

# KONUM KONTROLLÜ 6x6 SERBESTLİK DERECELİ STEWART PLATFORMU'NUN TASARIMI MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Cevher SUNGURAY\*, Satılmış ÜRGÜN, Haluk DEMİRTAŞ, Sezer GÜNGÖR

## Özet

Seri ve paralel mekanizmalar günümüzde birçok alanda yoğun şekilde kullanılmaktadır. Paralel mekanizmaların en yaygın kullanıldığı Stewart Platformu, ilk olarak 1965'te D. Stewart tarafından uçak simülatörlerinde 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. Bu çalışmada, MATLAB, Simulink ve SolidWorks gibi programların kullanımıyla konum kontrollü 6x6 serbestlik derecesine sahip bir Stewart Platformun ters kinematik analizi yapılarak platformun tasarımı hedeflenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Stewart Platform, Simülatör, Gerçek Zamanlı Kontrol, Konum Kontrolü, Ters Kinematik

## DESIGN, MODELLING AND SIMULATION OF POSITION CONTROLLED 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 this study, with the use of programs such as MATLAB, Simulink and SolidWorks, Position Controlled 6x6 Degree of Freedom Stewart Platform's inverse kinematic analysis and design of this platform is aimed.

**Keywords:** Stewart Platform, Simulator, Real Time Control, Position Control, Inverse Kinematic

## 1. Giriş

Robotikte 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].

Seri ve paralel manipülatörler günümüzde birçok alanda geniş kullanım alanları bulmaktadır. Seri ve paralel manipülatörler incelendiğinde seri manipülatörlerin paralel manipülatörlere kıyasla daha fazla kullanıldığı görülebilir. Ancak bu durum günümüzde değişiklik göstermiştir.

Seri manipülatörler robot manipülatörlerinin en yaygın şekilde kullanılan türüdür. Seri manipülatörler açık-çevrim kinematik zincirlere ve seri şekilde bağlı bağlantı elemanlarına sahiptir. İnsan koluna benzeyen bu yapılar, insan kolunun avantaj ve dezavantajlarına sahiptirler [2]. Seri manipülatörlerin hızlı, ivmesi yüksek olması ve tüm çalışma uzayını

\* Sivil Havacılık Yüksekokulu, Yüksek Lisans Öğrencisi  
E-posta: cevhersunguray@gmail.com

dolaşabilme özelliği avantajlarından bazılarıdır. Ancak her bağlantı elemanı kendinden önce gelen bağlantı elemanlarını ve aktüatörlerinin toplamını taşıdığı için enerji verimi açısından bu durum seri manipülatörler için önemli bir dezavantajdır.

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 geliştirdiği mekanizmadır [2]. Paralel mekanizmaların hassas konumlandırma, ağır yük taşıyabilme ve yüksek rijitlik gibi avantajları mevcuttur. Paralel manipülatörlerde her kol kendi üzerine düşen yükü kaldırdığı için ağır yük taşıma kabiliyeti oldukça yüksektir. Ancak azalan çalışma uzayı, zor mekanik tasarım, seri manipülatörlere göre daha karmaşık kinematik denklem hesaplamaları, karmaşık kontrol algoritmaları paralel manipülatörlerin dezavantajlarından öne çıkanlarıdır.

Paralel yapılar çok uzun zaman öncesinden bilinmektedir. Fakat bu yapılar 1960'lı yıllarda ilk olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1962 yılında Gough ve Whitehall lastikleri test etmek amacıyla 6 eksen lineer kaldıraç makinesini tasarlamışlardır [3]. Bu olaydan sonra 1965 yılında Stewart paralel manipülatörler ile bir uçuş simülatörü tasarlamıştır. Bu platform Stewart-Gough Platform veya kısaca Stewart Platform olarak adlandırılmaktadır.

Kapalı-zincir ve açık-zincir mekanizmalarının kombinasyonundan oluşan bir sistem daha vardır. Bu sistem Hybrid manipülatörler olarak bilinmektedir [4]. Aynı zamanda paralel manipülatörlerin gelişmiş şeklidir. Hybrid manipülatörler paralel manipülatörlerin limitli çalışma uzayı dezavantajını ortadan kaldırmıştır. Hybrid manipülatörler seri ve paralel mekanizmaların aynı anda kullanıldığı bir yapıdır, dolayısıyla yüksek rijitlik ve geniş çalışma uzayı içermektedir. Bu konu hakkında çalışmalar henüz yeteri kadar olmasa da bu konuya ilgi her geçen gün artmaktadır.

## 2. Stewart Platform Mekanizması

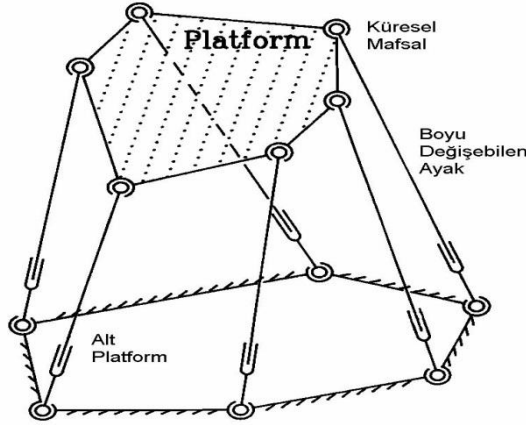
Stewart Platform Mekanizması (SPM) altı adet lineer aktüatör ile tahrik edilen paralel robot yapısıdır. Paralel bir mekanizma olan Stewart Platform makine endüstrisinde kullanıldığı gibi hava, deniz ve kara araçları için eğitim ve eğlence simülatörlerinde de kullanılmaktadır [URL-1].

Federal Havacılık Kurallarına (FAA) göre bir teçizatın uçuş simülatörü olarak adlandırılabilmesi için en az bir hareketli platforma sahip olması gerekmektedir. Aksi halde teçizat, uçuş simülatörü olarak değil uçuş eğitim aracı (FTD) olarak adlandırılmaktadır [5-6].

Literatürde bu mekanizmaya Stewart platformu dendiği gibi, tam paralel hal alması Gough'nun önerisiyle olduğundan mekanizmaya Gough-Stewart platformu da denmektedir.[7] 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 ayakta oluşmakta idi.[8]

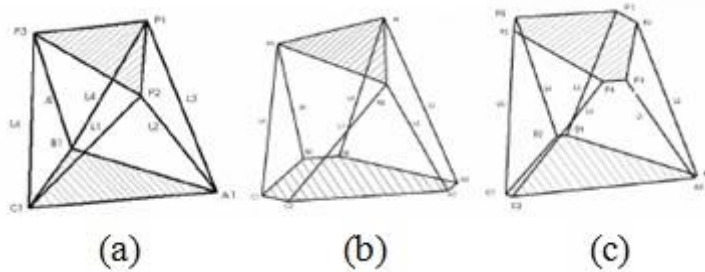
Bu gelişmelerden sonra bir çok imalat ve robotik uygulamalarda faydalandığından önemli bir araştırma alanı olarak ilgi çekmiştir. Örneğin, Hunt platformu bir paralel robot kolu olarak kullanmayı önermiş [9], Geng ve Haynes ise deneysel titreşim izolatör aleti tasarımında kullanmayı düşünmüşlerdir [10]

Bu yıllardan itibaren yoğun bir şekilde araştırma konusu haline gelen ve birçok tasarımı ortaya atılan SPM için zaman içerisinde genel bir yapı oluşturulmuştur. Bu genelleştirilmiş 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 [11]. Şekil 1'de Stewart Platform Mekanizması görülmektedir.



Şekil 1. Stewart Platform Mekanizması

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 düzlemli olabileceği gibi farklı düzlemlerde de olabilir. Eş düzlemli olmayan bağlantının kinematik çözümü için ekstra algılayıcılar gerekmektedir [12]. 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. Şekil 2'de farklı mimarideki Stewart Platform Mekanizmaları verilmiştir.

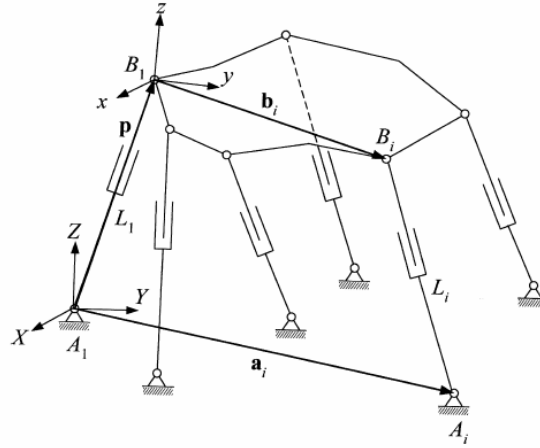


Şekil 2. Farklı mimarideki SPM modelleri a) 3x3 b) 3x6 c) 6x6 [URL-2]

## 2.1. SPM Kinematik Analiz Matematiksel Modeli

Kinematik, platformun hareketlerinin bu hareketlere sebep olan kuvvet ve torklar hesaba katılmadan incelenmesidir.[8]. 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. 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.[2]

Bu çalışmada tasarlanan SPM'nin 6x6 modelidir. Sistemin analizi temelde bilgisayar ortamında olacağından platformun düz kinematik analizine bu kısımda yer verilmeyecektir. Bu bölümde [4] genel bir 6x6 serbest dereceli SPM'nin ters kinematik analizi anlatılacaktır.



Şekil 3. 6x6 serbest dereceli Stewart Platform [4]

Şekil 3'te görüldüğü gibi modelde bulunan 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 sağlanmalıdır:

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

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

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

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

(2.2)

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

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

$\mathbf{a}_i = [a_{ix} \ a_{iy} \ a_{iz}]^T$  and  ${}^B\mathbf{b}_i = [b_{iu} \ b_{iv} \ b_{iw}]^T$  burada  $\mathbf{a}_i$  eşitliği, sabit yapı üzerindeki  $A_i$  noktasının pozisyon vektörlerini belirtmektedir.  ${}^B\mathbf{b}_i$  eşitliği ise hareketli yapı üzerindeki  $B_i$  noktasının pozisyon vektörlerini vermektedir. Dolayısıyla denklem 2.2 için kapalı döngü denklemi şöyle yazılabilir:

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

Burada p sabit tabana bağlı olan hareketli platformun konumunu belirten pozisyon vektörüdür.  $i^{th}$  uzvunun  $d_i$  uzunluğunu hesaplayabilmek için  $A_i B_i$  '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. Uzun uzunlukları ise hesaplanacaktır. Eşitlik 2.5'teki denklemi genişletirsek ve sonucun karekökünü alırsak, uzuv uzunluklarını bulmak için aşağıdaki gibi genel bir ifade elde edilir:**

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

Denklem 2.5'teki denklem konum uzunluklarını hesaplayabilmek için 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.

Düz kinematik problem için, uzuv uzunlukları bilinir ve bu konfigürasyon için pozisyon vektörü p ve rotasyon matrisi  ${}^A R_B$  belirlenecektir. Düz kinematik problemde yüksek derecede doğrusal olmayan ve çözmesi son derece zor olan birçok eşitlik vardır. Birçok araştırmacı bu eşitlikler üzerine çalışmalar yapmış, analitik veya numerik olarak çözüm yolları bulmayı denemiş, bunun sonucunda bazı metotları geliştirmişlerdir. Konuyla ilgili olarak yapılan ilk çalışma Bezout yöntemi kullanılarak yapılan düz kinematik çözümdür [13]. 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 [14]. Raghavan [15] süreklilik metodunu kullanarak düz kinematik problemleri çözebilmeye çalışmış ve genel bir SPM'nin 40 düz kinematik çözümü olduğunu ispatlamıştır. Konu dışında kalması ve karmaşık yapıda olması sebebiyle bu çözümler bu çalışmada belirtilmemiştir.

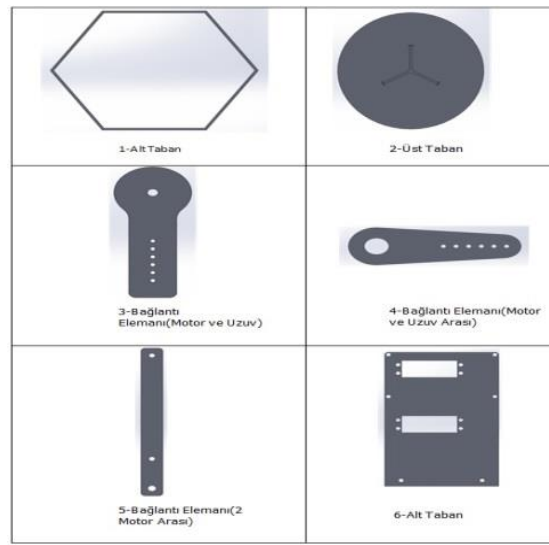
### 3. Stewart Platform Mekanizmasının Katı Modellenmesi

Bu çalışmada anlatılan konum kontrollü 6x6 serbestlik derecesine sahip SPM SolidWorks programı ile sanal ortamda modellenmiştir. Bu bölümde SolidWorks programının bu

çalışmada hangi bölümlerde gerekli olduğunu ve ilgili bölümlerde nasıl kullanıldığı anlatılacaktır.

SolidWorks 2 boyutlu ve/veya 3 boyutlu çizim yapmaya imkân veren, bilgisayar destekli tasarım (BDT) yazılımıdır. SolidWorks programı sayesinde bir nesnenin istenildiği boyutta çizimi yapılır, çizimi yapılan bu nesne programın içeriğinde bulunan test modül sistemleri sayesinde çeşitli uygulamalara (simülasyon, analiz vs.) tabi tutulabilir. SolidWorks programında katı model oluşturmak için öncelikli olarak parça iki boyut halinde çizilir. Daha sonra üç boyut haline getirilerek çizime derinlik kazandırılır. Bu çalışmada modellenen Stewart Platform Mekanizmasının her parçası bu şekilde oluşturulmuştur. Tablo 1’de Stewart Platform Mekanizmasını oluşturan parçaların katı model şekilleri görülmektedir.

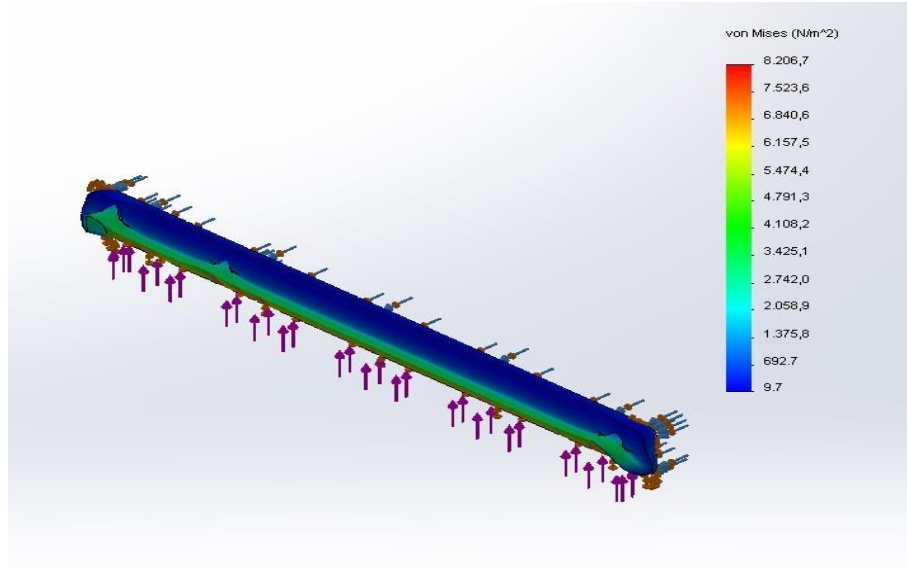
Tablo 1. SPM tasarımında kullanılan katı modeller



Tablo 1’de belirtilen parçaların hepsi SolidWorks programında “.sldprt” formatında çizilmiş ve daha sonra SimMechanics programında çalıştırabilmek için “.xml” olarak farklı kaydedilmiştir.

Katı modeli oluşturulan her parçaya SolidWorks programının analiz uygulamasıyla ayrı ayrı dayanım analizi yapılmıştır. Dayanım analizi yapmanın amacı, parçanın hangi kuvvetlere dayanabileceğinin alt ve üst limitlerini anlayabilmektir. Örneğin; hareket esnasında ne kadar esneme olacağı, parçaya ne kadar yük bineceği ve parçada hangi bölgede ne kadar zorlanma olduğu gibi bilgiler analiz sonucu elde edilebilir.

Parçaların analiz işlemi üretim aşamasına geçmeden sanal ortamda test edildiği için maliyetten ve zaman bakımından oldukça faydalı bir uygulamadır. Şekil 4’te SPM tasarımında kullanılan iki motor arası bağlantıyı gerçekleştiren parçanın analiz sonuçları gösterilmektedir.

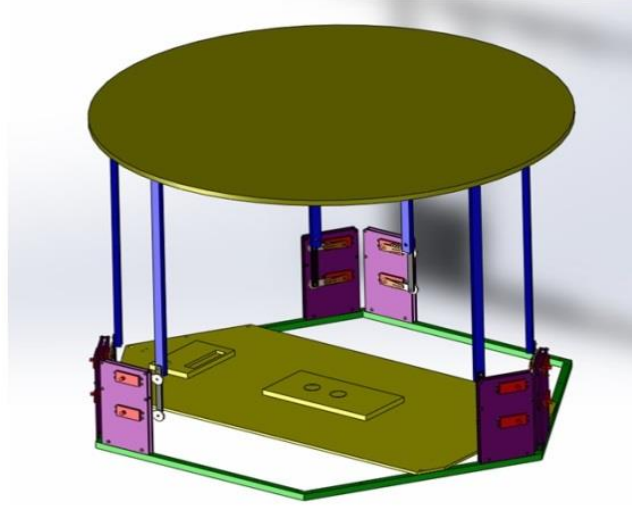


Şekil 4. Bağlantı elemanı analizi sonucu

Şekil 4'te Von Mises grafiğinde esneme payı minimum 9,7 N/m<sup>2</sup>, maximum 8206,7 N/m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Parçanın şekilde görüldüğü gibi üst ve yan kısmına simülasyon ortamında kuvvet uygulanmıştır. Parçanın esneme payı belirtilen minimum ve maximum değerler arasında olduğu için parçanın dayanım analizi sonucu idealdir. Grafikte mavi renkten kırmızı renge doğru parçanın zorlanma durumu gösterilmektedir. Mavi kısım minimum, kırmızı kısım ise maximum esneme payı değerlerini belirtmektedir. Analizi yapılan parça için esneme payı değerinin minimum ve maximum değerler arasında olması ideal değer olarak belirlenmiştir. Bağlantı elemanı istenilen değerler arasında olup, analizi geçmiştir.

Yapılan analiz işlemi tüm parçalara uygulanmıştır. SPM'nin tüm parçalarının birbiri ile uyum içerisinde çalışması mekanizmanın amacını gerçekleştirme açısından oldukça önemlidir. Tüm parçaların analiz işlemi bitirildikten sonra parçaların birleştirme işlemi ile SPM son haline kavuşturulmuştur.

Tablo 1'de görünen tüm üç boyutlu parçalar teker teker SolidWorks programının birleştirme işlemi için kullanılan "Assembly" alanına getirildikten sonra birleştirme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda parçanın bütünlük görüntüsü elde edilir. Birleştirme işleminden sonra tüm ilişkili parçaların kontrolü yapılır. Hareket eden parçaların birbirlerinin hareket kabiliyetini kısıtlamaması gerekmektedir. SPM'i oluşturan parçalarda bu tür problemler ortadan kaldırılmalıdır. Şekil 5'te birleştirme işlemi yapılan SPM'nin son hali görülmektedir.



Şekil 5. Birleştirmesi yapılan SPM modeli

#### 4. SPM'nin MATLAB ve Simulink ile Simülasyonu

Bu çalışmada bahsi geçen konum kontrollü 6x6 Stewart Platform Mekanizması SolidWorks programında tasarımı, parça dayanım analizi ve birleştirilmesi yapıldıktan sonra MATLAB programının alt uygulaması olan Simulink programında eş zamanlı olarak simüle edilmiştir. Bu bölümde MATLAB ve Simulink programlarının bu çalışmada hangi bölümlerde gerekli olduğunu ve ilgili bölümlerde nasıl kullanıldığı anlatılacaktır.

Simulink MATLAB programı içerisinde bulunan bir uzantıdır. Simulink programı çoklu dinamik sistemlerin analizine, sistemlerin eş zamanlı simülasyonuna ve grafiksel tasarım işlemleri yapmaya imkân vermektedir.

SolidWorks programında tasarlanan Stewart Platform Mekanizması “simulink.xml” dosya formatında kaydedildikten sonra montajda kullanılan her parçanın ayrı ayrı “.xml” uzantılı dosyası oluşur. Son olarak yine aynı uzantılı “Assembly” adında bir dosya oluşur. Bu dosya ismi isteğe göre değiştirilebilir.

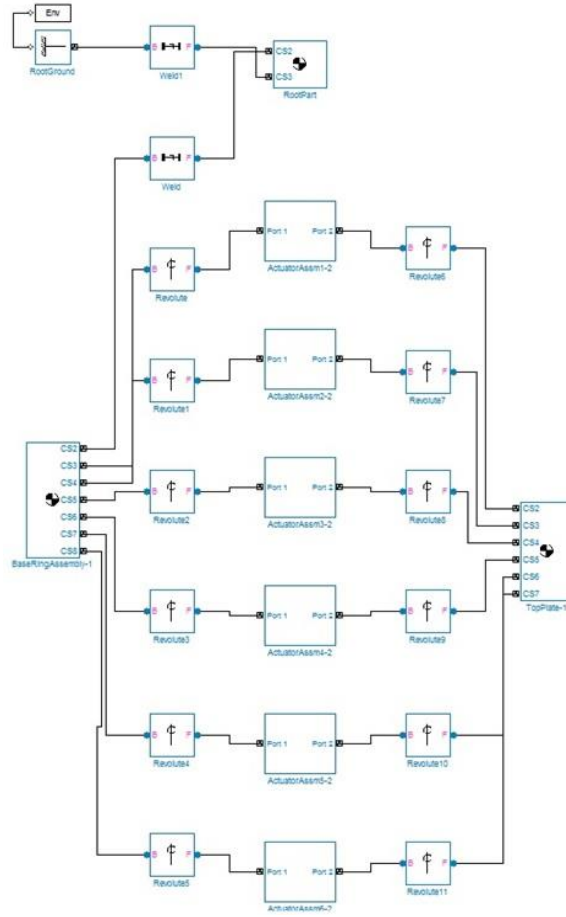
Oluşan bu dosya adı ve adresi ile birlikte MATLAB çalışma alanına “mech\_import” komutu ile bildirilir. Şekil 6’da bu işlem gösterilmektedir.

```
Command Window
>> simulink
>> simulink
>> mech_import('C:\Users\CEVHER\Desktop\CEVHER\stewart_platform.xml')
```

Şekil 6. “mech\_import” komutunun yazılması

Simulink programında karşımıza çıkacak olan pencere Şekil 7’de görülmektedir.

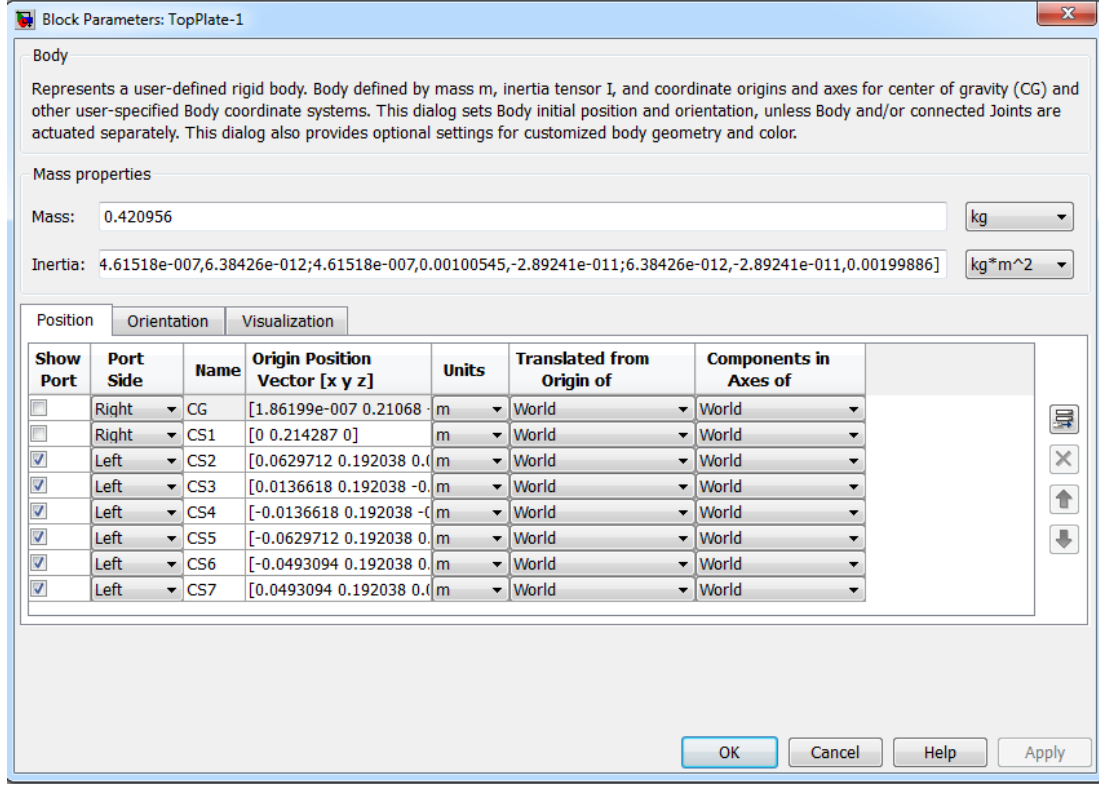




Şekil 7. Tasarımın Simulink blok şeması

Şekil 7’de tasarlanan Stewart Platform Mekanizmasının tüm bağlantı şekillerini gösteren blok şemalar görülmektedir. Şekilde 6 adet aktüatör, 6 adet uzuv, bir adet sabit plaka ve bir adet hareketli plakadan oluşan Stewart Platform Mekanizmasının Simulink programında açılmış şekli görülmektedir. Sistem 6x6 serbestlik derecesine sahiptir. Her bacak küresel mafsallar kullanılarak alt ve üst plakaları birbirine bağlar. Şekil 7 de görülen blok şemalar içerisinde bazı parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler elemanın hareket eksenini, ağırlık merkezini, başlangıç konum vektörlerini içermektedir. Sistemin uygun bir şekilde çalışabilmesi amacıyla tüm elamanların aynı uzay düzleminde, aynı hareket ekseninde seçilmesi oldukça önemlidir.

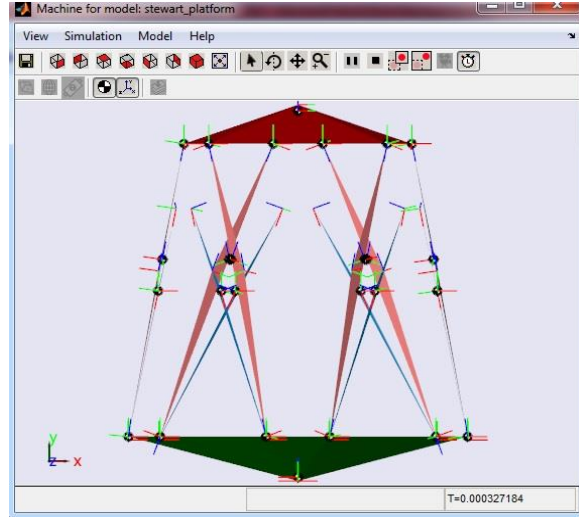
Örneğin farklı ekseninde çalışacak bir uzuv hareket yönleri farklı olacağı için sistem karışacak ve simülasyon adımı hatalar ile karşılaşılacaktır. Üst plakanın blok parametreleri Şekil 8 de gösterilmektedir.



Şekil 8. Üst plaka blok parametreleri

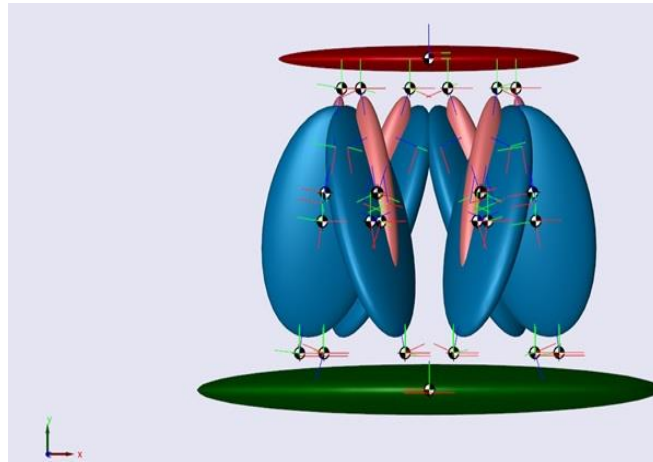
Sistemi oluşturan blok şemaların parametreleri belirlendikten sonra bir sonraki aşama simülasyondur. Sistemi görsel olarak test edebilmek için yine Simulink programından faydalanılacaktır. Sistemi bilgisayar ortamında simüle edebilmek önemli avantajlar sağlamaktadır. Örneğin gerçek hayatta üretim aşamasına geçilmeden önce yapının doğruluğu ve verimliliği simülasyon sayesinde incelenebilmektedir. Dolayısıyla simülasyon sanal ortamda kullanıcıya problemleri giderebilmesi için alternatif çözüm yollarını deneme imkânı sunabilmektedir.

SPM'nin blok şeması ekrana geldikten sonra Simulink penceresinin yukarı menüsünde bulunan "play" tuşuna basılması sonucu Simulink modeli algılayacak ve simülasyonu başlatacaktır. Şekil 8'de simülasyonun başlatılması sonucu açılan pencere görülmektedir.



Şekil 8. Simülasyon ekranı

Şekil 8’de SPM’de kullanılan üst plaka, alt plaka ve altı adet aktüatörler net bir şekilde görülebilmektedir. Aynı zamanda her bir aktüatörün ağırlık merkezleri ve koordinat düzlemleri görülebilmektedir. Şekile 3 boyut kazandırabilmek amacıyla yine programın menüsünden “3D” sekmesi işaretlenebilir. Şekil 9’da SPM’nin üç boyut görüntüsü görülmektedir.



Şekil 9. SPM üç boyutlu simülasyonu

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada paralel ve seri mekanizmalar üzerinde durulmuş, paralel manipulatörlerden en önemli olanlarından biri Stewart Platformu detaylı olarak incelenmiştir. Stewart Platformu’nun çalışma mantığını kavrayabilmek amacıyla seri ve paralel manipulatörleri bilmek ve anlamak oldukça önemli bir husustur. Ayrıca sistemin ileri ve ters kinematik denklemlerinin çözülmesi oldukça önemlidir. Kullanılan programlar sayesinde yazılım dilinden faydalanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan SPM tasarımının ters kinematik analizini anlayabilmek için genel bir 6x6 serbestlik derecesine sahip Stewart Platformunun ters kinematik analizi yapılmıştır.

SPM’nin SolidWorks programı ile tasarımı yapıldıktan sonra katı model olan parçalara dayanım analiz testi uygulanmıştır. 2 motor arasındaki bağlantıyı gerçekleştiren parçanın

detaylı analizi yapılmıştır. Analiz sonucu istenilen değerler elde edilmiş ve platformun birleştirme işlemine geçilmiştir.

Birleştirilmesi yapılan SPM “.xml” dosya formatında kayıt edilerek Simulink programında açılmış ve burada simüle edilmiştir. Modelin üretimden önce simüle edilmesi zaman, maliyet ve doğruluk vb. birçok faktör açısından büyük önem arz etmektedir.

Simülasyonu yapılan 6x6 serbestlik derecesine sahip Stewart Platform hareket kabiliyeti, doğruluk, verimlilik ve hassasiyet kriterleri baz alınarak istenilen seviyede çalıştığı gözlemlenmiştir.

## 6. Kaynaklar

- [1]Ulaş B., Stewart Platformu Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 251328.
- [2]Ünsal A., Farklı Yapıdaki Stewart Platform Mekanizmalarının Düz ve Ters Kinematik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007,201166.
- [3]Stewart, D., “ A Platform with Six Degrees of Freedom” Proceedings Institution of Mechanical Engineers, 180(15), 371-386, 1965.
- [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]Dongsu, W. ve Hongbin, G. (2007). Adaptive Sliding Control of Six-DOF Flight Simulator Motion Platform, Chinese Journal of Aeronautics 20, 425-433.
- [6]Ay S., “ Stewart Platform Mekanizması Çalışma Uzayı Analizi” Doktora Tezi, Hava Harp Okulu, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 407202
- [7] Elmas Anlı, Hüseyin Alp, Sait N. Yurt ve İbrahim Özkol, “Paralel Mekanizmaların Kinematiği, Dinamiği ve Çalışma Uzayı”, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi Cilt 2 Sayı 1 (19- 36), Ocak 2005.
- [8]Güney A, İnsan Makine Arayüzü olarak 3x3 Stewart Platformunun Empedans Kuvvet Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,2010,259820
- [9]K.H. Hunt, *Kinematic Geometry of Mechanisms* (Oxford University, London, 1978).
- [10]Z. Geng and L.S. Haynes, “Six-Degree-of-Freedom Active Vibration Isolation Using a Stewart Platform Mechanism”, *J. Robotic Systems* **10**, No. 5, 725–744 (1993).
- [11] [8]Yurt, Sait N., (2002) “6-3 Stewart Platform Mekanizmasının Kinematik, Dinamik Analizi ve Kontrolü” İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [12]Bonev, I.A., Ryu,J., (2000) “ A New method for solving the kinematics of general 6-6 Stewart Platforms using three linear extra sensors, Mechanism and Machine Theory, 35, 423-436.
- [13]Nanua P. ,Waldron K.J. and Murthy V. (1990). “Direct Kinematic Solution Of A Stewart Platform”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 6:438-444.
- [14]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
- [15]Raghavan M. The Stewart platform of general geometry and has 40 configurations. Journal of Mechanical Design, 115, 277-282, 1993.

## **İnternet Kaynakları**

### **[URL-1]**

<http://www.otomasyondergisi.com.tr/arsiv/yazi/stewart-platform-ve-hareketli-yaris-simulasyonu>

Erişim Tarihi: 30.10.2014

**[URL-2]**[http://robotics.technion.ac.il/projects/ronen\\_project.html](http://robotics.technion.ac.il/projects/ronen_project.html)

Erişim Tarihi: 30.10.2014