

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**6X6 STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ TASARIMI,  
BENZETİMİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**CEVHER SUNGURAY**

**KOCAELİ 2015**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**




**6X6 STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ TASARIMI,  
BENZETİMİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**CEVHER SUNGURAY**

**Doç.Dr. Satılmış ÜRGÜN**  
**Danışman, Kocaeli Üniv.**

**Prof.Dr. Faruk ARAS**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Yrd.Doç.Dr. Hayri ACAR**  
**Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniv.**

  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 22.06.2015**

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında ve geliştirilmesinde bana her konuda yardımcı olan, bilgilerini her daim paylaşan ve beni sabırla destekleyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Satılmış ÜRGÜN 'e ve Öğr. Gör. Haluk DEMİRTAŞ 'a teşekkür ederim.

Platformun üretim aşamasında bizimle beraber olan “Bravo Click” firmasından Sayın Kemal Fazlı KETENCİ 'ye yardımlarını esirgemediği, ve tecrübelerini aktardığı için teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarım sırasında beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

Haziran – 2015

Cevher SUNGURAY

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
GİRİŞ.....	1
1. GENEL BİLGİLER .....	3
1.1. Seri ve Paralel Manipülatörlerin Karşılaştırılması .....	5
1.2. Stewart Platform Mekanizması .....	7
1.3. Stewart Platform Kullanım Alanları.....	9
1.3.1. Uçak ve araç simülatörleri.....	9
1.3.2. Medikal alanda hassas operasyon .....	9
1.3.3. Diğer alanlarda kullanılan SPM'ler.....	10
1.4. Literatür İncelemesi.....	12
1.4.1. SPM dinamiği üzerine yapılmış çalışmalar.....	14
1.4.2. Konum kontrolü üzerine yapılmış çalışmalar .....	15
1.4.3. Kuvvet kontrolü üzerine yapılmış çalışmalar.....	16
1.4.4. SPM benzetim araçları ile ilgili yapılan çalışmalar.....	17
2. GERÇEKLEŞTİRİLEN SPM'NİN KİNEMATİK ANALİZİ.....	18
2.1. Gerçekleştirilen 6x6 SPM'nin Ters Kinematik Analizi .....	18
2.2. Gerçekleştirilen 6x6 SPM'nin Düz Kinematik Analizi.....	20
3. GERÇEKLEŞTİRİLEN PLATFORMUN MODELLENMESİ .....	23
3.1. Platform Parçalarının Analizi .....	26
3.2. Platform Parçalarının Birleştirilmesi.....	36
4. GERÇEKLEŞTİRİLEN PLATFORMUN “SIM-MECHANICS” MODELİ.....	38
5. MODELLENEN PLATFORMUN GERÇEKLEŞMESİNDE KULLANILAN MALZEMELER .....	45
5.1. SPM'in Üretiminde Kullanılan Malzemeler .....	45
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	50
KAYNAKLAR .....	51
EKLER.....	59
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	71
ÖZGEÇMİŞ .....	72

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	PUMA model seri manipülatör .....	4
Şekil 1.2.	Genel bir paralel manipülatör .....	4
Şekil 1.3.	Hybrid robot manipülatörü .....	5
Şekil 1.4.	Stewart Platform Mekanizması .....	8
Şekil 1.5.	Farklı mimarideki SPM modelleri a) 3x3 b) 3x6 c) 6x6 .....	8
Şekil 1.6.	Araç simülatörü .....	9
Şekil 1.7.	Lufthansa uçak simülatörü .....	9
Şekil 1.8.	Medikal alanda kullanılan SPM .....	10
Şekil 1.9.	Uydu pozisyonlamada kullanılan SPM .....	10
Şekil 1.10.	Fizyoterapide kullanılan SPM .....	11
Şekil 1.11.	Ölçüm almada kullanılan SPM .....	11
Şekil 1.12.	Ayna pozisyonlamada kullanılan SPM .....	12
Şekil 2.1.	6x6 DOF Stewart Platform .....	19
Şekil 3.1.	Biçim değiştirme enerjisi grafiği .....	35
Şekil 3.2.	Von-Mises hasar (akma) diyagramı .....	36
Şekil 3.3.	Birleştirilmesi yapılan SPM son hali .....	37
Şekil 4.1.	6x6 SPM “Sim-mechanics” modeli .....	39
Şekil 4.2.	Aktüatör üst bloğu .....	40
Şekil 4.3.	Platformun genel blok diyagramı .....	41
Şekil 4.4.	PID kontrolör blok diyagramı .....	41
Şekil 4.5.	“Leg trajectory” bloğunun içeriği .....	42
Şekil 4.6.	Gerçekleştirilen platformun benzetim görüntüsü .....	43
Şekil 4.7.	“Scope” bloğu çıktısı .....	43
Şekil 4.8.	Platformun Sim-mechanics programındaki üç boyutlu görüntüsü .....	44
Şekil 5.1.	Motor .....	45
Şekil 5.2.	5VDC 20A switch mode güç kaynağı .....	46
Şekil 5.3.	Motor sürücü arayüz modülü .....	46
Şekil 5.4.	Plexyglass malzemenin kullanıldığı motor tutucu ve ara kollar .....	47
Şekil 5.5.	Platformun alt plakası .....	47
Şekil 5.6.	Platform kontrol arayüzü .....	48
Şekil 5.7.	Platformunun “1800-4000” değerleri arasındaki görüntüsü .....	49

## TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Seri ve paralel manipulatörlerin karşılaştırılması.....	6
Tablo 3.1. Tasarlanan platformda kullanılan katı modeller.....	23
Tablo 3.2. Tasarlanan platformun hedefleri .....	24
Tablo 3.3. 6x6 SPM ait fiziksel parametreler .....	25
Tablo 3.4. Servo motora ait boyut ve performans bilgileri .....	25
Tablo 3.5. Model bilgisi .....	27
Tablo 3.6. Modele uygulanan kuvvetler .....	28
Tablo 3.7. Model mesh bilgisi ve görünümü.....	29
Tablo 3.8. Model Von Mises stres analizi sonucu.....	30
Tablo 3.9. Mil modeli bilgisi .....	31
Tablo 3.10. Mil modeline uygulanan kuvvetler .....	32
Tablo 3.11. Mil modeli mesh bilgisi ve görünümü .....	33
Tablo 3.12. Mil parçası Von Mises stres analizi sonucu .....	34

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Akım, (I)
N	: Newton, (kg . m/s <sup>2</sup> )
T	: Tork, (N.m)
V	: Hacim, (m <sup>3</sup> )
$\rho$	: Yoğunluk, (kg/m <sup>3</sup> )

### Kısaltmalar

DK	: Düz Kinematik
DOF	: Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)
FAA	: Federal Aviation Administration (Federal Havacılık Kurulu)
FTD	: Flight Training Device (Uçuş Eğitim Aracı)
MATLAB	: Matrix Laboratory (Matris Laboratuvarı)
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Orantılı İntegral Türetme)
SPM	: Stewart Platform Mekanizması
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
YSA	: Yapay Sinir Ağları

## **6X6 STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ TASARIMI, BENZETİMİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

### **ÖZET**

Seri ve paralel mekanizmalar günümüzde birçok alanda yoğun şekilde kullanılmaktadır. Paralel mekanizmaların en yaygın biçimde kullanıldığı Stewart Platformu, ilk olarak 1965'te D. Stewart tarafından uçak simülörlerinde kullanılmak üzere yapılmıştır. Stewart platformu, biri hareketli diğeri sabit olmak üzere iki plaka arasına yerleştirilen ve uzunluğu değiştirilebilir altı kol ile oluşturulabilir. Mekanizmada kullanılan uzuv sayısına ve bağlantı şekillerine göre hareket kabiliyeti değişiklik gösterir. Bu sistem, hava aracının uzaysal hareketlerinin gerçek zamanlı olarak uygulanmasını sağlamaktadır.

Paralel mekanizmalarda, hava araçlarındaki ötelenme ve dönme hareketlerinin gerçeğe yakın hassasiyette olması önemli bir husustur. Stewart Platform Mekanizması kullanımı tıp, deniz araştırmaları, uzay araştırmaları, otomobil eğitimlerinde ve birçok alanda gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Paralel mekanizmalar sayesinde kullanıcılar uçakların seyir durumundaki uzaysal hareketlerini gerçek zamanlı olarak hissedebilirler.

Bu çalışmada, Matlab, SimMechanics ve SolidWorks programlarının kullanımıyla 6x6 serbestlik derecesine sahip bir Stewart Platformun yazılımsal olarak ters ve düz kinematik analizi, modellenmesi, benzetimi ve gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Matlab, SimMechanics, Simülör, Stewart Platform.



## **DESIGN, SIMULATION AND PERFORM A 6X6 DEGREE OF FREEDOM STEWART PLATFORM**

### **ABSTRACT**

Serial and parallel mechanisms are used extensively in many fields today. Stewart Platform which is the most widely used parallel mechanism was first intended to be used in aircraft as a simulator in 1965 by D. Stewart. Stewart platform can be made with the use of six arms with extensible length and fixed to two plates. According to the number of limbs used in the mechanism and connections, platform shows changes in mobility. This system serves spatial movement application of an aircraft as a real time.

In parallel mechanisms, it is an important issue to have sensitivity close to the real conditions of shift and rotational movement of aircraft. Consequently, its use in medicine, marine, space research, automobile simulator and in many other fields becomes widespread day by day. Thanks to parallel mechanisms, it will allow the users to feel, in real time, the spatial movements of a navigating aircraft.

In this study, with the using programs Matlab, SimMechanics and SolidWorks, Position Controlled 6x6 Degree of Freedom Stewart Platform's inverse and forward kinematic analysis, modelling, simulation and practice is aimed.

**Keywords:** Matlab, SimMechanics, Simülâtör, Stewart Platform.

## GİRİŞ

Manipülasyon terimi nesnelerin bir amaç doğrultusunda yerinden alınması, taşınması, montajı, yerleştirilmesi ve çeşitli takımlar ile işlenmesini ifade etmektedir. Bu işlemleri gerçekleştirebilen mekanizmalar ise manipülatör olarak adlandırılır [1].

Bir manipülatörün her bir uzvuna, bir mafsal ile bağlı olan rijit gövde sayısı bağlantı derecesini ifade etmektedir. Bu durumda, her bir uzvu 2 veya daha az bağlantı derecesine sahip olan sistemler, basit kinematik zincir olarak adlandırılırlar. Ulaş'ın yaptığı çalışmada [1] belirtildiği gibi eğer uzuvlardan en az biri, taban olmamak koşuluyla 3 veya daha yüksek bir bağlantı derecesine sahip ise bu sistem bir kapalı-çevrim kinematik zincir adını alır.

Manipülatörler seri, paralel ve hybrid manipülatörler olmak üzere 3 şekilde karşımıza çıkar. Seri ve paralel manipülatörler günümüzde birçok uygulamada geniş kullanım alanları bulmaktadır. Hybrid manipülatörler ise henüz literatürde seri ve paralel manipülatörler kadar yaygın değildir, fakat gün geçtikçe bu manipülatör türü üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır. Seri ve paralel manipülatörler incelendiğinde seri manipülatörlerin paralel manipülatörlere kıyasla daha fazla kullanıldığı görülebilir. Ancak bu durum günümüzde değişiklik göstermiştir. Bu konuyu daha ayrıntılı şekilde ele alacağız.

Paralel manipülatörler 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 [2].

Kullanım alanı gün geçtikçe artan manipülatörler özellikle simülatör alanında kullanılmaktadır. Araç ve uçak simülatörlerinde bu mekanizmalar büyük önem taşımaktadır. Havacılık alanında yetiştirilecek olan pilot adaylarının eğitim süresince

edindikleri bilgileri test etme fırsatı çeşitli şekillerde üretilmiş simülatörler sayesinde gerçekleşmektedir.

Simülatörlerin pilot adaylarının yetiştirilmesinde kullanılması, adayların eğitimde kullanacakları uçaklardaki maddi ve manevi kayıpları azaltmaktadır. Uçuş eğitimi için kullanılacak simülatörde pilot adayının uçağın tüm hareketlerini gerçeğe yakın şekilde algılaması gerekmektedir.

Hareketlerden bazıları simülatör içerisinde bulunan ekranlardan görsel olarak sağlanırken, insan vücudunun uçağın ötelenme, dönme gibi hareketleri algılayabilmesi işlemi alt tarafta bulunan ve pilot adayının komutlarına göre çalışan bir paralel mekanizma tarafından sağlanır.

Bu yüksek lisans tezi altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde paralel ve seri mekanizmaların ne olduğu irdelenmiş, Stewart Platform Mekanizması ile ilgili genel bilgilere ve literatürde platform ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. İkinci bölümde ters ve ileri kinematik kavramları açıklanmış, genel bir 6x6 Stewart Platformu için örnek ters kinematik matematiksel model hesaplamaları yapılmıştır. Üçüncü bölümde gerçekleştirilen 6x6 Stewart Platformun SolidWorks programında tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yine bu bölümde platformu oluşturan parçalardan ara bağlantı elemanı ve motordan aldığı gücü hareketli platforma ileten mil üzerine uygulanan analizlerin sonuçları paylaşılmıştır. Dördüncü bölümde SolidWorks programında modellenen platformun Matlab ve Sim-Mechanics programlarında benzetimi anlatılmıştır. Beşinci bölümde 6x6 Stewart Platformun gerçekleşmesinde hangi malzemelerin kullanıldığına yer verilmiştir. Altıncı bölümde ise sonuç ve öneriler açıklanmıştır.

## 1. GENEL BİLGİLER

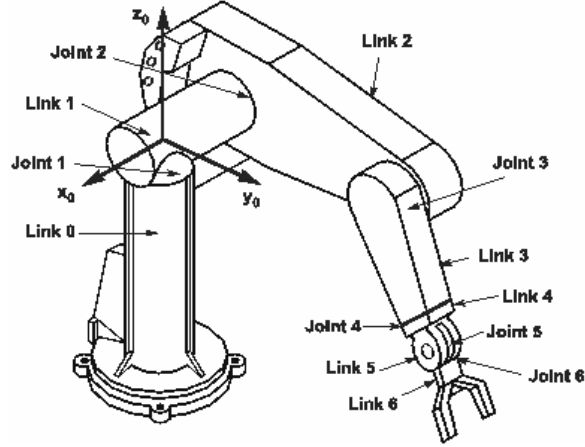
Seri manipülatörler robot manipülatörlerinin en yaygın şekilde kullanılan türüdür. Seri manipülatörler açık-çevrim kinematik zincirlere ve seri şekilde bağlı bağlantı elemanlarına sahiptir. Seri manipülatörler insan koluna benzetilebilmektedir. Seri manipülatörlerin hızlı, ivmesi yüksek olması ve tüm çalışma uzayını dolaşabilme özelliği avantajlarından bazılarıdır. Ancak her bağlantı elemanı kendinden önce gelen bağlantı elemanlarını ve aktüatörlerinin toplamını taşıdığı için enerji verimi açısından seri manipülatörler çok iyi değildir. Şekil 1.1'de PUMA model seri manipülatör verilmiştir.

Uç işlevcinin (hareketli platformun) en az iki bağımsız eleman ile sabit bir koordinat sistemine bağlanmasıyla oluşan kinematik zincire paralel mekanizma adı verilir. Bu tür kinematik zincirlerden en çok kullanım alanı bulan Stewart'ın [3] geliştirdiği mekanizmadır.

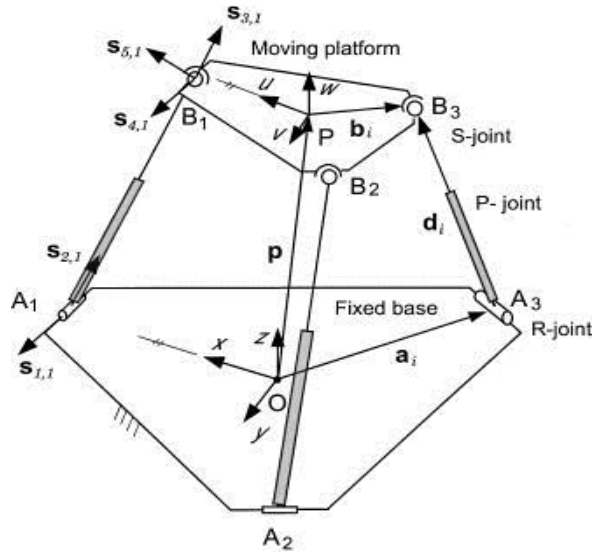
Paralel mekanizmaların hassas konumlandırma, ağır yük taşıyabilme ve yüksek rijitlik gibi avantajları bulunmaktadır. Paralel manipülatörlerde her kol kendi üzerine düşen yükü kaldırdığı için ağır yük taşıma kabiliyeti oldukça yüksektir. Güneri'nin Stewart Platform üzerine yaptığı dinamik analiz çalışmasında [4] ifade edildiği gibi azalan çalışma uzayı, zor mekanik tasarım, seri manipülatörlere göre daha karmaşık kinematik denklem hesaplamaları, karmaşık kontrol algoritmaları paralel manipülatörlerin dezavantajlarından öne çıkanlardır.

Paralel yapılar çok uzun zaman öncesinden bilinmektedir fakat bu yapılar 1960'lı yıllarda ilk olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1962 yılında Gough ve Whithall [5] lastikleri test etmek amacıyla 6 eksen lineer kaldıraç makinesini tasarlamışlardır. Bu olaydan sonra 1965 yılında Stewart paralel manipülatörler ile bir uçuş simülatörü tasarlamıştır. Bu platform Stewart-Gough veya kısaca Stewart Platform olarak bilinmektedir.

Bu tarihten sonra paralel manipulatörlerin kullanım alanı oldukça yaygınlaşmıştır. Robotik uygulamaları, medikal alanda kullanılan mikro-robotlar, işleme tezgahları, fizik-tedavi cihazları Stewart Platformunun kullanım alanlarından bazılarıdır. Şekil 1.2’de genel bir paralel manipulatör verilmiştir.



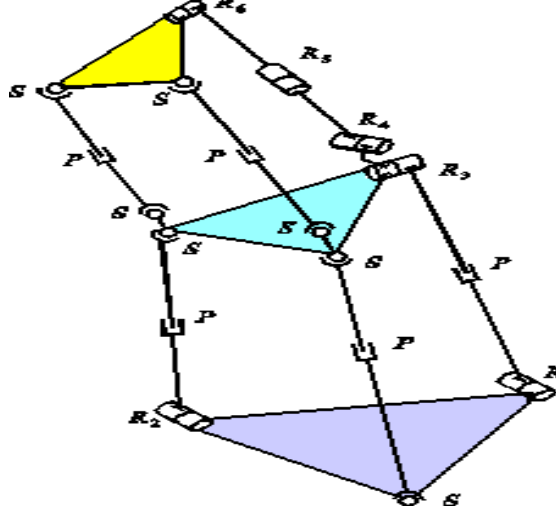
Şekil 1.1. PUMA model seri manipulatör [4]



Şekil 1.2. Genel bir paralel manipulatör [6]

Hybrid manipulatörler ise kapalı-zincir ve açık-zincir mekanizmalarının kombinasyonundan oluşan bir sistemdir. Aynı zamanda paralel manipulatörlerin gelişmiş hali olarakta bilinmektedir. Hybrid manipulatörler paralel manipulatörlerin limitli çalışma uzayı dezavantajını ortadan kaldırmıştır. Hybrid manipulatörler seri ve paralel mekanizmaların aynı anda kullanıldığı bir yapıdır dolayısıyla yüksek rijitlik ve geniş çalışma uzayı içermektedir [4]. Bu konu hakkında çalışmalar henüz

yeteri kadar olmasa da bu konuya ilgi her geçen gün artmaktadır. Şekil 1.3'te hybrid robot manipülatörü verilmiştir.



Şekil 1.3. Hybrid robot manipülatörü [7]

### 1.1. Seri ve Paralel Manipülatörlerin Karşılaştırılması

Seri ve Paralel manipülatörler karşılaştırıldığı zaman her ikisinde avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu görülecektir. Ünsal'ın yapmış olduğu çalışmada [8] mekanik tasarımların ve robotik alanında yapılan çalışmaların artması sonucu araştırmacılar ilk olarak insanın yaptığı hareketleri yapabilen robot üretimine eğilim gösterdiği ifade edilmiştir. Açık-zincir seri manipülatörler bu fikrin sonucu ortaya çıkmıştır.

İnsan kolunun sahip olduğu manevra kabiliyeti ve çalışma alanı genişliği seri manipülatörlerin en önemli avantajlarından. Ancak aynı şekilde insan kolunun avantajlarından yararlanabilen seri manipülatörler insan kolu davranışının dezavantajlarından da karşılaşabilmektedir [8].

Örneğin ağır bir yükü taşıma durumunda tek kol bu yükü kaldıramayabilir. Bu durumda insan iki kolunu kullanarak yükü kaldırma eğilimi gösterecektir.

Ağır bir yük kaldırılmaya çalışıldığı zaman titreşim oluşturmaktadır. Seri manipülatörlerde çalışma alanının genişliği de bir dezavantaj durumu ortaya çıkarmaktadır. Bu alan geniş olduğu için hassas konumlandırmada problemler

yaşanabilmektedir. Yukarıda bahsedilen problemleri ortadan kaldırmak amacıyla araştırmacılar paralel manipülatörler üzerinde çalışmaya başlamış ve çeşitli tasarımlarda üretimler ortaya çıkmıştır.

Paralel manipülatörlerin ortaya çıkışında doğa faktörleri de yer almaktadır. Örneğin seri manipülatörlerde verdiğimiz örnekte tek kol ile ağır bir yükü kaldıramayabiliyorduk. Fakat hayvanların 4 bacak üzerinde ağır yükler taşıyabildiği göz önünde bulundurularak çeşitli sistemlerin tasarlanmasına ilham kaynağı olmuştur. Bu bağlamda paralel manipülatörler ağır yükleri kaldırabilmekte, hassas konumlandırma yapabilmekte ve rijit bir görüntü sergilemektedir.

Ancak bu avantajların yanı sıra paralel manipülatörlerinde bazı dezavantajları vardır. Örneğin çalışma uzayları seri manipülatörlere göre daha dardır. Hız ve ivmelenme açısından da seri manipülatörlere göre daha geride kalmaktadır. Bir diğer dezavantaj ise bu sistemlerin paralellüğünden kaynaklanan ağır yapılarıdır. Tablo 1.1’de seri ve paralel manipülatörlerin karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 1.1. Seri ve paralel manipülatörlerin karşılaştırılması [9]

	SERİ	PARALEL
Yükleme Kapasitesi	Düşük	Yüksek
Katılık	Düşük	Yüksek
Çalışma Uzayı	Geniş	Dar
Tekillik Durumu	Önemsiz	Karmaşık
Kinematik / Dinamik Analiz	Kolay	Zor
Birim Yükte Harcanan Güç	Yüksek	Düşük
Atalet	Düşük	Yüksek
Ayarlanabilirlik	Kolay	Zor

## 1.2. Stewart Platform Mekanizması

Stewart Platform Mekanizması altı adet lineer aktüatör ile tahrik edilen paralel robot yapısıdır. Özdemir'in ifadesine göre [10] paralel bir mekanizma olan Stewart Platform makine endüstrisinde kullanıldığı gibi hava, deniz ve kara araçları için eğitim ve eğlence simülasyonlarında da kullanılmaktadır.

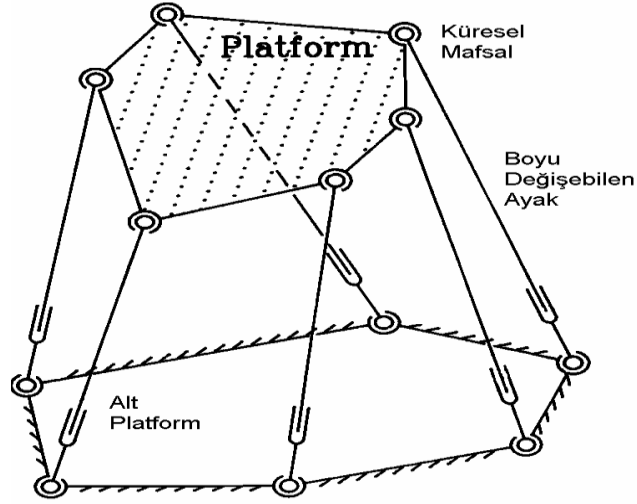
Federal Havacılık Kurallarına (FAA) göre bir teçhizatın uçuş simülasyonu olarak adlandırılabilmesi için en az bir hareketli platforma sahip olması gerekmektedir. Aksi halde teçhizat, Dongsu ve Ay'a göre [11-12], uçuş simülasyonu olarak değil uçuş eğitim aracı (FTD) olarak adlandırılmaktadır.

Literatürde bu mekanizmaya Stewart platformu dendiği gibi, tam paralel hal alması Gough'nun önerisiyle [13] olduğundan mekanizmaya Gough-Stewart platformu da denmektedir. Bu ilk mekanizma üçgen şeklinde bir üst platform, kendisine küresel mafsallarla tutturulmuş boyları değişebilen üç ayak ve bu ayaklara iki eksenli açılabilir hareket veren diğer üç ayaktan oluşmakta idi [14].

Bu gelişmelerden sonra bir çok imalat ve robotik uygulamalarda faydalandığından önemli bir araştırma alanı olarak ilgi çekmiştir. Örneğin, Hunt platformu bir paralel robot kolu olarak kullanmayı önermiş [15], Geng ve Haynes ise deneysel titreşim izolatör aleti tasarımında kullanmayı düşünmüşlerdir [16].

Bu yıllardan itibaren yoğun bir şekilde araştırma konusu haline gelen ve birçok tasarımı ortaya atılan SPM için zaman içerisinde genel bir yapı oluşturulmuştur. Bu geliştirilmiş yapı, altı adet boyları değişebilen bacakla birleştirilmiş, iki adet rijit tabla içermektedir. Ayakların her iki ucunda küresel mafsallar olabileceği gibi bir ucunda kardan mafsal diğer ucunda küresel mafsal olabilir. Genelde alt platform sabit, üst platform hareketli kabul edilmekle beraber bazı uygulamalarda alt platform hareketli, üst platform sabit olarak kullanılabilir. Bu tip uygulamalar petrol platformları ve helikopterle ağır yüklerin taşınması sırasında kullanılmaktadır [17]. Şekil 1.4'te Stewart Platform Mekanizması görülmektedir.

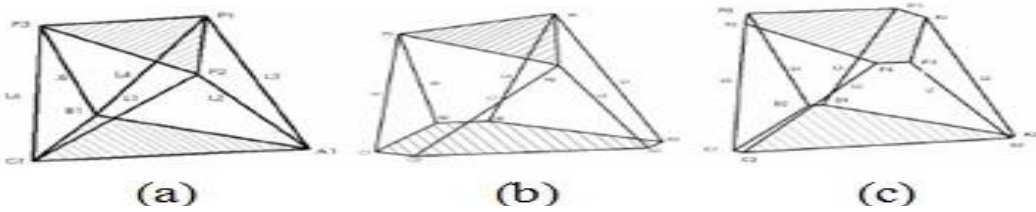




Şekil 1.4. Stewart Platform Mekanizması [14]

Platformları birbirine bağlayan, boyları değişebilen ayaklar bir pistondan oluşabileceği gibi birbirine mafsallarla bağlanmış bir dizi elemandan da oluşabilir. Ayaklar istenilen serbestlik derecesine göre alt ve üst platforma küresel, kardan veya rulmanlı yataklarla bağlanabilirler. Alt taraftaki bağlantı noktaları eş düzlemlide olabileceği gibi farklı düzlemlerde de olabilir. Bonev ve Ryu'nun çalışmalarının [18] sonucuna göre eş düzlemlide olmayan bağlantının kinematik çözümü için ekstra algılayıcılar gerekmektedir.

Stewart Platform Mekanizmaları hareketli üst tabla ve sabit alt tabladaki eklem sayılarına göre adlandırılırlar. Örneğin; uzuvlar her iki kısma farklı noktalardan bağlı iseler bu platform 6x6 Stewart Platform, eğer uzuvlar üst tarafta birleştirilmiş alt tarafta farklı noktalara bağlı iseler 6x3 Stewart Platform olarak adlandırılırlar. Stewart Platform Mekanizmasının kullanım amacına göre bağlantı şekilleri farklılık gösterebilmektedir. Şekil 1.5'te farklı mimarideki Stewart Platform Mekanizmaları verilmiştir.



Şekil 1.5. Farklı mimarideki SPM modelleri a) 3x3 b) 3x6 c) 6x6 [19]

### 1.3. Stewart Platform Kullanım Alanları

#### 1.3.1. Uçak ve araç simülatorleri

1960'lı yılların başından bu yana adı duyulan paralel manipulatorlerin uçak simülatorü olarak kullanılması fikri ilk olarak 1965 yılında D.Stewart tarafından ortaya atılmıştır. SPM'ler günümüzde havacılık ve otomotiv endüstrisine yön veren firmalar tarafından yoğun şekilde kullanılmaktadır. Şekil 1.6 ve Şekil 1.7'de sırasıyla araç ve uçak simülatorü olarak kullanılan SPM'ler verilmiştir.



Şekil 1.6. Araç simülatorü [20]

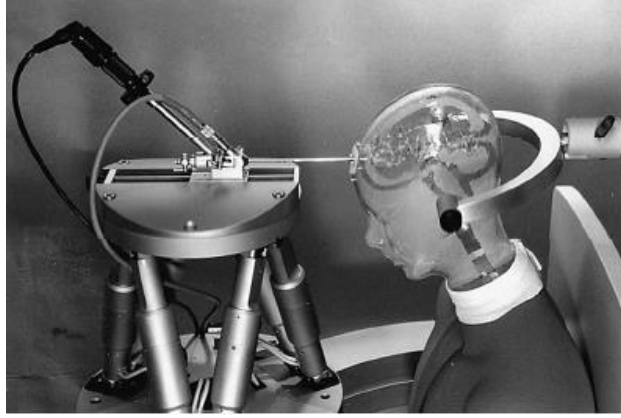


Şekil 1.7. Lufthansa uçak simülatorü [21]

#### 1.3.2. Medikal alanda hassas operasyon

Günümüzde SPM'nin kullanımı medikal dünyasında oldukça geniş çaptadır. Yoğun hassaslık gerektiren ameliyatlarda SPM'lerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Mikro

cerrahi operasyonlarda özel olarak kullanılan SPM'lerden bazıları saniyede 10mm ilerleyebilmekte, oldukça hassas konumlandırma yapabilmektedir. Şekil 1.8'de medikal alanda kullanılan SPM verilmiştir.



Şekil 1.8. Medikal alanda kullanılan SPM [22]

### 1.3.3. Diğer alanlarda kullanılan SPM'ler

Bir önceki bölümde SPM'nin en fazla kullanılan alanlarından bahsedilmiştir. SPM ayrıca uydu pozisyonlama, ölçüm alma ve fizyoterapi gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Şekil 1.9'da uydu pozisyonlamada kullanılan SPM, Şekil 1.10'da fizyoterapide kullanılan SPM ve Şekil 1.11'de ölçü almada kullanılan SPM, Şekil 1.12'de ayna pozisyonlamada kullanılan SPM çeşitleri belirtilmiştir.



Şekil 1.9. Uydu pozisyonlamada kullanılan SPM [12]



Şekil 1.10. Fizyoterapide kullanılan SPM [23]



Şekil 1.11. Ölçüm almada kullanılan SPM [24]





Şekil 1.12. Ayna pozisyonlamada kullanılan SPM [15]

Görüldüğü gibi günümüzde SPM birçok alanda kullanılmaktadır. SPM'nin bu kadar hızlı yayılması mekanizmanın doğru, güçlü ve hassas çalışmasından kaynaklı bir durumdur. Sonuç olarak önümüzdeki senelerde SPM'nin kullanım alanlarının daha da artacağını ve şu anki teknoloji ile kullanılabilen SPM'lerden daha iyileri üretilebileceğini söyleyebiliriz.

#### **1.4. Literatür İncelemesi**

Bu kısımda tezde bahsi geçen konuların literatür çalışmaları anlatılacaktır. Stewart Platform Mekanizması ve benzer paralel mekanizmaların ters kinematik hesapları (hareketli platform konumlarından bacak boylarının hesaplanması) işlem yükü ve karmaşıklık bakımından daha basit olduğundan dolayı, bu tip mekanizmalar hakkında yapılan hemen her çalışmada ters kinematik hesaplara yer verilmektedir. Düz kinematik (DK) hesap ise daha zor ve karmaşık olduğu için bu konu hakkındaki çalışmalar sınırlıdır [5,13].

Stewart Platform Mekanizmasının düz kinematik çözümü için birçok yöntem üzerinde çalışılmıştır. Konuyla ilgili olarak Nanua, Waldron ve Murthy'nin yaptığı ilk çalışma [25] Bezout yöntemi kullanılarak yapılan düz kinematik çözümdür. Bu çalışmada, 3x3 SPM için, sistemin geometrik yapısı kullanılarak üst platforma ait 6 tane bilinmeyen konum değişkeni, ikinci dereceden üç bilinmeyenli üç adet

denklemlerle ifade edilmiş, Bezout matrisi kullanılarak bu denklemler 16'ncı dereceden bir bilinmeyenli denkleme indirgenmiştir. Bu denklemin çözümünden hareketli platforma ait 6 konum bilgisi bulunmuştur.

Düz kinematik yöntemlerle ilgili başka bir çalışma da Harib ve Srinivasan'ın [26] yaptığı iteratif bir yöntem olarak öne çıkan Newton-Raphson yöntemidir. Alrashidi Mohammad'ın yaptığı çalışmada [27] bu yöntemde içinde hareketli platforma ait değişkenlerin de bulunduğu 6 adet bacak uzunluğunu veren denklem bulunmuş ve bu denklemlere Newton-Raphson yöntemi uygulanarak bu 6 değişken iterasyonlarla bulunmuştur. Chen ve Huang'ın yaptığı çalışmada [28] düz kinematik problemin çözümü için doğrusal olmayan bir gözlemci tasarlanarak sistemin durum değişkenlerinden faydalanılarak 3 eksen öteleme ve dönme miktarı öngörülme çalışılmıştır.

Liu, Fitzgerald ve Lewis'in bir çalışmasında [29] sistemin normalde düz kinematik çözümü için gerekli 30 doğrusal olmayan denklem, 3'e indirilmiş ve bu üç denklem Newton-Raphson metodu kullanılarak çözülmüştür. Tarokh'un çalışmasına göre [30] ise iki aşamalı bir çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde çevrim içi ve çevrim dışı aşamalar mevcut olup, çevrim dışı çalışma sonucunda bir tablo oluşturup, çevrim içi kısımda bu tablo kullanılarak gerçek zamanlı çözüm elde edilmiştir. Mu ve Kazerounian'ın çalışmasında [31] ise, matematikte "Homotopi" hipotezine dayanılarak bir sayısal yöntem oluşturulmuş ve bu yöntemle problem çözülmüştür.

Genetik algoritma, bağışıklık algoritması ve bulanık mantık kullanılarak oluşturulan melez bir yöntemle [32] düz kinematik problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Song ve Kwon [33] 3x6 SPM için sistemin tetrahedral yapısını kullanılarak işlem yükünü azaltmıştır. Ren, Feng ve Mills [34] iterasyon vasıtası ile çözülen düz kinematik yöntemin iterasyon süresini azaltmaya yönelik olarak öz-ayarlamalı (Self Tuning) bir yöntem oluşturulmuşlardır. 6x6 bir SPM için Huang, Liao ve Wei'nin geliştirdiği farklı bir yöntemde de [35], "Sylvester" matrisi kullanılarak oluşturulan bir algoritmada sistem 14'üncü dereceden tek değişkenli bir denkleme indirgenmiş ve çözülmüştür.

Yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Yee ve Lim [36] ileri beslemeli bir ağ kullanılarak sistem giriş ve çıkışları arasındaki ilişki

kurmuş ve bu yöntemle düz kinematik problem çözülmüştür. Yurt, Anlı ve Özkol'un çalışmasında [37] yine ileri beslemeli bir ağ kullanılarak 6x3 SPM'nin öteleme, dönme ve uzaysal verilerle eğitilmesi ile sistemin düz kinematiği çözülmüştür. Belirli bir seviyede kesinliğe sahip bir çözüm yöntemi olarak da Parikh ve Lam'ın geliştirdiği [38] YSA ve iteratif yöntemler kullanılmıştır.

#### **1.4.1. SPM dinamiği üzerine yapılmış çalışmalar**

Stewart Platform Mekanizmasının dinamiği üzerine pek çok çalışma mevcuttur. Do ve Young Newton-Euler metodunu kullanarak yaptıkları ters dinamik çalışmada [39] bacakların kütsüz ve eklemlerin sürtünmesiz olduğunu farz ederek hesaplamalar yapmışlardır. Yine aynı metot yardımıyla, eklem sürtünmeleri ve bacak ataletleri de hesaba katılarak Dasgupta ve Mruthyunjaya [40] bir çalışma ortaya koymuşlardır.

Geng ve diğerleri [41] diğer bir yöntem olarak Lagrange denklemlerini kullanmış ve sistem dinamikleri ifade edilmiştir. Liu ve diğerlerinin yaptığı başka bir çalışmada da [42] aynı yöntemle sistemin modellenmesi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. El-Khasawneh ve Ferreira [43] paralel mekanizmaların katılık ve katılık sınırlarının belirlenmesi için sonlu eleman yöntemi kullanılarak bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tsai yaptığı bir çalışmada [44] virtuel iş ve jakobiyen matrislerini kullanarak dinamik hareket denklemleri türetmiş ve denklemler ayrık olarak çözülmüştür. Piras ve diğerlerinin çalışmasında [45] yüksek hızlı paralel bir robot, sonlu eleman yöntemi tüm uzuvların elastik olduğu varsayılarak modellenmiş ve yüksek hızdan kaynaklı elastik titreşimler incelenmiştir. Denklemlerin ve değişkenlerin çokluğundan dolayı oluşan hataların giderilmesi amacıyla, Lin ve Chen'in çalışmasında ise [46] Newton-Raphson ve Lagrange yöntemleri kullanılarak SPM'nin dinamik denklemlerini sembolik olarak üretilmesi amacıyla bir prosedür oluşturulmuştur. Genelleştirilmiş momentum yaklaşımı kullanılarak [47] bir SPM'nin dinamik modeli oluşturulmuş, atalet, koriolis ve merkezci ivmelerin analitik ifadeleri elde edilmiştir.

#### 1.4.2. Konum kontrolü üzerine yapılmış çalışmalar

Birbirine paralel kinematik bir zincir şeklinde bağlanmış tahrik elemanları sistemin kinematiğini bir hayli karmaşıklaştırdığından, bu mekanizmanın kontrolü üzerine çok sayıda algoritmalar ortaya konulmuştur.

Yurt ve diğerlerinin çalışmasında [48] Temel bir kontrol metodu olan PID, 6x3 SPM için her bir bacak için ayrı ayrı olmak üzere uygulanmış, genetik algoritma kullanılarak katsayılar optimize edilmiştir. Li ve Salcudean'ın çalışmasında [49] hidrolik bir 6x6 SPM'yi, yine bu yöntemle kontrol etmişlerdir. Yingjie ve diğerleri [50] bacaklarını motorlu bir kablo sisteminin oluşturduğu bir SPM için uygulanan PID kontrole ek olarak referans girişlerine öteleme, dönme ve bozucu etkiler geri beslenerek bir kontrol yöntemi uygulamışlardır. Su ve diğerleri [51] hidrolik bir hareket sistemine sahip SPM için PD tabanlı bir denetleyicinin yanı sıra yüksek hassasiyet için bozucu etkilere dayanıklı bir denetleyici uygulamışlardır.

Bulanık mantık metodu L.A. Zadeh [52] tarafından ortaya konulmasından sonra pek çok alana uygulanmıştır. Chung ve diğerlerinin çalışmasında [53] 6x6 hidrolik tahrikli bir SPM için 25 elemandan oluşan bir kural tablosu düzenlenmiş ve bulanık mantık denetleyici sisteme uygulanmıştır. Lin ve Tsay'ın yapmış olduğu bir çalışmada [54] piezo-elektrik tahrik elemanlarına sahip bir başka 6x6 SPM ise geri besleme lineerleştirmesini yapan ve 81 elemandan oluşan bir bulanık mantık denetleyici ile 49 elemandan oluşan bulanık mantık denetleyici birlikte kullanılarak hassas kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Li ve Gatland'ın çalışmasında [55] geleneksel bulanık mantık kontrol metodu, PID tip kontrol yöntemi ile birleştirilerek daha verimli ve dayanıklı denetleyiciler ortaya konmuştur. Benzer olarak Mudi ve Pal [56] denetleyici giriş ve çıkış katsayıları bulanık mantık ile ayarlanan iki kural tabanına sahip bulanık denetleyici, modelden bağımsız sistemi dayanıklı bir şekilde kontrol etmesi için geliştirilmişlerdir. Yapay sinir ağları kullanılarak SPM'nin düz kinematiği ve kontrolü üzerine çalışmalar [57] ortaya konulmuştur. Sadjadiyan ve diğerleri [58] SPM'nin bulanık mantık kontrolörünün kural tabanını değiştirmeden daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi açısından hat üzerinde eğitim yapabilen bir YSA algoritması geliştirilmişlerdir.



### 1.4.3. Kuvvet kontrolü üzerine yapılmış çalışmalar

İnsan ve robot etkileşimi zamanla yeni kontrol gereksinimleri getirmiş ve getirmektedir. Bunlardan birisi de kuvvet kontrolüdür. Zeng ve Hemami kuvvet kontrolü üzerine yaptığı çalışmalarda [59] en basitinden en karmaşığına kadar birçok yöntem üzerinde inceleme ve karşılaştırmalar yapmışlardır.

Salisbury çalışmasında [60] kuvvet kontrol yöntemlerinden birisi olan aktif katılık kontrolü 3 öteleme ve 3 dönme eksenini için program yardımıyla katılığın büyüklüğü değiştirilebilecek şekilde uygulamıştır. Hogan ise sistemin hızı ile sisteme etkiyen kuvvet arasındaki ilişkiyi [61] matematiksel olarak ifade etmiştir. Sistem hızının kuvvete oranı olarak ifade edilen mekanik empedansın tersi olarak Admitans kuvvet kontrol yöntemi [62] ortaya konmuştur. Benalli ve diğerleri endoskopik cerrahi için pnömatik bir manipülatör olarak 6x6 SPM geliştirmiş [63], endoskop ile yüzey arasındaki ilişki kuvvet kontrol algoritması ile sağlamışlardır.

Mikro cerrahi için de endüstriyel bir robot koluna 6 eksenli paralel bir robotun eklenmesiyle oluşturulan sistem [64], yine bir başka paralel manipülatör vasıtasıyla haptik (dokunsal) kontrol uygulaması yapılmıştır.

Kuvvet kontrolü ve dokunsal kontrol yöntemleri insan-makine ilişkisi teşkil ettiğinden rehabilitasyon sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ayak bileği rehabilitasyonu için pnömatik 6x6 SPM [65], kullanıcı ara yüzü ile birlikte kullanılmıştır. Bilek rehabilitasyonu için de 3 eksenli paralel bir robot geliştirilmiş [66,67], terapist etkisi de eklenerek sistemin performansı incelenmiştir.

Kuvvet kontrol algoritmaları çeşitli sistemlere uygulanırken bu yöntemlerinin kararlılıkları da incelenmiştir. Katı satırlarla temas halinde bulunan ve kuvvet kontrol algoritmaları ile kontrol edilen robotlar genellikle kararsız hale geçebilmektedirler. An ve Hollerbach robotların çevreleriyle olan ilişkilerinin kuvvet kontrolünün kararlılığına olan etkilerini incelemek için [68] tek eklemlili bir robot kullanmışlardır. Hayward ve Astley'in çalışmasında da [69] dokunsal ara yüzler için çeşitli performans ölçütleri ortaya konmuştur.

#### **1.4.4. SPM benzetim araçları ile ilgili yapılan çalışmalar**

Ovayolu [2, 70], 6x6, 6x3, 4x4, 5x5 GSP (Genel Stewart Platformları) 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.

Korkmaz [2, 71], paralel manipulatörleri eklem esnekliği ile beraber modelleyerek yörünge takip kontrolünü gerçekleştiren bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Örnek olarak üç serbestlik dereceli, iki bacaklı bir düzlemsel paralel manipulatör ele alınarak Matlab ve Simulink yazılımları ile benzetimi gerçekleştirilmiştir.

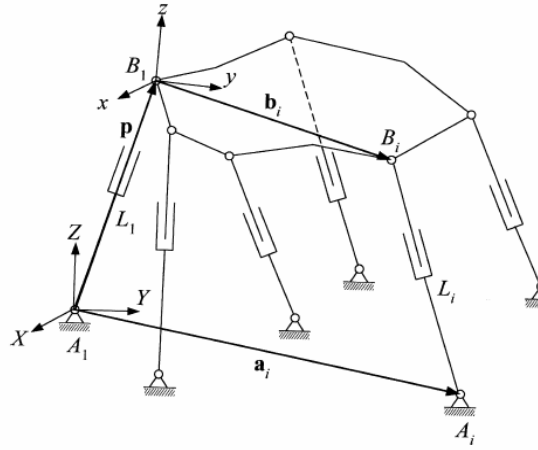
Karahan [2, 72], seri ve paralel robotlar için yörünge kontrolü sağlayan, parçacık sürü eniyileme (PSO) tabanlı farklı kontrolörlerin tasarımını yapan bir doktora tezi hazırlamıştır. 6 serbestlik dereceli Stewart Platformun dinamik modelinde kullanılmak üzere Jacobian matrisi iki farklı şekilde elde edilmiştir. Sistemin dinamiği Matlab-Simulink ortamında modellenip, fiziksel robot üzerinde model doğruluğu için yörünge deneyleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

## **2. GERÇEKLEŞTİRİLEN SPM'NİN KİNEMATİK ANALİZİ**

Paralel mekanizmaların kinematik analizi incelenirken temel iki kinematik problem ile ilgilenilir. Bunlardan birincisi düz kinematik problem olup, bacak boyları verildiğinde hareketli üst platformun sabit alt platforma göre ötelenme ve yönelmesini bulmaktır. Burada üst platformun köşelerini veren vektörün ve vektörleri üst platformun koordinat sisteminden alt platformun koordinat sistemine geçiren dönme matrisinin bulunması gerekmektedir. Düz kinematik problem önemlidir çünkü belirli bacak boylarında platformun alabileceği tüm konfigürasyonların bilinmesi gerekir. Diğer ise ters kinematik problem olup, üst platformun konum ve yönelmesi bilindiğinde o konum ve yönelmeyi verecek bacak boylarının bulunmasıdır. Seri ve paralel mekanizmalar arasındaki zıtlık burada da devam eder. Seri mekanizmalarda düz kinematik problem kolay, ters kinematik problem karışık iken burada tam tersidir, yani düz kinematik problem oldukça karışık, ters kinematik problem ise son derece kolaydır. Pek çok araştırmacının çalışmasına bakarak, paralel mekanizmalarda düz kinematik problemin çözümünün tek olmadığı söylenebilir. Bu demektir ki bir giriş, yani bacak boyuna karşılık birden fazla konfigürasyon mevcuttur. Ters kinematik problemin ise çözümü tektir, yani bir üst platformun bir konfigürasyonu sadece bir giriş ile oluşabilir [6].

### **2.1. Gerçekleştirilen 6x6 SPM'nin Ters Kinematik Analizi**

Bu kısımda genel bir 6x6 SPM modelinin ters kinematik analizi anlatılacaktır. Sistemin analizi temelde bilgisayar ortamında benzetim verilerinden alınan bilgilere göre yapıldığından platformun kinematik ve dinamik analizlerine bu kısımda detaylı olarak yer verilmeyecektir. Yıldız İ. [73] Matlab-SimMechanics programında yapmış olduğu benzetim sonucu elde edilen verileri yine Matlab yazılım programında işleyerek 6x6 SPM'in ters ve düz kinematik analizlerini yapmıştır. Güneri B. [4] genel bir 6x6 DOF (Degree of Freedom) modelindeki SPM'nin ters kinematik analizini aşağıdaki gibi ifade etmiştir.



Şekil 2.1. 6x6 DOF Stewart Platform [4]

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi modelde bulun 6 adet uzuvdan her biri spherical-prismatic-spherical bağlantılara sahiptir. Hareketli platform üzerinde sistemin hareket koordinat eksenleri olan x, y ve z eksenlerine sırasıyla u, v ve w birim vektörleri atanmıştır. Bu durumda rotasyon matrisi şu şekilde yazılabilir :

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} U_x & V_x & W_x \\ U_y & V_y & W_y \\ U_z & V_z & W_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Rotasyon Matrisinin birimleri ortogonal koşulları sağlamalıdır :

$$U_x^2 + U_y^2 + U_z^2 = 1$$

$$V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 = 1$$

$$W_x^2 + W_y^2 + W_z^2 = 1$$

(2.2)

$$U_x V_x + U_y V_y + U_z V_z = 0$$

$$U_x W_x + U_y W_y + U_z W_z = 0$$

$$V_x W_x + V_y W_y + V_z W_z = 0$$

$a_i = [a_{ix} \ a_{iy} \ a_{iz}]^T$  and  ${}^B b_i = [b_{iu} \ b_{iv} \ b_{iw}]^T$  burada  $a_i$  eşitliği, sabit yapı üzerindeki  $A_i$  noktasının pozisyon vektörlerini belirtmektedir.  ${}^B b_i$  eşitliği ise hareketli yapı üzerindeki  $B_i$  noktasının pozisyon vektörlerini vermektedir. Dolayısıyla Şekil 2.1 için kapalı döngü denklemi şöyle yazılabilir :

$${}^A B_i = p + {}^A R_B {}^B b_i - a_i \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'te "p" sabit tabana bağılı olan hareketli platformun konumunu belirten pozisyon vektörüdür.  $i^{\text{th}}$  uzvunun  $d_i$  uzunluğunu hesaplayabilmek için A,B, nin ürettiği nokta kendisini götürür. Bu işlemden sonra şu eşitlik elde edilir :

$$d_i^2 = [p + {}^A R_B {}^B b_i - a_i]^T [p + {}^A R_B {}^B b_i - a_i] \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.4)$$

Ters kinematik problemi için, pozisyon vektörü olan p ve rotasyon matrisi  ${}^A R_B$  bilinmektedir. Uzunlukları ise hesaplanacaktır. Denklem (2.4) genişletilirse ve sonucun karekökü alınırsa, uzuv uzunluklarını bulmak için aşağıdaki gibi genel bir ifade elde edilir :

$$d_i = \sqrt{\pm p^T p + {}^B b_i^T {}^B b_i + a_i^T a_i + 2p^T {}^A R_B {}^B b_i - 2p^T a_i - 2 [{}^A R_B {}^B b_i]^T a_i} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5) konum uzunluklarını hesaplayabilmek amacıyla her bir uzuv için 6 kez yazılır. Denklemden de görüldüğü gibi iki olası çözüm mevcuttur ancak negatif uzuv uzunluğu uygulanabilir olmadığından pozitif olan dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada daha önce belirtildiği üzere 6x6 SPM'nin düz kinematik analizi benzetim programlarından alınan verilere ve platformumuzun özelliklerine göre yapılmıştır. Platformun dönme açıları, öteleme vektörleri, sabit alt platformun köşe noktalarının konumları, üst platformun köşelerinin üst platformun eksen takımına göre konum vektörleri ve üst platformun köşe noktalarının konumları ve bacak boyları alınmış, Yıldız İ. [73] çalışmasında yer alan Matlab yazılım kodlarıyla yine aynı programda işlenmiştir. Matlab' ta 6x6 SPM ters kinematik analiz için yapılan programlama Ek-A'da gösterilmiştir.

## 2.2. Gerçekleştirilen 6x6 SPM'nin Düz Kinematik Analizi

Düz kinematik problemin çözümünde, verilen bacak boyuna karşılık gelen hareketli platformun konum ve yönelim bilgileri hesaplanmaktadır. Düz kinematik problemin çözümü ters kinematik problemin çözümüne göre oldukça zordur [74, 75]. Çünkü paralel mekanizmalarda belirli bacak boylarına karşılık gelen birden çok konfigürasyon mevcuttur. Ayrıca SPM düz kinematik analizi genellikle yüksek dereceli doğrusal olmayan denklemler içermektedir. Genellikle de bu denklemlerin

kapalı form ve özgün çözümleri yoktur [74, 76-79]. Dasgupta ve Mruthyunjava yapmış oldukları çalışmalarında [74-80] 6-4 SPM gibi karmaşık yapılarda düz kinematik problemin kapalı formda çözüm sayısının 40 adet olduğunu ifade etmişlerdir. Raghavan yaptığı çalışmada [74, 81], genel SPM (6x6 SPM) düz kinematik probleminin karmaşık sayılar çözüm kümesinde 40 adet farklı çözümünün olduğunu sayısal olarak ortaya koymuştur. Husty [74, 82], genel SPM düz kinematik probleminde uzaysal kinematik eşleşmeyi kullanarak geliştirdiği algoritma ile tek değişkenli 40'ıncı derece polinom elde etmiştir. SPM kinematik analizi ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğu düz kinematik problemin çözümü üzerine yoğunlaşmaktadır [74, 83].

Mekanizmanın çalışma uzayını belirlemek için normalde düz kinematik yöntem gereklidir. Ancak paralel mekanizmaların çalışma uzayı analizleri söz konusu olduğunda (özellikle ayırıklaştırma yöntemi ile çalışma uzayı analizlerinin araştırma çalışma uzayındaki her bir düğüm noktası için ters kinematik çözüm gerektirmesi ve bunun da çok zaman alıcı olmasına rağmen) basitliği nedeniyle ters kinematik yöntem kullanılmaktadır [74, 84].

Düz kinematik analiz hem SPM'nin konum kontrolü hem de hareketli platform üzerine yerleştirilen uç organın hız kontrolü açısından gereklidir. Düz kinematik yöntem gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında, görev uzay kontrolünde, kalibrasyonda ve hareket planlamada kullanılmaktadır. Eğer mekanizmanın altı bacağına uzunlukları uygun şekilde kontrol edilirse hareketli platform arzu edilen yörüngeleri izleyebilir [74, 85].

Düz kinematik yöntem mekanizma yol planlamalarında da kullanılmaktadır. Yol planlamasının asıl amacı; başlangıç noktasından son noktaya kadar bir yörünge bulmaktır. İstenen yörünge gerektirdiği hareket mümkün olduğunca yumuşak olmalı, konumda, hızda, ivmelenmede keskin değişimlerden kaçınılmalıdır. Çünkü çalışma ortamında istenmeyen engeller ve tekillikler mevcut olabilmektedir. Tekillik bölgelerinden kaçınmak ve uç organ ile çalışma ortamındaki muhtemel engeller arasındaki mesafenin hesaplanması amacıyla Parsa ve arkadaşları [74, 86], ters kinematik verilerle eğitilmiş yapay sinir ağını düz kinematik problemi çözmek için kullanmışlardır. İstenen yörünge her bir adımında mafsal açıları için düz

kinematik problemi çözerek çarpışma olup olmayacağını, söz konusu mesafe ile engelin ve tekil noktanın konumunu karşılaştırarak teyit etmişlerdir.

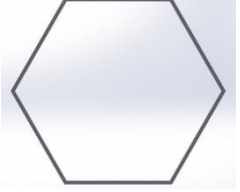





Mekanik basitliği SPM'ye birçok mühendislik uygulaması için potansiyel sağlamasına rağmen düz kinematiğinin karmaşıklığı, onun gerçek zamanlı endüstriyel uygulamalar için kullanılmasını sınırlamaktadır. Düz kinematik problemin çözümü için birçok araştırmacı tarafından analitik [74, 87-88] ve sayısal yöntem [74, 89-90] esaslı çalışmalar yapılmıştır. Analitik esaslı çalışmalar yüksek dereceli doğrusal olmayan denklemlerin çözümünü gerektirmekte iken sayısal yöntem esaslı çalışmalar da iyi bir başlangıç değeri ile çok sayıda iterasyon gerektiren zaman alıcı çalışmalardır. Bu durumlar da SPM'nin yüksek hızlı gerçek zamanlı mühendislik uygulamaları için kullanımını elverişsiz hale getirmektedir [74, 91].

Sistemin ters kinematik analizi gibi düz kinematik analiz işlemide Yıldız İ. [73] çalışmasında yer alan Matlab yazılım kodlarıyla yine aynı programda yapılmıştır. Matlab'ta 6x6 SPM düz kinematik analiz için yapılan programlama Ek-B'de gösterilmiştir.

### 3. GERÇEKLEŞTİRİLEN PLATFORMUN MODELLENMESİ

Bu çalışmada gerçekleştirilen 6x6 Stewart Platformunun modellenmesi SolidWorks programı ile gerçekleştirilmiştir. Platformu oluşturan alt taban, üst taban, bağlantı elemanları, mafsallar, motor tutucuları ve genel iskelet yapısı bu program kullanılarak modellenmiştir. Tablo 3.1’de tasarlanan platformda kullanılan katı modeller gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Tasarlanan platformda kullanılan katı modeller

	
1- Alt tabanlı iskelet	2- Üst taban
	
3- Bağlantı elemanı (motor ve uzuv)	4- Bağlantı elemanı (motor ve uzuv arası)
	
5- Bağlantı elemanı (iki motor arası)	6- Motor tutucu



Tablo 3.1’de belirtilen katı modeller ölçülendirilerek çizilmiştir. Ölçülendirme aşaması platformu oluşturan temel yapıların uyum içerisinde çalışması için önem arz etmektedir. Ölçülendirme aşamasında yaşanabilecek uygunsuzluklar platformun birleştirme işleminde problemlere yol açacaktır. Bu problemlerden bazıları platformun düzgün hareket edememesi, platforma fazla yük binmesi, platform parçalarının birbiri ile sürtmesi gibi sayılabilir. Bir diğer önem arz eden konu ise ölçülendirilmesi yanlış yapılan katı modeller dayanım analiz testinde yanlış sonuçlar verecektir ve buda platformun benzetilmesi ve gerçekleştirilmesi açısından büyük dezavantajlar ortaya çıkaracaktır. Ölçüsü yanlış girilen modelin ağırlığı, uzunluğu, genişliği, ağırlık merkezi gibi önem arz eden parametreleri de yanlış olacağından analiz sonuçları gerçekten uzak olacaktır. Ek-C’de tasarlanan platformda kullanılan katı modellerin ölçülendirilmiş halleri detaylı olarak verilmektedir.

Ölçülendirme işlemi sonlandırıldıktan sonra parçalar dayanım analiz testine tabii tutulmuştur. Bu testi yapmanın amacı platformu oluşturan parçalara çalışma esnasında binen yükün parçalara herhangi bir zarar verip vermeyeceğini sanal ortamda görebilmektir. Örneğin platformda kullanılan motorların belli bir tork kuvveti mevcuttur. Platforma bu değeri kaldıramayacak bir yük konulduğu zaman motorlar aşırı çalışma eğilimi gösterecek ve bütünleşik yapıda bazı esnemelere hatta kırılmalara kadar yol açabilecektir. Tablo 3.2’de tasarlanan platformun tasarım hedefleri ifade edilmektedir. Tablo 3.3’te ise platformun fiziksel parametreleri belirtilmiştir.

Tablo 3.2. Tasarlanan platformun hedefleri

<b>Tasarım Hedefi</b>	<b>Amaç</b>
Kaldırılabilir maksimum yük miktarının belirlenmesi	Platformun uygun koşullarda çalışmasını sağlamak
Kullanılan Motorlardan el edilen toplam torkun hesaplanması	Platformun yük kaldırma kapasitesinin anlaşılabilmesi
Platformun serbestlik derecesinin belirlenmesi	Platformun hareket kabiliyetini ve çalışma uzayının hesaplanması
Tasarlanan parçaların dayanım analizinin yapılması	Maksimum uygulanabilecek yüke karşı katı model parçaların tepkilerinin incelenmesi

Tablo 3.3. 6x6 SPM ait fiziksel parametreler

Üst platform ağırlığı	0,784kg
Üst platform yarıçapı	0,375m
Alt platform yarıçapı	0,400m
Motor mil ağırlığı	0,145kg
Motor gövde ağırlığı	0,05kg
Uygulayabileceği maksimum tork	12,76 Nm

Tasarlanan platformda 12 adet MG996R tipi servo motor kullanılmıştır. MG996R tipi servo motorlar yüksek torklu ve yaklaşık olarak 120 derece dönebilme kabiliyetine sahiptir. Platformun üretiminde kullanılan bu motorların en büyük avantajı yazılım ile kolayca kullanılabilmesidir. Aynı zamanda hafifliği ve ucuz maliyeti avantaj olarak sayılabilir. Daha yüksek torklara maruz kalabilecek sistemler için kullanılacak olan motorlarda sistem yapısının çalışma şekline göre değişiklik gösterecektir.

Yapılan hesaplamalar sonucu motorların tork değerleri ele alınarak platforma uygulanabilecek maksimum kuvvet değerleri hesaplanmıştır. Tablo 3.4'te gerçekleştirilen SPM'de kullanılan motorların boyut ve performans bilgileri verilmektedir.

Tablo 3.4. Servo motora ait boyut ve performans bilgileri

Ağırlık	0,055kg
Ölçüler	40,7 x 19,7 x 42,9 mm yaklaşık
Maksimum tork	11kgf.cm (6V)
Maksimum çalışma hızı	0,14 s/60 <sup>0</sup> (6V)
Çalışma gerilimi	4,8 V-7,2 V
Çalışma akımı	500mA - 900mA (6V)
Ölü bant genişliği	5µs
Çalışma sıcaklığı	0 <sup>0</sup> C - 55 <sup>0</sup> C

### 3.1. Platform Parçalarının Analizi

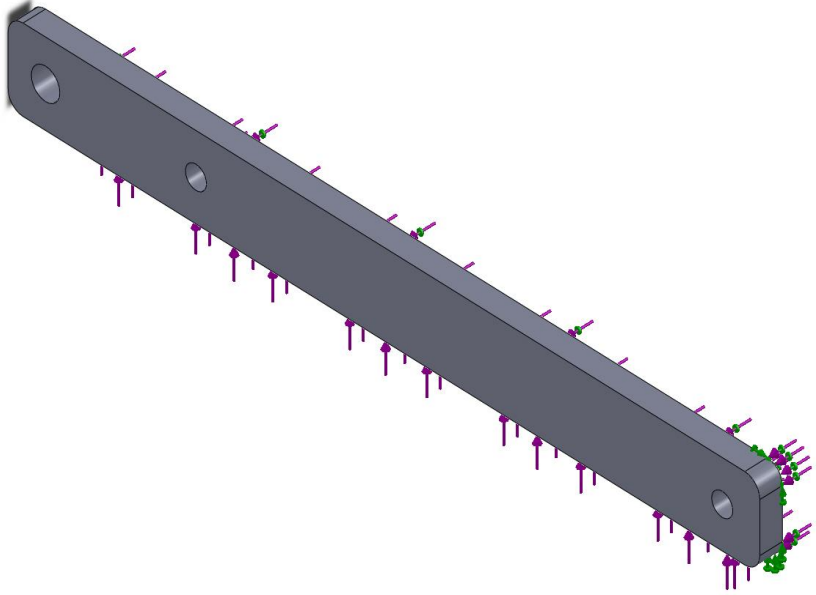
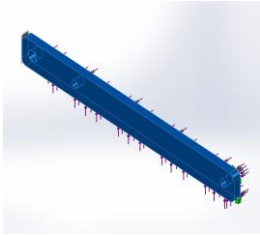
Tasarlanan platformun bir önceki bölümde de belirtildiği üzere tasarım hedeflerine ulaşabilmesi için kullanılacak olan malzemeler üzerinde bazı analizler gerçekleştirilmiştir. Sanal ortamda yapılan analizler yorumlandıktan sonra optimum tasarım hedefine ulaşılan değerler bu bölümde açıklanmıştır.

Platformun fiziksel parametreleri ve platformda kullanılan güç uygulayıcı motorların çalışma özellikleri dikkate alınarak bazı hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda platformda 12 adet motor kullanılmaktadır. Ortalama olarak her bir motor 11kgf.cm değerinde bir tork üretmektedir. Eyleyiciler üst plakaya maksimum 12,84 N.m'lik bir tork uygulayacaktır. Gerçek tasarımda olacağı gibi analizi yapılacak olan parçaların sabitlendiği noktalar dikkat edilmesi gereken bir konudur. Sabitlenen yerlerde analizlerden de anlaşılacağı üzere hasar olabilme ihtimali daha yüksektir. Üst plakaya hesaplanan 12,84 N.m değerinden daha fazla bir yük konulduğu zaman platform normal çalışma eğrisinden uzaklaşacaktır. Konulabilecek ağır bir yük platform elemanlarına ekstra baskı uygulayacak ve buda hasarlara yol açabilecektir. Bu hasarlar kırılmalara kadar yol açabilir. Elde edilen değerlere göre SolidWorks programında platformun motorlardan aldığı gücü üst plakaya aktaran ara bağlantı elemanı üzerine ve motorlardan aldığı gücü hareketli plakaya bağlayan miller üzerine düşebilecek maksimum kuvvet sonucu gerilmeleri, yer değiştirmeleri gösteren analizler yapılmıştır.

İlk olarak ara bağlantı elemanının daha sonra mil parçasının üzerine düşen gerilmeler ve yer değiştirmelerin analiz durumları anlatılmıştır. Üst plakaya 20 kg'lık (yaklaşık 200N) bir ağırlık konulması sonucu her iki parça için elde edilen analiz sonuçları tablolarda gösterilmektedir.

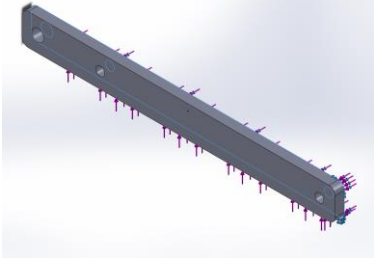
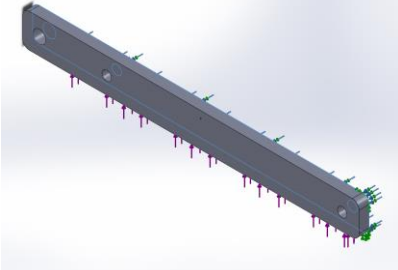
Tablolarda ilk olarak model bilgileri verilmiş, daha sonra modele uygulanan kuvvetler belirtilmiş ve sonuç olarak analiz durumları paylaşılarak yorumlanmıştır.

Tablo 3.5. Model bilgisi

			
Model ismi: Ara bağlantı elemanı Konfigürasyon: Varsayılan			
Katı Modeller			
Döküman ismi	Tipi	Hacimsel Özellikleri	Döküman adresi ve son güncelleme tarihi
Ara bağlantı elemanı 	Katı Model	Kütle:0,197711 kg Hacim:2,91873e-006 m <sup>3</sup> Yoğunluk:1020 kg/m <sup>3</sup> Ağırlık:1,91756 N	C:\Users\CEVHER\Desktop\YENİ PLATFORM TASARIM\arabaglantielemanı.SLDPRTPRT Jan 14 13:17:12 2015

Tablo 3.5’te platformu oluşturan katı model parçalardan ara bağlantı elemanının analize hazırlanma aşaması görülmektedir. Tabloda genel hatlarıyla parçanın tipi ve hacimsel özellikleri verilmiştir. Analiz işlemine başlamadan önce katı model parçanın hangi malzemeden olduğu bilgiside belirtilmelidir. Bu parçanın analizinde platformun gerçekleştirilmesinde de kullanılacak olan pleksiglas malzeme seçilmiştir.

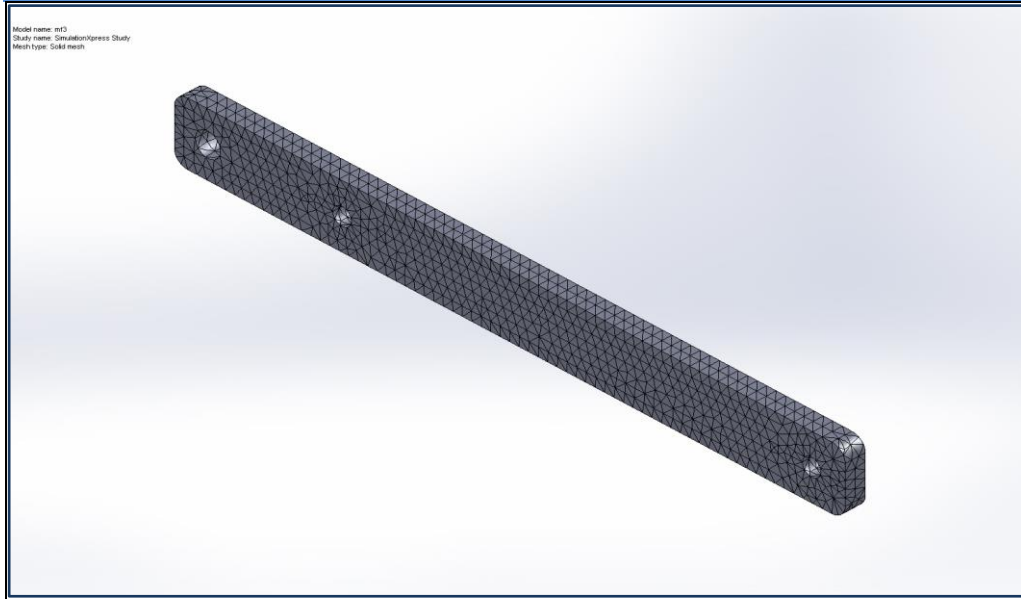
Tablo 3.6. Modele uygulanan kuvvetler

Fikstür ismi	Fikstür Resmi	Fikstür Detayları
Sabit-1		<p><b>Yüzey: 1 yüzey(ler)</b>  <b>Tip: Sabit geometri</b></p>
Yük İsmi	Yük Resmi	Yük Detayları
Kuvvet-1		<p><b>Yüzey: 1 yüzey(ler)</b>  <b>Tip: Normal Kuvvet Uygulanmış yüzey</b>  <b>Değer: 200 N</b></p>
Kuvvet-2		<p><b>Yüzey: 1 yüzey(ler)</b>  <b>Tip: Normal Kuvvet Uygulanmış yüzey</b>  <b>Değer: 200 N</b></p>

Tablo 3.6’da analizi yapılacak olan parçanın hangi yüzeylerine kuvvet uygulanacağı seçilmektedir. İlk fikstür resminde parçanın hangi noktalarından sabitlendiği gösterilmektedir. Ara bağlantı elemanı motordan alacağı gücü uzuvlar vasıtasıyla üst platforma iletmektedir. Parça üzerinde sabitlenecek iki geometri mevcuttur. Motor ve uzuv kısmından parça sabitlenmiştir. Daha sonra aynı şekilde belirtilen yüzeyler üzerinden olası bir zorlanmaya maruz kalabileceğinden bu alanlar üzerine platformumuzun motorlardan aldığı güç ile kaldırabileceği maksimum ağırlık değeri olan 200 N’luk bir kuvvet uygulanmıştır.

Tablo 3.7. Model mesh bilgisi ve görünümü

<b>Mesh tipi</b>	Solid Mesh
<b>Mesh yöntemi:</b>	Standard mesh
<b>Otomatik Geçiş:</b>	Yok
<b>Otomatik Mesh Döngüleme:</b>	Yok
<b>Jacobian noktaları</b>	4 Points
<b>Element boyutu</b>	1,42971 mm
<b>Çözünürlük</b>	0,0714857 mm
<b>Mesh Kalitesi</b>	Yüksek

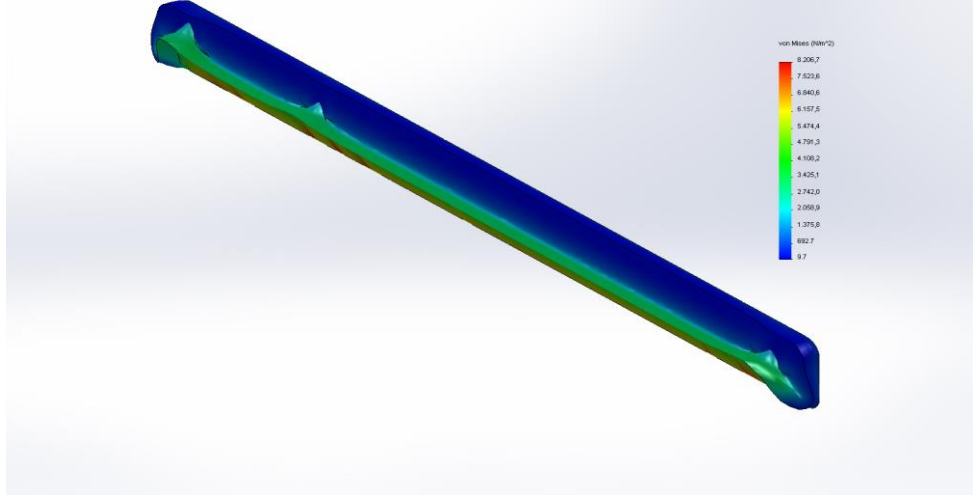


Tablo 3.7’de katı modelin mesh örgüsü görülmektedir. Dilimizde örgü ya da ağ denen mesh, bir cismin eğri yüzeylerini olabildiğince az hatayla tanımlayabilmek için bir araya gelmiş küçük, düz çokgen yüzeylerin oluşturduğu bütünleşik yüzey grubudur. Ağın gözeneklerinin sıklığı, yüzey eğriliğinin daha hassas tanımlanabilmesini sağlar [92].

Tablo 3.8. Model Von Mises stres analizi sonucu

İsim	Tip	Min	Max
Stres	VON: Von Mises Stress	9,65437 N/m <sup>2</sup> Düğüm: 13372	8206,74 N/m <sup>2</sup> Düğüm: 9493

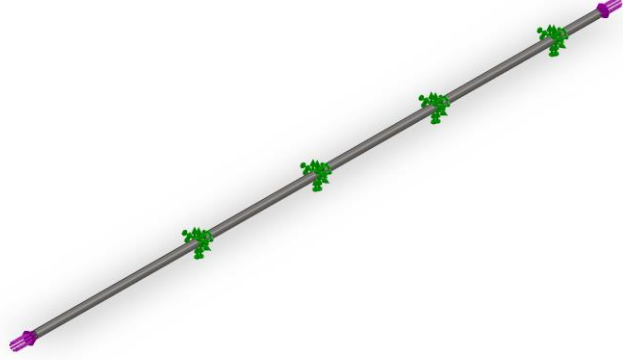
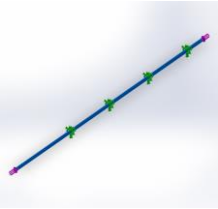
Model name: m3  
Study name: SimulationXpress Study  
Part type: Static model (stress, stress)  
Deformation scale: 1.04057e+006



Ara bağlantı elemanı-SimulationXpress Study-Stress-Stress

Tablo 3.8’de, Tablo 3.5’deki yüzeyler üzerine uygulanan kuvvetler sonucu katı modelin Von Mises stres analizine göre sonuçları gözükmektedir. Sonuçları değerlendirmeden önce aynı şekilde analizi yapılan mil modeli için elde edilen sonuçlar listelenecektir. Tablo 3.9’da motorlardan aldığı gücü hareketli plakaya ileten mil parçasının analize hazırlanma aşaması gözükmektedir. Daha sonra ilk analizi yapılan parçada izlenen işlem adımları aynı şekilde takip edilecektir.


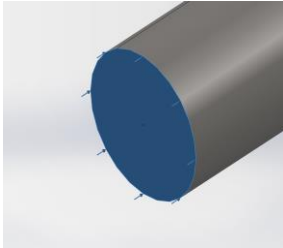
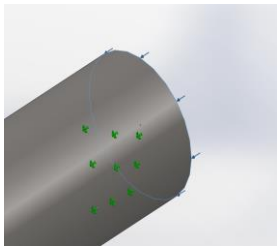
Tablo 3.9. Mil modeli bilgisi

			
Model ismi: Mil Konfigürasyon: Varsayılan			
Katı Modeller			
Döküman İsmi	Tipi	Hacimsel Özellikleri	Döküman İsmi ve Son Güncelleme Tarihi
Boss-Extrude1 	Katı Model	Kütle:0,177798 kg Hacim:2,30907e-005 m <sup>3</sup> Yoğunluk:7700 kg/m <sup>3</sup> Ağırlık:1,74242 N	C:\Users\CEVHER\Desktop\mil. SLDPRT Jan 14 10:47:47 2015



Tablo 3.9’da platformun mobil parçasını hareket ettiren milin analize hazırlanma aşaması görülmektedir. İlk parçanın analizinde olduğu gibi Tablo 3.9’da da genel hatlarıyla parçanın tipi ve hacimsel özellikleri verilmiştir. Bu parçanın analizinde platformun gerçekleştirilmesinde de kullanılan olan paslanmaz çelik malzeme seçilmiştir.

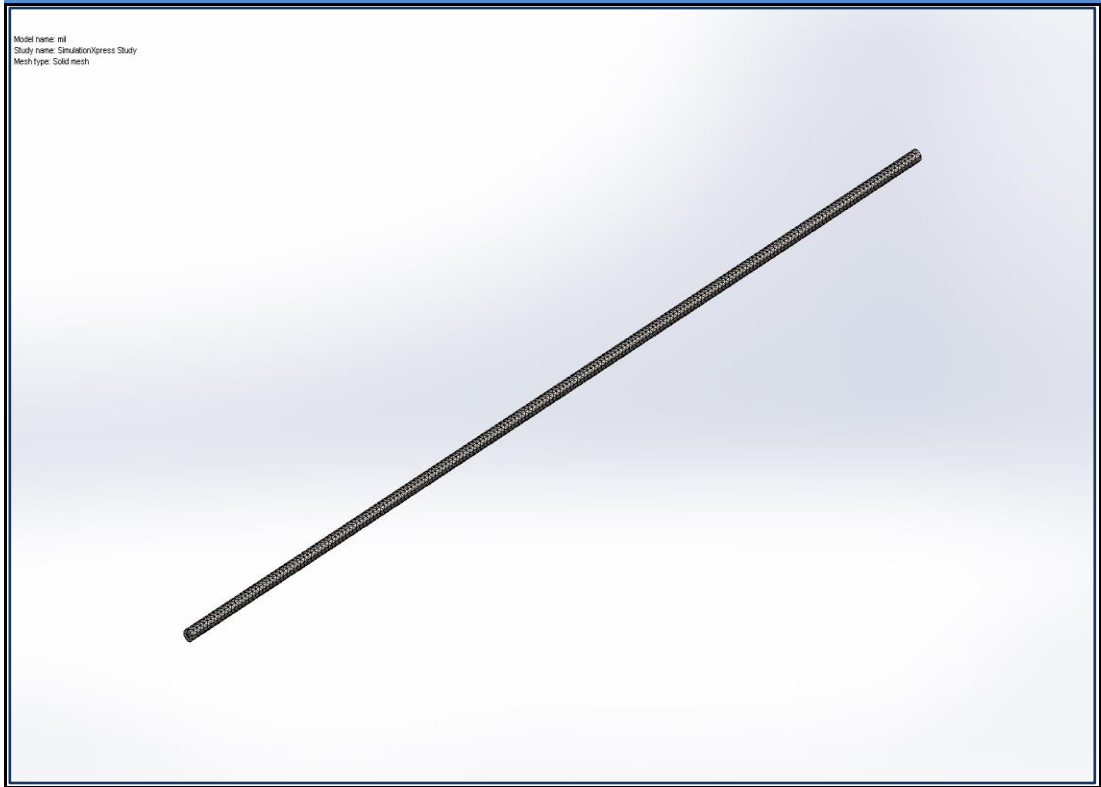
Tablo 3.10. Mil modeline uygulanan kuvvetler

Fikstür ismi	Fikstür Resmi	Fikstür Detayları
Sabit-1		<p><b>Yüzey:</b> 1 yüzey(ler)</p> <p><b>Tip:</b> Sabit Geometri</p>
Yük ismi	Yük Resmi	Yük Detayları
Kuvvet-1		<p><b>Yüzey:</b> 1 yüzey(ler)</p> <p><b>Tip:</b> Normal kuvvet uygulanmış yüzey</p> <p><b>Değer:</b> 200 N</p>
Kuvvet-2		<p><b>Yüzey:</b> 1 yüzey(ler)</p> <p><b>Tip:</b> Normal kuvvet Uygulanmış yüzey</p> <p><b>Değer:</b> 200 N</p>

Tablo 3.10’da milin hangi yüzeylerine kuvvet uygulanacağı ve uygulanacak olan kuvvetin miktarını gösteren bilgiler bulunmaktadır.

Tablo 3.11. Mil modeli mesh bilgisi ve görünümü

<b>Mesh tipi</b>	Solid Mesh
<b>Mesh Yöntemi:</b>	Standard mesh
<b>Otomatik Geçiş:</b>	Off
<b>Otomatik Mesh Döngüleme:</b>	Off
<b>Jacobian Noktaları</b>	4 Points
<b>Element Boyutu</b>	2,84861 mm
<b>Çözünürlük</b>	0,142431 mm
<b>Mesh Kalitesi</b>	Yüksek



Tablo 3.11’de mil parçasının mesh örgüsü görülmektedir. Tablo değerlerinden anlaşılacağı gibi çözünürlük değeri oldukça yüksektir. Bu durum parçanın mukavemeti için önem arz etmektedir.

Tablo 3.12. Mil parçası Von Mises stres analizi sonucu

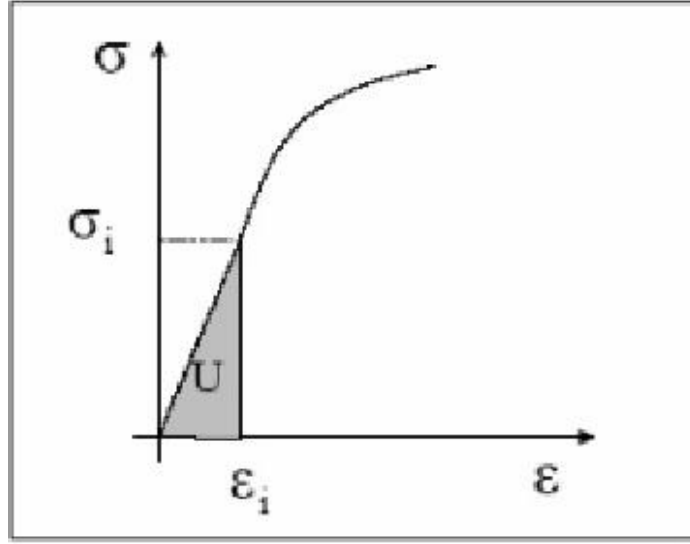
İsim	Tip	Min	Max
Stres Analizi	VON: von Mises Stress	0 N/m <sup>2</sup> Düğüm: 72	5252,10 N/m <sup>2</sup> Düğüm: 4



İlk parçada elde edilen değerler gibi Tablo 3.12’de da analiz sonuçları görülmektedir. Şimdi bu analiz sonuçlarının ne ifade ettikleri izah edilecektir. Hasar, elemanın birim hacmindeki şekil değiştirme enerjisi, tek eksenli çekme numunesinin akma dayanımına kadar yüklendiğinde oluşan şekil değiştirme enerjisine eşit olduğundan meydana gelir [93]. Hidrostatik basınç deneyinde mukavemetin sınırsız oluşu tehlikeli durumun doğmasında hacim değiştirmenin bir rolü olmadığını açıkça göstermektedir. O halde enerji esasına dayanan bir hipotez kurulurken hacim

değiştirme enerjisini hesaba katmak doğru olmaz; daha çok enerjinin cismin geometrisini değiştirmeye sarf edilen kısmı, yani biçim değiştirme enerjisi (Von-Mises) esas alınmalıdır. Bu teoriyi Von-Mises, Huber ve Hencky geliştirmiştir [94].

Şekil 3.1’de biçim değiştirme enerjisi grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Biçim değiştirme enerjisi grafiği [93]

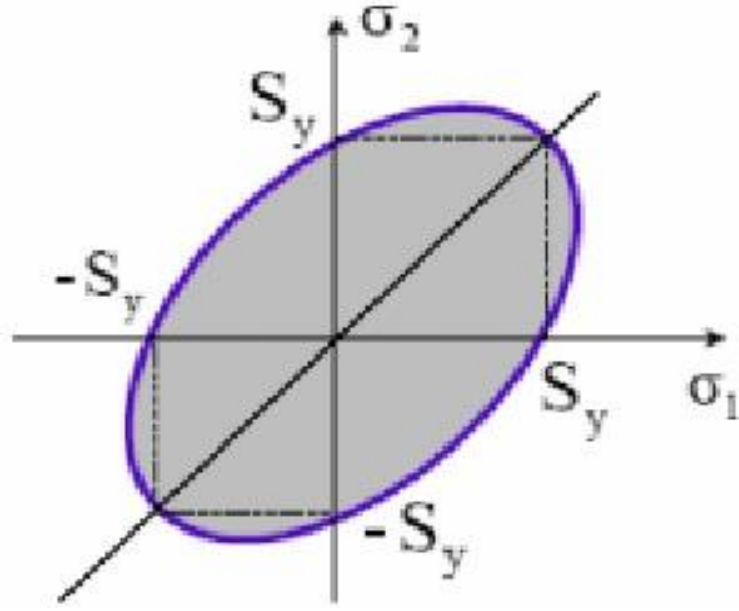
$$U = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1 + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2 + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3 \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)’de biçim değiştirme enerjisi formülü verilmiştir. Bu denklemle yola çıkarak düzlem gerilme durumunda Von-Mises stres formülü Denklem (3.2)’deki gibi yazılabilir [93]:

$$\sigma_3 = 0 \quad \text{ise} \quad \sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2}{2}}$$

Şekil 3.2’de Von-Mises diyagramı verilmektedir. Von-Mises ve arkadaşları tarafından bu hipotez [94], plastite teorisinde, akma şartı olarak başarı ile kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Von-Mises hasar (akma) diyagramı [93]

Gerilme durumu gölgeli alanda oldukça akma (hasar) meydana gelmez. Mavi çizgi ile belirtilen ve malzemenin akmaya başladığı yüzey akma yüzeyi olarak tanımlanır [93].

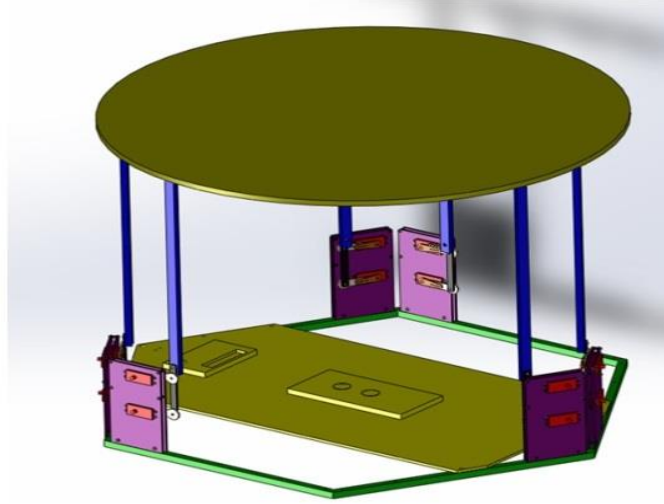
Sonuç olarak; Tablo 3.4'te verilen Von Mises grafiğinde modelin esneme payı minimum  $9,7 \text{ N/m}^2$ , maksimum  $8206,7 \text{ N/m}^2$  olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.9'da verilen Von Mises grafiğinde ise parçanın analiz değerleri minimum  $0 \text{ N/m}^2$ , maksimum  $5252,10 \text{ N/m}^2$  olarak hesaplanmıştır. Motorların uyguladığı tork ve kaldırma kuvvetine göre platformumuzun kaldırabileceği maksimum değer  $200 \text{ N}$  olarak hesaplanmıştır. Tasarımda kullanılan parçanın özelliklerine göre ve platforma maruz kalabilecek maksimum güce oranla esneme payının oldukça ideal olduğu görülmektedir. Tablo 3.4 ve 3.9'daki bar grafikte mavi renkten kırmızı renge doğru parçanın zorlanma durumu gösterilmektedir. Mavi kısım minimum, kırmızı kısım ise maksimum esneme payı değerlerini belirtmektedir. Ara bağlantı elemanı ve mil parçaları istenilen değerler arasında olup, analizi geçmiştir.

### 3.2. Platform Parçalarının Birleştirilmesi

Analiz işlemi SPM'yi oluşturan tüm katı modellere farklı durumlar (üzerlerine düşen yükler) neticesinde uygulanmıştır. SPM'nin tüm parçalarının birbiri ile uyum içerisinde çalışması mekanizmanın amacını gerçekleştirmesi açısından oldukça

önemlidir. Tüm parçaların analiz işlemi bitirildikten sonra parçaların birleştirme işlemi ile SPM son haline kavuşturulmuştur.

Tablo 3.1’de görünen tüm üç boyutlu parçalar SolidWorks programının birleştirme işlemi için kullanılan “Assembly” alanına getirildikten sonra birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda parçanın bütünleşik görüntüsü elde edilmiştir. Birleştirme işleminden sonra tüm ilişkili parçaların kontrolü yapılmıştır. Hareket eden parçaların birbirlerinin hareket kabiliyetini kısıtlamaması gerekmektedir. SPM’yi oluşturan parçalarda bu tür problemler ortadan kaldırılmalıdır. Şekil 3.3’te birleştirme işlemi yapılan SPM’nin son hali görülmektedir.



Şekil 3.3. Birleştirilmesi yapılan SPM son hali

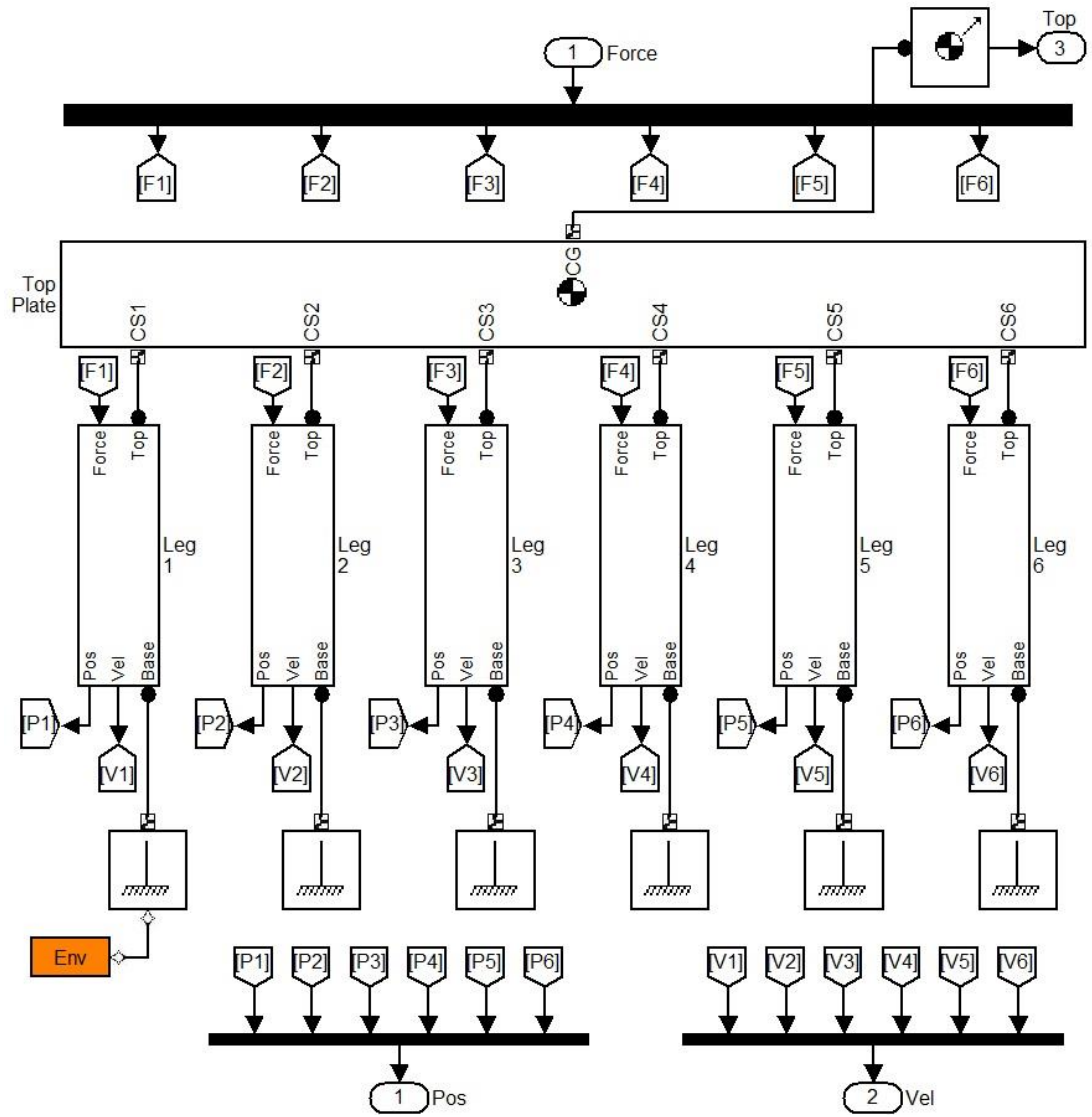
#### 4. GERÇEKLEŞTİRİLEN PLATFORMUN “SIM-MECHANICS” MODELİ

“Sim-Mechanics”, “Matlab-Simulink” altında çalışan ve mekanik sistemlerin dinamik modellerinin oluşturulmasına yarayan blok topluluğudur. Yıldız çalışmasında [73] ifade edildiği üzere bu blok topluluğu temelinde, modellenecek sisteme ait kuvvet ve momentlerin Newton dinamikleri ile üç boyutlu uzaydaki hareket ve davranışlarını belirleyen alt fonksiyonlara bağlı programcıklardan oluşmaktadır.

Sim-Mechanics” modelleme blok diyagramlarla model oluşturulması prensibine dayalıdır. Görsel olarak mekanizmanın modelinin iyi bir şekilde anlaşılmasını sağlamakla beraber, sanal gerçeklikte, sistemin motorlar, eklemler ve sensörler kullanarak yeniden oluşturulması, modelin gerçek sisteme uyumu açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Blok içeriklerinin tam olarak hangi dinamik öğeleri içerdiğinin çok iyi görülememesi, dinamik modelin matematiksel karakteristiğini anlamak açısından önemlidir. Bu sebeple, sistemin matematiği, blokların içerisinde saklıdır denilebilir [73].

Bu çalışmada gerçekleştirilen Stewart Platform tasarım, analiz ve birleştirme işlemlerinden sonra “Sim-Mechanics” ortamında modellenip, simüle edilmiştir. Benzetim ortamında tasarım farklı değerlerdeki girdiler (moment, kuvvet) ile test edilmiş, ve optimum çalışma aralığını veren çıktı (ivme, hız, konum) değerleri tespit edilmiştir. Sistemin benzetim aşaması bu bölümde detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

Şekil 4.1’de 6x6 Stewart Platform Mekanizmasının “Sim-Mechanics” modeli verilmiştir.



Şekil 4.1. 6x6 SPM “Sim-mechanics” modeli [95]

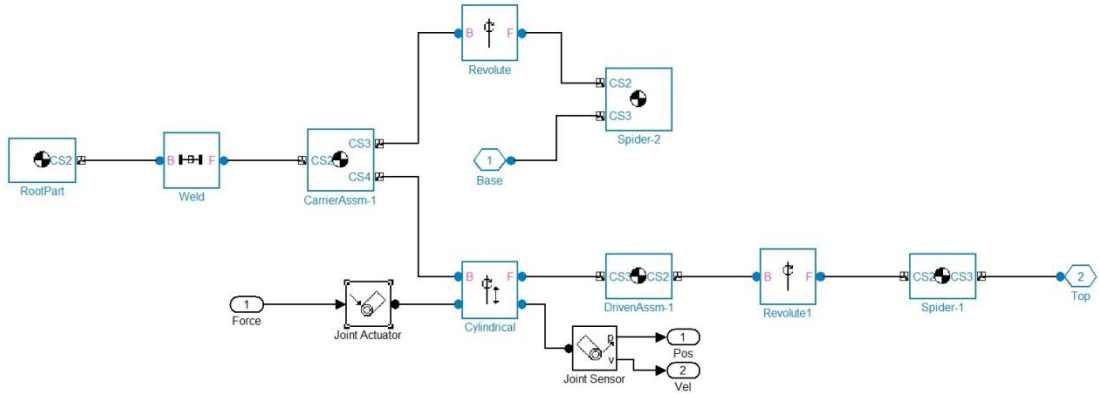
Şekil 4.1’de “Top Plate” olarak isimlendirilen blok platformumuzun mobil kısmıdır. Bu bloğa girilen parametreler yardımı ile modellenen nesneye ait kütle, atalet ve pozisyon gibi dinamik parametreler benzetim içerisinde tanımlanmış olur [73]. Belirtilen bu değerler bloklar içerisinde bir ön yükleme (m-file) dosyası ile yüklenir. “Top plate” bloğunun “CG” bağlantı noktasına bağlanan giriş ise hareketli platformun hareketli üst kısımdan konum bilgisi almak için oluşturulmuş sensör girişidir. Bloğun diğer bağlantı noktalarına ise “joint” adlı bloklar bağlanmaktadır. Bu bloklar ise gerçek sistemdeki eklemlerin “z” eksenindeki serbestliğini ifade etmektedir [73].



Yine Şekil 4.1’de görülen “Ground” bloğu ise mekanizmanın bağlandığı sabit bir noktayı ifade etmektedir. Kullanıcı diğer bloklarda olduğu gibi burada da bu noktanın koordinatlarını girmelidir. “Leg” bloğu Stewart Platform Mekanizmasının motorlarının bağlandığı her bir bacağı temsil etmektedir. “Env” bloğu ise başta yerçekimi vektörünün tanımlanması olmak üzere, mekanizmanın kaç boyutlu bir ortamda tanımlandığı, analiz metodu, doğrusallık ve görsellik bakımından mekanizmanın bulunduğu sanal ortamı temsil eder [73].

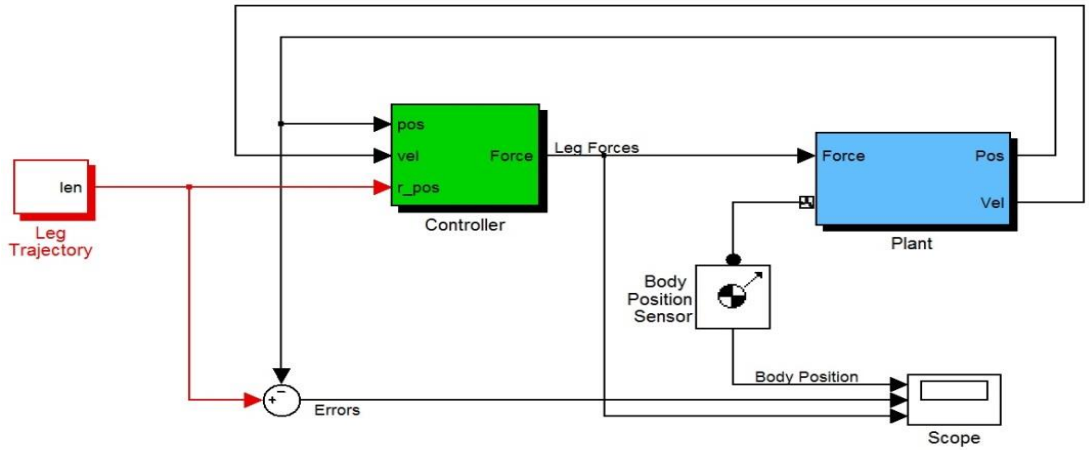
Şekil 4.2’de “Aktüatör” üst bloğu verilmektedir. “Weld” bloğu manipülatörün üst mobil platforma rijit bir şekilde bağlanmasını sağlar. Şekilde görülen modelin en kritik elemanlarından birisi olan ve “Revolute” olarak gösterilen blok sistemin başka bir sisteme veya sabit bir düzleme bağlandığı mafsalı veya eklemi temsil etmektedir. Bu blokta kullanıcı, eklemin hangi ekseninde serbestliği olduğunu girmelidir [73].

Bu ekleme bağlı bulunan “Joint sensor” bloğu ise tahrik elemanının mevcut konum ve hız bilgisini ölçmektedir. Yine aynı ekleme bağlı “Joint Actuator” bloğu kontrolcüden veya sürücüden gelen kuvvet bilgisini tahrik elemanında harekete dönüştürür.[73]



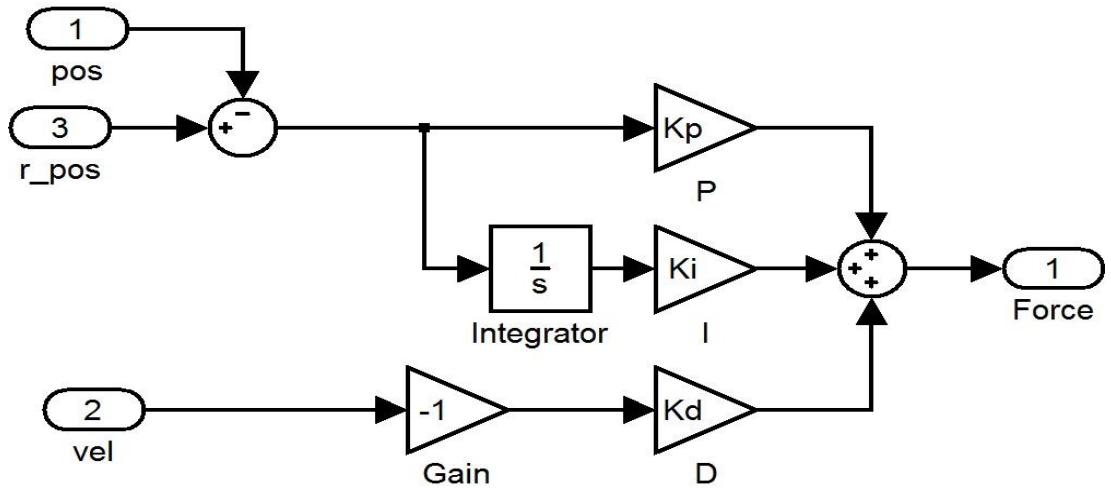
Şekil 4.2. Aktüatör üst bloğu [95]

Şekil 4.3’te platformun genel blok diyagramı verilmektedir. Şekilde “Plant” olarak ifade edilen blok Şekil 4.1’de belirtilen Sim-mechanics bloklarından oluşan yapıdır.



Şekil 4.3. Platformun genel blok diyagramı [95]

“Controller” olarak ifade edilen blok ise basit bir PID Düşük-Seviyeli Kontrolör bloğudur. PID (Proportional, Integral, Derivative) oransal-integral-türevsel denetleyici endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan genel bir kontrol döngüsü geribildirim mekanizmasıdır. Bir PID denetleyici ölçülü bir süreç içinde değişen ve istenilen ayar noktası ile arasındaki farkı olarak bir "hata" değerini hesaplar. Kontrolör proses kontrol girişini ayarlayarak hatayı en aza indirerek istenilen ayar değerine ulaşmak için çalışır [96]. Şekil 4.4'te PID kontrolörün blok diyagramı verilmektedir.

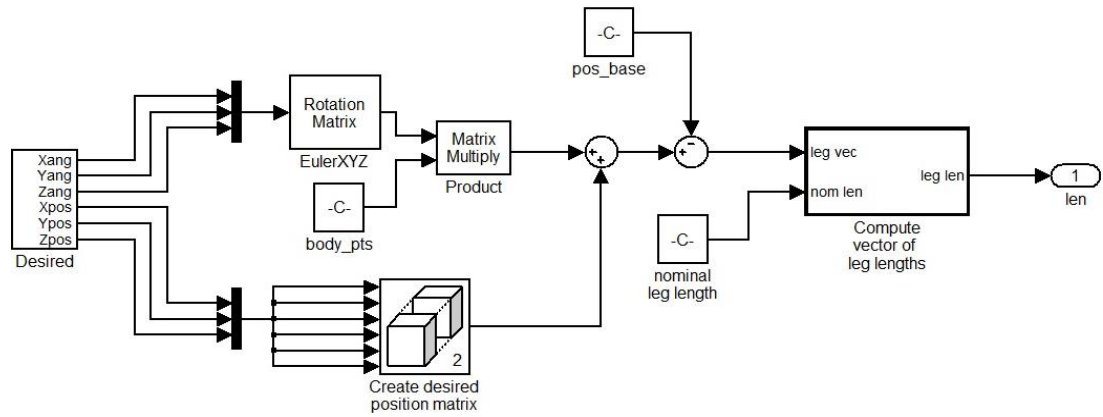


Şekil 4.4. PID kontrolör blok diyagramı [95]

Bu kontrolörde giriş bilgileri gerçek bacak pozisyonu, istenilen bacak pozisyonu ve hız olarak belirlenmiştir. Bu blok “Leg Trajectory” bloğundan gelen referans bacak uzunlukları ile mevcut bacak uzunluklarını karşılaştırır ve aradaki fark mertebesince tahrik elemanlarına kuvvet çıkışı verir [73]. Bacak pozisyonları bir “error” bloğu ve

sonrasında integral bloğu kullanılarak Kp ve Ki kazanç bloklarına iletilmiştir. Hız bilgisi “gain” bloğu ile Kd kazancına iletilmiş ve bu 3 veri tek bir noktada toplanarak “Force” bloğuna iletilmiştir.

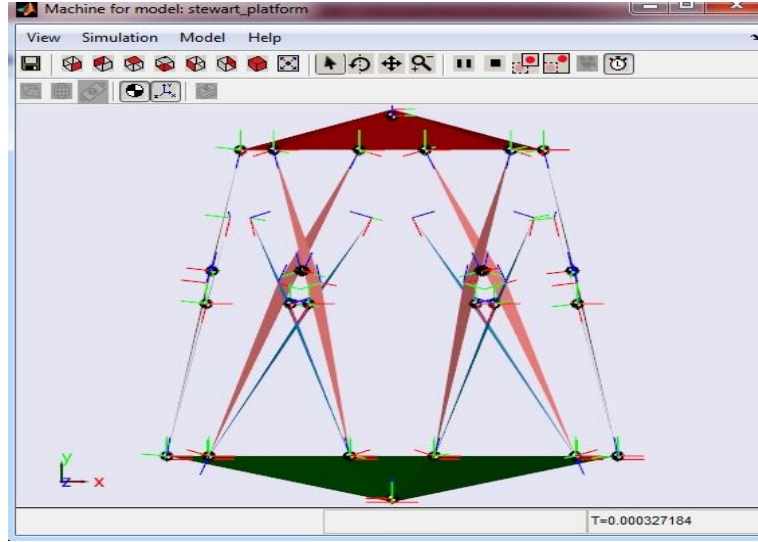
Şekil 4.3’te verilen “Leg Trajectory” bloğu platformun istenilen pozisyon ve rotasyonu için gerekli bacak boylarının hesaplandığı ters kinematik denklemleri içeren referans bloğudur. [73]. Bu bloğun içeriği Şekil 4.5’ de verilmiştir.



Şekil 4.5. “Leg trajectory” bloğunun içeriği [95]

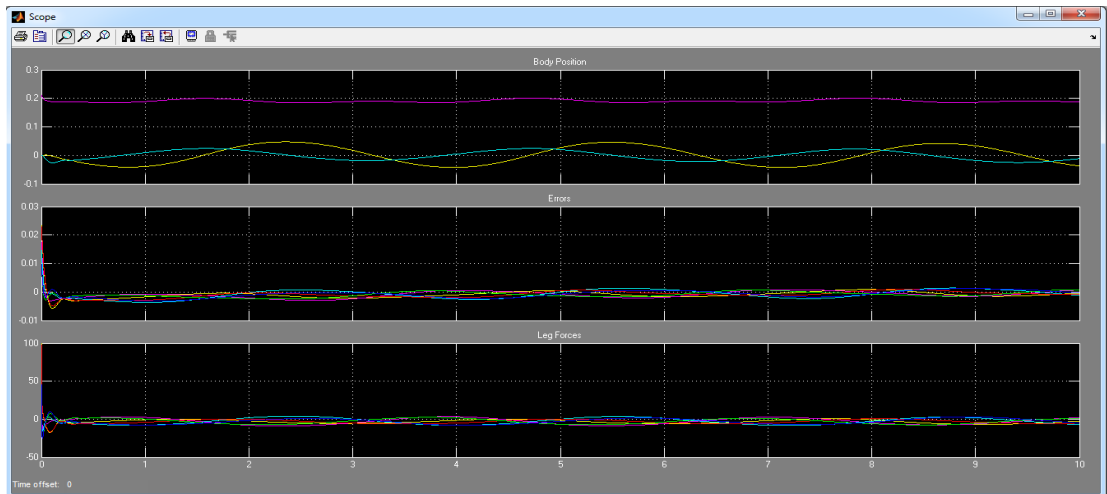
“Desired” olarak belirtilen blok platformun x-y-z açılarını ve x-y-z pozisyon bilgilerini içeren bloktur. Bu bloktan gönderilen sinüsoidal dalgalar sayesinde platformun hareket sınırları belirlenebilir. “Rotation Matrix” olarak belirtilen blok içerisine platformun x-y-z açı bilgileri gönderilir. Pozisyon bilgileri ise “Position Matrix” bloğu içerisine gönderilir. Benzetim işlemine başlamadan önce blokların içerisine platformun bazı parametrelerini m-file olarak tanıtmak gerekmektedir. Bu parametreler tüm mekanizmanın başlangıç durumunu, kütleleri, sürtünme ve kazanç katsayılarını, yüzeyler arası mesafeleri, ataletleri içerir. Ek-D’de “m-file” olarak yüklenen program kodları ve blok parametreleri görülebilir.

SolidWorks programında tasarlanan SPM bütünlük yapıda .xml olarak kaydedilmiştir. Daha sonra bu dosya Matlab çalışma ekranında “mech\_import” komutu ile çağrılmış ve modelin blokları Sim-Mechanics programında açılmıştır. Bu bloklar üzerinde yapılan düzenlemeler sonucu sistem benzetimi yapılabilecek duruma gelmiştir. Şekil 4.6’da gerçekleştirilen platformun benzetim görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.6. Gerçekleştirilen platformun benzetim görüntüsü

Benzetim esnasında “Scope” bloğundan sinyalleri görmemiz mümkündür. İlk gösterilen alan platformumuzun benzetim süresince hareket eden üst mobil parçasının x-y-z eksenlerindeki konum değerlerini vermektedir. İkinci grafik alanı ise benzetim süresince zamanla değişen gerçek bacak uzunlukları ile, “Leg Trajectory” bloğunda hesaplanan ve istenilen bacak uzunlukları arasındaki farkı göstermektedir. Üçüncü grafik alanı ise benzetim esnasında herbir bacak üzerine düşen kuvveti göstermektedir. Grafik sonuçlarına göre platformun çalışma uzayına müdahale etmek mümkündür. Örneğin “Desired” bloğundan gönderilen ve hareketi sağlayan sinüsoidal sinyalin genliği değiştirilerek ilgili eksenlerdeki hareket alanları değiştirilebilir ve bu durum grafiklerden okunabilir. Şekilde 4.7’de “Scope” bloğundan alınan görüntü verilmektedir.



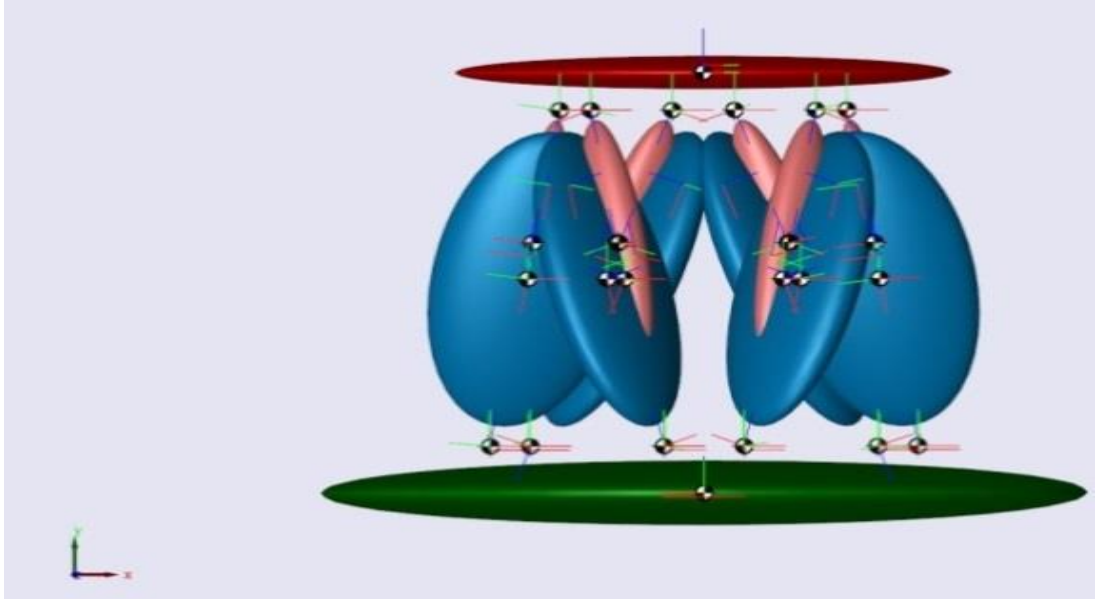
Şekil 4.7. “Scope” bloğu çıktısı [95]

Örnek olarak “desired” bloğundan gönderilen Y eksenini sinüsoidalini ele alalım. İlk grafik alanındaki Y ekseninin sinüs çıkış sinyali formülü Denklem (4.1)’de verilmiştir.

$$O(t) = \text{Amp} \times \text{Sin}(\text{Freq} \times t + \text{Phase}) + \text{Bias} \quad (4.1)$$

Platformun Y eksenini için genlik değeri; 0,1, Frekans değeri; 0,5 rad/sec, zaman değeri; benzetim gerçek zamanı, faz; 0 rad ve bias değeri 0 olarak belirlenmiştir. Bu hesaplamalar sonucunda çıkan grafik “mor” renk ile görülebilir.

Şekil 4.8’de SolidWorks programında modellenen platformun benzetim alanındaki üç boyutlu görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Platformun Sim-mechanics programındaki üç boyutlu görüntüsü

## 5. MODELLENEN PLATFORMUN GERÇEKLEŞMESİNDE KULLANILAN MALZEMELER

Diğer bölümlerde anlatılan tüm işlemler neticesinde gerçek hayatta 6x6 serbestlik derecesine sahip bir SPM üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu SPM ilk olarak katı modelleme programı olan SolidWorks'te tasarlanmış daha sonra Matlab ve SimMechanics programlarında simüle edilmiştir. Analiz esnasında karşılaşılan en büyük problemlerden biri kolların aşırı hareket etmesi ve birbiri ile uyumsuz olarak çalışmasıydı. Bu problem benzetim çalışması sayesinde sanal ortamda birkaç kez hata düzeltme işlemleri ile çözümlenmiştir. Bu veriler sonucunda optimum şekilde çalışabilecek bir SPM üretimine geçilmiştir. Bu bölümde üretilen SPM de kullanılan malzemeler detaylı olarak anlatılmıştır.

### 5.1. SPM'in Üretiminde Kullanılan Malzemeler

#### A) Motorlar:

Platformda 12 adet MG996R model servo motor kullanılmıştır. Bu motorların ortalama kaldırma kuvvetleri 10kg civarındadır. Motorlar toplamda platformun hareketli plakasına 12.76 N.m'lik bir tork uygulayabilmektedir. Motorlar geliştirilen yazılımda birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Aynı zamanda motorlar kendi aralarında 6'lı gruplara ayrılabilir. Bunun amacı tersleyen hareketler yaptırarak platforma daha fazla hareket kabiliyeti kazandırabilmektir. platforma ters hareketleri kolay yaptırabilmektir.



Şekil 5.1. Motor [97]

## B) Güç Kaynağı:

Platforma enerji verebilmek amacıyla 5VDC 20A switch mode güç kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 5.2. 5VDC 20A switch mode güç kaynağı [98]

## C) Servo Kontrol&Arayüz Modülü

Platformda kullanılan motorlara hareket kazandırmak ve hareketleri kontrol edebilme amacıyla bir arayüz modülü oluşturulmuştur. Bu arayüz modülü sayesinde platformda kullanılan 12 adet motor hareket kabiliyetine kavuşturulmuştur.



Şekil 5.3. Motor sürücü arayüz modülü

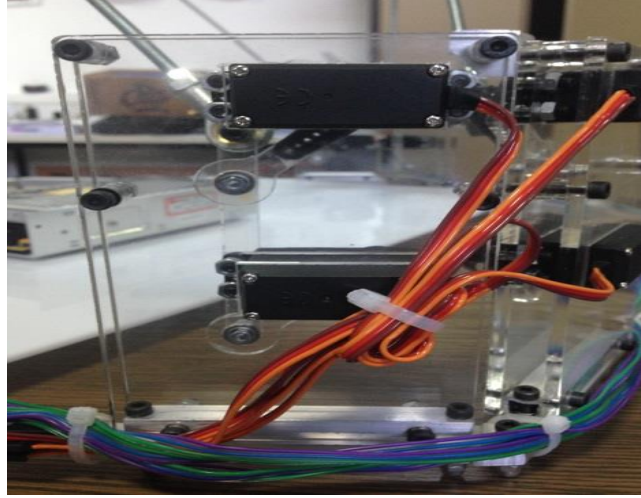
## D) Rulman ,Bağlantı Parçaları ve Aparatları

Bu bağlantı parçaları ve aparatlar platformun alt ve üst merkezlerini birbirine bağlamak amacıyla kullanılmıştır. Motorlardan alınan mekanik güç ile kollar hareket ettirilmiş ve platform hareket edebilme kabiliyetine kavuşturulmuştur.



#### E) Plexyglas Malzeme ve Mekanik İşlem

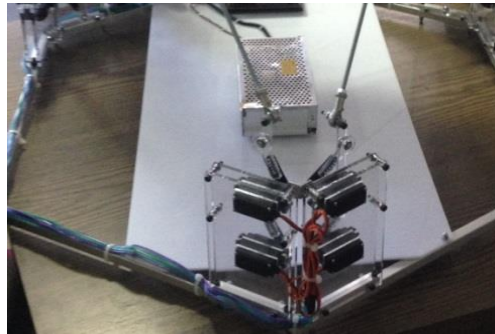
Motorların platforma sabitlenmesi amacıyla kullanılan malzemelerdir. Aynı zamanda motorlardan alınan mekanik gücün platforma aktarılması amacıyla kullanılan ara kollar bu malzemedan yapılmıştır.



Şekil 5.4. Plexyglass malzemenin kullanıldığı motor tutucu ve ara kollar

#### F) Alüminyum Konstrüksiyon ve Mekanik İşlem

Platformun alt plakasını oluşturan kısımdır. Bu kısımda alüminyum kullanılmasının sebebi dayanıklılığı arttırmak ve platformun hafif olmasını sağlamaktır. Aynı zamanda kullanılan malzeme maliyet açısından ucuzdur.

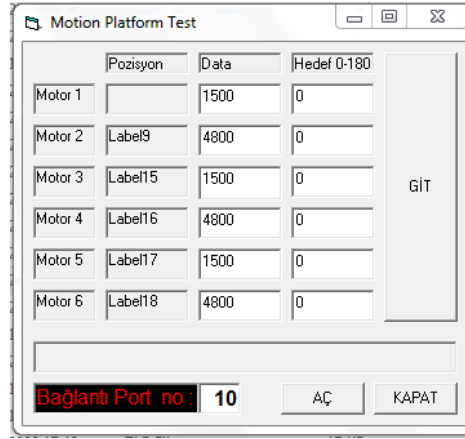


Şekil 5.5. Platformun alt plakası



### G) Platform Test Programı

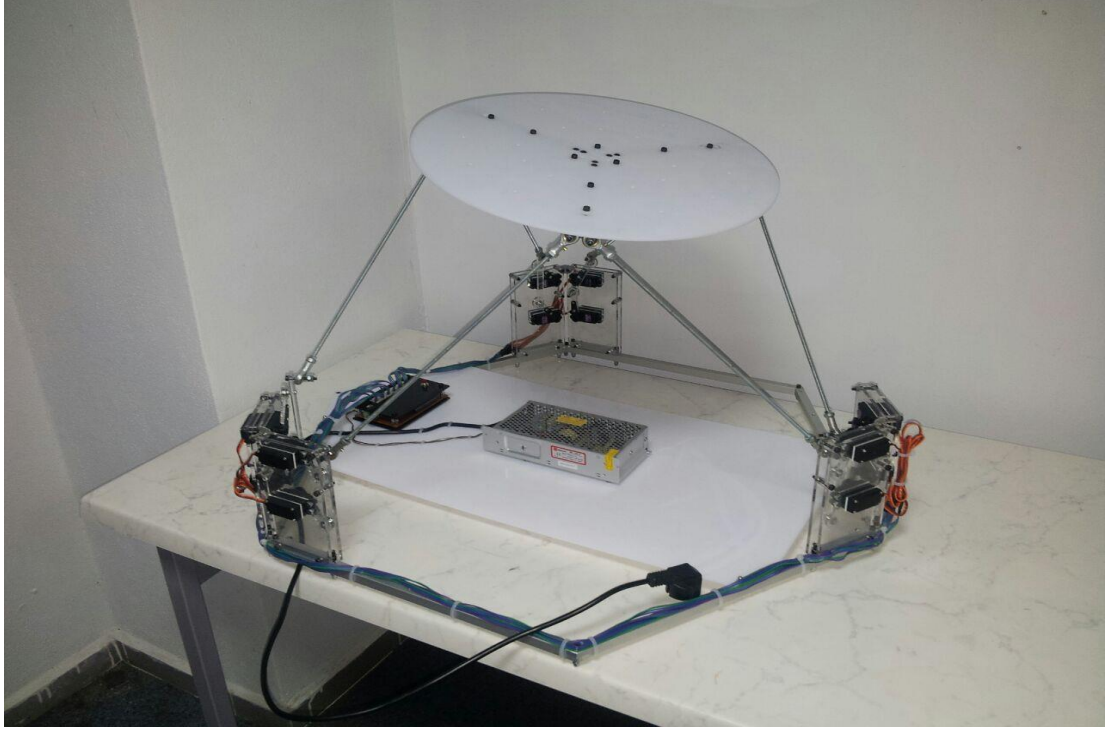
Platform Visual Basic programlama dilinde yazılan program ile kontrol edilmektedir. Bu program sayesinde platformun hareket kabiliyeti, çalışma hızı vs. gibi bilgiler kontrol edilebilmektedir. Stewart Platform Mekanizması bilgisayar ile seri porttan haberleşmektedir. Seri porttan bağlantı gerçekleştirildikten sonra yazılım otomatik olarak port tanımakta ve platform ile bağlantıya geçmektedir. Şekil 5.6'da platform kontrol arayüzü görülmektedir.



Şekil 5.6. Platform kontrol arayüzü

Şekil 5.6'da görülen arayüzde her bir motor ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Seri port bağlantısı gerçekleştirildikten sonra arayüz otomatik olarak COM10 değerini tanımlamıştır. Seri porttan tüm servolara sırayla 4 dijital olarak hedef bilgisi gönderilmektedir. Platformumuzda kullanılan hedef değeri 1400-5500 arasındadır. Komutlar "H" karakteri ile başlamaktadır. Örnek olarak bir komut "H140014001400140014001400" olarak platforma gönderilmektedir. Bu kısımda seri porttan platforma ASCII olarak ilk önce CHR(10) ve peşinden CHR(13) bilgileri gönderilmektedir. Böylece 12 motor içinde hedefler tek komutta gönderilebilmektedir. Platformda kullanılan motorlar iki grup şeklinde ayrılmıştır. Mekanik olarak motor grubundan biri "+" diğeri "-" şeklinde bağlanmıştır.

Yani bir grup için 1500 hedefi ayağı en alta çekerken sonraki grupta 5500 değeri en alta çekmektedir. Şekil 5.7'de farklı gönderilmiş değerler sonucu platformun nasıl hareket ettiği görülmektedir.



Şekil 5.7. Platformunun “1800-4000” değerleri arasındaki görüntüsü

Şekil 5.7’de bir motor grubu için “1800” değeri gönderilip diğer motor grubu için “4000” değeri gönderilmiştir. Bu değerlere göre platform ilgili motorları harekete geçirerek platforma hareket kazandırmıştır. Şekil 5.7’de gerçekleştirilen platformun son şekli görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ilk olarak Stewart Platform Mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için seri ve paralel mekanizmalardan bahsedilmiştir. Seri ve paralel mekanizmaların özelliklerinden bahsedilip karşılaştırmaları yapıldıktan sonra Stewart Platform Mekanizması detaylı olarak anlatılmıştır. SPM'nin tarihsel gelişimi ve bu süreç içerisinde SPM türleri üzerine ne tür çalışmalar yapıldığından bahsedilmiştir. Daha sonra SPM'nin ters ve düz kinematik analizine geçilmiştir.

6x6 serbestlik derecesine sahip bir SPM'nin ters kinematik analizi yapılmıştır. Düz kinematik analizin çözümü oldukça zor ve karmaşık olduğundan düz kinematik analizden teorik olarak bahsedilmiştir. Düz kinematik analiz ile ilgili yapılan çalışmalardan faydalanılarak Matlab programında SPM'nin düz kinematik analizi yapılmıştır.

Tasarlanan platform SolidWorks çizim programında modellenmiştir. Platformu oluşturan parçalardan motordan aldığı gücü mil parçasına ileten ara bağlantı elemanı ve platformun üst plakasını hareket ettiren mil parçalarının gerçek ortamda ne kadar yüke maruz kalacağı hesaplanarak parçaların dayanım analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda hata oluşturan veya istenilen değerler arasında olmayan katı modeller üzerinde düzeltme işlemi yapılarak tüm katı modeller birleştirilmiş, SPM'nin bütünlük görüntüsü elde edilmiştir.

Birleştirilmesi yapılan SPM'nin Matlab-SimMechanics programında benzetimi yapılmıştır. Bu tür uzaysal hareket eden mekanizmaların istenilen çalışma seviyesine getirilebilmesi için benzetim oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Daha sonra SPM'nin gerçekleştirilmesi aşamasında kullanılan malzemelerden ve kullanılan yazılımdan detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Platformun gerçekleştirilme aşamasından önce yukarıda bahsedilen programlar vasıtasıyla yapılan analiz ve benzetim işlemleri oldukça faydalı uygulamalardır. Bu uygulamalar üzerinde yapılacak çalışmaları arttırmak bizi daha doğru, kararlı ve dengeli mekanizmaların üretimi konusunda yönlendirecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Ulaş B., Stewart Platformu Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 251328.
- [2] İner B. A., Stewart Platform Benzetim Ve Eniyileme Yazılımının Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 335442.
- [3] Dasgupta D., Mruthyunjaya, T. S., Singularity-free Path Planning for the Stewart Platform Manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, 1998, **33**(6), 711-725.
- [4] Güneri B., Complete Dynamic Analysis of Stewart Platform Including Singularity Detection, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007, 213141.
- [5] Stewart D., A Platform with Six Degrees of Freedom, *UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings*, 1965, **180**(15), 371-386.
- [6] <http://mechanicaldesign.asmedigitalcollection.asme.org/> (Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2014).
- [7] <http://www-sop.inria.fr/coprin/EJCK/99-1-1-2/EJCK99.html> (Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2014).
- [8] Ünsal A., Farklı yapıdaki Stewart Platform Mekanizmalarının Düz ve Ters Kinematik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 201166.
- [9] Yao W., Symbolic Kinematics and Dynamics Analysis and Control of a General Stewart Parallel Manipulator, Master of Science Thesis, New York State University, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, New York, 2008, 14260.
- [10] Özdemir Ö. F., Stewart Platform ve Hareketli Yarış Simülasyonu, Akışkan Otomasyon, <http://www.otomasyondergisi.com.tr/arsiv/yazi/stewart-platform-ve-hareketli-yaris-simulasyonu> (Ziyaret tarihi: 11 Mart 2014).
- [11] Dongsu W., Hongbin G., Adaptive Sliding Control of Six-DOF Flight Simulator Motion Platform, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, **20**(5), 425-433.
- [12] Ay S., Stewart Platform Mekanizması Çalışma Uzayı Analizi, Doktora Tezi, Hava Harp Okulu, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 407202.

- [13] Anlı E., Alp H., Yurt S. N., Özkol İ., Paralel Mekanizmaların Kinematiği, Dinamiği ve Çalışma Uzayı, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 2005, **2**(1), 19- 36.
- [14] Güney A, İnsan Makine Arayüzü olarak 3x3 Stewart Platformunun Empedans Kuvvet Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 259820
- [15] Hunt K. H., *Kinematic Geometry of Mechanisms, 2nd ed.*, Clarendon Press, London, 1978.
- [16] Geng Z., Haynes L. S., Six-Degree-of-Freedom Active Vibration Isolation Using a Stewart Platform Mechanism, *J. Robotic Systems*, 1993, **10**(5), 725–744.
- [17] Yurt S. N., 6-3 Stewart Platform Mekanizmasının Kinematik, Dinamik Analizi ve Kontrolü, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 126643.
- [18] Bonev I. A., Ryu J., A New method for solving the kinematics of general 6-6 Stewart Platforms using three linear extra sensors, *Mechanism and Machine Theory*, 1999, **35**(2000), 423-436.
- [19] [http://robotics.technion.ac.il/projects/ronen\\_project.html](http://robotics.technion.ac.il/projects/ronen_project.html) (Ziyaret tarihi: 11 Mart 2014).
- [20] <https://www.kickstarter.com/projects/1909880349/six-degree-of-freedom-motion-simulation-platformv> (Ziyaret tarihi: 11 Mart 2014).
- [21] [http://en.wikipedia.org/wiki/Stewart\\_platform](http://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform) (Ziyaret tarihi: 22 Mart 2014).
- [22] Wapler M., Urban V., Weisener T., Stallkamp J., Durr M., and Hiller A., A Stewart platform for precision surgery, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2003, **25**(4), 329-334.
- [23] <http://www.ecnmag.com/articles/2011/05/New-generation-hexapods-deliver-sub-micron-resolution-ultra-precision-applications> (Ziyaret tarihi: 23 Mart 2014).
- [24] <http://www.hexapod-system.com/hexapod-technology/hexapod-applications/> (Ziyaret tarihi: 18 Mayıs 2014).
- [25] Nanua P., Waldron K. J., Murthy V., Direct Kinematic Solution Of A Stewart Platform, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1990, **6**(4), 438-444.
- [26] Harib K., Srinivasan K., Kinematic and Dynamic Analysis of Stewart Platform Based Machine Tool Structures, *Robotica*, 2003, **21**(5), 541-554.

- [27] Alrashidi Mohammad F., In Vivo Mechanical Assessment of Human Elbow Kinematics Using a Six Axis Parallel Mechanism Developed in House, Degree of Doctor of Philosophy Thesis, Brunel University, Department of Mechanical Aerospace and Civil Engineering, London, 2011, 2438/9175.
- [28] Chen S-H., Huang C-I., Fu L-C., Applying a Nonlinear Observer to Solve Forward Kinematics of a Stewart Platform, *IEEE International Conference on Control Applications*, San Antonio, United States, 3-5 September 2008.
- [29] Liu K., Fitzgerald J. M., Lewis F. L., Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, **40**(2), 282-293.
- [30] Tarokh M., Real Time Forward Kinematics Solutions for General Stewart Platforms, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rome, Italy, 10-14 April 2007.
- [31] Mu Z., Kazerounian K., A Real Parameter Continuation Method for Complete Solution of Forward Position Analysis of the General Stewart, *Transactions of the ASME*, 2002, **124**(2), 236-244.
- [32] Sheng L., Wan-Long L., Yang-Chun D., Liang F., Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang, China, 25-28 June 2006.
- [33] Song S-K. and Kwon D-S., Efficient Formulation Approach for the Forward Kinematics of the 3-6 Stewart Gough Platform, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, United States, 29 October 2001- 03 November 2001.
- [34] Ren L., Feng Z., Mills J. K., A Self-Tuning Iterative Calculation Approach for the Forward Kinematics of a Stewart-Gough Platform, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang, China, 25-28 June 2006.
- [35] Huang X., Liao Q., Wei S., Closed-form forward kinematics for a symmetrical 6-6 Stewart platform using algebraic elimination, *Mechanism and Machine Theory*, 2010, **45**(2), 327–334.
- [36] Yee C. S., Lim K., Forward kinematics solution of Stewart platform using neural networks, *Neurocomputing*, 1997, **16**(4), 333-349.
- [37] Yurt S. N., Anlı E., Özkol I., Forward kinematics analysis of the 6-3 SPM by using neural networks, *Meccanica*, 2007, **42**(2), 187–196.
- [38] Parikh P. J., Lam S. S., Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy, *Int. J. Adv.Manuf. Technol.*, 2009, **40**(5-6), 595–606.

- [39] Do W. Q. D., Yang D. C. H., Inverse dynamic analysis and simulation of a platform type of robot, *Journal of Robotic Systems*, 1988, **5**(3), 209–227.
- [40] Dasgupta B., Mruthyunjaya T.S., A Newton-Euler Formulation For The Inverse Dynamics Of The Stewart Platform Manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, 1998, **33**(8), 1135-1152.
- [41] Geng Z., Haynes L. S., Lee J. D., Carroll R. L., On the dynamic model and kinematic analysis of a class of Stewart platforms, *Robotics and Autonomous Systems*, 1992, **9**(4), 237-254.
- [42] Liu K., Fitzgerald M., Dawson D. W., Lewis F. L., Modeling and control of a Stewart platform manipulator, *ASME Control of Systems with Inexact Dynamic Models*, 1991, **33**(1), 83-89.
- [43] El-Khasawneh B. S. and Ferreira P. M., Computation of stiffness and stiffness bounds for Parallel link manipulators, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, **39**(2), 321–342.
- [44] Tsai L-W., Solving the Inverse Dynamics of a Stewart-Gough Manipulator by the Principle of Virtual Work, *ASME Journal of Mechanic Design*, 2000, **122**(1), 3-10.
- [45] Piras G., Cleghorn W. L., Mills J.K., Dynamic finite-element analysis of a planar high-speed, high-precision parallel manipulator with flexible links, *Mechanism and Machine Theory*, 2005, **40**(7), 849–862.
- [46] Lin J., Chen C. W., Computer-aided-symbolic dynamic modeling for Stewart-platform manipulator, *Robotica*, 2009, **27**(3), 331–341.
- [47] Lopes A. M., Dynamic modeling of a Stewart platform using the generalized momentum approach, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.*, 2009, **14**(8), 3389–3401.
- [48] Yurt S. N., Özkol I., Kaya M. O., Hacıyev C., Optimization of the PD coefficient in a flight simulator control via genetic algorithms, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2002, **74**(2), 147–153.
- [49] Li D., Salcudean S. E., Modeling, Simulation, and Control of a Hydraulic Stewart Platform, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, United States, 20-25 April 1997.
- [50] Yingjie L., Wenbai Z. and Gexue R., Feedback Control of a Cable-Driven Gough–Stewart Platform, *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, **22**(1), 198-202.
- [51] Su Y. X., Duan B. Y., Zheng C. H., . Zhang Y. F, Chen G. D., Mi J. W., Disturbance-Rejection High-Precision Motion Control of a Stewart Platform, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, **12**(3), 364-374.
- [52] Zadeh L.A, Fuzzy Sets, *Inf. Control*, 1965, **31**(6), 338-353.

- [53] Chung I-F., Chang H-H., Lin C-T., Fuzzy Control of a Six-degree Motion Platform with Stability Analysis, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Tokyo, Japan, 12-15 October 1999
- [54] Lin L-C., Tsay M-U., Modeling and Control of Micropositioning Systems Using Stewart Platforms, *Journal of Robotic Systems*, 2000, **17**(1), 17-52.
- [55] Li H-X., Gatland H. B., Conventional Fuzzy Control and Its Enhancement, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part-B: Cybernetics*, 1996, **26**(5), 791-797.
- [56] Mudi R. K., Pal N. R., Robust Self-Tuning Scheme for PI- and PD-Type Fuzzy Controllers, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, **7**(1), 2-16.
- [57] Serrano F., Caballero A., Yen K., Brezina T., Automatic Control and Robotics, Editors: Jablonski R., Turkowski M., Szewczyk R., *Recent Advances in Mechatronics*, 1st ed., LE-TEX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig, 156-160, 2007.
- [58] Sadjadiyan H., Taghirad H. D., Fatehi A., Neural Networks Approaches for Computing the Forward Kinematics of a Redundant Parallel Manipulator, *International Journal of Computational Intelligence*, 2005, **2**(1), 40-47.
- [59] Zeng G., Hemami A., An overview of robot force control, *Robotica*, 1997, **15**(5), 473-482.
- [60] Salisbury K. J., Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, *The 19th IEEE Conf. on Decision and Control*, Albuquerque, United States, 10-12 December 1980.
- [61] Hogan N., Impedance Control, An Approach to Manipulation: Part I, II, *Int. J. of Robotics Res.*, 1985, **107**(1), 1-24.
- [62] D. E. Whitney, Historical perspective and state of the art in robot force control, *International Journal of Robotics Research*, 1987, **6**(1), 3-14.
- [63] Benalli A., Richard P., Bidaud P., Design, control and evaluation of a six DOF force feedback interface for virtual reality applications, *Proceedings of the 1999 IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction*, Pisa, Italy, 10-12 September 1999.
- [64] Kwon D. S., Woo K. Y., Cho H. S., Haptic Control of the Master Hand Controller for a Microsurgical Telerobot System, *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, United States, 10-15 May 1999
- [65] Girone M., Burdea G., Bouzit M., Popescu V., A Stewart Platform-Based System for Ankle Telerehabilitation, *Autonomous Robots*, 2001, **10**(2), 203-212.



- [66] Gupta A., O'Malley M. K., Patođlu V., Burgar C., Design, Control and Performance of RiceWrist: A Force Feedback Wrist Exoskeleton for Rehabilitation and Training, *The International Journal of Robotics Research*, 2008, **27**(2), 233–251.
- [67] Saticı A. C., Erdođan A., Patođlu V., Design of a Reconfigurable Ankle Rehabilitation Robot and Its Use for the Estimation of the Ankle Impedance, *IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Kyoto, Japan, 23-26 June 2009.
- [68] An C. H., Hollerbach J. M., Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators, *American Control Conference*, Minneapolis, United States 10-12 June 1987.
- [69] Hayward V., Astley O. R., Performance Measures for Haptic Interfaces, *In Robotics Research: The 7th Int. Symposium*, Montr'eal, Canada, 25 June 1996.
- [70] Ovayolu H., Kinematic Analysis Of Stewart Platform-Based Mechanisms/Manipulators, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 1997, 65943.
- [71] Korkmaz O., Inverse Dynamics Control Of Flexible Joint Parallel Manipulators, Yüksek Lisans Tezi, Orta Dođu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, 199264.
- [72] Karahan O., Seri Ve Paralel Robotlarda Parçacık Sürü Optimizasyonu İle Yörünge Kontrolörü Tasarımı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2012, 315723.
- [73] Yıldız İ., Uzaysal Hareket Eden Taşıtların Stewart Platform Mekanizması İle Tek Noktadan Kuvvet Geri Beslemeli Kontrolü, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 295837.
- [74] Ay S., Stewart Platform Mekanizması Çalışma Uzayı Analizi, Doktora Tezi, Hava Harp Okulu, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 407202.
- [75] Tari H., Su H. J., Hausenstein, J. D., Classification and complete solution of the kinestatics of a compliant Stewart–Gough platform, *Mechanism and Machine Theory*, 2012, **49**(1), 177–186.
- [76] Zhang D., Gao Z., Forward kinematics, performance analysis, and multi-objective optimization of a bio-inspired parallel manipulator, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, **28**(4), 484–492.
- [77] Hulme K. F., Pancotti A., Development of a Virtual D.O.F. Motion Platform for Simulation and Rapid Synthesis, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, California, United States, 19-22 April 2004.

- [78] Gonzales H., Dutra M. S., Lengerke O., Direct and inverse kinematics of Stewart platform applied to offshore cargo transfer simulation, *13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Guanajuato, México, 19-25 June 2011.
- [79] Wang Z., He J., Gu H., Forward Kinematics Analysis of a Six-Degree-of-Freedom Stewart Platform Based on Independent Component Analysis and Nelder–Mead Algorithm, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part a: Systems and Humans*, 2011, **41**(3), 589-597.
- [80] Dasgupta B., Mruthyunjava T. S., The Stewart platform manipulator: a review, *Mechanism and Machine Theory*, 2000, **35**(1), 15-40.
- [81] Raghavan M., The Stewart platform of general geometry has 40 configurations, *ASME J. Mech. Des.*, 1993, **115**(2), 277–282.
- [82] Husty M. L., An Algorithm for Solving The Direct Kinematics of General Stewart-Gough Platforms, *Mech. Mach. Theory*, 1996, **31**(4), 365-380.
- [83] Zhang G. F., Classification of direct kinematics to planar generalized Stewart platforms, *Computational Geometry*, 2012, **45**(8), 458-473.
- [84] Majid M. Z. A., Huang Z. Yao Y. L., Workspace analysis of a six-degrees of freedom, three-prismatic–prismatic–spheric-revolute parallel manipulator, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2000, **16**(6), 441–449.
- [85] Pi Y., Wang X., Trajectory tracking control of a 6-DOF hydraulic parallel robot manipulator with uncertain load disturbances, *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(2), 185–193.
- [86] Parsa S. S., Daniali H. M., Ghaderi R., Optimization of parallel manipulator trajectory for obstacle and singularity avoidances based on neural network, *Int J Adv Manuf Technol.*, 2010, **51**(5-8), 811–816.
- [87] Huang X., Hang Z., He G., Tan X., An Efficient Algebraic Method for Direct Kinematics of the 5-6 Stewart Platform, *2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Wuhan, China, 6-7 March 2010.
- [88] Griffis M., Duffy J., A Forward Displacement Analysis of a Class of Stewart Platforms, *Journal of Robotic Systems*, 1989, **6**(6), 703-720.
- [89] Wang Z., He Z., Shang H., Gu H., Forward kinematics analysis of a six-DOF Stewart platform using PCA and NM algorithm, *Industrial Robot: An International Journal*, 2009, **36**(5), 448–460.
- [90] Morell A., An artificial intelligence approach to forward kinematics of Stewart Platforms, Control & Automation (MED), *20th Mediterranean Conference on*, Barcelona, Spain, 3-6 July 2012.

- [91] Chapra S. C., Canale R. P., *Numerical Methods for Engineers*, 6 th ed., McGraw-Hill Primis, New York, 2010.
- [92] <http://www.mwtrainer.bafex.de/acad%20files/ACAD8.HTM> (Ziyaret tarihi: 18 Mayıs 2014).
- [93] Kaymaz İ., Temel Bilgileri-Mukavemet Esasları, Erzurum Atatürk Üniveristesi, <http://muhserv.atauni.edu.tr/makine/ikaymaz/makel> (Ziyaret tarihi: 01 Haziran 2014).
- [94] [http://makine.usak.edu.tr/uploads/14/MMD\\_4.pdf](http://makine.usak.edu.tr/uploads/14/MMD_4.pdf) (Ziyaret tarihi: 01 Haziran 2014).
- [95] <http://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/creating-a-stewart-platform-model-using-simmechanics.html> (Ziyaret tarihi: 11 Nisan 2015).
- [96] <http://tr.wikipedia.org/wiki/PID> (Ziyaret tarihi: 02 Haziran 2014).
- [97] [http://arduino-ua.com/prod272-MG996R\\_servo\\_15\\_kg](http://arduino-ua.com/prod272-MG996R_servo_15_kg) (Ziyaret tarihi: 08 Eylül 2014).
- [98] <http://www.dhgate.com/free-shipping/5v-regulated-power-supply-free-shipping.html> (Ziyaret tarihi: 11 Ocak 2015).
- [99] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/2334-stewart-platform-mechanical-system/content/StewartPlatformSetup.m> (Ziyaret tarihi: 11 Nisan 2015).

## **EKLER**

## EK-A

### TERS KİNEMATİK ANALİZ PROGRAM KODLARI [73]

```
clear;
% Ofset Açılarının tanımlanması
theta_1=0;
theta_2=2*(pi/3);

% Hareketli Platformun pozisyon ve rotasyonlarının tanımlanması
alfa=0;
beta=0;
gama=0;
ax=gama;
ay=beta;
az=alfa;
axs1=0;
axs2=0;
axs3=0.2;

%Üst platform bağlantı noktalarının x eksenine göre açılar
Ulamda_1=(pi/3)-(theta_1/2);
Ulamda_3=(3*pi/3)-(theta_1/2);
Ulamda_5=(5*pi/3)-(theta_1/2);
Ulamda_2=(Ulamda_1+theta_1);
Ulamda_4=(Ulamda_3+theta_1);
Ulamda_6=(Ulamda_5+theta_1);

%Alt platformun x eksenine göre açılar
Alamda_1=(pi/3)-(theta_2/2);
Alamda_3=(3*pi/3)-(theta_2/2);
Alamda_5=(5*pi/3)-(theta_2/2);
Alamda_2=(Alamda_1+theta_2);
Alamda_4=(Alamda_3+theta_2);
Alamda_6=(Alamda_5+theta_2);
R1=0.375;%üst platform yarıçapı
R2=0.400;%alt platform Yarıçapı

%Rotasyon Matrisi
R=[(cos(beta)*cos(alfa)) (cos(alfa)*sin(beta)*sin(gama)+sin(alfa)*cos(gama)) -
cos(gama)*sin(beta)*cos(alfa)+sin(gama)*sin(alfa);
-(sin(alfa)*cos(beta)) -sin(gama)*sin(beta)*sin(alfa)+cos(gama)*cos(alfa)
sin(beta)*sin(alfa)*cos(gama)+cos(alfa)*sin(gama);
(sin(beta)) -cos(beta)*sin(gama) (cos(gama)*cos(beta))];
```

**%Üst Platform bağlantı noktalarının pozisyonları**

$u2=R*[R1*\cos(Ulamda\_2);R1*\sin(Ulamda\_2);0]+[axs1;axs2;axs3];$

$u3=R*[R1*\cos(Ulamda\_3);R1*\sin(Ulamda\_3);0]+[axs1;axs2;axs3];$

$u1=R*[R1*\cos(Ulamda\_5);R1*\sin(Ulamda\_5);0]+[axs1;axs2;axs3];$

**% Alt platform bağlantı noktalarının pozisyonları**

$a1=[R2*\cos(Alamda\_1);R2*\sin(Alamda\_1);0];$

$a2=[R2*\cos(Alamda\_2);R2*\sin(Alamda\_2);0];$

$a3=[R2*\cos(Alamda\_4);R2*\sin(Alamda\_4);0];$

**%bacak Uzunlukları**

$l1=norm(u1-a1);l2=norm(u2-a1);l3=norm(u2-a2);$

$l4=norm(u3-a2);l5=norm(u3-a3);l6=norm(u1-a3);$

## EK-B

### DÜZ KİNEMATİK ANALİZ PROGRAM KODLARI [73]

```
clear;
x=[1;0;0];y=[0;1;0];z=[0;0;1]; %koordinat sistemi

% Alt platformun bağ noktaları
ABAG10=0.15;ABAG11=0;ABAG12=0;
BBAG10=-0.075;BBAG11=0.1299;BBAG12=0;
CBAG10=-0.075;CBAG11=-0.1299;CBAG12=0;
A1=[ABAG10;ABAG11;ABAG12];B1=[BBAG10;BBAG11;BBAG12];C1=[CBAG
10;CBAG11;CBAG12];

% üst platformun kenar uzunlukları
b1=0.4180;b2=0.4180;b3=0.4180;

%Bacak uzunlukları
L1=0.6581; L2=0.6581; L3=0.6581; L4=0.6581; L5=0.6581; L6=0.6581;

%alt platform kenar uzunlukları
a=norm(B1-A1);b=norm(C1-A1);c=norm(C1-B1);
r1=(a^2+L3^2-L4^2)/(2*a);
r2=a-r1;
m1=(L3^2-r1^2)^0.5;
s1=(b^2+L2^2-L1^2)/(2*b);
s2=b-s1;
m2=(L2^2-s1^2)^0.5;
t1=(c^2+L6^2-L5^2)/(2*c);
t2=c-t1;
m3=(L6^2-t1^2)^0.5;

% pozisyon vektörleri(üst bağ noktalarının alt kenar üzerine izdüşüm
% noktalarının pozisyon vektörleri)
POS1=A1+(r1*(B1-A1)/norm(B1-A1));
POS2=A1+(s1*(C1-A1)/norm(C1-A1));
POS3=C1+(t1*(B1-C1)/norm(B1-C1));

% A1A2,B1B2 ve C1C2 'ye dik doğruların x eksenine ile yaptıkları açıların
% hesabı
v1=cross((B1-A1), k);n1=dot(v1,j);beta1=asin(n1/norm(v1));
v2=cross((A1-C1), k);n2=dot(v2,j);beta2=asin(n2/norm(v2));
v3=cross((C1-B1), k);n3=dot(v3,i);beta3=acos(n3/norm(v3));

% Katsayıların hesaplanması
D1=2*m1*cos(beta1)*(ABAG10+(r1*(BBAG10-ABAG10)/norm(B1-A1))-
ABAG10-(s1*(CBAG10-ABAG10)/norm(C1-
```

$$A1))) + 2 * m1 * \sin(\beta1) * (ABAG11 + (r1 * (BBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(B1 - A1)) - ABAG11 - (s1 * (CBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(C1 - A1)));$$

$$D2 = -2 * m2 * \cos(\beta2) * (ABAG10 + (r1 * (BBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(B1 - A1)) - ABAG10 - (s1 * (CBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(C1 - A1)));$$

$$2 * m2 * \sin(\beta2) * (ABAG11 + (r1 * (BBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(B1 - A1)) - ABAG11 - (s1 * (CBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(C1 - A1)));$$

$$D3 = -2 * m1 * m2 * \cos(\beta1 - \beta2);$$

$$D4 = -2 * m1 * m2;$$

$$D5 = (ABAG10 + (r1 * (BBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(B1 - A1)) - ABAG10 - (s1 * (CBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(C1 - A1)))^2 + (ABAG11 + (r1 * (BBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(B1 - A1)) - ABAG11 - (s1 * (CBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(C1 - A1)))^2 + m1^2 + m2^2 - b1^2;$$

$$E1 = 2 * m2 * \cos(\beta2) * (ABAG10 + (s1 * (CBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(C1 - A1)) - CBAG10 - (t1 * (BBAG10 - CBAG10) / \text{norm}(B1 - C1))) + 2 * m2 * \sin(\beta2) * (ABAG11 + (s1 * (CBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(C1 - A1)) - CBAG11 - (t1 * (BBAG11 - CBAG11) / \text{norm}(B1 - C1)));$$

$$E2 = -2 * m3 * \cos(\beta3) * (ABAG10 + (s1 * (CBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(C1 - A1)) - CBAG10 - (t1 * (BBAG10 - CBAG10) / \text{norm}(B1 - C1))) - 2 * m3 * \sin(\beta3) * (ABAG11 + (s1 * (CBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(C1 - A1)) - CBAG11 - (t1 * (BBAG11 - CBAG11) / \text{norm}(B1 - C1)));$$

$$E3 = -2 * m2 * m3 * \cos(\beta2 - \beta3);$$

$$E4 = -2 * m2 * m3;$$

$$E5 = (ABAG10 + (s1 * (CBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(C1 - A1)) - CBAG10 - (t1 * (BBAG10 - CBAG10) / \text{norm}(B1 - C1)))^2 + (ABAG11 + (s1 * (CBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(C1 - A1)) - CBAG11 - (t1 * (BBAG11 - CBAG11) / \text{norm}(B1 - C1)))^2 + m2^2 + m3^2 - b2^2;$$

$$F1 = 2 * m3 * \cos(\beta3) * (CBAG10 + (t1 * (BBAG10 - CBAG10) / \text{norm}(B1 - C1)) - ABAG10 - (r1 * (BBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(B1 - A1))) + 2 * m3 * \sin(\beta3) * (CBAG11 + (t1 * (BBAG11 - CBAG11) / \text{norm}(B1 - C1)) - ABAG11 - (r1 * (BBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(B1 - A1)));$$

$$F2 = -2 * m1 * \cos(\beta1) * (CBAG10 + (t1 * (BBAG10 - CBAG10) / \text{norm}(B1 - C1)) - ABAG10 - (r1 * (BBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(B1 - A1))) - 2 * m1 * \sin(\beta1) * (CBAG11 + (t1 * (BBAG11 - CBAG11) / \text{norm}(B1 - C1)) - ABAG11 - (r1 * (BBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(B1 - A1)));$$

$$F3 = -2 * m1 * m3 * \cos(\beta3 - \beta1);$$

$$F4 = -2 * m1 * m3;$$

$$F5 = (CBAG10 + (t1 * (BBAG10 - CBAG10) / \text{norm}(B1 - C1)) - ABAG10 - (r1 * (BBAG10 - ABAG10) / \text{norm}(B1 - A1)))^2 + (CBAG11 + (t1 * (BBAG11 - CBAG11) / \text{norm}(B1 - C1)) - ABAG11 - (r1 * (BBAG11 - ABAG11) / \text{norm}(B1 - A1)))^2 + m1^2 + m3^2 - b3^2;$$

$$G1\_1 = -D1 - D2 + D3 + D5;$$

$$G1\_2 = D1 - D2 - D3 + D5;$$

$$G1\_3 = 4 * D4;$$

$$G1\_4 = -D1 + D2 - D3 + D5;$$

$$G1\_5 = D1 + D2 + D3 + D5;$$

$$H1\_1 = -E1 - E2 + E3 + E5;$$

$$H1\_2 = E1 - E2 - E3 + E5;$$

$$H1\_3 = 4 * E4;$$

$$H1\_4 = -E1 + E2 - E3 + E5;$$

$$H1\_5 = E1 + E2 + E3 + E5;$$

$$I1\_1 = -F1 - F2 + F3 + F5;$$

$$I1\_2 = F1 - F2 - F3 + F5;$$



```

I1_3=4*F4;
I1_4=-F1+F2-F3+F5;
I1_5=F1+F2+F3+F5;
K1=(H1_2*G1_1-G1_4*H1_1)^2;
K2=2*(H1_2*G1_1-
G1_4*H1_1)*(G1_2*H1_2G1_5*H1_1)+H1_1*H1_2*(G1_3^2);
K3=( G1_2*H1_2-G1_5*H1_1)^2;
K4=- G1_1*G1_3*H1_2*H1_3-H1_1*H1_3*G1_3*G1_4;
K5=- G1_2*G1_3*H1_2*H1_3-H1_1*H1_3*G1_3*G1_5;
K6=2*(H1_2*G1_1-H1_1*G1_4)*(H1_5*G1_1-
H1_4*G1_4)+G1_1*G1_4*(H1_3^2);
K7=2*(H1_2*G1_1-H1_1*G1_4)*(G1_2*H1_5-G1_5*H1_4)+2*(H1_2*G1_2
G1_5*H1_1)*(G1_1*H1_5-G1_4*H1_4)+
G1_1*G1_5*(H1_3^2)+G1_2*G1_4*(H1_3^2)+H1_1*H1_5*(G1_3^2)+H1_2*H1_
4*(G1_3^2);
K8=2*(G1_2*H1_2-G1_5*H1_1)*(G1_2*H1_5-
G1_5*H1_4)+G1_2*G1_5*(H1_3^2);
K9=-H1_3*H1_4*G1_3*G1_4-H1_3*H1_5* G1_1*G1_3;
K10=-H1_3*H1_4*G1_3*G1_5-H1_3*H1_5*G1_2*G1_3;
K11=(H1_5* G1_1-H1_4*G1_4)^2;
K12=2*(G1_1*H1_5-H1_4*G1_4)*(G1_2*H1_5-
G1_5*H1_4)+H1_4*H1_5*G1_3^2;
K13=(G1_2*H1_5-G1_5*H1_4)^2;
syms x1;
J1=(K1*x1^4)+(K2*x1^2)+K3;
J2=(K4*x1^3)+K5*x1;
J3=(K6*x1^4)+(K7*x1^2)+K8;
J4=(K9*x1^3)+K10*x1;
J5=(K11*x1^4)+(K12*x1^2)+K13;
M1=(I1_1*x1^2)+I1_4;
M2=I1_3*x1;
M3=(I1_2*x1^2)+I1_5;
SS=[J1*M3-J3*M1 J2*M3-J4*M1-J3*M2 -J5*M1-J4*M2 -J5*M2;
J1*M2-J2*M1 J1*M3-J3*M1 -J4*M1 -J5*M1;
M1 M2 M3 0;
0 M1 M2 M3];
SSp=sym2poly(det(SS));
sols=roots(SSp);bb=0;sols2=[];
for aa=1:16
if sols(aa,1)>0
if imag(sols(aa,1))==0
bb=bb+1;sols2(bb,1)=sols(aa,1);
end
end
end
cc=0;

```

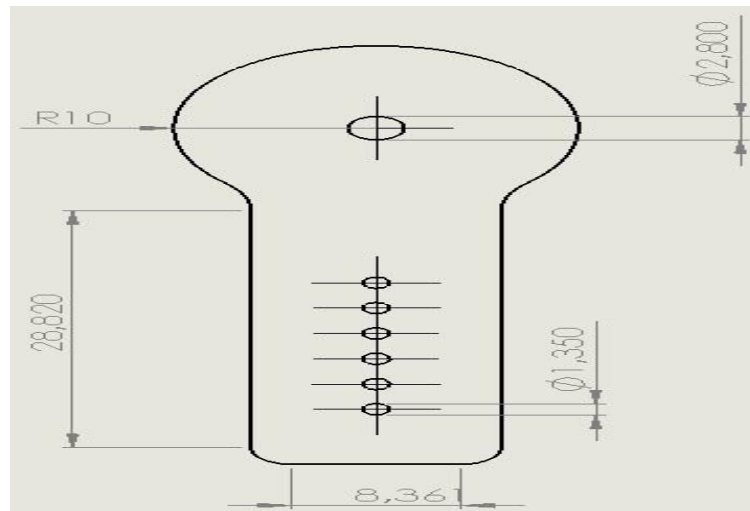
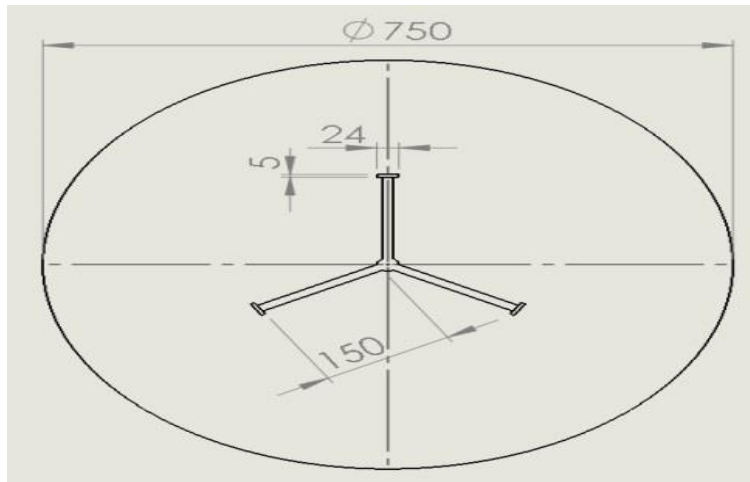
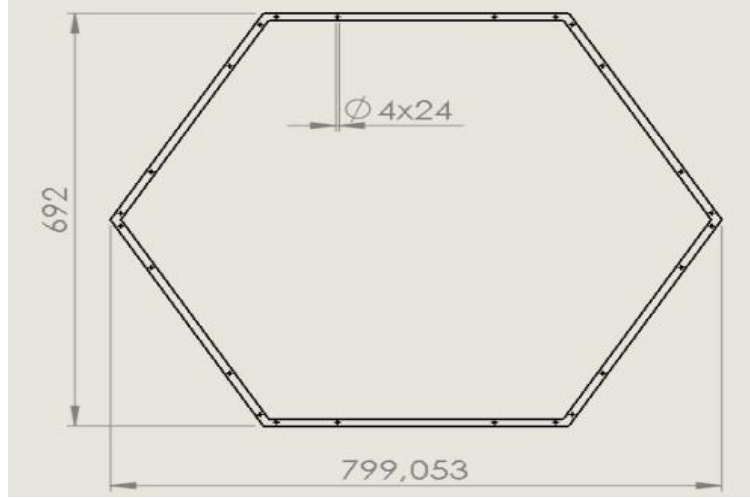
```

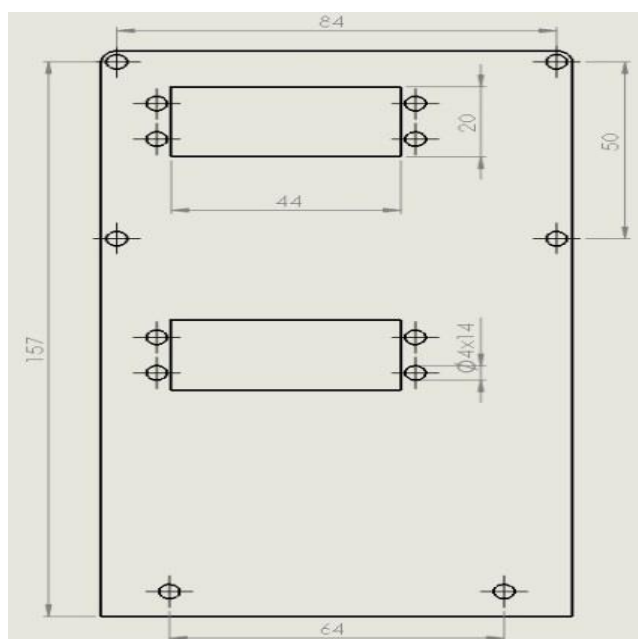
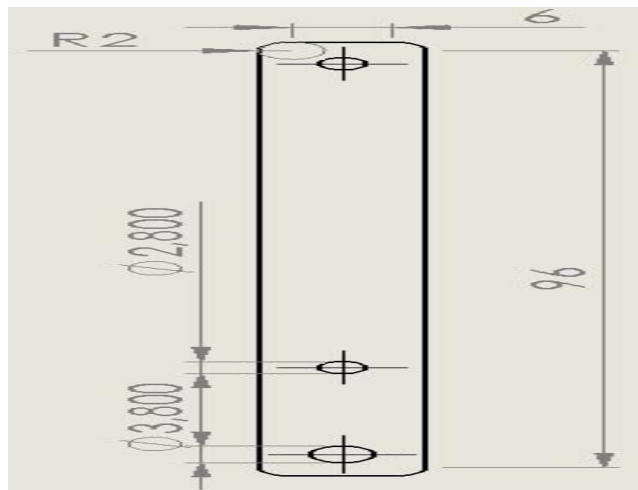
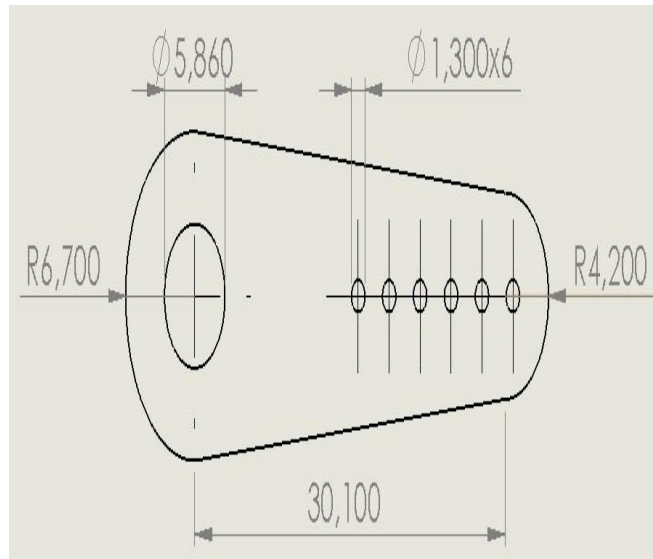
for aa=1:bb
if roots([(G1*sols2(aa,1)^2+G1_2) G1_3*sols2(aa,1) G1_4*sols(aa,1)^2+G1_5])>0
if imag(roots([(G1*sols2(aa,1)^2+G1_2)G1_3*sols2(aa,1)G1_4*sols(aa,1)^2+G1_5]))=0
cc=cc+1;x2(cc,:)=roots([(G1*sols2(aa,1)^2+G1_2)G1_3*sols2(aa,1)G1_4*sols(aa,1)^2+G1_5]);
end
end
end
dd=0;
for aa=1:bb
if roots([(I1_1*sols2(aa,1)^2+I1_4) I1_3*sols2(aa,1) I1_2*sols2(aa,1)^2+I1_5])>0
if imag(roots([(I1_1*sols2(aa,1)^2+I1_4)I1_3*sols2(aa,1)I1_2*sols2(aa,1)^2+I1_5]))==0
dd=dd+1;x3(dd,:)=roots([(I1_1*sols2(aa,1)^2+I1_4)I1_3*sols2(aa,1)I1_2*sols2(aa,1)^2+I1_5]);
end
end
end
ee=0;ff=1;
for aa=1:cc
for ee=1:dd
h(ff,1)=(H1_1*x3(ee,1)^2+H1_4)*x2(aa,1)^2+H1_3*x3(ee,1)*x2(aa,1)+H1_2*x3(ee,1)^2+H1_5;h2(ff,1)=x2(aa,1);h3(ff,1)=x3(ee,1);
h(ff,2)=(H1_1*x3(ee,1)^2+H1_4)*x2(aa,2)^2+H1_3*x3(ee,1)*x2(aa,2)+H1_2*x3(ee,1)^2+H1_5;h2(ff,2)=x2(aa,2);h3(ff,2)=x3(ee,1);
h(ff,3)=(H1_1*x3(ee,2)^2+H1_4)*x2(aa,1)^2+H1_3*x3(ee,2)*x2(aa,1)+H1_2*x3(ee,2)^2+H1_5;h2(ff,3)=x2(aa,1);h3(ff,3)=x3(ee,2);
h(ff,4)=(H1_1*x3(ee,2)^2+H1_4)*x2(aa,2)^2+H1_3*x3(ee,2)*x2(aa,2)+H1_2*x3(ee,2)^2+H1_5;h2(ff,4)=x2(aa,2);h3(ff,4)=x3(ee,2);
ff=ff+1;
end
end
hm=[h(:,1);h(:,2);h(:,3);h(:,4)];
hm2=[h2(:,1);h2(:,2);h2(:,3);h2(:,4)];

```

EK-C

PLATFORMU OLUŞTURAN KATI MODELLERİN ÖLÇÜLERİ





## EK-D

### SPM SIM-MECHANICS MODELİ KURULUM KODLARI [99]

% Stewart Platformu Altprogramı

deg2rad = pi/180; % dereceden radyana dönüşüm

x\_axis = [1 0 0]; % x ekseninin tanımlanması

y\_axis = [0 1 0]; % y ekseninin tanımlanması

z\_axis = [0 0 1]; % z ekseninin tanımlanması

% Üst ve alt plakada bağlantı noktalarının tanımlanması

poz\_alt = [];

poz\_ust = [];

alpha\_alt = 2.5\*deg2rad; % alt plakada 120 derecelik ofset açısının oluşturulması için bağlantı

alpha\_ust = 10\*deg2rad; % üst plakada 120 derecelik ofset açısının oluşturulması için bağlantı

yukseklk = 1.5; % serbest durumda üst plakanın yüksekliği (2 metre)

yaricap\_alt = 0.4; % alt plaka yarıçapı (m)

yaricap\_ust = 0.375; % üst plaka yarıçapı (m)

for i = 1:3,

% alt plaka noktaları

aci\_m\_alt = (2\*pi/3)\* (i-1) - alpha\_alt;

aci\_p\_alt = (2\*pi/3)\* (i-1) + alpha\_alt;

poz\_alt(2\*i-1,:) = yaricap\_alt\* [cos(aci\_m\_alt), sin(aci\_m\_alt), 0.0];

poz\_alt(2\*i,:) = yaricap\_alt\* [cos(aci\_p\_alt), sin(aci\_p\_alt), 0.0];

% üst plaka noktaları

aci\_m\_ust = (2\*pi/3)\* (i-1) - alpha\_ust + 2\*pi/6;

aci\_p\_ust = (2\*pi/3)\* (i-1) + alpha\_ust + 2\*pi/6;

poz\_ust(2\*i-1,:) = yaricap\_ust\* [cos(aci\_m\_ust), sin(aci\_m\_ust), yukseklik];

poz\_ust(2\*i,:) = yaricap\_ust\* [cos(aci\_p\_ust), sin(aci\_p\_ust), yukseklik];

end

% üst plakanın bağlantı koordinatlarının birleştirilmesi(1,3,5 ve 2,4,6 bağlantı noktaları)

poz\_ust = [poz\_ust(6,:); poz\_ust(1:5,:)]; %üstteki 6. nokta alttaki 1. noktaya bağlanıyor

% Noktaların 3x6 matris normuna dönüştürülmesi

govde\_pts = poz\_ust' - yukseklik\*[zeros(2,6);ones(1,6)];

% eyleyici vektörlerinin hesaplanması

bacaklar = poz\_ust - poz\_alt;

bacak\_uzunlugu = [ ];

bacak\_vektorleri = [ ];

```

for i = 1:6,
    bacak_uzunlugu(i) = norm(bacaklar(i,:));
    bacak_vektorleri(i,:) = bacaklar(i,:) / bacak_uzunlugu(i);
end

```

**% silindirik ve dönel eksenlerin hesaplanması**

```

for i = 1:6,

    rot1(i,:) = cross(bacak_vektorleri(i,:), z_axis);
    rot1(i,:) = rot1(i,:) / norm(rot1(i,:));
    rot2(i,:) = - cross(rot1(i,:), bacak_vektorleri(i,:));
    rot2(i,:) = rot2(i,:) / norm(rot2(i,:));
    cyl1(i,:) = bacak_vektorleri(i,:);
    rot3(i,:) = rot1(i,:);
    rot4(i,:) = rot2(i,:);

end

```

**end**

**% Koordinat sistemleri**

```

alt_bacak = struct('merkez', [0 0 0], 'donus', eye(3), 'bitis_noktası', [0 0 0]);
ust_bacak = struct('merkez', [0 0 0], 'donus', eye(3), 'bitis_noktası', [0 0 0]);

```

```

for i = 1:6,

```

```

    alt_bacak(i).merkez = poz_alt(i,:) + (3/8)*bacaklar(i,:);
    alt_bacak(i).bitis_noktası = poz_alt(i,:) + (3/4)*bacaklar(i,:);
    alt_bacak(i).donus = [rot1(i,:)', rot2(i,:)', cyl1(i,:)'];
    ust_bacak(i).merkez = poz_alt(i,:) + (1-3/8)*bacaklar(i,:);
    ust_bacak(i).bitis_noktası = poz_alt(i,:) + (1/4)*bacaklar(i,:);
    ust_bacak(i).donus = [rot1(i,:)', rot2(i,:)', cyl1(i,:)'];

```

**end**

**% Kütle ve Ataletlerin Hesaplanması**

```

ustplaka_kalınlik = 0.03;
altplaka_kalınlik = 0.03;
eyleyici_cap = 0.03;
ozkutle = 76e3/9.81; % Çeliğin özkütlesi Kg/m^3

```

**%eyleyicilerin atalet ve kütlelerinin hesabı**

```

[alt_bacak_kütle, alt_bacak_atalet] = inertiaCylinder(ozkutle, ...
    0.75*bacak_uzunlugu(1), eyleyici_cap);
[ust_bacak_kütle, ust_bacak_atalet] = inertiaCylinder(ozkutle, ...
    0.75*bacak_uzunlugu(1), eyleyici_cap, 0);

```

```
% üst ve alt plakanın kütle ve ataletinin hesabı
[ust_kutle, ust_atalet] = inertiaCylinder(ozkutle, ...
    ustplaka_kalınlik, yarıcap_ust, 0);
[alt_kutle, alt_atalet] = inertiaCylinder(ozkutle, ...
    altplaka_kalınlik,yarıcap_alt, 0);
```

```
% kontrolcü katsayıları
```

```
% Kp = 30000; Ki = 200000; Kd = 1000;
% Kp = 80000; Ki = 200000; Kd = 4000;
% Kp = 2e6; Ki = 1e4; Kd = 4.5e4;
```

```
Kp = 2e6; Ki = 1e4; Kd = 4.5e4;
```

```
%H_inf kontrolör verilerinin yüklenmesi
```

```
load StewartPlatformHinf;
```

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Sunguray C.**, Ürgün S., Demirtaş H., Güngör S., Konum Kontrollü 6x6 Serbestlik Dereceli Stewart Platformu'nun Tasarımı, Modellenmesi ve Simülasyonu, *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2014, **6**(3), 49-61.
- [2] Çolak A., Yüksel H., **Sunguray C.**, Gümüş R., Uzaktan Kontrollü İnsan Makine Arayüz Uygulamasıyla Yeni Bir Eğitim Platformu, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 2013, **3**(1), 1-5.
- [3] Çolak A., Yüksel H., **Sunguray C.**, Gümüş R., Design A Low Cost 3D Body Scanning System, *3rd International Conference on Sustainable Life In Manufacturing Conference*, Eğirdir, Turkey, 2-5 October 2012.



## **ÖZGEÇMİŞ**

1990 yılında Adana'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 2008 yılında girdiği Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Mekatronik Öğretmenliği Bölümü'nden 2012 yılında Mekatronik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2012-2015 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2012 yılından beri Türk Hava Yolları Teknik A.Ş. bünyesinde yetkili teknisyen olarak çalışmaktadır.