

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRONİK ve BİLGİSAYAR EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**STEWART PLATFORM BENZETİM VE ENİYİLEME
YAZILIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

ALPASLAN BURAK İNNER

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK ve BİLGİSAYAR EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

STEWART PLATFORM BENZETİM VE ENİYİLEME
YAZILIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ALPASLAN BURAK İNNER

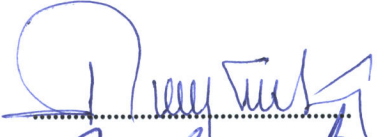

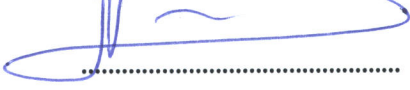

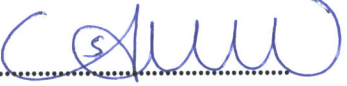
Doç.Dr. Serdar KÜÇÜK
Danışman, Kocaeli Üniv.

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: 18.01.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Paralel manipülatörlerin yüksek hassasiyet, taşıma kapasitesi, doğruluk, sağlamlık ve yüksek hız sağlaması gibi ilgi çekici özellikleri nedeniyle son yıllarda sıkça kullanıldığı görülmektedir. Genel Stewart Platform (GSP) Mekanizması altı serbestlik derecesiyle, paralel manipülatörlerin en yaygın tipidir ve ilk olarak pilot yetiştirmek amacıyla uçuş benzetimi için kullanılmıştır. Zaman içerisinde bu tip paralel mekanizmalara olan ilgi artmış eğlence, tıp ve yapı sektöründen, hassas konumlama uygulamalarına, pilot eğitiminden, deniz ve uzay araştırmalarına kadar pek çok alanda başarıyla kullanılmıştır. İstenilen bir işe uygun olarak mekanizmaların imalatı gerçekleştirilmeden önce bilgisayar ortamında benzetimi ve mekanizmanın üretim parametrelerinin belirlenmesi önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında GSP mekanizmalarının benzetimi gerçekleştirilerek hem endüstriyel uygulamalarda hem de eğitim amaçlı olarak kullanılacak bir yazılım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu yazılım temel alınarak kinematik performans eniyilemesi yapabilecek başka bir yazılım daha geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında fikirleri ve tecrübesi ile yol gösteren, birikimlerini benimle paylaşan, yoğun akademik yaşamında değerli zamanını her türlü problemimi çözmeye ayıran, gösterdiği sabır, anlayış ve verdiği sürekli destek için danışmanım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Serdar KÜÇÜK'e şükranlarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Değerli katkılarından dolayı Arş. Gör. Metin TOZ'a teşekkür ederim. Literatür araştırmam sırasında büyük katkı sağlamış olan İTÜ Uçak mühendisliğinden Dr. Elmas (ANLI) ATABAY'a da teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Yapmış olduğum bu tez çalışmasına 2010/36 numaralı tez proje desteği veren Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (KOU-BAP) teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince desteklerini esirgemeyen tüm çalışma arkadaşlarıma, hocalarıma ve idarecilerime destekleri ve sağladıkları huzurlu çalışma ortamı için teşekkür ederim. Ayrıca beni bugünlere getiren ve hiçbir zaman haklarını ödeyemeyeceğim annem ve babama, bu süreçte göstermiş olduğu sabır, anlayış ve verdiği destek için değerli eşim Aslı'ya, destekleri için sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışmamı en değerli varlıklarım olan kızlarım Ayşenur ve Zeynep'e ithaf ediyorum.

Ocak – 2013

A. Burak İNNER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLOLAR DİZİNİ	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vi
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
GİRİŞ	1
1. GENEL STEWART PLATFORM MEKANİZMASI	4
1.1. Paralel Robotların Tarihçesi	5
1.2. Literatürde Yapılan Çalışmalar	9
1.3. Çalışmanın Amacı	17
1.4. GSP Mekanizmalarının Geometrik Tanımı	17
1.5. Ters Kinematik	17
1.6. Jacobian Matrisi Analizi	20
1.7. İleri (Düz) Kinematik	21
1.8. Beceri (Dexterity) Analizi	24
1.9. Çalışma Uzayı	26
1.10. Tekillikler	29
2. STEWART PLATFORM BENZETİM ARACI (STEWSIM)	31
2.1. GSP Mekanizmalarının Tasarımı	31
2.2. GSP Mekanizmalarının Analizi	37
2.2.1. Ters kinematik analizi	37
2.2.2. Jacobian analizi	41
2.2.3. İleri (düz) kinematik	43
2.2.4. Beceri analizi	44
2.2.5. Çalışma uzayının belirlenmesi	47
2.2.6. Tekillik analizi	47
2.2.7. Yörünge analizi	49
2.2.8. STEWSIM değerlendirmesi	51
3. BOYUTSAL ENİYİLEME ARACI (STEWOPT)	53
3.1. Eniyileme Kısıtları	55
3.2. Eniyilemenin Amaçları	59
3.3. Eniyileme Algoritması	60
3.3.1. Parçacık sürü eniyileme algoritması (PSO)	60
3.3.2. Kuantum parçacık sürü eniyileme algoritması (QPSO)	62
3.3.3. STEWOPT yazılımının tanıtımı	63
4. KİNEMATİK ENİYİLEME SONUÇLARI	71
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	86
KAYNAKLAR	89
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	98
ÖZGEÇMİŞ	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	James Gwinnett tarafından patenti alınan hareket platformu	6
Şekil 1.2.	Otomatik boya püskürtme mekanizması	7
Şekil 1.3.	D. Stewart tarafından önerilen mekanizma	7
Şekil 1.4.	Dr. Eric Gough tarafından tasarlanan mekanizma	8
Şekil 1.5.	Altı bacaklı farklı bağlantılı GSP mekanizmaları	9
Şekil 1.6.	a) 3 bacaklı 3x3 GSP mekanizması b) 6 bacaklı 6x6 GSP mekanizması	18
Şekil 1.7.	40 tane gerçek ileri kinematik çözüme sahip GSP mekanizması	23
Şekil 2.1.	STEWSIM yazılımının aşamaları	31
Şekil 2.2.	STEWSIM uygulamasının ana ekranı	32
Şekil 2.3.	Sabit platformun yarıçap değerinin belirlenmesi	32
Şekil 2.4.	Sabit platformun yarıçap ve açı değerlerinin girildiği ekran	33
Şekil 2.5.	Hareketli platformun yarıçap ve açı değerlerinin girildiği ekran	33
Şekil 2.6.	STEWSIM ana tasarım ekranı	34
Şekil 2.7.	STEWSIM ana tasarım ekranında 6x6 GSP mekanizmasının gösterilmesi	36
Şekil 2.8.	Gelişigüzel şekilde sabit ve hareketli platformlar	36
Şekil 2.9.	STEWSIM ana tasarım ekranında 5x4 GSP mekanizmasının gösterimi	37
Şekil 2.10.	Mekanizmanın seçilerek analiz yapılabildiği analiz ekranı	38
Şekil 2.11.	6x6 GSP mekanizmasının ters kinematik hesabı	38
Şekil 2.12.	Yönelim matrisinin seçim ekranı	39
Şekil 2.13.	Hareketin yönelim açıları, zaman ve çözünürlük değerlerinin seçilmesi	40
Şekil 2.14.	Hareketli platform ve bacakların hareketin konum, hız ve ivme profili	41
Şekil 2.15.	GSP mekanizmasının hareket geçmişi	41
Şekil 2.16.	6x6 GSP mekanizmasının Jacobian analizi	42
Şekil 2.17.	5x4 GSP mekanizmasının Jacobian analizi	42
Şekil 2.18.	İleri kinematik analiz ekranı	43
Şekil 2.19.	İleri kinematik sonucunun çizdirilmesi	44
Şekil 2.20.	6x6 GSP mekanizması için beceri hesabı	45
Şekil 2.21.	6x6 GSP mekanizması için farklı parametrelerle beceri gösterimi	46
Şekil 2.22.	5x4 GSP mekanizması için beceri hesabı için parametre sabitlenmesi	46
Şekil 2.23.	5x4 GSP mekanizmasının beceri hesabı sonucunun görselleştirilmesi	47
Şekil 2.24.	6x6 GSP mekanizmasının çalışma uzayı	48
Şekil 2.25.	5x4 GSP mekanizmasının çalışma uzayı	48
Şekil 2.26.	6x6 GSP mekanizması için tip 2 tekilliklerinin görselleştirmesi	49
Şekil 2.27.	5x4 GSP mekanizması için tip 2 tekilliklerinin görselleştirmesi	50
Şekil 2.28.	EXCEL dosyasında Yörünge planlaması için bilgilerin saklanması	50

Şekil 2.29. 6x6 GSP mekanizmasının yörünge planlaması.....	51
Şekil 2.30. 6x6 GSP mekanizmasının yörüngesinin gösterimi	51
Şekil 3.1. Doğrusal eyleyicinin şematik gösterimi	56
Şekil 3.2. Minimum tabla yarıçap hesaplanması	57
Şekil 3.3. Minimum ayırma açısının gösterimi	58
Şekil 3.4. Maksimum yerleştirme açısı.....	59
Şekil 3.5. PSO algoritmasının akış diyagramı.....	62
Şekil 3.6. QPSO algoritmasının sözde (pseudo) kodu.....	64
Şekil 3.7. STEWOPT yazılımının akış diyagramı.....	65
Şekil 3.8. STEWOPT yazılımının karşılama ekranı	66
Şekil 3.9. Mekanizmanın tipi ile ilgili ayarlamalar	66
Şekil 3.10. Bacak özelliklerinin belirlenmesi.....	67
Şekil 3.11. Sabit ve hareketli platform yarıçap parametrelerinin belirlenmesi	67
Şekil 3.12. Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktalarının açıları.....	68
Şekil 3.13. Çalışma uzayı parametrelerinin seçilmesi	68
Şekil 3.14. Performans indislerinin seçimi ve ağırlıkları.....	69
Şekil 3.15. Eniyileme (PSO) parametrelerinin ayarlanması	70
Şekil 3.16. STEWOPT tüm parametrelerin doğrulanma ekranı.....	70
Şekil 4.1. Doğrusal eyleyicinin şematik gösterimi	71
Şekil 4.2. On farklı GSP mekanizmasının GBİ değerleri	84

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Paralel mekanizmalarla ilgili benzetim araçlarının karşılaştırılması	12
Tablo 3.1. Minimum yarıçap hesaplanırken kullanılan maksimum yerleştirme açıları	57
Tablo 3.2. Sabit ve hareketli platformdaki maksimum yerleşim açıları	59
Tablo 3.3. Eniyileme amacı.....	60
Tablo 4.1. Endüstride yaygın olarak kullanılan doğrusal eyleyicilerin özellikleri	72
Tablo 4.2. Endüstride kullanılan GSP mekanizmalarının yönelim açıları.....	72
Tablo 4.3. Sabit & hareketli platformun minimum ve maksimum yarıçap değerleri	72
Tablo 4.4. 3x3 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	74
Tablo 4.5. 4x3 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	75
Tablo 4.6. 4x4 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	76
Tablo 4.7. 5x3 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	77
Tablo 4.8. 5x4 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	78
Tablo 4.9. 5x5 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	79
Tablo 4.10. 6x3 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	80
Tablo 4.11. 6x4 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	81
Tablo 4.12. 6x5 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	82
Tablo 4.13. 6x6 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları.....	83
Tablo 4.14. GSPs stroke uzunluğu 50 ve 100	84
Tablo 4.15. GSP stroke uzunluğu 150 ve 200	85
Tablo 4.16. GSP stroke uzunluğu 250	85

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

B	: Sabit platformun koordinat merkezi
B_i	: B koordinat ekseninde her bir bacağın 3-boyutlu konumu
$B_i M_i$: Bacak vektörleri
d_i	: Bacakların uzunlukları
ε	: Maksimum açı
j_m	: İki komşu eklem birbiri en yakın yerleştirilebileceği uzaklık
J^{-1}	: Jacobian matrisinin tersi
J_{A1}	: J_A matrisinin ilk üç sütunu
J_{A2}	: J_A matrisinin son üç sütunu
κ	: Koşul sayısı
η	: Koşul sayısının tersi
L	: Karakteristik uzunluk
l_{\min}	: Bacakların minimum uzunluğu
l_{\max}	: Bacakların maksimum uzunluğu
l	: Doğrusal eyleyicinin uzunluğu
l_u	: Hareketli platforma bağlı üniversal eklem uzunluğu
l_r	: İçine çekilmiş (retracted) uzunluk
l_s	: Stroke uzunluğu
l_l	: Üniversal (Kardan) eklem uzunluğu
M	: Hareketli platformun koordinat merkezi
M_i	: M koordinat ekseninde her bir bacağın 3-boyutlu konumu
O	: Sabit platformun merkezi
P	: Hareketli platformun merkezi
R	: Dönme matrisi
R_x	: x eksenine etrafındaki dönme matrisi
R_y	: y eksenine etrafındaki dönme matrisi
R_z	: z eksenine etrafındaki dönme matrisi
r_j	: Pasif üniversal (Kardan) eklem yarıçapı
rb_{\min}	: Sabit platformun minimum yarıçap limiti
rb_{\max}	: Sabit platformun maksimum yarıçap limiti
rm_{\min}	: Hareketli platformun minimum yarıçap limiti
rm_{\max}	: Hareketli platformun maksimum yarıçap limiti
T	: Öteleme vektörü
v_p	: Hareketli platformun doğrusal hızı
ω_b	: Sabit platformun açısal hızı
ψ_{bi}	: B_i vektörlerinin B koordinat sistemindeki x eksenine yaptığı açılar
ψ_{mi}	: M_i vektörlerinin M koordinat sistemindeki x eksenine yaptığı açılar
\dot{q}	: Bacakların doğrusal hızları
\dot{x}	: Hareketli platformun doğrusal ve açısal hızları
z_i	: $B_i M_i$ bacakların doğrultusundaki birim vektörler

Alt indisler

i : Bacak sayısını ifade eder.

Kısaltmalar

BS	: Bacak Sayısı
Çal.	: Çalışma Uzayı
ÇUH	: Çalışma Uzayının Hacmi
GBİ	: Genel Beceri İndisi
GUI	: Graphical User Interface (Grafiksel Kullanıcı Arabirimi)
Görs.	: Görselleştirme
GSP	: General Stewart Platform (Genel Stewart Platform)
Kin.	: Kinematik
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Eniyilemesi)
QPSO	: Quantum Particle Swarm Optimization (Kuantum Parçacık Sürü Eniyilemesi)
STEWSIM	: Stewart Platform Simulation Software (Stewart Platform Benzetim Yazılımı)
STEWOPT	: Stewart Platform Optimization Software (Stewart Platform Eniyileme Yazılımı)
Tek.	: Tekillik
Yör.	: Yörünge Planlaması
YBİ	: Yerel Beceri İndisi

STEWART PLATFORM BENZETİM VE ENİYİLEME YAZILIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında robot tasarımcıları ve araştırmacıları için bir Genel Stewart Platform (GSP) benzetim aracı (STEWSIM) tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Farklı sayıda bacağına sahip olası tüm GSP mekanizmalarının kolaylıkla tasarlanabilmesini sağlayan bağlantı matrisi algoritması geliştirilmiştir. MATLAB ortamında grafiksel kullanıcı arabirime sahip olarak geliştirilen bu araç sayesinde GSP mekanizmalarının ters ve ileri kinematik, Jacobian matrisi, beceri (Dexterity), çalışma uzayı, tekillik analizi ve yörünge planlaması hesaplamaları Roll-Pitch-Yaw veya Euler açı setleri kullanılarak yapılabilmektedir.

Üç ile altı bacak sayısına sahip olası tüm GSP mekanizmalarının boyutsal eniyilemesini yapabilen araç (STEWOPT), STEWSIM'in kinematik özellikleri temel alınarak geliştirilmiştir. STEWOPT, kullanıcıların en iyi bacak uzunluklarını, sabit ve hareketli platformun yarıçapları ile bağlantı noktalarının konumlarını manipülatörün beceri değeri yardımıyla hesaplayabilmektedir. Beceri hesaplanmasında, iki farklı norm operatörü yardımıyla Jacobian matrisinin koşul sayısının hesaplanabilmesi sağlanmıştır. Eniyileme algoritması olarak parçacık sürü ve kuantum parçacık sürü algoritmalarından birisi seçilebilmektedir. STEWOPT, GSP mekanizmalarının beceri değerlerini karşılaştırarak, verilen bir işe uygun en iyi GSP yapılandırmasının bulunmasını sağlayabilir.

Beş farklı stroke uzunluğuna sahip on farklı tipte altı bacaklı GSP mekanizmalarının eniyilemesi STEWOPT yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak 6x5 ve 6x6 GSP mekanizmalarının en iyi, 5x5 GSP mekanizmasının ise en kötü kinematik başarımı sergilediği görülmüştür. Ayrıca stroke uzunluğu olarak 100 mm ve 150 mm değerleri on farklı GSP içinde en iyi beceri değerlerini sunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çalışma Uzayı Analizi, Genel Stewart Platform Mekanizması, Global Dexterity İndisi, Kuantum Parçacık Sürü Eniyilemesi, Paralel Robot.

IMPLEMENTATION OF SIMULATION AND OPTIMIZATION OF STEWART PLATFORM

ABSTRACT

In this work, a General Stewart Platform (GSP) Simulation tool (STEWSIM) has been developed for robot designers and researchers. STEWSIM uses an efficient connection matrix algorithm that has been developed for designing all possible types of GSPs easily. This new simulation software, based on MATLAB graphical user interface, provides a suite of analysis such as inverse and forward kinematics, Jacobian matrix, dexterity, workspace, singularity and trajectory planning by using different kinds of Roll-Pitch-Yaw or Euler angle sets.

A new interactive optimization tool (STEWOPT) has been developed based on the kinematic properties of STEWSIM to perform dimensional optimization of all types of GSPs with different number of legs varying between three and six. STEWOPT enables the designers user to find the optimum link lengths, radiuses and attachment points of the base and moving platforms for different actuator stroke lengths in order to measure the dexterity of the manipulator computed by applying two different norms of the condition number of the Jacobian matrix. The Particle Swarm and Quantum Particle Swarm Optimization can be used as the optimization algorithms. STEWOPT allows the user to compare the dexterity values of several manipulators in order to find the best GSP configuration for a specified task.

Ten different types of six-legged GSPs with five different actuator stroke lengths have been optimized by using STEWOPT. It is concluded from the results that 6x6 and 6x5 GSP provides the best while 5x5 GSP provides the worst kinematic performances. The actuator stroke lengths of 100 mm and 150 mm produce the best dexterity values for the ten different GSPs.

Keywords: Workspace Analysis, General Stewart Platform Mechanism, Global Dexterity Index, Quantum Particle Swarm Optimization, Parallel Robot.

GİRİŞ

Paralel mekanizmaların kökeni incelendiğinde, seri robotlardan bile önce önerildiği görülmektedir. Buna rağmen endüstriyel uygulamalardaki kullanımı son 20 yılda artmıştır. Paralel mekanizmalar yüksek katılık, yüksek hassasiyet, yük taşıma kapasitesi ve yüksek hız gibi avantajlarından dolayı seri mekanizmalara göre tercih edilmektedirler. Bununla beraber kısıtlı çalışma uzayı, karmaşık kinematik çözümler ve çalışma uzayı içerisindeki tekillikler bu tip mekanizmalarda karşılaşılan en önemli problemlerdir. Hareketli platforma birden fazla bacağın bağlı olması nedeniyle kaldırabilecekleri kütlelerin, mekanik yapılarının kütesine oranı büyüktür. Çok hassas konumlama yapabildikleri gibi aynı hareketi tekrarlama kabiliyetleri de yüksektir. Paralel mekanizmalar, rijitlik ve hassasiyet bakımından seri mekanizmalara göre daha üstündürler. Doğal frekansları ile kuvvet/ağırlık oranları yüksek olduğundan yüksek hız ve hassasiyet gerektiren fakat küçük çalışma uzayının yeterli olduğu durumlarda seri mekanizmalara göre tercih edilirler [1].

Paralel robotlar konusunda, Türkiye’de 1992 yılından itibaren yüksek lisans ve doktora tezlerine rastlanmaktadır. Dünyadaki gelişmelere paralel olarak Türkiye’de de yapılan çalışmaların son yıllarda önemli ölçüde arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında ülkemizde önemli projelerin gerçekleştirildiği de görülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında iki önemli uygulama geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi, Genel Stewart Platform (GSP) mekanizmalarının benzetim ve analiz aracı olarak kullanılması için geliştirilen STEWSIM yazılımıdır. STEWSIM, GSP mekanizmaları üzerinde ters ve ileri kinematik, Jacobian, beceri, çalışma uzayı, tekillik ve yörünge analizini gerçekleştirebilmektedir. Yazılım MATLAB ortamında grafiksel arabirime sahip olacak şekilde geliştirilmiş ve kullanıcıya etkileşimli görsel kullanım imkânı sunulmuştur. Yazılım çevrimdışı çalışacak şekilde programlanmıştır. Daha sonra imalatı tamamlanacak olan GSP mekanizmasının da çevrimiçi kontrol edilebilme özelliğinin de yazılıma eklenmesi planlanmaktadır. Bu

tez çalışmasının en önemli katkılarından birisi de üç ile altı arasında bacak sayısına sahip $3 \times 3, 4 \times 3, 4 \times 4, \dots, 6 \times 5, 6 \times 6$ gibi olası tüm GSP mekanizmalarının tasarım ve analizinin tek bir kod parçası ile yapılabilmesini sağlayan bağlantı matrisi algoritmasıdır. Bu algoritma sayesinde farklı GSP mekanizmaları için ayrı ayrı uygulamalar geliştirilmesine gerek kalmamıştır. STEWSIM yazılımı endüstriyel uygulamalar düşünülerek geliştirilmiştir. Bununla birlikte paralel manipülatörlerin eğitiminde de kullanılması planlanmaktadır.

STEWSIM yazılımının kinematik özellikleri temel alınarak, GSP mekanizmalarının kinematik boyutsal eniyileme işlemlerinde kullanılmak üzere STEWOPT isimli uygulama geliştirilmiştir. Kinematik performans indisleri incelenmiş, global beceri indisinin (Global Dexterity Index) en fazla tercih edilen indis olduğu görülmüştür. Beceri hesabında, Jacobian matrisinin boyutsal uyumsuzluk nedeniyle doğrudan kullanılamayacağı dolayısıyla homojenleştirilmesi gerektiği görüldüğünden, karakteristik uzunluk yardımıyla Jacobian matrisi homojenleştirilmiştir. Ayrıca beceri hesaplamasında kullanılan koşul sayısının (condition number) hesabında iki farklı norm operatörü kullanılabilir şekilde STEWOPT uygulaması geliştirilmiştir. Uygulama yardımıyla verilen bacak uzunluklarına göre GSP mekanizmalarının sabit ve hareketli platformlarının yarıçap büyüklüğü ve bacakların platformlar üzerindeki bağlantı noktalarının konumları, Parçacık Sürü eniyileme (PSO) algoritması kullanılarak belirlenebilmektedir. Ayrıca bacak uzunluklarının da eniyilemesi sağlanabilmektedir. Literatürde benzer işi belirli birkaç tane GSP mekanizması için yapan pek çok çalışma bulunmaktadır. Geliştirilen STEWOPT'un en önemli katkısı, farklı sayıda bacak ve farklı bağlantı noktalarına sahip $3 \times 3, 4 \times 3, 4 \times 4, \dots, 6 \times 5, 6 \times 6$ gibi GSP mekanizmalarının tümünü tek bir arayüz yardımıyla eniyileyebilmesidir.

Endüstriyel malzemeler incelenerek belirlenen beş farklı bacak uzunluğu için on farklı GSP mekanizmasının STEWOPT yazılımı yardımıyla eniyilemesi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde 6×6 ve 6×5 GSP mekanizmaları en iyi kinematik performansı sunmaktadır. Bunun yanında en büyük çalışma uzayı hacimlerine sahip oldukları da görülmüştür. 5×5 GSP mekanizmasının da en kötü kinematik performans ve en küçük çalışma uzayı hacmine sahip olduğu görülmüştür. Bacak uzunlukları incelendiğinde ise stroke uzunluğu 100 mm ve 150 mm olarak seçilen mekanizmaların en iyi kinematik

performansı sergiledikleri görülmüştür. Eniyilenmiş mekanizmaların sabit ve hareketli platform şekilleri incelendiğinde şekillerin kabaca üçgene benzediği görülmüştür. Yarı düzenli altıgen (hexagon) olarak da adlandırılan bu şeklin en iyi kinematik performansı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bu doktora tez çalışmasında, geliştirilen STEWOPT uygulaması kullanılarak imalatı gerçekleştirilmekte olan bir mekanizmanın kinematik olarak boyutsal eniyilemesi yapılmıştır. Bacakların platformlar üzerinde bağlantı noktalarının konumları belirlenerek, bu değerlere göre imalat işlemi gerçekleştirilmektedir. Stewart platform mekanizmasının imalatı tamamlandığında, kinematik performans sonuçlarının fiziksel olarak da doğrulanabileceği öngörülmektedir.

Bu doktora tezi dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde paralel mekanizmaların kökeni ve tarihsel gelişimi irdelenmiş, Stewart platform mekanizması ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Ters ve ileri kinematik, Jacobian matrisi, beceri, çalışma uzayı, tekillik kavramları açıklanmıştır. İkinci bölümde ise geliştirilen STEWSIM uygulamasının grafiksel arabirimi detaylı olarak açıklanmıştır. Üçüncü bölümde kinematik olarak boyutsal eniyileme işlemini gerçekleştiren STEWOPT yazılımının sunduğu tüm özellikler, ekran görüntüleri yardımıyla detaylı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölümde endüstride kullanılan malzemelere göre belirlenen değerler için gerçekleştirilen kinematik eniyileme sonuçları tablolar halinde verilmiş ve sonuçlar detaylı olarak irdelenmiştir.

1. GENEL STEWART PLATFORM MEKANİZMASI

Bir genel paralel manipülatör, uç işlevcisinin birkaç bağımsız kinematik zincir ile tabanına bağlı olduğu, kapalı döngülü kinematik zincir mekanizma olarak tanımlanmaktadır. Bu genel paralel manipülatör tanımı, kontrol edilebilen serbestlik derecesinden daha fazla sayıda eyleyici (actuator) bulunduran artık (redundant) mekanizmaları içine aldığı gibi ortaklaşa çalışan manipülatörleri de içine alacak kadar geniştir. Genelde aşağıdaki özellikleri sağlayan mekanizmalar ile ilgilenilmektedir [2, 3]:

- Sabit platform, hareketli platforma en az iki kinematik zincir ile bağlanmıştır. Bu kinematik zincirlerin her birisi en az bir tane eyleyici içermektedir,
- Uygun bir algılayıcı (sensor) yardımıyla eyleyici ile ilişkilendirilmiş değişkenler (dönme açısı veya doğrusal hareket) ölçülmektedir,
- Uç işlevcisinin serbestlik derecesi eyleyici sayısı ile eşittir,
- Eyleyiciler kilitlendiğinde (hareketsiz kaldığında) manipülatörün hareketliliği (mobilitesi) sıfırdır.

Bu tür mekanizmalar aşağıdaki sebeplerden dolayı ilgi çekici hale gelmiştir [2, 3]:

- En az iki kinematik zincir ile yükün zincirler üzerine dağıtılması sağlanır,
- Eyleyici sayısı minimumdur,
- Mekanizmanın kapalı döngü kontrolü için gerekli algılayıcı sayısı minimumdur,
- Eyleyiciler kilitlendiğinde uç işlevci pozisyonunu korur. Bu özellikle medikal robotlarda güvenlik açısından son derece önemlidir.

Paralel robotlar, n serbestlik derecesine sahip bir uç işlevci ile sabit platforma en az iki bağımsız kinematik zincir ile bağlı olduğu mekanizmalardır [2, 3]. N tane eyleyici yardımıyla uç işlevcide hareket meydana getirilebilir. Zincir sayısı serbestlik

derecesine eşit olan paralel manipülatör, tam paralel manipülatör olarak adlandırılmaktadır [2, 3].

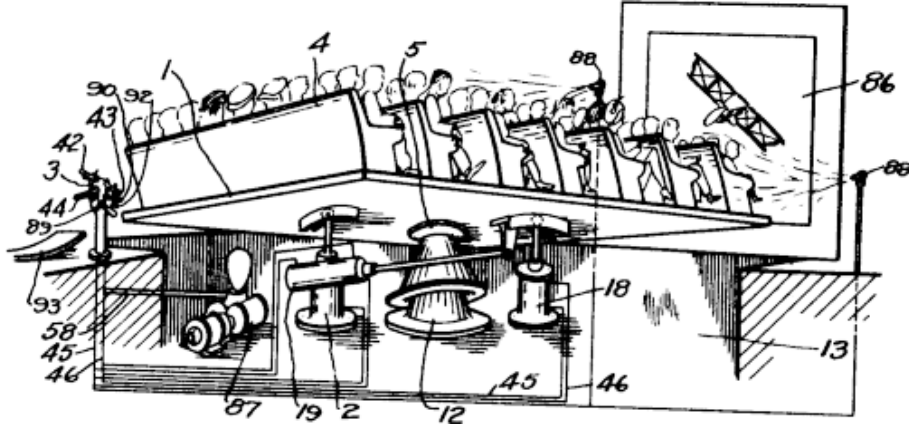
Seri robotlar ise bir dizi eklem (joint) ve bu eklemleri birleştiren bağlardan (link) oluşmaktadır. Seri robotlar, kinematik yapısı açık döngülü zincir şeklinde olan mekanizmalardır. Seri robotlar, az sayıda mekanik parçaya, geniş çalışma uzayına ve paralel robotlara göre daha basit kinematik denklemlere sahiptir. Fakat kaldıracakları kütlelerin, mekanik yapılarının kütesine oranı çok küçüktür. Eklenen her bağın ve eklemün ağırlığını önceki bağlar ve eklemler taşımaktadır. Her bir eklemün dolaylı olarak oluşan hata uç işlevciye doğru toplanmaktadır. Ayrıca kontrolleri esnasında aynı hareketi tekrarlama kabiliyetleri (repeatability) de göreceli olarak düşüktür. Endüstriyel seri robotlar, yapı olarak kabaca insan koluna benzetilebilirler [4, 5].

Paralel mekanizmalar yüksek katılık, yüksek hassasiyet, yük taşıma kapasitesi ve yüksek hız gibi avantajlarından dolayı seri mekanizmalara göre tercih edilmektedirler. Bununla birlikte kısıtlı çalışma uzayı, karmaşık kinematik çözümler ve çalışma uzayı içerisindeki tekillikler bu tip mekanizmalarda karşılaşılan en önemli problemlerdir. Hareketli platforma birden fazla bağın bağlı olması nedeniyle kaldıracakları kütlelerin, mekanik yapılarının kütesine oranı büyüktür. Çok hassas konumlama yapabildikleri gibi aynı hareketi tekrarlama kabiliyetleri de yüksektir. Paralel mekanizmalar, rijitlik ve hassasiyet bakımından seri mekanizmalara göre üstündür. Doğal frekansları ile kuvvet/ağırlık oranları yüksek olduğundan yüksek hız ve hassasiyet gerektiren fakat küçük çalışma uzayının yeterli olduğu durumlarda tercih edilmektedirler [1, 3]. Paralel mekanizmalar, mimarilerinden dolayı, seri mekanizmalardan daha yüksek doğal frekansa, katılığa, çalışma hızına, nominal yüklemeye ve hassasiyete sahiptirler. Özet olarak yüksek dinamik özellikler, yüksek kuvvet/ağırlık oranı ve küçük çalışma uzayının yeterli olduğu durumlarda paralel mekanizmalar tercih sebebidir. Bunlara karşın paralel mekanizmaların kinematiği, dinamiği ve kontrolü seri mekanizmalara nispeten daha zordur [1, 3].

1.1. Paralel Robotların Tarihçesi

Paralel robotların tarihçesi için Bonev [6] tarafından hazırlanan “Paralel Mekanizmaların Gerçek Kökeni” isimli çalışması, Willard L.G. Pollard Jr., Klaus Cappel ve Dr. Eric Gough gibi bu konudaki öncülerle bizzat görüşülerek

hazırlanıldığından, önemli bir kaynak olarak görülebilir. Bu çalışmada, ilk paralel mekanizmanın 1931 yılında James Gwinnett tarafından patenti alınmış eğlence amaçlı bir hareket platformu olduğu söylenmiş ve Şekil 1.1’de gösterilmiştir [6]. Fakat Gwinnett zamanının çok ötesinde böyle bir paralel mekanizmayı düşünmesine rağmen o tarihte endüstri teknolojik olarak bunu gerçekleştirebilecek seviyede donanımlı değildi [6].

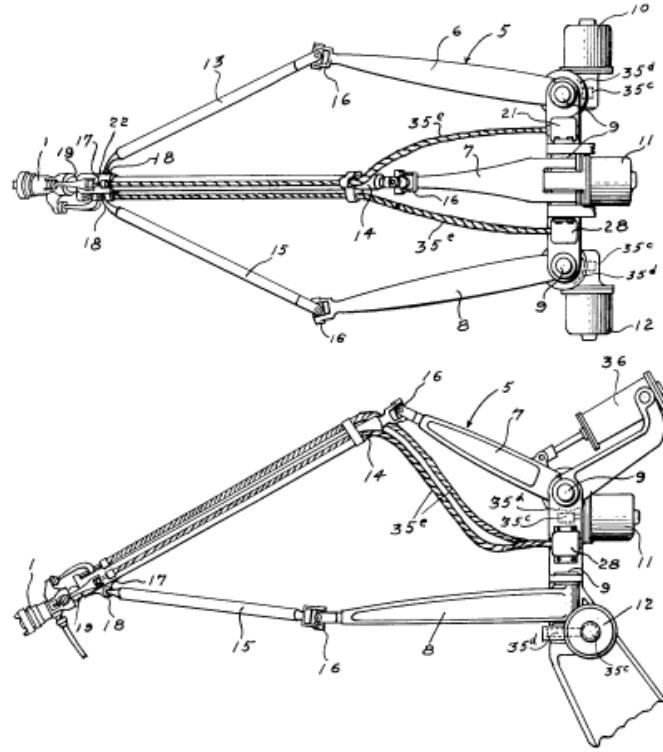


Şekil 1.1. James Gwinnett tarafından patenti alınan hareket platformu [6]

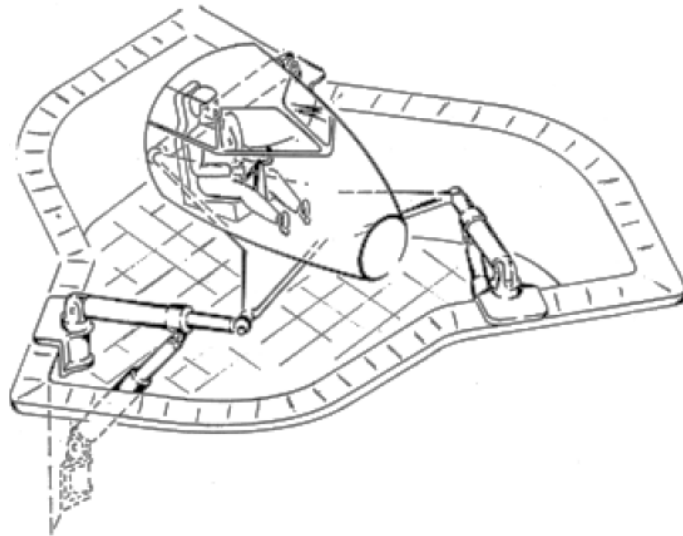
Willard L.V. Pollard tarafından otomatik boya püskürtme işlemi için tasarlanan mekanizma, ilk endüstriyel paralel robot olarak kabul görmüştür. 5 serbestlik dereceli olarak icat edilen bu tasarım ne yazık ki hiçbir zaman gerçekleştirilememiştir. Willard L.V. Pollard’ın oğlu Willard L.V. Pollard Jr. tarafından 1942 yılında patenti alınarak gerçekleştirilen otomatik boya püskürtme mekanizması ise Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Bu mekanizma ilk endüstriyel paralel robot mekanizması olarak kabul edilmektedir.

D. Stewart tarafından 1965 yılında uçuş simülatörü (aircraft simulator motion base) olarak bir paralel robot (Şekil 1.3) önerilmiştir [7]. Önerdiği yapı üzerinde Meier, Eastern, Gough, Hunt, Murdoch, Nicholls, Thomas ve Tindale’in yorumları ile değişiklik yapılmış ve öneri son halini almıştır. Otomotiv mühendisi olan Dr. Eric Gough, Stewart tarafından önerilen mekanizmanın benzerini (Şekil 1.4) 1949 yılında lastik test mekanizması olarak tasarladığını ve 1954-55 yıllarında kullanıldığını ifade etmiştir. Bu platform otomotiv lastiklerine uygulanan kuvvetleri tespit etmek için kullanmıştır [8]. Stewart ve Gough’un tasarladığı mekanizmaların bugün kullanılan birçok paralel mekanizmanın temelini teşkil etmesi nedeniyle bu tür

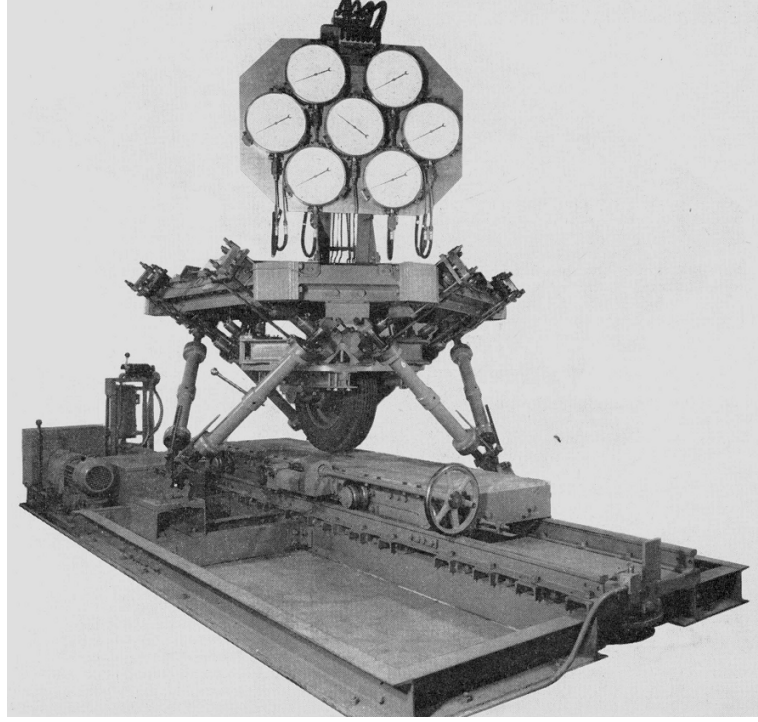
mekanizmalar bu iki tasarımcının isimleri kullanılarak (Gough-Stewart Platform) adlandırılmaktadır. Fakat literatürde Stewart platform olarak da kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında Stewart platform mekanizması şeklinde isimlendirme tercih edilmiştir. Hunt 1978 yılında paralel mekanizmaların manipülator olarak kullanılmasını önermiş ve avantaj-dezavantajlarından bahsetmiştir.



Şekil 1.2. Otomatik boya püskürtme mekanizması



Şekil 1.3. D. Stewart tarafından önerilen mekanizma [7]



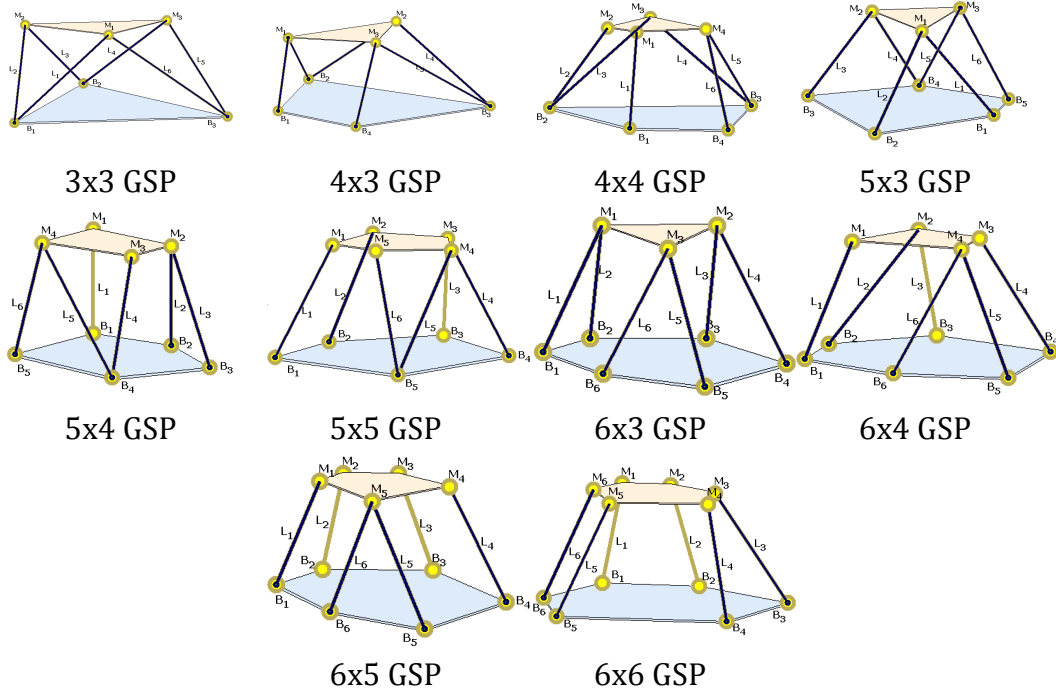
Şekil 1.4. Dr. Eric Gough tarafından tasarlanan mekanizma [6]

Mekanizmalar kullanım amaçlarına göre farklı yapıda ve değişik çalışma uzaylarında olabilmektedirler. Günümüzde kullanılan Genel Stewart Platform (GSP) mekanizmaları, 1965 yılında önerildiği [7] şekilden biraz farklı olarak, boyları prizmatik eklemler vasıtasıyla değişebilen 6 bacak ile birbirine bağlı altıgen biçimli, biri sabit ve diğeri hareketli, iki platformdan oluşmaktadır. Bacakları hareket ettiren eyleyiciler, sabit ve hareketli platformlara çeşitli eklemlerle bağlıdır ve bu eklemler üniversal (kardan), dönel veya küresel eklem olarak seçilebilir. GSP mekanizmaları, genellikle eklem ve eyleyicilerin yapılarına bağlı olarak üç yönde öteleme ve üç yönde dönme hareketi yapabilecek şekilde 6 serbestlik dereceli olarak tasarlanır.

1965'te Stewart'ın uçuş simülatörü olarak önerdiği 6 serbestlik dereceli paralel platform mekanizması başta uçak, tank, deprem ve sürüş simülatörleri, radar anteni, eğlence parkları, petrol platformları, robot kolları, CNC tezgâhları, yüzey cilalama, kesme ve şekillendirme, montaj işlemleri, anten yerleştirme, mikro makineler ve ameliyat robotları olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır [7-11].

GSP mekanizmaları yapısal olarak birçok şekilde sınıflandırılabilirler. En önemli sınıflamalardan biri bacaklarının taban ve hareketli platforma bağlanma noktalarının sayısıdır. Örnek olarak, bacakların tabana bağlandığı nokta sayısı altı, hareketli

platforma bağlandığı nokta sayısı üç olan mekanizma 6x3 GSP şeklinde isimlendirilmektedir. Başlıca farklı mekanizma bağlantı örnekleri Şekil 1.5'de verilmiştir. Dikkat edilirse bu mekanizmaların tümünde bacak sayısı altıdır. Altı bacedan daha az GSP tasarlanabilir. Örnek olarak üç bacedan oluşan 3x3 bir GSP tasarlanabilir fakat bacak sayısı altı olduğu durumda da aynı isimlendirme kullanılmış olur. Bu durumda mekanizmalar tanımlanırken aynı zamanda kullanılan bacak sayısının da belirtilmesi gereklidir. Bu tez çalışması kapsamında üç bacaklı 3x3, dört bacaklı 3x3,4x3,4x4, beş bacaklı 3x3,4x3,4x4,5x3,5x4,5x5 ve altı bacaklı 3x3,4x3,4x4,5x3,5x4,5x5,6x3,6x4,6x5,6x6 mekanizmalar incelenmiştir.



Şekil 1.5. Altı bacaklı farklı bağlantılı GSP mekanizmaları

1.2. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Merlet [2] paralel mekanizmalarla ilgili olarak kapsamlı bir kitap hazırlamış ve bu alanda yapılan çalışmalarını detaylı bir şekilde özetlemiştir. Dasgupta ve Mruthyunjaya [12] da literatür taraması yapmış ve Stewart platform ile ilgili olarak çözülmesi gereken problemleri işaret etmiştir. Ayrıca yüksek yük taşıma ve hassasiyet gereken uygulamalarda paralel mekanizma kullanımının biyolojik hayatta da yer aldığını söylemiş, dört ayaklı yük taşımacılığında kullanılan hayvanları, yazı yazarken hassasiyetten dolayı parmakların paralel kullanıldığı vb. gibi örnekleri göstermiştir.

Faugere ve Lazard [13] paralel manipulatörlerin kombinyonel (combinatorial) olarak sınıflandırılmasını sunmuştur. Köşegen rijitlik matrisi ile karakterize edilen yeni bir 6 serbestlik dereceli paralel robot Artigue [1] tarafından önerilmiştir. Kuvvet geri besleme kontrolü olarak kullanılabilir 6 serbestlik dereceli yeni bir paralel robotlar ise Dafaoui [15] tarafından önerilmişlerdir. Hunt [16] ve Pritsschow [17] ise noktalar ve doğrular arasındaki uzaklığa göre yeni paralel robotlar önermişlerdir. Farklı çeşit GSP mekanizmaların tasarımı ile ilgili en önemli çalışma Gao [18] tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada nokta, doğru ve düzlemler arasındaki uzaklıklara göre 3850 farklı formda GSP mekanizması olduğunu gösterilmiştir. Bu mekanizmalardan 1120 tanesinin, Lazard [19] ve Mourrain [20] tarafından önerilen çözüm teknikleri kullanılarak gerçek kinematik çözümleri elde edilmiştir. Wang [21] ise hazırlanmış olduğu yüksek lisans tezinde 20 yapılabılır (feasible) GSP topolojisi önermiş, her bir topoloji için farklı yapılandırmalar (configuration) göstermiştir. Bu tiplerden bazıları için endüstriyel uygulamalardan örnekler verilmiştir.

Stewart platformun bir robot manipulatörü olarak yapımı ve genel teorisi ile ilgili ilk önemli çalışma Fichter [22] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada Oregon State Üniversitesinde geçmiş yıllarda yapılan çalışmaların özeti verilerek, kinetik, kinematik ve tekillik analizleri sunulmuştur. Fichter'in bu çalışması diğer araştırmacılar için bir temel olmuş ve pek çok araştırmacı tarafından referans olarak kullanılmıştır.

Modelleme ve benzetim mühendislik problemlerinin çözümünde en önemli ve temel adımdır. Endüstriyel uygulamaların üretiminden önce tasarım ve benzetim araçlarının kullanılması hem maliyeti hem de üretim zamanını düşürmektedir. Robot topluluğu tarafından büyük çoğunluğu seri robotlar için olmak üzere pek çok benzetim aracı geliştirilmiştir. Seri robotların benzetimi için geliştirilen bu araçlardan en önemlileri Robolab [23], Robotect [24], Robotica [25], RoboSim [26] ve RAMP [27] olarak sıralanabilir. Endüstride ve literatürde seri robotlar için pek çok benzetim aracı geliştirilmiş olmasına rağmen paralel robotlar konusunda geliştirilmiş bu benzetim araç sayısı çok azdır. Merlet [28] 3-RPR düzlemsel paralel manipulatörlerin ileri kinematik analizi için C programlama dilinde bir benzetim aracı geliştirmiştir. Küçük [29] düzlemsel paralel manipulatörler için kapsamlı bir çalışma yapılarak, MATLAB ortamında grafiksel arabirime sahip interaktif bir

benzetim ve tasarım aracı olan SIDE P yazılımını geliştirmiştir. SIDE P ileri ve ters kinematik, çalışma uzayı ve tekillik analizlerini RRR, RPR, PRR ve PPR düzlemsel paralel manipülatörler için gerçekleştirebilmektedir. Bu yazılımlarda düzlemsel paralel manipülatörler çizgiler şeklinde görselleştirilmektedir. Gosselin [30], prizmatik veya dönel eyleyicilerden oluşan 3 serbestlik dereceli küresel paralel manipülatörler için ileri ve ters kinematik, tekillik ve çalışma uzayı analizi ve tasarımı için bir benzetim aracı geliştirmiştir. Bu yazılımda interaktif kinematik analizi yapılabilmekte ve yörüngenin grafik animasyonu gösterilebilmektedir. GSP mekanizmaları için geliştirilen en önemli benzetim aracı olarak Wang [21] tarafından geliştirilmiştir. Wang [21], Ding [31] tarafından Visual C++ dilinde hazırlanan yazılıma modül olarak GSP mekanizmalarını ilave edilerek grafiksel kullanıcı arabirimine sahip bir benzetim aracı geliştirilmiştir. Bu yazılımda sadece ileri kinematik ve yörünge analizi yapılabilmektedir. Wang [21] altıgen, beşgen, dörtgen, üçgen ve çizgi olmak üzere beş farklı tipte düzlemsel geometrik şekle sahip sabit ve hareketli platformdan oluşan GSP mekanizmaları üzerinde çalışmıştır. Bu yazılımda beceri, tekillik, çalışma uzayı ve yörünge planlaması yapılamamaktadır.

Bu tez kapsamında geliştirilen STEWSIM yazılımında ise olası tüm GSP mekanizmalarının ters ve ileri kinematik, beceri, tekillik, çalışma uzayı analizi ve yörünge planlaması gerçekleştirilebilmektedir. MATLAB ortamında Grafiksel Kullanıcı Arabirimine (GUI) sahip etkileşimli bir yazılım olan STEWSIM, GSP mekanizmalarını katı modeller olarak görselleştirilmektedir.

Paralel mekanizmalarla ilgili olarak geliştirilen benzetim araçlarının zellikleri Tablo 1.1'de karşılaştırılmıştır. Bu tablodaki Grs, GUI, Kin, Tek., al. ve Yr. kısaltmaları sırasıyla görselleştirme, grafiksel kullanıcı arabirimi, ters ve ileri kinematik, tekillik, çalışma uzayı ve yörünge planlaması yerine kullanılmıştır.

Türkiye'de yapılan çalışmaları incelenerek aşağıda verilmiştir. Türkçe bir çalışma hazırlayarak literatür taraması sunan Anlı [1], ileriye yönelik çalışma alanları için de önerilerde bulunmuştur.

Gökçen [32] 6x3 ve 3x3 Stewart platform mekanizmasının matematiksel modelini dört bloktan oluşacak şekilde tasarlayarak Türkiye'deki paralel robotlar konusunda ilk yüksek lisans tezini hazırlamıştır. Bu bloklar ters kinematik, sistem, dinamik ve

ileri kinematik bloklardır. Bu modelin bilgisayar yazılımı ile benzetimi yapılmış ve sonuçları incelenmiştir.

Tablo 1.1. Paralel mekanizmalarla ilgili benzetim araçlarının karşılaştırılması

Program	Dil	Görs.	GUI	Robotlar	Kin.	Beceri	Tek.	Çal.	Yör.
STEWSIM	MATLAB	Katı	Evet	Tüm GSP	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet
Wang [21]	Visual C++	Çizgi	Evet	20 GSP	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Merlet [28]	C	-		3-RPR	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Sidep [29]	MATLAB	Çizgi	Evet	RRR,RPR, PRR, PPR	Evet	Hayır	Evet	Evet	Hayır
Gosselin [30]	C, Xview	Katı	Evet	Küresel PM	Evet	Hayır	Evet	Evet	Hayır

Ovayolu [33] 6x6, 6x3, 4x4, 5x5 GSP mekanizmaları için ileri kinematik hesaplarını MATHEMATICA yazılımı yardımıyla gerçekleştiren bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Bu çalışmada 6x6 dışındaki GSP mekanizmaları için analitik çözüm, 6x6 GSP içinde sayısal (nümerik) bir çözüm sunulmuştur.

Salih [34], 3x3 Stewart platform mekanizmasının ileri ve ters kinematiğini MATLAB yazılımı ile incelemiş, ayrıca bu platformun prototipini nasıl hazırladığını anlatan bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır.

Himmetoğlu [35], paralel ve hibrid manipülatörlerin kinematik ve kuvvet analizini yapan bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Bu analizler için ULTRA isimli bir yazılım geliştirilmiş, 8 farklı yapıdaki hibrid manipülatörün kinematik analizi ve mekanik tasarımı yapılmıştır.

Özdağlar [36], bir tank kulesi ve namlusunun dinamik davranışının test edilebilmesi için geliştirilen hareket taklitçisinin (simülatörünün) anlatıldığı yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Newton-Euler denklemleri kullanılarak Stewart platformun dinamik analizi yapılmıştır.

Bulut [37], düzlemsel tip robot kolunun ileri, ters kinematik, dinamik ve klasik PD, klasik PID ve PD artı yerçekimi terimli denetimi için benzetim yazılımının

geliştirildiği bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Her bir denetim stratejisi için elde edilen denklemlerin benzetimi yazılımı MATLAB ortamında programlanmış ve görsel canlandırmalar DELPHI yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Yurt [38], genel ve özel bir 6x3 Stewart platform yapısının ileri kinematik çözümünü Bezout yöntemi ile on altıncı dereceden bir polinom yardımıyla analitik olarak, dinamik modelini ise Newton-Euler yaklaşımını kullanarak yapan bir doktora tezi hazırlamıştır. 6x3 Stewart mekanizmasının doğrusal olmayan (nonlinear) dinamik denklemleri 4-5. Dereceden Runge-Kutta metodu kullanılarak çözülmüştür. Dinamik modele uygulanacak olan PD kontrolü ise genetik algoritmalar kullanılarak hesaplanmıştır.

Bayram [39], yeni bir tip uzaysal altı serbestlik dereceli paralel manipülatörü öneren, kinematik ve dinamik analizi yapan bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Dinamik analiz Lagrange-Euler yaklaşımı ile yapılmış, yapısal sentez ve konum analizini yapabilmek için ise CaSSoM ve İMIDAS adlı iki program geliştirilmiştir.

Serim [40], üç serbestlik dereceli düzlemsel RRR paralel robotun tasarım, imalat ve kontrolünü anlatan bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Bu robotun sağladığı avantajlar incelenmiş, tasarlanan açık çevrim kontrol sistemi ve kullanılan eklem uzay kontrolü ile robotun uygunluğu gözlemlenmiştir.

Anlı [41], 6x3 Stewart platformun düz ve ters kinematik hakkında geniş bir literatür özetinin yer aldığı, yapay sinir ağlarının ileri kinematik probleminin çözümüne uygulandığı bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Yapay sinir ağlarının performansını artırmak için çevrim metodu uygulanmıştır.

Albayrak [42], modern tanklarda kullanılan iki ekseninde stabilize alın aynasının performans testlerinin yapılabilmesi için tasarlanan hareket taklitçisinin modellenmesi ve kontrolünün gerçekleştirildiği yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Matematiksel modeller MATLAB ve ADAMS yazılımları kullanılarak oluşturulmuştur. Hareket taklitçisinin doğruluğu bir atalet ölçme cihazı kullanılarak test edilmiştir.

Korkmaz [43], paralel manipulatorleri eklem esnekliği ile beraber modelleyerek yörünge takip kontrolünü gerçekleştiren bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Örnek olarak üç serbestlik dereceli, iki bacaklı bir düzlemsel paralel manipulator ele alınarak MATLAB ve SIMULINK yazılımları ile benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Ulucay [44], bir GSP mekanizmasının tasarım, analiz ve prototip üretiminin gerçekleştirildiği bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Bu tezde kontrol yöntemleri geliştirilerek, prototip üzerinde uygulaması da anlatılmıştır.

Ünsal [45], 3x3, 6x3 ve 6x6 yapıdaki GSP mekanizmalarının ileri ve ters kinematik hesaplamalarını MAPLE yazılımı yardımıyla yaptığı bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. 6x6 yapıdaki Stewart platformun ileri kinematiğinin çözümü için farklı zaman dilimlerinde bacak boyları bilinen iki tane 6x3 Stewart platform mekanizması kullanılarak çözülmüştür.

Güner [46], prototipi üretilen bir Stewart platformu için geometrik ve kinematik parametrelerin çalışma uzayı üzerindeki etkilerini MATLAB ortamında yazılan kodla inceleyen yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Elde edilen sonuçlardan birisi, bacakların sabit ve hareketli platformlar üzerinde aynı açı değerleriyle konumlandırılmasının tekilliğe sebep olduğudur. Diğer bir sonuç ise bacaklar birbirine yakın konumlandığında en büyük çalışma uzayına sahip Stewart platformun elde edilmesidir.

Kömürlüoğlu [47], Stewart platform mekanizmasının C++ programlama ortamında ileri ve ters kinematik hesabını sayısal olarak çözen ve gerçek zamanlı 3 boyutlu benzetimini 3D State kütüphanesiyle gerçekleştiren yüksek lisans tezi hazırlamıştır.

Alp [48], 6x3 ve 6x4 Stewart platform mekanizmalarının kinematik ve dinamik analizleri yaparak, çalışma uzayı analizini ayrıklaştırma ve geometrik yöntem yerine yapay sinir ağları ile gerçekleştiren bir doktora tezi hazırlamıştır. Bu yapay sinir açı modelinde 1 tane girişi, 2 tane gizli ve 1 tane çıkış katmanı kullanılmıştır.

Yıldız [49], 3x3 Stewart platform mekanizmasının dinamiğini Bond-graf yöntemi ile gerçekleştirdiği bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır.

Cin [50], bir insan-makine ara yüzü olarak, uzaysal hareket eden araçları kontrol etmek için 3x3 Stewart platformun çalışma uzayı merkezli tasarımının anlatıldığı bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır.

Can [51], genel değişken kısıtlamalı Euclidean platform robot-manipülatorlerin yapısal sentezi için yeni metotlar geliştirerek, üç serbestlik dereceli paralel manipülatöre uygulayarak, imalat işlemini gerçekleştiren bir doktora tezi hazırlamıştır.

Ünal [52], kapalı kinematik yapıdaki haptik aygıtların birden çok tasarım amacına göre boyutsal sentezlemesinde kullanılacak Pareto-front bazlı çok amaçlı tasarım eniyileştirme prosedürü sunan bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Kuvvet geri besleme cihazı olarak kullanılacak bir dış iskeletin (ex-oskeleton) üzerinde tasarım, kontrol ve prototip gerçekleştirme işlemleri uygulanmıştır.

Ulaş [53], paralel manipülatorlerin tasarımında çalışma uzayı, geometrik boyutlar ve uç elemanın taşıyabileceği yüke bağlı eyleyici kuvvetleri gibi özellikleri belirleyebilecek bir prosedür geliştirilmiştir. Çoklu gövde dinamik benzetimlerine alternatif olacak bir matematiksel model oluşturularak, iki sistemin davranışları, çıkışlar üzerinden karşılaştırılmıştır.

Ağaoğlu [54], altı serbestlik derecesine sahip paralel bir robotun, çalışma uzayı eniyilemesini kızak limitlerini de içerecek şekilde hesaplayan bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır.

Güney [55], uzaysal altı eksenli hareket edebilen 3x3 Stewart platformun gerçek zamanlı insan-makine arayüzünün empedans kontrol yöntemi ile kontrolünü gerçekleştiren bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. 3x3 Stewart platformun ileri kinematik problemi, gerçek zamanlı olarak Newton-Raphson yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

Oğan [56], eklem esnekliği göz önüne alınmış ve kısıtlı ortamlarda çalışan paralel manipülatorler için kuvvet ve hareket kontrolünü sağlayacak bir kontrol yöntemi geliştiren bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Tekil denklemlerin çözümü için kapalı sayısal integral metotları kullanılmıştır. Örnek olarak iki bacaklı, üç serbestlik

dereceli, kısıtlanmış ve esnek eklemlili düzlemsel bir paralel manipülatör ele alınmıştır.

Doğan [57], delta paralel robotların ileri ve ters kinematik hesaplarının yapıldığı bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. İleri ve ters kinematik çözümlerin doğruluğu MATLAB'da yazılan program yardımıyla test edilmiştir.

Aydın [58], 3 serbestlik dereceli paralel bir robot olan triglide (lineer delta) robotunun ters ve düz kinematik çözümlerini analitik olarak elde eden bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Lagrange yöntemi kullanılarak robotun hareket denklemleri de elde edilmiş ve bu hareket denklemleri kullanılarak sistemin Simulink modeli oluşturulmuştur. PID kontrol yöntemi kullanılarak 3 serbestlik dereceli triglide paralel robotun x, y ve z koordinatları kontrol edilmiştir.

Şanlıtürk [59], görerek işlem yapabilen bir Delta robotun tasarım, performans karakteristiklerini inceleyerek imalat ve kontrolünün gerçekleştirildiği bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Robotun analitik modeli atalet ve yerçekim kuvvetleri de göz önünde bulundurularak, gerilme analizleri yapılmış daha sonra imalatı gerçekleştirilmiş ve görerek işlem yapabilen bir sistem üzerinde deneyler yapılmıştır.

Karahan [60], seri ve paralel robotlar için yörünge kontrolü sağlayan, parçacık sürü eniyileme (PSO) tabanlı farklı kontrolörlerin tasarımını yapan bir doktora tezi hazırlamıştır. 6 serbestlik dereceli Stewart platformun dinamik modelinde kullanılmak üzere Jacobian matrisi iki farklı şekilde elde edilmiştir. Sistemin dinamiği MATLAB-SIMULINK ortamında modellenip, fiziksel robot üzerinde model doğruluğu için yörünge deneyleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Yörünge kontrolünde bulanık FOPID yöntemi önerilerek diğer kontrol yöntemlerine göre avantajları gösterilmiştir.

Güven [61], kemik kesme ameliyatlarında kullanılmak üzere geliştirilen ortopedik cerrahi robot sistemi olan OrthoRoby ve OrthoRoby'i kontrol etmek için akıllı kontrol mimarisi geliştirilen bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. OrthoRoby'nin kullanılabilirliğini test etmek için kadavra kemiği üzerinde gerçek zamanlı deneyler yapılmıştır.

1.3. Çalışmanın Amacı

Bu doktora tez çalışmasının amacı farklı yapıda ve farklı sayıda bacadan oluşan GSP mekanizmalarının ters ve ileri kinematik, çalışma uzayı, Jacobian, beceri ve tekillik hesaplamalarını yapabilecek bir uygulama geliştirmektir. Bu uygulama yardımıyla farklı yapıdaki GSP mekanizmalarını birbiriyle kıyaslanabilecek ve istenilen işe en uygun yapının seçilmesi sağlanabilecektir. Ayrıca en etkili mekanizmanın imalatı ile ilgili ölçüler tespit edilmeye çalışılacaktır.

1.4. GSP Mekanizmalarının Geometrik Tanımı

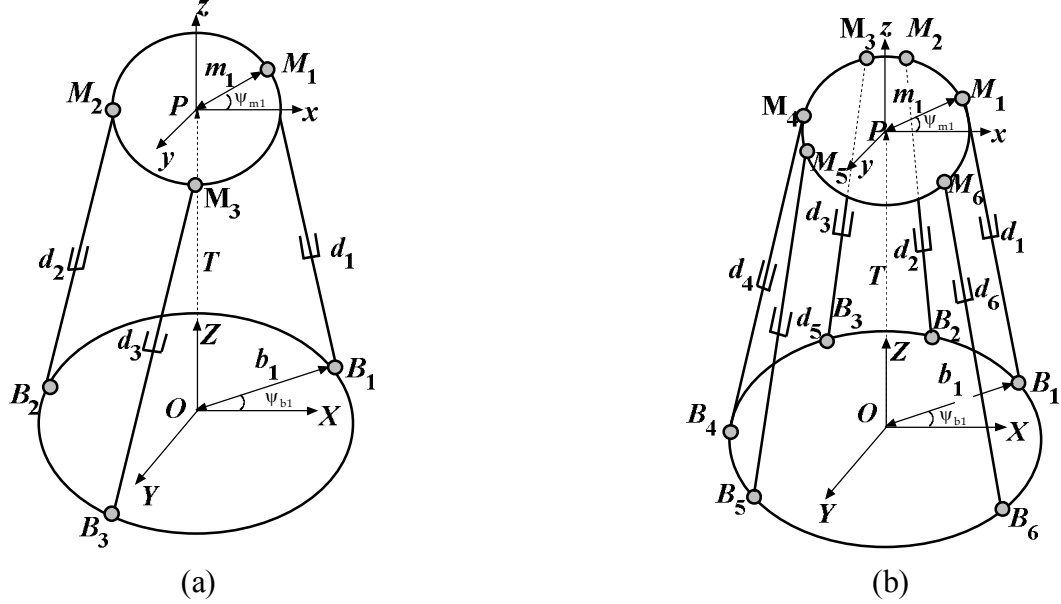
Bu bölümde 3 bacaklı 3x3 GSP ile 6 bacaklı 6x6 GSP mekanizmalarının geometrik yapısı anlatılacaktır. Bu tez kapsamında yapılan tüm hesaplamalarda bacak sayısının üç, dört, beş ve altı olduğu farklı yapıdaki GSP mekanizmaları için ortak hesaplama yöntemleri geliştirilmeye çalışılmıştır.

Şekil 1.6a'da gösterilen 3x3 GSP mekanizmasında, üç bacak sabit olup, hareketli platforma üç bağlantı noktasından bağlanmıştır. Şekil 1.6b'de gösterilen 6x6 GSP mekanizmasında, altı bacak sabit olup, hareketli platforma altı bağlantı noktasından bağlanmıştır. Sabit platformun merkezi O, hareketli platformun merkezi P ile ifade edilmek üzere, $B=\{X, Y, Z\}$ ve $M=\{x, y, z\}$ koordinat eksenleri Şekil 1.6'da gösterildiği gibi sırasıyla O ve P noktalarına yerleştirilmiştir. Bacaklar pasif eklemler yardımıyla B_i ve M_i (3x3 GSP için $i=1, 2, 3$ ve 6x6 GSP için $i=1, 2 \dots 6$) noktalarından sabit ve hareketli platforma bağlanmıştır. $B_i = [b_{ix} \quad b_{iy} \quad b_{iz}]^T$ ve $M_i = [m_{ix} \quad m_{iy} \quad m_{iz}]^T$ pozisyon vektörleri sırasıyla B ve M koordinat eksenlerinde tanımlanmıştır. B_i vektörlerinin B koordinat sistemindeki x eksenine ile yaptığı açılar ψ_{b_i} ve M_i vektörlerinin M koordinat sistemindeki x eksenine ile yaptığı açılar ψ_{m_i} (3x3 GSP için $i=1, 2, 3$ ve 6x6 GSP için $i=1,2\dots 6$) ile ifade edilmiştir. Bu açı değerleri gelişigüzel olarak belirlenebilir.

1.5. Ters Kinematik

Ters kinematik analiz, hareketli platformun konum ve yönelmesi bilindiğinde, o konum ve yönelmeyi sağlayacak olan bacak uzunluklarının bulunması işlemidir.

GSP mekanizmalarının ters kinematik hesaplama sonucu sadece bir doğru çözümü bulunmaktadır. Bu da endüstriyel uygulamalarda büyük kolaylık sağlamaktadır. Paralel mekanizmaların gerçek zamanlı kontrolünde kullanılan ters dinamik hesaplamaların etkinliği, ters kinematik çözümündeki verilere bağlıdır [62].



Şekil 1.6. a) 3 bacaklı 3x3 GSP mekanizması b) 6 bacaklı 6x6 GSP mekanizması

Sabit ve hareketli platform üzerinde bacakların bağlantı noktalarının konumları sabittir. Bu konumlar imalat aşamasında belirlenmiştir ve bu platformların merkezlerine yerleştirilmiş koordinat eksenlerine göre bu konum bilgileri bilinmektedir. Hareketli platformun merkezinin, sabit platformun merkezine göre yönelim ve ötelemesi verildiğinde bacakların o andaki uzunlukları matematiksel olarak kolaylıkla hesaplanabilir. Bu hesaplama işleminde vektör cebri kullanılır. Hareketli platformun sabit platforma göre ötelemesi Şekil 1.6'da gösterildiği gibi 3-boyutlu uzayda $T=[P_x, P_y, P_z]^T$ şeklinde ifade edilir. Yönelimi ifade ederken, Euler veya Roll-Pitch-Yaw açı seti kullanılabilir. Literatürdeki çalışmalarda Roll-Pitch-Yaw açı setinin daha fazla kullanıldığı gözlemlenmiştir ve bu açı setine göre kinematik hesaplamalar açıklanacaktır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen uygulamanın hem Euler hem de Roll-Pitch-Yaw açı setine göre işlem yapabilecek şekilde geliştirildiği de belirtilmelidir.

Hareketli platformdaki eksen takımı, sabit platformdaki eksen takımına göre önce x etrafında α , sonra y etrafında β ve son olarak da z eksen etrafında γ açısıyla dönerse, dönme matrisi $R_{xyz}=(R_z, R_y, R_x)$ Roll-Pitch-Yaw açı setine göre tanımlanır ve Denklem (1.1)'deki gibi gösterilebilir. Burada R_x , x eksen etrafındaki dönme matrisi, R_y , y eksen etrafındaki dönme matrisi, R_z ise z eksen etrafındaki dönme matrisidir. R_{xyz} dönme matrisinin açık hali ise Denklem (1.3)'de gösterilmiştir.

$$R_{xyz} = (R_z, R_y, R_x) \quad (1.1)$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \gamma \cos \beta & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \gamma \cos \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Dönme matrisi (R) ve öteleme vektöründen (T) faydalanarak, hareketli platforma bacakların bağlantı noktalarının konumları, sabit platformun koordinat eksenine göre hesaplanabilir. Hareketli platform üzerindeki bağlantı noktaları bu platforma yerleştirilen M koordinat sistemine göre M_i şeklinde (3x3 GSP için $i=1, 2, 3$ ve 6x6 GSP için $i=1, 2, \dots, 6$) ifade edilir. Her bir bacağı ifade eden vektörler $B_i M_i$ olmak üzere Denklem (1.4)'deki gibi elde edilebilir.

$$B_i M_i = R \cdot M_i + T \quad (1.4)$$

Buradaki i indisi mekanizmada bulunan bacak sayısıdır. Örneğin 3-bacıklı bir 3x3 GSP mekanizması için i değeri 3 olduğu gibi 6-bacıklı 6x6 GSP mekanizması için de i değeri 6 olacaktır. d_i ile ifade edilen bacak uzunlukları ise Denklem (1.5)'de gösterildiği gibi $B_i M_i$ vektörünün normu alınarak elde edilebilir.

$$d_i = \|B_i M_i\| \quad (1.5)$$

$B_i M_i$ vektörleri doğrultusundaki birim vektörler z_i ile ifade edilirse, Denklem (1.6)'daki gibi elde edilebilir.

$$z_i = \frac{B_i M_i}{\|B_i M_i\|} = \frac{B_i M_i}{d_i} \quad (1.6)$$

1.6. Jacobian Matrisi Analizi

Jacobian matrisinin hesaplanmasında iki farklı yöntem kullanılabilir. Bunlardan birincisi, vektör-döngü (loop closure) denklemleri yardımıyla diğeri ise vida (screw) teorisi kullanarak hesaplama yöntemidir [1, 2, 63]. Bu bölümde hız vektör-döngü denklemleri kullanılarak Jacobian hesaplaması gerçekleştirilmiştir.

Her bir bacak için vektör-döngü denklemleri ayrı ayrı Denklem (1.7)'deki gibi yazılır.

$$\overline{OP} + \overline{PM}_i = \overline{OB}_i + \overline{B}_i M_i \quad (1.7)$$

Burada OP daha önce tanımlanan T öteleme vektörüne karşılık gelmektedir. Denklem (1.7)'nin zamana göre türevi alındığında Denklem (1.8)'deki gibi elde edilir [63].

$$v_p + \omega_B \times b_i = d_i \omega_i \times z_i + \dot{d}_i z_i \quad (1.8)$$

Buradaki v_p hareketli platformun doğrusal hızı, ω_B sabit platformun açısal hızı, ω_i i. bacağın sabit platformdaki koordinat eksenine göre açısal hızı, z_i ise her bir bacağın doğrultusundaki birim vektörü ifade etmektedir. ω_i değerlerini Denklem (1.8)'den elimine etmek için denklemin her iki tarafı z_i vektörü ile noktasal çarpım yapılır [63].

$$z_i \cdot v_p + (m_i \times z_i) \cdot \omega_p = \dot{d}_i \quad (1.9)$$

Her bir bacak için Denklem (1.9) ayrı ayrı yazılarak matris formunda Denklem (1.10)'daki gibi gösterilebilir.

$$J_A \dot{x} = J_B \dot{q}$$

$$\begin{bmatrix} z_1^T & (M_1 \times z_1)^T \\ z_2^T & (M_2 \times z_2)^T \\ z_3^T & (M_3 \times z_3)^T \\ z_4^T & (M_4 \times z_4)^T \\ z_5^T & (M_5 \times z_5)^T \\ z_6^T & (M_6 \times z_6)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{p_x} \\ v_{p_y} \\ v_{p_z} \\ \omega_{p_x} \\ \omega_{p_y} \\ \omega_{p_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{d}_4 \\ \dot{d}_5 \\ \dot{d}_6 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Buradaki J_A Denklem (1.11)'de ifade edilmiştir. J_B ise 6x6 boyutlu birim matristir.

Ayrıca denklemdeki \dot{q} bacakların doğrusal hızlarını göstermektedir ($[\dot{d}_1, \dot{d}_2 \dots \dot{d}_6]$).

\dot{x} ise hareketli platformun doğrusal ve açısal hızlarını ifade etmektedir

$$\left(\begin{bmatrix} v_{p_x} & v_{p_y} & v_{p_z} & \omega_{p_x}(\alpha) & \omega_{p_y}(\beta) & \omega_{p_z}(\gamma) \end{bmatrix}^T \right).$$

$$J_A = \begin{bmatrix} z_1^T & m_1 \times z_1 \\ z_2^T & m_2 \times z_2 \\ z_3^T & m_3 \times z_3 \\ z_4^T & m_4 \times z_4 \\ z_5^T & m_5 \times z_5 \\ z_6^T & m_6 \times z_6 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Böylece tüm Jacobian matrisi Denklem (1.12)'deki gibi ifade edilebilir.

$$J = J_B^{-1} J_A \quad (1.12)$$

1.7. İleri (Düz) Kinematik

İleri kinematik yöntemde amaç, verilen bacak boylarından (d_i), istenilen bir

koordinat eksenine göre hareketli platformun yapacağı öteleme $T = [p_x \ p_y \ p_z]^T$

ve dönme $R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma)$ vektörlerinin bulunmasıdır.

Literatürde ileri kinematik çözümü için pek çok yöntem geliştirildiği görülmektedir.

Bu yöntemlerden polinom [64], devam etme (continuation) [65] ve aralık analizi [66]

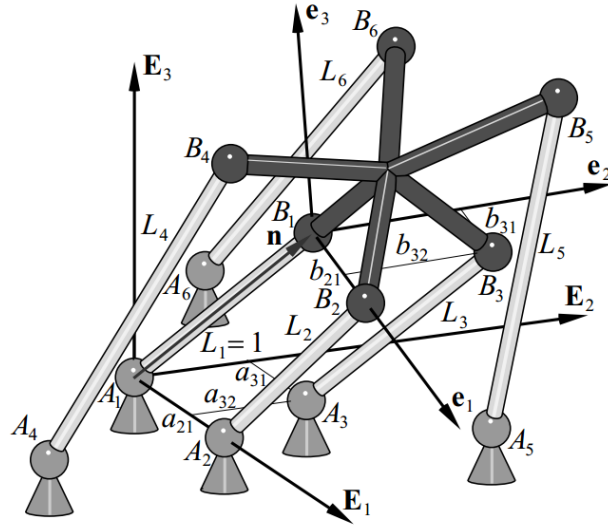
(interval analysis) gibi yöntemler analitik olarak olası tüm çözümleri bulmayı

amaçlamaktadır. Behi [67] 6 serbestlik dereceli 3-PRPS robotunun ileri kinematığını sayısal, ters kinematığı ise analitik olarak çözmüştür. Nanua [68], 3x3 ve 6x3 GSP mekanizmalarının ileri kinematığını 24. mertebeden bir polinoma dönüştürerek analitik olarak çözmüştür. Innocenti [69], Stewart'ın önerdiği ilk Stewart platformunun [7] ileri kinematığını 16.dereceden bir polinom yardımıyla analitik olarak çözülmüştür. Chen [70], 6x6 Stewart platformun ileri kinematik çözümü için ekstra sensörler ve tetrahedron geometrisi kullanmıştır. Bu yöntem doğrusal olmayan denklemleri basitleştirip, tek çözüm elde edilmesini sağlamıştır. Çözümün gerçek zamanlı uygulamalar için uygun olduğu gösterilmiştir. Geng [71] ise 6x6 GSP mekanizmasının ileri kinematik problemini önerdiği CMAC yapay sinir ağıyla yardımcıyla çözmüştür.

Dietmaier [72], verilen bir GSP mekanizmasının parametrelerini sistematik olarak değiştirerek 40 tane gerçek ileri kinematik çözüme sahip olduğu durumu bulan sayısal bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem kullanılarak 40 tane gerçek ileri kinematik çözüme sahip bir GSP bulunmuş ve Şekil 1.7'de gösterilmiştir.

İleri kinematik hesaplaması sonucunda 40. mertebeden bir polinom elde edilmektedir. Bu 40 olası çözümden bazıları karmaşık düzlemde çıkmakta, bazılarının ise fiziksel olarak gerçekleşmesi (karmaşık düzlemde) mümkün olmamaktadır. Bazı çözümler ise diğerlerinin simetrikleridir. Bu yöntemlerin gerçek zamanlı bir kontrol sisteminde uygulanması ise mümkün değildir. Bu nedenle sayısal hesaplama yöntemleri yardımıyla yaklaşık hesaplamalar yapılmaktadır. Bu sayısal hesaplama yöntemlerinden basit ve etkinliği nedeniyle en fazla uygulanan yöntem Newton-Raphson [73] yöntemidir. Fakat bu yöntemin iyi sonuç elde edebilmesi için başlangıç değerlerinin iyi olması gerekmektedir.

Bir GSP mekanizmasının ileri kinematik hesaplaması yapılmadan önce, bir önceki adımdaki konum bilgisi saklanarak başlangıç koşulu olarak verilebilir. Böylece yöntem çok kısa süre içinde çok iyi sonuçlar elde edebilmektedir. Doğrusal olmayan n-bilinmeyenli n tane denklem sisteminin Newton-Raphson [73] yöntemiyle çözümünde Bölüm 1.6'de anlatılan Jacobian matrisi kullanılmaktadır. Ardışık olarak $f_i (i=1,2,\dots,n)$ denklem çözümü içinde Denklem (1.13) kullanılır.



Şekil 1.7. 40 tane gerçekte çözümlenebilir kinematik çözüme sahip GSP mekanizması [72]

$$x_{n+1} = x_n - J^{-1} \cdot f_i(x_n) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.13)$$

Bu denklemde J^{-1} , Denklem (1.12)'de tanımlanan Jacobian matrisinin tersidir. Ardışık olarak denklem sisteminin çözüm işlemi, $f_i(x_n)$ fonksiyonunun mutlak değeri, belirlenen bir ε tolerans değerinden küçük olana kadar devam ettirilir. Burada ε tolerans değeri Denklem (1.14) gibi elde edilir.

$$\max |f_i(x_{n+1})| < \varepsilon \quad (1.14)$$

Newton-Rapshon yönteminin ileri kinematik hesaplamasına uygulamasında f_i fonksiyonu Denklem (1.4) ve Denklem (1.5) göz önüne alındığında Denklem (1.15)'teki gibi elde edilebilir.

$$f_i = \|R_{XYZ} M_i + T - B_i\| - d_i \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (1.15)$$

Buradaki $T = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ başlangıçtaki öteleme, $R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma)$ ise başlangıçtaki yönelim değerleridir. d_i değeri ise elde edilmek istenen (ileri kinematikte verilen) bacak uzunluklarının değerleridir.

1.8. Beceri (Dexterity) Analizi

Beceri, bir mekanizmanın çalışma uzayı içinde rastgele yönlere küçük kaydırmaları (displacement) mümkün olduğu kadar kolay başarabilmesi olarak tanımlanabilir [76]. Ayrıca beceri, bir mekanizmanın kinematik performansını etkilemektedir. Paralel mekanizmaların beceri analizinde kullanılan Jacobian matrisinin koşul sayısı (condition number), Jacobian matrisinin boyutsal olarak homojen olduğu durumlarda geçerli olmaktadır. GSP mekanizmaları gibi karmaşık serbestlik derecesine (öteleme ve yönelim) sahip uzaysal paralel manipülatörlerin Jacobian matrisleri homojen olmadıklarından dolayı Jacobian matrisinin homojenleştirilmesinde karakteristik uzunluk (characteristic length) [77, 78] kullanılır. Denklem (1.11)'de verilen J_A matrisinin ilk üç sütunu uzunluk biriminde iken son üç sütunu ise uzunluk² birimindedir. Koşul sayısı boyutsal olmadığından (non-dimensional) karakteristik uzunluk (L) hesaplanmalıdır [79-81]. J_A matrisi ilk üç sütunu bir matris (J_{A1}), son üç sütunu (J_{A2}) ise karakteristik uzunluk (L) ile bölünerek homojen Jacobian matrisi elde edilebilir.

$$J_{Ah} = \begin{bmatrix} J_{A1} & \frac{1}{L} J_{A2} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Benzer şekilde $J_A^T J_A$ matris çarpımı da homojenleştirilebilir.

$$J_A^T J_A = \begin{bmatrix} J_{A1} J_{A1}^T & \frac{1}{L} J_{A1}^T J_{A2} \\ \frac{1}{L} J_{A2}^T J_{A1} & \frac{1}{L^2} J_{A2}^T J_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta^2 \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \vartheta^2 \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Bu denklemdeki $I_{3 \times 3}$ 3x3 birim matrisi, $0_{3 \times 3}$ 3x3 sıfır matrisini, ϑ ise skaler bir değeri göstermektedir. Denklem (1.17)'de köşegen elemanların toplamları karşılıklı olarak eşitlendiğinde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{tr\left(\frac{1}{L^2} J_{A2} J_{A2}^T\right)}{tr\left(J_{A1} J_{A1}^T\right)} = \frac{tr\left(\vartheta^2 I_{3 \times 3}\right)}{tr\left(\vartheta^2 I_{3 \times 3}\right)} \quad (1.18)$$

Buradaki tr köşegendeki elemanların toplamını (trace) ifade etmektedir. Denklem (1.18)'de karakteristik uzunluğu ifade eden L yalnız bırakılarak Denklem (1.19) elde edilmiş olur.

$$L = \sqrt{\frac{tr(J_{A2}J_{A2}^T)}{tr(J_{A1}J_{A1}^T)}} \quad (1.19)$$

Karakteristik uzunluk göz önüne alınarak tüm Jacobian matrisi Denklem (1.20)'daki gibi elde edilmiş olur.

$$J = J_B^{-1} J_{Ah} \quad (1.20)$$

Jacobian matrisine bağlı olarak yerel ve global beceri ölçekleri önerilmiştir [82, 83]. Koşul sayısına (κ) bağlı olarak Jacobian matrisinin yerel beceri değeri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\kappa = \|J\| \|J^{-1}\| \quad (1.21)$$

Burada $\|\cdot\|$ operatörü matris norm operatörüdür ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \|J\| &= \sqrt{tr(JnJ^T)} \\ \|J^{-1}\| &= \sqrt{tr(J^{-1}n(J^{-1})^T)} \end{aligned} \quad (1.22)$$

Buradaki n köşegen matristir. κ değeri 1 ile sonsuz (∞) arasında değişebilmektedir. Özellikle eniyileme işlemlerinde karşılaştırma ve hesaplama kolaylığı açısından bu koşul sayısının tersi $\left(\eta = \frac{1}{\kappa}\right)$ alınarak normalize edilir. Böylece η değeri 0 ile 1 arasında değişir. Burada en iyi beceri değerini ifade eden $\eta = 1$ olduğu durumda her yönde eşit kuvvet uygulandığı, en kötü beceri değeri olan $\eta = 0$ durumunda ise mekanizmanın kontrol edilemediği tekil bir durum konum olduğu söylenebilir [84]. Bir robot manipülatörünün global özelliğini ölçmek için Global Beceri İndeksi (GBİ) [85] kullanılır.

$$GB\dot{I} = \frac{\int_w \eta dW}{\int_w dW} \quad (1.23)$$

Denklem (1.23)'de kesirin paydası, mekanizmanın çalışma uzayını ifade etmektedir. GBİ, 1 değerine yaklaştıkça mekanizma çok daha iyi hareket kabiliyetine sahip olmaktadır. Denklem (1.23)'de bulunan integral işleminin bilgisayar yardımıyla hesaplama işleminin kolaylaştırılması için aşağıdaki denklem kullanılabilir [86].

$$GB\dot{I} = \frac{\sum \eta}{nsa} \quad (1.24)$$

Bu denklemdeki nsa değeri çalışma uzayındaki nokta sayısını, $\sum \eta$ ise η değerlerinin toplamını ifade etmektedir.

1.9. Çalışma Uzayı

Bir manipülatörün çalışma uzayı, uç işlevcisinin uzayda ulaşabildiği hacim olarak tanımlanır [63]. Genel olarak çalışma uzayı bir paralel manipülatör için hareketli platformun ağırlık merkezine; seri manipülatör için ise uç organına yerleştirilen koordinat sisteminin merkezinin uzayda ulaşılabilceği noktalar kümesi veya bölge olarak tanımlanır [1, 48, 87].

Stewart platform mekanizmasının çalışma uzayı analizinin çözümü için ilk çalışma Yang&Lee [88] ve Cwiakala [89] tarafından yapılmıştır. Fakat bu çalışmalar sabit yönelimli çalışma uzayının bazı bölgelerini belirlemekle sınırlı çalışmalardır. Merlet [90], sabit yönelimli teorik çalışma uzayı (küresel eklem limitleri ihmal edilmiştir) analizi için basit bir yöntem sunmuştur. Ancak bu yöntem Gosselin [83, 91, 92], tarafından sistematik olarak geliştirilmiş ve gerçekleştirilmiş daha sonra bir CAD yaklaşımı ile 3 boyutlu çalışma uzayı analizini yapacak şekilde genişletilmiştir.

Paralel mekanizmaların çalışma uzayını etkileyen bazı sınırlamalar vardır. Bunlar geometrik ve kinematik sınırlamalar olarak iki grupta sınıflandırılabilir. Geometrik sınırlandırmalar [46]: (i) Hareketli ve sabit platformun yarıçapları, platformların merkezleri arasındaki uzaklık, (ii) Bağlantıların (eklem, mafsal) yerleridir. Kinematik sınırlamalar [46] ise (i) Bacak uzunlukları sınırlamaları: minimum ve maksimum

bacak uzunlukları, (ii) Bağlantı elemanlarının (eklem) açılarının sınırlamaları: sabit ve hareketli platformlardaki bağlantı elemanlarının yapabileceği maksimum ve minimum hareket limitleri, (iii) Bacakların girişim (interference) sınırlamaları: bacakların birbirleriyle çarpışmasının (girişim) engellenmesi veya bu bacaklar arasında önceden tanımlanmış bir mesafenin korunmasıdır. Eklem limitleri ile ilgili literatürde detaylı çalışmalar yapılmış ve çalışma uzayı hesaplamasında etkili algoritmalar önerilmiştir [93]. Düzlemsel robotların bacaklarının girişimi (interference) Chablat ve Wager [94] tarafından incelenmiştir.

Çalışma uzayı hesaplama yöntemleri, geometrik ve analitik yöntemler olmak üzere iki farklı grupta sınıflandırılabilir [88]. Merlet ise paralel manipülatörlerin çalışma uzayı hesaplama yöntemlerini ayrıklaştırma yöntemi, geometrik yöntem ve Jacobian matris tekniği olarak üç ana sınıfta tanımlamaktadır [2]. Ayrıklaştırma metodu; hareketli platformun adım adım hareket ettirilerek bacak uzunluklarının saptanması için ters kinematik denklemlerinin çözülmesi işlemidir. Daha sonra eklem limitleri ve bacak kesişmelerine karşılık hesaplanan bacak uzunluklarının kontrol edilmelidir. Merlet özellikle yüksek çözünürlüklü çalışma uzayı haritasının çıkarılması gerektiği zaman ayrıklaştırma metodunun çok zaman aldığı ve verimli olmadığını söylemektedir. Ek olarak başlangıç seviyesinde ayrıklaştırma metodunun (basit tarama ve çalışma uzayı örneklenmesi) matematik programlama yaklaşımı temeline dayanan daha karışık eniyileme (optimizasyon) metotlarıyla eşlenemediğini söylemektedir. Oysaki araştırmacılardan Bonev ve Ryu [95], 6 serbestlik dereceli mekanizmalar için 3 boyutlu yönelme uzayını ayrıklaştırma metodu kullanarak başarılı ve verimli bir şekilde hesaplamışlardır. Yine Fichter [22] tarafından 6 serbestlik dereceli paralel manipülatörün çalışma uzayı tespitinde bu yöntem kullanılmıştır.

Nokta ayrıklaştırma yönteminde manipülatör çevresindeki uzay eşit olarak dağılmış noktalara bölünür. Her bir noktanın ters kinematik çözümü ile olası bacak uzunlukları bacak limitleriyle, eklemlerin açıları eklem limitleriyle ve bacakların birbirleriyle girişimde olmaması için bacaklar arasındaki en küçük mesafe limitleri kontrol edilerek bu şartların tümünü birden sağlayan değerler erişilebilir çalışma uzayı olarak saklanır [96-98]. Bu yöntem çok eskilere dayanmaktadır [95, 98].

Çalışma uzayı analizi metotlarından ikincisi olan geometrik metot Gosselin [83] tarafından önerilen tamamen geometrik yaklaşıma dayalı bir yöntemdir. Geometrik yöntemde; hareketli platformun boyutu, eklemlerin konumları veya bacak boyları gibi paralel mekanizma geometrisi ile ilgili bilgiler kullanılarak çalışma uzayı analizinin yapılmasıdır. Bu metodun özelliği, çalışma uzayı hesaplanırken hareketli platformun konum ve yönelme bilgisine ihtiyaç duyulmamasıdır yani sadece tasarım değişkenlerinin yeterli olmasıdır. Geometrik yöntem yaygın olarak 6 serbestlik dereceli paralel manipülatörlerin konumsal çalışma uzayı analizi için kullanılmaktadır. Yöntem mekanik kesişmeleri göz ardı ederek çalışma uzayı sınırına erişilmesinden ve eyleyicilerden en az birinin limit değerlerine ulaşp ulaşmadığının kontrol edilmesinden oluşmaktadır. Gosselin sonraki çalışmalarında konumsal çalışma uzayını bulmak için minimum ve maksimum eyleyici bacak uzunluklarıyla ilgili dairesel bölgelerin kesişmesini izole etmiştir. Kim ve Chung [99], 6 serbestlik dereceli paralel manipülatörlerin çalışma uzayı analizini geometrik yöntem ile hesaplamışlardır. Geometrik yaklaşım metodu Merlet tarafından çalışma uzayını kısıtlayan bütün diğer fiziksel sınırları hesaba katacak şekilde genişletilmiştir. Buradaki fiziksel sınırlar; bacak uzunluklarının sınırları, pasif eklemlerin mekanik sınırları ve bacak kesişmeleridir. Merlet aynı zamanda düzlemsel paralel manipülatörlerin çeşitli çalışma uzaylarını ve 3 boyutlu Stewart platformunun yönelme çalışma uzayını bulmak için bu metodu kullanmıştır.

Merlet'in da ilgilendiği yöntemlerden üçüncüsü Jacobian matris tekniğidir. İlk olarak Jo ve Haug [100] çalışmalarında bu yaklaşımın uygulamasını sunmuşlardır. Daha sonra Haug [101], bu sınıf içindeki tekniklerden süreklilik metodu olarak bahsetmiştir ve manipülatörlerin çalışma uzayını haritalamak için süreklilik metodunu başarılı bir şekilde uygulayarak sayısal şablon geliştirmiştir. Merlet'in Jacobian metodu için eleştirisi, pratik olarak bu metot ile paralel mekanizmanın fiziksel sınırlamalarının davranışı istenen şekilde ve uygun olarak elde edilemeyeceğidir.

Wang ve Hsieh [102], var olan süreklilik programlarını kullanmak için Jo ve Haug'ın [100] çalışmalarını referans almışlardır. Sınır denklemleri ve mekanizmanın Jacobian matrisini net ifade edebilmek için bu gereklidir. Fakat genel paralel mekanizmalar için bu denklemleri türetmek zor olabilir.

Çalışma uzayı analizindeki bir başka zorluk da 6 serbestlik dereceli paralel mekanizmanın 6 boyutlu çalışma uzayının grafiksel olarak gösterilememesidir. Bir Stewart platformun çalışma uzayı 6 boyutlu bir uzay olduğundan dolayı grafik olarak gösterimi mümkün değildir çünkü Kartezyen çalışma uzayında bir anda sadece 3 serbestlik derecesi gösterilebilmektedir [85]. Grafiksel olarak bir GSP'nin çalışma uzayı daha düşük boyutlu alt kümeler haline indirgenerek gösterilebilir. Bir başka deyişle, 6 serbestlik derecesinin 3'ü öteleme 3'ü dönme olmak üzere bu serbestliklerden üçü sabit tutularak diğer üçünün çalışma uzayını nasıl etkileyeceği hesaplanır [86].

1.10. Tekillikler

Stewart platform mekanizmasında uç işlevcinin bir veya daha fazla serbestlik derecesi kazandığı pozisyonlar tekil yapılandırma olarak adlandırılır [79]. Tekillik bir paralel veya seri mekanizmanın kinematik probleminin çözümünün olmadığı noktalardır [1, 5]. Tekillik, paralel mekanizmaların analizi, tasarımı, yol planlaması ve kontrol edilmesi konusunda karşılaşılan en önemli problemlerden biridir. Paralel mekanizmalar seri mekanizmalara göre kapalı döngülü bir yapıya sahiptirler bundan dolayı hareketleri kısıtlanmakta ve çalışma uzaylarında tekillikler oluşmaktadır. Tekil noktalarda mekanizmanın kontrolü çok zorlaşmakta, hatta kaybolmaktadır. Mekanizma, üzerindeki yükü karşılayamamakta ve bu noktalarda bir ya da daha fazla serbestlik derecesi kazanmaktadır [63]. Paralel mekanizmaların karışık yapısı tekillik incelemelerini de zorlaştırmaktadır [14].

Tekillik seri manipülatörler için, serbestlik derecesinin azalması ve kısmi kilitlenmelerdir. Oysaki paralel manipülatörlerde baskın tekillikler, serbestlik derecesinin artması ve kontrol edilemezliktir. Paralel mekanizmalardaki tekillik analizleri başlıca 3 grupta tekilliğin kaynaklandığı duruma göre yapılabilir [48].

1. Mimari tekillik (Architecture singularity): Manipülatörün özel yapısından dolayı oluşan tekilliklerdir [103].

2. Yapılandırma Tekilliği (Configuration singularity): Manipülatörün özel yapılandırmalarının neden olduğu tekilliktir. Paralel manipülatörün çalışma

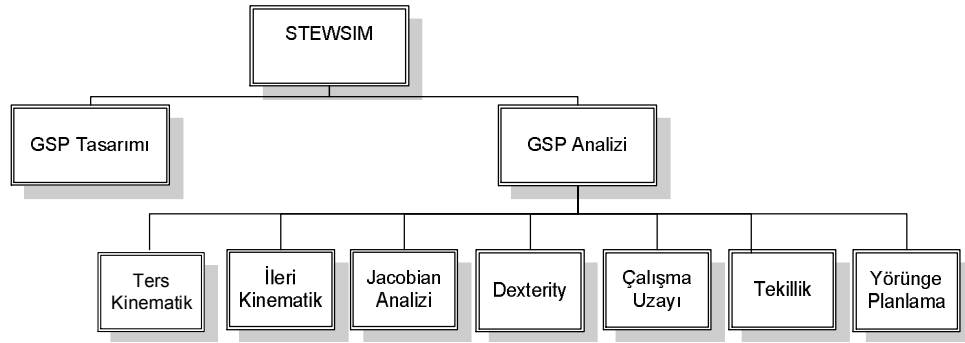
uzayındaki tekilliklerinde bağların uzunlukları ve eklemlerin dönme açı limitlerinin etkisi bulunmaktadır [103].

3. Formülasyon Tekillik (Formulation singularity): Manipülatörün belirli bir yapılandırmasında kinematik model hatası olarak ortaya çıkan tekilliktir. Çalışma uzayının ve en iyi yörüngenin belirlenmesi amacıyla tekillik konusundaki çalışmalar önem kazanmaktadır [104].

Fichter [22], hareketli platformun tabana paralel olduğu durumda, z eksenine etrafında $\pm 90^\circ$ döndürülmesi ile bir tekilliğin meydana geldiğini belirtmiştir. Merlet [105] ise Grassmann geometrisini kullanarak muhtelif tekillikler bulmuştur. Bütün bu yaklaşımlar geometrik çözümler olup farklı Stewart platform mekanizmalarına uygulanabilirlikleri zordur [99]. Kim ve Chung [80] ve Gosselin [106] tekillikleri bulabilmek amacıyla analitik çözümler önermişlerdir.

2. STEWART PLATFORM BENZETİM ARACI (STEWSIM)

Bu doktora tez çalışmasında geliştirilen uygulamanın ismi “Stewart Platform Simülasyon (Benzetim) Aracı” kelimelerinden seçilerek STEWSIM olarak belirlenmiştir. STEWSIM yazılımı, tasarım ve analiz olmak üzere iki önemli adımdan oluşmaktadır ve blok gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir. Tasarım adımında 3x3, 4x3, 4x4, 5x3, 5x4, 5x5, 6x3, 6x4, 6x5 ve 6x6 yapılarındaki GSP mekanizmalarının tasarlanabilmesi mümkündür. Analiz adımında ise tasarlanarak kaydedilmiş bir GSP mekanizmasının ters ve ileri kinematik, Jacobian, beceri, çalışma uzayı, tekillik analizleri ve yörünge planlaması yapılabilmektedir.



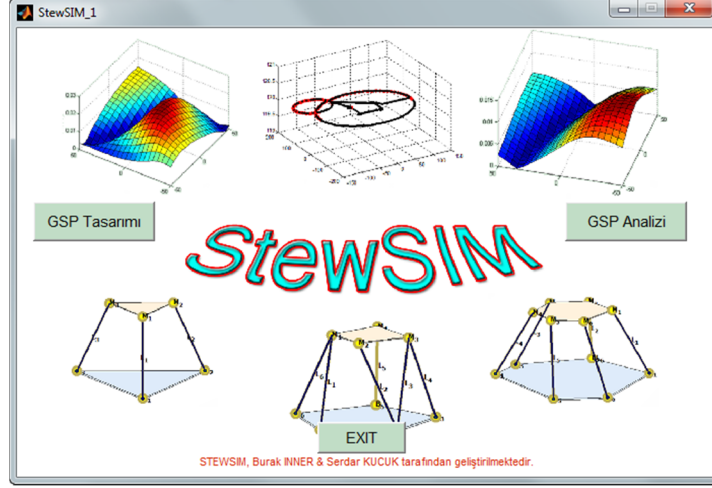
Şekil 2.1. STEWSIM yazılımının aşamaları

STEWSIM yazılımı çalıştırıldığında ilk olarak Şekil 2.2’de gösterilen ana ekran gelmektedir. Bu ekran üzerinden GSP mekanizmalarının tasarlanması için “GSP Tasarımı” veya tasarlanmış bir GSP mekanizmasının analizi için “GSP Analizi” düğmesine tıklanması yeterlidir.

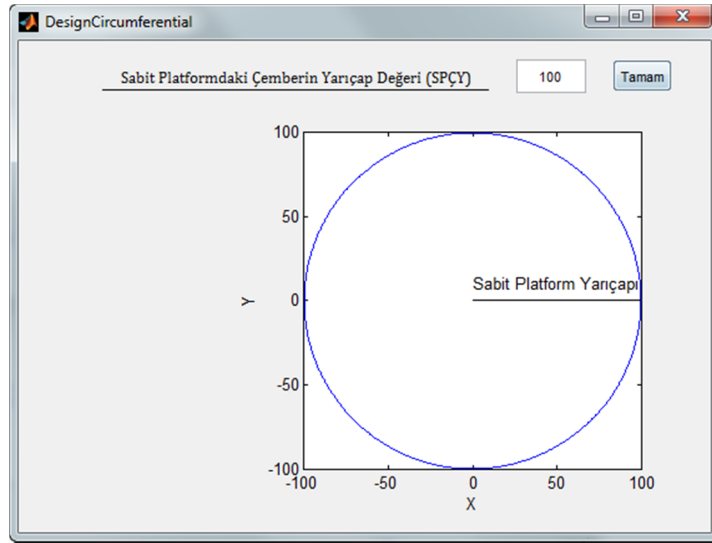
2.1. GSP Mekanizmalarının Tasarımı

Tasarım adımında bir GSP mekanizması tasarlanırken sabit ve hareketli platform üzerinde bulunan bağlantı noktaları tanımlanarak mekanizma oluşturulur. Öncelikle sabit platformun bağlantı noktalarının üzerinde bulunacağı dairenin yarıçapı kullanıcı tarafından girilmelidir. Sabit platformun yarıçap değeri Şekil 2.3’de görüldüğü gibi girildikten sonra “Tamam” düğmesine tıklanır. Böylece her bir bağlantı noktasının

3-boyutlu uzaydaki konumu hesaplanırken kullanılacak açı ($\psi_{bi}, i=1,2,\dots,6$) değerleri Şekil 2.4’de gösterildiği gibi girilebilmektedir.



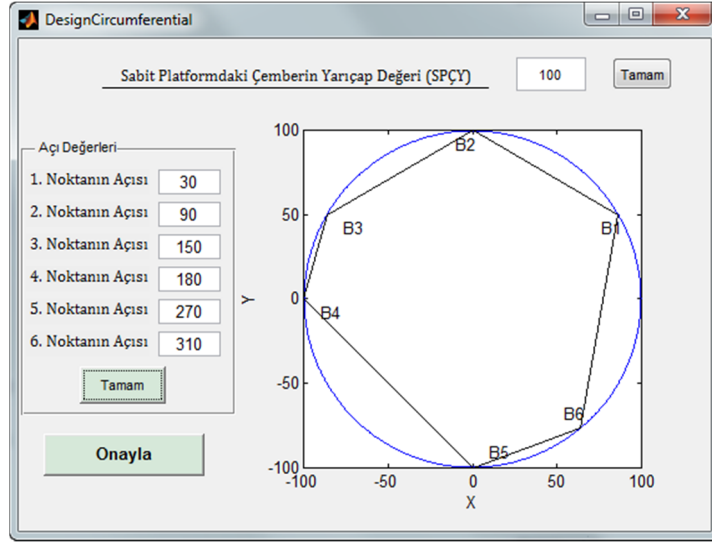
Şekil 2.2. STEWSIM uygulamasının ana ekranı



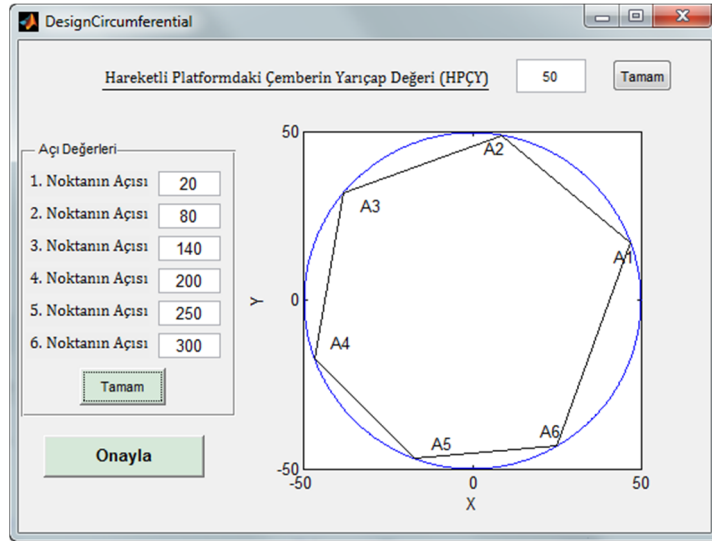
Şekil 2.3. Sabit platformun yarıçap değerinin belirlenmesi

“Onayla” düğmesine basıldıktan sonra sabit platform için belirtilen tüm değerler saklanarak, hareketli platformun yarıçap ve açı değerlerinin girilebildiği ekrana geçilecektir. Hareketli platform için de yarıçap değeri girildikten sonra “Tamam” düğmesine basılır ve Şekil 2.5’de görüldüğü gibi her bir bağlantı noktasının 3-boyutlu uzaydaki konumu belirlenirken kullanılacak Şekil 1.6’da da gösterildiği gibi açı ($\psi_{mi}, i=1,2,\dots,6$) değerlerinin girilmesi istenecektir. Girilen açı değerleri x eksenini ile yapılan açı değeridir ve 0 ile 360 arasında değerler seçilebilir. Ayrıca açı değerlerinin küçükten büyüğe doğru girilmiş olması gerekir aksi durumda bacakların

birbirini kestiği durumlar oluşabilir. “Onayla” düğmesi tıklanarak Şekil 2.6’da görüldüğü gibi GSP mekanizmasının ana tasarım ekranına geçilir.



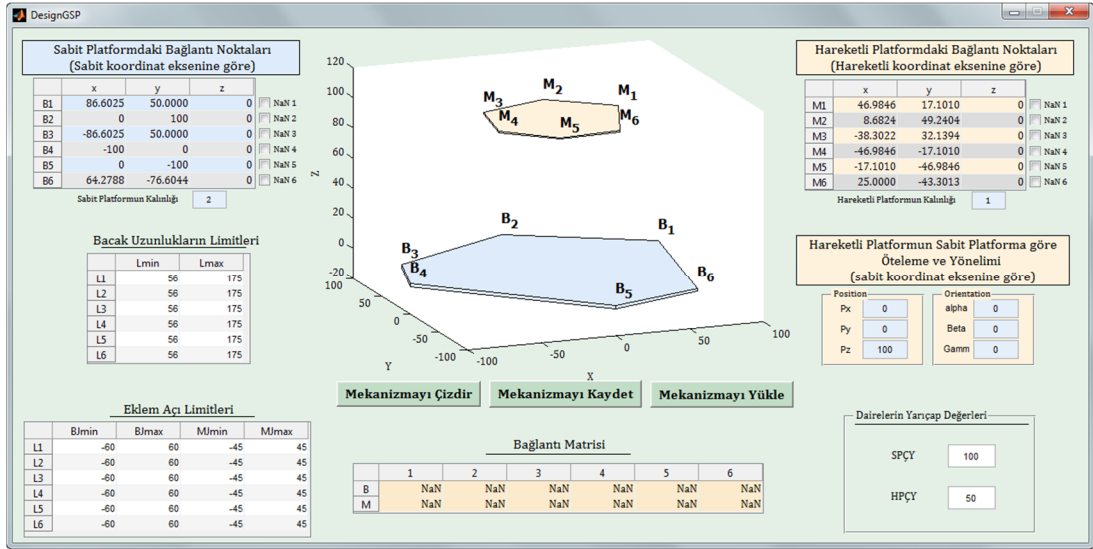
Şekil 2.4. Sabit platformun yarıçap ve açı değerlerinin girildiği ekran



Şekil 2.5. Hareketli platformun yarıçap ve açı değerlerinin girildiği ekran

Tasarlanan sabit ve hareketli platforma ait açı değerlerinin, Şekil 2.6’da gösterilen ana tasarım ekranına 3-boyutlu konum (x, y, z) değerlerine dönüştürülerek aktarıldığı görülmektedir. Sabit platform üzerindeki bağlantı noktalarının konumları, sabit platform üzerinde tanımlanmış koordinat eksenine göre, hareketli platform üzerindeki bağlantı noktalarının konumları ise hareketli platform üzerinde tanımlanmış koordinat eksenine göre tanımlanmıştır. Örnek olarak sabit platform

üzerindeki B_1 noktasının konumu sabit platform üzerinde bulunan koordinat eksenine göre $[86,6025 \ 50 \ 0]^T$ değerleri ile M_1 noktasının konumu hareketli platform üzerinde bulunan koordinat eksenine göre $[46.9844 \ 17.1010 \ 0]^T$ ile gösterilmektedir. Dikkat edilirse burada z-eksenine karşılık gelen değerler sıfır olmuştur. Genellikle sabit ve hareketli platform bir düzlem olarak seçilmektedir, dolayısıyla bağlantı noktalarının z eksenindeki değerleri sıfır olmaktadır. Fakat STEWSIM uygulamasında platformların düzlem olarak seçilme zorunluluğu yoktur. Düzlem olarak seçilmeyen sabit ve hareketli platformlar için ters kinematik hesaplamalarında bacakların kesişimi ile ilgili ek kontroller de yapılması gerekmektedir. Daha önce belirlenmiş açı değerleri 3-boyutlu konum değerlerine dönüştürülmüş olmasına rağmen bu değerler üzerinde istenildiği gibi değişiklik yapılabilir.



Şekil 2.6. STEWSIM ana tasarım ekranı

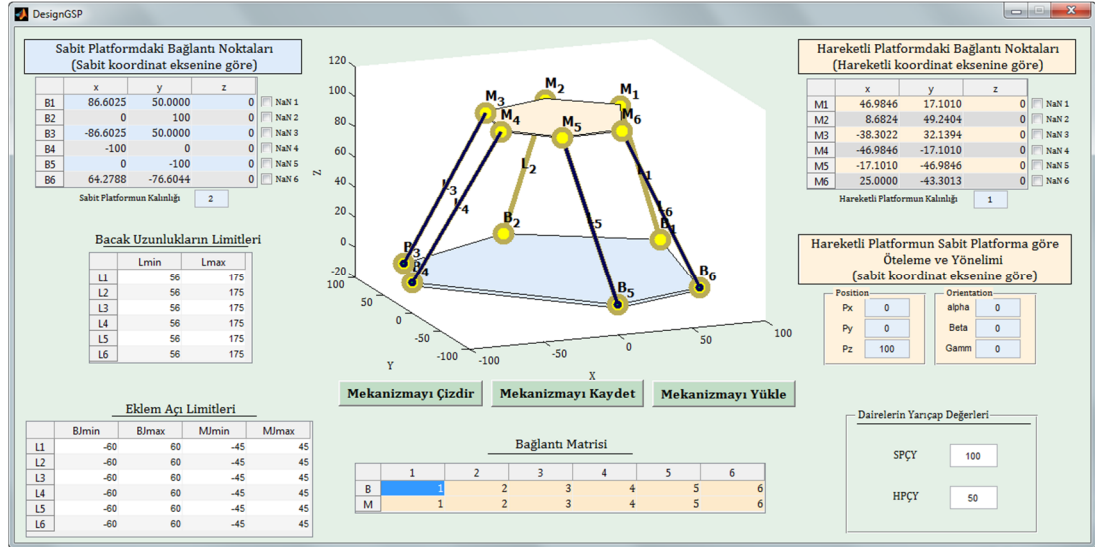
Eğer tasarlanacak mekanizmada platform üzerindeki bağlantı sayısı altıdan az ise bu durumda bağlantı noktalarından ilgili satırın sağ tarafındaki NaN düğmesine tıklanır. Rakam değil anlamına gelen NaN (Not a Number), IEEE kayan noktalı aritmetikte rakam değil olarak tanımlanmış ve MATLAB ortamındaki hesaplamalarda da NaN olarak kullanılmaktadır. Kullanıcı ayrıca ilgili kutucuklarla (editbox) sabit ve hareketli platformun kalınlıklarını, bacakların uzunluk limitlerini, eklemlerin açı limitlerini ve manipülatörün başlangıç duruşunu (konum ve yönelimini) belirleyebilir. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi sabit platformun kalınlığı 2, hareketli

platformun kalınlığı 1, bacak limitleri her bir bacak için aynı olmak üzere minimum bacak uzunluğu $L_{\min}=56$, maksimum bacak uzunluğu $L_{\max}=175$ olarak seçilmiştir. Ayrıca sabit platform üzerindeki eklemlerin limitleri olarak minimum açı değeri $BJ_{\min}=-60^\circ$, maksimum açı değeri $BJ_{\max}=60^\circ$, hareketli platform üzerindeki eklemlerin limitleri olarak minimum açı değeri $MJ_{\min}=-45^\circ$, maksimum açı değeri $MJ_{\max}=45^\circ$ olarak seçilmiştir. Mekanizmanın başlangıç durumu (pose) olarak öteleme $T=[0 \ 0 \ 100]^T$, yönelim değeri $R_{XYZ}=(0, 0, 0)$ değerleri seçilmiştir. Buraya kadar seçilen tüm değerlerin 3-boyutlu olarak çizdirilmesi “Mekanizmayı Çizdir” düğmesine tıklanarak sağlanabilir.

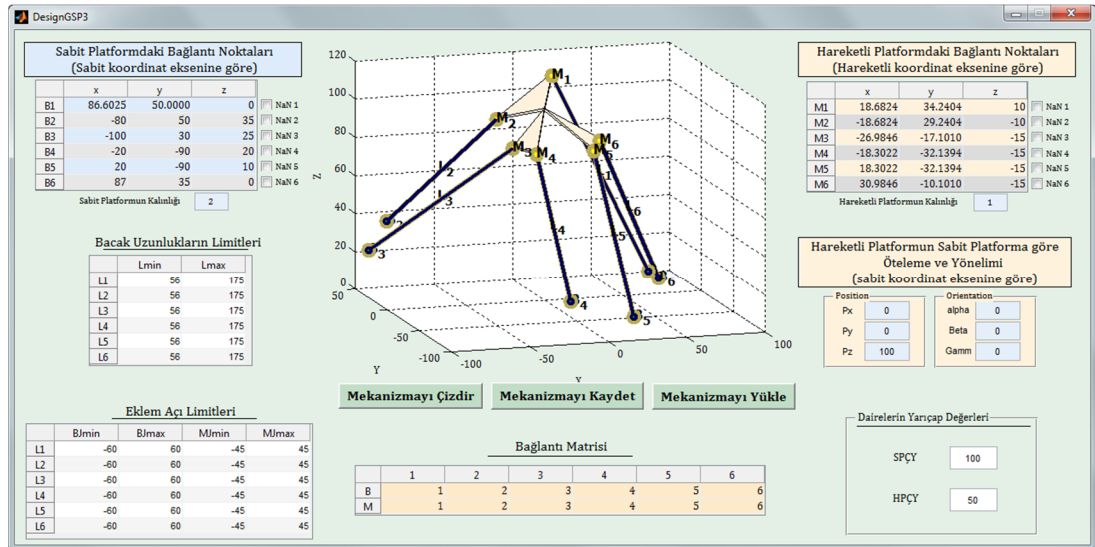
Ana tasarım ekranında sabit platform üzerinde bulunan bağlantı noktaları ile hareketli platform üzerinde bulunan bağlantı noktalarını birleştirecek olan bacakların bağlantı konumlarının ayarlanması gerekir. Bu bağlantıların ayarlanabilmesi için “Bağlantı Matrisi” kavramı önerilmiş ve bu tez kapsamında geliştirilen tüm uygulamalarda başarıyla kullanılmıştır. Bağlantı matrisi sayesinde olası tüm GSP mekanizmalarının (3x3, 4x3, 4x4, 5x3, 5x4, 5x5, 6x3, 6x4, 6x5 ve 6x6) tasarlanması mümkündür. Ayrıca tüm hesaplamalar, bağlantı matrisi kullanılarak yapıldığı için her mekanizmaya özel uygulama geliştirilmesine gerek kalmamıştır. Örneğin sabit platform üzerinde bulunan (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 ve B_6) noktaları ile hareketli platform üzerinde bulunan (M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 ve M_6) noktaları L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 ve L_6 bacakları ile bağlanarak 6x6 GSP mekanizması oluşturulabilir. Bunun için bağlantı matrisi Şekil 2.7’de görüldüğü gibi doldurulur. “Mekanizmayı Çizdir” düğmesine tıklanarak Şekil 2.7’de görüldüğü gibi mekanizma ekranda çizdirilebilir.

Genellikle GSP mekanizmalarının sabit ve hareketli platformları düzlem olarak seçilmektedir. Fakat bu tez kapsamında geliştirilen STEWSIM yazılımında sabit ve hareketli platformlar, düzlem olarak seçilebileceği gibi gelişigüzel şekillerde seçilebilmektedir. Örnek olarak sabit ve hareketli platformlardaki noktaların z-eksenindeki konumları (Sabit platform için 0, 35, 25, 20, 10, 0 ve hareketli platform için 10, -10, -15, -15, -15, -15) sıfırdan farklı olan bir GSP mekanizma seçilmiş ve Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Önerilen bağlantı matrisi algoritması yardımıyla her bir bağlantı noktasının konumu doğrudan hesaplamaya dâhil edilmektedir. Bağlantı matrisi yardımıyla ters ve ileri kinematik, beceri, tekillik, çalışma uzayı analizleri ve

yörünge planlaması hesaplamalarında düzlem olmayan sabit ve hareketli platformlardan oluşan GSP mekanizmalarının hesaplamaları yapılabilmektedir.



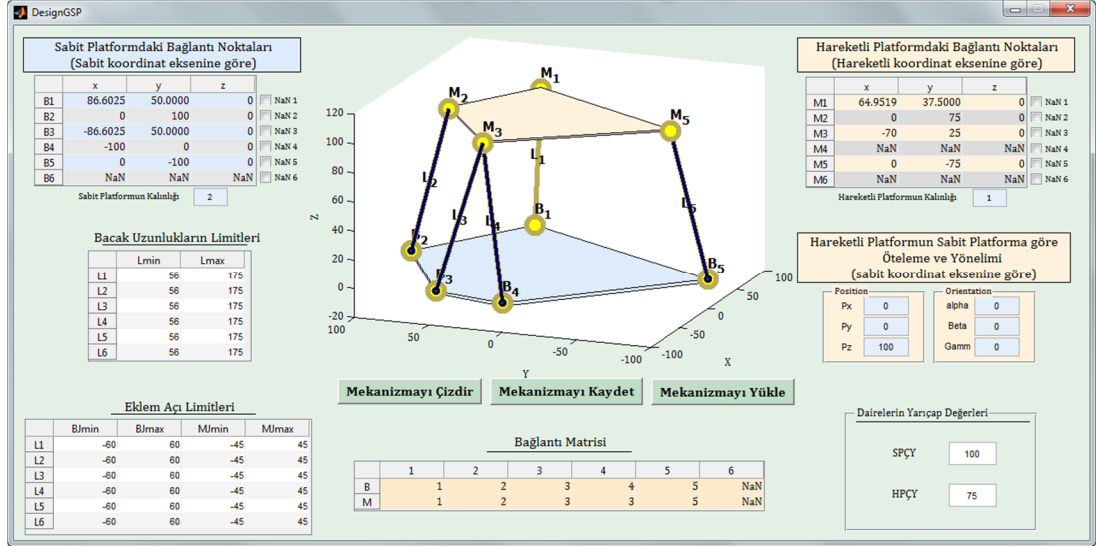
Şekil 2.7. STEWSIM ana tasarım ekranında 6x6 GSP mekanizmasının gösterilmesi



Şekil 2.8. Gelişigüzel şekilde sabit ve hareketli platformlar

Farklı yapı bir GSP mekanizması tasarlanması için bağlantı noktaları ve bağlantı matrisi üzerinde istenildiği gibi değişiklikler yapılabilir. Örneğin sabit platform üzerinde bulunan (B₁, B₂, B₃, B₄ ve B₅) noktaları ile hareketli platform üzerinde bulunan (M₁, M₂, M₃ ve M₅) noktaları L₁, L₂, L₃, L₄ ve L₅ bacakları ile bağlanarak Şekil 2.9'daki görüldüğü gibi 5x4 GSP mekanizması oluşturulabilir. Dikkat edilirse 5x4 GSP mekanizmasının yapısı gereği mevcut olmayan B₆, M₄ ve M₆ bağlantı noktaları NaN olarak seçilmiştir. Tasarım işlemleri tamamlandıktan sonra

mekanizma ile ilgili tüm bilgiler “Mekanizmayı Kaydet” düğmesine tıklanarak kaydedilebilir. Burada dosya ismi başka 5x4 GSP yapıdaki mekanizmalar ile karışmaması için “5x5 GSP1” olarak seçilmiştir. Kullanıcı istediği gibi dosya ismini seçebilmektedir.



Şekil 2.9. STEWSIM ana tasarım ekranında 5x4 GSP mekanizmasının gösterimi

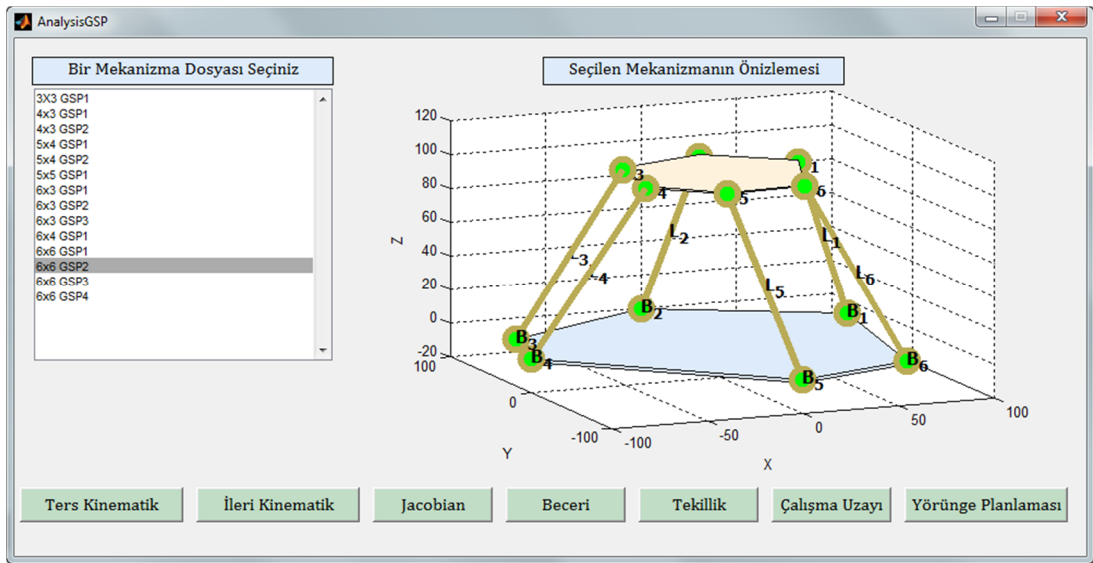
2.2. GSP Mekanizmalarının Analizi

Tasarım ekranında mekanizma kaydedildikten veya Şekil 2.2’den “GSP Analizi” düğmesine tıklanarak analiz ekranına geçilebilir. Analiz ekranı Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Bu ekranın sol tarafında daha önce kaydedilen mekanizma dosyaları gösterilmektedir. İstenilen bir mekanizma seçildikten sonra analiz için ekranın altında bulunan analiz düğmelerinden (ters kinematik, ileri kinematik, Jacobian, beceri, çalışma uzayı, tekillik ve yörünge planlaması) birisine tıklanabilir.

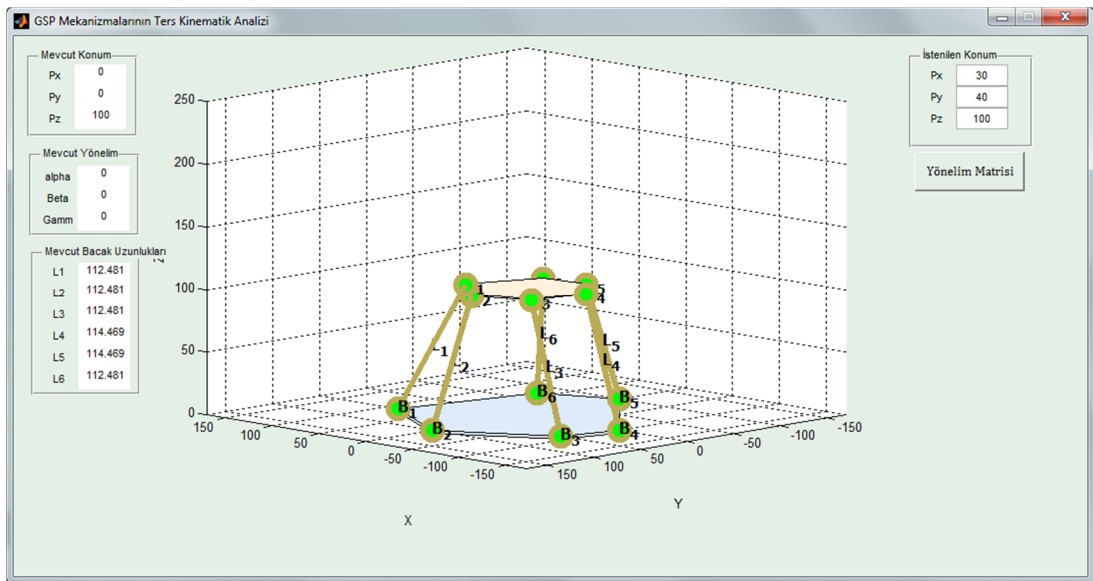
2.2.1. Ters kinematik analizi

STEWSIM ters kinematik analiz ekranında, verilen konum ve yönelim bilgilerine göre sabit platformdaki koordinat ekseninde tanımlı bacak uzunluklarını hesaplamaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen benzetim aracında hareketli platformun yönelimini tanımlamak için olası tüm Roll-Pitch-Yaw veya Euler açı setleri kullanılabilir. İlgili kutucuklardan platformun animasyonunda kullanılacak zaman (saniye) ve çözünürlük (hertz) değerleri seçilebilir. Hareket sırasında 7. dereceden bir polinom kullanılarak hareketin pürüzsüz (smooth) bir

yörüngede olması sağlanmıştır. Platformun hareket profili olarak konum, hız ve ivme değerleri “Yörüngeyi Göster” düğmesine basılarak her bir bacak için kolaylıkla görülebilmektedir. Platformun hareket geçmişi saklanarak yörünge hesaplamaya gerek kalmadan hareket gösterimi yapılabilmektedir. Şekil 2.7’de tasarlanan mekanizmanın ters kinematik analizi için Şekil 2.11’de gösterildiği gibi hareketli platformunun konumu $p_x=30$, $p_y=40$ ve $p_z=100$ seçilmiştir. Ekranın sol tarafında mekanizmanın mevcut konum, yönelim ve bacak uzunluk değerleri gösterilmektedir.

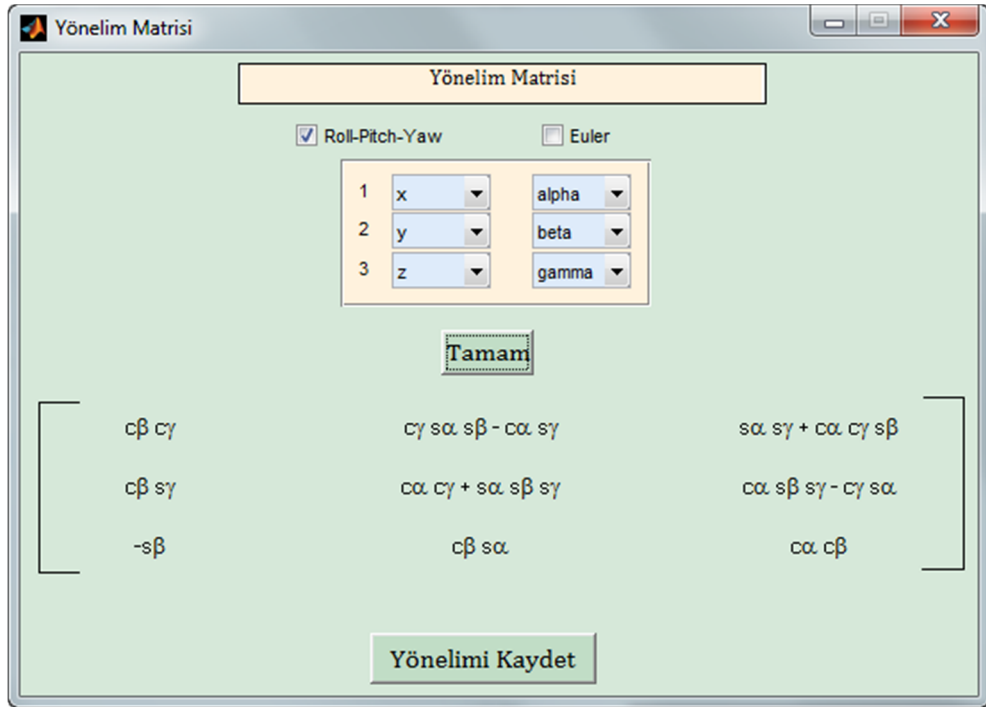


Şekil 2.10. Mekanizmanın seçilerek analiz yapılabildiği analiz ekranı



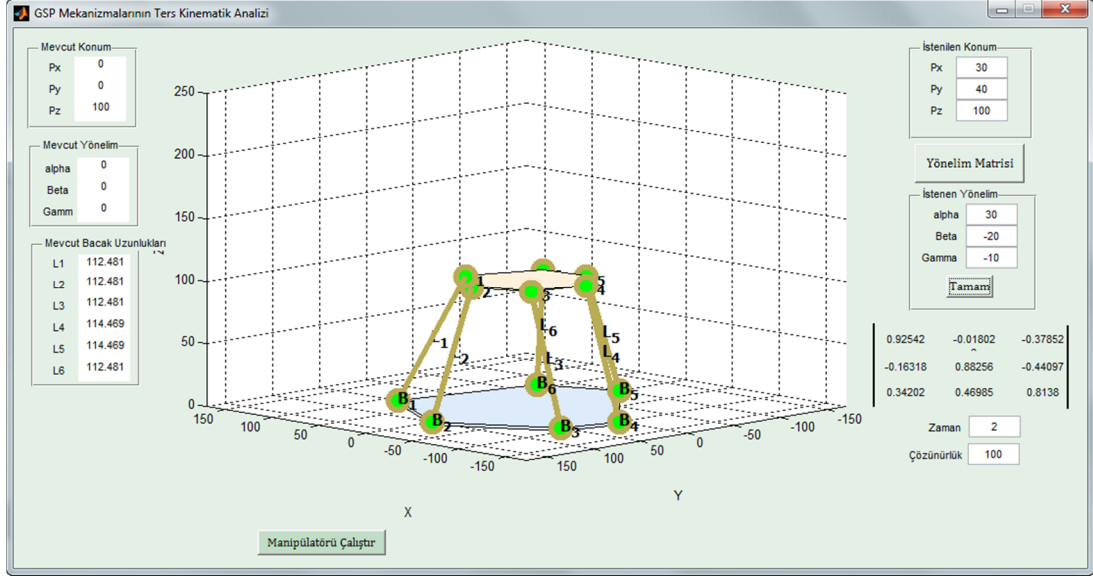
Şekil 2.11. 6x6 GSP mekanizmasının ters kinematik hesabı

Kullanıcının bir yönelim matrisi seçmesi gereklidir. “Rotasyon Matrisi” düğmesine tıklandığında Şekil 2.12’de görüldüğü gibi Roll-Pitch-Yaw veya Euler açı setlerinden birisi yönelim matrisi olarak seçilebilir. Örnek olarak sırasıyla x-ekseninde α (alpha), y-ekseninde β (beta) ve z-ekseninde γ (gamma) kadar döndürülerek R_{XYZ} Roll-Pitch-Yaw açı seti seçilsin. “Tamam” düğmesine tıklandığında Şekil 2.11’de gösterildiği gibi yönelim matrisi sembolik olarak ifade edilecektir. Buradaki c kosinüs, s ise sinüs operatörlerinin kısaltılmış halidir. Yönelim matrisi ayarlanması tamamlandığında “Yönelimi Kaydet” düğmesine tıklanarak ters kinematik ekranına geri dönülür.



Şekil 2.12. Yönelim matrisinin seçim ekranı

Yönelim matrisi belirlendikten sonra Şekil 2.13’de görüldüğü gibi hareket için gerekli yönelim açıları ($\alpha = 30, \beta = -20, \gamma = -10$), zaman (2 saniye) ve çözünürlük (100 hertz) değerleri belirlenir. Yönelim matrisi için seçilen açı setine göre ($R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma) = R_Z(\gamma)R_Y(\beta)R_X(\alpha)$) açı değerlerine ($\alpha = 30, \beta = -20, \gamma = -10$) karşılık gelen yönelim matrisinin sayısal gösterimi “Tamam” düğmesine tıklanarak görüntülenebilir.

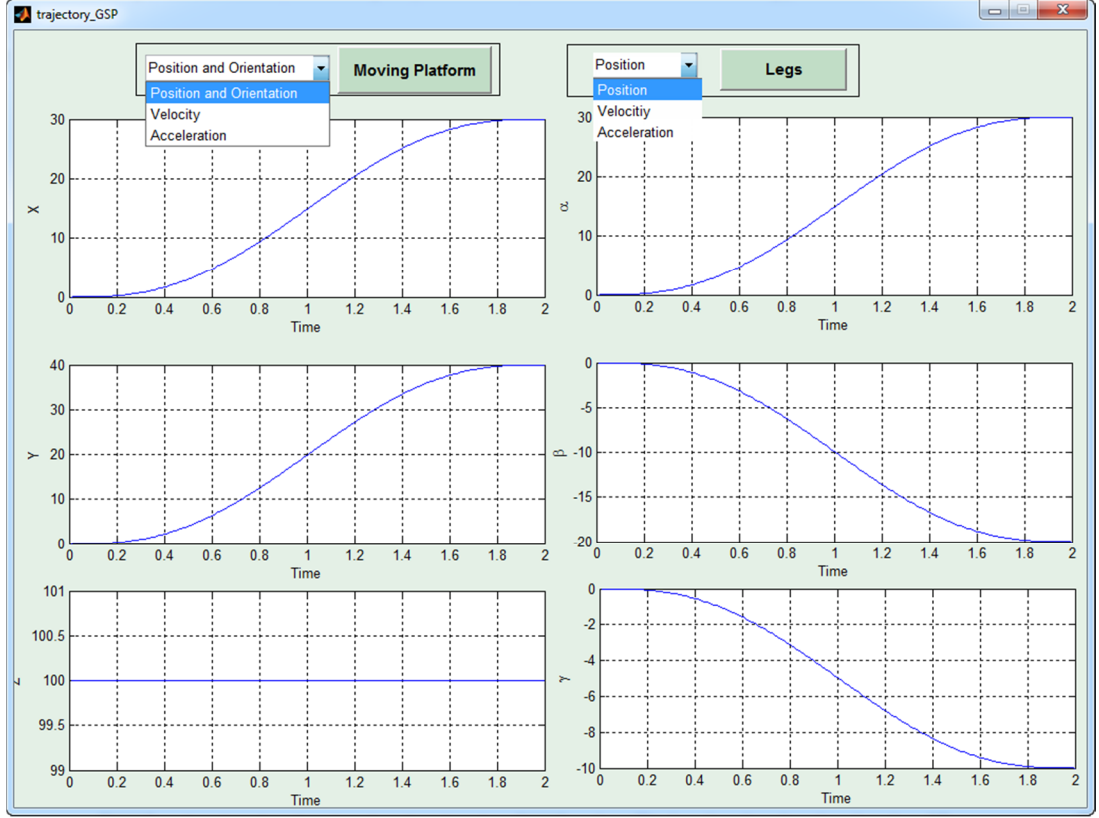


Şekil 2.13. Hareketin yönelim açıları, zaman ve çözünürlük değerlerinin seçilmesi

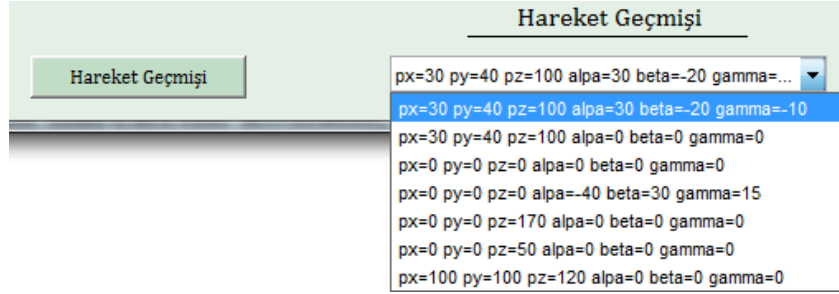
6x6 GSP mekanizmasının belirlenen konum ve yönelime göre yapacağı hareketi animasyon olarak görüntülemek için Şekil 2.13'deki "Mekanizmayı Çalıştır" düğmesine tıklanır. Girilen zaman ve çözünürlük değerleri de dikkate alınarak platformun hareketi animasyon şeklinde gösterilecek ve "Mevcut bacak uzunlukları" alanındaki değerler anlık olarak güncellenecektir.

Hareketli platform ve bacakların yapacağı hareketin konum, hız ve ivme profili "Yörüngeyi Göster" düğmesine basılarak çizdirilebilir. Şekil 2.14'de başlangıç konumu $[p_{xi} \ p_{yi} \ p_{zi}] = [0 \ 0 \ 100]$ ve yönelimi $[\alpha_i \ \beta_i \ \gamma_i] = [0 \ 0 \ 0]$ değerlerinden istenilen konum $[p_{xd} \ p_{yd} \ p_{zd}] = [30 \ 40 \ 100]$ ve yönelim $[\alpha_d \ \beta_d \ \gamma_d] = [30 \ -20 \ -10]$ değerlerine doğru değişen yörünge gösterilmektedir. Dikkat edilirse burada z-ekseninde bir değişim olmamıştır.

Mekanizmanın hareket geçmişi "Hareket Geçmişi" düğmesine basılarak GSP mekanizmasının Şekil 2.15'de görüldüğü gibi daha önceki konum ve yönelimlerine göre hareketleri tekrar incelenebilir. En son yaptırılan hareket en üste eklenecek şekilde hareket geçmişi güncellenecektir.



Şekil 2.14. Hareketli platform ve bacakların hareketin konum, hız ve ivme profili

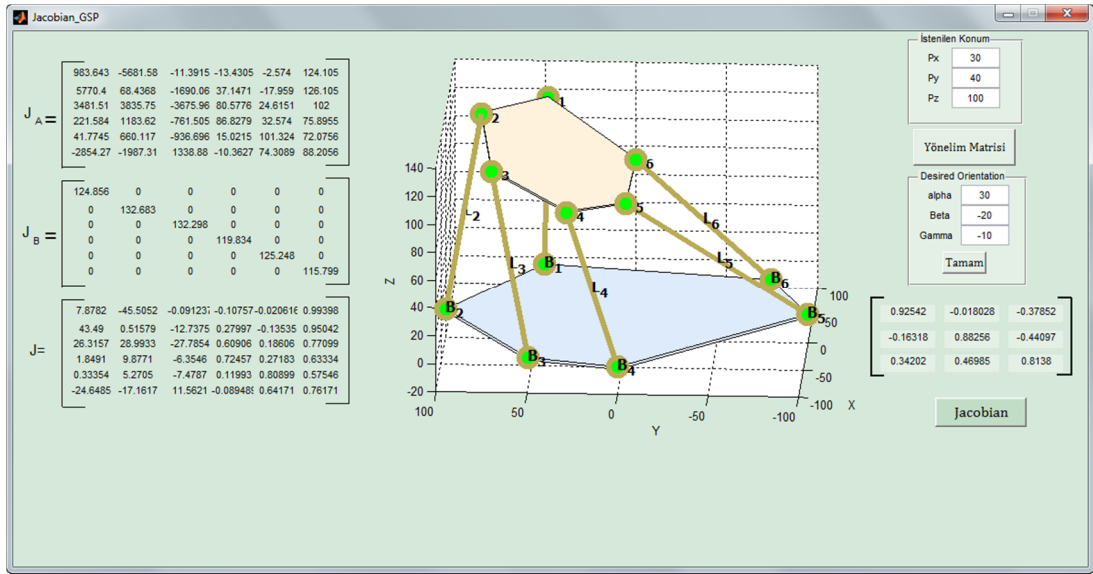


Şekil 2.15. GSP mekanizmasının hareket geçmişi

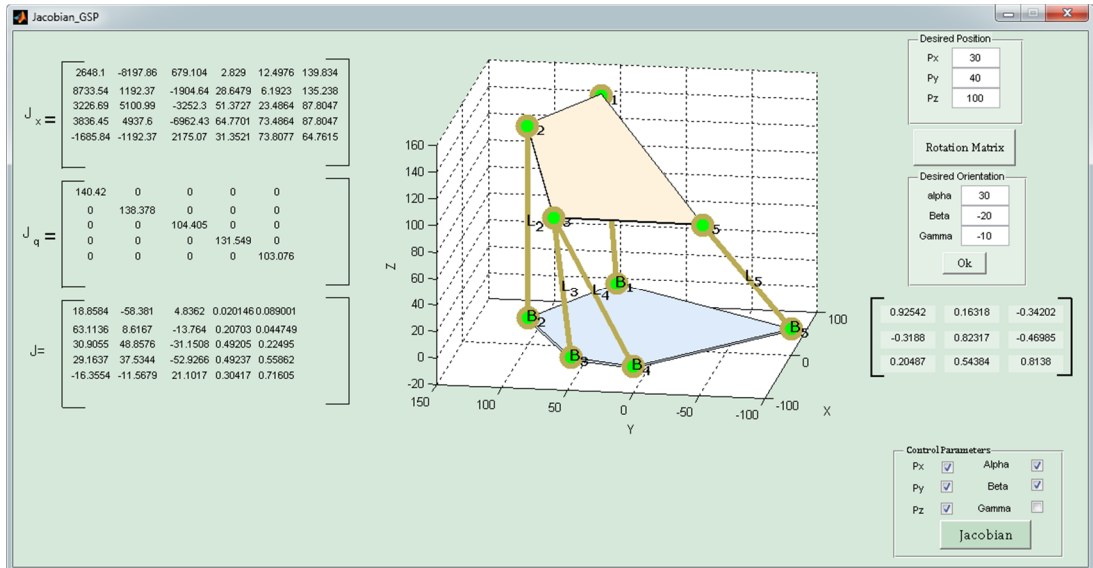
2.2.2. Jacobian analizi

Seçilen bir mekanizma üzerinde Jacobian analizi Şekil 2.10'daki "Jacobian" düğmesine basılarak yapılabilir. Jacobian analizi Denklem (1.10)'da ifade edilen J_A ve J_B ile toplam Jacobian (J) matrislerini hesaplamaktadır. Gösterim kolaylığı açısından doğrusal ve açısal hızla ilgili olarak kullanılan J_A yerine J_x , bacakların hızları ile ilgili olan J_B yerine J_q kullanılmıştır. Ters kinematik analiz adımındaki benzer şekilde konum ve istenilen açı setine göre yönelim bilgileri seçilerek hareketli

platform için bir konum ve yönelim ayarlanır. Bu konum ve yönelim için J_x, J_q ve J değerleri hesaplanarak aynı pencere içinde gösterilecektir. 6x6 GSP mekanizması için Jacobian hesaplama örneği Şekil 2.16’da, 5x4 GSP mekanizması için Jacobian hesaplama örneği Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Her iki mekanizmanın konumu için $p_x=30, p_y=40, p_z=100$ ve yönelimi için Roll-Pitch-Yaw açısı setine göre R_{XYZ} tanımlı ($\alpha = 30, \beta = -20, \gamma = -10$) değerlerine göre hesaplama yapılmıştır.



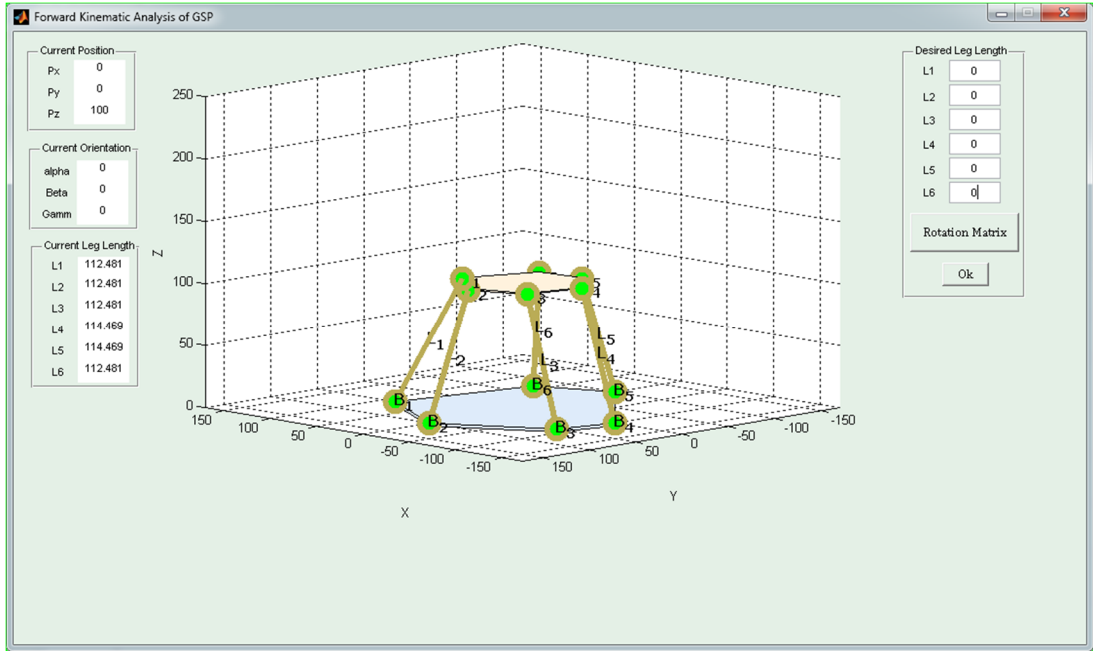
Şekil 2.16. 6x6 GSP mekanizmasının Jacobian analizi



Şekil 2.17. 5x4 GSP mekanizmasının Jacobian analizi

2.2.3. İleri (düz) kinematik

Seçilen bir mekanizma üzerinde ileri kinematik analizi Şekil 2.10'daki "İleri Kinematik" düğmesine basılarak yapılabilir. Şekil 2.7'de tanımlanan 6x6 GSP mekanizması için ileri kinematik analizinin yapılmak istendiğini düşünelim. İleri kinematik ekranında prizmatik eyleyicilere ait bacak uzunlukları verildiğinde buna karşılık gelen hareketli platformun konum ve yönelim değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 2.18'de gösterilen ileri kinematik ekranında, sol tarafta 6x6 GSP mekanizmasının başlangıç konum ve yönelim değerleri ile bacakların uzunlukları gösterilmektedir. Bu değerler aynı zamanda Newton-Rapshon yöntemi içinde başlangıç değerleri kabul edilmektedir. Sağ tarafta ise istenilen bacak uzunlukları ve hareketli platform için yönelim açısı girilebilir.

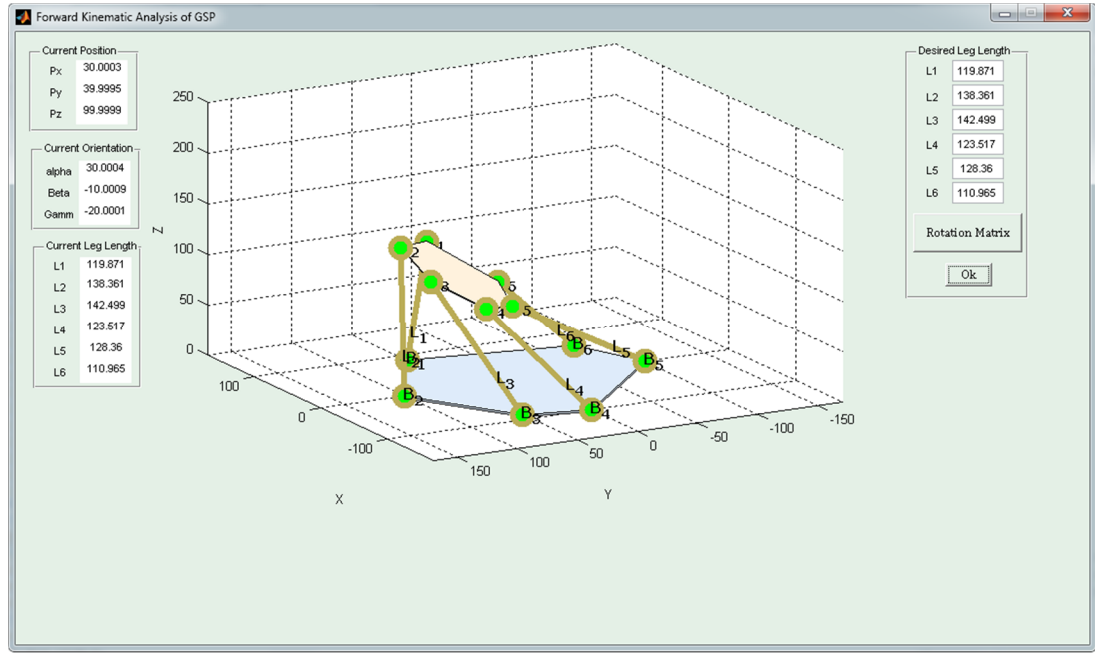


Şekil 2.18. İleri kinematik analiz ekranı

Mekanizmanın istenilen bacak uzunluklarının Şekil 2.19'da gösterildiği gibi $L1=122,194$, $L2=126,35$, $L3=130,394$, $L4=120,367$, $L5=126,748$, $L6=119,386$ ve yönelim matrisinin $R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma) = R_Z(\gamma)R_Y(\beta)R_X(\alpha)$ şeklinde seçildiğini kabul edelim. Hesaplama sonucu ekranda Şekil 2.19'da gösterildiği gibi çizdirilmiştir. Şekil 2.19'da hesaplanan konum ve yönelim değerleri incelendiğinde Şekil 2.11'de gösterilen mekanizmanın olması gereken konum ve yönelim değerleriyle 10^{-4} mertebesinde bir hata ile bulunduğu doğrulanmış olur.

2.2.4. Beceri analizi

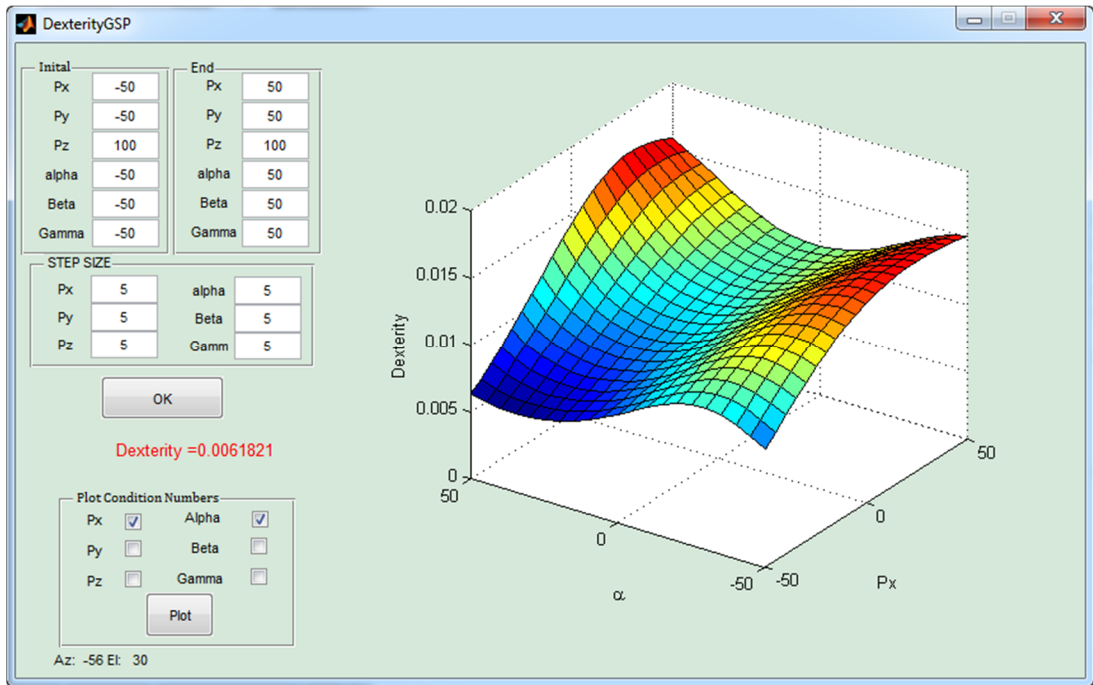
Seçilen bir mekanizma üzerinde beceri analizi Şekil 2.10'daki "Beceri" düğmesine basılarak yapılabilir. İlk adımda Denklem (1.16)'da gösterilen homojen Jacobian matrisinin hesaplanması gereklidir. Daha sonra hareketli platformun her bir duruşu (pose) için $\eta = 1/\kappa$ değerleri ayrıklaştırılmış Kartezyen uzayda Denklem (1.21) kullanılarak hesaplanır. Tüm değerler hesaplandıktan sonra Denklem (1.24)'e göre mekanizmanın beceri değeri hesaplanır.



Şekil 2.19. İleri kinematik sonucunun çizdirilmesi

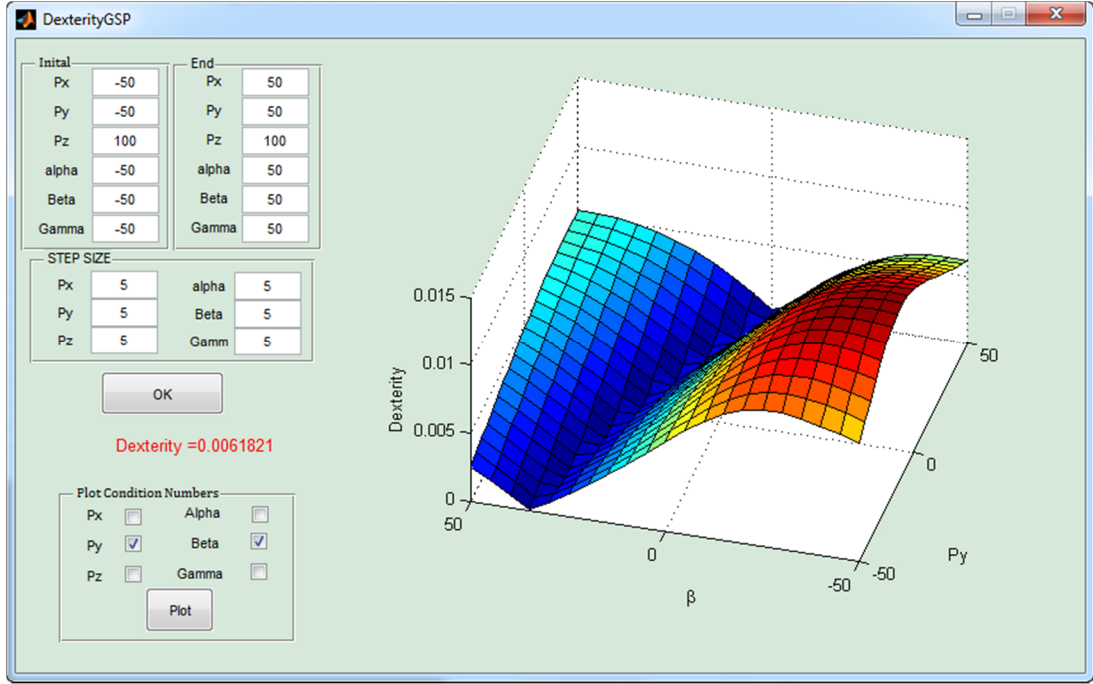
STEWSSIM'in sunduğu bu beceri hesabıyla kullanıcı; (i) önerilen bir yapılandırmasının kalitesi ölçülmüş, (ii) verilen bir iş için paralel robotun performansı iyileştirilmiş olacaktır. Örnek bir beceri hesabı Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Ayrıklaştırılmış Kartezyen uzayı için konum (p_x, p_y, p_z) , aralıklar $[-50, 50]$, $[-50, 50]$, $[100, 100]$ ve yönelim açıları (α, β, γ) için aralıklar $[-50, 50]$, $[-50, 50]$, $[-50, 50]$ şeklinde verilmiştir. Adım aralıkları ise her bir aralık için 5 olarak seçilmiştir. Dikkat edilirse p_z değerleri sabit alınarak bir düzlem için beceri değerlerinin hesaplanması sağlanmıştır. Şekil 2.20'de görüleceği gibi beceri hesaplama sonucu 0,0061821 değeri elde edilmiştir. Bu beceri değeri sıfıra yakın olduğundan, seçilen mekanizma yapılandırmasının kötü olduğunu göstermektedir. Hesaplama işlemi tamamlandıktan sonra ekranın sol alt tarafında konum ve yönelim

$(p_x, p_y, p_z, \alpha, \beta, \gamma)$ parametreleri çıkmaktadır. Bu parametrelerden seçilen iki parametreye karşılık gelen beceri değerleri “Çizdir” düğmesine tıklandığında ekranda çizdirilecektir. Yatay eksenler seçilen iki parametreyi, dikey eksen ise Beceriye ifade etmektedir. Detaylı analizler yapmak ve tüm parametreleri incelemek için çizdirmek istenen parametreler değiştirilerek “Çizdir” düğmesine tıklandığında yeniden hesaplama yapmaya gerek kalmadan ekranda çizdirme işlemi gerçekleştirilecektir. Seçilen p_x ve α parametrelerine karşılık gelen beceri değerleri Şekil 2.20’de, p_y ve β parametrelerine karşılık gelen beceri değerleri Şekil 2.21’de gösterilmiştir.

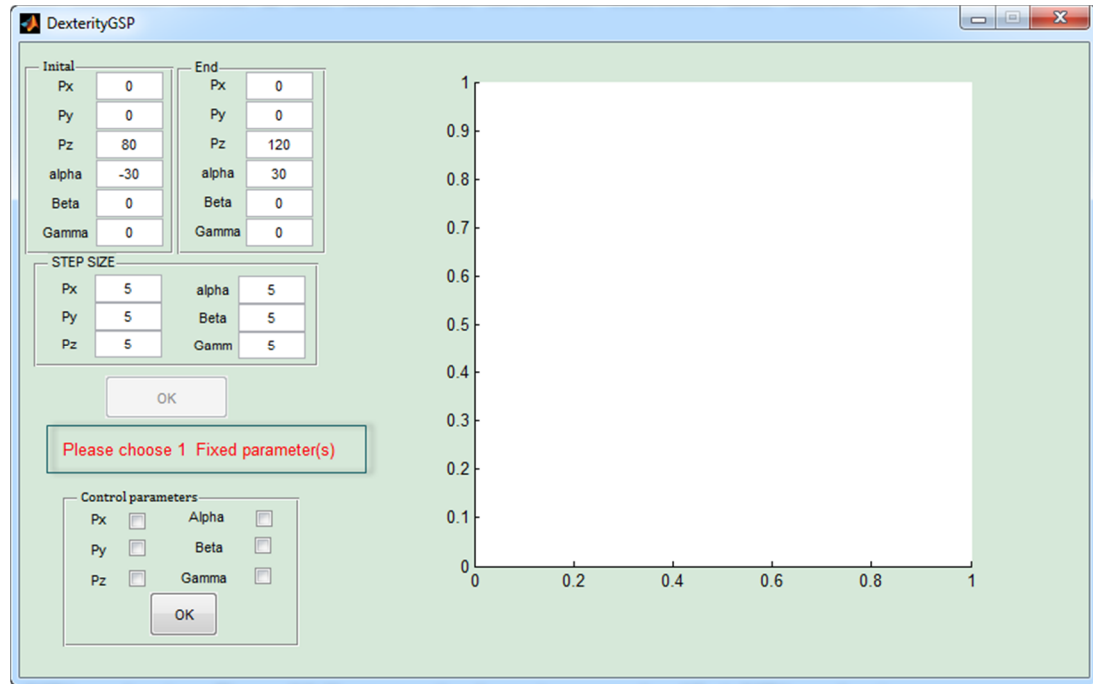


Şekil 2.20. 6x6 GSP mekanizması için beceri hesabı

Bacak sayısının altıdan az olduğu durumlarda bacak sayısı ile konum ve yönelim parametreleri aynı sayıda olmadığından dolayı Jacobian matrisi kare matris olmayacak dolayısıyla da tersi alınamayacaktır. Bu nedenle kullanıcıdan bazı parametrelerin sabitlenmesi (artık o parametre kontrol edilemeyecektir) istenerek bacak sayısı ile konum ve yönelim parametrelerinin eşitlenmesi sağlanacaktır. Beş bacağa sahip 5x4 GSP mekanizması için bir parametrenin sabitlenmesi için konum veya yönelim parametrelerinden birisinin sabit seçilmesi gerektiği ekranda Şekil 2.22’deki gibi gösterilmektedir.

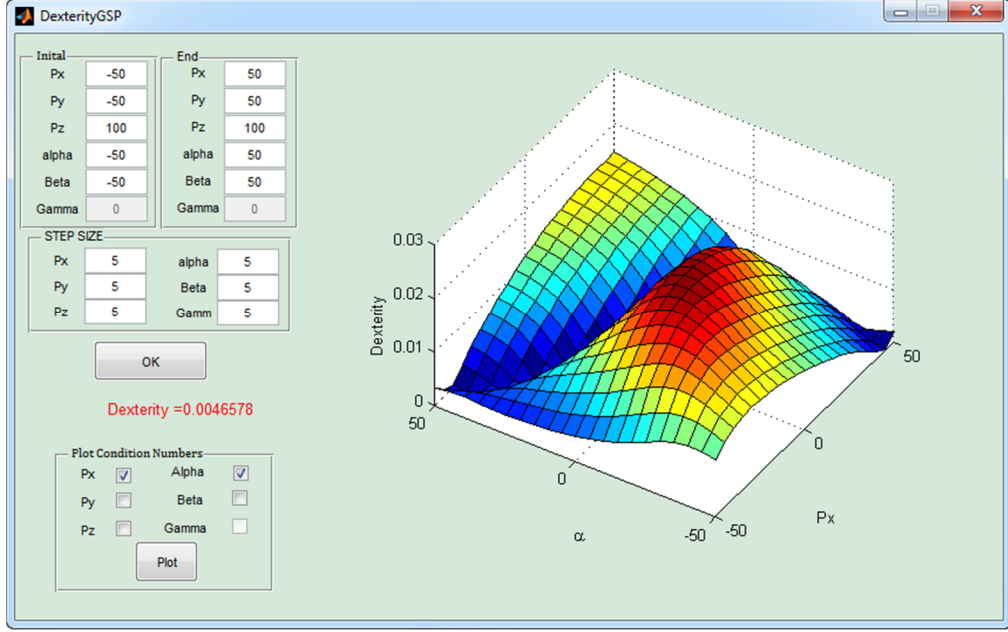


Şekil 2.21. 6x6 GSP mekanizması için farklı parametrelerle beceri gösterimi



Şekil 2.22. 5x4 GSP mekanizması için beceri hesabı için parametre sabitlemesi

5x4 GSP1 mekanizması için γ parametresinin sabitlendikten sonra 6x6 GSP mekanizmasının beceri hesaplanmasına benzer şekilde hesaplama yapılır. 5x4 GSP mekanizmasının beceri sonucu 0,0046678 olarak hesaplanmış ve P_x ile α parametrelerine karşılık gelen beceri grafiği Şekil 2.23'de çizdirilmiştir.



Şekil 2.23. 5x4 GSP mekanizmasının beceri hesabı sonucunun görselleştirilmesi

2.2.5. Çalışma uzayının belirlenmesi

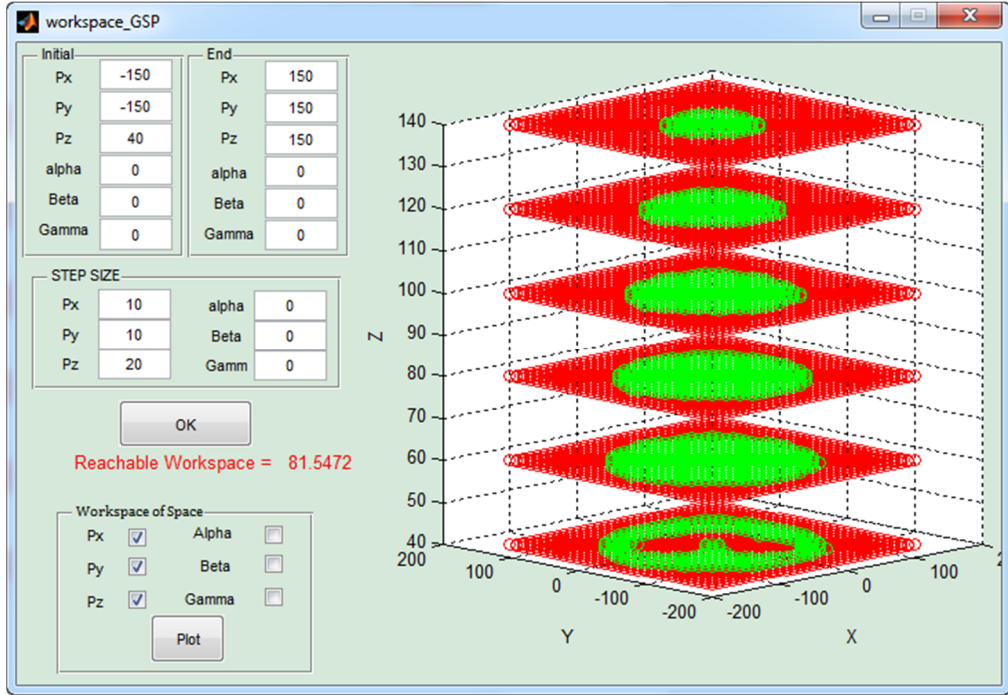
STEWSIM çalışma uzayı hesaplamasında ayrıklaştırma yöntemini [22] kullanmaktadır ve daha iyi bir gösterim açısından çalışma uzayını düzlem kesitleriyle göstermektedir. Kullanıcı tarafından bu düzlem kesitlerinin sayısı z-eksenindeki adım aralığı yardımıyla ayarlanabilmektedir. 6x6 GSP mekanizmasının çalışma uzayı Şekil 2.24'de, 5x4 GSP mekanizmasının çalışma uzayı ise Şekil 2.25'de görselleştirilmiştir. Bu şekillerdeki yeşil renkli bölgeler erişilebilir, kırmızı renkli bölgeler ise erişilemeyen bölgeleri ifade etmektedir. 6x6 GSP mekanizmasının çalışma uzayının hacmi 81,5472 birim³, 5x4 GSP mekanizmasının çalışma uzayının hacmi 71,7833 birim³ olarak hesaplanmıştır.

2.2.6. Tekillik analizi

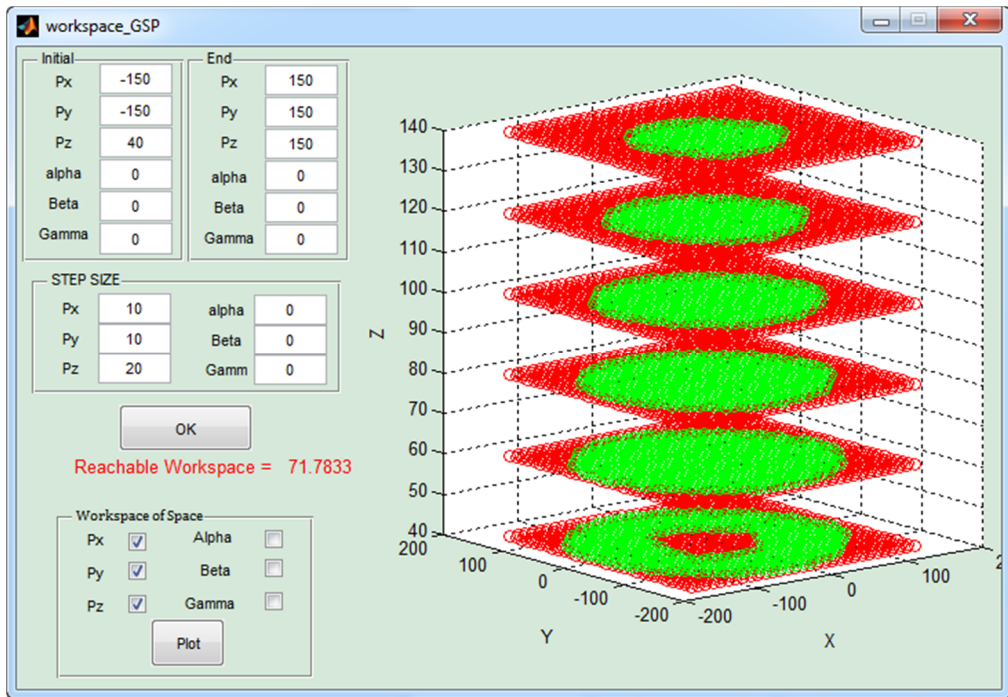
Paralel mekanizmalar için tip 1 ve tip 2 olmak üzere toplam iki çeşit tekillik bulunmaktadır. Tip 1 tekillikler çalışma uzayının sınırlarında bulunmaktadır ve Bölüm 2.2.5'de anlatılan çalışma uzayı analizi yardımıyla kolaylıkla tespit edilebilir.

STEWSIM tip 2 tekillikleri ise Jacobian matrisinin determinantı sıfıra eşit olup olmadığına göre belirlenerek görselleştirilmektedir. Şekil 2.26'da 6x6 GSP mekanizmasının, Şekil 2.27'de ise 5x4 GSP mekanizmasının tip 2 tekilliği

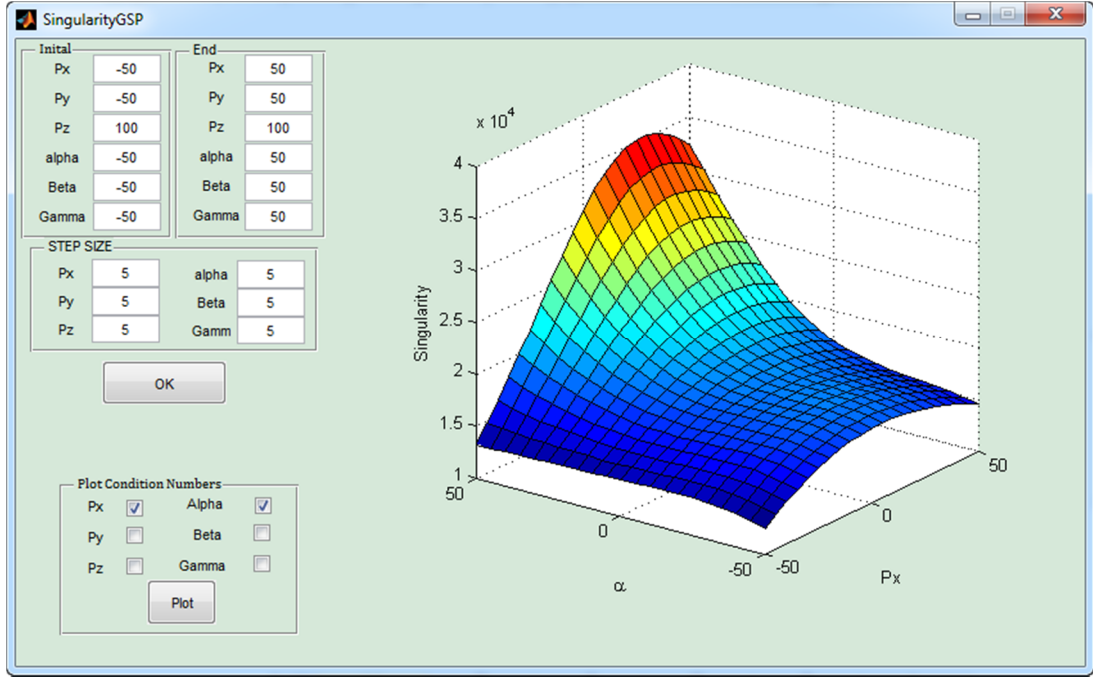
görselleştirilmiştir. Şekil 2.26'da görüleceği gibi 6x6 GSP mekanizmasının verilen (p_x, p_y, p_z) konum aralığı $[-50, 50]$, $[-50, 50]$, $[100, 100]$ ile (α, β, γ) yönelim $[-50, 50]$, $[-50, 50]$, $[-50, 50]$ aralığındaki tekil değerleri sıfır değerinden uzaktadır. Bu da hareketin tekillikten uzak olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.24. 6x6 GSP mekanizmasının çalışma uzayı



Şekil 2.25. 5x4 GSP mekanizmasının çalışma uzayı

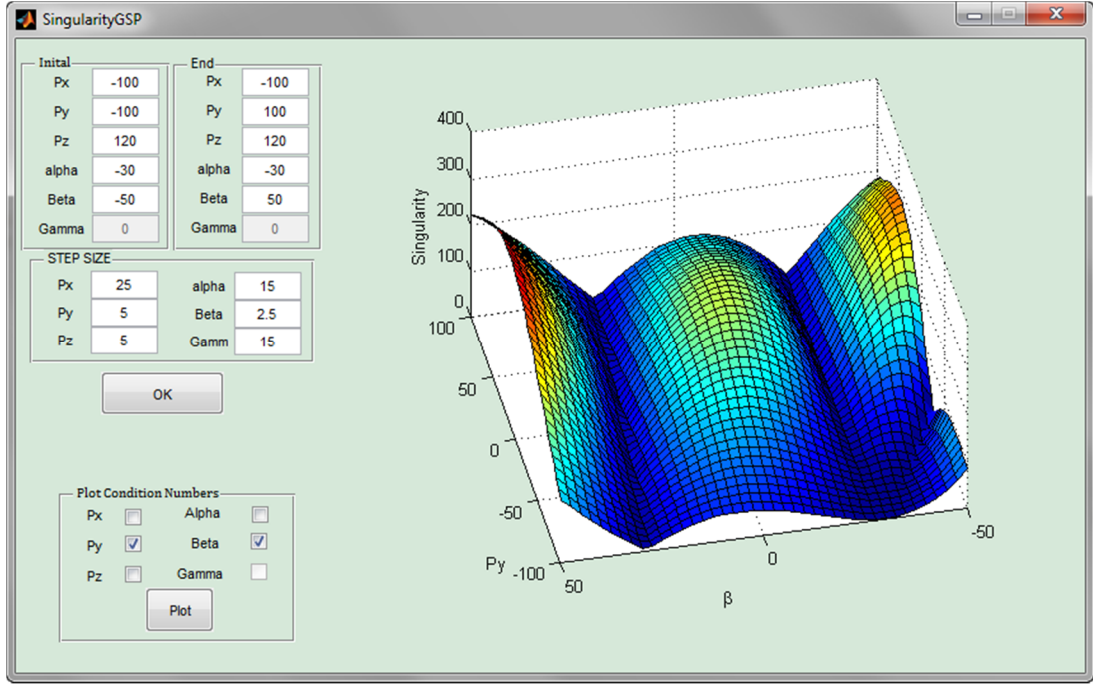


Şekil 2.26. 6x6 GSP mekanizması için tip 2 tekilliklerinin görselleştirmesi

Şekil 2.27’de görüleceği gibi 5x4 GSP mekanizmasının yönelim parametresi β için $[-50 \ 50]$ değerleri aralığında iki tane tekil doğrusu vardır. İki tekil doğru dışında kalan bölgeler için tekillikten uzaklaştığı gözlemlendiğinden bu bölgeler dışında 5x4 GSP mekanizmasının çalıştırılması gerekmektedir.

2.2.7. Yörünge analizi

Yörünge analizinde, kullanıcı verilen karmaşık bir iş için, hareketli platformun istenilen zamanda istenilen koordinatlarda olup olmadığını kontrol edebilir. STEWSIM, çevrimdışı bir benzetim aracıdır fakat ileride GSP için kontrol imkânı da sağlayan çevrimiçi bir araca dönüştürülmesi planlanmaktadır. Hareketli platformun konum ve yönelimleri Şekil 2.28’de gösterilen formatta MICROSOFT OFFICE içinde bulunan EXCEL yazılımında ayarlanır. Bu EXCEL dosyasındaki her bir satır hareketli platformun bir konum ve yönelimine karşılık gelmektedir. STEWSIM bu EXCEL dosyasından konum ve yönelim bilgilerini okuyarak Şekil 2.29’da gösterildiği gibi kullanıcı arabirimine aktarmaktadır. Kullanıcı isterse bu arabirimden konum ve yönelim bilgilerinde değişiklik yapabilmektedir.

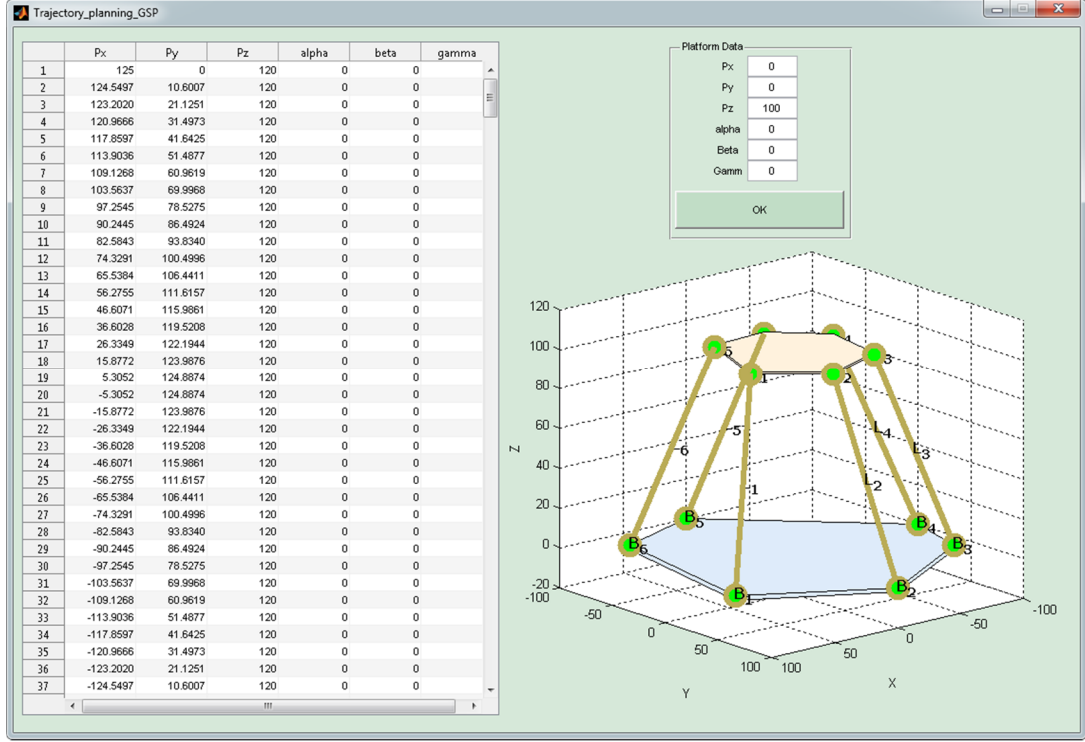


Şekil 2.27. 5x4 GSP mekanizması için tip 2 tekilliklerinin görselleştirilmesi

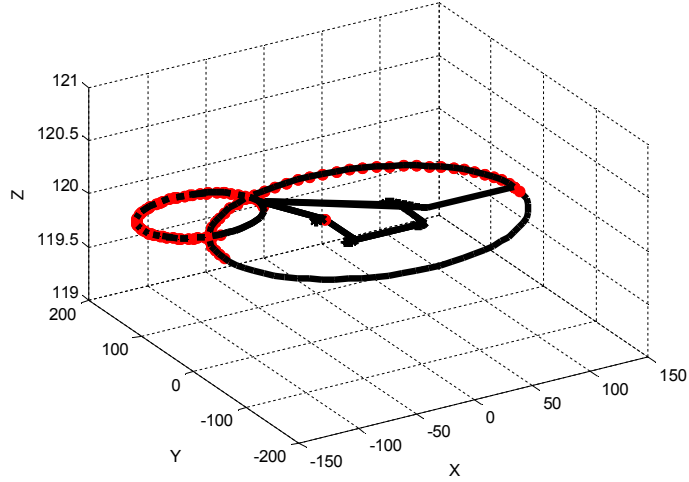
A1		fx px				
	A	B	C	D	E	F
1	px	py	pz	alpha	beta	gamma
2	125	0	120	0	0	0
3	124,5497	10,60074	120	0	0	0
4	123,202	21,1251	120	0	0	0
5	120,9666	31,49726	120	0	0	0
6	117,8597	41,64247	120	0	0	0
7	113,9036	51,48766	120	0	0	0
8	109,1268	60,96187	120	0	0	0
9	103,5637	69,99685	120	0	0	0
10	97,25447	78,5275	120	0	0	0

Şekil 2.28. EXCEL dosyasında Yörünge planlaması için bilgilerin saklanması

Ekrandaki “Tamam” düğmesine tıklandığında 6x6 GSP mekanizmanın yörüngesi çalıştırılarak animasyonu izlenebilir. Animasyon tamamlandıktan sonra Şekil 2.30’daki EXCEL dosyasından okunan yörünge görselleştirilmiştir. Kırmızı renkle belirtilen bölgeler bu yörüngede mekanizmanın fiziksel olarak gidemeyeceği noktaları göstermektedir. Yörüngede kırmızı noktalara karşılık gelen konum ve yörünge bilgileri tekrar gözden geçirilerek yörünge tekrar tanımlanabilir.



Şekil 2.29. 6x6 GSP mekanizmasının yörünge planlaması



Şekil 2.30. 6x6 GSP mekanizmasının yörüngesinin gösterimi

2.2.8. STEWSIM değerlendirmesi

Bu uygulama kapsamında robot tasarımcıları ve araştırmaları için bağlantı matrisi algoritması sunulmuştur. STEWSIM benzetim aracı ile MATLAB grafik arabirimi yardımıyla bacak sayısı üç ile altı arasında değişebilen 3x3,4x3,...,6x5 ve 6x6 gibi olası tüm GSP mekanizmaları kolaylıkla tasarlanabilmektedir. Bu grafiksel arabirim yardımıyla ters ve ileri kinematik, Jacobian matrisi, beceri, çalışma uzayı, teklik ve

yörünge planlaması Roll-Pitch-Yaw veya Euler açı setleri ile analiz yapılabilmesi mümkündür. Ayrıca GSP mekanizmalarının görselleştirilmesi, çalışma uzayının grafik olarak gösterilmesi ve yörünge'nin 3-boyutlu uzayda ters kinematik hesaplamaları ile grafik animasyonu olarak gösterilmesi sağlanmıştır. Yörünge planlaması aşamasında gerçek bir GSP üzerinde hiçbir zarar vermeden karmaşık yörünge işlemlerinin tasarlanması ve kontrol edilmesi sağlanabilir. Çalışma uzayları ve beceri değerlerine göre farklı yapıdaki GSP mekanizmalarının birbirleriyle karşılaştırılması da mümkündür. Endüstriyel uygulamalar için en uygun robot yapısının belirlenmesinde STEWSIM'in önemli rol oynayacağı düşünülmektedir.

3. BOYUTSAL ENİYİLEME ARACI (STEWOPT)

Yeni robot manipülatörlerinin tasarlanması endüstriyel çözümler için esas adımdır. Bununla birlikte mevcut bir robot manipülatörünün performansının iyileştirilmesi hem daha ucuz hem de daha az zaman aldığı için yeni manipülatörler tasarlama işlemine tercih edilebilir. Bir robot manipülatör performansının iyileştirilmesi, iki temel yol göz önüne alınarak yapılabilir. Bunlardan birincisi, en iyi kinematik ve geometrik parametrelerin belirlenmesi diğeri ise en iyi dinamik parametrelerin belirlenmesidir. Kinematik ve geometrik parametreler; hareketli ve sabit platform üzerindeki bağlantı noktalarının konumları, eklem açılarının limitleri ve bacak uzunluk limitleridir. Dinamik parametreler ise genel olarak eklem tork limitleri ve bacakların kütleleri olarak sıralanabilir. Bu tez çalışmasında kinematik ve geometrik parametrelerin eniyilemesi yapılmış, dinamik parametrelerin eniyilemesi ise tezdin sonra ki bir çalışma olarak bırakılmıştır.

Kinematik ve geometrik parametrelerin eniyilemesi için pek çok indis [78] geliştirilmiştir. Jacobian matrisinin koşul sayısının hesaplanmasına dayalı beceri hesabı en fazla tercih edilen performans indisidir. Koşul sayısı hesaplanmasında genel olarak iki farklı matris norm operatörü kullanılmaktadır. Bunlardan birisi Euclidean (veya Frebenius) norm, diğeri ise Jacobian matrisinin maksimum ve minimum öz (eigen) değerlerinin oranı veya tekil değerlerin en büyüğüdür (2-norm) [78].

GSP mekanizmaları gibi karmaşık serbestlik derecesine (öteleme ve yönelim) sahip uzaysal paralel manipülatörlerin Jacobian matrisleri homojen değildir. Dolayısıyla beceri hesabında Jacobian matrisi doğrudan kullanılmaz. Zanganeh ve Angeles [79] Jacobian matrisinin elemanlarını homojenleştirmek için karakteristik uzunluğu geliştirmiştir. Paralel manipülatörlerin tasarım parametreleri belirlerken pek çok araştırmacı bu karakteristik uzunluktan yararlanmıştır [79, 85]. Hosseini ve Daniali [107], Jacobian matrisinin elemanlarını homojenleştirmek için karakteristik uzunluk

yerine ağırlık faktörünü kullanmıştır. Hosseini ve diğ. [108] de Tricept uzaysal paralel manipülatörün beceri hesabında bu ağırlık faktörünü kullanmıştır. Pek çok araştırmacı paralel manipülatörlerin tasarımlarının eniyilemesi için koşul sayısını kullanırken matris norm operatörlerden birisini tercih etmiştir. Abbasnejad ve diğ. [109], 4PUS+1PS paralel manipülatörün tasarımını, çalışma uzayının tamamını kapsayan global beceri indisi kullanarak Parçacık Sürü algoritması (PSO) ile eniyilemiştir. Ayrıca Kuantum Parçacık Sürü (QPSO) algoritmasını da kullanarak klasik parçacık sürü algoritmasına göre avantajlarını da göstermiştir. Li ve Xu [110], genel tipte 3-PRS uzaysal paralel manipülatörün kinematik eniyilemesini beceri ve çalışma uzayını göz önünde bulundurarak gerçekleştirmişlerdir. Lara-Molina ve diğ. [111] ise Stewart-Gough manipülatörünü Global Beceri, Global Payload ve Global Gradient indislerini bir arada kullanarak “Control Elitist Non-dominated Sorting Genetic” (CENSGA) algoritması ile çoklu-amaç eniyilemesi gerçekleştirmişlerdir. Buraya kadar anlatılan eniyileme çalışmalarında beceri değeri hesaplanırken Jacobian matrisinin norm operatörü olarak Euclidean norm tercih edilmiştir.

Hosseini ve diğ. [108], Tricept paralel manipülatörün becerikli (dexterous) çalışma uzayının eniyilenmesinde genetik algoritmalarından yararlanmışır. Pond ve Carretero [112] uzaysal paralel manipülatörlerden 3-PRS, 3-RPS ve Tricept mekanizmalarının beceri değerlerini nicel olarak karşılaştırmıştır. Lou ve diğ. [113], paralel manipülatörlerin kinematik eniyilemesinde performans indisi olarak beceri değerini kullanan bir “Kontrollü Arama Tekniği” (Controlled Random Search Technique-CRS) önermiştir. Bu tekniğin etkinliğini göstermek için örnek olarak Delta ve Stewart-Gough platform mekanizmalarının eniyilemesini gerçekleştirmişlerdir. Buraya kadar anlatılan çalışmalarda ise beceri değeri hesaplanırken Jacobian matrisinin maksimum ve minimum tekil değerlerinin oranı norm operatörü olarak kullanılmışır.

Bahsi geçen çalışmalar göz önüne alındığında 4PUS+1PS paralel manipülatör [109], Delta ve Gough-Stewart platform mekanizmaları [113] veya 3-PRS, 3-RPS ve Tricept mekanizmaları [112] gibi bir, iki veya üç farklı yapıdaki robot manipülatörü için eniyileme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak bu tez kapsamında geliştirilen boyutsal eniyileme aracı (STEWOPT) bacak sayısı üç ile altı arasında değişebilen 3x3, 4x3, 4x4, ..., 6x5 ve 6x6 gibi olası tüm GSP mekanizmalarının eniyilemesini bir

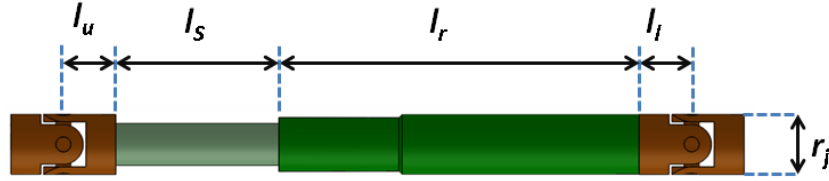
önceki bölümde sunulan bağlantı matrisi algoritması sayesinde tek bir program parçası ile başarıyla gerçekleştirebilmektedir. STEWOPT yazılımında bağlantı matrisi algoritması kullanılarak farklı yapıdaki GSP mekanizmalarının eniyilemesi için ayrı ayrı kod geliştirilmesine gerek kalmamıştır. Ayrıca örneğin Lara-Molina ve diğ. [111], altı bacaklı 6x6 GSP mekanizmasının eniyilemesinde sabit ve hareketli platformun bağlantı noktalarını tanımlarken sadece iki değişken (ardışık bağlantı noktaları arasındaki açı değeri) kullanmışlardır. 6x6 GSP mekanizması dışındaki 3x3, 4x3, 4x4, ..., 6x5 GSP mekanizmaları içinde benzer şekilde bağlantı noktalarının konumlarını ifade etmek için iki değişken yeterli olmayabilir. Bu nedenle STEWOPT her bir bacağın bağlantı noktası için ayrı değişken (açı değeri) kullanarak eniyileme işlemini gerçekleştirmiştir. Örneğin altı bacaklı 6x6 GSP mekanizması için on iki değişken, beş bacaklı 5x3 GSP mekanizması için sekiz değişken kullanarak bağlantı noktalarının konumları tanımlanmış ve bu değişkenler eniyilenmiştir. Bu değişkenlere ek olarak STEWOPT güçlü grafik arabirimi yardımıyla en iyi bacak uzunlukları, sabit ve hareketli platformun yarıçap değerlerini iki farklı norm operatöründen seçilen operatörü kullanarak hesaplayabilmektedir. Kullanıcı eniyileme işleminde Parçacık Sürü (PSO) veya Kuantum Parçacık Sürü Optimizasyon (QPSO) algoritmalarından istediği birisini seçebilmektedir. STEWOPT bir manipülatörün çalışma uzayının farklı bölgelerinin beceri değerlerini karşılaştırma imkânı da sunmaktadır. Bununla birlikte farklı GSP mekanizma yapılarının beceri değerleri karşılaştırılarak, belirli bir iş için en iyi mekanizma yapılandırmasının belirlenmesini sağlar. Yapılan literatür taramasında GSP mekanizmalarının pek çok özelliğini güçlü bir grafik arabirim yardımıyla eniyileme yapan STEWOPT'un benzeri bir uygulamayla karşılaşılmamıştır.

3.1. Eniyileme Kısıtları

STEWOPT, GSP mekanizmalarının eniyilemesinde bacakların uzunlukları, sabit ve hareketli platformun yarıçapları ve bu platformlar üzerindeki bağlantı noktalarının konumları olmak üzere üç temel kısıt göz önünde bulundurmaktadır. İlk kısıt bacakların minimum (l_{\min}) ve maksimum (l_{\max}) uzunluklarının belirlenmesidir. Doğrusal bir eyleyicinin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir. Doğrusal bir eyleyicinin uzunluğu (l), hareketli platforma bağlı universal eklem uzunluğu (l_u), stroke uzunluğu (l_s), içeri çekildiğindeki uzunluğu (l_r) ve sabit platforma bağlı

üniversal eklemin uzunluğunun (l_i) toplamı olarak Denklem (3.1)'deki gibi tanımlanır.

$$l = l_u + l_s + l_r + l_i \quad (3.1)$$

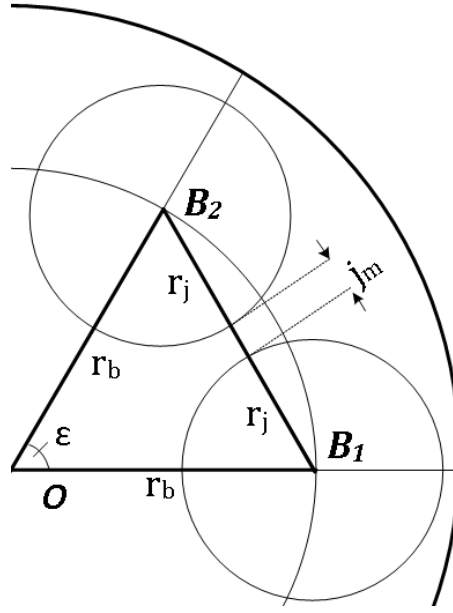


Şekil 3.1. Doğrusal eyleyicinin şematik gösterimi

Her ne kadar literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde birbirinin aynı özelliklerde olan bacaklar kullanıldığı gözlemlense de STEWOPT, bacakların birbirlerinden farklı özelliklerde tanımlanabilmesine imkân tanıyacak şekilde geliştirilmiştir. Şekil 3.1'de gösterilen doğrusal eyleyicinin (küresel eklemin) çapını ifade eden r_j ikinci kısıt hesaplaması içinde kullanılacaktır.

İkinci kısıt olarak sabit ve hareketli platformun yarıçap değerlerinin minimum ve maksimum değerleri göz önünde bulundurulmaktadır. Şekil 3.2'de gösterilen platformun minimum yarıçap limitinin (rb_{min}) belirlenebilmesi için platforma bağlı pasif üniversal eklemin yarıçapı (r_j) ile iki komşu eklemin birbirine en yakın yerleştirilebileceği mesafenin (j_m) kullanılması gerekmektedir. Minimum yarıçap değeri belirlenirken bağlantı noktaları sabit platform üzerinde mümkün olduğu kadar platformun merkezine yaklaştırılarak yapılmalıdır. Dikkat edilirse merkeze en yakın noktalara yerleştirebilmek için bağlantı noktalarının aralarında maksimum açı olacak şekilde yerleştirilmelidir. Üç bacak ile altı baceden oluşan mekanizmalar için sabit platformun minimum yarıçap limitleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Sabit platformun maksimum yarıçap değeri rb_{max} , hareketli platformun maksimum yarıçap değeri ise rm_{max} ile gösterilmektedir. Her ne kadar bu değerler hesaplanabilecek olmasına rağmen bu değerlerin kullanıcı tarafından verilmesi daha makuldür. Çünkü seçilen minimum ve maksimum değerler, eniyilemenin çalışma zamanını ve sonucunu doğrudan etkilemektedir.



Şekil 3.2. Minimum tabla yarıçap hesaplanması

Tablo 3.1. Minimum yarıçap hesaplanırken kullanılan maksimum yerleştirme açıları

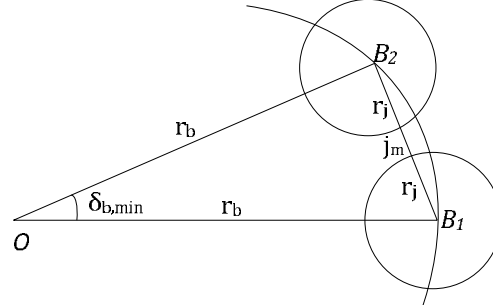
Bağlantı nokta sayısı	3	4	5	6
Maksimum Açı (ϵ)	120°	90°	72°	60°
Minimum Yarıçap Değeri	$\frac{2r_j + j_m}{2\sin(60)}$	$\frac{2r_j + j_m}{2\sin(45)}$	$\frac{2r_j + j_m}{2\sin(\frac{\epsilon}{2})}$	$\frac{2r_j + j_m}{2\sin(30)}$

Üçüncü kısıt olarak sabit ve hareketli platform üzerinde bulunan her bir bağlantı noktasının minimum ($\delta_{bi,min}$ ve $\delta_{mi,min}$) ve maksimum ($\delta_{bi,max}$ ve $\delta_{mi,max}$) açı değerleri kullanılmıştır. Platformu ifade eden daire üzerinde birbirine en yakın yerleştirilebilecek iki bağlantı noktasının açı değeri Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Şekil 3.3’de de görüleceği gibi platformun yarıçap değeri büyüdükçe açı değeri küçülecektir. OB_1B_2 üçgeninde kosinüs teoremi uygulanırsa Denklem (3.2) elde edilir.

$$r_b^2 + r_b^2 - 2r_b r_b \cos \delta_{b,min} = (r_j + j_m + r_j)^2 \quad (3.2)$$

$\delta_{b,min}$ değeri yalnız bırakıldığında Denklem (3.3)’deki ifade elde edilir. Buradaki i değerinin 1 ile mekanizmanın Bacak Sayısı (BS) arasında olacağı belirtilmelidir.

$$\delta_{bi,min} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{(2r_j + j_m)^2}{2r_b^2} \right) \quad (3.3)$$



Şekil 3.3. Minimum ayırma açısının gösterimi

Denklem (3.3)'deki ifade benzer şekilde hareketli platform için de Denklem (3.4)'teki gibi elde edilir.

$$\delta_{mi,min} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{(2r_j + j_m)^2}{2r_m^2} \right) \quad (3.4)$$

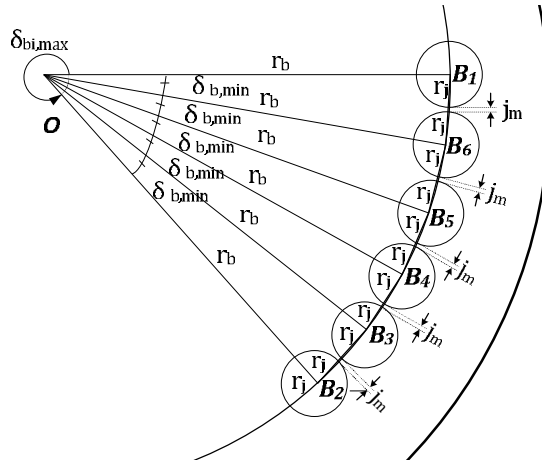
Sabit ve hareketli platform için maksimum yerleşim açısı değerleri olan ($\delta_{bi,max}$) ve ($\delta_{mi,max}$) Şekil 3.4'deki gibi gösterilebilir. Bacakların sayısı BS ile ifade edilirse bir bağlantı noktası için maksimum bağlantı açısı değeri Denklem (3.5)'daki gibi elde edilebilir. Tablo 3.2'de bacak sayılarına göre maksimum açı değerleri verilmiştir. Örneğin B₂ noktası için maksimum açı değerini göz önüne alalım. B₁ noktasının 0° ile yerleştirildiğini B₂ dışında kalan tüm bağlantı noktalarının ise olası en büyük açı değerleri ile yerleştirildiğini düşünelim. Bu durumda B₂ için maksimum açı değeri 360-(5) $\delta_{b,min}$ olacaktır. Dikkat edilirse Şekil 3.4'de 5 tane $\delta_{b,min}$ açı değeri görülmektedir.

$$\delta_{bi,max} = 360 - ((BS + 1) - i)\delta_{b,min} \quad (3.5)$$

Eniyileme algoritması sabit platformdaki bağlantı noktalarının açı değerleri için rastgele seçilen (δ_{bj}) ve hareketli platformdaki bağlantı noktalarının açı değerleri için rastgele (δ_{mj}) değerlerinin minimum ve maksimum açı değerleri arasında kalmasını sağlayarak eniyileme işlemini gerçekleştirmektedir.

3.2. Eniyilemenin Amaçları

STEWOPT, bir GSP mekanizmasının beceri ve çalışma uzayını çoklu-amaç (multi-objective) problem olarak ele alıp aynı anda her ikisini de eniyileyebilmektedir. Jacobian matrisinin koşul sayısı hesaplanırken iki farklı (Euclidean ve 2-norm) norm hesaplama operatörlerinden seçilen bir norm operatörüne göre hesaplama yapılabilmektedir. Paralel manipülatörler 3-boyutlu uzayda hem öteleme hem de yönelme yapabildiğinden Jacobian matrisinin bazı sütunlarının arasında boyut uyumsuzluğu olabilmektedir. Beceri hesabında Jacobian matrisinin kendisi ile çarpımı sırasında boyut uyumsuzluğu olan sütunlar birbiriyle çarpılacağından dolayı doğrudan Jacobian matrisinin kullanılması uygun olmaz. Jacobian matrisinin homojenleştirilmesinde pek çok yöntem önerilmiştir. STEWOPT içinde Denklem (1.19)'da tanımlanan karakteristik uzunluk değeri kullanılarak Jacobian matrisi homojenleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Maksimum yerleştirme açısı

Tablo 3.2. Sabit ve hareketli platformdaki maksimum yerleşim açıları

Bacak Sayısı	3	4	5	6
Maksimum açı (ϵ)	$360 - (4 - i)\delta_{b,m}$	$360 - (5 - i)\delta_{b,min}$	$360 - (6 - i)\delta_{b,min}$	$360 - (7 - i)\delta_{b,min}$

Homojenleştirilmiş Jacobian matrisinin Denklem (1.21)'e göre koşul sayısının hesaplanmasında 2-norm operatörü ile hesaplama yapılmak istenirse Denklem (3.6)'ya göre hesaplanır.

$$\kappa_2 = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (3.6)$$

Buradaki σ_{max} öz değerlerden en büyüğünü, σ_{min} ise öz değerlerden en küçüğünü göstermektedir. Manipulatörün çalışma uzayının becerikli bölgelerini karşılaştırmak için Denklem (3.6)'da tanımlanan koşul sayısının tersin ($YBI = 1/\kappa_2$) kullanımı tercih edilebilir. Çalışma uzayının becerikli bölgeleri, uç işlevcinin konum ve yönelimleri için tekil yapılandırma içermeyen bölgelerdir ve robot manipulatörlerinin eniyilemesinde önemli bir ölçüt olarak kullanılabilir.

Sonuç olarak üç ve altı bacak arasında farklı yapıdaki GSP mekanizmalarının eniyilemesinde çoklu-amaç eniyileme problemi olarak global beceri indisi veya çalışma uzayının becerikli bölgelerinin maksimize edilmesi tercih edilebilir.

Tablo 3.3. Eniyileme amacı

Maksimum	GBİ veya YBI
Bağımlı	
	$l_{min} \leq l \leq l_{max}$
	$r_{b,min} \leq r_b \leq r_{b,max}$
	$r_{m,min} \leq r_m \leq r_{m,max}$
	$\delta_{bi,min} \leq \delta_{bi} \leq \delta_{bi,max} \quad i = 2, 3, \dots, 6$
	$\delta_{mi,min} \leq \delta_{mi} \leq \delta_{mi,max} \quad i = 1, 2, \dots, 6$

3.3. Eniyileme Algoritması

3.3.1. Parçacık sürü eniyileme algoritması (PSO)

1995'te Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy [114] tarafından geliştirilmiş Parçacık Sürü Eniyilemesi (Particle Swarm Optimization) (PSO) sayısal eniyileme problemlerinin çözümü için kullanılan etkili, sürü tabanlı sezgisel bir eniyileme tekniğidir. Kuş

sürülerinin sosyal davranışları incelenirken bu davranışlardan esinlenerek bir eniyileme algoritması olarak kullanılabilceği düşünölmüş ve başarıyla uygulanmıştır. PSO algoritmasının genetik algoritmalara göre avantajları şu şekilde sıralanabilir : (i) PSO kolaylık gerçekleştirilebilir, (ii) hesaplama zamanı kısadır, (iii) ayarlanması gereken parametre sayısı azdır, (iv) uygunluk fonksiyonunu hızla yakınsar ve (v) geniş arama uzayında arama yapmak için uygundur. PSO algoritması pek çok çeşit mühendislik alanlarına başarı ile uygulanmıştır.

PSO algoritmasında, arama uzayındaki olası çözümler parçacıklar olarak tanımlanır. Bu parçacıklar kendi ve diğer parçacıkların tecrübelerine göre belirlenmiş hızlarla çok boyutlu arama uzayında gezinirler. PSO algoritmasında rastgele çözümlerden oluşan bir parçacık sürüsüyle başlanır ve en iyi çözümler için jenerasyonları güncellenerek uygunluk fonksiyonuna göre aramaya devam edilir. Genetik algoritmalarının tersine PSO’da çaprazlama ve mutasyon gibi evrimsel operatörler yoktur. PSO’da parçacık denilen potansiyel çözümler, mevcut en iyi çözümleri takip ederek problem uzayında gezinirler.

D-boyutlu bir arama uzayı göz önüne alınırsa olası çözümleri ifade eden her bir D-boyutlu çözümler parçacık, bu parçacıkların oluşturduğu nüfus ise sürü (swarm) olarak tanımlanır. M tane parçacıktan oluşan bir sürü düşünelim ve s. parçacık vektörü $X_s = (x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sD})$ ile gösterilsin. Her bir parçacık için o ana kadarki en iyi çözümler değeri kişisel en iyi değeri $PBest_s = (PB_{s1}, PB_{s2}, \dots, PB_{sD})$ olarak saklanır. O ana kadar tüm parçacıkların içindeki en iyi çözümler değeri ise global en iyi değeri ($Gbest$) olarak saklanır. Sürüdeki her bir parçacığın hızı ise $V_s = (V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sD})$ ile ifade edilir. Her bir adımda parçacıkların hızları aşağıdaki Denklem (3.7) yardımıyla güncellenir.

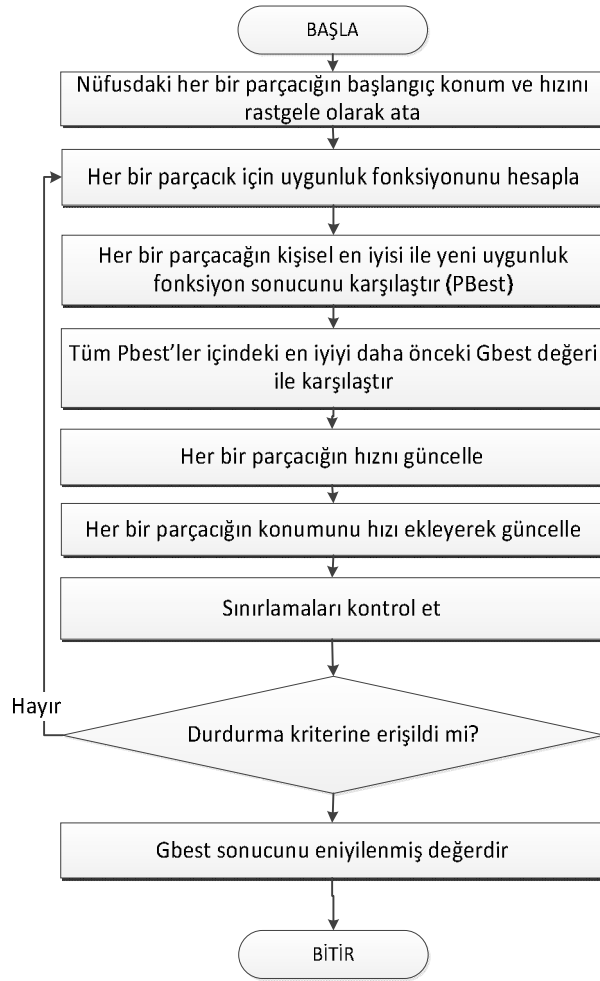
$$V_{s+1} = \omega_s V_{sd} + c_1 r_1 (PB_{sd} - X_{sd}) + c_2 r_2 (Gbest_{sd} - X_{sd}) \quad (3.7)$$

Buradaki ω_s atalet ağırlığını (inertia weight), c_1 kendi en iyi değeri c_2 ise global en iyi değeri ne kadar takip edeceğini ayarlayan öğrenme faktörlerini, r_1 ve r_2 ise 0 ile 1 arasında düzenli dağılmış rastgele sayılardır. Öğrenme faktörleri c_1 ve c_2

sabit olarak 2 civarında seçilir. Her bir parçacığın konumu ise Denklem (3.8) yardımıyla her bir adımda güncellenir.

$$X_{s+1} = X_s + V_{s+1} \quad (3.8)$$

Denklem (3.7)'in ilk kısmı önceki hızın patlamasını, ikinci kısmı yerel aramayı etkileyecek parçacığın kişisel tecrübesinin etkisini, üçüncü parça ise global aramayı etkileyecek global tecrübenin etkisini kontrol etmektedir. PSO algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. PSO algoritmasının akış diyagramı

3.3.2. Kuantum parçacık sürü eniyileme algoritması (QPSO)

Son yıllarda PSO algoritmasının yakınsama hızı ve global yakınsama özelliklerinin geliştirilmesi konusunda çok çalışma yapıldığı görülmektedir. Klasik PSO algoritmasının global en iyi sonucu bulmayı garanti etmediği Van den Bergh [115]

tarafından hazırlanmış doktora tezinde gösterilmiştir. Klasik PSO algoritmasının yörünge analizi ve kuantum mekaniğinden kavramlar göz önüne alınarak global yakınsamayı garantileyecek arama tekniği olan Kuantum Parçacık Sürü Eniyileme (QPSO) algoritması Sun ve diğ. [116, 117] tarafından önerilmiştir. QPSO algoritmasının PSO'dan üstün olduğu [117] gösterilmiştir.

QPSO algoritmasında hız bilgisi yerine dalga fonksiyonları $\psi(x, t)$ kullanılmaktadır. Bu algoritmaya göre parçacıkların konumları Denklem (3.9)'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} X_{(t+1)} &= p_s - \beta \times (mBest - X_t) \times \ln(1/u) \quad \text{if } k \geq .5, \\ X_{(t+1)} &= p_s + \beta \times (mBest - X_t) \times \ln(1/u) \quad \text{if } k < .5 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Buradaki β , u ve k 0 ile 1 arasında düzenli dağılmış rastgele sayılardır. p_s ve $mBest$ değerleri Denklem (3.10)'de gösterildiği gibi hesaplanır. Dikkat edilirse buradaki $mBest$ değeri tüm parçacıkların ortalaması alınarak hesaplanır.

$$\begin{aligned} p_s &= \varphi \times PB_s + (1 - \varphi) \times GBest \\ mBest &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_i \end{aligned} \quad (3.10)$$

QPSO algoritmasının sözde (pseudo) kodu Şekil 3.6'da verilmiştir.

3.3.3. STEWOPT yazılımının tanıtımı

Bölüm 2'de anlatılan STEWSIM yazılımının kinematik özellikleri göz önüne alınarak olası tüm GSP mekanizma çeşitleri üzerinde eniyileme yapacak şekilde STEWOPT yazılımı geliştirilmiştir. Araştırmacılar Şekil 3.7'de verilen akış diyagramından da görülebileceği gibi pek çok özelliklere göre eniyileme işlemini STEWOPT yazılımını kullanabileceklerdir. Yeni bir mekanizma tasarımı yapılabilir veya daha önce kaydedilmiş bir mekanizma ve eniyileme özellikleri yüklenerek eniyileme algoritması farklı parametreler için tekrar çalıştırılabilir. Eniyileme için seçilen özelliklerin sayısı arttıkça yazılımın çalışma zamanı da artacaktır.

STEWOPT yazılımı çalıştırıldığında Şekil 3.8'deki karşılama ekranı gösterilecektir. Bu ekran yardımıyla kullanıcının yeni bir mekanizma tasarlayarak veya daha önce tasarlamış olduğu bir mekanizmayı seçerek eniyileme yapması mümkündür.

```

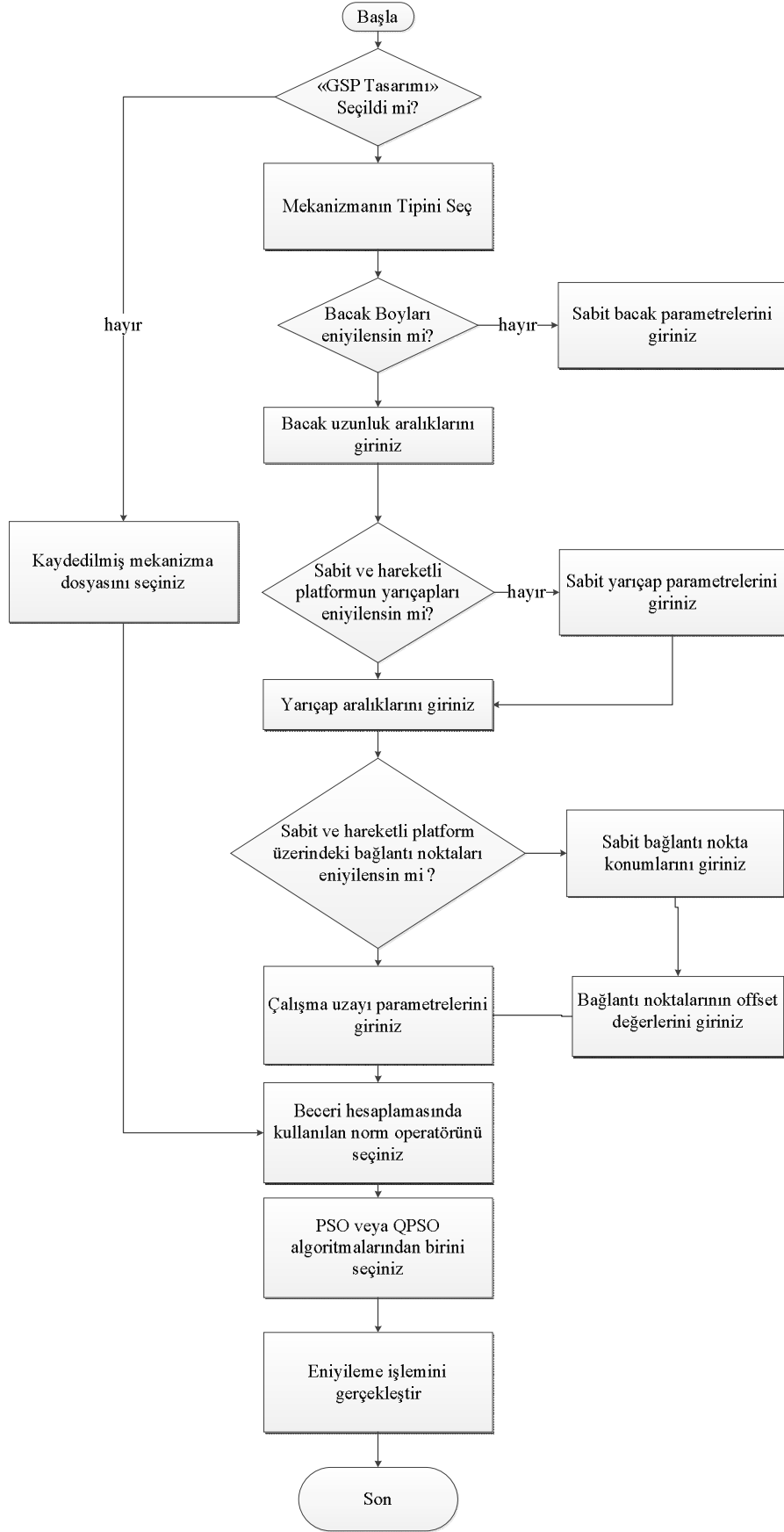
Nüfustaki her bir parçacığın başlangıç konum ve hızını rastgele olarak ata

For t=1 to Maksimum iterasyon T
mBest ortalama değerini hesapla
 $\beta = (1.0 - 0.5) \cdot (T - t) / T + 0.5;$ 
For s=1 to nüfusun büyüklüğü M
If  $f(x_s) < f(PB_s)$  then  $PB_s = x_s$ ; Endif
GBest =  $\min(PB_s)$ ;
For j=1 to boyut D
 $\varphi = rand(0,1); u = rand(0,1);$ 
 $p_{sj} = \varphi \cdot PB_{sj} + (1 - \varphi) \cdot Gbest ;$ 
If ( $rand(0,1) > 0.5$ )
 $X_{sj} = p_{sj} - \beta \times abs(mBest_j - X_{sj}) \times \ln\left(\frac{1}{u}\right);$ 
Else
 $X_{sj} = p_{sj} - \beta \times abs(mBest_j - X_{sj}) \times \ln\left(\frac{1}{u}\right);$ 
Endif
Endfor //end for loop j
Endfor //end for loop i
Endfor //end for loop t

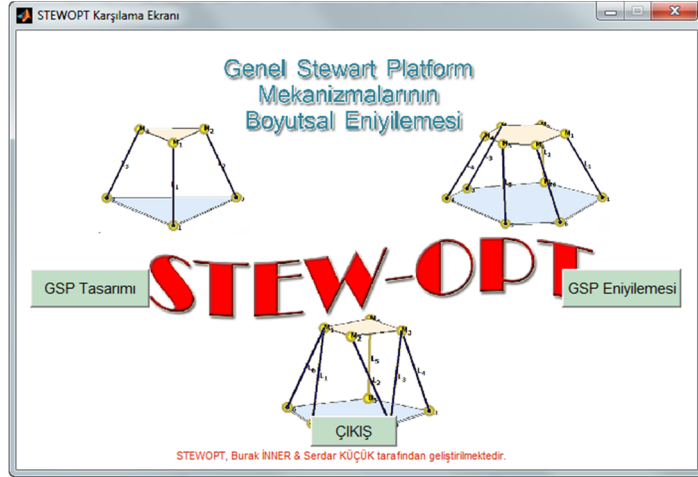
```

Şekil 3.6. QPSO algoritmasının sözde (pseudo) kodu

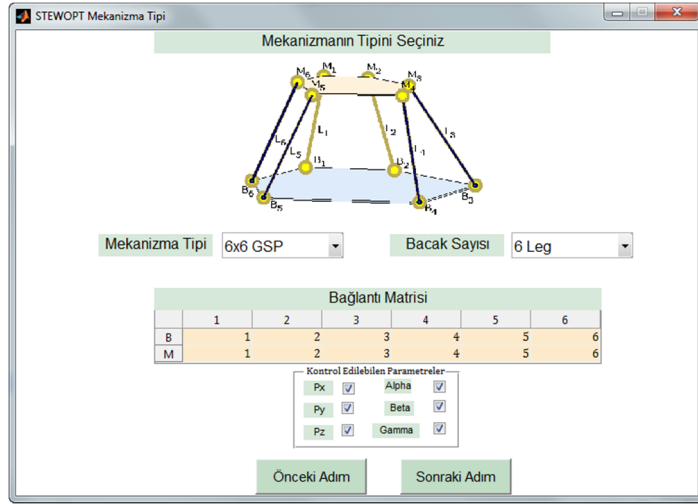
Eğer “GSP Tasarımı” düğmesi tıklanırsa, Şekil 3.9’de gösterilen pencere ekranda görünecektir. Kullanıcı bu ekranda mekanizma tiplerinden (3x3, 3x4, 3x5,...,6x5 ve 6x6) birisini, bacak sayısını ve bağlantı matrisi yardımıyla bacakların hangi noktalara birleştirileceğini belirleyebilir. Eğer bacak sayısı altıdan küçük seçilirse, Jacobian matrisinin sütun sayısı ile satır sayısı eşit olmayacağından dolayı Jacobian matrisinin tersi hesaplanamaz. Bu nedenle kontrol edilemeyen parametreler seçilerek bacak sayısı ile Jacobian matrisinin sütunları eşitlenir. İlgili ayarlamalar tamamlandığında “Sonraki Adım” düğmesine basılarak bir sonraki adıma geçilebilir.



Şekil 3.7. STEWOPT yazılımının akış diyagramı



Şekil 3.8. STEWOPT yazılımının karşılama ekranı

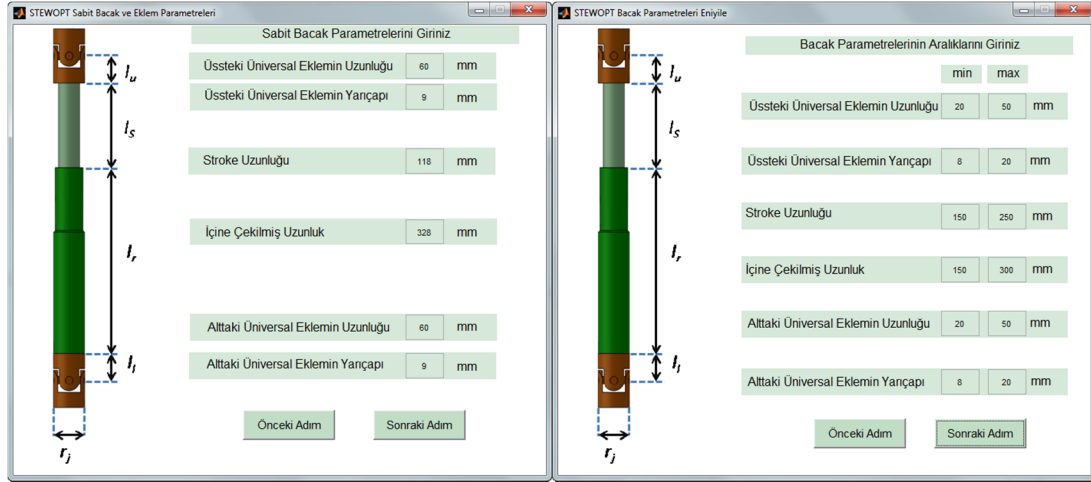


Şekil 3.9. Mekanizmanın tipi ile ilgili ayarlamalar

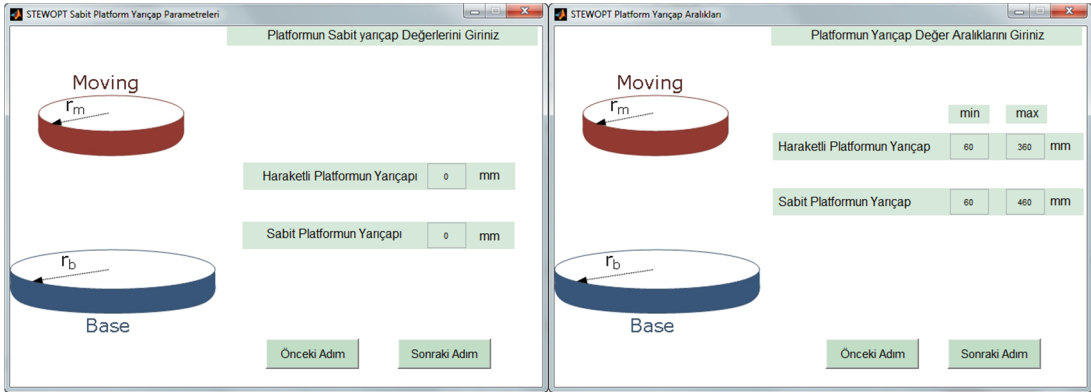
Şekil 3.10’da gösterilen pencere üzerinden bacak özellikleri belirlenebilmektedir. Bacak uzunluğu belirlenirken Denklem (3.1)’den yararlanılır. Bacak uzunluklarının da eniyilemesi isteniyorsa “Bacak Uzunluklarını Eniyile” kutucuğunun işaretlenerek bacak uzunluklarının eniyilemesi yapılabilir. Fakat bu durumda bacak uzunluklarının eniyilemesi yapılacak aralık (minimum ve maksimum bacak uzunluk limitleri) belirtilmelidir. “Sonraki Adım” düğmesine basılarak bir sonraki adım olan yarıçap parametrelerinin seçimine geçilebilir.

Sabit ve hareketli platformun yarıçap değerleri sabit olarak seçilebilir. Bu durumda her iki değerinin Şekil 3.11’deki gibi ilgili yerlere girilmesi gerekir. Sabit ve hareketli platformun yarıçap değerlerinin de eniyilemesi istenebilir. Bu durumda Şekil 3.11’deki gibi eniyileme yapılacak aralığın (minimum ve maksimum yarıçap

limitleri) belirtilmesi gerekir. “Sonraki Adım” düğmesine basılarak bir sonraki adım olan bağlantı noktaları ile ilgili parametrelerinin seçimine geçilebilir.



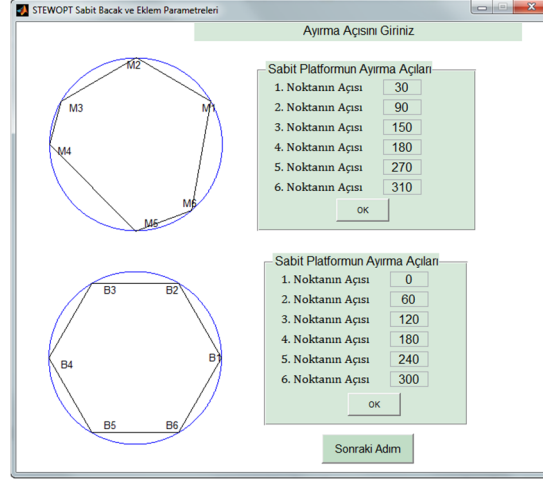
Şekil 3.10. Bacak özelliklerinin belirlenmesi



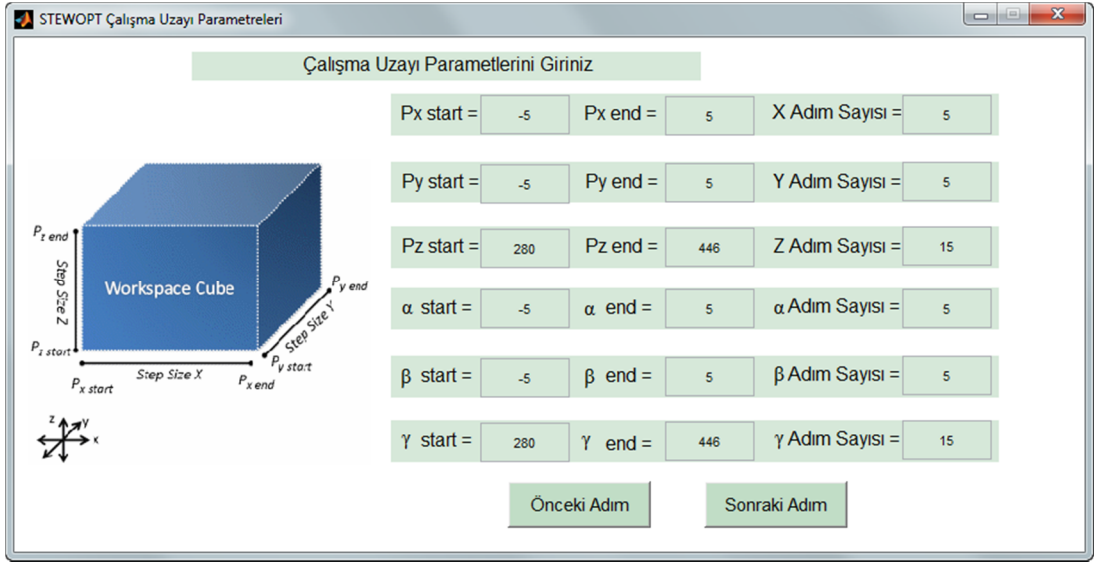
Şekil 3.11. Sabit ve hareketli platform yarıçap parametrelerinin belirlenmesi

Bacakların sabit ve hareketli platform üzerindeki bağlantı noktaları sabit olarak seçilebilir. Bu durumda Şekil 3.12’de gösterildiği gibi sabit ve hareketli platformdaki seçilen bacak sayısı kadar bağlantı noktası için açı değerlerinin verilmesi gerekmektedir. Bacakların konumlarının eniyelenmesi de istenebilir. Bu durumda minimum ve maksimum açı değerleri Denklem (3.3)-(3.5) yardımıyla hesaplanabilir.

Küp şeklinde bir çalışma uzayı için gerekli olan x, y ve z eksenindeki başlangıç (P_start) ve bitiş (P_end) değerleri ile adım büyüklükleri (Adım Sayısı) Şekil 3.13’deki gibi belirlenir. Yönelim uzayı içinde α , β ve γ açıları için başlangıç ve bitiş değerleri ile adım büyüklükleri (Step Size) belirlenir. “Sonraki Adım” düğmesine basılarak bir sonraki adıma geçilir.



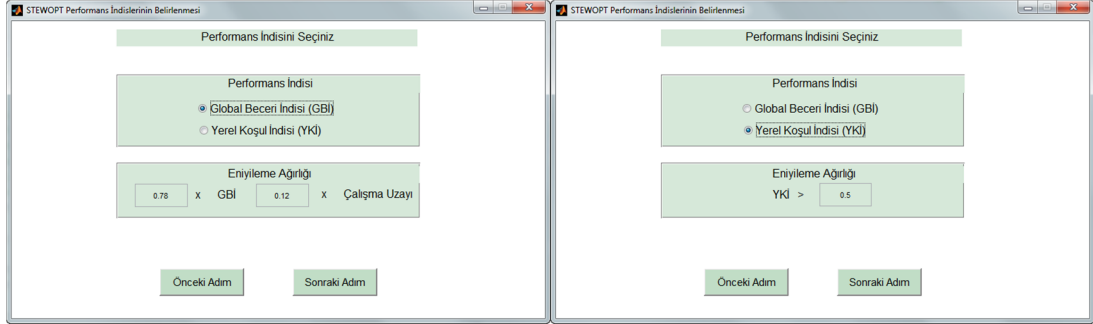
Şekil 3.12. Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktalarının açıları



Şekil 3.13. Çalışma uzayı parametrelerinin seçilmesi

Performans indisi olarak global beceri indisi veya yerel koşul indisinden birinin tercih edilmesi gerekmektedir. Global beceri değeri yeni bir mekanizma tasarımında kullanılabilir. Bu indis seçildiğinde Şekil 3.14’de gösterildiği gibi GBİ değeri ile çalışma uzayının ağırlık değerlerinin de seçilmesi gerekmektedir. Bacak uzunlukları sabit seçilerek eniyileme yapılmak istendiğinde çalışma uzayı büyüdükçe beceri değerinin küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle beceri ile çalışma uzayın arasındaki ağırlıkları %50 olarak belirlemek yerine %78 beceri ve %12 çalışma uzayı hesaplanarak uygunluk fonksiyonu çalıştırılmıştır. Kullanıcı bu değerleri değiştirerek farklı amaçlar için kullanılacak mekanizmaları eniyileyebilir. Örneğin çalışma uzayının küçük ama beceri değerinin büyük olması istenen durumda bu ağırlıklar

uygun şekilde seçilebilir. Performans indisi olarak YKİ değeri seçilirse bu mevcut bir mekanizmanın becerikli çalışma uzayının eniyilemesinde kullanılabilir. Bu durumda YKİ değerinin 0 ile 1 arasında seçilen bir değerden büyük olduğu değerlere sahip mekanizmalar göz önüne alınacaktır.



Şekil 3.14. Performans indislerinin seçimi ve ağırlıkları

Eniyileme algoritması olarak parçacık sürü veya kuantum parçacık sürü algoritmalarından birisi Şekil 3.15’de gösterilen gibi seçilebilir. Sürünün boyutu (swarm size) ve iterasyon sayısı her iki eniyileme algoritmasında da kullanılmaktadır. Klasik parçacık sürü algoritmasındaki w , $c1$ ve $c2$ parametrelerinin değiştirilmesi mümkündür. “Sonraki Adım” düğmesine basıldığında ise doğrulama ekranına geçilebilir.

Bu adıma kadar seçilen tüm değerlerin gösterildiği doğrulama ekranda Şekil 3.16’daki gibi gösterilecektir. Bu ekran sadece doğrulama için değil aynı zamanda parametreler üzerinde değişiklik yapmak için de kullanılabilir. Eniyileme işlemi tamamlandığında elde edilen mekanizmanın verileri Bölüm 2.1’de anlatılan STEWSIM’deki tasarım ekranında kullanılabilir formatta kaydedilmektedir. Böylece eniyileme sonucu STEWSIM yazılımında da analiz ve benzetim yapılabilir.

Bu uygulama kapsamında robot tasarımcıları ve araştırmaları bacak sayısı üç ile altı arasında değişebilen $3 \times 3, 4 \times 3, \dots, 6 \times 5$ ve 6×6 gibi olası tüm GSP mekanizmalar kolaylıkla kinematik olarak eniyileyebilmektedir. Bu eniyileme işleminde sihirbaz şeklinde bir grafiksel arabirim tasarlanmıştır. Uygulama endüstride kullanılan malzemeler göz önüne alınarak belirlenmiş parametrelere göre beş farklı bacak uzunluğu için on farklı GSP mekanizma eniyilenmiş ve elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde verilmiştir.

STEWOPT Eniyileme Algoritmasının Parametreleri

Eniyileme Parametrelerini Giriniz

Sürü (Swarm) Boyutu = 40

İterasyon Sayısı = 60

Parçacık Sürü Eniyileme Yöntemi

Klasik PSO

Kuantum PSO

w 0.97897

c1 2.01

c2 2.01

Sonraki Adım

Şekil 3.15. Eniyileme (PSO) parametrelerinin ayarlanması

STEWOPT Doğrulama Ekranı

Mekanizma Tipi

Mekanizma Tipi 6x6 GSP

Bacak Sayısı 6 Leg

Bağlantı Matrisi

Sabit 1 2 3 4 5 6

Hareke 1 2 3 4 5 6

Kontrol Edilebilen Parametreler

Px Alpha

Py Beta

Pz Gamma

Bacak Parametreleri

Bacakları Eniyile Evet Hayır min max

Üstteki Üniversal Eklemin Uzunluğu 20 50

Üstteki Üniversal Eklemin Yanıçapı 8 20

Stroke Uzunluğu 150 250

İçine Çekilmiş Uzunluk 150 300

Aittaki Üniversal Eklemin Uzunluğu 20 50

Aittaki Üniversal Eklemin Yanıçapı 8 20

Platform Parametreleri

Yanıçapları Eniyile Evet Hayır min max

Sabit Platform Yanıçap 60 460

Hareketli Platform Yanıçap 60 360

Bağlantı Noktaları Parametreleri

Bağlantıları Eniyile Evet Hayır

Sabit Platformdaki 1. Ayırma Açısı (B1) 0

Sabit Platformdaki 2. Ayırma Açısı (B2) 60

Sabit Platformdaki 3. Ayırma Açısı (B3) 120

Sabit Platformdaki 4. Ayırma Açısı (B4) 180

Sabit Platformdaki 5. Ayırma Açısı (B5) 240

Sabit Platformdaki 6. Ayırma Açısı (B6) 300

Hareketli Platformdaki 1. Ayırma Açısı 30

Hareketli Platformdaki 2. Ayırma Açısı 90

Hareketli Platformdaki 3. Ayırma Açısı 150

Hareketli Platformdaki 4. Ayırma Açısı 180

Hareketli Platformdaki 5. Ayırma Açısı 270

Hareketli Platformdaki 6. Ayırma Açısı 310

Çalışma Uzayı Parametreleri

	Start	End	Adım
Px	-5	5	5
Py	-5	5	5
Pz	280	446	15
α	-5	5	5
β	-5	5	5
γ	280	446	15

Performans İndisi

Global Beceri İndisi (GBI)

0.78 x GBI

0.12 x Çalışma

Yerel Koşul İndisi (YKI)

0.5

PSO Parametreleri

Algoritma PSO QPSO

Sürü (Swarm) Boyu 40

İterasyon Sayısı 60

w 0.97897

c1 2.01

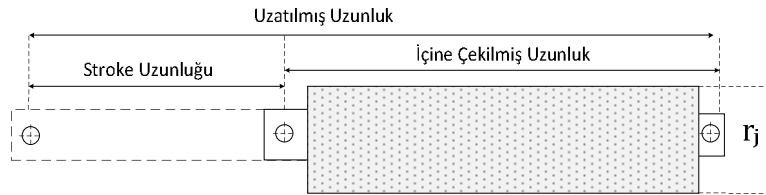
c2 2.01

Eniyilemeye Başla

Şekil 3.16. STEWOPT tüm parametrelerin doğrulanma ekranı

4. KİNEMATİK ENİYİLEME SONUÇLARI

Bu tez çalışması kapsamında STEWOPT yazılımı kullanılarak beş farklı stroke uzunluklarında bacaklardan oluşan on GSP mekanizmasının eniyilemesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de bir doğrusal eyleyicinin şematik diyagramı verilmiştir. Bu şekilde uzatılmış (extended) uzunluğunun stroke ve içine çekilmiş (retracted) uzunluklarının toplamından oluştuğu görülür. Tablo 4.1’de endüstride yaygın olarak kullanılan doğrusal eyleyiciler bazılarının eklem yarıçapları (r_j), stroke uzunluğu, içine çekilmiş ve uzatılmış uzunluk (mm cinsinden) değerleriyle birlikte sunulmuştur. Tablo 4.1’e göre stroke uzunlukları genel olarak 50mm ile 250mm arasında değişmektedir. Bu çalışmada endüstride yaygın olarak kullanıldığı düşünülen 50mm, 100mm, 150mm, 200mm ve 250 mm değerleri stroke uzunlukları olarak alınmıştır. Eklem yarıçapları ise 13.5mm ve 30mm arasında değişmektedir. 5 farklı stroke değeri için eklem yarıçaplarının (r_j) 18mm olduğu kabul edilmiştir. Son olarak PI M-840.PD3 mekanizmasından hareketle iki komşu eklem birbine en yakın yerleştirilebileceği mesafe (j_m) olarak 6mm kabul edilmiştir.



Şekil 4.1. Doğrusal eyleyicinin şematik gösterimi

5 farklı stroke değeri kullanılan 10 farklı GSP mekanizması için uç işlevcinin referans yönelim açısıyla ($R_{XYZ} = (\alpha, \gamma)$) rahatlıkla erişebileceği üç boyutlu Kartezyen bir çalışma uzayının belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 4.2’de endüstriyel uygulamalar için tasarlanmış mekanizmalarının yönelim açlarına göre hareket bölgeleri verilmiştir. Hareket bölgelerinin çok küçük açı değerleri arasında olduğu gözlemlenmiş ve hesaplama kolaylığı açısından yönelim açıları $\alpha = \gamma = 0^\circ$ seçilmiştir.

Tablo 4.1. Endüstride yaygın olarak kullanılan doğrusal eyleyicilerin özellikleri

Doğrusal Eyleyici	Model	Stroke (mm)	İçine çekilmiş uzunluk (mm)	Uzatılmış uzunluk (mm)	r_j (mm)
Oriental Motor	DRL60PA4-05G	50	133	183	30
	DRL60PB4-10G	100	186,5	286,5	30
PI	M-235.5DG	50	218	268	13.5
Linear-Mech	LMI 02-C100	100	345	445	22.5
	LMI 02-C150	150	395	545	22.5
	LMI 02-C200	200	445	645	22.5
	LMI 02-C250	250	495	745	22.5
	LMP 03-C100	100	252	352	25
	LMP 03-C150	150	302	452	25
	LMP 03-C200	200	352	552	25
	LMP 03-C250	250	402	652	25

Tablo 3.2'den yararlanılarak sabit ve hareketli platformun minimum yarıçap değerleri 42 olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.3'de sabit ve hareketli platformun minimum ve maksimum yarıçap değerleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Endüstride kullanılan GSP mekanizmalarının yönelim açıları

Manipülötör	Hareket Bölgesi			Manipülötör	Hareket Bölgesi		
	θ_x	θ_y	θ_z		θ_x	θ_y	θ_z
Newport HXP50	$\pm 9^\circ$	$\pm 8.5^\circ$	$\pm 18^\circ$	PI M-850KHLH	$\pm 3^\circ$	$\pm 3^\circ$	$\pm 4^\circ$
PI H-824	± 7.5	± 7.5	± 12.5	PI M-850KHLAH	$\pm 5^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 5^\circ$
PI M-811	$\pm 10^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 21^\circ$	SYMETRIE Bora	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$
PI M-824.3DG	$\pm 7.5^\circ$	$\pm 7.5^\circ$	$\pm 12.5^\circ$	SYMETRIE Breva	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$
PI M-824.3PD	$\pm 7.5^\circ$	$\pm 7.5^\circ$	$\pm 12.5^\circ$	SYMETRIE Sonora	$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$

Tablo 4.3. Sabit & hareketli platformun minimum ve maksimum yarıçap değerleri

	Stroke 50 (mm)		Stroke 100 (mm)		Stroke 150 (mm)		Stroke 200 (mm)		Stroke 250 (mm)	
	r_b	r_m	r_b	r_m	r_b	r_m	r_b	r_m	r_b	r_m
Min.	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Mak.	210	210	420	420	630	630	840	840	1050	1050

Çok-amaçlı eniyileme probleminde sürüdeki bireylerin amaç fonksiyonları olarak Denklem (1.24)'deki beceri değeri ve çalışma uzayının hacminin aynı anda maksimize edilmesi seçilmiştir. PSO algoritmasının parametreleri olarak $\chi = 0.7298$, $c_1 = c_2 = 2.05$ seçilmiştir. Nüfus büyüklüğü olarak 60 seçilmiştir.

Sürüdeki her bir parçacık sabit & hareketli platformun yarıçapları ile bağlantı noktalarını ifade eden açı değerlerini ifade eden 13 elemandan oluşmaktadır. Amaç fonksiyonu 60 jenerasyon boyunca çalıştırılmıştır. Eniyileme sonuçları Tablo 4.4-4.13'de verilmiştir. Bu tablolarda platformların yarıçap değerleri, bağlantı noktalarını ifade eden açı değerleri, çalışma uzayının hacmi (ÇUH), GBİ değerleri ile sabit ve hareketli platformun şekli verilmiştir. Kolay karşılaştırma yapılabilmesi açısından platform şekilleri aynı eksenlerde, sabit platform için kırmızı, hareketli platform için mavi renk kullanılarak çizdirilmiştir. Bağlantı noktalarının açı değerleri, içine çekilmiş ve uzatılmış uzunluklarda dahil olmak üzere manipülatörlerle ilgili bilgilerin tümü kompakt bir formda tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 4.4-4.13'de görüldüğü gibi beş farklı stroke uzunluklarının kullanıldığı on farklı GSP mekanizmasının her birisinde sabit platformun yarıçap değeri hareketli platformun yarıçap değerinden büyük çıkmıştır. Bağlantı noktalarının birleştirilmesi ise kabaca üçgenler oluştuğu gözlemlenmiştir. Dört bağlantı noktasından oluşan GSP mekanizmaları göz önüne alınırsa iki bağlantı noktası birbirlerinden ayrı olacak, diğer iki bağlantı noktaları ise birbirine çok yakın olacak şekilde eniyileme gerçekleşmiştir. Birbirine çok yakın olacak şekilde eniyilenen bu iki bağlantı noktasını tek bir nokta olarak kabul edersek kabaca bir üçgen oluştuğu söylenebilir. Benzer şekilde beş bağlantı noktasından oluşan GSP mekanizmaları incelendiğinde bir bağlantı noktasının ayrı, kalan dört tanesinin ise ikişerli olarak birbirine çok yakın olacak şekilde eniyilenmiş olduğu gözlemlenmiştir.

GSP mekanizmasında çoğunluğunda hareketli platform üzerindeki bağlantı noktalarının sabit platform üzerindeki bağlantı nokta çiftlerinin birleşimi ile oluşacak bir doğrunun ortalarına denk gelecek şekilde eniyilendiği gözlemlenebilir. Tablo 4.4-4.13'de görüldüğü gibi stroke uzunlukları arttığında çalışma uzayının hacmi de büyümektedir. Bununla birlikte stroke uzunlukları arttığında GSP mekanizmalarının GDI değerlerinin artmadığı görülebilir. Şekil 4.2'de her bir stroke değerine karşılık GSP mekanizmaların GBİ değerleri gösterilmiştir. Genel olarak stroke değeri 100 mm olan GSP mekanizmalarının en iyi GBİ değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Stroke değeri 150 mm olan GSP mekanizmalarının da stroke değeri 100 mm olan mekanizmalara çok yakın GBİ değerlerine sahip olduğu görülebilir.

Tablo 4.4. 3x3 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap (mm)	r_b	130,79	203,35	42,05	404,84	515,41
	r_m	45,12	42,31	52,91	54,56	58,66
Hareketli Platformun Yerleşim Açılırları (derece)	δ_{m1}	0,00	0,00	172,60	92,54	93,93
	δ_{m2}	121,13	118,83	293,20	211,15	212,92
	δ_{m3}	239,13	238,69	105,57	314,73	318,05
Sabit Platformun Yerleşim Açılırları (derece)	δ_{b1}	36,16	38,85	105,57	0,00	0,00
	δ_{b2}	159,30	158,09	224,28	113,46	113,97
	δ_{b3}	275,31	279,69	345,77	230,19	231,21
İçine çekilmiş uzunluk (mm)		150	250	280	592	740
Uzatılmış uzunluk (mm)		200	350	430	792	990
GBİ		0,918	0,829	0,821	0,784	0,785
ÇUH (cm ³)		116,28	328,23	1133	1344,4	1550
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Sabit	B_1	B_1	B_2	B_2	B_3	B_3
Hareketli	M_3	M_1	M_1	M_2	M_3	M_1

3x3 GSP: stroke uzunluğu 50

3x3 GSP: stroke uzunluğu 100

3x3 GSP: stroke uzunluğu 150

3x3 GSP: stroke uzunluğu 200

3x3 GSP: stroke uzunluğu 250

Tablo 4.5. 4x3 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap (mm)	r_b	154,75	200,28	231,15	411,20	520,90
	r_m	42,81	42,11	42,02	42,54	42,15
Hareketli Platformun Yerleşim Açılımları (derece)	δ_{m1}	113,76	72,44	67,90	67,28	64,34
	δ_{m2}	207,78	185,25	185,13	187,36	184,83
	δ_{m3}	301,16	300,18	300,03	300,84	300,22
Sabit Platformun Yerleşim Açılımları (derece)	δ_{b1}	0,00	0	0	0	0
	δ_{b2}	112,55	110,98	108,54	114,77	114,45
	δ_{b3}	208,72	235,65	233,95	236,84	236,28
	δ_{b4}	344,40	347,96	349,57	354,14	355,38
İçine çekilmiş uzunluk (mm)		150	250	280	592	740
Uzatılmış uzunluk (mm)		200	350	430	792	990
GBİ		0,745	0,829	0,821	0,784	0,785
ÇUH (cm ³)		55,66	328,23	1133	1344,36	1550
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Sabit	B_1	B_2	B_2	B_3	B_3	B_4
Hareketli	M_1	M_1	M_2	M_2	M_3	M_3

4x3 GSP: stroke uzunluğu 50

4x3 GSP: stroke uzunluğu 100

4x3 GSP: stroke uzunluğu 150

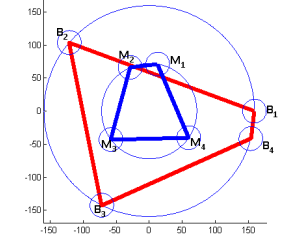
4x3 GSP: stroke uzunluğu 200

4x3 GSP: stroke uzunluğu 250

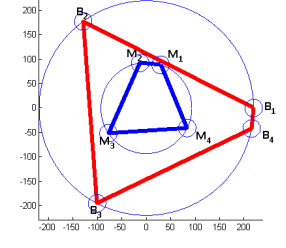
Tablo 4.6. 4x4 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap (mm)	r_b	159,43	219,45	253,13	415,84	525,50
	r_m	72,13	93,05	79,33	96,38	110,50
Hareketli Platformun Yerleşim Açılırları (derece)	δ_{m1}	79,84	71,72	72,24	71,42	76,76
	δ_{m2}	113,71	97,81	102,94	96,59	98,67
	δ_{m3}	216,46	213,51	212,62	212,79	219,50
	δ_{m4}	326,14	333,91	328,37	325,38	329,42
Sabit Platformun Yerleşim Açılırları (derece)	δ_{b1}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	δ_{b2}	139,42	126,12	130,16	129,09	130,66
	δ_{b3}	243,22	242,64	240,32	241,37	243,62
	δ_{b4}	344,86	349,02	350,48	354,19	355,42
İçine çekilmiş uzunluk (mm)		150	250	280	592	740
Uzatılmış uzunluk (mm)		200	350	430	792	990
GBİ		0,767	0,830	0,815	0,758	0,761
ÇUH (cm ³)		48,26	131,88	747	1129,68	1281
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Sabit	B_1	B_2	B_2	B_3	B_3	B_4
Hareketli	M_1	M_2	M_3	M_3	M_4	M_4

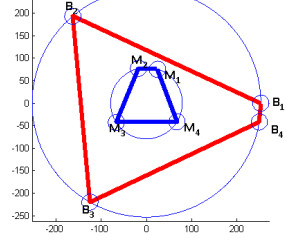
4x4 GSP: stroke uzunluğu 50



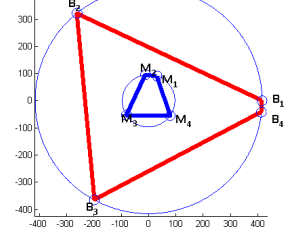
4x4 GSP: stroke uzunluğu 100



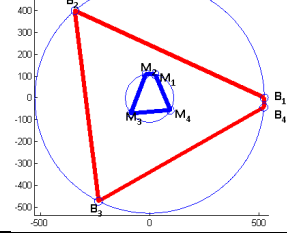
4x4 GSP: stroke uzunluğu 150



4x4 GSP: stroke uzunluğu 200



4x4 GSP: stroke uzunluğu 250



Tablo 4.7. 5x3 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap (mm)	r_b	157,13	204,43	234,16	406,02	528,65
	r_m	45,85	42,13	42,08	42,00	42,08
Hareketli Platformun Yerleşim Açılımları (derece)	δ_{m1}	123,13	70,68	70,18	64,01	64,48
	δ_{m2}	216,98	190,25	189,85	185,09	186,00
	δ_{m3}	305,48	300,19	300,12	299,97	300,12
Sabit Platformun Yerleşim Açılımları (derece)	δ_{b1}	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00
	δ_{b2}	114,22	104,85	107,22	114,38	117,46
	δ_{b3}	129,58	116,64	117,51	120,31	122,01
	δ_{b4}	217,21	234,90	230,17	237,56	240,87
	δ_{b5}	343,54	348,20	349,71	354,07	355,36
İçine çekilmiş uzunluk (mm)		150	250	280	592	740
Uzatılmış uzunluk (mm)		200	350	430	792	990
GBİ		0,705	0,820	0,811	0,772	0,785
ÇUH (cm ³)		58,20	290,20	1094,99	1399,52	1466,90
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Sabit	B_1	B_2	B_3	B_4	B_4	B_5
Hareketli	M_1	M_1	M_2	M_2	M_3	M_3

5x3 GSP: stroke uzunluğu 50

5x3 GSP: stroke uzunluğu 100

5x3 GSP: stroke uzunluğu 150

5x3 GSP: stroke uzunluğu 200

5x3 GSP: stroke uzunluğu 250

Tablo 4.8. 5x4 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap (mm)	r_b	151,62	228,78	265,56	455,12	593,70
	r_m	127,58	181,81	207,62	352,70	461,61
Hareketli Platformun Yerleşim Açılırları (derece)	δ_{m1}	68,84	57,13	60,56	64,11	60,44
	δ_{m2}	159,76	158,88	164,64	169,58	166,86
	δ_{m3}	264,56	273,90	283,44	291,95	287,75
	δ_{m4}	341,05	346,42	348,34	353,17	354,68
Sabit Platformun Yerleşim Açılırları (derece)	δ_{b1}	0,05	0,00	0,45	2,75	0,00
	δ_{b2}	106,16	103,51	110,11	111,51	112,42
	δ_{b3}	208,79	207,38	215,82	220,56	222,53
	δ_{b4}	224,72	217,91	224,89	229,75	226,58
	δ_{b5}	330,09	332,54	343,07	354,70	348,18
İçine çekilmiş uzunluk (mm)	150	250	280	592	740	
Uzatılmış uzunluk (mm)	200	350	430	792	990	
GBİ	0,863	0,823	0,819	0,775	0,785	
ÇUH (cm ³)	59,49	669,90	1426,23	1504,44	1606,46	
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
Sabit	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₄	B ₅
Hareketli	M ₁	M ₂	M ₂	M ₃	M ₄	M ₄

5x4 GSP: stroke uzunluğu 50

5x4 GSP: stroke uzunluğu 100

5x4 GSP: stroke uzunluğu 150

5x4 GSP: stroke uzunluğu 200

5x4 GSP: stroke uzunluğu 250

Tablo 4.9. 5x5 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap (mm)	r_b	167,84	325,82	266,60	424,62	513,02
	r_m	68,65	224,64	99,44	125,12	148,42
Hareketli Platformun Yerleşim Açıları (derece)	δ_{m1}	92,37	37,05	88,04	91,86	93,74
	δ_{m2}	128,00	171,03	112,43	111,18	110,01
	δ_{m3}	206,42	205,72	219,18	228,42	230,18
	δ_{m4}	242,04	285,07	243,56	247,74	246,45
	δ_{m5}	324,38	349,27	335,62	340,57	343,73
Sabit Platformun Yerleşim Açıları (derece)	δ_{b1}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	δ_{b2}	132,62	59,76	121,49	123,71	123,51
	δ_{b3}	147,01	67,15	130,53	129,38	128,20
	δ_{b4}	228,03	213,69	221,26	227,52	228,43
	δ_{b5}	338,67	245,44	323,06	337,07	341,06
İçine çekilmiş uzunluk (mm)	150	250	280	592	740	
Uzatılmış uzunluk (mm)	200	350	430	792	990	
GBİ	0,648	0,674	0,678	0,645	0,645	
ÇUH (cm ³)	30,69	644,96	653,15	1129,4 7	1438,4 3	
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
Sabit	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₅
Hareketli	M ₁	M ₂	M ₃	M ₃	M ₄	M ₅

5x5 GSP: stroke uzunluğu 50

5x5 GSP: stroke uzunluğu 100

5x5 GSP: stroke uzunluğu 150

5x5 GSP: stroke uzunluğu 200

5x5 GSP: stroke uzunluğu 250

Tablo 4.10. 6x3 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap (mm)	r_b	129,45	210,49	234,74	414,76	524,13
	r_m	42,18	44,12	42,31	42,17	42,02
Hareketli Platformun Yerleşim Açılımları (derece)	δ_{m1}	100,90	80,31	72,75	68,69	64,91
	δ_{m2}	167,76	194,47	189,30	187,28	185,40
	δ_{m3}	298,10	303,15	300,47	300,26	300,02
Sabit Platformun Yerleşim Açılımları (derece)	δ_{b1}	8,39	0,00	3,34	0,00	0,01
	δ_{b2}	110,98	108,50	115,52	115,16	116,84
	δ_{b3}	129,65	119,95	125,79	120,97	121,43
	δ_{b4}	228,59	229,40	232,40	238,17	238,17
	δ_{b5}	247,26	240,85	242,66	243,98	242,81
	δ_{b6}	340,51	348,53	349,67	354,04	355,40
İçine çekilmiş uzunluk (mm)		150	250	280	592	740
Uzatılmış uzunluk (mm)		200	350	430	792	990
GBİ		0,642	0,811	0,791	0,771	0,776
ÇUH (cm ³)		56,88	250,09	1099,23	1309,14	1514,48
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Sabit	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
Hareketli	M_1	M_1	M_2	M_2	M_3	M_3

6x3 GSP: stroke uzunluğu 50

6x3 GSP: stroke uzunluğu 100

6x3 GSP: stroke uzunluğu 150

6x3 GSP: stroke uzunluğu 200

6x3 GSP: stroke uzunluğu 250

Tablo 4.11. 6x4 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap p (mm)	r_b	168,19	263,47	304,97	494,46	741,16
	r_m	144,04	239,37	268,54	399,81	687,17
Hareketli Platformun Yerleşim Açılımları (derece)	δ_{m1}	63,16	65,25	50,65	56,58	47,02
	δ_{m2}	157,35	167,07	160,31	166,37	155,03
	δ_{m3}	260,59	282,24	276,55	283,37	272,38
	δ_{m4}	343,04	349,76	350,91	353,90	344,17
Sabit Platformun Yerleşim Açılımları (derece)	δ_{b1}	0,00	16,74	1,91	1,45	2,86
	δ_{b2}	109,09	121,81	114,27	113,35	111,73
	δ_{b3}	198,28	208,17	201,04	215,69	195,59
	δ_{b4}	212,63	217,31	208,93	220,56	198,88
	δ_{b5}	227,02	237,11	228,21	227,64	227,19
	δ_{b6}	322,44	330,06	326,60	339,69	317,50
İçine çekilmiş uzunluk (mm)	150	250	280	592	740	
Uzatılmış uzunluk (mm)	200	350	430	792	990	
GBİ	0,864	0,822	0,822	0,781	0,786	
ÇUH (cm ³)	62,56	651	1415	1502	1586	
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
Sabit	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆
Hareketli	M ₁	M ₂	M ₂	M ₃	M ₄	M ₄

6x4 GSP: stroke uzunluğu 50

6x4 GSP: stroke uzunluğu 100

6x4 GSP: stroke uzunluğu 150

6x4 GSP: stroke uzunluğu 200

6x4 GSP: stroke uzunluğu 250

Tablo 4.12. 6x5 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap (mm)	r_b	209,95	256,18	334,88	561,02	635,39
	r_m	154,31	173,90	168,87	379,88	365,68
Hareketli Platformun Yerleşim Açıları (derece)	δ_{m1}	58,48	51,26	101,75	70,04	58,29
	δ_{m2}	83,37	65,95	117,10	76,40	64,93
	δ_{m3}	180,54	172,20	131,39	188,63	178,31
	δ_{m4}	196,26	186,10	231,68	195,02	184,91
	δ_{m5}	308,59	300,46	345,71	308,83	300,66
Sabit Platformun Yerleşim Açıları (derece)	δ_{b1}	10,56	2,32	1,24	22,79	3,56
	δ_{b2}	129,96	114,27	119,10	123,07	119,67
	δ_{b3}	141,44	123,93	232,00	141,77	123,65
	δ_{b4}	247,00	235,64	239,19	242,34	239,74
	δ_{b5}	258,49	250,94	256,19	262,16	245,06
	δ_{b6}	346,24	350,59	351,80	355,45	356,21
İçine çekilmiş uzunluk (mm)		150	250	280	592	740
Uzatılmış uzunluk (mm)		200	350	430	792	990
GBİ		0,928	0,922	0,915	0,884	0,886
ÇUH (cm ³)		106,9	741,2	1531,6	1620,0	1805,1
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Sabit	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
Hareketli	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_5

6x5 GSP: stroke uzunluğu 50

6x5 GSP: stroke uzunluğu 100

6x5 GSP: stroke uzunluğu 150

6x5 GSP: stroke uzunluğu 200

6x5 GSP: stroke uzunluğu 250

Tablo 4.13. 6x6 GSP mekanizmalarının eniyileme sonuçları

Eniyilenmiş Tasarım Değişkenleri		Stroke Uzunluğu (mm)				
		50	100	150	200	250
Yarıçap (mm)	r_b	205,81	290,40	320,49	599,12	688,71
	r_m	153,73	225,11	226,68	434,32	443,86
Hareketli Platformun Yerleşim Açıları (derece)	δ_{m1}	0,00	13,00	56,05	68,94	11,88
	δ_{m2}	85,69	104,95	68,70	75,73	115,77
	δ_{m3}	104,87	133,14	175,54	186,96	130,05
	δ_{m4}	209,34	224,86	187,82	194,65	235,77
	δ_{m5}	225,38	252,24	296,01	306,33	251,01
	δ_{m6}	338,46	343,85	307,00	312,08	354,55
Sabit Platformun Yerleşim Açıları (derece)	δ_{b1}	35,13	54,63	10,02	24,72	62,18
	δ_{b2}	46,84	62,92	113,89	119,63	65,82
	δ_{b3}	156,76	174,66	130,56	143,06	180,36
	δ_{b4}	168,89	183,27	233,35	239,03	185,53
	δ_{b5}	269,71	294,13	250,63	262,41	300,64
	δ_{b6}	284,75	302,43	351,92	355,88	304,74
İçine çekilmiş uzunluk (mm)		150	250	280	592	740
Uzatılmış uzunluk (mm)		200	350	430	792	990
GBİ		0,918	0,923	0,918	0,891	0,893
ÇUH (cm ³)		116,47	777	1558	1552	1738
Sabit ve hareketli platformdaki bağlantı noktaları						
Bacak	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Sabit	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
Hareketli	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6

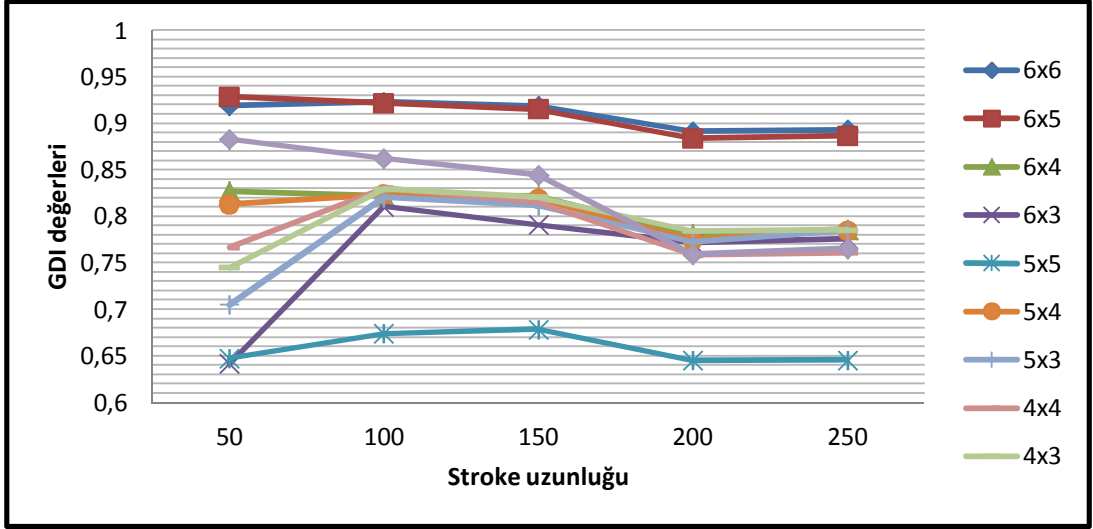
6x6 GSP: stroke uzunluğu 50

6x6 GSP: stroke uzunluğu 100

6x6 GSP: stroke uzunluğu 150

6x6 GSP: stroke uzunluğu 200

6x6 GSP: stroke uzunluğu 250



Şekil 4.2. On farklı GSP mekanizmasının GBİ değerleri

On farklı GSP mekanizmasının kinematik performansları karşılaştırmak için GBİ değerleri büyükten küçüğe sıralanarak Tablo 4.14-4.16'da verilmiştir. Her bir stroke uzunluğu için 0,883 ile 0,928 arasında değişen GBİ değerlerine sahip 6x5 ve 6x6 GSP mekanizmalarının en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Bu değerlerin fiziksel anlamı olarak 6x5 ve 6x6 GSP mekanizmalarının daha iyi kinematik performansa ve becerikli hareket kabiliyetlerine sahip oldukları söylenebilir. Ayrıca bu mekanizmalar diğerlerine kıyasla daha büyük çalışma uzayı hacimlerine de sahiptir.

Tablo 4.14. GSPs stroke uzunluğu 50 ve 100

Stroke Uzunluğu 50				Stroke uzunluğu 100			
Sıra	GSP	GBİ	Çalışma Uzayı (cm ³)	Sıra	GSP	GBİ	Çalışma Uzayı (cm ³)
1	6x5	0,928	106,88	1	6x6	0,923	777,34
2	6x6	0,919	116,47	2	6x5	0,921	741,16
3	3x3	0,883	75,58	3	3x3	0,862	511,59
4	6x4	0,827	87,23	4	4x4	0,830	131,88
5	5x4	0,813	96,91	5	4x3	0,829	328,23
6	4x4	0,767	48,26	6	5x4	0,823	669,90
7	4x3	0,745	55,66	7	6x4	0,821	651,22
8	5x3	0,705	58,2	8	5x3	0,820	290,20
9	5x5	0,648	30,69	9	6x3	0,810	250,09
10	6x3	0,642	56,88	10	5x5	0,673	644,96

5x5 GSP mekanizmasının ise her bir stroke değeri için 0,645 ile 0,678 arasında değişken GBİ değerleri ile diğer mekanizmalara kıyasla en kötü kinematik performans sergiledikleri görülmüştür. Aynı zamanda bu mekanizmaların en küçük

çalışma uzayına sahip olduğu görüldüğünden robot tasarımcıları tarafından bu mekanizma tipinin tercih etmemeleri gerektiği söylenebilir.

Tablo 4.15. GSP stroke uzunluğu 150 ve 200

Stroke uzunluğu 150				Stroke uzunluğu 200			
Sıra	GSP	GBİ	Çalışma Uzayı (cm ³)	Sıra	GSP	GBİ	Çalışma Uzayı (cm ³)
1	6x6	0,915	1558,02	1	6x6	0,890	1551,83
2	6x5	0,914	1532,00	2	6x5	0,883	1619,99
3	3x3	0,844	1346	3	4x3	0,784	1344,36
4	6x4	0,821	1415	4	6x4	0,780	1502,08
5	4x3	0,820	1133	5	5x4	0,774	1504,44
6	5x4	0,818	1426	6	5x3	0,772	1399,52
7	4x4	0,815	747	7	6x3	0,771	1309,14
8	5x3	0,811	1095	8	3x3	0,759	1339,55
9	6x3	0,791	1099	9	4x4	0,758	1129,68
10	5x5	0,678	653	10	5x5	0,645	1129,47

Bu uygulama kapsamında robot tasarımcıları ve araştırmaları için GSP mekanizmaları üzerinde global beceri indisi kullanılarak eniyilemesi gerçekleştirilmiştir. Eniyileme algoritması olarak parçacık sürü algoritması kullanılmıştır. GSP mekanizmalarının tasarımında bacak uzunluklarının önemli bir kriter olduğu açıktır. Bununla birlikte sabit ve hareketli platformun yarıçapları ile bu platformlar üzerindeki bağlantı noktalarının konumlarının da kinematik performansı etkilediği görülmüştür. Endüstriyel uygulamalar için GSP mekanizması tasarlanırken yapılan bu çalışmadan istifade edileceği düşünülmektedir.

Tablo 4.16. GSP stroke uzunluğu 250

Stroke uzunluğu 250			
Sıra	GSP	GBİ	Çalışma Uzayı (cm ³)
1	6x6	0,892	1737,97
2	6x5	0,886	1805
3	6x4	0,785	1586
4	4x3	0,785	1550
5	5x4	0,784	1606
6	5x3	0,784	1467
7	6x3	0,775	1514
8	3x3	0,765	1510
9	4x4	0,760	1281
10	5x5	0,645	1438

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Paralel mekanizmaların son yıllarda çok popüler olduğu görülmesine rağmen üzerinde çalışılması gereken pek çok açık konuların olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmektedir. Bu tez çalışmasında olası tüm GSP mekanizmalarının tasarımı, analiz ve benzetiminin yapılabileceği çevrimdışı bir yazılımın (STEWSIM) geliştirilmiştir. STEWSIM yazılımında üç ile altı arasında bacak sayısından oluşabilecek 3x3, 4x3, 4x4,..., 6x5,6x6 GSP mekanizmalarının bağlantı matrisi ile tanımlanarak tasarlanması sağlanmıştır. Tüm hesaplamalar için bu bağlantı matrisi kullanıldığından dolayı her bir GSP mekanizması için ayrı ayrı kodlar yazılmasına gerek kalmamış, tek bir kod parçası ile hesaplamalar yapılabilmektedir. Hesaplama sonucunda GSP mekanizmasının yapacağı hareket animasyon olarak gösterilmiştir. Mekanizmanın bacaklarının ve eklemlerin limitleri dahilinde yapabileceği hareketler kümesi olarak tanımlanan çalışma uzayı hacmi hesaplanarak, görselleştirilmiştir. Jacobian matrisi yardımıyla hesaplanan Global Beceri İndisi mekanizmanın kinematik performansını gösteren önemli bir kriterdir. Jacobian matrisinin determinantının sıfır olduğu noktalar olarak tanımlanan tekillik analizi ise mekanizmanın kontrol edilemediği noktalar olduğundan son derece önemlidir. Bu noktalarda mekanizmanın yapacağı hareket kestirilemediğinden dolayı mekanizmanın kırılma ihtimali de bulunmaktadır. Yörünge planlaması aşamasında önceden belirlenen bir yörünge için benzetimi yapılabilmektedir. Böylece fiziksel olarak imalatı tamamlanmış bir mekanizma üzerinde kontrol yapmak yerine benzetim üzerinde zararsız bir şekilde hareket kontrol edilebilir. Doğrulanmış yörünge mekanizma üzerinde uygulanır.

Bu tez çalışmasının ikinci aşaması olarak kinematik boyutsal eniyileme yazılımı (STEWOPT) geliştirilmiştir. Bu yazılım yardımıyla mekanizmanın kinematik performansını etkileyeceği düşünülen tüm ayrıntıları (eklem, bacak, platform özellikleri) kapsayacak şekilde veriler toplanarak eniyileme gerçekleştirilmiştir. Mekanizmanın tipi, bacak sayısı seçildikten sonra Eklem ve bacak özelliklerinin girilmesi istenmektedir. Ayrıca istenirse bacak uzunluklarının da eniyilemesi

yapılabilmektedir. İstenilen çalışma uzayı belirlendikten sonra parçacık sürü eniyileme yöntemi parametreleri seçilerek eniyileme işlemi gerçekleştirilmektedir. Eniyileme sonuçları STEWSIM yazılımına da aktarılacak şekilde çıktı üretilmektedir. Bu yazılım ile kinematik eniyileme yapılarak mekanizma tasarlanabildiği gibi bir mekanizma üzerinde çalışma uzayının da becerikli (en iyi kinematik performansı sunun) bölgeler de belirlenebilir.

Son bölümde ise STEWOPT yazılımı kullanılarak endüstriyel ekipmanlar incelenerek belirlenen beş farklı stroke uzunluğundan oluşan altı bacaklı on farklı (3x3,4x3,4x4, 5x3, 5x4, 5x5, 6x3, 6x4, 6x5, 6x6) GSP mekanizmasının eniyileme sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde 6x6 ve 6x5 GSP mekanizma tiplerinin en iyi kinematik performansı, 5x5 tipinin ise en kötü kinematik performansı sunduğu görülmüştür. Stroke değerlerinin büyümesinin çalışma uzayını da büyüteceği söylenebilir. Fakat sonuçlar içinde en iyi kinematik performansı sunan stroke değerlerinin 100 mm ve 150 mm olduğu görülmüştür.

Geliştirilen uygulamalar ile ilgili olarak gelecekte eklenmesi planlanan özellikler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

STEWSIM yazılımı çevrimdışı olarak çalışmaktadır. Gerçekleştirilen bir mekanizmayı kontrol edebilme özelliği eklenmesi planlanmaktadır. DSP üzerinden bacakların her birisini kontrol edecek yazılımın üretilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte DSPACE DS1103 benzeri gerçek bir denetleyici kullanmak MATLAB SIMULINK ortamından kontrol edebilmek açısından çok avantajlı olarak gözükmektedir. Paralel hesaplama özellikleri düşünüldüğünde ise FPGA üzerinden kontrol edilmesi avantajlı olabilir.

STEWOPT yazılımında kinematik eniyileme işlemi global Beceri indis ve çalışma uzayı göz önüne alınarak yapılmıştır. Bunlar dışında eniyileme işleminde kullanılan diğer performans indisleri (global payload indis, global gradient indis) incelenerek çok-amaçlı eniyileme işlemleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca dinamik performans indisleri (Manipulability, Joint-Space inertia matrix vb. gibi) incelenerek bu indislere göre eniyileme işlemi gerçekleştirilebilir. Hem kinematik hem de dinamik indislerin bir arada kullanıldığı bir eniyilemenin sonuçları ise ilgi çekici olabilir. Bu

bağlamda bağlantı matrisi algoritması kullanılarak olası tüm GSP mekanizmaları için dinamik eniyileme işlemi gerçekleştirecek bir yazılım geliştirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Anlı E., Alp H., Yurt S. N., Özkol İ., Paralel Mekanizmaların Kinematiği Dinamiği ve Çalışma Uzayı, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi (Hava Harp Okulu)*, 2005, **2**(1), 19-36.
- [2] Merlet J. P., *Parallel robots*, 2nd Ed., Springer, Netherlands, 2006.
- [3] İner B., Küçük S., Bingül Z., Farklı Yapıdaki Stewart Platformlarının Tek Bir Çatı Üzerinden Tasarımı Ve Benzetimi, *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı (TOK)*, Kocaeli, Türkiye, 21-23 Eylül 2010.
- [4] Küçük S., Endüstriyel robotların modellemesi ve çevrimdışı programlanması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2004, 154848.
- [5] Bingül Z., Küçük S., *Robot Kinematiği*, 2nci Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2009.
- [6] <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007p.html> (Ziyaret Tarihi: 02 Nisan 2012)
- [7] Stewart D., A Platform with Six Degrees of Freedom, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, 1965, **180**, 371-386.
- [8] Gough V. E., Whitehall S. G., Universal tyre test machine, *Proc. of the FISITA Ninth International Technical Congress*, 1962, **1**, 117-137.
- [9] Gao F., Li W., Zhao X., Jin Z., Zhao H., New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs, *Mechanism and Machine Theory*, 2002, **37**, 1395-1411.
- [10] Gallardo-Alvarado J., Orozco-Mendoza H., Rico-Martínez J. M., A Novel Five-Degrees-of-Freedom Decoupled Robot, *Robotica*, 2010, **28**, 909-917.
- [11] Li F., Kuiper J. H., Khan S. A., Hutchinson C., Evans C. E., Oc30 A New Method to Measure the Inter-Fracture Site Movements (IFMS) Dynamically By Means Of Stewart Platform Algorithm, *J. Bone Joint Surg. Br.*, 2008, **90-B**, 366-367.
- [12] Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S., The Stewart platform manipulator: a review, *Mechanism and Machine Theory*, 2000, **35**, 15-40.
- [13] Faugère J., Lazard D., Combinatorial classes of parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 1995, **30**, 765-776.

- [14] Artigue F., Amirat M. Y., Pontnau J., Isoelastic behavior of parallel robots, *Robotica*, 1989, **7**, 323-325.
- [15] Dafaoui E. M., Amirat Y., Pontnau J., Francois C., Analysis and design of a six-DOF parallel manipulator, modeling, singular configurations, and workspace, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, **14**, 78-92.
- [16] Hunt K. H., Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms, *Journal of Mechanical Design*, 1983, **105**, 705–712.
- [17] Pritschow G., Eppler C., Lehner W. D., Highly dynamic drives for parallel kinematic machines with constant arm length, *Proc. 1st Int. Colloq., Collaborative Res. Center*, Braunschweig, Germany, 2002.
- [18] 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.
- [19] Lazard D., Generalized Stewart platform: How to compute with rigid motions?, *Proc. of IMACS ACA*, Lille, France, 1993.
- [20] Mourrain B., The 40 generic positions of a parallel robot, *International symposium on Symbolic and algebraic computation*, New York, USA, 1993.
- [21] Wang A., Reconfigurable kinematics of General Stewart Platform and simulation interface, Master Thesis, University of Windsor, Canada, 2007.
- [22] Fichter E. F., A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction, *The International Journal of Robotics Research*, 1986, **5**, 157-182.
- [23] Kucuk S., Bingul Z., An off-line robot simulation toolbox, *Computer Applications in Engineering Education*, 2010, **18**, 41-52.
- [24] Nayar H. D., Robotect: serial-link manipulator design software for modeling, visualization and performance analysis, *7th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*, 2002, **3**, 1359-1364.
- [25] Nethery J. F., Spong M. W., Robotica: a Mathematica package for robot analysis, *IEEE Robotics Automation Magazine*, 1994, **1**, 13-20.
- [26] Bingul Z., Koseeyaporn P., Cook G. E., Windows-based robot simulation tools, *7th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore, 2-5 December 2002.
- [27] Hill B., Tesar D., Rapid analysis manipulator program (RAMP) as a design tool for serial revolute robots, *Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Minneapolis-Minnesota, April 1996.
- [28] Merlet J. P., 5barres user's manual, INRIA Sophia-Antipolis, <http://www-sop.inria.fr/coprin/logiciels/RP/FK/3-RPR/notice-html.html>, (Ziyaret Tarihi: 10 Nisan 2012).

- [29] Kucuk S., Simulation and design tool for performance analysis of planar parallel manipulators, *Simulation*, 2012, **88**, 542-556.
- [30] Gosselin C., Perreault L., Vaillancourt C., Simulation and computer-aided kinematic design of three-degree-of-freedom spherical parallel manipulators, *Journal of robotic systems*, 1995, **12**, 857-869.
- [31] Ding Z. Q., A unified Robotic Kinematic Simulation Interface, Master Thesis, University of Windsdor, 2005.
- [32] Gökçen H. M., Control of a stewart mechanism using direct kinematic solution, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1992, 24457.
- [33] Ovayolu H., Kinematic analysis of stewart platform-based mechanisms/manipulators, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 1997, 65943.
- [34] Salih H., Üç serbestlik dereceli manipülör mekanizmasının prototipinin kurulması ve kinematığının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999, 98484.
- [35] Himmetoğlu S., Kinematic and force analysis of parallel and hybrid manipulators, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2000, 093355.
- [36] Özdağlar M., Dynamic modeling and control of a stewart platform type motion simulator, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001, 116127.
- [37] Bulut H., Control and animation of a three-link robotic arm using direct kinematics and inverse kinematics methods, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 129421.
- [38] Yurt S. N., 6-3 Stewart platform mekanizmasının kinematik, dinamik analizi ve kontrolü, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 126643.
- [39] Bayram Ç., Kinematic and dynamic analysis of spatial 6-DOF parallel structure manipulator, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2003, 134298.
- [40] Serim M. B., Paralel robotlar ve düzlemsel 3RRR paralel robot uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2004, 153015.
- [41] Anlı E., Positional kinematics analysis of the 6-3 Stewart platform mechanism using heuristic algorithms, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 166695.

- [42] Albayrak O., Modeling and real-time control system implementation for a Stewart platform, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005, 167042.
- [43] Korkmaz O., Inverse dynamics control of flexible joint parallel manipulators, Yüksek Lisans, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, 199264.
- [44] Ulucay Ö., Design and control of Stewart platform, Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 185096.
- [45] Ünsal A., Farklı Yapıdaki Stewart Platform Mekanizmalarının Düz ve Ters Kinematik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 201166.
- [46] Güner B., A Complete Dynamic Analysis Of Stewart Platform Including Singularity Detection, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007, 213141.
- [47] Kömürlüoğlu H., Deneysel Bir Stewart Platformunun Kontrol ve Simulasyon Programlanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007, 213319.
- [48] Alp H., Sezgisel yöntemlerle paralel mekanizmaların çalışma uzayı analizi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 223686.
- [49] Yıldız İ., 3x3 Kuvvet Geri Beslemeli Bir Stewart Platformunun Kinematik Analizi, Bağ-Grafik Modellenmesi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 201314.
- [50] Cin S., Uzaysal hareket eden araçlara kumanda etmek maksadıyla bir insan-makine ara yüzü olarak 3-3 stewart gough platformun çalışma uzayı merkezli tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Deniz Harp Okulu Komutanlığı, Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü, İstanbul, 2007, 200397.
- [51] Can F. C., Analysis and synthesis of parallel manipulators, Doktora Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008, 233490.
- [52] Ünal R., Design optimization and control of a parallel lower-arm exoskeleton, Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 178681.
- [53] Ulaş B., Stewart platformu tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 251328.
- [54] Ağaoglu A., Workspace optimization of a six degree of freedom parallel manipulator for micromachining, Yüksek Lisans Tezi, Yeditepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 305860.

- [55] Güney A., İnsan-makine arayüzü olarak 3x3 Stewart platformunun empedans kuvvet kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 259820.
- [56] Oğan O. C., Modeling and control of constrained flexible joint parallel manipulators, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 255384.
- [57] Doğan E., Delta paralel robot ileri ve ters kinematik hesaplamaları, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.
- [58] Aydın M., Üç serbestlik dereceli paralel bir robotun kinematiği, dinamiği ve denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2012, 301159.
- [59] Şanlıtürk İ. H., Görerek işlem yapabilen delta robotun tasarımı ve performans karakteristiklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2012, 306957.
- [60] Karahan O., Seri ve paralel robotlarda parçacık sürü optimizasyonu ile yörünge kontrolörü tasarımı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2012, 315723.
- [61] Güven Y., Orthoroby robotic system for orthopedic surgery, Yüksek Lisans Tezi, Yeditepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 317905.
- [62] Zhao Y., Gao F., Inverse dynamics of the 6-dof out-parallel manipulator by means of the principle of virtual work, *Robotica*, 2009, **27**, 259-268.
- [63] Tsai L. W., *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1999.
- [64] Lee T-Y., Shim J-K., Forward kinematics of the general 6-6 Stewart platform using algebraic elimination, *Mechanism and Machine Theory*, 2001, **36**, 1073-1085.
- [65] Bin D., Xiang-de Z., Continuation method applied in kinematics of parallel robot, *Applied Mathematics and Mechanics*, 2001, **22**, 1422-1428.
- [66] Merlet J. P., Solving the Forward Kinematics of a Gough-Type Parallel Manipulator with Interval Analysis, *The International Journal of Robotics Research*, 2004, **23**, 221-235.
- [67] Behi F., Kinematic analysis for a six-degree-of-freedom 3-PRPS parallel mechanism, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1988, **4**, 561-565.
- [68] Nanua P., Waldron K. J., Murthy V., Direct kinematic solution of a Stewart platform, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1990, **6**, 438-444.

- [69] Innocenti C., A novel numerical approach to the closure of the 6-6 Stewart platform mechanism, *Fifth International Conference on Advanced Robotics: 'Robots in Unstructured Environments'*, 1991, **1**, 851-855.
- [70] Chen S-H., The Forward Kinematics of the 6-6 Stewart Platform Using Extra Sensors, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2006, **6**, 4671-4676.
- [71] Geng Z., Haynes L., Neural network solution for the forward kinematics problem of a Stewart platform, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991, **3**, 2650-2655.
- [72] Dietmaier P., The Stewart-Gough Platform of General Geometry Can Have 40 Real Postures, Lenarcic J., Husty M. L., *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 7-16, 1998.
- [73] Kiusalaas J., *Numerical Methods in Engineering with Matlab*, Cambridge University press, New York, 2005.
- [74] Nguyen C. C., Zhou Z. L., Antrazi S. S., Campbell C. E., Efficient computation of forward kinematics and Jacobian matrix of a Stewart platform-based manipulator, *IEEE Proceedings of Southeastcon*, 1991, **2**, 869-874.
- [75] Merlet J. P., An algorithm for the forward kinematics of general parallel manipulators, *Fifth International Conference on Advanced Robotics Robots in Unstructured Environments*, 1991, **2**, 1136-1140.
- [76] Klein C. A., Blaho B. E., Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, 1987, **6**(2), 72-83.
- [77] Pond G., Carretero J. A., Formulating Jacobian matrices for the dexterity analysis of parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, **41**, 1505-1519, 2006.
- [78] Merlet J. P., Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots, *Journal of Mechanical Design*, 2006, **128**, 199-206.
- [79] Zanganeh E. K., Angeles J., Kinematic Isotropy and the Optimum Design of Parallel Manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, 1997, **16**, 185-197.
- [80] Kim D., Chung W., Analytic singularity equation and analysis of six-DOF parallel manipulators using local structurization method, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999, **15**, 612-622.
- [81] Kucuk S., A dexterity comparison for 3-DOF planar parallel manipulators with two kinematic chains using genetic algorithms, *Mechatronics*, 2009, **19**, 868-877.

- [82] Gosselin C., Angeles J., A Global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators, *Journal of Mechanical Design*, 1991, **113**, 220-226.
- [83] Gosselin C., Determination of the workspace of 6-d.o.f parallel manipulators, *ASME Journal of Mechanical Design*, 1990, **112**, 331-336.
- [84] Kucuk S., Bingul Z., Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators, *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, **54**, 567-573.
- [85] Fattah A., Hasan Ghasemi A. M., Isotropic Design of Spatial Parallel Manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, 2002, **21**, 811-824.
- [86] Pusey J., Fattah A., Agrawal S., Messina E., Design and workspace analysis of a 6-6 cable-suspended parallel robot, *Mechanism & Machine Theory*, 2004, **39**, 761-778.
- [87] Alp H., Özkol İ., 6 Serbestlik dereceli 6-3, özel yapı 6-3 ve 6-4 paralel mekanizmaların genişletilmiş çalışma uzayı analizi, *İtü dergisi/D Mühendislik*, 2008, **7**, 3-14.
- [88] Yang D. C. H., Lee T. W., Feasibility Study of a Platform Type of Robotic Manipulators from a Kinematic Viewpoint, *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 1984, **106**, 191-198.
- [89] Cwiakala M., Workspace of a Closed-Loop Manipulator, *ASME Journal of Mechanical Design*, 1986.
- [90] Merlet J. P., Parallel manipulators, Part 1, Theory, Technical report 646, *INRIA*, 1987.
- [91] Gosselin C., Lavoie E., Toutant P., An Efficient algorithm for the graphical representation of the three-dimensional workspace of parallel manipulators, *ASME Design Engineering Division*, 1992, **45**, 323-328.
- [92] Merlet J. P., Gosselin C. M., Mouly N., Workspaces of planar parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 1998, **33**, 7-20.
- [93] Wan Y., Wang S., Kinematics Analysis and Simulation System Realization of Stewart Platform Manipulator, *4th Int. Conf. on Control and Automation*, Montreal, Que., Canada, 10-12 June 2003.
- [94] Chablat D., Wenger P., Moveability and collision analysis for fully-parallel manipulators, *12th RoManSy*, 1998, Paris, 61-68.
- [95] Bonev I. A., Ryu J., A new Approach to Orientation Workspace Analysis of 6-DOF Parallel Manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 2001, **36**, 15-28.

- [96] Saxena V., Liu D., Daniel C. M., Sutherland J. W., A Simulation Study of the Workspace and Dexterity of a Stewart Platform Based Machine Tool, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 1997, 16-21.
- [97] Miller K., Maximization of Workspace Volume of 3-Dof Spatial Parallel Manipulators, *Journal of Mechanical Design*, 2002, **124**, 347-350.
- [98] Arai T., Cleary K., Nakamura T., Adachi H., Homma K., Design, analysis and construction of a prototype parallel link manipulator, *Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems Towards a New Frontier of Applications*, 1990, **1**, 205-212.
- [99] Kim D., Chung W., Analytic Singularity Equation and Analysis of Six-Dof Parallel Manipulators Using Local Structurization Method, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999, **15**, 612-622.
- [100] Jo D. Y., Haug E. J., Workspace analysis of multibody mechanical systems using continuation methods, *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, Automation Design*, 1989, **111**, 581-589.
- [101] Haug E. J., Luh C-M., Adkins F. A., Wang J-Y., Numerical Algorithms for Mapping Boundaries of Manipulator Workspaces, *Journal of Mechanical Design*, 1996, **118**, 228-234.
- [102] Wang L-CT., Hsieh J-H., Extreme reaches and reachable workspace analysis of general parallel robotic manipulators, *Journal of Robotic Systems*, 1998, **15**, 145-159.
- [103] Ma O., Angeles J., Architecture singularities of platform manipulators, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1991, **2**, 1542-1547.
- [104] Bessala J., Bidaud P., Ben Ouezdou F., Analytical study of Stewart platform workspaces, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1996, **4**, 3179-3184.
- [105] Merlet J. P., Singular Configurations of Parallel Manipulators and Grassmann Geometry, *The International Journal of Robotics Research*, 1989, **8**, 45-56.
- [106] Gosselin C., Angeles J., Singularity analysis of closed-loop kinematic chains, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1990, **6**, 281-290.
- [107] Hosseini M. A., Daniali H. M., Weighted local conditioning index of a positioning and orienting parallel manipulator, *Scientia Iranica*, 2011, **18**, 115-120.
- [108] Hosseini M. A., Daniali H. R. M., Taghirad H. D., Dexterous Workspace Optimization of a Tricept Parallel Manipulator, *Advanced Robotics*, 2011, **25**, 1697-1712.
- [109] Abbasnejad G., Daniali H. M., Fathi A., Architecture optimization of 4PUS+1PS parallel manipulator, *Robotica*, 2011, **29**, 683-690.

- [110] Li Y., Xu Q., Optimal kinematic design for a general 3-PRS spatial parallel manipulator based on dexterity and workspace, *Proc. of 11th Int. Conf. on Machine Design and Production*, 2004, 571-584.
- [111] Lara-Molina F. A., Rosario J. M., Dumur D., Multi-objective optimization of Stewart-Gough manipulator using global indices, *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2011, 79-85.
- [112] Pond G., Carretero J. A., Quantitative dexterous workspace comparison of parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 2007, **42**, 1388-1400.
- [113] Lou Y., Liu G., Li Z., Randomized Optimal Design of Parallel Manipulators, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008, **5**, 223 -233.
- [114] Kennedy J., Eberhart R. C., Particle swarm optimization, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, Piscataway, 1995, 1942-1948.
- [115] Van den Bergh F., An analysis of particle swarm optimizers, PhD Thesis, University of Pretoria, 2001.
- [116] Sun J., Feng B., Xu W., Particle swarm optimization with particles having quantum behavior, *Congress on Evolutionary Computation*, 2004, **1**, 325 - 331.
- [117] Sun J., Xu W., Feng B., A global search strategy of quantum-behaved particle swarm Optimization, *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2004, **1**, 111-116.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

İnner B., Küçük S., A Novel Kinematic Design, Analysis and Simulation Tool for General Stewart Platforms, *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, DOI: 10.1177/0037549713482733

İnner B., Küçük S., Bingül Z., Farklı Yapıdaki Stewart Platformlarının Tek Bir Çatı Üzerinden Tasarımı Ve Benzetimi, *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, Kocaeli, Türkiye, 21-23 Eylül 2010.

İnner B., Laboratuvar Uygulamasında Moodle Öğrenme Yönetim Sistemi Kullanımında Karşılaşılan Problemler, Tecrübeler Ve Çözüm Önerileri, *9th International Educational Technology Conference IETC*, Ankara, Türkiye, 6-8 Mayıs 2009.

İnner B., Öğrenme Yönetim Sisteminin (Moodle) Örgün Öğretim Laboratuvar Uygulamalarında Kullanılması, *Ulusal Teknik Eğitim Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu UMES*, Kocaeli, Türkiye, 20-22 Haziran 2007.

İnner B., Sevilgen F. E., Sıkıştırılmış Sekizli Ağaç ve Sekizli Ağaç Veriyapı ile Hiyerarşik Ağaç Temelli Algoritmaların Gerçekleştirilmesi ve Karşılaştırılması, *I. Ulusal Yüksek Başarım ve Grid Konferansı (BAŞARIM09)*, Ankara, Türkiye, 15-18 Nisan 2009.

İnner B., Sevilgen F. E., N-Cisim Algoritmalarının Karşılaştırılması, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO*, Bursa, Türkiye, 2-12 Aralık 2004.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Erzincan'da doğdu. İlköğretimi Barbaros ilkokulunda, ortaokulu Erzincan Anadolu Lisesinde, Lise 1 ve 2. Sınıfı Erzincan Fen lisesinde okuduktan sonra Lise 3. Sınıfı Erzincan Özel Otlukbeli Erkek Koleji'nde okudu. 2001 yılında Kocaeli Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Ocak 2002'de Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak başladı. 2004 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği bölümünden "Hiyerarşik N-cisim Algoritmalarının Performans Karşılaştırması ve Veri yapılarının incelenmesi" isimli teziyle Yüksek Lisans mezun oldu. 2006 güz döneminde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalından doktora çalışmasına başladı.