t}_i = -R\vec{t}_i \times (\mathbf{v}_p + \omega_p \times R\vec{b}_i) = -R\vec{t}_i \times (\omega_p \times R\vec{b}_i) + \mathbf{v}_p \times R\vec{t}_i \\ &= -\left(\omega_p \left(R\vec{t}_i \cdot R\vec{b}_i \right) - R\vec{b}_i \left(R\vec{t}_i \cdot \omega_p \right) \right) + \mathbf{v}_p \times R\vec{t}_i \end{aligned} \quad (3.43)$$

Bulunan bu ifadeler Denklem (3.41)'de yerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} & \left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times (\omega_p \times R\vec{t}_i) + (\mathbf{v}_p + \omega_p \times R\vec{b}_i) \times R\vec{t}_i = \omega_p \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot R\vec{t}_i \right) \\ & - R\vec{t}_i \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \omega_p \right) - \left(\omega_p \left(R\vec{t}_i \cdot R\vec{b}_i \right) - R\vec{b}_i \left(R\vec{t}_i \cdot \omega_p \right) \right) + \mathbf{v}_p \times R\vec{t}_i \end{aligned} \quad (3.44)$$

Denklem (3.43), Denklem (3.40)'da yerine konur ve noktasal çarpım işlemi dağıtılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\begin{aligned} & \omega_p \left(\left(\vec{P} - \vec{a}_i \right) \cdot \vec{Rt}_i \right) \cdot \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \\ &= \left(\left(\vec{P} - \vec{a}_i \right) \cdot \vec{Rt}_i \right) \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \cdot \omega_p \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$-R\vec{t}_i \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \omega_p \right) \cdot \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) = 0 \quad (3.46)$$

$$R\vec{b}_i \left(\vec{Rt}_i \cdot \omega_p \right) \cdot \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) = \left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \cdot R\vec{b}_i \right) \vec{Rt}_i \cdot \omega_p \quad (3.47)$$

$$\left(v_p \times \vec{Rt}_i \right) \cdot \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) = v_p \cdot \left(\vec{Rt}_i \times \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \right) \quad (3.48)$$

Sonuç olarak elde edilen tüm ifadeler açısal ve doğrusal hız değişkenlerinin çarpanları şeklinde yazılırsa D₂ tip kısıt için hız ifadesi bulunmuş olur.

$$\begin{aligned} \dot{d}_i &= \frac{1}{d_i} \left(\left(\vec{Rt}_i \times \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \right) \cdot v_p \right) \\ &+ \frac{1}{d_i} \left(\left(\left(\left(\vec{P} - \vec{a}_i \right) \cdot \vec{Rt}_i \right) \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \right) \cdot \omega_p \right) \\ &+ \frac{1}{d_i} \left(\left(\left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \cdot R\vec{b}_i \right) \vec{Rt}_i \right) \cdot \omega_p \right) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Denklem (3.49) D₂ tipi kısıt için bütün GSP mekanizmalarında kullanılabilecek hız ifadesidir. Bu ifade kullanılarak J_{D₂} ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$J_{D_2} = \frac{1}{d_i} \begin{bmatrix} K_{v_p} & K_{\omega_{p1}} + K_{\omega_{p2}} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Denklemde yer alan değişkenler şu şekilde elde edilir.

$$K_{v_p} = \left(\vec{Rt}_i \times \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \right)^T \quad (3.51)$$

$$K_{\omega_{p1}} = \left(\left(\left(\vec{P} - \vec{a}_i \right) \cdot \vec{Rt}_i \right) \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \right)^T \quad (3.52)$$

$$K_{\omega_{p2}} = \left(\left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{Rt}_i \right) \cdot R\vec{b}_i \right) \vec{Rt}_i \right)^T \quad (3.53)$$

3.4.3. D₃ tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi

D₃ tip kısıt için ters kinematik ifadesi Denklem (3.23)'de verilmişti. Bu denklem için zamana göre türev ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{d}{dt}(d_i^2) = \frac{d}{dt} \left(\left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) \cdot \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) \right) \quad (3.54)$$

Denklem (3.40) aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$2d_i\dot{d}_i = 2 \left(\frac{d}{dt} \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) \cdot \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) \right) \quad (3.55)$$

Denklem (3.41)'de yer alan $\frac{d}{dt} \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right)$ ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{d}{dt} \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) = (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \frac{d}{dt} \vec{s}_i + \frac{d}{dt} (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i$$

Yukarıdaki ifade de $\frac{d}{dt} \vec{s}_i = 0$ 'dır. Bunun nedeni $\vec{s}_i$ 'nin sabit bir birim vektör

olmasıdır. Buna göre $\frac{d}{dt} \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right)$ tekrar şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{d}{dt} \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) = (\omega_p \times R\vec{b}_i + \mathbf{v}_p) \times \vec{s}_i$$

Elde edilen bu ifade Denklem (3.41)'de yerine konursa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\dot{d}_i = \frac{1}{d_i} \left(\left((\omega_p \times R\vec{b}_i + \mathbf{v}_p) \times \vec{s}_i \right) \cdot \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) \right) \quad (3.56)$$

Denklem (3.42)'de noktasal çarpım ifadesi dağıtılır ve gereken sadeleştirme işlemleri Ek A daki kurallara göre yapılırsa D₃ tip kısıt için hız ifadesi bulunmuş olur.

$$\begin{aligned} \dot{d}_i &= \frac{1}{d_i} \left(\left(\vec{s}_i \times \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) \right) \cdot \mathbf{v}_p \right) \\ &+ \frac{1}{d_i} \left(\left(\left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \times \vec{s}_i \right) \times \vec{s}_i \right) \times R\vec{b}_i \right) \cdot \omega_p \end{aligned} \quad (3.57)$$

Denklem (3.43) D₃ tipi kısıt için bütün GSP mekanizmalarında kullanılabilecek hız ifadesidir. Denkleme göre J_{D₃} ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$J_{D_3} = \frac{1}{d_i} \begin{bmatrix} K_{v_p} & K_{\omega_p} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Denklemdede yer alan değişkenler şu şekilde elde edilir.

$$K_{v_p} = \left(\vec{s}_i \times \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{s}_i \right) \right)^T \quad (3.59)$$

$$K_{\omega_p} = \left(\left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \times \vec{s}_i \right) \times \vec{s}_i \right) \times R\vec{b}_i \right)^T \quad (3.60)$$

3.4.4. D₄ tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi

D₄ tip kısıt için ters kinematik ifadesi Denklem (3.27)'de verilmişti. Bu denklem için zamana göre türev ifadesi oldukça yoğun işlem yükü gerektirdiği için basitlik açısından aşağıdaki tanımlamalar yapılabilir;

$$\begin{aligned} M_i &= (R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) \\ Q_i &= (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \end{aligned} \quad (3.61)$$

Bu tanımlamalara göre Denklem (3.27) yeniden şu şekilde yazılabilir;

$$d_i^2 M_i \cdot M_i = (Q_i \cdot M_i)^2 \quad (3.62)$$

Denklem (3.62)'nin zamana göre türevi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$2d_i \dot{d}_i (M_i \cdot M_i) + 2d_i^2 (\dot{M}_i \cdot M_i) = 2(Q_i \cdot M_i)(Q_i \cdot \dot{M}_i + \dot{Q}_i \cdot M_i) \quad (3.63)$$

Denklem (3.63)'den $\dot{d}_i$ aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\dot{d}_i = \frac{(Q_i \cdot M_i)(Q_i \cdot \dot{M}_i + \dot{Q}_i \cdot M_i) - d_i^2 (\dot{M}_i \cdot M_i)}{d_i (M_i \cdot M_i)} \quad (3.64)$$

Denklem (3.64)'de yer alan $\dot{M}_i$ ve $\dot{Q}_i$ ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned}\dot{M}_i &= \omega_p \left(-\vec{s}_i \cdot \vec{Rt}_i \right) + \vec{Rt}_i \left(\vec{s}_i \cdot \omega_p \right) \\ \dot{Q}_i &= \left(v_p + \omega_p \times R\vec{b}_i \right)\end{aligned}\quad (3.65)$$

Bu ifadeler kullanılarak Denklem (3.64)'ün payı aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned}(Q_i \cdot M_i) & \left(Q_i \cdot \dot{M}_i + \dot{Q}_i \cdot M_i \right) - d_i^2 \left(\dot{M}_i \cdot M_i \right) = \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \right) \\ & \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \left(-\omega_p \left(\vec{s}_i \cdot \vec{Rt}_i \right) + \vec{Rt}_i \left(\vec{s}_i \cdot \omega_p \right) \right) + \left(\omega_p \times R\vec{b}_i + v_p \right) \cdot \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \right) \\ & - d_i^2 \left(\left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \cdot \left(\omega_p \left(-\vec{s}_i \cdot \vec{Rt}_i \right) + \vec{Rt}_i \left(\vec{s}_i \cdot \omega_p \right) \right) \right) \\ & - d_i^2 \left(\left(-\vec{s}_i \cdot \vec{Rt}_i \right) \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) + \left(\left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \cdot \vec{Rt}_i \right) \vec{s}_i \right) \cdot \omega_p\end{aligned}\quad (3.66)$$

Denklem (3.64)'ün paydası da aşağıdaki gibi elde edilir;

$$d_i \left(\left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \cdot \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \right) \quad (3.67)$$

Bulunan bu ifadeler açısal ve doğrusal hız değişkenlerinin çarpanları olacak şekilde aşağıdaki gibi yazılabilirler.

$$m_i = d_i \left(\left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \cdot \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \right) \quad (3.68)$$

$$k_i = \left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \right) \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \right) \cdot v_p \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned}c_i &= \left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \right) \left(\left(R\vec{b}_i \cdot \vec{s}_i \right) \vec{Rt}_i - \left(R\vec{b}_i \cdot \vec{Rt}_i \right) \vec{s}_i \right) \right) \cdot \omega_p \\ &+ \left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \right) \left(\left(-\vec{s}_i \cdot \vec{Rt}_i \right) \left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \right) \right) \cdot \omega_p \\ &+ \left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \right) \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \cdot \vec{Rt}_i \right) \vec{s}_i \right) \cdot \omega_p\end{aligned}\quad (3.70)$$

$$g_i = \left(-d_i^2 \left(\left(-\vec{s}_i \cdot \vec{Rt}_i \right) \left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) + \left(\left(\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i \right) \cdot \vec{Rt}_i \right) \vec{s}_i \right) \right) \cdot \omega_p \quad (3.71)$$

Son olarak bu ifadeler Denklem (3.64)'de yerine yazılarak D_4 tipi kısıt için bütün GSP mekanizmalarında kullanılabilecek hız ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{d}_i = \frac{k_i + c_i + g_i}{m_i} \quad (3.72)$$

Denklem (3.72)'ye göre J_{D_4} ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$J_{D_4} = \frac{1}{m_i} [K_i^T C_i^T + G_i^T] \quad (3.73)$$

Denklemde yer alan değişkenler şu şekilde elde edilir.

$$K_i = \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) \right) (R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) \quad (3.74)$$

$$\begin{aligned} C_i = & \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) \right) \left((R\vec{b}_i \cdot \vec{s}_i) R\vec{t}_i - (R\vec{b}_i \cdot R\vec{t}_i) \vec{s}_i \right) \\ & + \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) \right) \left((-\vec{s}_i \cdot R\vec{t}_i) (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \right) \\ & + \left((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) \right) \left(((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot R\vec{t}_i) \vec{s}_i \right) \end{aligned} \quad (3.75)$$

$$G_i = -d_i^2 \left((-\vec{s}_i \cdot R\vec{t}_i) (R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) + ((R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) \cdot R\vec{t}_i) \vec{s}_i \right) \quad (3.76)$$

3.4.5. A₁ tipi kısıt için hız değişkeninin elde edilmesi

A₁ tip kısıt için ters kinematik ifadesi Denklem (3.28)'de verilmişti. Bu denklem için zamana göre türev ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d}{dt}(\cos \theta_i) = \frac{d}{dt}(R\vec{t}_i \cdot \vec{s}_i) \quad (3.77)$$

Denklem (3.77)'de yer alan türev alma işlemi şu şekilde gerçekleştirilebilir;

$$-\dot{\theta}_i \sin \theta_i = (\omega_p \times R\vec{t}_i) \cdot \vec{s}_i = \omega_p \cdot (R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) \quad (3.78)$$

Bu ifadeden A₁ tipi kısıt için bütün GSP mekanizmalarında kullanılabilecek hız ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{\theta}_i = -\frac{(R\vec{t}_i \times \vec{s}_i) \cdot \omega_p}{\sin \theta_i} \quad (3.79)$$

Denkleme göre J_{A_1} ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$J_{A_1} = -\frac{1}{\sin \theta_i} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ R\vec{t}_i \times \vec{s}_i \end{bmatrix}^T \quad (3.80)$$

3.4.6. Jacobian matrisinin oluşturulması

GSP mekanizmaları tanımlanırken her bir SD için bir kısıt tanımlanacağı belirtilmişti. Buna göre herhangi bir GSP mekanizmasının Jacobian matrisi oluşturulurken mekanizmanın kısıt yapısına göre yukarıda verilen Jacobian satırları biraraya getirilir. Örneğin $D_1^4 D_3 A_1$ yapıdaki bir GSP mekanizması için Jacobian matrisi oluşturulurken J_{D_1} , J_{D_3} ve J_{A_1} ifadeleri Denklem (3.81)'deki gibi birleştirilir. Bu vektörler birleştirilirken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta bu vektörler yazılırken ilgili bacağın indisine göre yazılmalarıdır. Örneğin, birinci bacak için J_{D_1} yazılacaksa J_{D_1} ifadesindeki “i” indisi yerine 1 alınmalıdır. Denklem (3.81)'de elde edilen Jacobian matrisi $D_1^4 D_3 A_1$ tipi herhangi bir GSP mekanizmasının Jacobian matrisi olarak kullanılabilir.

$$J = \begin{bmatrix} J_{D_1} \\ J_{D_1} \\ J_{D_1} \\ J_{D_1} \\ J_{D_3} \\ J_{A_1} \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

3.5. Sonuçlar

Bu bölümde GSP mekanizmaları için ilk önce SD hesabı yapılmış ve Gao ve diğ. [1]'nde kullanılan ve bu tez çalışmasında da esas alınan geometrik kısıt temelli SD hesabı ile Grübler formülü yöntemleri karşılaştırılmıştır. Üç farklı GSP mekanizması için SD hesabı her iki yöntemle de gerçekleştirilmiş ve aynı oldukları gösterilmiştir. Bu bölümde ayrıca GSP mekanizmalarının ters kinematik denklemleri her bir kısıt tipi için vektörel yaklaşımla elde edilmiştir. Elde edilen denklemler mekanizmanın temel ve uç işlevci çerçeveleri üzerinde rastgele seçilen nokta ve doğru geometrik

nesneleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu nedenle mekanizmadan bağımsız denklemlerdir. Bu denklemler ilgili kısıtın kullanıldığı tüm GSP ler için kullanılabileceklerdir. Son olarak bu bölümde yine kısıt tipine göre ayrı ayrı olmak üzere mekanizmaların Jacobian matrisinin oluşturulmasını sağlayacak olan hız denklemleri ve Jacobian matrisi satırları elde edilmiştir. Örnek bir GSP mekanizması için Jacobian matrisi oluşturulmuştur. Bir sonraki bölümde GSP mekanizmaları için bu tez çalışmasında gerçekleştirilen geometrik eniyileme işlemleri detayları ile sunulmuştur. Ayrıca matematiksel olarak bu tez çalışmasında sunulan bütün GSP mekanizmalarını örnekleyecek iki farklı simetrik olmayan GSP mekanizması için geometrik eniyileme gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, tablolar ve grafikler ile sunulmuştur.

4. GSP MEKANİZMALARININ GEOMETRİK ENİYİLEMESİ

4.1. Giriş

Paralel robot mekanizmaları için gerçekleştirilen bütün performans ölçümleri bu mekanizmaların sahip oldukları yapısal özelliklerle yakından ilişkilidir. Yeni bir paralel robot mekanizmasının tasarımı hedeflendiğinde, ilk olarak bu mekanizma için tasarım amacını sağlayabilecek bir yapı belirlenmelidir. Belirlenecek yapısal parametreler tasarım amacına göre değişmekle birlikte çoğunlukla mekanizmanın temel ve uç işlevci çerçevelerinin boyutsal özelliklerini (örneğin dairesel bir çerçeve için yarıçap), mekanizma bacaklarının bu çerçevelerle olan bağlantı noktalarının konumunu, aktif ve pasif eklem parametreleri gibi parametreleri içermektedir. Örnek çalışmalar [48-50]'de yer almaktadır. Bu parametrelerin mümkün olan en iyi şekilde belirlenebilmesi, seçilecek performans ölçüm kriterleri ile yakından ilişkilidir. Literatürde performans ölçümü ile ilgili birçok çalışma yer almaktadır. Literatür tarama kısmında da sunulduğu gibi araştırmacılar bir paralel robot mekanizmasının performansını değerlendirmek için çoğunlukla iki temel parametre kullanmışlardır. Bunlar Jacobian matrisinin durum sayısı ve dextrous çalışma uzayıdır. Jacobian matrisi bir paralel robot mekanizmasının bacakları ile uç işlevcisi arasındaki hız ilişkilerini ifade eder. Bununla birlikte özellikle uzamsal paralel robot mekanizmalarının Jacobian matrislerinin satırları arasında birim uyumsuzluğu ortaya çıkmaktadır. Araştırmacılar bu problemi ortadan kaldırmak için karakteristik uzunluk [85] ve “weighting factor” metodu [88, 89] gibi farklı yöntemler geliştirmişlerdir. Dexterous çalışma uzayı ise mekanizmanın belirli kinematik özelliklere sahip olarak ulaşabildiği çalışmaya uzayıdır. Bazı yazarlar mekanizmanın uç işlevcisinin muhtemel bütün yönelimlerle erişebildiği çalışma uzayı için bu tanımları kullanmışlardır [51]. Ancak bu tanım bazı yazarlar tarafından ise belirli bir dexterity seviyesinde (örneğin Jacobian matrisinin durum sayısı için belirli bir aralık) ulaşılabilen noktaları ifade etmek için kullanmıştır [89]. Bu bölümde GSP mekanizmalarının geometrik eniyilemesi üzerinde durulmuştur. Bu amaçla ilk olarak GSP mekanizmalarının performans ölçümünün sağlanabilmesi için gereken işlemler

gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin ilki Jacobian matrislerinin homojen hale getirilmesidir. Bu amaçla herbir kısıt için bir önceki bölümde sunulan hız ifadelerinin “birim” leri belirlenmiştir. Ardından homojen hale getirilen Jacobian matrisi kullanılarak Jacobian matrisinin durum sayısı ve bu sayı kullanılarak elde edilen bölgesel durum endeksi (LCI) tanımlanmıştır. Durum sayısı ve LCI bu doktora tez çalışmasında dexterous çalışma uzayının hesaplanması amacıyla kullanılmıştır. GSP mekanizmalarının geometrik sınırlamalarının nasıl belirleneceğinin tartışılması bu bölümün ikinci temel amacıdır. Bunun için ilk olarak bir önceki bölümde önerilen her bir bacak yapısı için kullanılan eklem yapıları ve bu eklemlerin sınırlarının nasıl hesaplanacağı üzerinde durulmuştur. Ayrıca eklem yapıları dışında mekanizmaların diğer yapısal özellikleri (örneğin çerçeve yarıçapı) ve bu özelliklerin GSP’ler açısından bu doktora tez çalışmasında nasıl tanımlanacağı tartışılmıştır. Bu bölümde üçüncü olarak eniyileme algoritması olarak PSO algoritması tanıtılmış ve bu algoritma kullanılarak iki farklı GSP mekanizmasının geometrik en iyilemesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar şekiller, grafikler ve tablolar ile sunulmuştur.

4.2. Homojen Jacobian Matrisi

Homojen Jacobian matrisi kavramı, Jacobian matrisinin elemanları arasında birim uyumluluğunun sağlanması amacıyla ortaya çıkmış bir kavramdır. Homojen Jacobian matrisinin sağlanması amacıyla ilk olarak Zanganeh ve Angeles [84] tarafından Jacobian matrisinin birim dereceleri yüksek olan elemanları karakteristik uzunluk olarak tanımlanan bir uzunluk ile bölünmüştür. Bu yaklaşım diğer bazı yazarlar tarafından da kullanılmıştır [85-87]. Homojen Jacobian matrisi sağlamanın diğer bir yöntemi Hosseini ve Daniali [88] tarafından önerilmiştir. Yazarlar çalışmalarında karakteristik uzunluk yerine “weighting factor” ismini verdikleri uzunluk değerini rastgele seçmişlerdir. Bu yaklaşım [89]’da da kullanılmıştır. Bu doktora tez çalışmasında Jacobian matrisinin homojen hale getirilmesi için “weighting factor” metodu kullanılmıştır. Ancak karakteristik uzunluğun rastgele seçilmesi yerine bu parametrenin de eniyileme sürecine dâhil edilmesi sağlanmış ve bu konu verilen ilk GSP mekanizması örneğinde tartışılmıştır. İlerleyen alt bölümlerde sırasıyla bütün kısıt tipleri için üçüncü bölümde elde edilen hız ifadelerinin birimleri tespit edilmiş ve buna göre hangi elemanların homojen hale getirilmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

D₁ tipi kısıt için birim tespiti: D₁ tipi kısıt için elde edilen Jacobian matrisi satırı üçüncü bölüm Denklem (3.38)'de elde edilmişti. Bu denklemde yer alan ifadenin birim tespitinin yapılabilmesi için ön kabul olarak konum ifadelerinin biriminin “m” (metre) olduğu varsayılmıştır. Buna göre denklemde yer alan $(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)$ ifadesinde konum bildiren $\vec{P}$, $\vec{b}_i$ ve $\vec{a}_i$ vektörlerinin birimi m'dir. Bu ifade de yer alan yönelim matrisi R ise birimsizdir. Bunun nedeni R 'nin trigonometrik fonksiyonlardan oluşmasıdır. Trigonometrik fonksiyonlar oran belirtirler. Dolayısıyla trigonometrik fonksiyonların birimi yoktur. Sonuç olarak $(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)$ ifadesinin birimi m olarak bulunur; ancak denklemde çarpan olarak yer alan $1/d_i$ ifadesinde yer alan d_i 'de uzunluk belirtir ve birimi m'dir. Sonuç olarak $(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)$ ifadesi için m/m şeklinde bir birim oluşur ki bu da bu ifadenin birimsiz olduğunu gösterir. Benzer şekilde $(R\vec{b}_i \times (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i))$ ifadesinde yer alan $R\vec{b}_i$ ile $(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)$ 'nin birimleri de m'dir. Bu iki ifadenin çapraz çarpımı ve çarpım sonucunun da $1/d_i$ ifadesi ile skaler çarpımı alındığı için $(R\vec{b}_i \times (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i))$ ifadesinin birimi m olur. Elde edilen sonuçlar bu doktora tez çalışmasında D₁ tipi kısıtın “birimsel vektörü” olarak isimlendirilen DJ_{D_1} ile aşağıdaki gibi gösterilebilir. Denklemde “0” ifadesi, J_{D_1} vektörünün o alanlardaki elemanlarının birimsiz olduğunu m ise ilgili alanlardaki elemanlarının birimlerinin m olduğunu gösterir.

$$DJ_{D_1} = [0 \ 0 \ 0 \ m \ m \ m] \quad (4.1)$$

D₂ tipi kısıt için birim tespiti: D₂ tipi kısıt için Jacobian matrisi satırı üçüncü bölümde Denklem (3.50)'de verildiği gibi elde edilmişti. Bu denkleme göre J_{D_2} 'de J_{D_1} 'den farklı olarak birim vektörler vardır. Birim vektörler de ait oldukları vektör veya koordinat sistemi için yön belirtirler. Dolayısıyla birimleri yoktur. Buna göre J_{D_2} için DJ_{D_2} ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$DJ_{D_2} = [0 \ 0 \ 0 \ m \ m \ m] \quad (4.2)$$

D_3 tipi kısıt için birim tespiti: D_3 tipi kısıt için Jacobian matrisi satırı üçüncü bölümde Denklem (3.58)'de verildiği gibi elde edilmişti. Bu denkleme göre J_{D_3} için DJ_{D_3} ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$DJ_{D_3} = [0 \ 0 \ 0 \ m \ m \ m] \quad (4.3)$$

D_4 tipi kısıt için birim tespiti: D_4 tipi kısıt için Jacobian matrisi satırı üçüncü bölümde Denklem (3.73)'de verilmişti. Denkleme göre J_{D_4} için DJ_{D_4} ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$DJ_{D_4} = [0 \ 0 \ 0 \ m \ m \ m] \quad (4.4)$$

A_1 tipi kısıt için birim tespiti: A_1 tipi kısıt için Jacobian matrisi satırı üçüncü bölümde Denklem (3.80)'deki gibi elde edilmişti. Denkleme göre J_{A_1} için DJ_{A_1} ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$DJ_{A_1} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (4.5)$$

Elde edilen sonuçlara göre D_1 , D_2 , D_3 ve D_4 kısıtları kullanılarak oluşturulacak Jacobian matrisinin ilgili satırlarında doğrusal ve açısal hızlar arasında birim uygunsuzluğu oluşacaktır. A_1 tipi kısıt kullanılan Jacobian matrislerinin ilgili satırlarında ise birim uygunsuzluğu oluşmayacaktır.

Homojen Jacobian matrisi oluşturulurken elde edilen 6x6 Jacobian matrisinin birim uyumsuzluğu olan elemanları seçilen karakteristik uzunluğa bölünür ve homojen Jacobian matrisi elde edilir. Örnek olarak üçüncü bölümde $D_1^4 D_3 A_1$ tipi GSP mekanizması için homojen Jacobian matrisinin elde edilmesi için ilk olarak bu mekanizma için birimsel Jacobian matrisi şu şekilde yazılır.

$$DJ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Denklem (4.6)'ya göre homojen Jacobian matrisini elde etmek için Denklem (3.81)'de elde edilen Jacobian matrisinin son 3 sütununun ilk 5 elemanı bir uzunluk değerine bölünmelidir. Buna göre $D_1^4 D_3 A_1$ tipi GSP mekanizması için homojen Jacobian matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$J_H = \begin{bmatrix} J_{D_1(1:3)} & \left(\frac{1}{L}\right) J_{D_1(4:6)} \\ J_{D_1(1:3)} & \left(\frac{1}{L}\right) J_{D_1(4:6)} \\ J_{D_1(1:3)} & \left(\frac{1}{L}\right) J_{D_1(4:6)} \\ J_{D_1(1:3)} & \left(\frac{1}{L}\right) J_{D_1(4:6)} \\ J_{D_3(1:3)} & \left(\frac{1}{L}\right) J_{D_3(4:6)} \\ J_{A_1(1:3)} & J_{A_1(4:6)} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Denklemde J_H , $D_1^4 D_3 A_1$ tipi GSP mekanizması için homojen Jacobian matrisi, (1:3) ve (4:6) ise sırasıyla ilgili vektörün ilk üç ve son üç elemanı ve son olarak L “weighting factor” metodu gereği kullanılan karakteristik uzunluktur.

Bir sonraki bölümde GSP mekanizmalarının performans analizi için bu doktora tez çalışmasında kullanılan parametreler tanımlanmıştır.

4.3. Dexterous Çalışma Uzayı

Paralel robot mekanizmaları için kullanılan performans ölçütleri arasında çalışma uzayı ve dexterity en önemli ve en çok kullanılan parametrelerdir [90,91]. Paralel robot mekanizmaları için farklı çalışma uzayları tanımlanmış olsa da ulaşılabilir çalışma uzayı ile dexterous çalışma uzayı mekanizma performans analizi için en çok kullanılan iki çalışma uzayıdır. Ulaşılabilir çalışma uzayı mekanizmanın uç işlevcisinin erişebildiği tekil noktalardan uzak tüm noktalardır. Dexterous çalışma uzayı ise mekanizmanın tamamı üzerinde belirli dexterity karakteristiğine sahip olduğu çalışma uzayı olarak ifade edilebilir. Dexterity [92]'de, robot mekanizmasının rastgele yönlerde kuvvet uygulama yeteneği olarak tanımlanmıştır.

Bu tez çalışmasında bir GSP mekanizmasının dexterous çalışma uzayını elde etmek için ilk olarak mekanizmanın ulaşılabilir çalışma uzayı hesaplanmıştır. Ardından

ulaşılabilir tüm noktalar için mekanizmanın o noktadaki homojen Jacobian matrisi kullanılarak durum sayısı ve LCI hesabı aşağıda verilen denklemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\kappa = \frac{\sigma_{eb}}{\sigma_{ek}} \quad (4.8)$$

$$LCI = \frac{1}{\kappa} \quad (4.9)$$

Denklemlerde σ_{eb} ve σ_{ek} homojen Jacobian matrisinin en buyk ve en küçük tekil değerleri, κ ise durum sayısıdır. LCI'nın 1 olduğu çalışma uzayı noktaları mekanizma için en iyi (best dexterous) noktalar olarak kabul edilir. Bu noktalarda mekanizma uç işlevcisi benzer hız karakteristikleri gösterir. LCI'nın 0'a yaklaştığı noktalar ise en kötü (less dexterous) noktalar olarak kabul edilir. Bu noktalarda uç işlevi çok yüksek hızlara erişebilir ve bu durum da mekanizma için problem teşkil edebilir.

Bu doktora tez çalışmasında LCI' ya ek olarak homojen Jacobian matrisinin σ_{ek} değeri de dexterous çalışma uzayının tespit edilmesi için kullanılmıştır. Buna göre bir ulaşılabilir çalışma uzayı noktasının bir dexterous çalışma uzayı noktası olduğunun söylenebilmesi için o nokta için hesaplanmış σ_{ek} değerinin aşağıdaki şartı sağlaması gerekir.

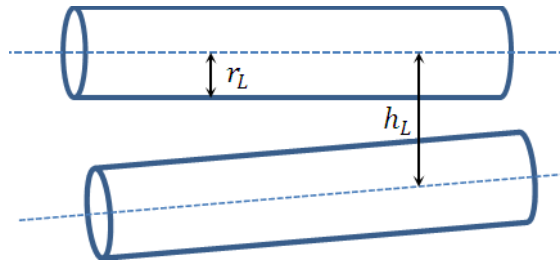
$$\sigma_{ek} > 0.2 \quad (4.10)$$

Bir paralel robot mekanizmasının ulaşabildiği bir noktanın dexterous çalışma uzayı noktası sayılabilmesi için sağlaması gereken diğer bir şart o noktanın bir tekil nokta olup olmadığının tespittir. Bir noktanın tekil nokta olup olmadığı en genel anlamda mekanizmanın o noktadaki homojen Jacobian matrisinin determinantı ile belirlenir [77]. Buna göre ulaşılabilir bir nokta için aşağıdaki şart sağlanıyorsa o nokta tekil değildir denir.

$$\det(J_H) > 0 \quad (4.11)$$

Son olarak bir paralel robot mekanizmasının dexterous çalışma uzayı hesaplanırken dikkate alınması gereken diğer önemli bir nokta bacak çarpışmalarıdır. Buna göre bir mekanizmanın matematiksel olarak bir noktaya erişebilmesi tek başına yeterli değildir. Bunun nedeni mekanizmanın matematiksel olarak sağlansa da bacak çarpışmaları nedeniyle fiziksel olarak bu noktaya erişemeyebileceğidir.

Bu doktora tez çalışmasında herhangi iki bacak arasında çarpışma olup olmadığı tespit edilirken bu iki bacağın merkezinden geçen doğru parçaları arasındaki en kısa uzunluğa bakılır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. İki bacak arasındaki uzaklık

İki bacak arasında çarpışma olup olmadığı hesaplanırken ilk olarak her iki bacağın merkezinden geçen doğru parçaları 100'er eşit parçaya bölünür ve herbir parça için bir nokta tanımlanır. Her iki bacağa ait bu noktalar arasındaki uzaklıklar hesaplanır ve eğer bu uzaklıkların tamamı belirli bir sınır değerinden büyük ise iki bacak arasında çarpışma olmadığına karar verilir. Buna göre $G_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$ ve $G_{2i}(x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$, $i = (1, 2, 3 \dots 100)$ iki bacak üzerinde iki nokta olmak üzere bu noktalar arasındaki uzaklık aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$h_{Li} = \sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2 + (z_{2i} - z_{1i})^2} \quad (4.12)$$

Denklemden h_{Li} iki bacak üzerinde tanımlanmış i . nokta çiftidir. Tüm nokta çiftleri için hesaplanan h_L değerleri aşağıdaki denklemi sağlıyorsa bu iki bacak arasında ilgili çalışma uzayı noktasında çarpışma olmadığına karar verilir. Denklemden r_L bacağı oluşturan silindirin yarıçapıdır.

$$h_L > 2r_L \quad (4.13)$$

Bu şekilde Denklemler (4.8), (4.9), (4.10), (4.11) ve (4.12)'yi sağlayan ulaşılabilir çalışma uzayı noktaları dexterous çalışma uzayı noktası kabul edilir. Bir sonraki bölümde GSP mekanizmaları için kullanılacak geometrik tasarım parametreleri tanımlanmıştır.

4.4. GSP Mekanizmalarının Geometrik Tasarım Parametreleri

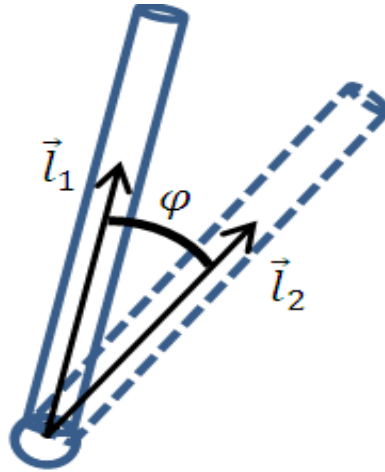
Geometrik tasarım parametreleri bir GSP'nin geometrik olarak nasıl bir yapıya sahip olacağını belirler. Bu parametreler mekanizmanın temel ve uç işlevci çerçeveleri için kullanılacak çerçeve yapıları (örneğin bir düzlem şeklinde çerçeveler mi kullanılacak), mekanizmanın bacak tipleri, her bir bacak için kullanılan eklemlerin aktif ve pasif parametreleri (örneğin küresel eklemlerin açısal sınırları) gibi parametrelerdir. Bu bölümde bütün bu tasarım parametreleri önceki bölümlerde sunulan bacak yapıları dikkate alınarak tanımlanacaktır.

Temel ve uç işlevci çerçeveleri: Literatürde yer alan 6 SD'ne sahip paralel robot mekanizmaları incelendiğinde önemli bir çoğunluğunun düzlem şeklinde platformlara sahip oldukları görülmektedir. Örneğin SP mekanizmasının temel ve uç işlevci çerçeveleri genellikle altıgen şeklinde tasarlanmaktadır. Bu tez çalışmasında sunulan GSP mekanizmaları için seçilebilecek muhtemel platform yapıları düzlem olabileceği gibi üç boyutlu bir platform da olabilir. GSP mekanizmaları için Platform yapısının seçiminde önemli olan mekanizmanın bacaklarının bağlanacağı geometrik nesneleri (doğru ve nokta) üzerinde uygun bir şekilde barındırabilecek bir yapının seçilmesidir. Örneğin eğer mekanizmanın aynı platformu üzerinde birden fazla doğru tanımlanacaksa bu doğruların birbirlerini kesmemesini sağlayacak bir platform tasarımı yapılmalıdır. Aynı durum "nokta" için de geçerlidir. Temel ve uç işlevci platformları üzerinde birden fazla "nokta" geometrik nesnesi tanımlanacaksa bu noktalara bağlanacak bacakların çapraz yerleşimine neden olacak bir tasarım mekanizmanın başlangıç pozisyonunda bile tekil noktalarda bulunmasına neden olabilecektir.

GSP bacak yapıları ve eklemler hareket sınırları: Bir GSP'nin bacak yapısı o bacak ile sağlanacak kısıtı sağladığı sürece herhangi bir şekilde olabilecektir. Örneğin [34]'te vida teorisini temel alan bacak tasarım yöntemi farklı bacak yapılarının tasarlanması için kullanılabilir. Bu tez çalışmasında literatürde en çok kullanılan eklemler

kullanılarak oluşturulan SPS, SPC, CPS ve CCC olmak üzere dört farklı bacak yapısı seçildi. Bu bacak yapıları ikinci bölümde çizimleri ile birlikte verilmiştir. Bacak yapısına karar verilirken seçilen eklemlerin hareket sınırları bacak tasarımı için en önemli parametrelerdir. Çünkü mekanizma bu sınırlar dahilinde hareket edebilecektir. Bu tez çalışmasında önerilen bacak yapıları için hem aktif hem pasif eklemlerin sınırları aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

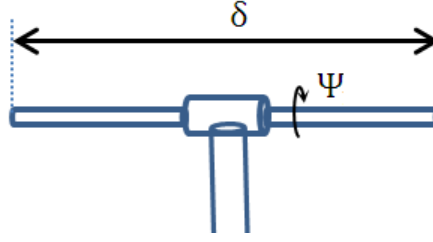
SPS bacak yapısı: Bu bacak yapısında yer alan prizmatik eklem aktif olan eklemdir ve sınırlarını kullanan silindir-piston ikilisinin uzama ve kısalma miktarı belirler. Küresel eklemler bu bacak yapısında yer alan pasif eklemlerdir. Bu tez çalışmasında küresel eklemler için sınırlar hesaplanırken bacağın başlangıç pozisyonu sonucu elde edilen bacak birim vektörü ile herhangi bir andaki bacak birim vektörü arasındaki açı hesaplanır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Küresel eklem sınırı

Şekilde $\vec{l}_1$ ve $\vec{l}_2$ bacağın başlangıç pozisyonu (home position) ile herhangi bir andaki pozisyonu sırasında oluşan bacak birim vektörleridir. Bu iki vektör arasındaki ϕ açısı küresel eklem için kullanılan pasif eklem değişkenidir. Bu açının küresel eklemlerin fiziksel sınırları dâhilinde olması gerekir.

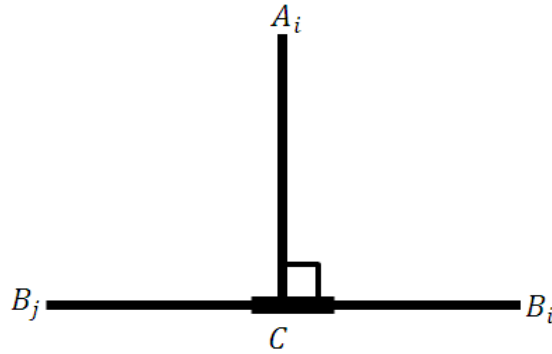
SPC bacak yapısı: Bu bacak yapısında da prizmatik eklem aktif olan eklemdir ve sınırları SPS bacak yapısında belirlendiği gibi tanımlanır. Aynı şekilde temel çerçeve tarafında yer alan küresel eklem için de Şekil 4.2 ve Denklem (4.9) ile özetlenen prosedür kullanılmaktadır. Uç işlevci çerçevesinde yer alan silindirik eklem için ise pasif eklem hareket sınırları Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Silindirik eklem sınırları

Silindirik eklem bir prizmatik ve bir dönel eklem aynı doğru üzerinde yerleştirilmesi ile oluşur. Şekilde Ψ açısı silindirik eklem dönel değişkenidir. Bu çalışmada silindirik eklem üzerinde yer aldığı doğru etrafında serbestçe dönebildiği kabul edilmiştir. Yani Ψ için herhangi bir sınır belirtilmemiştir. Bununla birlikte şekilde belirtilen δ uzunluğu silindirik eklem için çok önemli bir pasif eklem değişkenidir. Silindirik eklem üzerinde yer aldığı doğru parçası dışına çıkmaması gerekir. Dolayısıyla silindirik eklem doğru parçası üzerindeki konumu sürekli kontrol edilmelidir. Bu tez çalışmasında silindirik eklem doğru üzerindeki konumu aşağıdaki prosedürle tespit edilmiştir.

SPC yapıdaki bacağın temel çerçeve ve uç işlevci çerçeveleri ile bağlandığı noktaların koordinatları bilinmektedir. Bu bilinenler Şekil 4.4'teki gibi ifade edilebilir. Şekle göre temel çerçeve üzerinde yer alan küresel eklem bağlantı noktası O koordinat sistemine göre A_i dir. Uç işlevci çerçevesi üzerinde yer alan doğru parçasının başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatları ise aynı şekilde O koordinat sistemine göre B_i ve B_j dir. Ayrıca C noktası silindirik eklem ile prizmatik eklem bağlantı noktasıdır.



Şekil 4.4. Silindirik eklem konum tespiti

Silindirik eklem için δ değişkeninin bulunabilmesi için C noktasının koordinatlarının bulunması gerekir. Buna göre; $B_i = (x_1, y_1, z_1)$, $B_j = (x_2, y_2, z_2)$ ve $A_i = (x_3, y_3, z_3)$ alınırsa, C noktası B_i ve B_j noktaları ile aynı doğru üzerinde olduğundan bu iki noktadan geçen doğrunun parametrik denklemini sağlar. Yani C noktası için aşağıdaki ifade geçerlidir.

$$C = B_i + t(B_j - B_i) \quad (4.14)$$

Denklemde t , B_i ve B_j noktalarından geçen doğru denklemi için kullanılacak parametredir. B_i ve B_j noktalarından geçen doğru ile A_i ve C noktalarından geçen doğru silindirik eklem yapısı gereği birbirine dik olmalıdır. İki doğrunun birbirine dik olması şartı noktasal çarpımlarının sıfıra eşit olmasıdır. Buna göre aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$(B_j - B_i) \cdot (C - A_i) = 0 \quad (4.15)$$

Denklem (4.13), Denklem (4.14)'te yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir;

$$(B_j - B_i) \cdot (B_i - A_i) + tB_j - B_i^2 = 0$$

Denklemde t parametresi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$t = \frac{(B_j - B_i) \cdot (A_i - B_i)}{B_j - B_i^2} \quad (4.16)$$

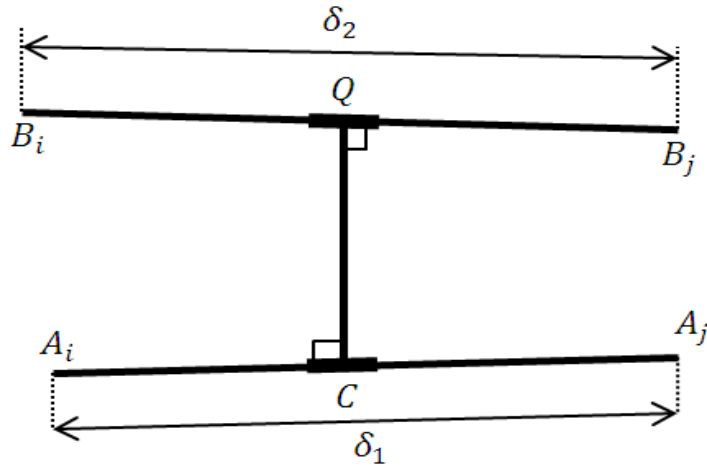
Denklem (4.15), Denklem (4.13)'de yerine konursa, C noktasının koordinatları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C = B_i + \left(\frac{(B_j - B_i) \cdot (A_i - B_i)}{B_j - B_i^2} \right) (B_j - B_i) \quad (4.17)$$

Sonuç olarak Denklem (4.16) ile elde edilen C noktasının B_i ve B_j noktaları arasında bulunması silindirik eklem için δ ile belirlenen sınırlar dahilinde kaldığını gösterir.

CPS bacak yapısı: Bu bacak yapısı SPC bacak yapısı ile aynı eklemlere sahiptir. Aynı şekilde prizmatik eklem aktif olan eklemdir. Aktif ve pasif eklemlerin sınırları yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanabilir.

CCC bacak yapısı: Bu bacak yapısı iki doğru arasında hem D_4 tipi uzaklık kısıtı hem de A_1 tipi açısal kısıt oluşturulmak istendiğinde kullanılır. Eğer D_4 tipi uzaklık kısıtı oluşturulmak istenirse bu bacağın ortasında yer alan silindirik eklemin öteleme kısmı aktif dönel kısmı pasif kabul edilir. A_1 tipi açısal kısıt oluşturulmak istendiğinde ise bu seçimin tam tersi gerçekleştirilir. Aktif eklem olarak öteleme yapan kısım seçilmişse bu eklemin sınırları yukarıda diğer bacak yapılarında prizmatik eklemler için verildiği gibi belirlenir. Pasif olan dönme kısmı için ise sınır belirtilmez yani serbestçe dönebildiği kabul edilir. Eğer aktif eklem olarak dönme hareketi yapan kısım seçilirse bu eklem için yine sınır belirtilmez ancak; pasif olan öteleme kısmı için aktif kabul edildiği zamanda olduğu gibi en uzun ve en kısa olabileceği uzunluklar belirtilir. CCC bacak yapısının uçlarında yer alan silindirik eklemler pasiftirler. Bu eklemlerin dönel kısımları için yine sınır belirtilmez ve serbestçe dönebildikleri kabul edilir. Ancak CPS bacak yapısında olduğu gibi öteleme kısımlarının belirli sınırlar içerisinde bulunması gerekir. Bu sınırların tespiti Şekil 4.5’de verilenlere göre aşağıdaki prosedür ile gerçekleştirilir.



Şekil 4.5. İki silindirik eklem konum tespiti

Şekle göre B_j , B_i , A_j ve A_i noktalarının koordinatları bilinen değerlerdir. Bu değerler kullanılarak C ve Q noktalarının koordinatlarının bulunması işlemleri gerçekleştirilmelidir.

Buna göre; $A_1 = (x_1, y_1, z_1)$; $A_2 = (x_2, y_2, z_2)$; $B_1 = (x_3, y_3, z_3)$; $B_2 = (x_4, y_4, z_4)$ olarak tanımlansın. Ayrıca A_i ve A_j noktalarından geçen doğrunun doğrultu vektörü ile B_i ve B_j noktalarından geçen doğrunun doğrultu vektörü de sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlansın;

$$\begin{aligned} S_A &= (S_{Ax} \ S_{Ay} \ S_{Az}) \\ S_B &= (S_{Bx} \ S_{By} \ S_{Bz}) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Yapılan tanımlamalara göre S_A ve S_B aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned} S_A &= A_2 - A_1 \\ S_B &= B_2 - B_1 \end{aligned} \quad (4.19)$$

Buna göre her iki doğruya ait simetrik denklemler aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} \frac{x - x_1}{S_{Ax}} &= \frac{y - y_1}{S_{Ay}} = \frac{z - z_1}{S_{Az}} = \lambda \\ \frac{x - x_3}{S_{Bx}} &= \frac{y - y_3}{S_{By}} = \frac{z - z_3}{S_{Bz}} = \nu \end{aligned} \quad (4.20)$$

Denklemleri belirlenen bu iki doğru üzerinde rastgele iki nokta şu şekilde tanımlanabilir. C noktası $A_i A_j$ doğrusu üzerinde ve Q noktası da $B_i B_j$ doğrusu üzerinde olsun. Bu noktaların koordinatları aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} C &= (\lambda S_{Ax} + x_1, \lambda S_{Ay} + y_1, \lambda S_{Az} + z_1) \\ Q &= (\nu S_{Bx} + x_3, \nu S_{By} + y_3, \nu S_{Bz} + z_3) \end{aligned} \quad (4.21)$$

C ve Q noktalarından geçen doğrunun yönelimi şu şekilde yazılabilir.

$$C - Q = (\nu S_{Bx} + x_3 - \lambda S_{Ax} - x_1, \nu S_{By} + y_3 - \lambda S_{Ay} - y_1, \nu S_{Bz} + z_3 - \lambda S_{Az} - z_1) \quad (4.22)$$

C ve Q noktalarından geçen doğrunun yönelimi kullanılarak diklik şartı yazılabilir. Buna göre yönelimi CQ noktasından geçen doğru ile yönelimi $A_i A_j$ noktalarından

geçen doğrunun noktasal çarpımı sıfıra eşit olmalı aynı zamanda yönelimi $B_i B_j$ noktalarından geçen doğru ile olan noktasal çarpımı da sıfır olmalıdır. Bu eşitlikler şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned} CQ \cdot A_i A_j &= (\nu S_{Bx} + x_3 - \lambda S_{Ax} - x_1) S_{Ax} + (\nu S_{By} + y_3 - \lambda S_{Ay} - y_1) S_{Ay} \\ &+ (\nu S_{Bz} + z_3 - \lambda S_{Az} - z_1) S_{Az} = 0 \\ CQ \cdot B_i B_j &= (\nu S_{Bx} + x_3 - \lambda S_{Ax} - x_1) S_{Bx} + (\nu S_{By} + y_3 - \lambda S_{Ay} - y_1) S_{By} \\ &+ (\nu S_{Bz} + z_3 - \lambda S_{Az} - z_1) S_{Bz} = 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Bu denklemlerin ν ve λ için çözülmesi gerekir. Denklemler yeniden düzenlenirse;

$$\begin{aligned} \nu (S_{Ax} S_{Bx} + S_{Ay} S_{By} + S_{Az} S_{Bz}) + \lambda (-S_{Ax}^2 - S_{Ay}^2 - S_{Az}^2) \\ + (S_{Ax} (x_3 - x_1) + S_{Ay} (y_3 - y_1) + S_{Az} (z_3 - z_1)) &= 0 \\ \nu (S_{Bx}^2 + S_{By}^2 + S_{Bz}^2) + \lambda (-S_{Ax} S_{Bx} - S_{Ay} S_{By} - S_{Az} S_{Bz}) \\ + (S_{Bx} (x_3 - x_1) + S_{By} (y_3 - y_1) + S_{Bz} (z_3 - z_1)) &= 0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

Bu iki bilinmeyenli iki denklem çözüldükten sonra ν ve λ aşağıdaki gibi bulunur.

$$\lambda = \frac{F_1 E_3 - F_3 E_1}{F_2 E_1 - F_1 E_2} \quad \nu = \frac{-\lambda E_2 - E_3}{E_1} \quad (4.25)$$

Denklemlerde geçen değişkenler aşağıdaki gibidir.

$$E_1 = (S_{Ax} S_{Bx} + S_{Ay} S_{By} + S_{Az} S_{Bz}) \quad (4.26)$$

$$E_2 = (-S_{Ax}^2 - S_{Ay}^2 - S_{Az}^2) \quad (4.27)$$

$$E_3 = (S_{Ax} (x_3 - x_1) + S_{Ay} (y_3 - y_1) + S_{Az} (z_3 - z_1)) \quad (4.28)$$

$$F_2 = (-S_{Ax} S_{Bx} - S_{Ay} S_{By} - S_{Az} S_{Bz}) \quad (4.29)$$

$$F_3 = (S_{Bx} (x_3 - x_1) + S_{By} (y_3 - y_1) + S_{Bz} (z_3 - z_1)) \quad (4.30)$$

Sonuç olarak Denklem (4.19) ile elde edilen C ve Q noktalarının koordinatlarının sırasıyla A_i ve A_j ile B_i ve B_j noktaları arasında bulunması silindirik eklemin δ_1 ve δ_2 ile belirlenen sınırlar dahilinde kaldığını gösterir.

GSP bacak bağlantı noktaları: Bacak bağlantı noktaları GSP mekanizmalarının geometrik eniyilemesinde en önemli parametrelerden biridir. Literatürde yer alan bir çok eniyileme çalışmasında bu noktaların mekanizmanın platformları üzerindeki konumlarının mekanizmanın kinematik performansı ile doğrudan ilişkisi ortaya konulmuştur [66]. Bu tez çalışmasında önerilen 4 bacak tipi için bağlantı noktaları tespit edilirken bacağın içerdiği pasif küresel eklemlerin herbiri için mekanizmanın platformları üzerinde bir nokta tanımlanmaktadır. Bacakların içerdiği pasif silindirik eklemler için ise eklemin bağlı olduğu doğrunun başlangıç ve bitiş noktaları için birer tane olmak üzere iki tane nokta tanımlanmaktadır. Bağlantı noktalarının tespiti özellikle temel ve/veya uç işlevci çerçevelerinin bir düzlem değil de üç boyutlu bir yapı olduğu durumlarda oldukça güçleşmektedir. Bunun nedeni muhtemel bağlantı noktalarının sayısının çok fazla olmasıdır. Bu nedenle yapılan tez çalışmasında, bacak bağlantı noktaları geometrik eniyileme işlemine parametre olarak dahil edilmişlerdir.

Yukarıda sunulan performans değerlendirme kıstasları ve tasarım parametreleri birlikte kullanılarak bir geometrik eniyileme yapılabilmesi ancak bu amaç için geliştirilmiş bir eniyileme algoritması kullanılmasına bağlıdır. Bir sonraki bölümde bu doktora tez çalışmasında eniyileme algoritması olarak kullanılan PSO algoritması hakkında özet bilgi sunulmuştur.

4.5. PSO Algoritması

PSO algoritması sürü tabanlı sezgisel bir eniyileme algoritmasıdır. Bu algoritma Kennedy ve Eberhart [59-60] tarafından geliştirilmiştir ve hayvan sürülerinin (örneğin kuş sürüleri) yiyecek bulmak için yaptıkları davranışları esas alan bir algoritmadır. PSO algoritması herbiri parçacık olarak tanımlanmış aday çözümlerden oluşan bir sürü tanımlaması ile başlar. Buna göre her parçacık çözülmesi istenen problemin boyutuna göre belirlenmiş arama uzayı içerisinde bir çözüm tanımlar ve bu parçacık çözülmek istenen problem ile aynı boyuta sahiptir. Örneğin üç boyutlu

bir uzayda bir nokta (x,y,z) aranıyorsa bu durumda bir parçacık üç boyutlu olarak tanımlanmalıdır. Her parçacık bütün boyutları için bir konum bilgisi ile ifade edilir. Örneğin üç boyutlu bir nokta (x=5, y=4 ve z=2.4) şeklinde olabilir. PSO eniyileme işlemini parçacıkları arama uzayı içerisinde amaç fonksiyona göre gezdirerek gerçekleştirir. Buna göre her bir iterasyonda bir parçacığın tüm boyutları için bir hız bilgisi hesaplanır ve bu hız bilgisi kullanılarak parçacığın yeni konum bilgisi elde edilir. Bir parçacığın eniyi çözüme doğru ilerlemesi iki temel parametre kullanılarak sağlanır. Bu parametreler bir parçacığın içinde bulunduğu iterasyona kadar elde ettiği konumlardan amaç fonksiyona göre en iyisi olarak tanımlanan pbest ve bütün sürünün pbest'lerinin eniyisi olarak tanımlanan gbest parametreleridir. PSO algoritmasının kullandığı konum ve hız formülleri şu şekilde ifade edilebilir [58].

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 rand[pbest_i(t) - x_i(t)] + c_2 rand[gbest(t) - x_i(t)] \quad (4.31)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (4.32)$$

Denklemde v_i , x_i ve $pbest_i$ i. parçacığın hız, konum ve pbest değerleridir. Ayrıca t , w , c_1 and c_2 ise sırasıyla iterasyon numarasını, atalet ağırlık faktörünü (inertia weight factor), bilişsel öğrenme hızını (cognitive learning rate), ve sosyal öğrenme hızını (social learning rate) tanımlar. Son olarak $rand$ 0 ile 1 arasında rastgele seçilen bir sayıyı temsil etmektedir. PSO algoritmasının durdurma kriteri olarak belirli bir amaç fonksiyon değeri belirlenebileceği gibi bir iterasyon sayısı da durdurma kriteri olarak kullanılabilir. Bu tez çalışmasında durdurma kriteri olarak iterasyon sayısı kullanılmıştır. PSO algoritmasının genel yapısını ve çalışma şeklini gösteren akış şeması Şekil 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.6. PSO algoritması akış şeması

4.6. $D_1^5D_3$ Tipi Bir GSP'nin Geometrik Eniyilemesi

Bu bölümde örnek olarak seçilmiş $D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizmasının geometrik eniyileme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen mekanizma 5 tane SPS bacak ve 1 tane CPS bacak yapısı içermektedir. En iyileme işleminin temel amacı bu mekanizmanın dexterous çalışma uzayını en büyük ve en iyi (en yüksek LCI değerine sahip) yapmaktır. Bu çalışmada özel olarak, farklı bacak boylarının dexterous çalışma uzayı üzerindeki etkisini görmek amaçlanmıştır. Buna göre en iyileme işlemi 10 farklı uzunlukta bacak tipi kullanılarak elde edilen 10 farklı $D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizması için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

10 farklı bacak boyuna sahip $D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizması elde etmek için öncelikle endüstride üretilmiş uzaklık kısıtı oluşturabilecek bacak yapıları ve bu bacakların en uzun ve en kısa oldukları sınır değerlerinin yer aldığı bir tablo (Tablo 4.1) hazırlanmıştır.

Tablo 4.1. Endüstride üretilmiş uzaklık kısıtı oluşturabilecek bacak yapıları

Marka	Model	En kısa	En uzun	Marka	Model	En kısa	En uzun
Oriental Motor	DRL60PA4-05MG	162,5	212,5	PI	M-235.22S	161	181
	DRL60PA4-05NG	133	183		M-238.5PG	362,2	412,2
	DRL20PB1-02G	81	106	Linear Mech	UAL 0-C100	343	373
	DRL28PA1G-03G	79	109		UAL 0-C200	443	573
	DRL42PA2-04NG	106	146		UAL 0-C300	543	773
Piezo Motor	LTC45011-020	98	118		UAL 0-C400	643	973
	LTC30011-020	80	100		UBA 0-C100	343	373
	LTC2014-013	69,15	81,95		...	...	...

Tablo 4.1'e göre yapılan değerlendirmede ilk olarak tabloda yer alan bacak yapılarının en kısa ve en uzun olduğu değerler arasında bir oran belirlenmiştir (l_{ratio}) Denklem (4.26). Bu orana göre en kısa uzunluğu 60 mm ve en uzun olduğu zamanki bacak boyu da $60 \times l_{ratio}$ olacak şekilde ilk bacak boyu belirlenmiştir. Bir sonraki parça için en kısa bacak boyu bir öncekinin en uzun bacak boyu olarak kabul edilmiş ve yine bu değer l_{ratio} ile çarpılarak o parça için en uzun bacak boyu elde edilmiştir. Sonuç olarak [60mm – 782mm] aralığında 10 farklı bacak boyu belirlenmiştir. Elde

edilen bacak yapıları için en kısa ve en uzun bacak boyları Tablo 4.2’de verilmiştir. $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için 10 farklı mekanizma bu tabloda yer alan 10 tane bacak yapısı kullanarak tasarlanmıştır.

$$l_{ratio} = \frac{\sum \text{Bacak boylarının en uzun değerleri}}{\sum \text{Bacak boylarının en kısa değerleri}} = 1.2928 \quad (4.33)$$

Tablo 4.2. 10 farklı bacak yapısı için en kısa ve en uzun bacak boyları

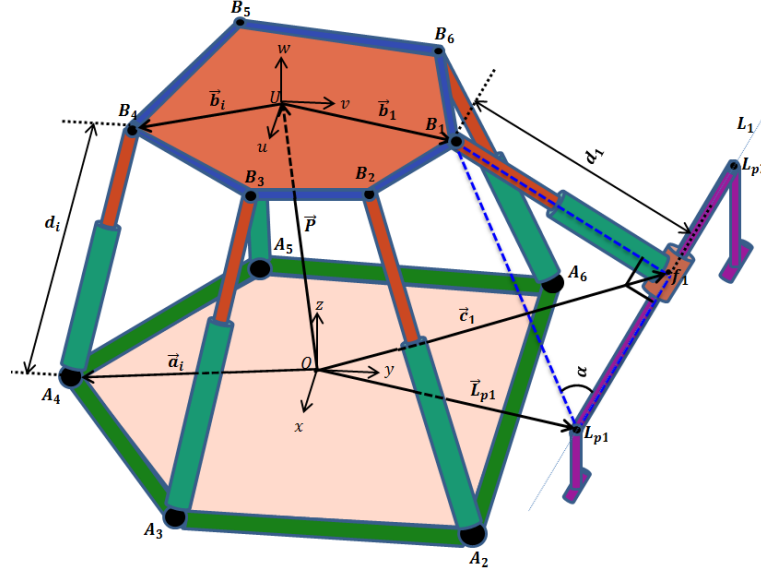
Bacak tipi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
En kısa	60	77.568	100.279	129.641	167.601	216.674	280.116	362.135	468.168	605.248
En uzun	77.568	100.279	129.64	167.496	216.674	280.116	362.135	468.168	605.248	782.464

İlerleyen bölümlerde $D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizmasının ters kinematiği, Jacobian matrisinin elde edilmesi, dexterous çalışma uzayının tespiti ve Tablo 4.2’de yer alan tüm bacak yapıları ile oluşturulan mekanizmaların tamamı için ayrı ayrı yapılan geometrik eniyileme işlemi detayları ile anlatılmıştır. Elde edilen sonuçlar kendi aralarında ve yine bu çalışmada kullanılan yöntemle eniyilemesi gerçekleştirilen D_1^6 tipi bir GSP ile karşılaştırılmıştır.

4.6.1. Geometrik tanımlama

6 SD’ne sahip $D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizması 6 tane uzaklık kısıtı sağlayan bacak kullanılarak birbirine bağlanmış iki platformdan oluşmaktadır. 5 tane SPS tipi bacak ile 1 tane CPS tipi bacak içeren bu mekanizma bacak yapılarının birbirinden farklı olması nedeniyle Tsai [30] tarafından önerilen simetrik olma şartlarını sağlamaz dolayısıyla asimetrik bir paralel robot mekanizmasıdır. Örnek mekanizma Şekil 4,6’da çizilmiştir. Şekle göre mekanizmanın temel çerçevesi üzerine O koordinat sistemi, uç işlevci çerçevesi üzerine de U koordinat sistemi eş yönelimle yerleştirilmişlerdir. $\vec{P}$ bu iki koordinat sistemi merkezlerinin arasındaki konum vektörünü, $\vec{a}_i$ ve $\vec{b}_i$ vektörleri platformlar üzerinde yer alan A_i ve B_i noktalarının kendi koordinat sistemlerine göre konumlarını göstermektedir. Temel çerçeve üzerinde 5 tane A_i ($i=2,3, \dots, 6$) noktasına ek olarak bir L_1 doğrusu tanımlanmıştır. Bu doğru temel çerçeve üzerinde yer alan L_{p1} ve L_{p2} noktalarından geçmektedir. Uç

işlevci çerçevesi üzerinde ise 6 tane B_i noktası ($i=1,2, \dots 6$.) tanımlanmıştır. $\vec{c}_1$ vektörü D_3 tipi kısıtı sağlayan CPS bacağın silindirik eklemnin merkezini göstermektedir. Bacak uzunlukları d_i ile ifade edilmiştir. Buna göre 5 tane D_1 tipi kısıt bacak uzunluğu için $d_2, d_3 \dots d_6$ kullanılırken d_1 ise D_3 tipi kısıtı sağlayan CPS tipi bacağın uzunluğudur.



Şekil 4.7. $D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizması

4.6.2. Ters kinematik

$D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizması iki farklı bacak yapısından oluştuğu için bu mekanizmanın ters kinematiği de iki farklı ters kinematik denklem ile gerçekleştirilebilir. İlk olarak SPS bacaklar için ters kinematik denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$d_i^2 = (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \quad (4.34)$$

Denklemde yer alan R , yönelim matrisi roll, pitch, yaw açısı, $R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma)$, kullanılarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$${}^O_U R = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

CPS bacak yapısı için ters kinematik denklem şekilde yer alan $L_{p1}f_1B_1$ dik üçgeni kullanılarak türetilir. Buna göre şu eşitlik yazılabilir;

$$\left(\vec{P} + R\vec{b}_1 - \vec{L}_{p1}\right) \times \vec{s}_1 = \left(\vec{P} + R\vec{b}_1 - \vec{L}_{p1}\right) \vec{s}_1 \sin \alpha \quad (4.36)$$

Denklemde $\vec{s}_1$, L_1 doğrusuna paralel olan birim vektördür. $L_{p1}f_1B_1$ üçgeni için ayrıca şu eşitlik te yazılabilir;

$$\sin \alpha = \frac{|\vec{d}_1|}{\left|\vec{P} + R\vec{b}_1 - \vec{L}_{p1}\right|} \quad (4.37)$$

Denklem (4.30), Denklem (4.29)'da yerine konulur ve her iki tarafın karesi alınırsa D_3 tipi kısıt için aşağıdaki ters kinematik denklemi elde edilir.

$$d_1^2 = \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_1 - \vec{L}_{p1}\right) \times \vec{s}_1\right) \cdot \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_1 - \vec{L}_{p1}\right) \times \vec{s}_1\right) \quad (4.38)$$

4.6.3. Jacobian matrisi

Denklemler (4.34) ve (4.38) ile elde edilen her iki ters kinematik denklemin zamana göre türevleri alınarak Jacobian matrisi elde edilebilir. Denklem (4.27)'in türevi 3. bölümde de elde edildiği gibi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\dot{d}_i = \frac{1}{d_i} \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i\right) \cdot \vec{v}_p + \left(R\vec{b}_i \times \left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i\right)\right) \cdot \vec{\omega}_p \right) \quad (4.39)$$

Denklemde $\vec{\omega}_p = [\dot{\alpha} \quad \dot{\beta} \quad \dot{\gamma}]^T$ ve $\vec{v}_p = [\dot{p}_x \quad \dot{p}_y \quad \dot{p}_z]^T$ uç işlevci çerçevesinin açısal ve doğrusal hızlarıdır. Denklem (4.31)'in zamana göre türevi de Denklem (4.40)'da verildiği gibi elde edilir. Sonuç olarak Jacobian matrisi Denklemler (4.39) ve (4.40) kullanılarak Denklem (4.41)'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \dot{d}_1 = & \frac{1}{d_1} \left(\left(\vec{s}_1 \times \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_1 - \vec{L}_{p1}\right) \times \vec{s}_1\right)\right) \cdot \vec{v}_p \right) \\ & + \frac{1}{d_1} \left(\left(\left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_1 - \vec{L}_{p1}\right) \times \vec{s}_1\right) \times \vec{s}_1\right) \times R\vec{b}_1\right) \cdot \vec{\omega}_p \right) \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$J = \begin{bmatrix} M & N \\ G_i & K_i \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

$$M = \frac{1}{d_1} \left(\vec{s}_1 \times \left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_1 - \vec{L}_{p1} \right) \times \vec{s}_1 \right) \right) \quad (4.42)$$

$$N = \frac{1}{d_1} \left(\left(\left(\left(\vec{P} + R\vec{b}_1 - \vec{L}_{p1} \right) \times \vec{s}_1 \right) \times \vec{s}_1 \right) \times R\vec{b}_1 \right) \quad (4.43)$$

$$G_i = \frac{1}{d_i} \left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \quad (4.44)$$

$$K_i = \frac{1}{d_i} \left(R\vec{b}_i \times \left(\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \right) \right) \quad (4.45)$$

Elde edilen Jacobian matrisi için birimsel Jacobian matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$DJ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

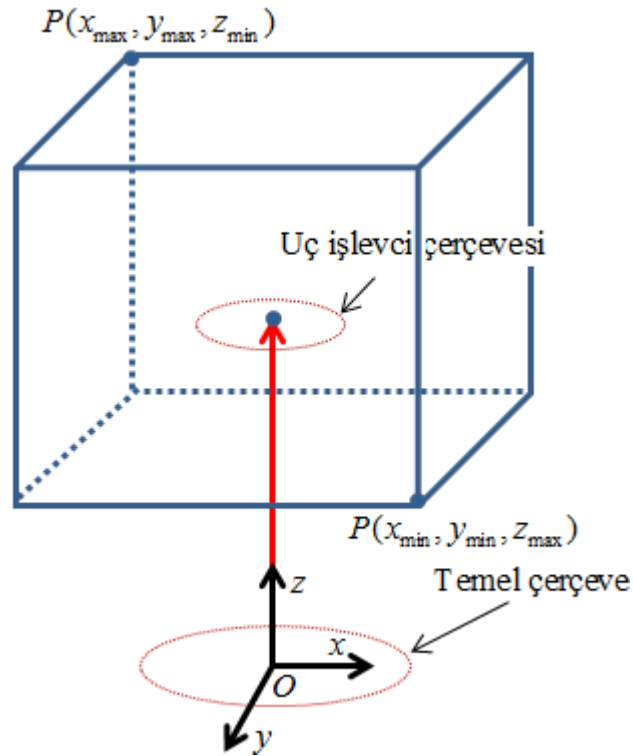
Birimsel Jacobian matrisi birim uygunsuzluğunu göstermektedir. Bu nedenle bu mekanizmanın homojen Jacobian matrisi Denklem (4.34)'te verilen Jacobian matrisinin son 3 sütununun bir uzunluk ile bölünmesi yoluyla elde edilebilir. Bu çalışmada uç işlevci çerçevesinin yarıçapı (r_m) bu amaç için seçilmiştir. Bu uzunluk kullanılarak elde edilen homojen Jacobian matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$J_H = \begin{bmatrix} J_A & \frac{1}{r_m} J_B \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

Denklemde J_A ve J_B matrisleri Jacobian matrisinin sırasıyla ilk ve son üç sütunu, J_H ise homojen Jacobian matrisidir.

4.6.4. Dexterous çalışma uzayının hesaplanması

Dexterous çalışma uzayı hesaplanırken ilk olarak mekanizmanın ulaşılabilir çalışma uzayı hesaplanır. Ulaşılabilir çalışma uzayının tespiti için mekanizmanın uç işlevci çerçevesi üzerinde tanımlı P noktası için kübik bir arama uzayı tanımlanır ve bu arama uzayında yer alan tüm noktalar için ters kinematik hesaplamalar gerçekleştirilir. Her bir mekanizma tipi için bu denklemleri sağlayan noktalar ulaşılabilir çalışma uzayı noktaları olarak kabul edilir. Örnek bir kübik çalışma uzayı Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. P için kübik arama uzayı

Şekilde x_{min} , x_{max} , y_{min} , y_{max} ve z_{min} , z_{max} değerleri kübik arama uzayının sınırları için kullanılan üç boyutlu kartezyen uzayda tanımlı, sırasıyla en küçük ve en büyük x, y ve z koordinatlarıdır. Ulaşılabilir bir çalışma uzayı noktasının bir dexterous çalışma uzayı noktası kabul edilebilmesi için bu noktanın Denklemler (4.9), (4.10) ve (4.12) de verilen şartları sağlaması gerekir.

Bir sonraki bölümde $D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizmasının eniyilemesi için kullanılacak parametreler için sınır değerleri ve amaç fonksiyon sunulmuştur.

4.6.5. Eniyileme parametreleri ve amaç fonksiyonu

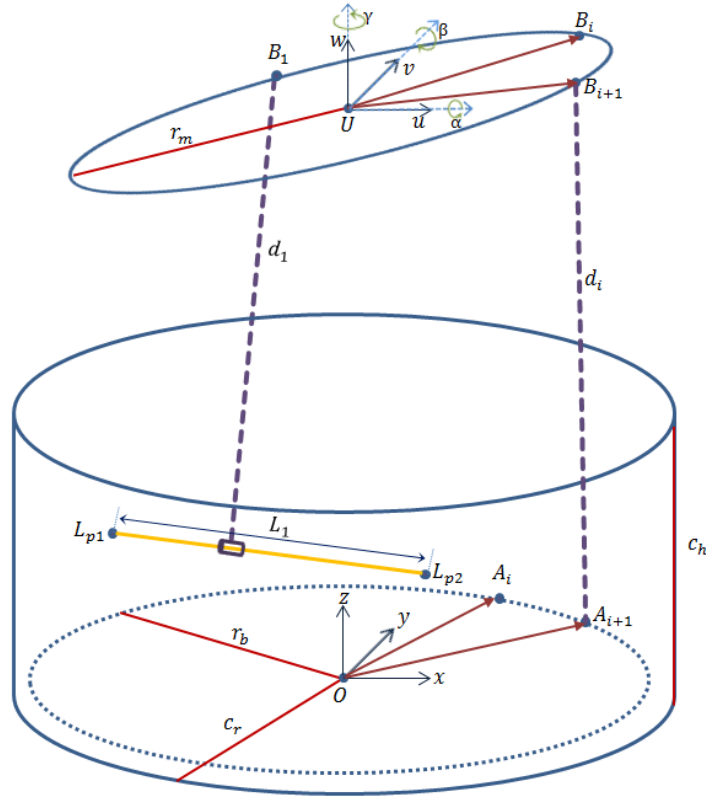
$D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizmasının geometrik kısıtlılıkları eniyileme işleminin parametreleri olarak kabul edilmiştir. Bu parametreler için uygun sınırların belirlenebilmesi amacıyla öncelikle endüstri ve akademide kullanılan 6 SD'ne sahip paralel robot mekanizmaları incelenmiş ve bu mekanizmaların özellikleri Tablo 4.3'de sunulmuştur. Tabloda örnek paralel robot mekanizmalarının yönelim açılarının sınırları ve temel (r_b) ve uç işlevci (r_m) platformlarının yarıçapları yer almaktadır. Tabloya göre yapılan değerlendirmede $D_1^5D_3$ mekanizması için yönelim açıları olan α , ve γ için sınır değerleri $[-30^\circ, +30^\circ]$ olarak seçilmesine karar verilmiştir. Temel ve uç işlevci platform yarıçapları için kullanılacak sınırların da $[100\text{mm} \ 732\text{mm}]$ aralığında olacak şekilde belirlenmesine karar verilmiştir.

Tablo 4.3. Örnek paralel robot mekanizmalarının parametreleri

Ürün Modeli	Yönelim açıları (derece)						Çerçeve yarıçapları (mm)	
	Minimum			maximum			Temel çerçeve	Uç işlevci çerçevesi
	α	β	γ	α	β	γ		
PI H-810	-10	-10	-30	10	10	30	100	100
PI H-824	-7.5	-7.5	-12.5	7.5	7.5	12.5	281	200
PI H-840	-15	-15	-30	15	15	30	348	250
PI M-811.STV	-10	-10	-21	10	10	21	136	100
PI M-850K	-15	-15	-30	15	15	30	350	350
SYMETRIE Bora	-10°	-10°	-15°	10°	10°	15°	212	160
SYMETRIE Brevia	-15°	-15°	-10°	15°	15°	10°	600	320
Newport HXP100	-12°	-10°	-20°	12°	10°	20°	300	200
Newport HXP50	-9°	-8.5°	-18°	9°	8.5°	18°	200	125
MeVEA 500E	-18°	-20°	-18°	18°	20°	18°	1000	800
MeVEA 1200E	-18°	-15°	-18°	18°	15°	18°	1000	800

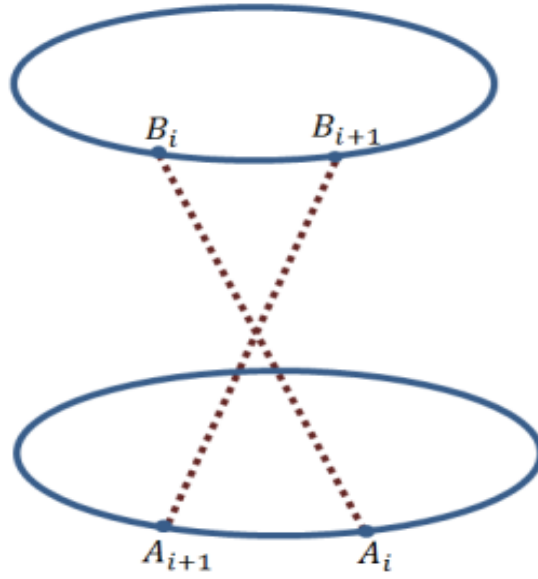
Bacak bağlantı noktaları eniyileme amacıyla kullanılacak önemli bir parametredir. Temel çerçeve üzerinde yer alan L_{p1} ve L_{p2} noktaları en iyileme işlemine dahil edilirken diğer bağlantı noktalarından ($A_2 \dots A_6$ ve $B_1 \dots B_6$) farklı olarak değerlendirilmiştir. Bunun nedeni bu noktaların bir doğru belirtmesidir. Bu doğru bir düzlem üzerinde olabileceği gibi üç boyutlu bir hacim içerisinde tanımlanmış rastgele iki noktadan geçen bir doğru da olabilir. Buna göre bu noktaların arama uzayı silindirik bir yapı olarak tasarlanmıştır. Bu silindirin yarıçapı (c_r) seçilen bacak

tipinin en uzun değerine, yüksekliği ise bacak tipinin en kısa değerinin 0.9 ile çarpılması ile bulunan değere ($c_h = 0.9 \times$ en kısa bacak boyu) eşitlenmiştir. Silindirin yüksekliğinin en kısa bacak boyundan daha düşük belirlenmesinin nedeni tasarlanacak mekanizmanın uç işlevcisi ile temel çerçeve üzerinde yer alan doğru arasındaki muhtemel çarpışmaların önüne geçilmesidir. Bu arama uzayı Şekli 4.9 'da gösterilmiştir. Uç işlevci ve temel çerçeve üzerinde yer alan diğer bağlantı noktaları ait oldukları platformun çevrel çemberi üzerinde rastgele yerleşmeleri planlanmıştır. Ancak, bu noktalar yerleşirken herbir platform üzerindeki noktaların kendi içinde saat yönünün tersinde sıralı olacak şekilde (A_2 'den A_6 'ya ve B_1 'den B_6 'ya) yerleşmeleri sağlanmıştır. Sıralı yerleşimin nedeni bacakların çapraz yerleşiminin önüne geçilmesidir. Örnek bir çapraz yerleşim Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Lp1 ve Lp2 için silindirik arama uzayı

Sonuç olarak gerçekleştirilen eniyileme işlemi için kullanılacak parametreler bacak boyları (10 farklı bacak boyu), yönelim açıları, temel ve uç işlevci çerçeve yarıçapları ve bacak bağlantı noktaları olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Bacakların çapraz yerleşimi

Bu çalışmada gerçekleştirilen eniyileme işleminin amacı yukarıda belirtilen parametrelerin mekanizmanın en iyi kinematik performansı göstereceği şekilde belirlenmesidir. Buna göre; yukarıda tanımlamaları ve sınırları belirtilen parametrelerin PSO algoritması kullanılarak eniyilemesi işlemleri iki temel aşamaya ayrılmıştır. Birinci aşamada yönelim açılarının 0 olduğu ($\alpha = \beta = \gamma = 0$) kabul edilmiştir. Bu aşamada ayrıca bacak çarpışmaları da hesaba katılmamıştır. Her iki işlemin temel amacı işlem yükünün azaltılmasıdır. İlk aşamada gerçekleştirilen işlemler maddeler halinde şu şekilde sıralanabilir.

- i. Herbir mekanizma tipi için bacak boylarının Tablo 4.2'den seçilmesi.
- ii. Temel ve uç işlevci platform yarıçaplarının sınır değerlerinin belirlenmesi. Bu değerler aşağıdaki gibi belirlemiştir. Denklemden $r_{b,min}$, $r_{b,max}$, $r_{m,min}$ ve $r_{m,max}$ sırasıyla temel çerçeve ile uç işlevci çerçevesi için en küçük ve en büyük yarıçap değerleridir.

$$r_{b,min} = r_{m,min} = 100 \text{ mm} \quad (4.48)$$

$$r_{b,max} = r_{m,max} = 732 \text{ mm} \quad (4.49)$$

- iii. $L_{p1} = [L_{p1x} \ L_{p1y} \ L_{p1z}]$ and $L_{p2} = [L_{p2x} \ L_{p2y} \ L_{p2z}]$ noktalarının koordinatları c_r ve c_h kullanılarak şu şekilde sınırlandırılmışlardır.

$$c_r = r_{b,max} \quad ; \quad c_h = 0.9 \times \text{en kısa bacak uzunluğu} \quad (4.50)$$

$$-c_r < L_{p1_x}, L_{p1_y}, L_{p2_x}, L_{p2_y} < c_r \quad ; \quad -c_h < L_{p1_z}, L_{p2_z} < c_h \quad (4.51)$$

iv. P için kullanılacak arama uzayının sınırları aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Denklemden $x_{min}, y_{min}, z_{min}$ ve $x_{max}, y_{max}, z_{max}$ değerleri O koordinat sistemine göre tanımlanmışlardır.

$$x_{min} = y_{min} = -2r_{b,max} \quad ; \quad x_{max} = y_{max} = 2r_{b,max} \quad (4.52)$$

$$z_{min} = 0.6 \times \text{en kısa bacak uzunluğu}, \quad z_{max} = \text{en uzun bacak boyu} \quad (4.53)$$

v. Son olarak elde edilecek tüm çalışma uzayı noktalarının Denklemler (4.8), (4.9), (4.10), (4.11) ve (4.12)'yi sağlaması ile elde edilecek tüm çalışma uzayının belirli bir dexterity değerine sahip olması sağlanmıştır. Belirlenen bu parametre ve sınırlamalara göre geometrik eniyileme probleminin amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F_j = N_j \quad (j=1.2.3...n) \quad (4.54)$$

Denklemden F_j, N_j ve n sırasıyla j. parçacık için uygunluk değeri, dexterous çalışma uzayı nokta sayısı ve PSO için kullanılan sürüde yer alan parçacık sayısıdır. Bu çalışmada kullanılan PSO parçacık yapısı şu şekildedir.

$$\left[\varphi_{A_2} \dots \varphi_{A_6}, \sigma_{B_1} \dots \sigma_{B_6}, L_{p1_x}, L_{p1_y}, L_{p1_z}, L_{p2_x}, L_{p2_y}, L_{p2_z}, r_b, r_m \right] \quad (4.55)$$

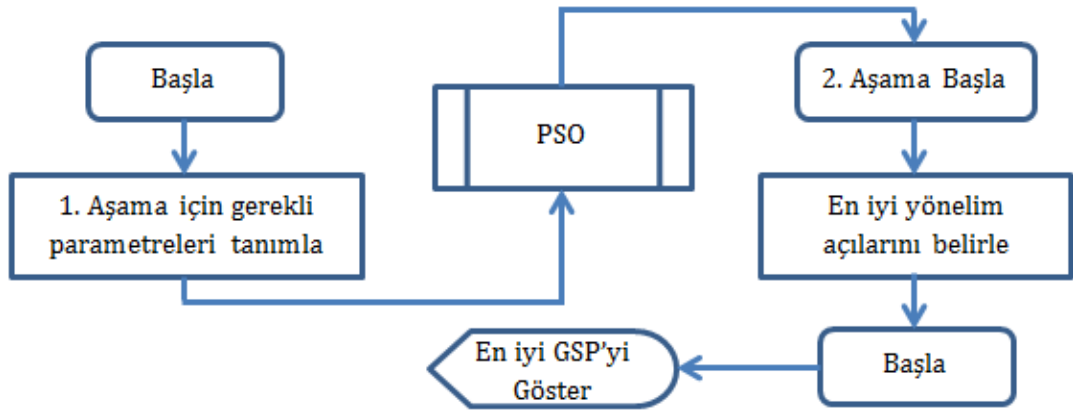
Denklemden φ_{A_i} ve σ_{B_i} A_i ve B_i noktalarının ait oldukları ereveseler üzerindeki konumlarını tanımlı oldukları koordinat sisteminin x eksenine göre gösteren aı değişkenleridir. Son olarak kullanılan PSO algoritmasının parametreleri de Tablo 4.4'te olduğu gibi tanımlanmışlardır.

Tablo 4.4. PSO parametreleri

Parçacık sayısı	İterasyon sayısı	C_1	C_2	W_{min}	W_{max}	W
60	60	2	2	0.4	0.9	$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min})}{İterasyon Sayısı} t$

Eniyileme işlemlerinin ikinci aşamasında $D_1^5D_3$ mekanizması için en iyi yönelim açılarının (α, β, γ) bulunması amaçlanmıştır. En iyi yönelim açısı kombinasyonunun bulunması için ilk olarak $-30^\circ \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 30^\circ$ aralığında ve 1° çözünürlükle bütün açı kombinasyonları belirlenmiştir. İkinci olarak bütün açı kombinasyonları için bacak çarpışmalarının da dikkate alındığı dexterous çalışma uzayı hesabı yapılmıştır.

Elde edilen en iyi dexterous çalışma uzayının üretilmesini sağlayan yönelim açıları o mekanizma için en iyi yönelim açıları olarak kabul edilmişlerdir. Tüm eniyileme prosedürü aşağıda görüldüğü gibi özetlenebilir.



Şekil 4.11. $D_1^5D_3$ mekanizması geometrik eniyileme akış şeması

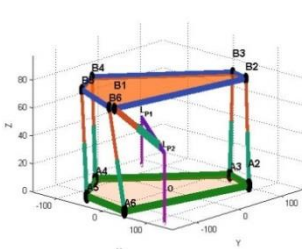
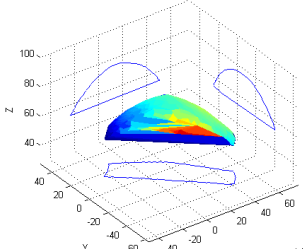
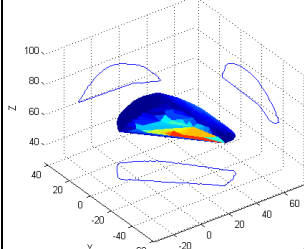
4.6.6. Eniyileme sonuçları

Bu çalışmada $D_1^5D_3$ tipi simetrik olmayan GSP mekanizması için geometrik eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bacak boylarının etkisini incelemek amacıyla 10 adet farklı uzunlukta bacak yapısı [60mm 782mm] aralığında belirlenmiştir. Belirlenen her bir bacak boyu kullanılarak oluşturulan 10 farklı mekanizmanın tamamı için eniyileme işlemi ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

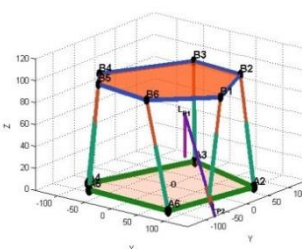
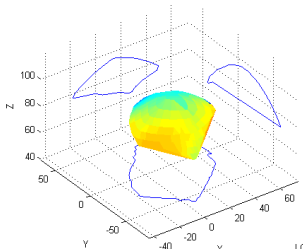
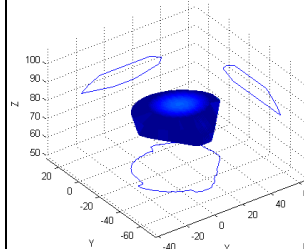
Elde edilen sonuçlar her bir mekanizma için Tablolar (4.5-4.14)'te sunulmuştur. Tablolarda her bir mekanizma için elde edilen eniyileme parametre sonuçları olan, bacak bağlantı noktalarının koordinatları, en iyi yönelim açıları ve temel ve uç işlevci platform yarıçapları ile birlikte elde edilen GSP mekanizmasının çizimi de yer almaktadır. Tabloda ayrıca her bir mekanizma için elde edilen ulaşılabilir çalışma

uzayı ile dexterous çalışma uzayları da çizdirilmiştir. Yapılan çalışma uzayı çizimlerinde renklendirme işlemleri mekanizmanın çalışma uzayının her bir noktası için elde ettiği LCI değerlerine göre yapılmıştır. Bu sayede çalışma uzayının okunabilirliği arttırılmıştır.

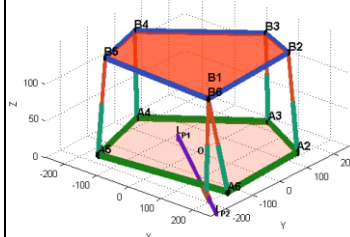
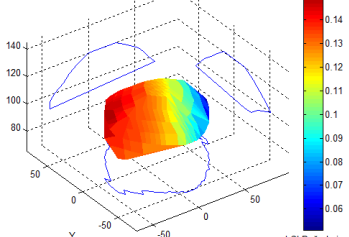
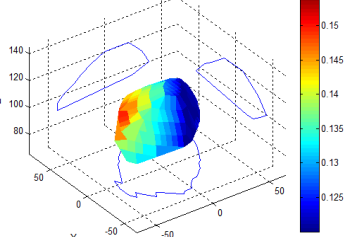
Tablo 4.5. 1. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları

Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu	
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{P1}	L _{P2}
X	11.32	51.76	13.841	-134.58	-99.008	0.349	74.58	11.897	-130.64	-74.964	26.979	-134.31	114.477
Y	-138.5	129	138.347	-34.899	-97.616	-139.03	111.7	133.787	-31.17	-111.44	-131.578	82.117	-130.89
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32.492	48.967
			Çerçeve yarıçapları					En iyi yönelim açıları					
			r _b		r _m		α		β	γ			
			134.3		139		0		0	0			
Eniyilenmiş mekanizma					Ulaşılabilir çalışma uzayı					Dexterous çalışma uzayı (σ _{ek} > .2 ve LCI > .12)			
													

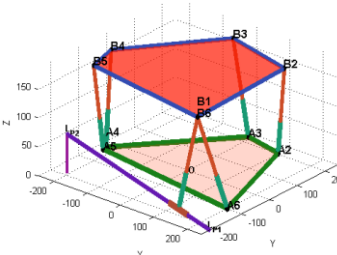
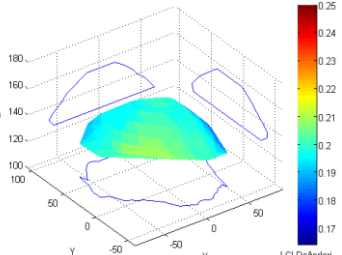
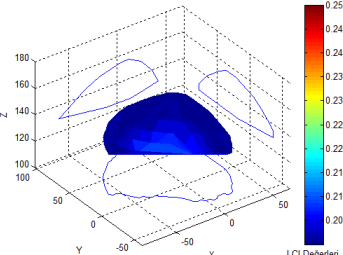
Tablo 4.6. 2. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları

Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu		
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{P1}	L _{P2}	
X	108.2	56.70	-38.35	-101.8	-69.432	35.479	101.433	-44.743	-102.33	-82.516	72.25	-67.689	122.0 2	
Y	-19.67	94.25	103.0	-41.666	-85.317	-104.12	69.394	114.46	-68.052	-91.079	-99.4	120.35	-51.25	
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39.051	-5.702	
			Çerçeve yarıçapları					En iyi yönelim açıları						
			r _b		r _m		α	β	γ					
			122.9		110		-1	0	0					
Eniyilenmiş mekanizma						Ulaşılabilir çalışma uzayı						Dexterous çalışma uzayı (σ _{ek} > .2 ve LCI > .12)		
														

Tablo 4.6. 3. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları

Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu			
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{P1}	L _{P2}		
X	162.03	136	24.951	-217.8	-171.91	162.038	183.668	20.958	-230.87	-168.67	199.77	-74.191	236.61		
Y	-147.4	171.7	217.66	23.12	-135.81	-147.46	149.165	235.68	51.779	-165.93	-126.7	15.349	-210.4		
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.825	-10		
			Çerçeve yarıçapları				En iyi yönelim açıları								
			r _b		r _m		α		β					γ	
			236.61		219.09		0		0					-1	
Eniyilenmiş mekanizma				Ulaşılabilir çalışma uzayı				Dexterous çalışma uzayı (σ _{ek} > .2 ve LCI > .12)							
															

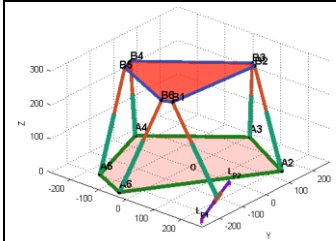
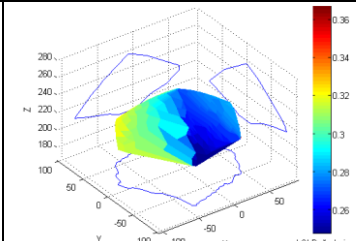
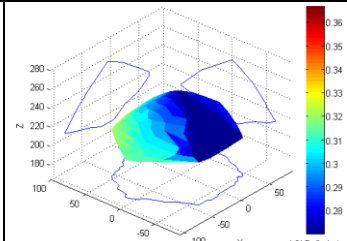
Tablo 4.7. 4. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları

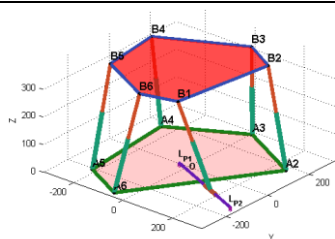
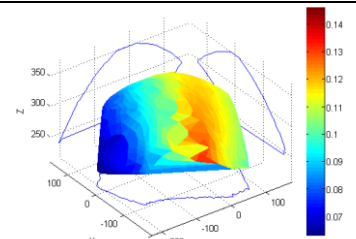
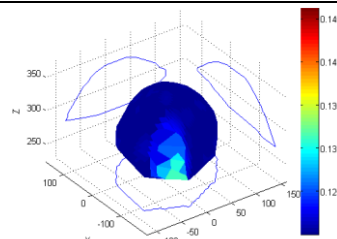
Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu	
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{P1}	L _{P2}
X	159.57	144.53	-49	-223.68	-201	159.57	100.14	-8.706	-223.25	-221.4	201.13	225	-203.3
Y	-157	170.97	218.45	-9.213	-98.53	-157.02	201.48	224.83	-27.95	-40.08	-100.8	-191.04	-191.2
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-10	67.135
			Çerçeve yarıçapları					En iyi yönelim açıları					
			r _b		r _m		α	β	γ				
			225		223.87		0	0	0				
Eniyilenmiş mekanizma				Ulaşılabilir çalışma uzayı				Dexterous çalışma uzayı (σ _{ek} > .2 ve LCI > .2)					
													

Tablo 4.8. 5. Tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları

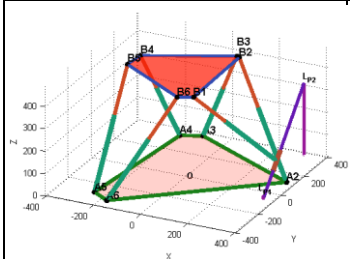
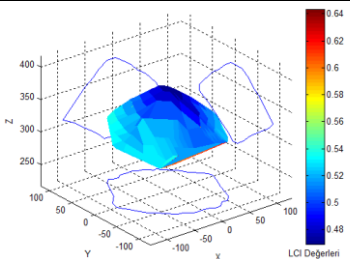
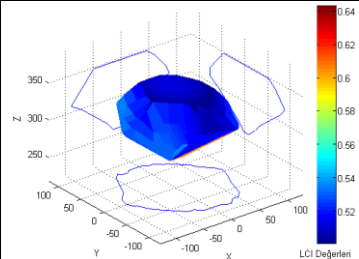
Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu	
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{P1}	L _{P2}
X	184.79	164.07	-8.82	-182.18	-162.72	21.404	172.21	19.651	-219.52	-207.35	42.348	-156.1	196.66
Y	-31.03	90.51	187.17	43.811	-92.909	-186.15	139.86	220.98	32.122	-78.897	-217.7	57.633	-178.08
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42.437	34.18
			Çerçeve yarıçapları				En iyi yönelim açıları						
			r _b		r _m		α		β	γ			
			221.85		187.38		-1		-1	1			

Eniyilenmiş mekanizma	Ulaşılabilir çalışma uzayı	Dexterous çalışma uzayı ($\sigma_{ek} > .2$ ve $LCI > .12$)

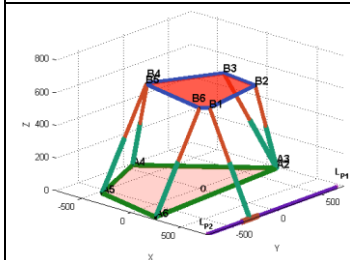
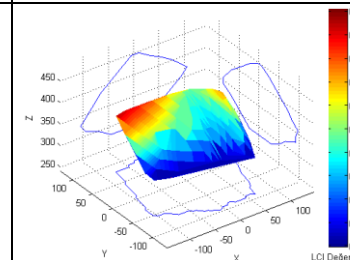
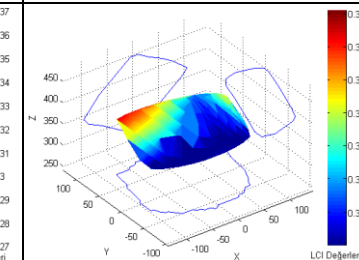
Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu	
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{P1}	L _{P2}
X	77.895	102.68	84.937	-181.2	-166.04	47.478	209.6	1.673	-247.29	-160.74	-46.458	253.95	155.4
Y	-168.9	155.08	165.47	-41.85	-83.821	-179.83	143.39	253.952	57.807	-196.61	-249.67	-253.95	-17.6
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
			Çerçeve yarıçapları					En iyi yönelim açıları					
			r _b		r _m		α	β	γ				
			253.95		186		0	0	0				
Eniyilenmiş mekanizma			Ulaşılabilir çalışma uzayı					Dexterous çalışma uzayı ($\sigma_{ek} > .2$ ve LCI > .27)					
													

Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu	
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{P1}	L _{P2}
X	128.74	175.16	51.473	-228.03	-199.42	4.895	248.42	1.983	-252.1	-214.93	-55.06	-26	301
Y	-208.4	171.29	239.53	89.592	-142.32	-244.95	169.95	300.99	164.452	-210.72	-295.9	-17	-161.5
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
		Çerçeve yarıçapları					En iyi yönelim açıları						
		r _b		r _m		α	β	γ					
		301		245		0	1	0					
Eniyilenmiş mekanizma				Ulaşılabilir çalışma uzayı				Dexterous çalışma uzayı ($\sigma_{ek} > .2$ ve LCI > .12)					
													

Tablo 4.11. 8. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları

Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu	
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{P1}	L _{P2}
X	128.4	119.69	106.21	-231.38	-240.71	71.601	367.36	-111.21	-192.25	-249.89	-173.817	348.55	312.017
Y	-205	210.28	217.4	70.754	-24.547	-231.12	113.63	368.10	333.033	-292.27	-343.014	-49.87	379.707
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-9.826	316.668
			Çerçeve yarıçapları					En iyi yönelim açıları					
			r _b		r _m			α	β	γ			
			384.54		241.96			0	-1	0			
Eniyilenmiş mekanizma				Ulaşılabilir çalışma uzayı				Dexterous çalışma uzayı (σ _{ek} > .2 ve LCI > .5)					
													

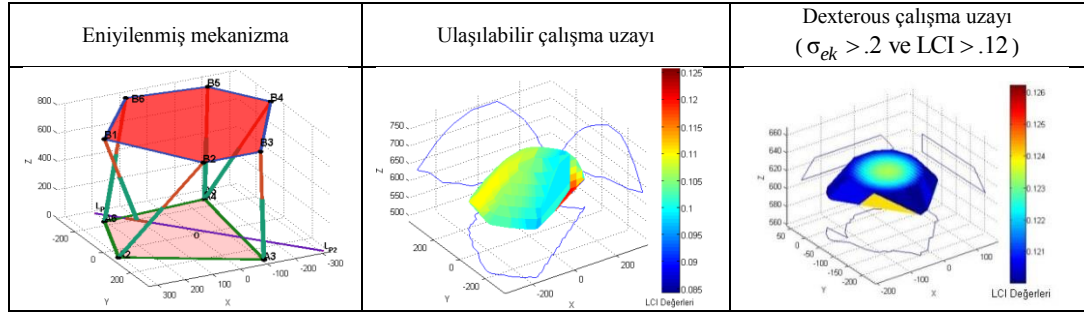
Tablo 4.12. 9. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları

Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu		
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{P1}	L _{P2}	
X	328.42	234.91	-126.55	-391.76	-381.91	277.185	108.19	108.198	-731.59	-467.74	194.35	704.68	734.2	
Y	-260.8	347.46	399.879	-149.78	-173.36	-314.78	726.265	726.265	62.719	-566.02	-708	724.63	-734.2	
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-10	-3.934	
			Platform yarıçapları					En iyi yönelim açıları						
			r _b			r _m		α	β	γ				
			734.28			419.42		0	0	0				
Eniyilenmiş mekanizma				Ulaşılabilir çalışma uzayı				Dexterous çalışma uzayı (σ _{ek} > .2 ve LCI > .3)						
														

Tablo 4.13. 10. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları

Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											L ₁ doğrusu	
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	L _{p1}	L _{p2}
X	304.8	142.60	-60.218	-310.44	-205.9	64.865	-304.8	-106.56	-171.46	-171.46	205.43	199.9	-311
Y	-61.78	276.37	305.11	-18.645	-233.07	-304.16	61.786	292.17	-259.46	-259.46	-233.48	-311	311
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Platform yarıçapları					En iyi yönelim açıları					
			r _b		r _m			α		β	γ		
			311		311			-2		2	6		

Tablo 4.14. (Devam) 10. tip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması için eniyileme sonuçları

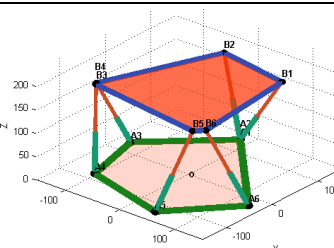
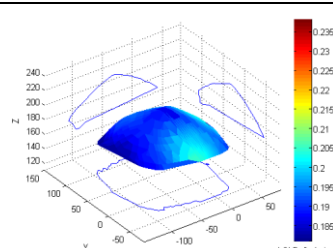
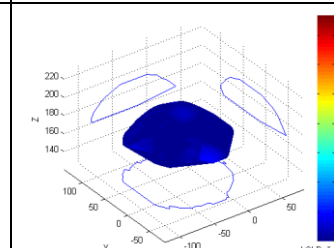


$D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizması ile karşılaştırmak amacıyla SP mekanizması, bu çalışmadaki adıyla D_1^6 tipi GSP mekanizması, aynı yöntemle eniyileştirilmiştir. SP mekanizması simetrik bir yapıya sahip olduğu için eniyileme parametreleri olarak bacak bağlantı noktaları, çerçeve yarıçapları ve yönelim açıları seçilmiştir. Belirlenen parametre sınırları ve eniyileme sürecinin ilk aşamasında kullanılan parçacık yapısı Denklem (4.56) ve Denklem (4.57)'de verilmiştir. Belirtilen limitler $D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizması ile aynı olarak seçilmişlerdir. SP için elde edilen eniyileme sonuçları Tablo 4.15'de sunulmuştur.

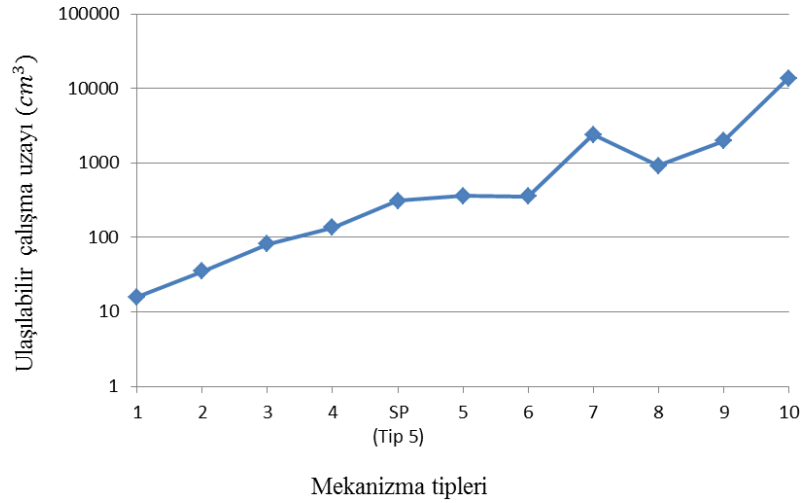
$$100 \text{ mm} \leq r_b, r_m \leq 732 \text{ mm} ; -30^\circ \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 30^\circ \quad (4.56)$$

$$\left[\varphi_{A_1} \varphi_{A_2} \varphi_{A_3} \varphi_{A_4} \varphi_{A_5} \varphi_{A_6} \sigma_{B_1} \sigma_{B_2} \sigma_{B_3} \sigma_{B_4} \sigma_{B_5} \sigma_{B_6} r_b r_m \right] \quad (4.57)$$

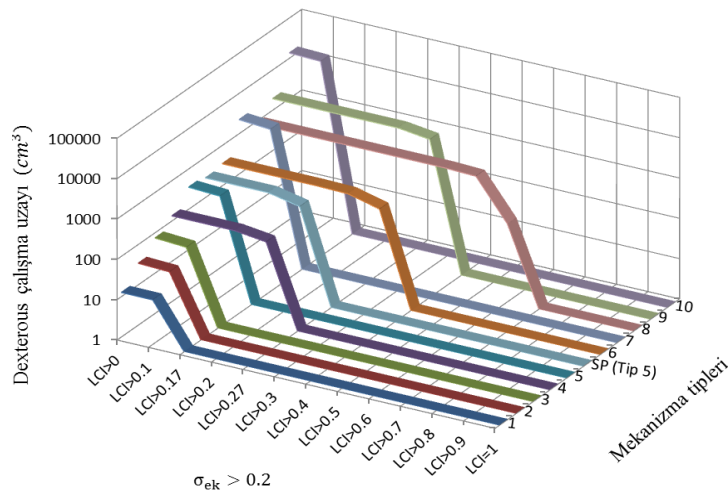
Tablo 4.145. SP eniyileme sonuçları

Konum	Bacak bağlantı noktaları koordinatları											
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
X	81.35	-42.25	-115.95	-113.64	88.873	101.652	-17.741	-17.741	-130.158	-102.307	42.815	130.25
Y	105.0	126	-64.933	-68.903	-98.812	-85.61	131.71	131.71	26.856	-84.827	-125.814	-26.403
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Platform yarıçapları					En iyi yönelim açıları				
			r _b		r _m		α	β	γ			
			132.9		132.9		0	0	1			
Eniyilenmiş mekanizma				Ulaşılabilir çalışma uzayı				Dexterous çalışma uzayı (σ _{ek} > .2 ve LCI > .2)				
												

Tabloya göre SP mekanizması en iyi sonucu Tablo 4.2’de verilen 5. bacak tipiyle elde etmiştir. Tablolar (4.4-4.14) ve Tablo 4.15 incelendiğinde en iyi yönelim açılarının α için -2° ve 0° , β için -1° ve 2° ve son olarak γ için -1° ve 6° aralıklarında yer aldığı görülmektedir. Bu yönelim açıları hem $D_1^5D_3$ tipi GSP için hem de SP için en iyi dexterous çalışma uzayını üretmişlerdir. Çerçeve yarıçaplarına bakıldığında da genel olarak temel çerçeve yarıçapının uç işlevci çerçevesi yarıçapından daha büyük olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Elde edilen sonuçları daha iyi yorumlayabilmek için Şekil 4.12’de tüm mekanizmaların ulaşılabilir çalışma uzayı hacimleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca Şekil 4.13’de de bu mekanizmaların dexterous çalışma uzayları ve bu çalışma uzayları için elde ettikleri LCI değerleri grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 4.12. Ulaşılabilir çalışma uzayı hacimleri

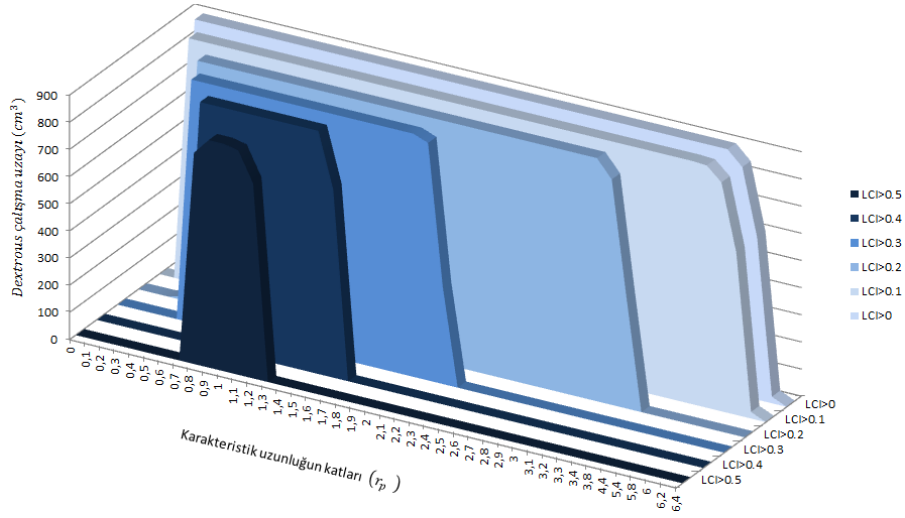


Şekil 4.13. Dexterous çalışma uzayları ve LCI değerleri

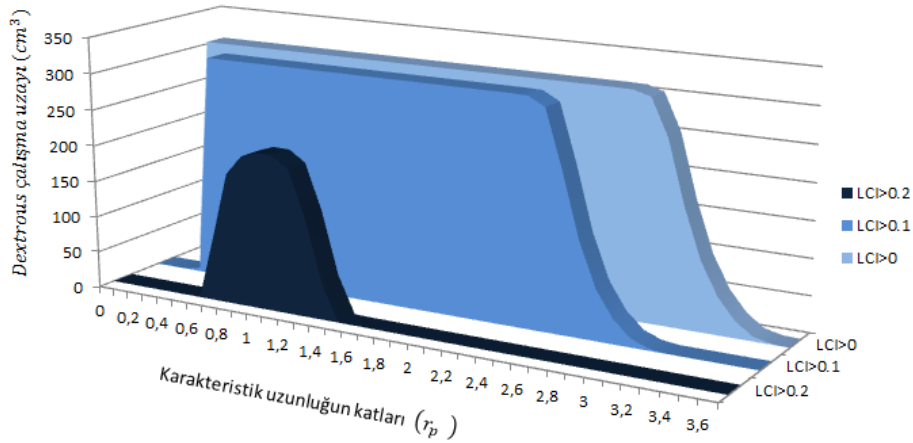
Şekiller 4.12 ve 4.13 birlikte değerlendirildiğinde sadece 3 mekanizma tipinin (6., 8. ve 9. tipler) LCI değerinin 0.4'ten büyük olabildiği görülür. LCI değerine göre bu üç tip mekanizmanın en iyi dexterity karakteristiğine sahip oldukları söylenebilir. $D_1^5D_3$ mekanizma tip 7 ve tip 10 her ne kadar en büyük ulaşılabilir çalışma uzayı hacimlerini elde etselerde bu mekanizmaların dexterous çalışma uzayları LCI değeri arttıkça hızlı bir şekilde 0'a inmektedir. $D_1^5D_3$ mekanizma tip 1, 2 ve 3 hem ulaşılabilir hem de dexterous çalışma uzayları açısından en kötü sonuçları elde etmişlerdir. Sonuç olarak $D_1^5D_3$ mekanizma tip 8'in hem diğer $D_1^5D_3$ mekanizma tipleri hemde SP karşısında en iyi dexterous çalışma uzayı değerlerini elde ettiği görülmektedir. Bu mekanizmanın dexterous çalışma uzayı için LCI değeri 0.5'den daha yukarıda elde edilmiştir. Ayrıca bu mekanizmanın ulaşılabilir çalışma uzayı ile dexterous çalışma uzayları arasındaki ilişkiye bakıldığında, dexterous çalışma uzayı ulaşılabilir çalışma uzayının yaklaşık %90'ı büyüklüğündedir. Bu durum da bu mekanizmanın çalışma uzayının önemli bir kısmında iyi bir dexterity karakteristine sahip olduğunu göstermektedir.

Son olarak bu çalışmada karakteristik uzunluk olarak “weighting factor” metodu gereği rastgele seçilen platform yarıçapı değerinin etkisi incelenerek doğru bir seçim yapıp yapılamadığı değerlendirilebilir. Buna göre hem $D_1^5D_3$ tip 8 GSP mekanizması hem de tip 5 bacak boyu kullanılarak elde edilen SP mekanizması için karakteristik uzunluğun dexterous çalışma uzayına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla karakteristik uzunluk olarak $D_1^5D_3$ tip 8 GSP mekanizması için r_m 'nin 0 ile 6.4 arasındaki katları, SP için ise 0 ile 3.8 arasındaki katları seçilmiştir. Bu katlar kullanılarak elde edilen karakteristik uzunluk değerleri için dexterous çalışma uzayı hesabı gerçekleştirilmiştir. Karakteristik uzunluğun etkisini görmek için dexterous çalışma uzayı ile karakteristik uzunluğun katları farklı LCI değerlerine göre Şekiller 4.14 ve 4.15'te çizdirilmişlerdir. Her iki şekil de incelendiğinde karakteristik uzunluğun uç işlevci platformunun 1 katı olduğu durumlarda dexterous çalışma uzayı tüm LCI değer aralıkları için en üst seviyeye çıkmıştır. Karakteristik uzunluk platform yarıçap değerinden uzaklaştıkça her iki yönde de dexterous çalışma uzayı değerleri azalmaktadır. Sonuç olarak karakteristik uzunluk seçiminde bu çalışma da

da yapıldığı gibi, uç işlevci platform yarıçapına eşit bir değerin seçilmesi dexterous çalışma uzayı hacmini en iyi duruma getirmektedir.



Şekil 4.14. $D_1^5D_3$ tip 8 GSP mekanizması için karakteristik uzunluğun dexterous çalışma uzayı üzerine olan etkisi



Şekil 4.15. 5. tip bacak boyu ile elde edilen SP mekanizması için karakteristik uzunluğun dexterous çalışma uzayı üzerine olan etkisi

Yapılan bu çalışmada doktora tez çalışmasında önerilen 195 GSP mekanizmasından biri olan $D_1^5D_3$ tipi GSP mekanizması için geometrik eniyileme yapılmıştır. En iyileme bu mekanizma için en iyi dexterous çalışma uzayını üreten yapıyı bulmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bacak boylarının etkisini incelemek için 10 farklı bacak boyu seçilmiş ve bu bacak boyları kullanılarak elde edilen 10 tip mekanizma için geometrik eniyileme ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aynı yöntemle geometrik eniyilemesi yapılan SP mekanizması ile karşılaştırılmış ve tip 8

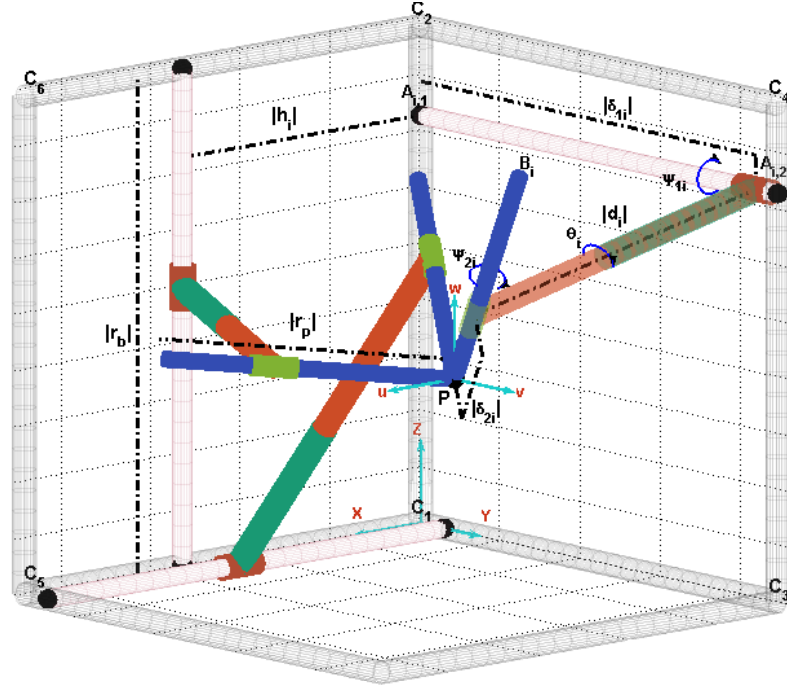
bacak boyuna sahip $D_1^5D_3$ GSP mekanizması en iyi dexterous çalışma uzayı karakteristiklerini elde etmiştir. Bu çalışmada ayrıca karakteristik uzunluğun dexterous çalışma uzayına olan etkisi incelenmiş ve bu değerin uç işlevci yarıçapına eşit seçilmesinin eniyi çalışma uzayı değerlerini ürettiği görülmüştür.

4.7. $D_4^3A_1^3$ Tipi ve 3 Bacaklı Bir GSP'nin Geometrik Eniyilemesi

Geometrik eniyilemesi yapılacak ikinci mekanizma Gao ve diğ. [1]'nin çalışmasında örnek olarak verdiği ve Gan ve diğ. [93] tarafından ileri kinematiği gerçekleştirilmiş olan 3 bacaklı asimetrik bir paralel robot mekanizmasıdır. Bu bölümde bu mekanizma için hem sabit yönelimli dexterous çalışma uzayı (TDW) hem de belirli bir uç işlevci noktası için sabit konumlu yönelimsel çalışma uzayı (ODW) PSO algoritması kullanılarak eniyilenmiştir. Buna göre mekanizma için iki ayrı geometrik eniyileme işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar [92]'de yer alan çalışmada SP mekanizması için sunulan eniyileme sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

4.7.1. Geometrik tanımlama

Seçilen mekanizma herbiri CCC yapısına sahip üç bacak kullanılarak oluşturulmuştur. Mekanizmanın hem temel çerçeve platformu hem de uç işlevci platformu birbirine dik üç doğru parçasının bir araya gelmesi ile oluşturulmuştur. Mekanizma, temel çerçeve platformu ile uç işlevci platformu arasında 3 tane uzaklık kısıtı ve 3 tane açısal kısıt oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için mekanizmanın bacaklarını oluşturan silindirik eklemlerden, ortada yer alan eklemin hem öteleme hem de dönel kısmı aktif edilmiştir. Buna göre mekanizmanın bir bacağına iki tane eyleyici vardır ve dolayısıyla bir bacak ile iki tane (hem uzaklık hemde açısal) kısıt birden oluşturulmaktadır. Bu mekanizma sahip olduğu bacak sayısı SD'den daha az olduğu için bir asimetrik paralel robot mekanizmasıdır. Bu özelliklerine göre mekanizma bu doktora tez çalışmasında Tablo 2.2'de elemanları verilen 3D3A sınıfına mensuptur. Mekanizma, sahip olduğu bacaklar ile iki doğru arasında D_4 tipi uzaklık kısıtı ve yine aynı doğrular arasında A_1 tipi açısal kısıt oluşturur. Bu bilgiler ışığında mekanizma için $D_4^3A_1^3$ tipi bir GSP tanımı yapılabilir. Temel çerçevesi kübik bir platfrom üzerine yerleştirilmiş olan mekanizmanın örnek çizimi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. $D_4^3A_1^3$ tipi bir GSP mekanizması

Şekle göre mekanizmanın temel çerçevesine ait sabit $O(X, Y, Z)$ Kartezyen koordinat sistemi temel çerçeveyi oluşturan üç doğru parçasının kesişim yeri olan C_1 noktasına yerleştirilmiştir. Aynı şekilde uç işlevcisine ait $P(u, v, w)$ koordinat sistemi de bu platformu oluşturan üç doğru parçasının kesişim yeri olan P noktasına yerleştirilmiştir. Her iki koordinat sistemi eş yönelimlidir. Temel çerçeveyi oluşturan doğru parçaları $A_{i,1}$ ve $A_{i,2}$ ($i=1,2,3$) noktalarından kübik platforma bağlanmıştır. Uç işlevci çerçevesini oluşturan doğrular ise P noktasında birbirlerine ve pasif silindirik eklemler ile aracılığıyla da mekanizmanın bacaklarına bağlanmışlardır. Uç işlevciyi oluşturan doğru parçalarının bitiş noktaları B_i ile ifade edilmiştir. Şekilde ayrıca h_i mekanizmanın temel çerçevesini oluşturan her bir doğru ile paralel olduğu O koordinat sistemi eksenleri arasındaki uzaklık, r_b temel çerçeveyi oluşturan doğru parçalarının uzunluğu ve r_p uç işlevci çerçevesini oluşturan doğru parçalarının uzunluğudur. Bacakların oluşturduğu uzaklık kısıtı, diğer bir ifadeyle bacak uzunluğu, d_i ile açısal kısıt ise θ_i ile isimlendirilmiştir. Son olarak Ψ_{1i} ve Ψ_{2i} pasif silindirik eklemlere ait açısal değişkenler benzer şekilde δ_{1i} ve δ_{2i} ise pasif öteleme değişkenleridir.

4.7.2. Ters kinematik

$D_4^3 A_1^3$ tipi bir GSP mekanizmasının ters kinematiğinin çözümü için üçüncü bölümde Denklemler (3.27) ve (3.28)' de verilen ifadeler bu mekanizmanın geometrik tanımlamaları dikkate alınarak şu şekilde yazılabilir.

$$d_i^2 (\vec{Rt_i} \times \vec{s_i}) \cdot (\vec{Rt_i} \times \vec{s_i}) = \left((\vec{P} + R\vec{B_i} - \vec{A_{i,1}}) \cdot (\vec{Rt_i} \times \vec{s_i}) \right)^2 \quad (4.58)$$

$$\cos \theta_i = (\vec{Rt_i}) \cdot \vec{s_i} \quad (4.59)$$

Denklemlerde $\vec{P}$ temel çerçeve ile uç işlevci koordinat sistemlerinin merkezleri arasındaki konum vektörü, R ise uç işlevci platformunun temel çerçeveye göre yönelimini roll, pitch, yaw açısı setine göre gösteren yönelim matrisidir (Denklemler(4.28)). Ayrıca $\vec{s_i}$, O koordinat sistemine göre, $A_{i,1}$ ve $A_{i,2}$ noktalarından geçen doğruya ait birim vektör, aynı şekilde $\vec{t_i}$ de P koordinat sistemine göre P ve B_i noktalarından geçen doğruya ait birim vektördür.

$$\vec{s_i} = \frac{\vec{A_{i,2}} - \vec{A_{i,1}}}{|\vec{A_{i,2}} - \vec{A_{i,1}}|} \quad (4.60)$$

$$\vec{t_i} = \frac{\vec{B_i}}{|\vec{B_i}|} \quad (4.61)$$

4.7.3. Jacobian matrisi

Denklemler (4.58) ve (4.59) ile elde edilen her iki ters kinematik denklemin zamana göre türevleri alınarak Jacobian matrisi elde edilebilir.

Ters kinematik denklemlerinin türevleri üçüncü bölümde Denklemler (3.72) ve (3.79) ile elde edilmişti. Buna göre Denklem (4.58)'in türevi 3. bölümde de elde edildiği gibi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{d_i} = \frac{G_i \cdot v_p + N_i \cdot \omega_p}{T_i} \quad (4.62)$$

$$M_i = (\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i) \quad (4.63)$$

$$Q_i = (\vec{P} + R\vec{B}_i - \vec{A}_{i,1}) \quad (4.64)$$

$$G_i = (Q_i \cdot M_i) M_i \quad (4.65)$$

$$N_i = (Q_i \cdot M_i) (R\vec{B}_i \times M_i - (\vec{s}_i \cdot R\vec{t}_i) Q_i + (Q_i \cdot R\vec{t}_i) \vec{s}_i) - d_i^2 ((M_i \cdot R\vec{t}_i) \vec{s}_i - (\vec{s}_i \cdot R\vec{t}_i) M_i) \quad (4.66)$$

$$T_i = d_i (M_i \cdot M_i) \quad (4.67)$$

Denklem (4.59)'un türevi de şu şekilde elde edilebilir.

$$\dot{\theta}_i = -\frac{1}{\sin \theta_i} (\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i) \cdot \omega_p \quad (4.68)$$

Sonuç olarak mekanizmaya ait Jacobian matrisi şu şekilde yazılabilir.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_i} G_i^T & \frac{1}{T_i} N_i^T \\ 0_{3 \times 3} & -\frac{1}{\sin \theta_i} ((\vec{Rt}_i \times \vec{s}_i))^T \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

Homojen Jacobian matrisini elde etmek için ilk önce mekanizmanın Jacobian matris elemanlarının birimlerini gösteren birimsel jacobian matrisi şu şekilde yazılabilir.

$$DJ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & m & m & m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

Denklem (4.70)'e göre $D_4^3 A_1^3$ tipi bir GSP mekanizmasının Jacobian matrisini homojen hale getirmek için Denklem (4.69)'da verilen Jacobian matrisinin son üç sütununun ilk üç satırı bir karakteristik uzunluğa bölünmelidir.

Bu doktora tez çalışmasında “weighting factor” metodu bu amaç için seçilmişti. Bu metodda ağırlık faktörü olarak tanımlanan karakteristik uzunluk rastgele seçilmektedir. Ancak bir önceki örnekte sunulan geometrik eniyileme çalışmasında $D_1^5D_3$ tipi bir GSP mekanizması için bu uzunluğun uç işlevci platform yarıçapına eşit olarak seçilmesinin mekanizmanın dexterous çalışma uzayını en iyi seviyeye çıkarttığı gösterilmişti. Bu sonuç göz önüne alınarak $D_4^3A_1^3$ mekanizması için de karakteristik uzunluk değeri r_p olarak seçilebilir. Buna göre homojen Jacobian matrisi şu şekilde yazılabilir.

$$J_H = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_i} G_i^T & \frac{1}{r_p T_i} N_i^T \\ 0_{3 \times 3} & -\frac{1}{\sin \theta_i} ((R \vec{t}_i \times \vec{s}_i))^T \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

4.7.4. Dexterous çalışma uzayının hesaplanması

$D_4^3A_1^3$ tipi GSP mekanizması için gerçekleştirilen dexterous çalışma uzayı hesabı bir önceki çalışmada $D_1^5D_3$ tipi GSP için kullanılan yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Ancak $D_4^3A_1^3$ tipi mekanizma için iki farklı dexterous çalışma uzayı hesabı yapılmıştır. Buna göre TDW için uç işlevcinin kartezyen uzayda sabit yönelimle ulaşabildiği tüm noktalardan belirli dexterity karakteristiklerine sahip olanlar seçilmiştir. ODW için ise uç işlevci kartezyen uzayda bir noktada sabit tutulmuş ve o noktada mekanizmanın elde edebileceği tüm yönelimlerden belirli dexterity karakteristiklerine sahip olanlar tespit edilmiştir. Dexterity hesabı için hem LCI hem de σ_{ek} 'nin belirli sınırlarda olması şartı aranmıştır.

Dexterous çalışma uzayı hesabı yapılırken kontrol edilen bacak çarpışmaları yine bir önceki örnekte sunulduğu gibi gerçekleştirilmiştir. Ancak $D_4^3A_1^3$ tipi mekanizmanın özel şekli nedeniyle sadece bacaklar arasındaki çarpışmalar değil aynı zamanda bacakların temel çerçeve ve uç işlevci çerçevesi ile olan çarpışmaları da dikkate alınmıştır. $D_4^3A_1^3$ mekanizması için dikkate alınması gereken diğer bir önemli nokta mekanizmanın temel çerçeve platformunu oluşturan doğru parçaları ile uç işlevci çerçevesini oluşturan doğru parçaları arasında oluşması muhtemel paralelliklerdir.

Bu tür bir durum $D_4^3A_1^3$ mekanizması için istenmeyen bir durumdur. Bunun nedeni böyle bir durumda mekanizmaya ait ters kinematik denklemleri olan Denklemler (4.39) ve (4.40)'ın geçerliliğini yitirmesidir. Bu nedenle dexterous çalışma uzayı hesabında bu nokta da dikkate alınmış ve herhangi bir paralellik nedeni olacak noktalar veya yönelimler dexterous çalışma uzayına dâhil edilmemiştir.

4.7.5. Eniyileme parametreleri ve amaç fonksiyonu

$D_4^3A_1^3$ mekanizması için gerçekleştirilecek geometrik eniyileme işleminin amacı bu mekanizmanın TDW ve ODW değerlerini en üst seviyeye çıkaracak geometrik yapısını tespit etmektir. Yapılan en iyileme işlemi hem TDW hem de ODW için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak en iyi TDW değeri için bir geometrik yapı ve en iyi ODW yapısı için de bir geometrik yapı elde edilmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen geometrik en iyileme amacıyla kullanılan parametreler ve amaç fonksiyon bilgileri sunulmuştur. Gerçekleştirilen geometrik eniyileme işlemlerinde bir önceki uygulamada olduğu gibi gerçeğe yakın ve uygulanabilir geometrik yapılar elde etmek amacıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.3'de yer alan veriler dikkate alınmıştır. $D_4^3A_1^3$ mekanizmasının geometrik en iyileme parametreleri bacak uzunlukları, temel ve uç işlevci çerçevelerini oluşturan doğru parçalarının uzunlukları (r_b ve r_p) ve temel çerçeve doğru parçalarının kübik platform üzerindeki konumunu tespit etmek için kullanılan (h_i) uzunluklarıdır. Bacak uzunlukları tanımlanırken bir bacağın iki farklı durumu, en uzun olduğu durum (d_E) ve en kısa olduğu durum (d_R) belirlenmiştir. Bacak uzunlukları eniyileme sürecine parametre olarak dahil edilirken sadece d_R uzunluğu eniyileştirilmiştir. d_E uzunluğu ise eniyileme süreci içerisinde oluşan d_R 'nin bir önceki çalışmada da yer alan l_{ratio} parametresi ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Benzer şekilde bacak uzunluklarına ait sınır değerler Tablo 4.2'de yer alan değerlere göre belirlenmiştir. Bu sınır değerler ve kullanılan l_{ratio} parametresi aşağıda sunulmuştur.

$$60\text{ mm} \leq d_R \leq 360\text{ mm}$$

$$d_E = l_{ratio} d_R \quad ; \quad l_{ratio} = 1.292 \quad (4.72)$$

Bu çalışmada bir önceki bölümde sunulan çalışmadan elde edilen sonuçlar da göz önüne alınarak, uç işlevci ve temel çerçeve platformları ayrı parametreler olarak eniyileme prosedürüne dâhil edilmemişlerdir. Bunun yerine bacak uzunlukları için yapıldığı gibi ilk olarak r_b eniyileme parametresi olarak seçilmiş ardından Tablo 4.3 kullanılarak r_b ve r_p arasında bir oran (r_{ratio}) belirlenmiştir. Bu oran ve r_b için kullanılan sınır değerleri aşağıda sunulmuştur.

$$100 \text{ mm} \leq r_b \leq 350 \text{ mm} \quad (4.73)$$

$$r_p = r_{ratio} r_b \quad ; \quad r_{ratio} = 0.751$$

Bir diğer geometrik eniyileme parametresi olan h_i değeri $D_4^3A_1^3$ mekanizmasının özel yapısı nedeniyle en fazla r_b 'ye eşit olabilecektir. Dolayısıyla bu parametrenin sınır değerleri şu şekilde kabul edilmiştir.

$$0 \leq h_i \leq r_b \quad (4.74)$$

Uç işlevcinin temel çerçeveye göre yönelimini ifade eden yönelim açıları da eniyileme parametreleri olarak kabul edilmişlerdir. Bu açılar için sınır değerleri şu şekilde belirlenmiştir.

$$-170^\circ \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 170^\circ \quad (4.75)$$

Bu çalışmada bir önceki çalışmadan farklı olarak ODW için de geometrik eniyileme yapıldığı için uç işlevcinin konumunu veren P noktası da bir eniyileme parametresi olarak tanımlanmıştır. Bu noktanın sınır değerleri şu şekilde belirlenmiştir.

$$-200 \text{ mm} \leq P_x, P_y, P_z \leq 200 \text{ mm} \quad (4.76)$$

Son olarak CCC tipi bacaklara ait pasif eklem parametreleri olan (δ_{1i} ve δ_{2i}) ve (Ψ_{1i} ve Ψ_{2i}) de geometrik eniyileme açısından şu şekilde değerlendirilmişlerdir. Ψ_{1i} ve Ψ_{2i} dönel eklemlere ait parametreler oldukları ve silindirik eklemler için dönme açısından herhangi bir kısıtlama tanımlanmadığı için bu parametreler eniyileme prosedürüne dahil edilmemişlerdir. δ_{1i} ve δ_{2i} ise temel çerçeve üzerindeki

doğru parçalarının uzunluklarına bağlı oldukları için bu pasif eklem değişkenleri eniyileme prosedürüne dahil edilmişlerdir. Belirlenen sınır değerleri şu şekilde ifade edilebilir.

$$0 \leq \delta_{1i} \leq r_b \quad ; \quad 0 \leq \delta_{2i} \leq r_p \quad (4.77)$$

Belirlenen bu parametreler göre TDW ve ODW için gerçekleştirilecek geometrik en iyilemeye ait amaç fonksiyon ve eniyileme parametreleri şu şekilde ifade edilebilir. TDW için gerçekleştirilen eniyilemede amaç bu dexterous çalışma uzayının belirlenen dexterity parametrelerini (LCI ve σ_{ek}) sağlayan en fazla nokta sayısına sahip olmasıdır. Dolayısıyla amaç fonksiyon ve bu amaç fonksiyonda kullanılacak parametreler şu şekilde yazılabilir.

$$\text{Enbüyük}(\text{TDW}(LCI, \sigma_{ek}, d_R, r_b, h_i, \alpha, \beta, \gamma)) \quad (4.78)$$

$$LCI \geq 0.2$$

$$\sigma_{ek} \geq 0.2$$

$$60 \text{ mm} \leq d_R \leq 360 \text{ mm}$$

$$100 \text{ mm} \leq r_b \leq 350 \text{ mm}$$

$$0 \leq h_i \leq r_b$$

$$-170^\circ \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 170^\circ$$

Benzer şekilde ODW için amaç fonksiyon ve parametreler de şu şekilde yazılabilir.

$$\text{Enbüyük}(\text{ODW}(LCI, \sigma_{ek}, d_R, r_b, h_i, P_x, P_y, P_z)) \quad (4.79)$$

$$LCI \geq 0.2$$

$$\sigma_{ek} \geq 0.2$$

$$60 \text{ mm} \leq d_R \leq 360 \text{ mm}$$

$$100 \text{ mm} \leq r_b \leq 350 \text{ mm}$$

$$0 \leq h_i \leq r_b$$

$$-200 \text{ mm} \leq P_x, P_y, P_z \leq 200 \text{ mm}$$

4.7.6. Eniyileme sonuçları

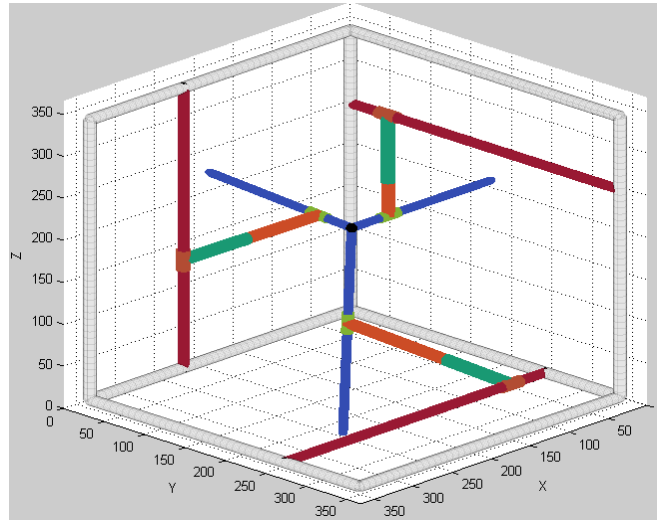
Gerçekleştirilen geometrik eniyileme çalışmasında PSO algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmaya ait parametreler bir önceki bölümde Tablo 4.4'te yer aldığı gibi kabul edilmiştir. TDW için yapılan geometrik eniyilemenin sonuçları Tablo 4.16'da sunulmuştur. Tabloda uzunluk bildiren değişkenlerin birimi mm, açı bildirenlerinki ise °'dir. Bu veriler kullanılarak elde edilen $D_4^3A_1^3$ mekanizması Şekil 4.17'de sunulmuştur. Bu mekanizma için hesaplanan dexterous çalışma uzayı da Şekil 4.18'de çizdirilmiştir. Şekilde çalışma uzayı noktaları mekanizmanın o noktalarda hesaplanan LCI değerlerine göre renklendirilmiştir. ODW için yapılan geometrik eniyilemenin sonuçları ise Tablo 4.17'de, bu veriler kullanılarak elde edilen $D_4^3A_1^3$ mekanizması Şekil 4.19'da ve bu mekanizma için elde edilen ODW'de Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

Tablo 4.156. $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizmasının TDW için eniyilenmesi sonucu elde edilen parametreler

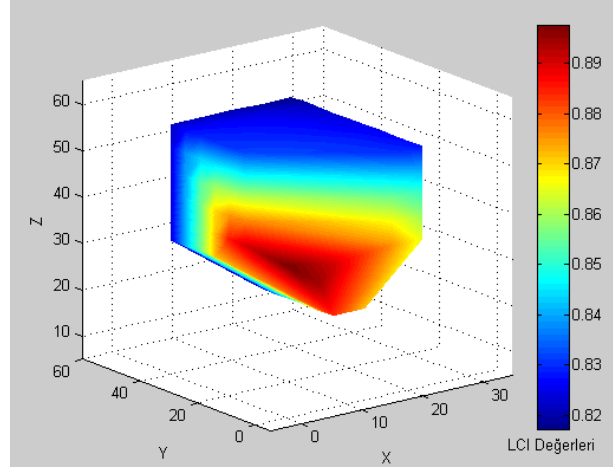
d_R	d_E	r_b	r_p	h_1	h_2	h_3	α	β	γ
188.195	243.147	333.1	250.158	240.316	246.2	213.33	-169	-86.83	77.95

Tablo 4.167. $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizmasının ODW için eniyilenmesi sonucu elde edilen parametreler

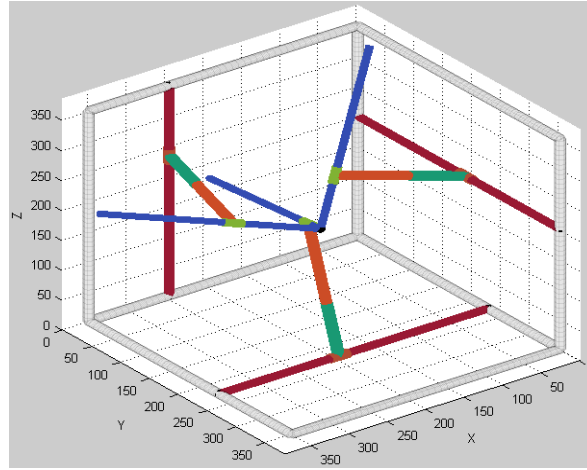
d_R	d_E	r_b	r_p	h_1	h_2	h_3	P_x	P_y	P_z
168.741	218.013	350	262.8	225.18	199.602	245.559	199.15	200	200



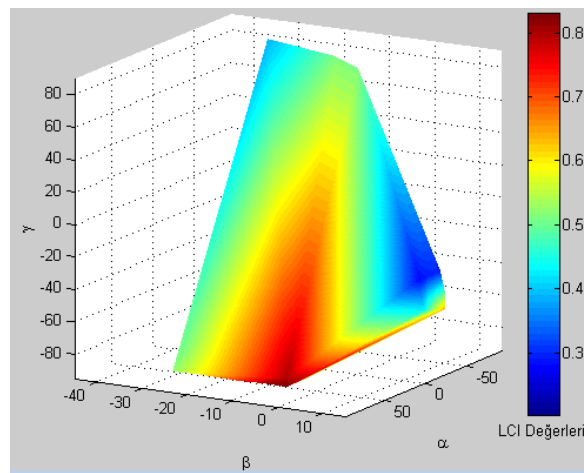
Şekil 4.17. TDW için eniyilenmesi yapılan $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması



Şekil 4.18. $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması için elde edilen eniyi TDW



Şekil 4.19. ODW için eniyilenmesi yapılan $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması



Şekil 4.20. $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması için elde edilen eniyi ODW

Tablo 4.16'ya göre $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması için en iyi yönelim $[\alpha \beta \gamma] = [-169.08^\circ -86.832^\circ 77.949^\circ]$ şeklinde bulunmuştur. Mekanizma en iyi TDW değerine bu yönelimle ulaşabilmektedir. Şekil 4.18'de de görüldüğü gibi mekanizmanın LCI değerleri bütün çalışma uzayı için 0.8'in üzerinde hesaplanmıştır. Bu değerler mekanizmanın dexterity'si konusunda önemli ipuçları vermektedir. Mekanizmanın en yüksek dexterity'e sahip olduğu alanlar kırmızı renk ile renklendirilmiş olan (örneğin $P_x = 5$, $P_y = 30$, ve $P_z = 35$) alanlardır. Şekilde görülen TDW'nin hacmi 24187.5 mm^3 olarak hesaplanmıştır.

ODW açısından bakıldığında $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması en iyi ODW değerine uç işlevcisi $[P_x, P_y, P_z] = [199.15 \ 200 \ 200]$ konumunda iken ulaşmaktadır. Şekil 4.20'ye bakıldığında mekanizmanın tüm ODW'si için LCI değerinin 0.2029'dan daha büyük olduğu görülmektedir. Yine aynı şekle göre mekanizmanın dexterity'sinin β (pitch) açısı ile yakından ilişkili olduğu görülmektedir. Bu açının 5° ile -35° arasındaki değerlerine göre mekanizmanın dexterity'si önemli değişiklikler göstermektedir. Her iki çalışma uzayı tipi (TDW ve ODW) birlikte değerlendirilecek olursa görülebilir ki bu mekanizma TDW'de ODW'den çok daha yüksek LCI değerleri elde etmiştir. Bu durum da göstermektedir ki $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması sabit yönelimli öteleme işlemlerinde daha yüksek performans göstermektedir.

Bu geometrik eniyileme çalışmasında elde edilen sonuçları SP mekanizması ile karşılaştırmak için Lou ve diğ. [92] tarafından SP mekanizması için gerçekleştirilen eniyileme çalışması seçilmiştir. Bu çalışmada yazarlar eniyileme için kontrollü rastgele arama tekniği ismini verdikleri bir yöntem kullanmışlardır. Yazarlar performans değerlendirmesi için $D_4^3A_1^3$ GSP için yapıldığı gibi LCI ve σ_{ek} değerlerini kullanmışlardır. Bu çalışmada yazarlar eniyileme parametreleri olarak temel ve uç işlevci çerçeve yarıçapları (sırasıyla a ve b), bacak bağlantı noktalarının yerinin tespiti için kullanılacak açı değerleri (temel çerçeve için θ ve hareketli platform çerçevesi için ϕ) ve bacak boyları (ρ_0)'nı seçmişlerdir. Yazarlar bütün bu parametreleri bacakların stroke değerleri ile orantılı olacak şekilde eniyileme işlemlerine dahil etmişler ve sonuç olarak da her bir parametrenin stroke değerine

olan oranını elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen parametreler Tablo 4.18’de verilmiştir.

Tablo 4.17. Lou ve diğ. [92]’nin SP için yaptığı en iyileme sonucu elde edilen parametreler

a	b	ρ_o	$\mathcal{G}$	φ
0.586	0.2105	1.2035	1.0027	0.939

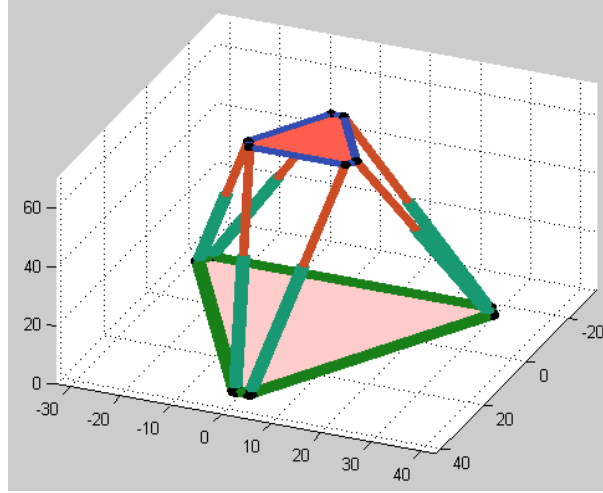
Her iki mekanizma arasında eşit düzeyde bir karşılaştırma yapabilmek için şu işlemler gerçekleştirilmiştir.

i) Tablo 4.18’de verilen parametreler $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması için elde edilen ve en iyi TDW değeri üreten mekanizmanın en uzun bacak boyu ile en kısa bacak boyu arasındaki fark (stroke=54.952 mm) ile çarpılarak boyutsal açıdan eş mekanizmalar elde edilmiştir. Bu çarpım sonucu elde edilen mekanizmanın ölçüleri Tablo 4.19’da verilmiştir.

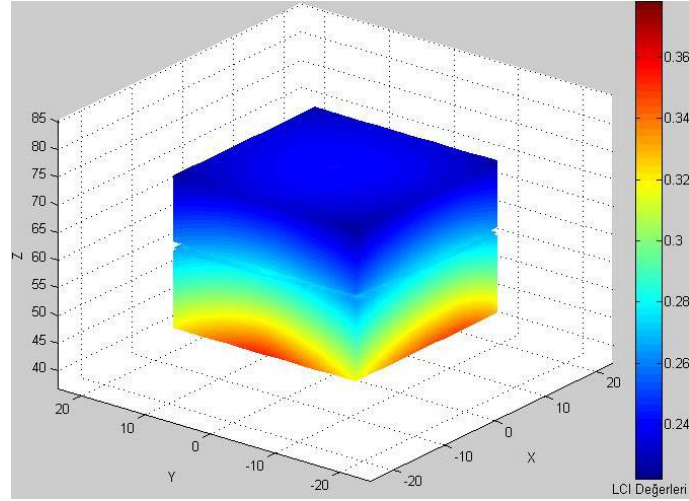
Tablo 4.189. Lou ve diğ. [92]’nin SP için yaptığı en iyileme sonucu elde edilen mekanizma boyutları

a (mm)	b (mm)	ρ_o (mm)	$\mathcal{G}$ (rad)	φ (rad)
32.201	11.567	66.134	1.0027 rad.	0.939 rad.

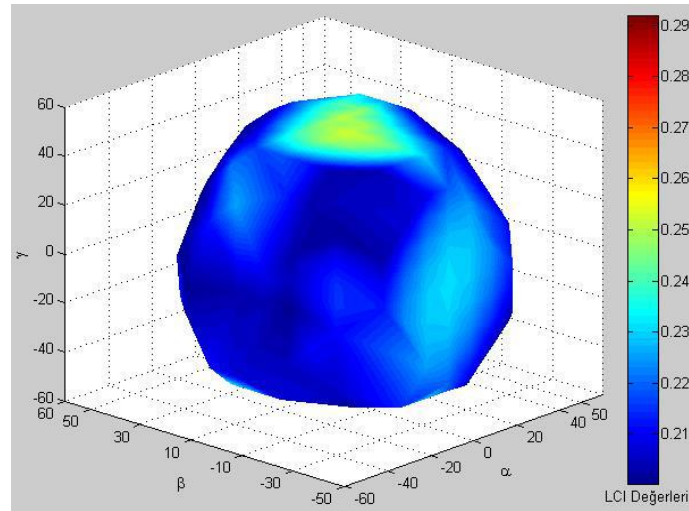
ii) Lou ve diğ. çalışmalarında, bu çalışmada olduğu gibi bir “weighting factor” veya karakteristik uzunluk kullanmamışlardır. Dolayısıyla bu konuda da eşliği sağlamak için karşılaştırma yaparken Lou ve diğerlerinin elde ettiği mekanizma için de homojen Jacobian matrisi hesaplanmıştır. Karakteristik uzunluk olarak bu çalışmada olduğu gibi uç işlevi yarıçapı kullanılmıştır. Tablo 4.19’da verilen ölçüler kullanılarak çizilen SP mekanizması Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Elde edilen SP mekanizması için $D_4^3A_1^3$ GSP mekanizması ile benzer şekilde TDW ve ODW hesabı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar sırasıyla TDW Şekil 4.22’de ve ODW Şekil 4.23’de sunulmuştur. TDW elde edilirken SP mekanizmasının yönelimi ($\alpha = \beta = \gamma = 0$) olarak alınmıştır. Aynı şekilde ODW hesaplanırken de SP mekanizmasının uç işlevcisi $P=[0 \ 0 \ 66.134]$ noktasında sabitlenmiştir.



Şekil 4.21. Tablo 4.10'da yer alan veriler ile çizdirilen SP mekanizması



Şekil 4.22. SP mekanizması için elde edilen TDW



Şekil 4.23. SP mekanizması için elde edilen ODW

Karşılaştırma yapabilmek için her iki mekanizma için elde edilen eniyi ve en kötü LCI değerleri Tablo 4.20’de bir araya getirilmiştir.

Tablo 4.20. $D_4^3A_1^3$ tip GSP ve SP mekanizmaları için en küçük ve en büyük LCI değerleri

Mekanizma	LCI (TDW)		LCI (ODW)	
	En küçük	En büyük	En küçük	En büyük
$D_4^3A_1^3$	0.8174	0.8977	0.2029	0.8314
SP	0.2217	0.378	0.2002	0.286

Şekiller 4.21 ve 4.22’e göre SP mekanizmasının eniyi LCI değerleri TDW için 0.378 civarında ve ODW için de yaklaşık 0.286 olarak elde edilmiştir. Tablo 4.11’e göre de $D_4^3A_1^3$ tipi GSP mekanizması Lou ve diğ. [92] tarafından eniyilemesi yapılan SP mekanizmasına göre TDW açısından yaklaşık iki kat daha yüksek LCI değerleri elde etmiştir. ODW için de her iki mekanizma arasında en küçük değerler birbirine yakın hesaplanmışken diğer tarafında en büyük değerler arasında yine $D_4^3A_1^3$ mekanizması öne çıkmaktadır.

4.8. Sonuçlar

Bu bölümde GSP mekanizmalarının geometrik eniyilemesi gerçekleştirilmiştir. GSP mekanizmalarının performans ölçümünün sağlanabilmesi için ilk olarak bu mekanizmaların homojen Jacobian matrisleri elde edilmiştir. Ardından homojen Jacobian matrisi için LCI ve durum sayısı elde edilmiştir. Bu parametreler mekanizmaların dexterous çalışma uzayının hesaplanmasında kullanılmışlardır. GSP mekanizmalarının geometrik sınırlamalarının nasıl tespit edileceği ve bu doktora tez çalışmasında kullanılan 4 farklı bacak yapısı için aktif ve pasif eklemlerin sınırlarının nasıl belirleneceği bu bölümde tartışılmıştır. Bu bölümde ayrıca PSO algortiması hakkında özet bilgiler verilmiş ve bu algortima kullanılarak iki farklı GSP mekanizmasının geometrik en iyilemesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak şekiller, grafikler ve tablolar ile sunulmuştur.

5. GSP TASARIM VE ANALİZ PLATFORMU

Yeni geliştirilen bir paralel robot mekanizmasının üretiminden önce farklı açılardan test edilebilmesi ancak mekanizmanın benzetiminin yapılabilmesi ile mümkün olmaktadır. Benzetim amacıyla çoğunlukla özel olarak geliştirilmiş bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlar geliştirilme amaçlarına göre sadece mekanizma tasarımı veya performans analizi için ya da hem tasarım hem de performans analizi için kullanılabilmektedirler. Literatürde paralel robot mekanizmalarının benzetimi için kullanılan bazı örnekler şu şekilde sıralanabilir. Inner ve Küçük [78], farklı sayıda bacak yapısına sahip olası tüm GSP mekanizmalarının tasarımının ve analizinin yapılabildiği STEWSIM adını verdikleri bir yazılım geliştirmişlerdir. Ayrıca STEWSIM'i temel alarak 3 ve 6 bacak sayısına sahip GSP mekanizmalarının geometrik eniyilemesinin yapılabildiği STEWOPT isimli diğer bir yazılım da yine aynı yazarlar tarafından geliştirilmiştir [66]. Her iki yazılım da Matlab programı kullanılarak geliştirilmişlerdir. Küçük [77], düzlemsel paralel manipülatörler için Matlab programını kullanarak grafiksel arabirime sahip bir yazılım geliştirmiştir. SIDEPA ismiyle sunulan bu yazılım ile RRR, RPR, PRR ve PPR yapıdaki düzlemsel paralel mekanizmalar için ileri ve ters kinematik, çalışma uzayı ve tekillik analizleri yapılabilmektedir. Gosselin [74], 3 serbestlik dereceli küresel paralel robot mekanizmaları için bir yazılım geliştirmiştir. Bu yazılımla mekanizmalara ait ileri ve ters kinematik, tekillik ve çalışma uzayı analizleri yapılabilmektedir. Wang [75], GSP mekanizmaları için geliştirdiği yazılımında bu mekanizmalar için ileri kinematik ve yörünge analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu yazılım Visual C++ kullanılarak Ding [76] tarafından daha önce geliştirilmiş bir yazılıma ek olacak şekilde tasarlanmıştır.

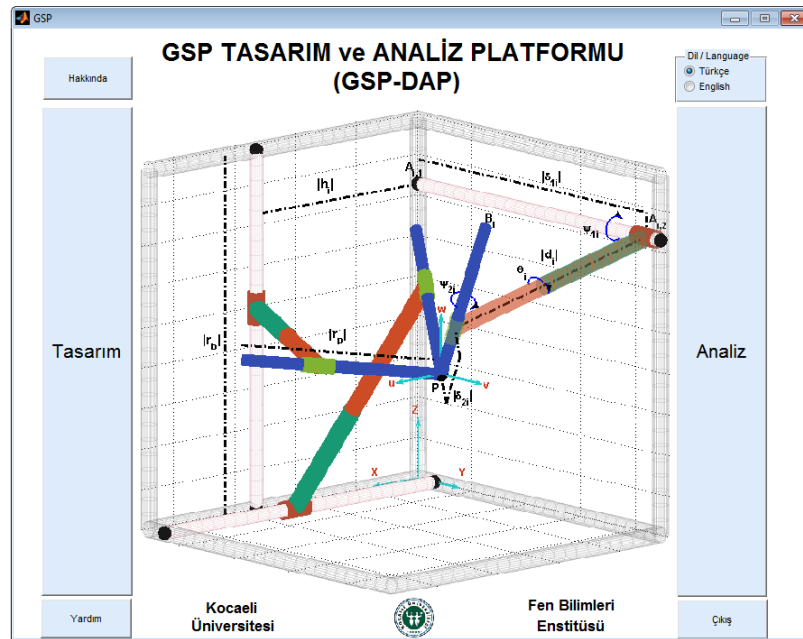
Bu tez çalışmasında da 2. bölümde tablolar halinde önerilen GSP mekanizmalarının tasarımının ve analizinin yapılabilmesi amacıyla Matlab programı kullanılarak bir benzetim programı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılıma “GSP Tasarım ve Analiz Platformu” kısaca GSP-DAP ismi verilmiştir. Bu yazılımın literatürde yer alan çalışmalardan temel farkı mekanizma tasarımında kullanılabilecek bacak yapılarıdır.

Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan bacak yapılarında genellikle aktif eklem olarak prizmatik ve dönel eklemler kullanılırken pasif eklemler olarak da küresel, üniversal(kardan), dönel ve prizmatik eklemler tercih edilmiştir. GSP-DAP kullanılarak geliştirilecek mekanizmalarda ise literatürde yer alan eklem tiplerine ek olarak silindirik eklemler hem aktif hem de pasif eklemler olarak kullanılabilir.

Bu bölümde GSP-DAP yazılımının tanıtımı yapılacak ayrıca örnek bir GSP mekanizmasının hem tasarımı hem de performans analizi bu yazılım kullanılarak sunulacaktır.

5.1. GSP-DAP Açılış Ekranı

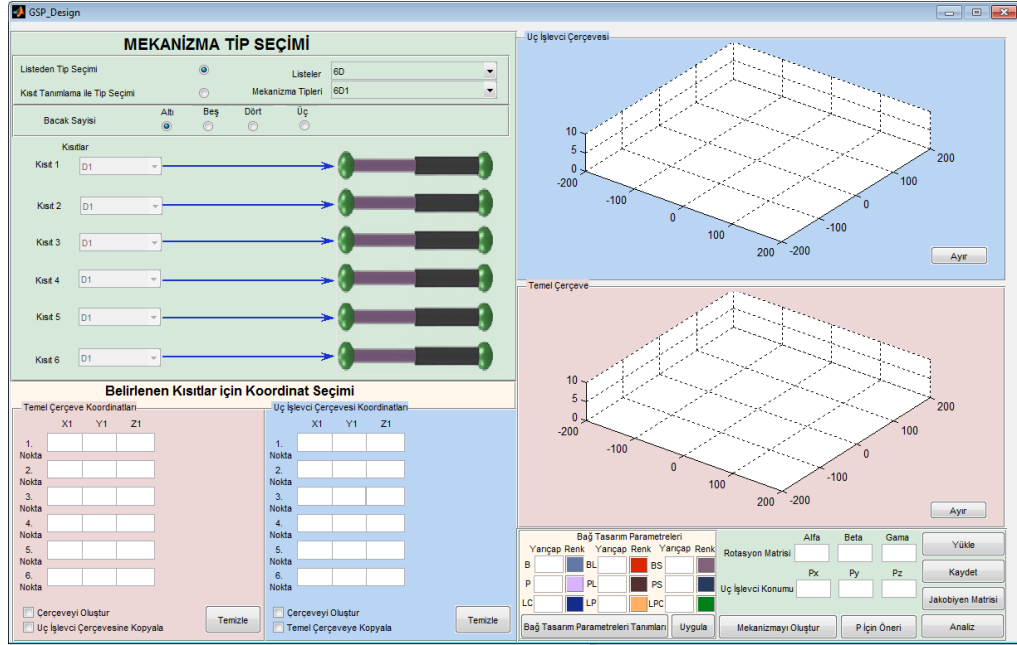
GSP-DAP yazılımının açılış ekranı Şekil 5.1’de verilmiştir. Bu ekrandan kullanıcı temel seçim işlemlerini gerçekleştirmektedir. Dil seçeneği olarak hem Türkçe hem de İngilizce desteği verilmiştir. Bu ekranda kullanıcı Yardım butonu ile programın nasıl kullanıldığının açıklandığı metin dosyasına erişebilmektedir. Hakkında butonu ise GSP-DAP yazılımının telif hakları konusunda bilgi vermek amacıyla kullanılmaktadır. Programın iki temel amacı olan GSP tasarım ve analiz işlemlerine erişim ise ekranın sağında ve solunda yer alan iki buton ile sağlanmaktadır. Son olarak Çıkış butonu programı sonlandırmak için kullanılmaktadır.



Şekil 5.1. GSP-DAP açılış ekranı

5.2. Tasarım

Tasarım butonu kullanılarak GSP mekanizmalarının geometrik olarak tasarımının yapıldığı ekrana erişilmektedir. Bu ekran Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.2. GSP-DAP tasarım ekranı

Tasarım ekranı 4 ana kısımdan oluşmaktadır.

5.2.1. Mekanizma tip seçimi

Mekanizma Tip Seçimi isimli kısım kullanıcının bu tez çalışmasında önerilen 195 adet GSP mekanizma tipinden birini seçmesi için kullanılmaktadır. Kullanıcı iki farklı yöntem kullanarak mekanizma seçebilecektir. Birincisi listeden tip seçimidir. Bu yöntem tercih edildiğinde “Listeler” ve “Mekanizma Tipleri” isimli iki seçenek aktif hale gelecektir. Kullanıcı listeler seçeneğinden 6D, 5D1A, 4D2A ve 3D1A listelerinden birini ve “Mekanizma Tipleri” isimli seçenekten de seçilen listede yer alan mekanizmalardan birini seçebilecektir. Diğer mekanizma seçimi yöntemi ise kısıt tanımlama ile tip seçimidir. Bu yöntemde kullanıcı mekanizmanın temel çerçevesi ve uç işlevci platformu arasında yer alacak altı tane kısıt tanımlı yapacaktır. Bu kısıtlar D_1 , D_2 , D_3 , D_4 ve A_1 kısıtlarıdır. Her iki yöntemde de yapılan seçime göre kullanılacak bacak şekilleri ilgili kısıt karşısında çizilecektir. Bu kısımda ayrıca mekanizma için bacak sayısı da belirtilebilmektedir. Mekanizma seçilen mekanizma

tipine göre üç, dört, beş veya altı bacaklı olabilecektir. Seçilebilecek bacak sayısı yapılan mekanizma seçimi ile doğrudan ilgilidir. Bunun nedeni mekanizma üzerinde tanımlanacak kısıt sayısının altı olmasıdır. Altı tane kısıt her bir bacakta bir kısıt kullanılarak altı bacak ile gerçekleştirilebilir. Ancak altı kısıtı daha az bacak sayısı ile gerçekleştirmek için iki kısıtı bir bacak üzerinde birleştirmek gereklidir. Birleştirilebilecek kısıt tipleri D_4 ve A_1 tipleridir. Bu iki kısıt ayrı ayrı bacaklar ile sağlanabileceği gibi tek bir bacak ile de sağlanabilmektedirler. Buna göre mekanizmadan bacak eksiltebilmek için uygun kısıt yapısının seçilmesi gerekir. Örneğin 5D1A sınıfından $D_1^4D_4A_1$ kısıt yapısına sahip mekanizma seçildiğinde bu mekanizmanın bacak sayısı hem altı hem beş olabilecektir. Beş bacak sayısına A_1 kısıtı ile D_4 kısıtının aynı bacak üzerinde birleştirilmesi ile ulaşılmaktadır. Bu durum aşağıdaki şekilde görülmektedir.

Şekil 5.3. GSP-DAP mekanizma tip seçimi

5.2.2. Koordinat tanımlama

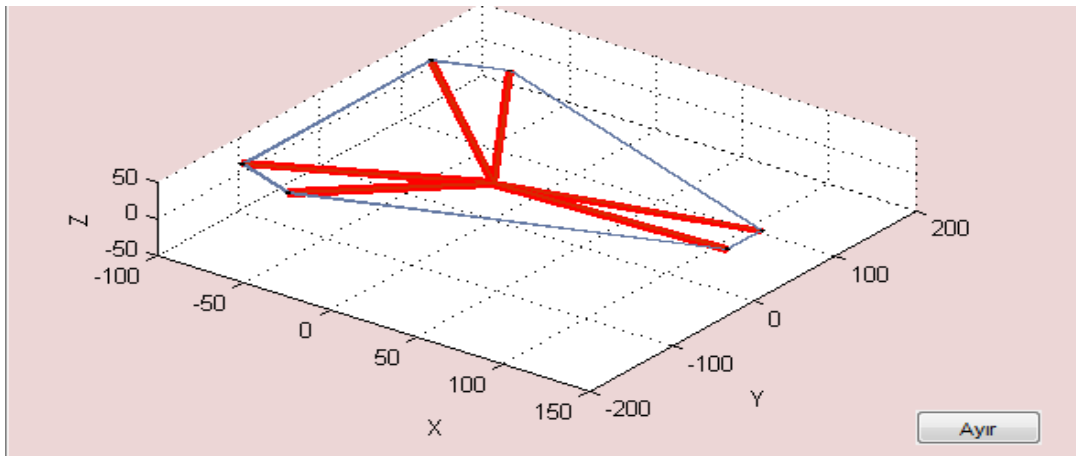
Tasarım ekranının ikinci kısmı kullanıcının seçtiği mekanizma için temel ve uç işlevci çerçevelerinin koordinatlarını girdiği kısımdır. Bu kısım seçilen mekanizmaya bağlı olarak dinamik olarak değişmektedir. Seçilen kısıt tipine göre her iki çerçeve üzerinde uygun geometrik nesnenin koordinatlarının girilebilmesi için alanlar oluşturulmaktadır. Örneğin D_1 tipi bir kısıt için her iki çerçeve üzerinde üç boyutlu uzayda tanımlı bir “nokta” koordinatı girebilmek için üç adet (X,Y,Z) alan oluşturulmaktadır. Diğer taraftan D_3 tipi bir kısıt için temel çerçeve üzerinde tanımlanacak doğrunun başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatlarının girilebilmesi

için altı adet alan uç işlevci çerçevesi üzerinde ise tanımlanacak nokta için üç adet alan oluşturulmaktadır. Aşağıdaki şekilde D_3^6 tipi bir mekanizma için koordinat tanımlamaları görülmektedir.

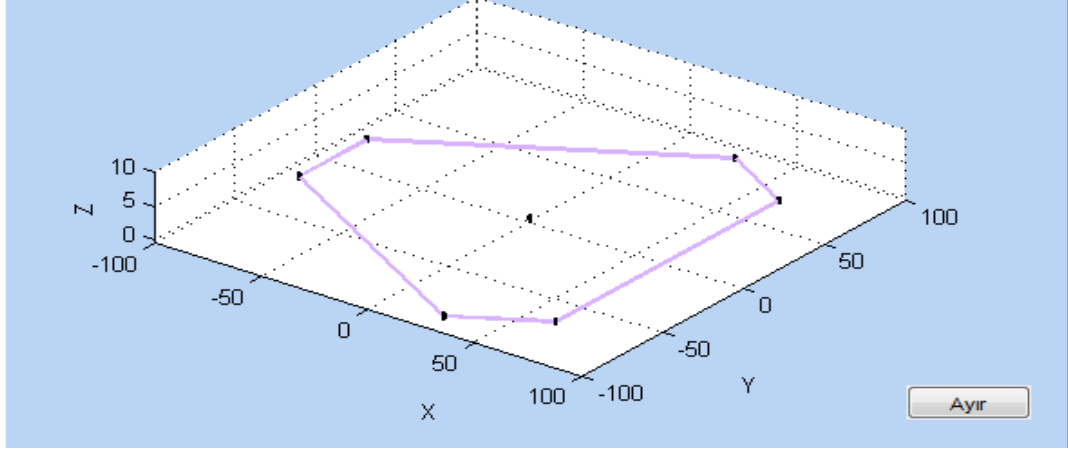
Belirlenen Kısıtlar için Koordinat Seçimi										
Temel Çerçeve Koordinatları							Uç İşlevci Çerçevesi Koordinatları			
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2		X1	Y1	Z1
1. Doğru	145.131	-20.932	30	0	0	0	1. Nokta	64.147	-69.174	0
2. Doğru	145.131	20.932	30	0	0	0	2. Nokta	64.147	69.174	0
3. Doğru	-54.437	136.153	30	0	0	0	3. Nokta	27.833	90.14	0
4. Doğru	-90.693	115.221	30	0	0	0	4. Nokta	-91.98	20.966	0
5. Doğru	-90.693	-115.22	30	0	0	0	5. Nokta	-91.98	-20.966	0
6. Doğru	-54.437	-136.15	30	0	0	0	6. Nokta	27.833	-90.14	0
☐ Çerçeveyi Oluştur ☐ Uç İşlevci Çerçevesine Kopyala							☐ Çerçeveyi Oluştur ☐ Temel Çerçeveye Kopyala			
Temizle							Temizle			

Şekil 5.4. GSP-DAP koordinat girişi

Koordinat girişi tamamlandıktan sonra kullanıcı isterse “Çerçeveyi Oluştur” seçeneğini işaretleyerek hem temel çerçeve hem de uç işlevci çerçevesinin nasıl bir şekle sahip olduğunu görebilir. Şekiller 5.5 ve 5.6’da D_3^6 tipi mekanizma için temel çerçeve ve uç işlevci çerçevesi şekilleri görülmektedir. Her iki şekil üzerinde yer alan “Ayır” isimli butonlar kullanıcının çerçeve şekillerini detaylı incelemesine olanak sağlar. Bu butonlara tıklanıldığında ilgili çerçeve şekli tasarım platformundan ayrı bir şekil olarak yeniden çizilir.



Şekil 5.5. Temel çerçeve



Şekil 5.6. Uç işlevci çerçevesi

Koordinat seçimi kısmında yer alan “Uç İşlevci Çerçevesine Kopyala” ve “Temel Çerçeveye Kopyala” isimli seçenekler kullanıcının benzer çerçeve şekilleri oluşturmak istediği zaman kolaylık sağlar. Bu sayede kullanıcı bir çerçeve için girdiği koordinatları diğerine tek bir işlem ile kopyalayabilir. Son olarak “Temizle” isimli butonlar ise ilgili çerçeve için girilen koordinatların silinmesi için kullanılır.

5.2.3. Tasarım ana menüsü

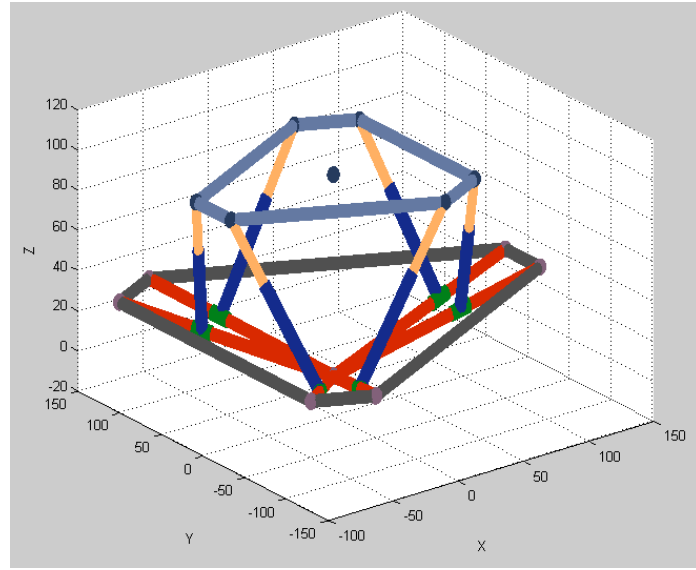
Çerçeve belirlenmesi işlemlerinin ardından mekanizmanın tam hali Şekil 5.7’de yer alan GSP-DAP tasarım kısmı ana menüsünden oluşturulabilir.

Bağ Tasarım Parametreleri						Alfa			Beta			Gama							
Yarıçap	Renk	Yarıçap	Renk	Yarıçap	Renk	Rotasyon Matrisi			Px	Py	Pz	Uç İşlevci Konumu							
B	3	BL	3	BS	3.9	0			0	0	0	0			0	100	Yükle		
P	2.9	PL	2.9	PS	3.8												Kaydet		
LC	3.5	LP	2.7	LPC	3.8												Jakobiyen Matrisi		
Bağ Tasarım Parametreleri Tanımları						Uygula						Mekanizmayı Oluştur			P için Öneri			Analiz	

Şekil 5.7. GSP-DAP tasarım kısmı ana menüsü

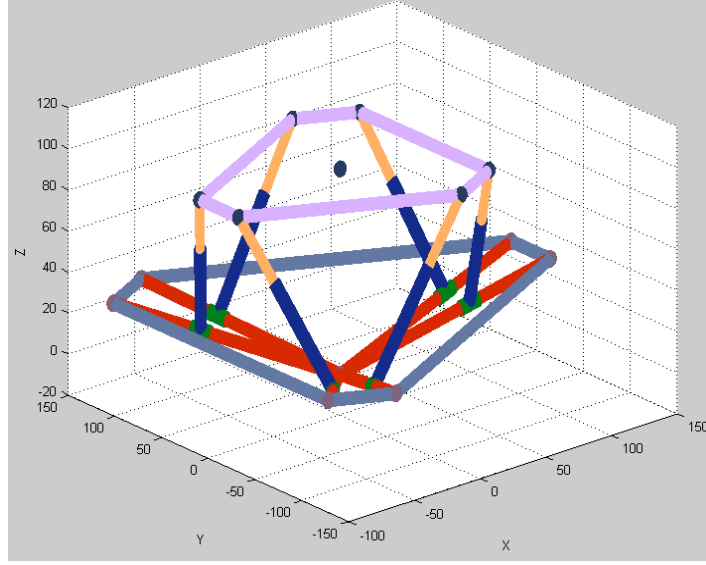
Tasarım kısmı ana menüsü üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm kullanıcının tasarlamış olduğu mekanizmayı tam olarak oluşturduğu kısımdır. Bu bölümde yer alan “Mekanizmayı Oluştur” butonu ile tasarlanan mekanizma ayrı bir şekil olarak ekrana çizdirilebilmektedir. Şekil 5.8’de D_3^6 mekanizmasının tam hali görülmektedir. Bu bölümde ayrıca kullanıcı, GSP-DAP analiz kısmında başlangıç konumu olarak da kullanılacak olan yönelim matrisi açılarını ve uç işlevci konumu (P) bilgilerini de tanımlayabilmektedir. Seçilen mekanizma için kullanıcı tarafından başlangıç konumu

belirlenemediği durumlarda ise “P için Öneri” butonu kullanılabilir. Bu butona tıklanıldığında ilk olarak seçilen mekanizma için temel ve uç işlevci çerçeveleri koordinatlarının göz önüne alınması ile belirlenen bir arama uzayı oluşturulur. Bu uzayda yer alan P noktaları için herhangi bir kısıt (Örneğin minimum ve maksimum bacak boyları) dikkate alınmadan mekanizmanın ters kinematik işlemi gerçekleştirilir. İlk bulunan uygun P noktası mekanizma için başlangıç pozisyonu olarak kullanıcıya önerilir.



Şekil 5.8. GSP-DAP ile oluşturulan D_3^6 mekanizması

“Bağ Tasarım Parametreleri” isimli ikinci bölümde ise kullanıcı tasarladığı mekanizmanın görüntüsü üzerinde değişiklik yapabilir. Yapacağı değişiklikler mekanizmanın bağlarının yarıçap değerleri ve renk seçenekleridir. Kullanıcı hem temel çerçevede yer alan doğrular için hem de uç işlevci çerçevesinde yer alan doğrular için renk ve yarıçap değerleri belirleyebilir. Ayrıca mekanizmanın bacaklarına ait aktif eklem silindiri, aktif eklem pistonu ve pasif eklem silindiri için de benzer şekilde tanımlamalar yapabilir. Bu bölümde yer alan “Uygula” butonu kullanıcının yapmış olduğu tercihlerin mekanizma üzerindeki etkisini görmek için kullanılmaktadır. Bu butona tıklanıldığında mekanizma yeni yarıçap ve renk değerleri ile çizilecektir. Şekil 5.9’da D_3^6 mekanizması için yapılan tercihler sonucunda çizdirilen mekanizma görünmektedir. Bu bölümde yer alan “Bağ Tasarım Parametreleri Tanımları” isimli buton yine bu bölümde yer alan kısaltmaların açıklamalarını gösteren bir not görüntülemektedir. Örneğin, B: Temel çerçeve gibi.



Şekil 5.9. Görüntüsü değiştirilen D_3^6 tip GSP

Tasarım kısmı ana menüsünün son bölümü tasarımı tamamlanmış mekanizmanın kayıt edilmesi, daha önceden kaydedilen mekanizmanın yeniden yüklenmesi ve seçilen mekanizma için sembolik Jacobian matrisinin oluşturulması için kullanılır. “Jacobian Matrisi” isimli buton kullanıcı için çok fazla işlem yükü getiren Jacobian matrisini sembolik olarak oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu buton sayesinde kullanıcı tasarladığı mekanizmaya ait Jacobian matrisini herhangi bir işlem yapmadan elde edebilecektir. Şekil 5.10’da D_3^6 mekanizması için elde edilen sembolik Jacobian matrisi görülmektedir.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_1}(v_1 \times ((RB_1 + P - A_{11}) \times v_1))^T & \frac{1}{d_1}(RB_1 \times (v_1 \times ((RB_1 + P - A_{11}) \times v_1)))^T \\ \frac{1}{d_2}(v_2 \times ((RB_2 + P - A_{21}) \times v_2))^T & \frac{1}{d_2}(RB_2 \times (v_2 \times ((RB_2 + P - A_{21}) \times v_2)))^T \\ \frac{1}{d_3}(v_3 \times ((RB_3 + P - A_{31}) \times v_3))^T & \frac{1}{d_3}(RB_3 \times (v_3 \times ((RB_3 + P - A_{31}) \times v_3)))^T \\ \frac{1}{d_4}(v_4 \times ((RB_4 + P - A_{41}) \times v_4))^T & \frac{1}{d_4}(RB_4 \times (v_4 \times ((RB_4 + P - A_{41}) \times v_4)))^T \\ \frac{1}{d_5}(v_5 \times ((RB_5 + P - A_{51}) \times v_5))^T & \frac{1}{d_5}(RB_5 \times (v_5 \times ((RB_5 + P - A_{51}) \times v_5)))^T \\ \frac{1}{d_6}(v_6 \times ((RB_6 + P - A_{61}) \times v_6))^T & \frac{1}{d_6}(RB_6 \times (v_6 \times ((RB_6 + P - A_{61}) \times v_6)))^T \end{bmatrix}$$

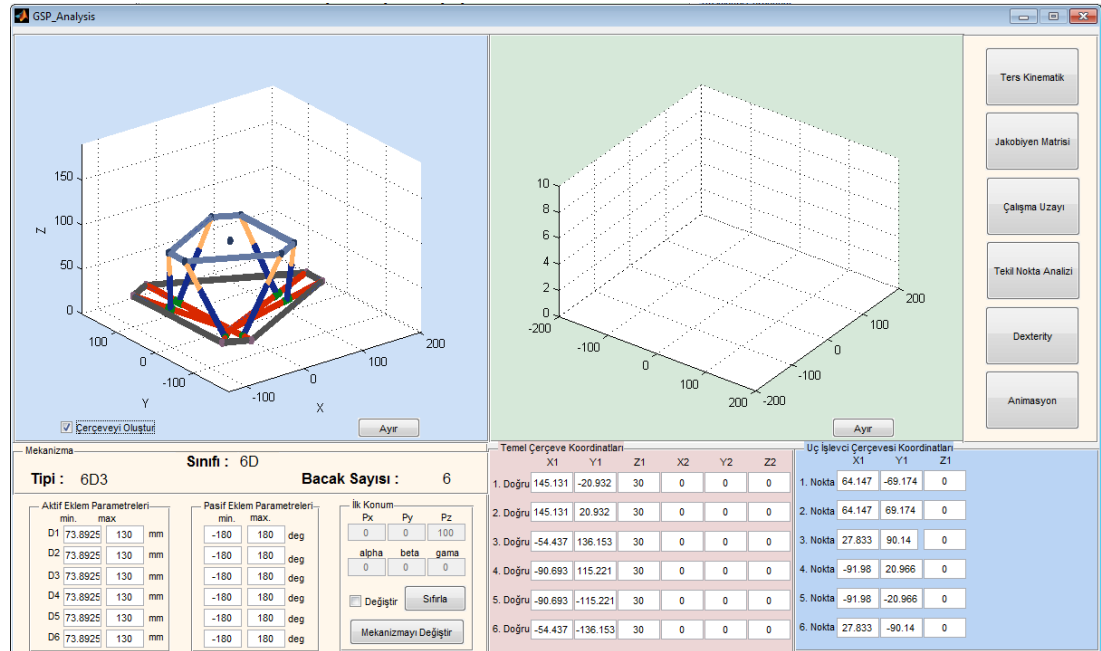
Şekil 5.10. D_3^6 tip GSP mekanizması için elde edilen sembolik Jacobian matrisi

“Kaydet” isimli butona tıklanıldığında tasarlanan mekanizma kullanıcının belirleyeceği bir isim ile programın ana dizininde yer alan My_Mechanisms isimli

klasöre kaydedilecektir. Aynı şekilde “Yükle” isimli buton da kayıt işleminin tam tersine aynı klasörde yer alan mekanizmaların tasarım formu üzerine yüklenmesini sağlamaktadır. Son olarak “Analiz” isimli buton ise tasarımı yapılan mekanizmanın GSP-DAP analiz kısmına taşınması için kullanılır.

5.3. Analiz

GSP-DAP analiz kısmına hem açılış ekranı üzerinde yer alan hem de tasarım kısmı ana menüsünde yer alan “Analiz” isimli butonlar kullanılarak ulaşılabilmektedir. Şekil 5.11’de analiz kısmı ana formu sunulmuştur.



Şekil 5.11. GSP-DAP analiz kısmı ana formu

GSP-DAP analiz kısmı dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm Mekanizmaya ait yapısal özelliklerin ve kısıtlılıkların yer aldığı “Mekanizma” isimli bölümdür. Bu bölümde mekanizmaya ait sınıf, tip ve bacak sayısı bilgileri yer almaktadır. Ayrıca mekanizmanın analizinde kullanılacak olan yapısal parametre tanımları da bu bölümden yapılmaktadır.

5.3.1. Mekanizma

Seçilen mekanizmaya ait yapısal parametreler bu bölümde tanımlanmaktadır. Bu parametreler için örnek değerler GSP-DAP tarafından kullanıcıya önerilir. Bununla

birlikte kullanıcı isterse bu parametrelerde değişiklik yapabilir. Seçilen mekanizma ile ilgili parametreler şu şekilde sıralanabilir.

Aktif Eklem Parametreleri: Mekanizmanın her bir bacağına ait en az ve en çok aktif eklem parametre sınırlarıdır. Bu sınırlar eğer ilgili bacak ile sağlanan kısıt bir uzaklık kısıtı ise mm olarak, eğer bir açısal kısıt ise de derece olarak tanımlanmaktadır. Örneğin Şekil 5.11'de yer alan D_3^6 mekanizmasının tüm bacakları CPS eklem yapısına sahiptir ve aktif eklem prizmatik eklemdir. Bu bacaklar için sınırlar GSP-DAP tarafından en az 73.8925 mm ve en çok 130 mm olarak önerilmiştir.

Pasif Eklem Parametreleri: Mekanizmanın her bir bacağına ait pasif eklemler için en az ve en çok sınırların belirlenmesi amacıyla kullanılan parametrelerdir. Şekil 5.11'de yer alan D_3^6 mekanizması için iki farklı pasif eklem bulunmaktadır. Bunlardan ilki küresel eklemdir. Bu eklem için sınır değerleri belirlenirken bacağına ait anlık birim vektör ile yine bacağın başlangıç konumundaki birim vektörü arasındaki açı dikkate alınır. Belirlenen sınırlar bu açı için kullanılmaktadır. Şekil 5.11' de bu değerler -180° ve 180° olarak seçilmiştir. D_3^6 mekanizması için diğer pasif eklem ise temel çerçeve üzerinde yer alan silindirik eklem parametreleridir. Bu ekleme ait iki farklı parametre vardır. Birincisi eklemin dönel kısmı nedeniyle oluşan açısal fark, diğeri ise eklemin ötelenmesi nedeniyle oluşan doğrusal farktır. GSP-DAP ile analiz yapılırken bir silindirik eklemin pasif açısal kısmı için herhangi bir sınır değeri belirtilmemektedir. Yani silindirik eklemin üzerinde yer aldığı doğrunun etrafında serbestçe dönebildiği kabul edilmektedir. Doğrusal fark için sınır değeri ise eklemin üzerinde yer aldığı doğru parçasının uzunluğu ile belirlenmektedir. Eğer gerçekleştirilen bir hareket silindirik eklemin üzerinde yer aldığı doğru parçasının dışında bir noktaya taşıyacaksa doğrusal fark için sınır değerlerinin aşıldığı kabul edilmektedir. (Bu işlemlerin nasıl yapıldığı Bölüm 4'te detaylı olarak anlatılmıştı.) Sonuç olarak kullanıcıya sadece uç işlevci tarafında yer alan küresel eklem ile ilgili sınır değerleri belirleme imkanı verilmiştir.

İlk Konum: Bu bölümde yer alan değişkenler mekanizmanın tasarımı yapılırken belirlenen uç işlevci konumu P ve uç işlevci yönelimini belirleyen α , β ve γ açılarıdır. Bu değerler kullanılarak mekanizmanın ilk konumu oluşturulmaktadır. İlk konum bir önceki madde de belirtildiği gibi pasif küresel eklemlerin sınır değerlerini aşp

aşmadıklarını tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Kullanıcı isterse “Değiştir” seçeneğini kullanarak mekanizmaya ait ilk konum parametrelerini değiştirebilir ve ya “Sıfırla” isimli butonu kullanarak ilk tasarlandığı duruma geri döndürebilir. Bu kısımda ayrıca kullanıcıya mekanizmayı değiştirme imkanı da sunulmuştur. Kullanıcı “Mekanizmayı Değiştir” butonuna tıklayarak farklı bir mekanizma seçebilir ve o mekanizma için analiz işlemlerini gerçekleştirebilir.

5.3.2. Çerçeve koordinat değişiklikleri

GSP-DAP analiz kısmının ikinci bölümü “Temel Çerçeve Koordinatları” ve “Uç İşlevci Çerçevesi Koordinatları” isimli alanlardır. Bu alanlarda mekanizmaya ait temel ve uç işlevci çerçevelerinin koordinat bilgileri yer alır. Kullanıcı elde ettiği analiz sonuçlarına göre burada değişiklikler yapıp mekanizmanın analizini tekrarlayabilir.

5.3.3. Çizim alanı

GSP-DAP analiz kısmının üçüncü bölümü, mekanizmanın ve analiz sonuçlarının gösterildiği çizim alanlarıdır. Şekil 5.11’ de mekanizmaya ait çizim alanında D_3^6 tip GSP mekanizması yer alırken analiz sonuçlarının yer aldığı ana çizim alanı henüz herhangi bir analiz işlemi yapılmadığı için boş olarak gösterilmiştir.

5.3.4. Analiz ana menüsü

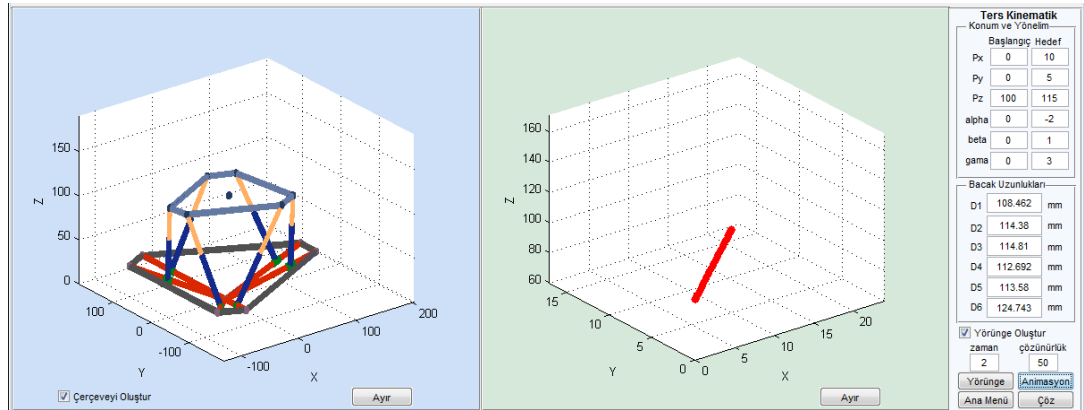
GSP-DAP analiz kısmının ana menüsü dördüncü bölümde yer almaktadır. Bu bölümde yer alan “Ters Kinematik”, “Jacobian Matrisi”, “Çalışma Uzayı”, “Tekil Nokta Analizi”, “Dexterity” ve “Animasyon” butonları kullanılarak mekanizmanın analizi gerçekleştirilmektedir. Bu butonlar ve bunlara ait işlevler şu şekilde sıralanabilir.

Ters kinematik: Ana menüde yer alan ters kinematik butonu kullanıcıya tasarladığı mekanizma için ters kinematik analizi yapması imkanını verir. Örneğin D_3^6 mekanizması için yapılan bir ters kinematik uygulaması Şekil 5.12’de sunulmuştur. Şekilde D_3^6 mekanizmasının uç işlevcisi için başlangıç konumu olarak $[P_x \ P_y \ P_z]=[0 \ 0 \ 100]$ ve başlangıç yönelim açıları olarak $\alpha=0$, $\beta=0$ ve $\gamma=0$ seçilmiştir. Hedef

konum olarak da $[P_x \ P_y \ P_z]=[10 \ 5 \ 115]$ ve hedef yönelim açıları olarak da $\alpha=-2$, $\beta=1$ ve $\gamma=3$ şeklinde verilmiştir. Ters kinematik menüsünde yer alan “Çöz” isimli butona tıklanıldığında mekanizmaya ait ters kinematik denklemleri çözülmekte ve sonuç olarak elde edilen bacak uzunlukları “Bacak Uzunlukları” isimli alanda gösterilmektedir. Ayrıca “Yörünge Oluştur” seçeneği seçildiğinde kullanıcı belirlediği başlangıç ve hedef parametreleri arasında bir yörünge oluşturabilir. Bu yörünge [94] de verilen “Kane transition function” yöntemiyle hesaplanmaktadır. Bu yöntemle uç işlevciye ait tüm parametreler için (konum ve yönelim bildiren parametreler örn. P_x) zamana bağlı konum yörüngesi şu şekilde ifade edilebilir.

$$y(t) = y_0 + (y_f - y_0) \frac{t - t_0}{t_f - t_0} - \frac{y_f - y_0}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{t - t_0}{t_f - t_0}\right) \quad (5.1)$$

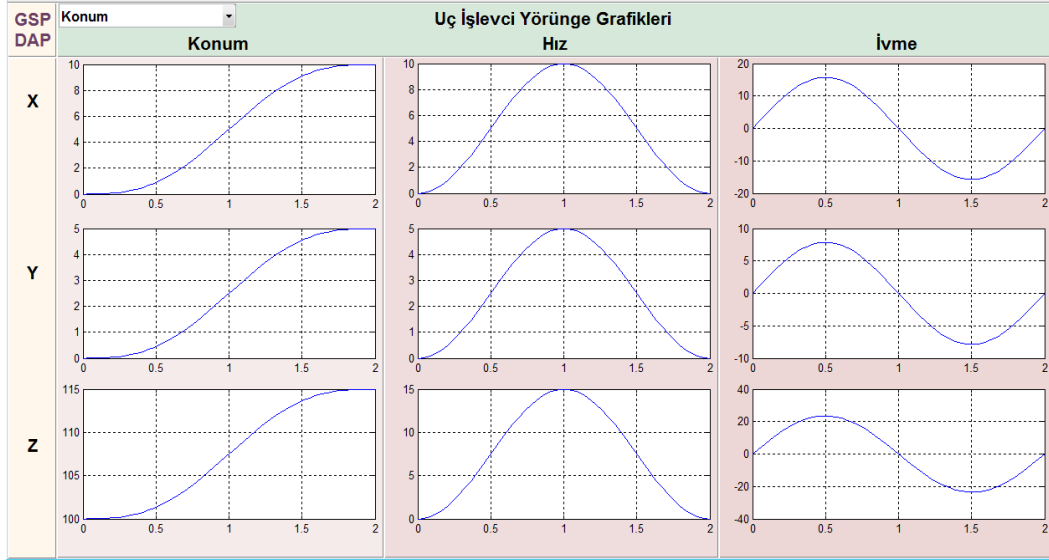
Denklemde, t zaman değişkeni, t_0 başlangıç zamanı, t_f bitiş zamanı, $y(t)$ zamana bağlı konum fonksiyonu y_0 başlangıç konumu ve y_f hedef konumu ifade etmektedir. Bir kez konum için Denklem (5.1) elde edildikten sonra hız ve ivmeye ait yörüngeler Denklem (5.1)’in zamana göre sırasıyla birinci ve ikinci türevlerinin alınmasıyla elde edilmektedir.



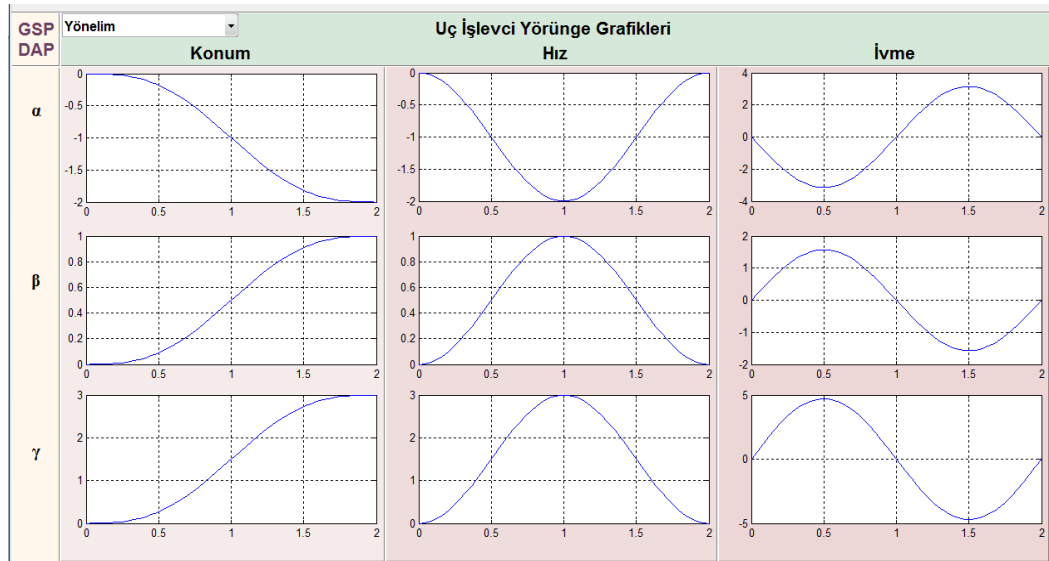
Şekil 5.12. GSP-DAP ters kinematik analizi

Ters kinematik menüsünde girilen “zaman” verisi yörüngeyi bitiş zamanını (t_f) ifade etmektedir. Başlangıç süresi ise 0 olarak alınmaktadır. “çözünürlük” verisi ise başlangıç ve bitiş konumları arasında oluşturulacak olan adım sayısını belirtmektedir. Bu verilere göre başlangıç ve bitiş konumları da dahil olmak üzere bu iki konum arasında girilen “çözünürlük” verisi kadar ara nokta oluşturulmaktadır. Hesaplanan

yörüngeye ait grafik “Yörünge” isimli butona tıklanması ile görülebilmektedir. Şekil 5.13’de konum değişkenlerine ait örnek yörünge grafikleri Şekil 5.14’de ise yönelim değişkenlerine ait örnek yörünge grafikleri görülmektedir.



Şekil 5.13. Konum değişkenleri yörünge grafikleri

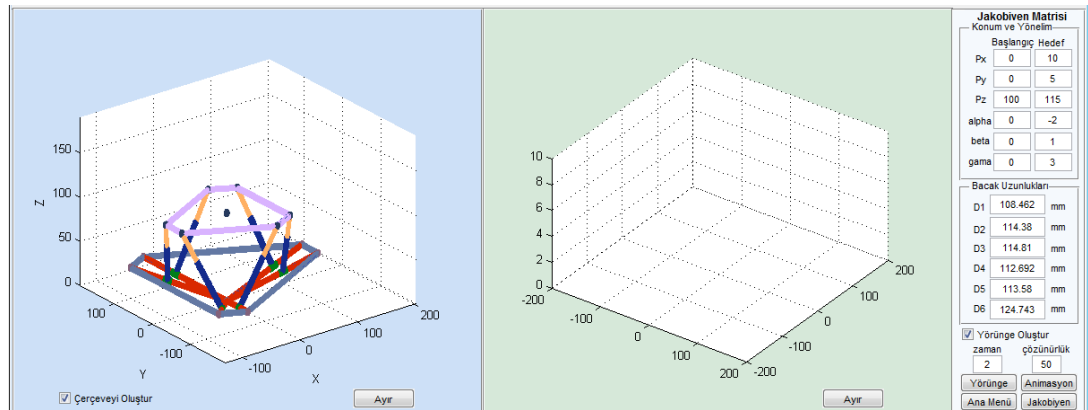


Şekil 5.14. Yönelim değişkenleri yörünge grafikleri

Ters kinematik menüsünde yer alan “animasyon” menüsü mekanizmanın hareketini seçilen yörüngelere bağlı olarak göstermek için kullanılmaktadır. Bu butona tıklanıldığında oluşturulan konum değişkenlerine ait yörünge ana çizim alanında mavi renkle çizdirilmektedir. Ardından mekanizma oluşturulan yörüngelere göre hareketini gerçekleştirmektedir. Mekanizma ile eş zamanlı olarak ana çizim alanında

gerçekleştirilen her yörünge noktası kırmızı renk ile boyanmaktadır. Animasyon mekanizmanın yörünge üzerindeki hareketinin tamamlanmasıyla sona ermektedir. Şekil 5.12’de animasyon sonucu oluşan çizimler görülebilmektedir. Son olarak “Ana Menü” isimli buton kullanıcının GSP-DAP analiz formu ana menüsüne dönüşü için kullanılmaktadır.

Jacobian matrisi: Ana menüde yer alan “Jacobian Matrisi” isimli butona tıklanıldığında ana menünün yerini Jacobian matrisi için hazırlanan menü almaktadır. Bu menüde yer alan kontrollerin büyük bir kısmı bir önceki seçenekte anlatılan ters kinematik menüsü ile aynıdır; dolayısıyla tekrar olmaması için burada verilmemiştir. Bu menüde ters kinematik menüsünden farklı olarak “Çöz” butonunun yerini “Jacobian” isimli buton almaktadır. Bu buton seçilen konuma/yörüngeye göre mekanizmanın Jacobian matrisini sayısal olarak hesaplamakta ve sonuçların gösterilmesi için ayrı bir form açmaktadır. Şekil 5.15’de Jacobian matrisi menüsü, Şekil 5.16’da ise D_3^6 mekanizması için üretilen Jacobian matrisi görülmektedir.

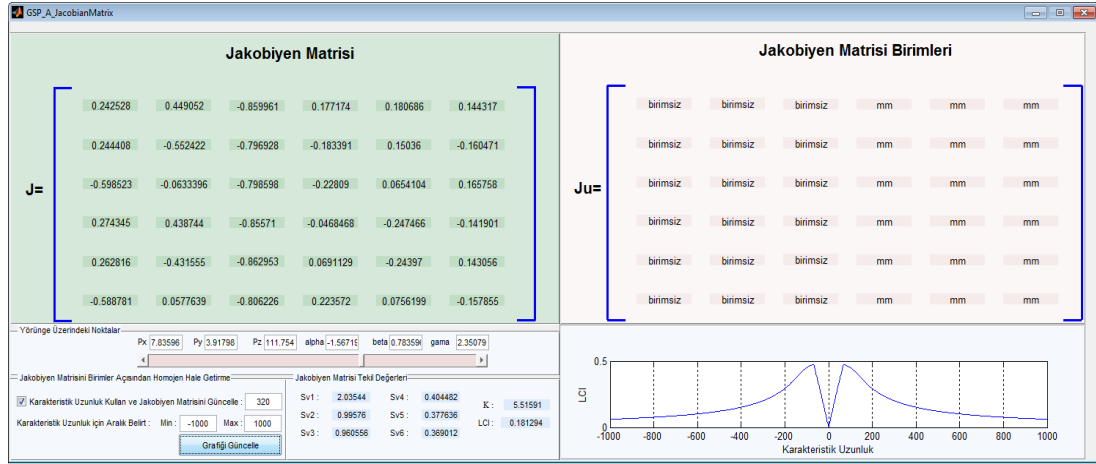


Şekil 5.15. Jacobian matrisi menüsü

Şekil 5.16’da mekanizmaya ait Jacobian matrisi dört farklı alan kullanılarak sunulmaktadır. Jacobian matrisi isimli ilk alanda mekanizmaya ait Jacobian matrisi sayısal olarak gösterilmektedir.

Eğer kullanıcı tek bir konum için değil de bir yörünge için Jacobian matrisini hesaplatmışsa yörünge için oluşturulan Jacobian matrisini de görebilmektedir. Bunun için “Yörünge Üzerindeki Noktalar” isimli alanda yer alan kaydırma çubuğu kullanılmaktadır. Kaydırma çubuğunun her adımında farklı bir

yörünge noktası için elde edilen Jacobian matrisi görüntülenmektedir. Yörünge için ilgili noktasına ait konum bilgileri yine aynı alanda yer almaktadır.

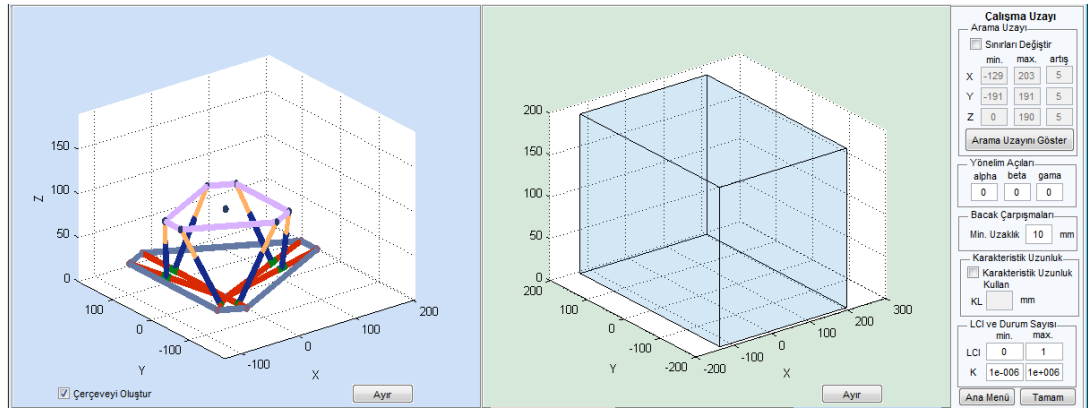


Şekil 5.16. D_3^6 mekanizması için üretilen Jacobian matrisi

“Jacobian Matrisi Birimleri” isimli ikinci alanda ise Jacobian matrisinin her bir elemanının birimleri gösterilmektedir. Eğer bir elemanın birimi yoksa birim sembolü yerine “birimsiz” ifadesi yazdırılmaktadır. Bu uygulamanın amacı kullanıcıya karakteristik uzunluğu kullanarak Jacobian matrisini homojen hale getirme ve bu işlemin sonuçlarını görme imkanı verilmesidir. Kullanıcı oluşan birim yapısına göre eğer isterse “Jacobian Matrisini Birimler Açısından Homojen Hale Getirme” isimli üçüncü alanda yer alan “Karakteristik Uzunluk Kullan ve Jacobian Matrisini Güncelle” isimli seçeneği seçerek kendi gireceği bir karakteristik uzunluk değerinin Jacobian matrisi üzerindeki etkisini görebilecektir. Kullanıcının karakteristik uzunluk girmesi ile GSP-DAP “Jacobian Matrisi Birimleri” isimli alanda yer alan birimler matrisini homojen hale getirecektir. Buna ek olarak Jacobian matrisi de girilen karakteristik uzunluk değerine göre güncellenecektir. Bu alanda kullanıcıya ayrıca karakteristik uzunluk değeri için bir aralık belirtme imkanı da verilmiştir. Bunun için kullanıcın karakteristik uzunluk için bir aralık girmesi ve “Grafik Güncelle” isimli butona tıklaması gerekmektedir. Bu işlemten sonra form üzerinde yer alan LCI ve karakteristik uzunluk ilişkisini gösteren grafik güncellenecektir. Elde edilen değerler anlık yörünge noktası için üretilen Jacobian matrisi üzerinden hesaplanmaktadır. Örneğin, Şekil 5.16’da D_3^6 mekanizması için $[P_x \ P_y \ P_z]=[7.83596 \ 3.91798 \ 111.754]$ ve $[\alpha \ \beta \ \gamma]=[-1.56719 \ 0.783596 \ 2.35079]$ değerleri için Jacobian matrisi elde edilmiştir. Bu matris için $[-1000 \ 1000]$ aralığında seçilen karakteristik uzunluk

kullanılarak üretilen LCI değerlerinin değişimi form üzerinde yer alan grafikte görülmektedir. Jacobian matrisi formunun son alanına “Jacobian Matrisi Tekil Değerleri” ismi verilmiştir. Bu alanda anlık olarak elde edilen Jacobian matrisinin tüm tekil değerleri ve bu tekil değerler kullanılarak üretilen durum sayısı ve LCI değerleri gösterilmektedir.

Çalışma Uzayı: Ana menüde yer alan “Çalışma Uzayı” isimli buton seçilen mekanizma için sabit yönelimli öteleme çalışma uzayı tespiti için kullanılmaktadır. Bu butona tıklanıldığında Şekil 5.17’de görülen çalışma uzayı menüsü ekrana gelmektedir.



Şekil 5.17. Çalışma uzayı menüsü

Çalışma uzayı menüsü 5 alandan oluşmaktadır. Birinci alanda mekanizmanın çalışma uzayını içeren arama uzayı tanımlamaları yapılmaktadır. GSP-DAP arama uzayı menüsü açılışında standart olarak kullanıcıya kübik bir arama uzayı önerisinde bulunmakta ve bu arama uzayını ana çizim alanında göstermektedir. Kullanıcı isterse “Sınırları Değiştir” isimli seçeneği aktif hale getirerek bu arama uzayının sınırlarını ve artış değerlerini değiştirebilecektir. Ayrıca “Arama Uzayını Göster” butonunu kullanarak seçtiği sınır değerlerine göre yeni arama uzayını ana çizim alanında görebilecektir.

İkinci ve üçüncü alanlarda kullanılacak olan yönelim açıları derece cinsinden ve arama uzayı hesaplanırken mekanizmanın bacakları arasındaki çarpışmaları önlemek için kullanılan minimum uzaklık değeri mm cinsinden girilmektedir.

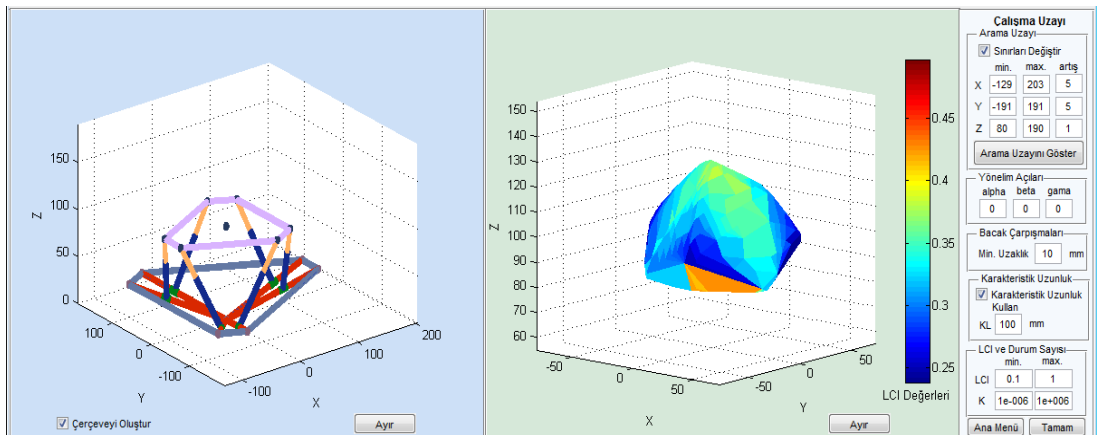
Dördüncü alan kullanıcıya karakteristik uzunluk kullanma imkanı sunmaktadır. Bu alanda yer alan “Karakteristik Uzunluk Kullan” seçeneği seçildiğinde kullanıcı “KL”

isimli alana belirlediği karakteristik uzunluk değerini girebilecektir. Eğer bu alan kullanılırsa yapılacak çalışma uzayı hesabında kullanılacak olan Jacobian matrisi girilecek karakteristik uzunluk değeri kullanılarak homojen hale getirilecektir.

Beşinci alan çalışma uzayının dexterity değerini arttırmak ve dexterous çalışma uzayı elde etmek için kullanılmaktadır. Bu alanda mekanizmaya ait LCI ve K değerleri için en az ve en çok değerler girilebilmektedir. Yapılacak çalışma uzayı hesabında girilen bu değerleri sağlayan noktalar çalışma uzayına dahil edilecekler, sağlamayanlar çalışma uzayı noktası olarak kullanılmayacaklardır.

Çalışma uzayında yer alan “Tamam” butonuna tıklanıldığında yapılan tercihlere göre çalışma uzayı hesabı yapılacak ve ana çizim alanında gösterilecektir. Şekil 5.18’de D_3^6 mekanizması için örnek bir çalışma uzayı çizimi görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi hesaplanan çalışma uzayı kapalı bir hacim şeklinde çizdirilmektedir. Ayrıca her bir çalışma uzayı noktası sahip olduğu LCI değerine göre renklendirilmektedir. LCI değerleri ve bu değerlere karşılık gelen renkler ana çizim alanı üzerinde yer alan renk çubuğunda gösterilmektedir.

Son olarak çalışma uzayı hesaplandığında GSP-DAP kullanıcıya, yapılan hesaplamalar ile ilgili bilgileri içeren bir raporu ayrı bir form şeklinde sunmaktadır. Şekil 5.18’de yapılan hesaplama için üretilen çalışma uzayı raporu Şekil 5.19’da görülmektedir.



Şekil 5.18. D_3^6 mekanizması için hesaplanan çalışma uzayı



Şekil 5.19. D_3^6 mekanizması çalışma uzayı raporu

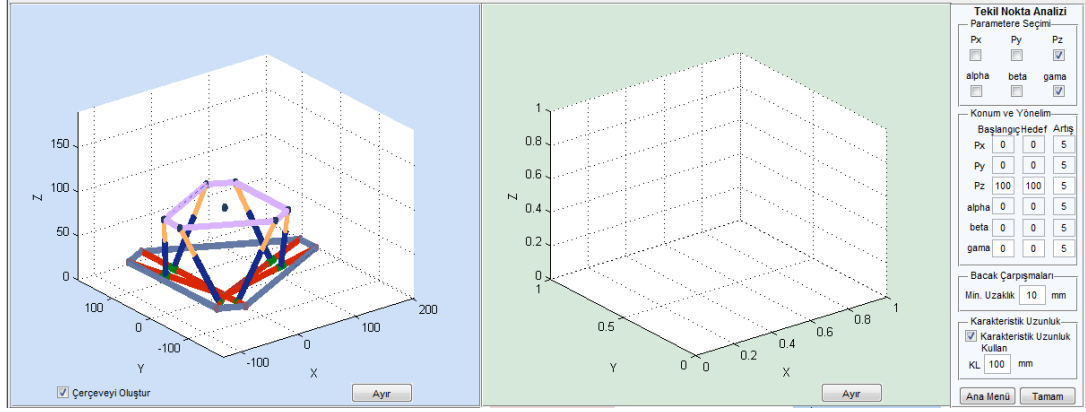
Tekil Nokta Analizi: Ana menüde yer alan “Tekil Nokta Analizi” isimli buton tıklanıldığında seçilen mekanizma için Jacobian matrisinin determinantını esas alan tekil nokta analizi menüsü ana menü yerine açılacaktır (Şekil 5.20).

GSP-DAP tekil nokta analizi menüsü dört alandan oluşmaktadır. İlk alan kullanıcıdan iki tane uç işlevci konum ve/veya yönelim parametresi seçimi yapmasını istemektedir. Seçilecek olan parametreler hesaplanan Jacobian determinant değerlerinin çizdirilmesinde referans alınacak parametrelerdir. Bu şekilde referanslar belirlenmesinin amacı seçilen parametrelerin Jacobian matrisi üzerindeki etkilerinin incelenmesidir.

Kullanıcının belirlediği iki parametre için menünün ikinci alanında sınır değerleri girilmesi gerekmektedir. Parametre seçiminden sonra GSP-DAP bu iki parametre için ayrılmış olan alanları aktive ederek kullanıcıdan veri girişini beklemektedir.

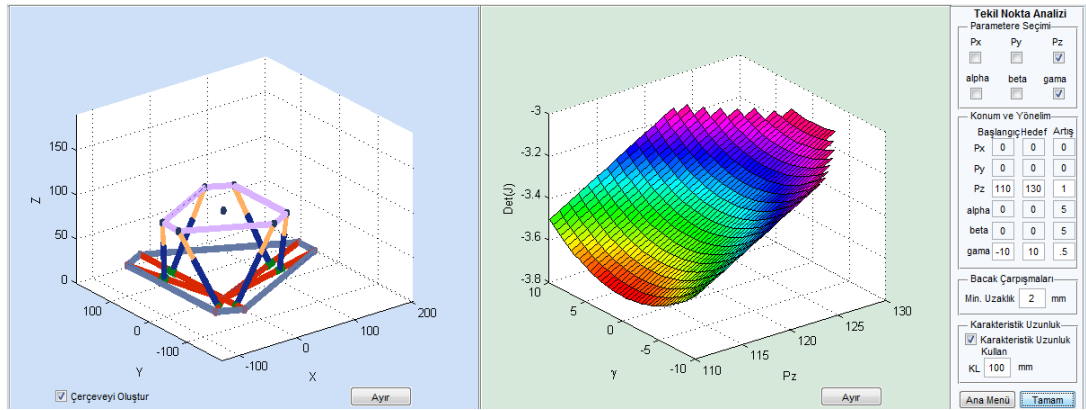
İlgili alanlara veri girişinden sonra kullanıcı üçüncü alanda bacak çarpışmaları ile ilgili seçimini, dördüncü alanda ise karakteristik uzunluk ile ilgili seçimini belirtebilmektedir.

Son olarak tekil nokta analizi işlemi kullanıcının “Tamam” isimli butona tıklamasıyla başlamaktadır.



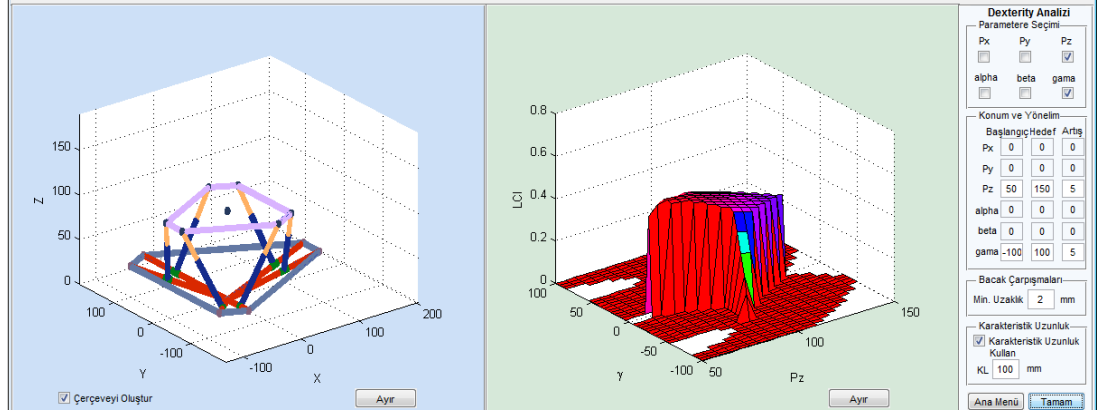
Şekil 5.20. Tekil nokta analizi menüsü

Elde edilen sonuçlar seçilen iki parametreye göre ana çizim alanında gösterilmektedir. Şekil 5.21’de D_3^6 mekanizması için örnek bir tekil nokta analizi yapılmıştır. Bu örnekte Pz ve γ parametrelerindeki değişimlerin Jacobian matrisinin determinantı üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 5.21. D_3^6 mekanizması için tekil nokta analizi

Dexterity: GSP-DAP analiz kısmı ana menüsünde yer alan “Dexterity” isimli butona tıklanıldığında dexterity menüsü açılmaktadır. Bu menüde yer alan alanlar bir önceki seçenekte anlatılan tekil nokta analizi menüsü ile tamamen aynıdır. Tekrar olmaması açısından burada verilmemiştir. Kullanıcının tekil nokta analizinde olduğu gibi iki parametre seçimi ve ilgili diğer alanlar için seçimlerini yapmasından sonra “Tamam” isimli butona tıklamasıyla dexterity analizi başlamaktadır. Bu analizde mekanizmaya ait LCI değerleri seçilen parametrelere göre ana çizim alanına çizdirilmektedir. Elde edilen sonuçlar kullanıcıya seçtiği parametrelerin mekanizmanın dexterity si üzerine olan etkisini görmesini sağlamaktadır. Şekil 5.22’de 6D3 mekanizması için örnek bir dexterity analizi sunulmuştur.

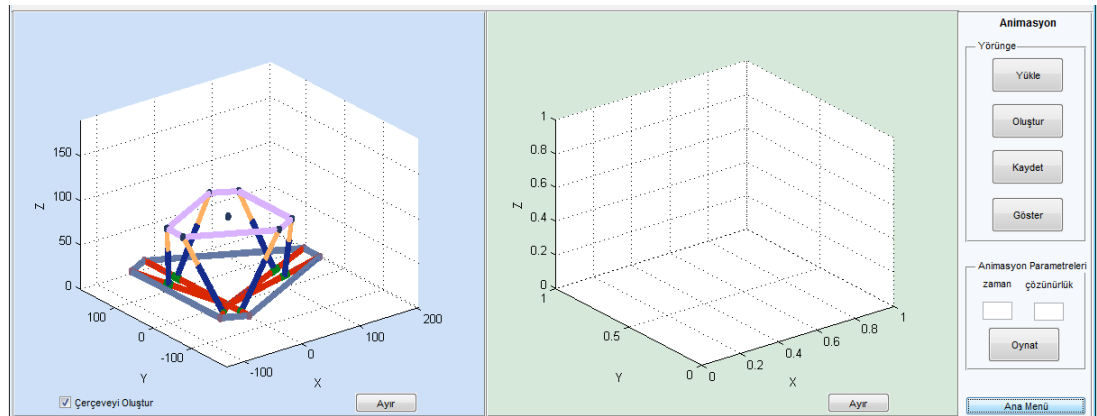


Şekil 5.22. D_3^6 mekanizması için dexterity analizi

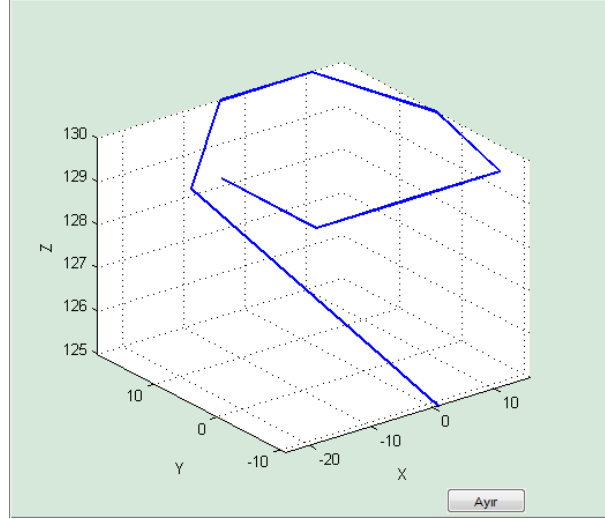
Animasyon: GSP-DAP animasyon menüsüne ana menüde yer alan “Animasyon” isimli buton kullanılarak seçilen mekanizma için hareket animasyonu yaptırılabilir. Animasyon menüsü Şekil 5.23’te sunulmuştur.

Seçilen mekanizma için animasyon yapılabilmesi için GSP-DAP öncelikle çalışma uzayı analizi yapılmasını kullanıcıdan istemektedir. Eğer çalışma uzayı analizi yapılmamışsa animasyon menüsü aktif edilmemektedir. Bunun nedeni animasyon amacıyla seçilecek olan yörüngenin mekanizmanın çalışma uzayı içerisinde olmasını sağlamaktır.

Animasyon menüsü iki alandan oluşmaktadır. Birincisi animasyon amacıyla kullanılacak olan yörüngenin belirlendiği “Yörünge” isimli alandır. Bu alanda yer alan “Yükle” isimli buton kullanıcının daha önceden mekanizmanın uç işlevcisi için oluşturduğu yörüngeleri yüklemesini sağlamaktadır. Şekil 5.24’te örnek bir yörünge gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Animasyon menüsü



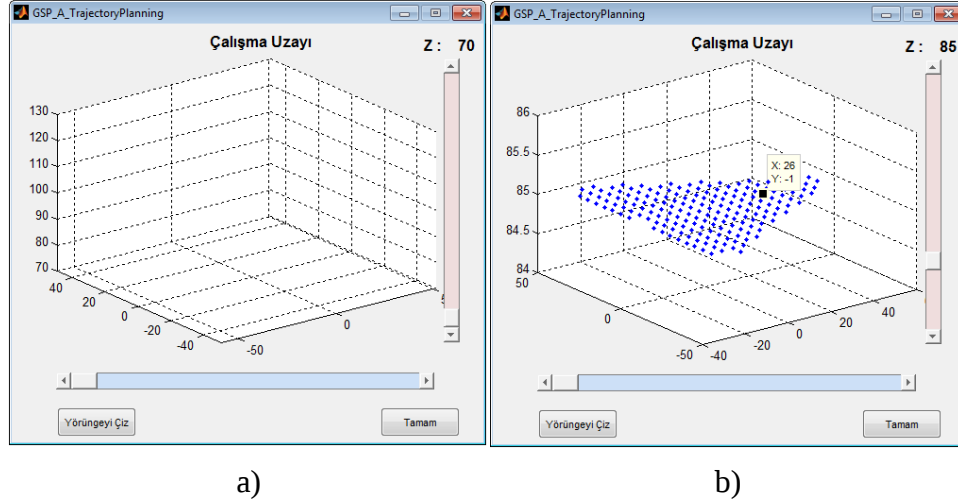
Şekil 5.24. Örnek bir yörünge

Yörünge alanında ye alan “Oluştur” isimli buton kullanıcıya mekanizmanın çalışma uzayı içerisinde seçeceği noktalardan geçecek bir yörünge oluşturmasını sağlayan yörünge belirleme formunu açar (Şekil 5.25 a).

Yörünge belirleme formu üzerinde kullanıcıya mekanizmanın tüm çalışma uzayı noktalarından seçim yapabilmesini sağlayacak kontroller yerleştirilmiştir. Bu kontrollerden yatay kaydırma çubuğu çalışma uzayının tamamını noktalar halinde form üzerindeki çizim alanında görmek için kullanılmaktadır. Dikey kaydırma çubuğu ise çalışma uzayını “z” eksenine göre dilimlere ayırmak ve sadece seçili olan dilimdeki çalışma uzayı noktalarını form üzerinde göstermek amacıyla tasarlanmıştır. Bu uygulama ile kullanıcının iki boyutlu olan bilgisayar ekranından üç boyutlu olan çalışma uzayı noktalarını kolayca seçebilmesi sağlanmıştır. Seçim işlemi için kullanıcının belirlediği noktaya tıklaması yeterlidir. GSP-DAP ilgili noktayı bir yörünge noktası olarak kaydedecektir.

Kullanıcı isterse “Yörüngeyi Çiz” isimli butonu kullanarak seçimleri sonucu oluşan yörüngeyi bir bütün olarak form üzerine çizdirebilecektir.

Son olarak “Tamam” butonu seçilen yörüngeyi hafızaya almak ve yörünge belirleme formunu kapatmak için kullanılmaktadır. Şekil 5.25 b’de örnek bir yörünge noktası seçim işlemi gösterilmektedir.

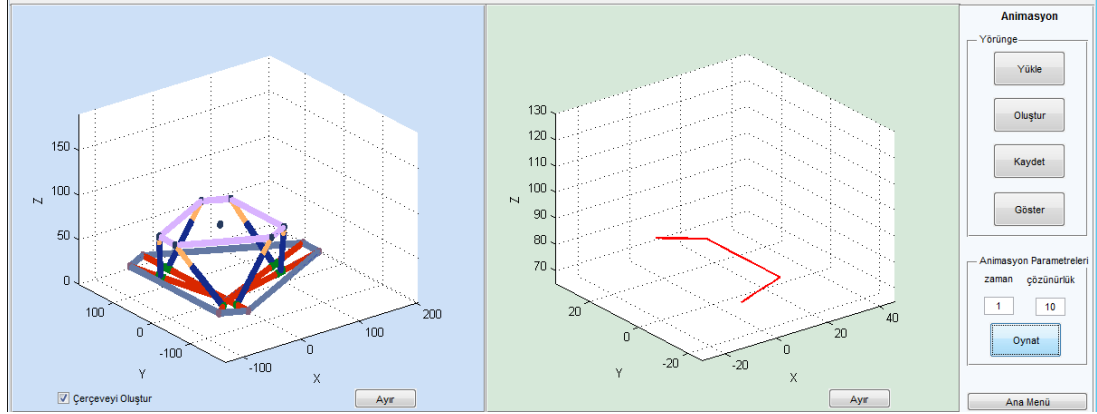


Şekil 5.25. a) Yörünge belirleme formu b) Yörünge noktası seçim işlemi

Yörünge alanında yer alan “Göster” isimli buton ise seçilen/oluşturulan yörünge için ana çizim alanında gösterilmesi için kullanılmaktadır. Yörünge oluşturma işleminden sonra kullanıcı isterse oluşturduğu yörüngeyi “Kaydet” isimli butonu kullanarak GSP-DAP ana dizininde yer alan My_Trajectories isimli klasöre kaydedebilecektir.

Yörünge menüsünün ikinci alanı “Animasyon Parametreleri” isimli alandır. Bu alanda yer alan “zaman” ve “çözünürlük” parametreleri ters kinematik analiz kısmında sunulan zaman ve çözünürlük parametreleri ile aynı görevi üstlenmektedirler. Bu kısımda ters kinematik analizinden farklı olarak sadece iki nokta (başlangıç ve hedef konumları) arasında bir yörünge oluşturma yoktur. Bu kısımda kullanıcı tarafından belirlenen bir yörünge üzerinde yer alan ardışık her iki nokta birer başlangıç ve hedef noktaları kabul edilmekte ve her bir başlangıç-hedef çifti arasında bir yörünge oluşturulmaktadır. Elde edilen tüm noktalar birleştirilerek animasyon için gerekli tam bir yörünge meydana getirilmektedir.

Son olarak kullanıcı “Oynat” isimli butonu kullanarak mekanizmanın belirlenen yörüngeyi izlerken sahip olduğu yapısal şekli görebilecektir. Mekanizmanın animasyonu ile paralel olarak ana çizim alanında da anlık olarak geçilen yörünge noktaları çizdirilmektedir. Bu sayede mekanizmanın yörüngeyi hangi aşamasında olduğu kolayca takip edilebilmektedir. Şekil 5.26’ da D_3^6 mekanizması için yapılan animasyonun bir anı gösterilmiştir.



Şekil 5.26. D_3^6 mekanizması için yapılan animasyon

Bu bölümde GSP-DAP yazılımının tasarım ve analiz kısımları detayları ile sunuldu. Bir sonraki bölümde örnek uygulama olarak D_1^6 yapısına sahip SP mekanizmasının tasarımı ve analizi GSP-DAP ortamında gerçekleştirilecektir.

5.4. SP Mekanizmasının GSP-DAP Uygulaması

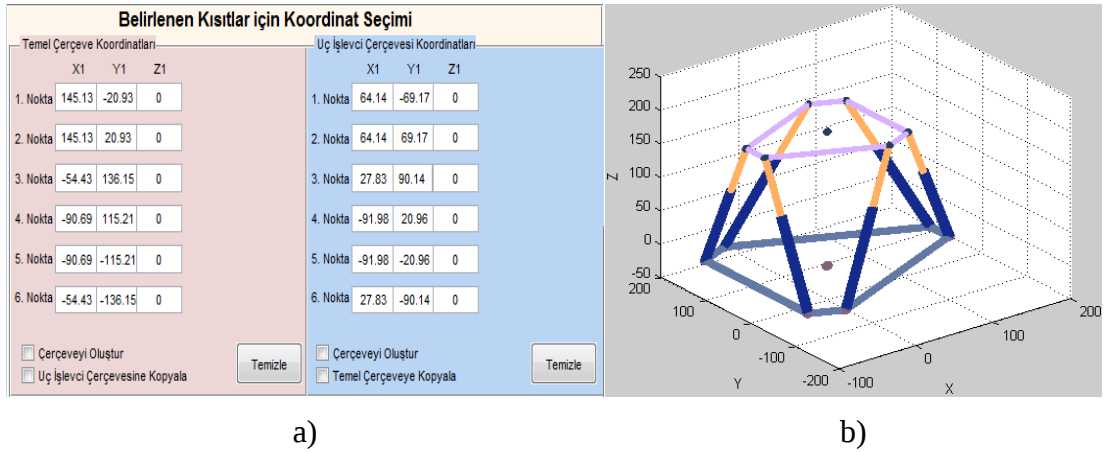
SP mekanizması literatürde üzerinde en çok durulan ve endüstride uygulama alanı bulan altı SD bir paralel robot mekanizmasıdır. Bacak yapısı SPS şeklindedir ve tüm bacaklarda aktif eklem prizmatik eklemdir. Yapısı gereği simetrik bir paralel robot mekanizmasıdır. Bu tez çalışmasında sunulan sınıflandırmada 6D sınıfında yer almaktadır ve D_1^6 tipi bir GSP mekanizmasıdır. Bu bölümde SP mekanizmasının tasarımı ve analizi GSP-DAP kullanılarak gerçekleştirilecektir.

GSP-DAP ile önceden çerçeve şekilleri belirlenen bir mekanizmanın tasarımı ve analizini yapmak ile rastgele tasarım yapmak arasında herhangi bir farklılık yoktur. Bununla birlikte temel çerçeve ve uç işlevci çerçevesi koordinatları önceden belirlenmiş olan bir mekanizmayı tasarlamak ve analizini yapmak hem zaman hem de elde edilecek analiz sonuçları açısından daha verimli olacaktır. Bu bölümde ilk olarak ele alınan SP mekanizmasına ulaşmak için GSP-DAP tasarım kısmında şu seçimler yapılmıştır. Mekanizma tip seçimi olarak listeden tip seçimi seçeneği, liste olarak 6D listesi ve son olarak mekanizma tipi olarak 6D1.

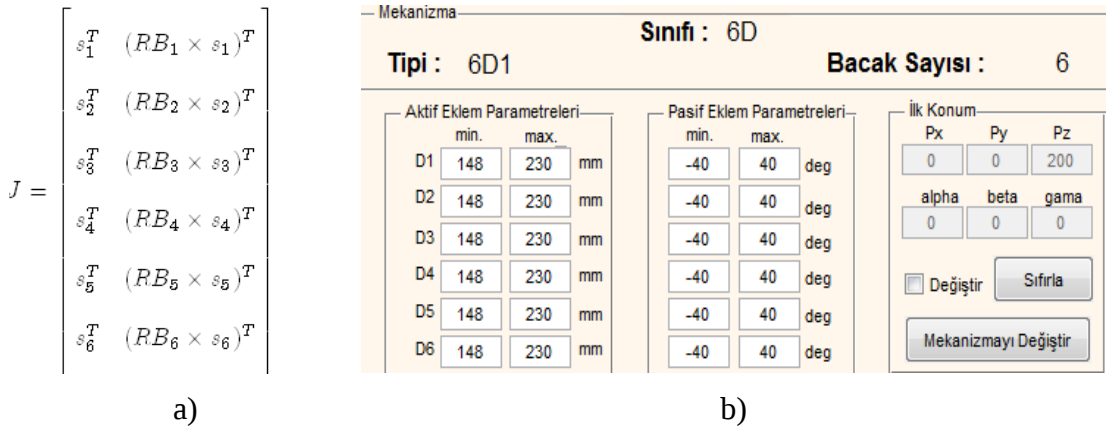
Bu seçimler sonucunda şekillenen “Belirlenen Kısıtlar için Koordinat Seçimi” alanına önceden belirlenmiş koordinatlar Şekil 5.27 a’da ki gibi girilmiştir. Girilen koordinat değerlerine göre SP mekanizmasının şeklini görmek için “Mekanizmayı

Oluştur” butonuna tıklanmış ve şekil 5.27 b’de verilen mekanizma elde edilmiştir. Elde edilen mekanizma için başlangıç konumu olarak $[P_x \ P_y \ P_z]=[0 \ 0 \ 200]$ ve $[\alpha \ \beta \ \gamma]=[0 \ 0 \ 0]$ olarak alınmıştır. Tasarımı yapılan SP mekanizmasının sembolik Jacobian matrisini elde etmek için “Jacobian Matrisi” butonu tıklanmış ve bu matris Şekil 5.28 a’da ki gibi elde edilmiştir.

Tasarım aşamasından sonra “Analiz” isimli buton kullanılarak GSP-DAP analiz kısmına geçilmiştir. Analiz kısmında ilk olarak aktif ve pasif eklem değişkenleri için sınır değerleri girilmiştir. SP mekanizmasının bacak yapısı SPS şeklinde olduğu için aktif eklem değişkeni olarak minimum ve maksimum bacak uzunlukları belirlenmiştir. Pasif eklem değişkenleri olarak da küresel eklemlerin ait oldukları bacağın başlangıç pozisyonuna göre alacakları minimum ve maksimum açı değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerler Şekil 5.28 b’de gösterilmiştir.

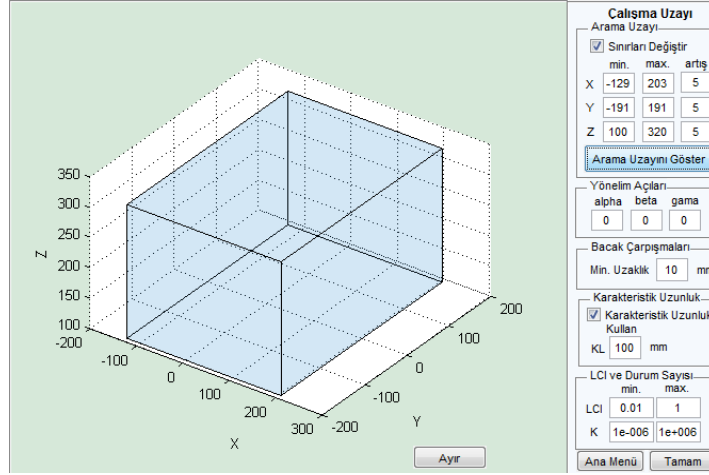


Şekil 5.27. a) SP mekanizması çerçeve koordinatları b) SP mekanizması



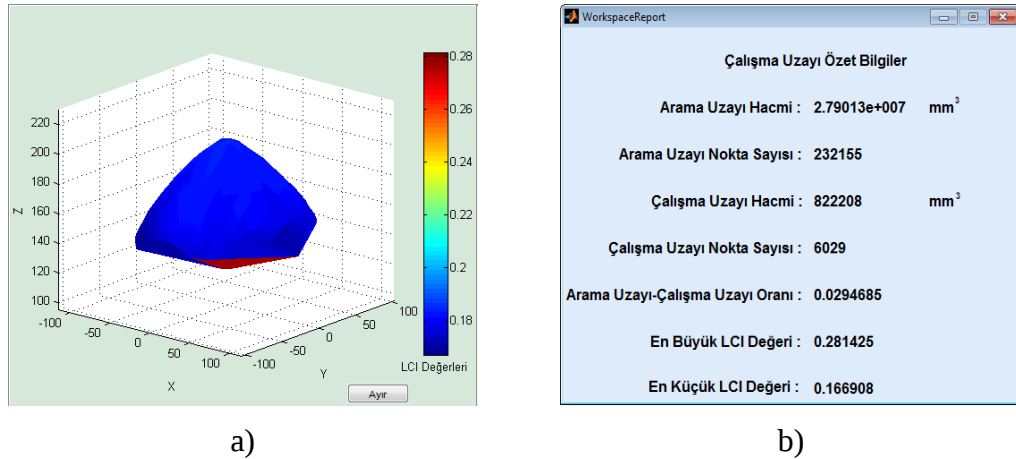
Şekil 5.28. a) SP mekanizması sembolik Jacobian matrisi b) Aktif ve pasif eklem parametreleri

Belirlenen değerlere göre analiz yapmak için öncelikle mekanizmaya ait çalışma uzayı analizi yapılmıştır. Bu amaçla arama uzayı, yönelim açıları, bacak çarpışmaları, karakteristik uzunluk, LCI ve durum sayısı ile ilgili parametreler Şekil 5.29'da verilmiştir.



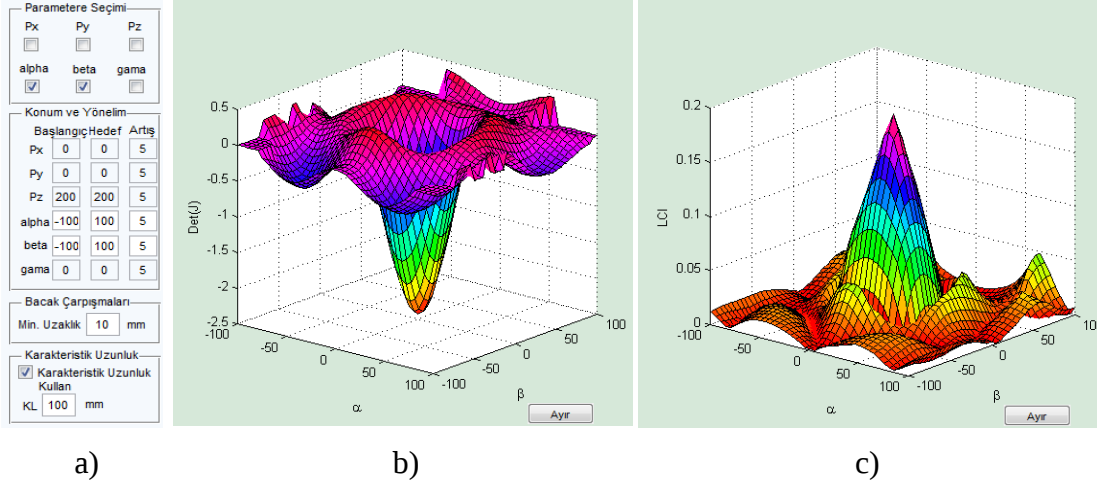
Şekil 5.29. SP mekanizması çalışma uzayı analiz parametreleri

Seçilen parametrelere göre yapılan çalışma uzayı analizi sonucu şekil 5.30 a'da verilen çalışma uzayı elde edilmiştir. Elde edilen çalışma uzayı ile ilgili rapor ise şekil 5.30 b'de olduğu gibi üretilmiştir.



Şekil 5.30. a) SP mekanizması çalışma uzayı b) Çalışma uzayı raporu

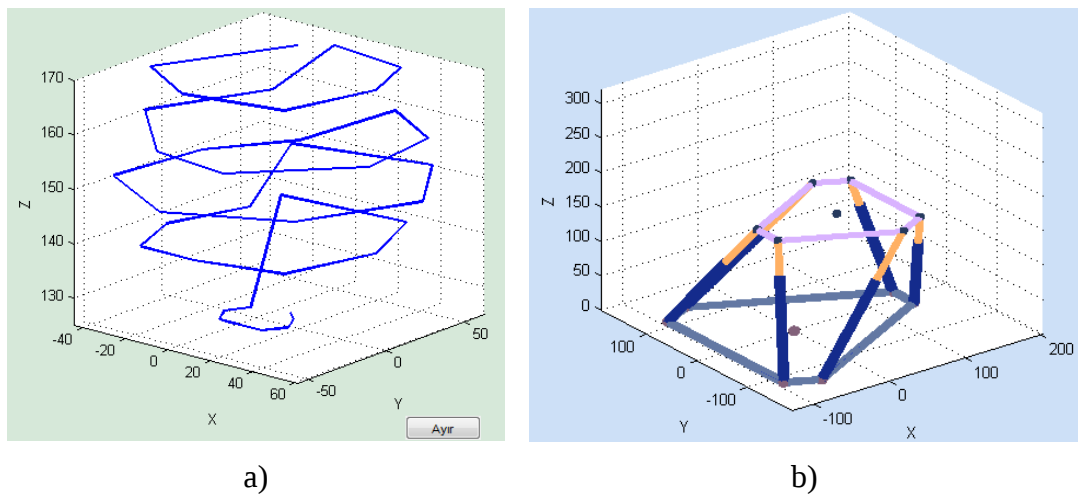
SP mekanizması için tekil nokta ve dexterity analizleri de yapılmıştır. Bu analizlerde kullanılan parametreler Şekil 5.31 a'da, tekil nokta analizi sonucu Şekil 5.31 b'de ve dexterity analizi sonucu da Şekil 5.31 c'de sunulmuştur.



Şekil 5.31. a) SP mekanizması analiz parametreleri (α , β) b) Tekil nokta analizi c) Dexterity analizi

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde SP mekanizması uç işlevci yönelim parametreleri olan α ve β açılarının her ikisi için de yaklaşık $[-20^\circ \ 20^\circ]$ aralığında iyi sayılabilecek sonuçlar üretmiştir. Diğer açı değerleri ($[-50^\circ \ -20^\circ]$ ve $[20^\circ \ 50^\circ]$) için ise hem Jacobian matrisinin determinantının 0 a yaklaştığı dolayısıyla tekil noktalar olduğu hem de bu aralıklarda LCI değerinin de dexterity açısından kötü sayılabilecek seviyelerde (~ 0) olduğu kolaylıkla söylenebilir.

Son olarak mekanizmanın animasyonunu yapmak için spirale benzer bir yörünge oluşturulmuş ve bu yörüngeye göre animasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.32 a'da oluşturulan yörünge 5.32 b'de ise SP mekanizmasının bu yörüngeyi izlerken oluşturduğu bir görüntü sunulmuştur.



Şekil 5.32. a) SP mekanizması için örnek yörünge b) SP mekanizmasının anlık görüntüsü

5.5. Sonuçlar

Bu bölümde tez çalışmasının 2. bölümünde de tablolar halinde nerilen GSP mekanizmalarının tasarımınn ve analizinin yapılabilmesi amacıyla Matlab programı kullanılarak geliştirilen GSP-DAP isimli yazılım tanıtılmıştır. Bu yazılım kullanılarak GSP tasarımınn ve analizinin nasıl yapılacağı adım adım anlatılmıştır. Ayrıca Stewart Platform mekanizmasının GSP-DAP kullanılarak nasıl tasarlanacağı örnek bir mekanizma sunulması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Robot araştırmacıları Dr. Eric Gough'un 1947 yılında otomobil lastiklerini test etmek amacıyla tasarladığı 6 SD'li mekanizma ile birlikte, küçük ve parçalı çalışma uzaylarına rağmen yüksek hassasiyet, konumlanma ve yük taşıma kapasitesine sahip paralel robotlara gittikçe artan düzeyde ilgi göstermişlerdir. Literatürde özellikle son 30 yılda paralel robotların tasarımı, analizi ve kontrolü ile ilgili birçok çalışma yer almıştır. Bu mekanizmaların hem kapalı zincir şeklinde yapılar içermeleri hem de bu zincirlerin sayılarının sınırlandırılmaması nedeniyle, özellikle muhtemel tüm paralel robotların ortaya konulması problemi henüz çözülememiştir.

Bu doktora tez çalışmasında özel olarak 6 SD'ne sahip paralel robot mekanizmaları ve bu mekanizmaların muhtemel tüm tiplerinin sayısını geometrik bir yaklaşımla ortaya koyan Gao ve diğ. [1]'nin çalışması referans alınmıştır. Gao ve arkadaşlarının [1] GSP ismini verdikleri ve muhtemel tüm sayılarını 3850 olarak elde ettikleri bu mekanizmalar arasından “yeni” paralel robot mekanizmalarının bulunması bu doktora tez çalışmasının temel amacı olmuştur. Bulunan mekanizmaların SD hesabı, ters kinematik denklemleri, Jacobian matrisinin oluşturulması, geometrik eniyilemesi ve benzetimi bu doktora tez çalışmasının diğer hedefleri olmuştur.

Sunulan tez çalışmasında Gao ve diğ. [1]'nin elde ettiği 3850 GSP mekanizması arasından 195 tanesi önerilen iki kısıtına göre seçilmiştir. Bu mekanizmalar 4 sınıf adı altında tablolar halinde sunulmuştur. Bu mekanizmalar için vektörel yaklaşım kullanılarak genel ters kinematik ve Jacobian denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler mekanizmadan bağımsız olarak geometrik kısıtlar esas alınarak elde edilmiştir.

195 GSP mekanizması arasından seçilen iki asimetric paralel robot mekanizmasının geometrik eniyilemesi dexterous çalışma uzayını eniyilemek amacıyla PSO algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak önerilen GSP mekanizmalarının tasarımının ve analizinin yapılabilmesi amacıyla Matlab programı kullanılarak GSP-DAP isimli bir yazılım geliştirilmiştir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda literatüre sağlanan katkılar şu şekilde özetlenebilir:

- Tez çalışması kapsamında sunulan 195 GSP mekanizması önerilen iki kıstasa göre elde edilebilecek muhtemel tüm GSP mekanizmalarıdır. Bu mekanizmalar tablolar halinde literatüre ilk kez bu doktora tez çalışması sonucunda girmiştir.
- Tez çalışmasında sunulan tüm mekanizmaların ters kinematik ve Jacobian matrisi için genel denklemler elde edilmiştir.
- 195 GSP mekanizmasını matematiksel olarak temsil edebilecek iki farklı mekanizmanın geometrik boyutlandırması PSO eniyileme algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan eniyileme işlemleri konu edinilen mekanizma tipleri açısından literatürde ilk kez yer almaktadır.
- Tez çalışması kapsamında elde edilen tüm mekanizmaların hem tasarımının hem de performans analizlerinin yapıldığı GSP-DAP isimli yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım da konu edindiği tüm mekanizmalar açısından literatüre ilk kez bu doktora tez çalışmasında girmiştir.

Tez kapsamında geliştirilen GSP-DAP isimli yazılım 195 GSP mekanizmasının tamamı için tasarım ve analiz yapabilecek şekilde programlanmıştır. Bu yazılımla kullanıcı seçtiği herhangi bir GSP mekanizması için şu işlemleri yapabilecektir.

- Geometrik nesne temelli GSP tasarımın mekanizmanın kısıt yapısına bağlı olmak üzere, 3, 4, 5 ve 6 bacaklı olarak gerçekleştirilmesi
- Ters kinematik analizi
- Sembolik ve sayısal Jacobian matrisi elde edilmesi
- Jacobian matrisi elemanlarının birim tespiti
- Karakteristik uzunluğun Jacobian matrisi üzerine olan etkisinin incelenmesi
- Dexterous çalışma uzayı analizi
- Dexterity analizi
- Tekil nokta analizi
- Yörünge tasarımı
- GSP hareket animasyonu

6.1. Öneriler

Tez çalışmasında 6 SD'li 195 GSP mekanizması listelenmiştir. Bu listelerden özellikle simetrik olmayan mekanizmaların seçilmesi ve geometrik, kinematik ve dinamik analizlerinin yapılması yeni paralel robot mekanizması tasarımı yapmak isteyen araştırmacılar için önerilebilir.

Önerilen mekanizmalar için tez çalışmasında kullanılan 4 farklı bacak yapısı dışında mekanizmaların performansını arttıracak yeni bacak tipleri geliştirilebilir. Örneğin [34]'te kullanılan vida teorisi temelli yaklaşım bu amaç için bir araç olabilir.

Tez çalışması kapsamında geometrik eniyilemesi yapılan iki GSP mekanizmasının SP mekanizması ile karşılaştırıldığında önemli üstünlükleri olduğu gösterildi. Bir sonraki aşama olarak bu mekanizmaların dinamik analizini, kontrolünü ve nihayetinde fiziksel olarak gerçekleştirilmelerini içeren çalışmalar önerilebilir.

Son olarak geliştirilen GSP-DAP yazılımı için dinamik analiz ve kontrol modülleri geliştirilerek bu yazılımın listelenen mekanizmalar için komple bir araç kutusu olması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Gao X. S., Lei D., Liao Q., Zhang G. F., Generalized Stewart-Gough platforms and their direct kinematics, *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, **21**, 141-151.
- [2] Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S., The Stewart platform manipulator: a review, *Mechanism and Machine Theory*, 2000, **35**, 15-40.
- [3] Bonev I., The true origins of parallel robots, <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html> (Ziyaret tarihi: 13 Ağustos 2013).
- [4] Küçük S., Endüstriyel robotların modellemesi ve çevrimdışı programlanması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2004, 154848.
- [5] Merlet J. P., *Parallel robots, solid mechanics and its applications*, 2nd ed., Springer, The Netherlands, 2006.
- [6] Kim J., Park F. C., Ryu S. J., Kim J., Hwang J. C., Park C., Iurascu C. C., Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, **17**, 423-434.
- [7] Angulo V. R., Torras C., Self-calibration of a space robot, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1997, **8**, 951-963.
- [8] Yoon W. K., Goshozono T., Kawabe H., Kinami M., Tsumaki Y., Uchiyama M., Oda M., Doi T., Model-based space robot teleoperation of ETS-VII manipulator, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, **20**, 602-612.
- [9] Shoham M., Burman M., Zehavi E., Joskowicz L., Batkilin E., Kunicher Y., Bone-mounted miniature robot for surgical procedures: Concept and clinical applications, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, **19**, 893-901.
- [10] Vitiello V., Lee S. L., Cundy T. P., Yang G. Z., Emerging robotic platforms for minimally invasive surgery, *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2013, **6**, 111-126.
- [11] Mobedi B., Nejat G., 3-D active sensing in time-critical urban search and rescue missions, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, **17**, 1111-1119.
- [12] Murphy R. R., Human-robot interaction in rescue robotics, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2004, **34**, 138-153.

- [13] Merlet J. P., Daney D., Appropriate design of parallel manipulators, Editors: Wang L., Xi J., *Smart Devices and Machines for Advanced Manufacturing*, Springer-Verlag, London, 1-25, 2008.
- [14] Hervé J. M., The Lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design, *Mechanism and Machine Theory*, 1999, **34**, 719-730.
- [15] Karouia M., Hervé J. M., Asymmetrical 3-dof spherical parallel mechanisms, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2005, **24**, 47-57.
- [16] Salgado O., Altuzarra O., Petuya V., Hernández A., Type synthesis of a family of 3T1R fully-parallel manipulators using a group-theoretic approach, *Proceedings of the 12th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Besançon, France, 17-20 June 2007.
- [17] Sparacino F., Hervé J. M., Synthesis of parallel manipulators using Lie-groups Y-STAR and H-ROBOT, *IEEE/Tsukuba International Workshop on Advanced Robotics: Can robots contribute to preventing environmental deterioration*, Tsukuba, Japan, 8-9 November 1993.
- [18] Meng J., Liu G., Li Z., A geometric theory for analysis and synthesis of sub-6 DOF parallel manipulators, *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**, 625-649.
- [19] Liu G. F., Meng J., Xu J. J., Li Z. X., Kinematic synthesis of parallel manipulators: a Lie theoretic approach, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, USA, 27-31 October 2003.
- [20] Hervé J. M., Sparacino F., Structural synthesis of 'parallel' robots generating spatial translation, *Fifth International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments'*, Pisa, Italy, 19-22 June 1991.
- [21] Ou F. M., A physical oriented methodology for the synthesis of functional alternatives of mechanism systems, Phd Thesis, Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan City, Taiwan (R.O.C.), 2005.
- [22] Freudenstein F., Maki E. R., The creation of mechanisms according to kinematic structure and function, *Environment and Planning B*, 1979, **6**, 375-391.
- [23] Yan H. S., Hsu C. H., Contracted graphs of kinematic chains with multiple joints, *Mathematical and Computer Modelling*, 1988, **10**, 681-695.
- [24] Tsai L. W., Lee J. J., Kinematic analysis of tendon-driven robotic mechanisms using graph theory, *Institute for Systems Research, ISR; TR 1988-20*, 1-23, 1988.
- [25] Li D., Zhang Z., McCarthy J. M., A constraint graph representation of metamorphic linkages, *Mechanism and Machine Theory*, 2011, **2**, 228-238.

- [26] Lu Y., Lu Y., Ye N., Mao B., Han J., Sui C., Derivation of valid contracted graphs from simpler contracted graphs for type synthesis of closed mechanisms, *Mechanism and Machine Theory*, 2012, **52**, 206-218.
- [27] Feng C. M., Liu T. S., A graph-theory approach to designing deployable mechanism of reflector antenna, *Acta Astronautica*, 2013, **87**, 40-47.
- [28] Simoni R., Doria C. M., Group and graph theories applied to the analysis of mechanisms and parallel robots, *XXXIII Congresso Nacional de Matematica Aplicada e Computacional*, Sao Paulo, Brasil, 20-23 September 2010.
- [29] Lee J. J., Tendon-driven manipulators: Analysis, synthesis, and control, Phd Thesis, University of Maryland, Department of Mechanical Engineering and System Research Center, College Park, USA, 1991.
- [30] Tsai L. W., *Robot analysis: The mechanics of serial and parallel manipulators*, John Wiley&Sons, New York, 1999.
- [31] Kong X., Gosselin C. M., Type synthesis of 3-DOF PPR-equivalent parallel manipulators based on screw theory and the concept of virtual chain, *Journal of Mechanical Design*, 2005, **127**, 1113-1121.
- [32] Kong X., Gosselin C. M., Type synthesis of 3-DOF spherical parallel manipulators based on screw theory, *Journal of Mechanical Design*, 2004, **126**, 101-108.
- [33] Kong X., Gosselin C. M., Type synthesis of 3-DOF translational parallel manipulators based on screw theory, *Journal of Mechanical Design*, 2004, **126**, 83-92.
- [34] Kong X., Gosselin C. M., *Type synthesis of parallel mechanisms*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2007.
- [35] Glazunov V., Design of decoupled parallel manipulators by means of the theory of screws, *Mechanism and Machine Theory*, 2010, **45**, 239-250.
- [36] Fang Y., Tsai L. W., Enumeration of a class of overconstrained mechanisms using the theory of reciprocal screws, *Mechanism and Machine Theory*, 2004, **39**, 1175-1187.
- [37] Zeng D., Huang Z., Type synthesis of the rotational decoupled parallel mechanism based on screw theory, *Science China Technological Sciences*, 2011, **54**, 998-1004.
- [38] Kong X., Gosselin C. M., Type synthesis of 3T1R 4-DOF parallel manipulators based on screw theory, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, **20**, 181-190.
- [39] Kong X., Gosselin C. M., Type synthesis of 5-DOF parallel manipulators based on screw theory, *Journal of Robotic Systems*, 2005, **22**, 535-547.

- [40] Checcacci D., Frisoli A., Bergamasco M., A screw geometry approach to a novel 5 DOFs haptic interface design, *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Bordeaux, Paris, 18-21 September 2001.
- [41] Dachang Z., Jianwu Z., Yuefa F., Analysis of a novel parallel manipulator for rotary humanoid wrist based on screw theory, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Thailand, 21-26 February 2009.
- [42] Jin Y., Chen I. M., Yang G., Kinematic design of a family of 6-DOF partially decoupled parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 2009, **44**, 912-922.
- [43] Briot S., Arakelian V., Guégan S., PAMINSA: A new family of partially decoupled parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 2009, **44**, 425-444.
- [44] Bonev I. A., Analysis and design of 6-dof 6-prrs parallel manipulators, Master Thesis, Kwangju Institute of Science and Technology, Department of Mechatronics, Kwangju, Korea, 1998.
- [45] Barbosa M. R., Pires E. J. S., Lopes A. M., Optimization of parallel manipulators using evolutionary algorithms, Editors: Corchado E., Novais P., Analide C., Sedano J., *Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, 5th International Workshop (SOCO 2010)*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 79-86, 2010.
- [46] Gao Z., Zhang D., Ge Y., Design optimization of a spatial six degree-of-freedom parallel manipulator based on artificial intelligence approaches, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, **26**, 180-189.
- [47] Gosselin C., Kinematic analysis, optimization and programming of parallel robotic manipulators, Phd Thesis, McGill University, Department of Mechanical Engineering, Montréal, Canada, 1988.
- [48] Kosinska A., Galicki M., Kedzior K., Designing and optimization of parameters of delta-4 parallel manipulator for a given workspace, *Journal of Robotic Systems*, 2003, **20**, 539-548.
- [49] Su Y. X., Duan B. Y., Peng B., Nan R. D., A real-coded genetic optimal kinematic design of a Stewart fine tuning platform for a large radio telescope, *Journal of Robotic Systems*, 2001, **18**, 507-516.
- [50] Jiang Q., Singularity-free workspace analysis and geometric optimization of parallel mechanisms, Phd Thesis, Université Laval, Faculté Des Sciences Et De Génie, Québec, Canada, 2008.
- [51] Hay A. M., Snyman J. A., A multi-level optimization methodology for determining the dextrous workspaces of planar parallel manipulators, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2005, **30**, 422-427.

- [52] Cha S. H., Lasky T. A., Velinsky S. A., Kinematic redundancy resolution for serial-parallel manipulators via local optimization including joint constraints, *Mechanics Based Design of Structures and Machines: An International Journal*, 2006, **34**, 213-239.
- [53] Fattah A., Jazi H., Optimal design of parallel manipulators, *Proceedings of the 10th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2001)*, Budapest, Hungary, 22-25 August 2001.
- [54] Gallant M., Boudreau R., The synthesis of planar parallel manipulators with prismatic joints for an optimal, singularity-free workspace, *Journal of Robotic Systems*, 2002, **19**, 13-24.
- [55] Modungwa D., Tlale N. S., Twala B., Techniques applied in design optimization of parallel manipulators, *4th Robotics and Mechatronics Conference of South Africa (ROBMECH 2011)*, CSIR Pretoria South Africa, 23-25 November 2011.
- [56] Mishra A., Omkar S. N., Singularity analysis and comparative study of six degree of freedom Stewart platform as a robotic arm by heuristic algorithms and simulated annealing, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 2011, **3**, 644-659.
- [57] Kurtz R., Hayward V., Multiple-goal kinematic optimization of a parallel spherical mechanism with actuator redundancy, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, **8**, 644-651.
- [58] Erdoğan P., Toz M., Heuristic Optimization Algorithms in Robotics, Editor: Kucuk S., *Serial and Parallel Robot Manipulators Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*, InTech, Rijeka, Croatia, 311-338, 2012.
- [59] Eberhart R., Kennedy J., A new optimizer using particle swarm theory, *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, 4-6 October 1995.
- [60] Kennedy J., Eberhart R., Particle swarm optimization, *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, 27 November-01 December 1995.
- [61] Kucuk S., Energy minimization for 3-RRR fully planar parallel manipulator using particle swarm optimization, *Mechanism and Machine Theory*, 2013, **62**, 129-149.
- [62] Bingül Z., Karahan O., A Fuzzy Logic Controller tuned with PSO for 2 DOF robot trajectory control, *Expert Systems with Applications*, 2011, **38**, 1017-1031.
- [63] Alıcı G., Jagielski R., Şekerciöğlu Y. A., Shirinzadeh B., Prediction of geometric errors of robot manipulators with Particle Swarm Optimization method, *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, **54**, 956-966.

- [64] Chyan G. S., Ponnambalam S. G., Obstacle avoidance control of redundant robots using variants of particle swarm optimization, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, **28**, 147-153.
- [65] Bingul Z., Karahan O., Dynamic identification of Staubli RX-60 robot using PSO and LS methods, *Expert Systems with Applications*, 2011, **38**, 4136–4149.
- [66] İner A. B., Stewart platform benzetim ve eniyileme yazılımının gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 335442.
- [67] Toz M., Erdoğan P., Şahin İ., A new educational toolbox for solving robotic optimization problems using ga and pso, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 2011, **6**, 1630-1644.
- [68] Bingul Z., Karahan O., Fractional PID controllers tuned by evolutionary algorithms for robot trajectory control, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2012, **20**, 1123-1136.
- [69] Lopes A. M., Freire H., De Moura Oliveira P. B., Solteiro Pires E. J., Reis C., Multi-objective optimization of parallel manipulators using a particle swarm algorithm, *Proceedings of the 10th WSEAS international conference on applied informatics and communications, and 3rd WSEAS international conference on Biomedical electronics and biomedical informatics*, Taipei, Taiwan, 20-22 August 2010.
- [70] Xu Q., Li Y., Stiffness Optimization of a 3-DOF parallel kinematic machine using particle swarm optimization, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Kunming, China, 17-20 December 2006.
- [71] Saputra V. B., Ong S. K., Nee A. Y. C., A PSO algorithm for mapping the workspace boundary of parallel manipulators, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, AK, 3-7 May 2010.
- [72] Yan P., Jiao M., Research of multi-robot parallel assembly optimization base on PSO-SS, *First International Conference on Robot, Vision and Signal Processing*, Kaohsiung, Taiwan, 21-23 November 2011.
- [73] http://tdk.gov.tr/index.php?option=com_bilimsanat&view=bilimsanat&kategori_get=terim&kelimeget=benzetim&hngget=md (Ziyaret tarihi: 24 Ağustos 2013).
- [74] Gosselin C. M., Perreault L., Vaillancourt C., Simulation and computer-aided design of spherical parallel manipulators, *OCEANS '93. Engineering in Harmony with Ocean*, Victoria, BC, 18-21 October 1993.
- [75] Wang A., Reconfigurable kinematics of general Stewart Platform and simulation interface, Master Thesis, University of Windsor, Canada, 2007.
- [76] Ding Z., A unified robotic kinematic simulation interface, Master Thesis, University of Windsor, Canada, 2005.

- [77] Kucuk S., Simulation and design tool for performance analysis of planar parallel manipulators, *Simulation*, 2012, **88**, 542-556.
- [78] Inner B., Kucuk S., A novel kinematic design, analysis and simulation tool for general Stewart platforms, *Simulation*, 2013, **89**, 876-897.
- [79] Gosselin C. M., Hamel J. F., The agile eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, CA, 8-13 May 1994.
- [80] Siciliano B., Khatib O., *Handbook of robotics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [81] Tsai L. W., The Jacobian analysis of a parallel manipulator using reciprocal screws, *Institute for System Research, ISR; TR 1998-34*, 1-9, 1998.
- [82] Murray R. M., Li Z., Sastry S. S., *A mathematical introduction to robotic manipulation*, CRC Press, 1994.
- [83] <http://www.simplex-cnc.com.au/download/ParallelKinemtaicsMachines.pdf> (Ziyaret tarihi: 13Ağustos 2013).
- [84] Zanganeh E. K., Angeles J., Kinematic isotropy and the optimum design of parallel manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, 1997, **16**, 185-197.
- [85] Fattah A., Ghasemi A. M. H., Isotropic design of spatial parallel manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, 2002, **21**, 811-824.
- [86] Ma O., Angeles J., Optimum architecture design of platform manipulators, *Fifth International Conference on Advanced Robotics*, Pisa, Italy, 19-21 June 1991.
- [87] Angeles J., Is there a characteristic length of a rigid-body displacement, *Mechanism and Machine Theory*, 2006, **41**, 884-896.
- [88] Hosseini M. A., Daniali H. M., Weighted local conditioning index of a positioning and orienting parallel manipulator, *Scientia Iranica*, 2011, **18**, 115-120.
- [89] Hosseini M. A., Daniali H. R. M., Taghirad H. D., Dexterous workspace optimization of a tricept parallel manipulator, *Advanced Robotics*, 2011, **25**, 1697-1712.
- [90] Kucuk S., A dexterity comparison for 3-DOF planar parallel manipulators with two kinematic chains using genetic algorithms, *Mechatronics*, 2009, **19**, 868-877.
- [91] Kucuk S., Bingul Z., Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators, *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, **54**, 567-573.

- [92] Lou Y., Liu G., Li Z., Randomized optimal design of parallel manipulators, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008, **5**, 223-233.
- [93] Gan D., Liao Q., Dai J. S., Wei S., Design and kinematics analysis of a new 3CCC parallel mechanism, *Robotica*, 2010, **28**, 1065-1072.
- [94] Kizir S., Bingul Z., Position control and trajectory tracking of the Stewart Platform, Editor: Kucuk S., *Serial and Parallel Robot Manipulators Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*, InTech, Rijeka, Croatia, 179-202, 2012.

EKLER

EK-A

A, B ve C vektörler olmak üzere vektörlerin noktasal ve çapraz çarpımı ile ilgili bazı temel eşitlikler şu şekilde sıralanabilirler;

1. İki vektörün noktasal çarpımının türevi aşağıdaki gibi alınır.

$$\frac{d}{dt}(A \cdot B) = A \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right) + \left(\frac{dA}{dt} \right) \cdot B$$

2. İki vektörün çapraz çarpımının türevi aşağıdaki gibi alınır.

$$\frac{d}{dt}(A \times B) = A \times \left(\frac{dB}{dt} \right) + \left(\frac{dA}{dt} \right) \times B$$

$$3. \quad A \times (B \times C) = B(A \cdot C) - C(A \cdot B)$$

$$4. \quad A \times B = -B \times A$$

$$5. \quad A \cdot B = B \cdot A$$

$$6. \quad A \cdot (B \times C) = B \cdot (C \times A) = C \cdot (A \times B)$$

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Toz M.**, Kucuk S., Dexterous workspace optimization of an asymmetric six-degree of freedom Stewart-Gough platform type manipulator, *Robotics and Autonomous Systems*, DOI: 10.1016/j.robot.2013.07.004
- [2] **Toz M.**, Kucuk S., Dynamics simulation toolbox for industrial robot manipulators, *Computer Applications in Engineering Education*, 2010, **18**, 319-330.
- [3] **Toz M.**, Erdoğan P., Şahin İ., A new educational toolbox for solving robotic optimization problems using ga and pso, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 2011, **6**, 1630-1644.
- [4] Erdoğan P., **Toz M.**, Heuristic Optimization Algorithms in Robotics, Editor: Kucuk S., *Serial and Parallel Robot Manipulators Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*, InTech, Rijeka, Croatia, 311-338, 2012
- [5] **Toz M.**, Kucuk S., A comparative study for computational cost of fundamental robot manipulators, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Auburn, Alabama, 14-16 March 2011.
- [6] **Toz M.**, Kucuk S., A type synthesis analysis for generalized Stewart Platforms, *12'th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Kocaeli, Turkey, 15-16 September 2011.
- [7] Kızıllan A., **Toz M.**, Aliustaoğlu C., Bingül Z., Gezgin robot tasarımı ve hareket planlaması, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, İstanbul, Türkiye, 5-7 Eylül 2007.

ÖZGEÇMİŞ

1979'da Adıyaman'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Adıyaman'da, lise öğrenimini Konya'da tamamladı. 2002 yılında Kocaeli Üniversitesi Köseköy MYO Bilgisayar Programcılığı, 2006 yılında ise Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi (Bilgisayar Öğretmenliği) Bölümü'nden mezun oldu. 2006 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini 2008 yılında tamamladı. 2009 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde başladığı doktora eğitimine halen devam etmektedir. 2000-2009 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Araştırma ve Uygulama Hastanesinde Sağlık Memuru olarak görev yaptı. 2009 yılından beri Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.