

## PARALEL MEKANİZMALARIN KİNEMATİĞİ, DİNAMİĞİ VE ÇALIŞMA UZAYI

**Elmas ANLI**  
Uçak Müh. Böl.  
İstanbul Teknik Üni.  
anli@itu.edu.tr

**Hüseyin ALP**  
Uçak Müh. Böl.  
İstanbul Teknik Üni.  
alp@isbak.com.tr

**Sait N. YURT**  
Uçak Müh. Böl.  
İstanbul Teknik Üni.  
yurtsa@itu.edu.tr

**İbrahim ÖZKOL**  
Uçak Müh. Böl.  
İstanbul Teknik Üni.  
ozkol@itu.edu.tr

### ÖZET

*Bu çalışmada, paralel mekanizmaların genel özellikleri, kinematik, dinamik ve çalışma uzayları hakkında bugüne kadar yapılan çalışmaların bir özeti verilerek ileriye yönelik önerilerde bulunulmuştur. Havacılık sahasında, pilot adayları, uçakla uçuş eğitimine başlamadan önce simülatörlerde eğitim görmektedirler, böylece eğitim kayıpları ve zamanı en aza indirilmektedir. Simülatörlerdeki eğitimler esnasında, pilot adaylarının ötelenme ve dönme hareketlerini gerçeğe yakın hassasiyette algulamaları çok önemlidir. Gerçek bir uçakta uçarken pilotun maruz kalacağı hareket, simülatörün altında bulunan bir paralel mekanizma ile sağlanır. 1965'te Stewart'ın uçuş simülatörü olarak önerdiği 6 serbestlik dereceli paralel platform mekanizmasının modifiye edilmiş hali bu işte kullanılmaktadır. Paralel mekanizmalar, mimarilerinden dolayı, seri mekanizmalardan daha yüksek doğal frekansa, katılığa, çalışma hızına, nominal yüklemeye ve hassasiyete sahiptir, ancak çalışma uzayları daha küçüktür. Stewart platform mekanizması, SPM, boyları prizmatik eklemler vasıtasıyla değişebilen 6 bacak ile birbirine bağlı altıgen biçimli bir sabit platform ve bir hareketli platformdan oluşmaktadır. Bacaklar platformlara genelde üniversal mafsallarla bağlı olmakla beraber, dönele veya küresel mafsallar da kullanılabilir. Bacakları hareket ettiren eyleyiciler sabit tabandadır. SPM üç yönde öteleme ve üç yönde dönme yapabilmektedir.*

**Anahtar Kelimeler:** ÇalışmaUzayı, Dinamik, Kinematik, Paralel Mekanizmalar, Stewart Platformu, Tekillikler

### ABSTRACT

*This paper summarizes the current state of affairs in the area of paralel mechanisms, their overall properties, kinematics, dynamics and workspace analysis; and makes suggestions on possible research areas that have not been explored yet. Piloting trainees train on flight simulators before flying the actual aircraft, so that training time and losses are minimized. It is vital for piloting trainees to sense the translation and rotation motions of the simulator just as they would in a real aircraft. The motion that a pilot would be exposed to while flying a real aircraft is provided by a paralel mechanism placed under the simulator. A slightly modified version of the 6 degree of freedom paralel platform mechanism suggested by Stewart in 1965 is used for this purpose. Due to their architecture, paralel mechanisms have higher natural frequencies, stiffness, speed, nominal loading capacity and precision, when compared to serial mechanisms, whereas their workspaces are smaller than those of serial mechanisms. The Stewart Platform Mechanism (SPM), is comprised of a hexagon shaped fixed base platform and a movable platform linked via six legs whose lengths can be changed using prismatic joints. The legs can be attached to the platforms using revolute or spherical joints, though universal joints are often used. The actuators that change leg lengths are on the base. SPM can move in three translational and three rotational directions.*

**Keywords:** dynamics, kinematics, parallel mechanisms, singularities, Stewart platform, workspace

### 1. GİRİŞ

Havacılık sahasında kullanılan simülatörlerin amacı, pilotlar gerçek uçakla uçmaya başlamadan önce eğitilmelerini sağlamak, böylece eğitim kayıpları ve zamanını en aza indirmektir. Simülatörler, uçuş

sırasında karşılaşılabilecek her türlü koşulu ve doğal şartı hassas bir şekilde pilota hissettirebilmelidirler. Eğitimler esnasında, gerçek uçakta maruz kalınan ötelenme ve dönme hareketlerinin pilot tarafından algılanması gerekir. Teknolojideki gelişmelere bağlı

olarak simülátörlerin hassasiyeti artmıştır. Gerçek uçuşla karşılaştırıldığında ortaya çıkan maddi kazanç da hesaba katıldığında, pilot eğitiminin neden gerçek uçaklarla yapılmadığı açıkça görölür. Günümüzde, pilotlar uçakla eğitim almadan, simülátördeki eğitimle uçmaya hazır hale gelebilmektedir. Simülátörler, pilotlara, uçakla eğitim sırasında denemelerinin güvenli olmayacağı acil durum planlarını deneme imkanı verir. Bu sebeplerden dolayı uçuş eğitimi sırasında simülátörler kullanılır.

İnsan vücudu hızın büyüklük ve yönündeki değişimlere, yani ivmeye hızın büyüklüğünden daha çok tepki verir. Bu sebeple ivmelerin doğru hesaplanması son derece önemlidir. Simülátörlerde ivmeler hesaplanırken iki tipe ayrılırlar. Bunlar uçuş kontolünden yani uçağın tırmanması veya inişe geçmesinden oluşan ivmeler ve uçağın hızlanması veya yavaşlamasından dolayı oluşan ivmelerdir.

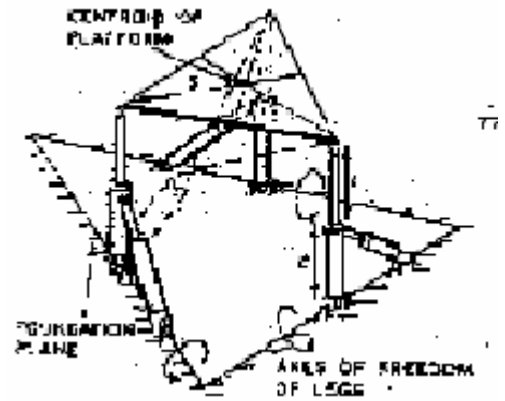
Pilotun maruz kalacağı ötelenme ve dönme hareketleri, simülátörün altında bulunan bir paralel mekanizma ile sağlanır. Bir paralel mekanizma, ortak bir platforma paralel olarak bağlanmış bağlardan meydana gelir. Bir başka tanım, paralel mekanizmaların, uç platformun tabana en az iki bağımsız kinematik bağ ile bağlandığı mekanizmalar olduğudur. Paralel mekanizmaların uçuş simülátörlerinde kullanılması fikrini ilk olarak 1965 yılında Stewart [1] ortaya atmıştır. Günümüzde Stewart platformu olarak anılan mekanizmadan biraz farklı olmakla beraber, ortaya atılan mekanizma 6 serbestlik dereceli, her biri zeminle bağlantılı 6 motora sahip bir mekanizmaydı. Üçgen biçimli hareketli üst platform küresel mafsallarla bacaklara bağlıydı. Stewart'ın tasarım aşamasında dikkate aldığı noktalar tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Paralel mekanizma tasarım hedefleri.

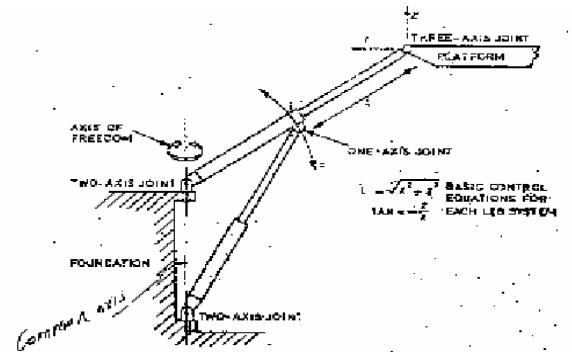
Tasarım Hedefi	Amaç
(1) 6'dan fazla motor kullanmamak	Redundancy'yi önlemek ve maliyeti düşürmek
(2) Her motorun zeminle bağlantılı olması	Motorların birbirleriyle etkileşimi önlemek
(3) Her motorun direk olarak aynı yüke etki etmesi	Belirli bir güç kaynağı için maksimum performans elde etmek
(4) Yük/yapısal ağırlık oranını yükseltmek	Mevcut güçten maksimum performans elde etmek
(5) Her motorun bir hareketle ilişkilendirilmesi	Kontrol kolaylığı
(6) Sürtünmeyi düşürmek	Güç kayıplarını düşürmek ve sistemden gelen yanıtı yükseltmek

Her motorun yalnızca bir hareketle ilişkilendirilmesinin imkansız olduğu görölüdü ve bu fikirden vazgeçildi. Neticede, üç doğrusal üç açısız yönde tek tek veya bunların herhangi bir

kombinasyonunda hareket edebilen bir paralel mekanizma tasarlanmıştır. Bu mekanizma, üçgen şeklinde bir üst platform, kendisine küresel mafsallarla tutturulmuş, boyları değişebilen üç ayak ve bu ayaklara iki eksenli açısız hareket veren diğer üç ayaktan oluşmakta idi. (şekil 1.) Üçgen biçimli hareketli platform her köşesinden 3 eksenli dönöl mafsallarla bacaklara, bacaklar da 2 eksenli mafsallarla zemine bağlanmışlardır. Bu 2 eksenli mafsalın eksenlerinden biri kontrol edilebilir, diğer i ise kontrol edilemez. Ayrıca, her bacak prizmatik eksenler vasıtasıyla boyunu değiştirme kontrolüne de sahiptir. (şekil 2.) Stewart, bu mekanizmanın kontrol edilebilir eksenleri aktifken 6 serbestlik derecesinin de kontrol edilebileceğini, bu elemanlar sabitken platformun da sabit bir konumda kalacağını belirtmiş, eklemler aktifken ve kilitliyen sistemin mobilitesini hesaplayıp bunu ispatlamıştır. Geometriden faydalanarak lineer ve açısız hareketi platformun köşe noktalarının koordinatlarıyla ilişkilendiren Stewart, son olarak da çeşitli tasarım önerileri vererek bacakların hidrolik jaklar, vida jakları, dönöl eyleyiciler veya kaldıraçlarla hareket ettirilebileceğini eklemiştir.



**şekil 1.** Stewart'ın önerdiği paralel mekanizma mimarisi.

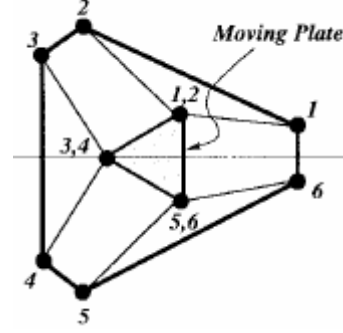


**şekil 2.** Stewart'ın önerdiği bacak mimarisi.

Bu çalışmanın ardından yazarla pek çok yazışma yapılmıştır. Bunlardan V.E. Gough'nun yorumu en

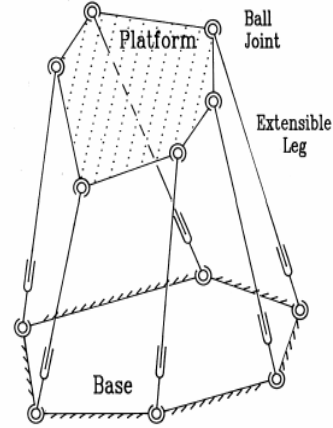
önemlidir çünkü, Whitehall ile birlikte altı adet lineer ve paralel ayak içeren bir platformu otomobil lastiği testlerinde kullandıklarını söyleyen Gough, altı eyleyicinin de paralel çalışmasını önermiş, böylece mekanizma günümüzdeki tam paralel halini almıştır. Bu çalışmayı takip eden yıllarda, paralel mekanizmalar uçuş simülörleri, oyun simülörleri, petrol platformları, robot kol ve uç organ tasarımı, helikopterle ağır yük taşımacılığı, hafif metal işleme, cilalama, kesme, şekil verme ve montaj işlemleri gibi pek çok sahada yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Paralel mekanizmalar, bağların tabana ve hareketli platforma eklemlerle bağlı olduğu robotlardır. Bağlardaki prizmatik eyleyiciler bağların boyunu değiştirir. Bir başka tanıma göre paralel mekanizmalar bir veya daha fazla kapalı döngü içeren ve bağlarının yalnızca bir kaç eyleyiciler tarafından hareket ettirilen zincirlerdir. Bu tür kinematik zincirlerin en ünlüsü Stewart'ın geliştirdiği mekanizmanın modifiye edilmiş halidir. Literatürde Stewart platform mekanizması (SPM) olarak anılan bu mekanizma, kontrol edilebilir 6 serbestlik derecesine sahiptir. Tipik bir SPM her biri tabana bağlı bir eyleyici ile hareket eden, boyları değişebilen 6 bacak vasıtasıyla birbirine bağlı rijit bir hareketli platform ve bir hareketsiz rijit platformdan oluşmaktadır. Platformları birbirine bağlayan, boyları değişebilen ayaklar bir pistondan oluşabileceği gibi, birbirine mafsallarla bağlanmış bir dizi elemandan da oluşabilir. Alt taraftaki bağlantı noktaları eş düzlemli olabileceği gibi, farklı düzlemlerde de olabilir. Eş düzlemli olmayan bağlantının kinematik çözümü için ekstra algılayıcılar gerekmektedir. Literatürde genellikle bacakların alt ve üst taraftan eş düzlemli olarak bağlandığı yapılar incelenmiştir. (Şekil 3 ve 4.) Havacılıkta kullanılan simülörlerde ve diğer çoğu uygulamada taban platformu sabit, üst platform hareketli olmakla birlikte, bazı uygulamalarda hareketli platformun tabanda, sabit platformun üstte olması da mümkündür. Petrol platformları buna örnek gösterilebilir. Eyleyiciler bacakların boyunu değiştirmektedir. Uçak simülörlerinde kullanılan mekanizmalarda hareketli platforma üst platform, hareketsiz platforma ise taban da denilmektedir. Üst platform, tabana göre 6 serbestlik derecesine sahiptir. Bacaklara belirli sabit boylar atanırsa, mekanizma bir yapı olur. Geometrik olarak bakıldığında, her bacak platformun üç köşesinden geçen çembere teğet düzlemlerdir. [2] Literatürde bu mekanizmaya Stewart platformu dendiği gibi, tam paralel hal alması Gough'nun önerisiyle olduğundan mekanizmaya Gough-Stewart platformu da denmektedir, ancak paralel bir mekanizmanın uzayda 3 yönde ötelenme 3 yönde de dönme hareketi yaparak uçuş simülörü olarak kullanma fikrini ortaya ilk atan kişi Stewart olduğundan SPM ismi daha yaygındır. Hunt ise bu mekanizmayı robot manipülörü olarak kullanmayı teklif etmiştir.



Şekil 3. Stewart Platform Mekanizmasının üstten görünüşü.

Geleneksel endüstriyel robotlar, seri bağlanmış bağlardan oluşan, açık döngülü mekanizmalardır. İnsan koluna benzeyen bu yapılar, insan kolunun avantaj ve dezavantajlarına sahiptirler. Seri bağlı mekanizmaların uzanabildikleri mesafe ve çalışma uzayları paralel mekanizmalardan daha yüksek olmasına rağmen dinamik özellikleri karşılaştırıldığında paralel bağlıların daha üstün



Şekil 4. Stewart Platform Mekanizmasının yandan görünüşü.

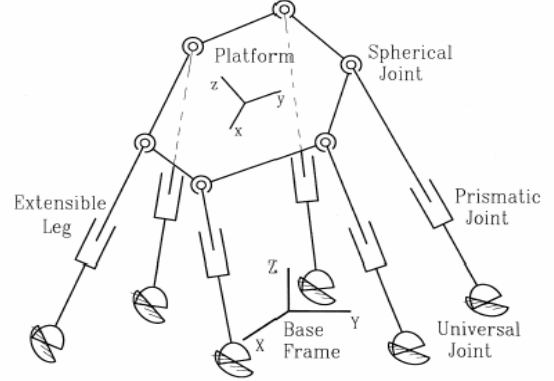
oldukları görülür. Seri mekanizmalar, pek çok araştırmacının da belirttiği gibi [3,4,5,6,7,8] fazla rijit değildir ve düşük doğal frekanslara sahiptir. Bu sebepten yüksek hızda ve yüksek yükler altındaki performansları düşüktür. Bunlara ilave olarak, zemine bağlı bağlardan uca doğru tüm bağlar, hem kendinden önceki bağ ve motorların ağırlığını taşıyabilecek kadar büyük olmalı, hem de istenilen hassasiyeti sağlamalıdır. Bu, eyleyicilerin boyut ve ağırlığının artmasına, dolayısıyla da yüksek hız ve yükleme gerektiren işlemlerde robotun dinamik performansının düşmesine sebep olur. Seri mekanizmaların bir başka dezavantajı ise, açık döngülü yapılarından dolayı eyleyici hatalarının toplanarak uça doğru büyük bir hata toplamı vermesidir. Aynı araştırmacılar paralel mekanizmaların üstünlükleri konusunda da bilgi vermişlerdir. Rijitlik ve hassasiyet bakımından daha üstün oldukları için ve doğal frekansları ile kuvvet/ağırlık oranları yüksek olduğundan, dinamik yüklemenin yüksek, hız ve hassasiyetin önemli, çalışma uzayının ise daha az önemli olduğu

durumlarda paralel mekanizmalar tercih edilir. Seri mekanizmalardan farklı olarak bağlardan yalnızca bir kaç eyleyiciler tarafından hareket ettirilir. Eyleyiciler tabana monte edilmiş olduğundan hareketli parçaların ağırlığı da düşüktür. Ayrıca, kapalı döngü yapılarından dolayı eyleyici hataları uca doğru eklenerek büyümür. Farkları özetlemek gerekirse, kapalı döngü yapıdan dolayı paralel manipülatör aynı boyut ve ağırlığındaki seri manipülatörlere göre daha rijittir, ve 6 eyleyicinin de kuvvet bileşenleri eklendiği için çıkış kuvveti/manipülatör ağırlığı oranı seri manipülatörlerden bir merteye büyüktür. Bütün bu özellikler göz önüne alındığında paralel mekanizmaların simülasyonlarda kullanımının son derece uygun olduğu görülür. Bunun karşılığında ise paralel mekanizmaların çalışma uzayı küçüktür, tasarımı, kinematığı ve kontrolü karmaşıktır.

Dasgupta ve Mruthyunjaya [9] yüksek yük taşıma ve hassasiyet gereken uygulamalarda paralel mekanizma kullanımının biyolojik hayatta da yer aldığını söyleyerek bu tezlerine örnekler vermişlerdir. Buna göre, yük taşımacılığında kullanılan hayvanların ikiden fazla ayağı vardır, böylece iki ayaklı insanlara göre daha kararlıdır, ağır yük taşımak gerektiğinde insanlar iki kollarını birden kullanırlar ve yazı yazarken gereken hassasiyetten dolayı parmaklar paralel çalışırlar. Aynı çalışmada, yazarlar robot manipülatörleri kapalı döngülü ve açık döngülü olarak sınıflandırmanın seri ve paralel olarak sınıflandırmayla aynı olmadığını belirtmişlerdir. Açık döngülü mekanizmalar her zaman seri olmalarına rağmen kapalı döngülü mekanizmalar paralel olabildikleri gibi seri de olabilirler. Bir serbestlik dereceli kapalı döngülü mekanizmalar seridirler. Bunlara ek olarak, paralel ve seri mekanizmaların bir arada kullanıldığı mekanizmalar da mevcuttur ve bunlara hibrit mekanizmalar denir. Literatürde az da olsa bunların tasarımı ve kinematik analizi ile ilgili çalışmalar da mevcuttur [10,11].

Havacılık simülasyonlarındaki yaygın kullanımlarından dolayı literatürde SPM ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Çoğunlukla bacakları üst ve alt platforma bağlayan eklemlerden biri küresel diğeri ise universal eklem olmakla beraber her ikisinin de küresel eklem olması da mümkündür. SPM'ler, kullanılan eklem türlerine göre ve bağ sayılarına göre isimlendirilirler. Bağları tabana m, hareketli üst platforma n noktadan bağlı bir SPM, m-n'lik mekanizma ismini alır. Örneğin bacaklar üstte ikişerli gruplar halinde birleştirilmiş ve üç noktadan üst platforma bağlanmış ise, mekanizma 6-3 SPM olarak adlandırılır. Eklem tiplerine baktığımızda ise, U universal, P prizmatik, R dönme, C silindirik, S ise küresel mafsallar için kullanıldığından, prizmatik eklemlere sahip bacakları, tabana universal, üst platforma ise küresel mafsallarla bağlı bir mekanizma UPS eklemli SPM olarak adlandırılır (şekil 5); bacakları her iki platforma da küresel mafsallarla bağlı bir mekanizma ise SPS adını alır. 3-3, 6-6, 6-3'lük mekanizmalar hakkında pek çok

çalışma yapılmıştır. 5-5, 4-4 ve 6-5 SPM'ler üzerinde de az da olsa çalışılmıştır. Bununla beraber, çeşitli koşulları iyileştirmek adına kendi paralel mekanizma tasarımını yapan araştırmacılar da vardır [12]. Bütün SPM türlerinin içerisinde 6-6'luk platform, taban ve üst platformlarda altışar destek noktası olduğundan dolayı diğerlerinden daha rijittir ve kuvvet dağılımı daha iyidir.

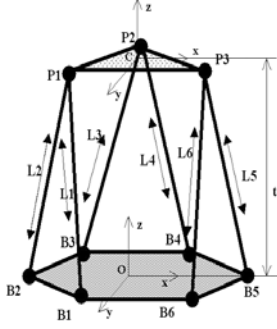


Şekil 5. 6-UPS Stewart Platform mekanizması.

## 2. KİNEMATİK

SPM'nin düz kinematik problemi, bacak boyları bilindiğinde üst platformun sabit alt platforma göre ötelenme ve yönelmesinin bulunmasıdır. Diğer bir deyişle, 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. Ters kinematik problem ise, 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 son derece kolaydır. Belirli bir yörüngeyi gerçek zamanlı takip etmek gerektiğinde, ters kinematığın online çözülmesi gerekir. 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 konfigürasyonuna sadece bir giriş ile ulaşılabilir. Ters kinematik analizde kullanılan 6-3 SPM modeli şekil 6'da verilmiştir.

Üst platformun tabandaki sabit eksen takımına göre koordinatları, R dönme matrisi ve t öteleme vektörü ile verilir. R dönme matrisinin bulunması için, hareketli platformun hangi eksenlere göre hangi sırada döndüğünün bilinmesi gerekir. Hareketli platformdaki eksen takımı, sabit platformdaki eksen takımına göre önce x etrafında  $\gamma$  derece, sonra y etrafında  $\beta$  derece,



Şekil 6. Kinematik analizde kullanılan model.

en son olarak da z eksenini etrafında  $\alpha$  derece dönerse, dönme matrisi R, Euler açılarından faydalanılarak

$R = (R_x R_y R_z)^T$  şeklinde tanımlanır. Burada  $R_x$  x eksenini etrafındaki dönme matrisi,  $R_y$  y eksenini etrafındaki dönme matrisi,  $R_z$  ise z eksenini etrafındaki dönme matrisidir. x eksenini etrafındaki dönmenin  $\gamma$  derece, y etrafındaki dönmenin  $\beta$  derece, z eksenini etrafındaki dönmenin de  $\alpha$  derece olduğu hesaba katılırsa, Euler açılarından faydalanılarak

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3) \text{ olur ve}$$

R matrisi

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \gamma \\ \hline & +\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & +\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \gamma \cos \alpha & -\sin \gamma \cos \alpha \\ \hline & +\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & +\cos \gamma \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır.

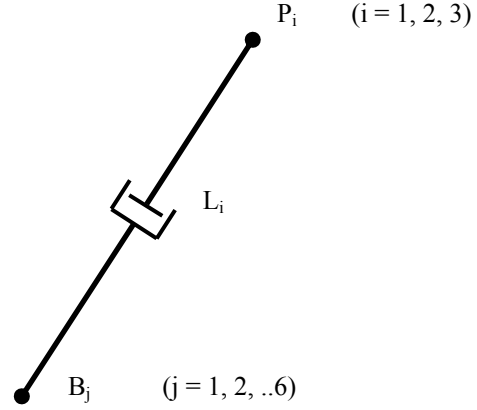
6-3 SPM'de  $P_i$ 'ler üst platformun köşelerinin tabandaki sabit eksen takımına göre konumu (şekil 7),  $p_i$ 'ler ise aynı köşelerin hareketli platformdaki eksen takımına göre olan konumu olmak üzere

$$P_i = R p_i + t \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

yazılabilir.

Bu dönme matrisi ve öteleme vektörü kullanılarak üst platformun köşe noktalarının ( $p_i$ ) alt platforma bağlı

sabit eksen takımındaki ifadeleri  $P_i$  ( $i = 1..3$ ) elde edilir. Alt platformun köşe noktaları  $B_j$  ( $j = 1..6$ ) ise, bacak vektörleri  $P_i$  ve  $B_j$ 'lerin farkından bulunur, bacak boyları  $L_i$ 'ler ise bu vektörlerin normudur.



Şekil 7. SPM'nin bir bacağı.

Mekanizmanın gerçek zamanlı kontrolü için kinematik problemin tam olarak çözülmesi gerekmektedir. Innocenti ve Parenti-Castelli [8], kinematik problemin kapalı formda çözümüne ulaşılmasının avantajları arasında girişteki hataların konuma olan etkisinin tam olarak bilinmesi ve giriş değerlerini kontrol ederek platformun yüksek hassasiyette konumlandırılmasının mümkün olmasını saymıştır.

Lee ve Shah [6] 3 serbestlik dereceli paralel mekanizmanın düz ve ters kinematik analizini yapmıştır. Bu çalışmada, 6 serbestlik dereceli bir paralel mekanizmanın iki tane 3 serbestlik dereceli mekanizmanın birleşiminden oluşabileceği gibi, 3 serbestlik dereceli mekanizmaların 6 serbestlik derecelilerin bir kısmı olarak nasıl kullanılabileceği de gösterilmiştir.

Nanua ve arkadaşları [13] Stewart platformunun 6-3 hali için düz kinematik problemi çözmüşlerdir. Bu özel hal, 6 bacağın, ardışık ikişer tanesinin üçgen biçimli hareketli platformun köşelerine birlikte bağlandığı durumdur. Hareketli platformun altıgen yerine üçgen olmasına izin veren bu mimari, robotikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bacakların hem tabana hem de üste ikişerli olarak bağlandığı bir başka özel hal de mevcuttur. (Şekil 8.) Bu mimarilerden her ikisi için de kinematik denklemler çıkarılmıştır. Bu çalışmada izlenen yol ilk olarak tabanın kenar uzunluklarının bacak boyları cinsinden ifade edilmesi, daha sonra hareketli platformun köşe vektörlerinin taban kenarları cinsinden verilmesi, ardından eklem dönme açılarının kenar uzunlukları ve birim vektörlerin cinsinden verilmesi ile başlar. Kinematik problemin çözümüne 16. dereceden bir polinom çözümü ile ulaşılır, bu da demektir ki bir bacak boyu takımına karşılık hareketli platform en fazla 16 konfigürasyon alabilir. Oktahedral SPM'nin düz kinematik denklemi  $J_1 x_t^4 + J_2 x_t^3 + J_3 x_t^2 + J_4 x_t + J_5 = 0$  (6) şeklinde verilebilir. Burada  $x_i$  değişkenlerine

$x_i = \tan(\phi_i)$  ( $i=r,s,t$ ) dönüşümü ile ulaşılmıştır.  $\phi_i$  açıları ise, hareketli üst platformda aynı noktaya bağlanan ardışık iki bacak ile, onların tabana bağlandıkları noktaları birleştiren doğruların oluşturdukları düzlemlerin, taban ile yaptıkları açılarıdır. J katsayıları aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$J_1 = K_1 x_r^4 + K_2 x_r^2 + K_3 \quad (7)$$

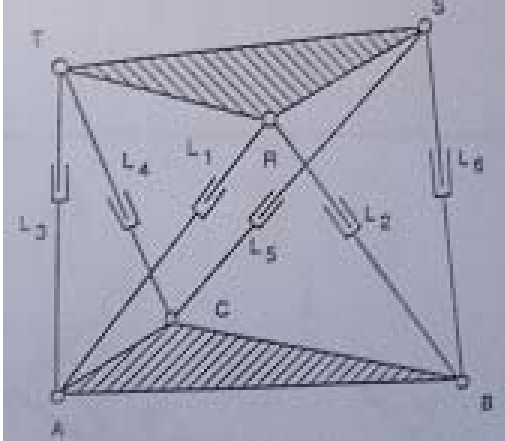
$$J_2 = K_4 x_r^3 + K_5 x_r \quad (8)$$

$$J_3 = K_6 x_r^4 + K_7 x_r^2 + K_8 \quad (9)$$

$$J_4 = K_9 x_r^3 + K_{10} x_r \quad (10)$$

$$J_5 = K_{11} x_r^4 + K_{12} x_r^2 + K_{13} \quad (11)$$

Burada K katsayıları sabitlerdir ve mekanizma geometrisine, hareketli platformun köşelerinin koordinatlarına ve eklem dönme açılarına bağlıdır. Bu polinomun çözümüne aslında yalnızca 8. dereceden bir polinom çözümünüyle ulaşılabileceği matematiksel olarak gösterilmiştir. Çözümlerden sekizi, diğer sekizinin negatiftir. Bulunan sonuçlar sayısal bir örnekle doğrulayan yazarlar, polinom derecesinin daha da düşürülerek problemin çözümüne daha kolay yoldan ulaşılabileceğini de belirtmiştir.



Şekil 8. Özel bir SPM mimarisi (oktahedral mimari.)

Innocenti ve Parenti-Castelli ise [8] SPM'nin düz kinematığını kapalı formda çözmüştür. Bu çalışmanın özelliği özel bir SPM mimarisi için değil, Stewart tarafından tanımlanan genel model için çalışılmış olmasıdır. Bu araştırmacıların ulaştıkları sonuç, G, M, N, U, V, D, E, F katsayıları sistem mimarisine ve bacak boyları ile dönme açılarına bağlı olmak üzere,

$$\begin{vmatrix} 0 & G & M & N & U & V \\ G & M & N & U & V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D & E & F \\ 0 & 0 & D & E & F & 0 \\ 0 & D & E & F & 0 & 0 \\ D & E & F & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0 \quad (12)$$

şeklinde bir determinant denklemidir. Dikkat edilmesi gereken nokta, bu determinantın değeri hesaplandıktan sonra yine 16. dereceden bir polinoma ulaşıldığıdır.

Bu çalışmada da 16. dereceden tek bilinmeyenli polinom denkleminde ulaşılmış, bir giriş değeri için platformun 16 farklı konfigürasyon alabileceği yinelenmiştir.

Shi ve Fenton [7] genel SPM'nin ani düz kinematığını hesaplamıştır. Kullanılan yöntemde hareketli parçanın aynı doğru üzerinde olmayan üç noktasının hızı kullanılarak çözüme ulaşılmıştır. Bu metodun avantajı, pasif eklem değişkenlerinden yalnızca bir kaçının hesaba katılmasıdır. Sonuca altı lineer denklem çözerek ulaşmak mümkündür.  $P_1$ ,  $P_2$  ve  $P_3$  hareketli platformun köşeleri,  $v_{p1}$ ,  $v_{p2}$  ve  $v_{p3}$  bu köşelerin hızları,  $q_i'$  ( $i=1,2,3$ ) üç aktif eklem hızı ve  $w_i'$  bacakların yönelmesini gösteren birim vektör olmak üzere aşağıdaki denklemlere ulaşılmıştır.

$$v_{p1} \cdot (P_1 - P_2) = v_{p2} \cdot (P_1 - P_2) \quad (13)$$

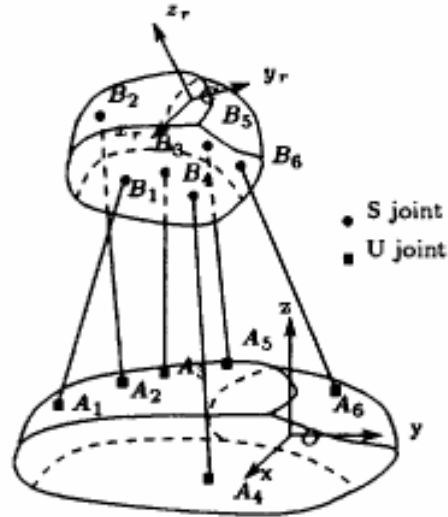
$$v_{p2} \cdot (P_2 - P_3) = v_{p3} \cdot (P_2 - P_3) \quad (14)$$

$$v_{p3} \cdot (P_3 - P_1) = v_{p1} \cdot (P_3 - P_1) \quad (15)$$

$$q_i' = v_{pi} \cdot w_i' \quad (i=1,2,3) \quad (16)$$

Çalışmada ayrıca 6-3 SPM'nin düz kinematik probleminin üç lineer denklem ile çözülebildiği gösterilmiş, sayısal örnekler verilmiştir.

Merlet [3] paralel manipülatörlerin düz kinematığını dört sayısal yöntemle çözmüş ve bu yöntemleri hesaplama zamanı açısından karşılaştırmıştır. Bu yöntemlerden üçü iteratif yöntemler, dördüncüsü ise polinom yöntemidir. Öncelikle ters kinematik problemi matematiksel olarak ifade edersek, ilk olarak  $A_i B_i$  vektörünün hesaplanması gerekir ki burada  $A_i$ 'ler SPM'nin tabanının köşe noktalarına,  $B_i$ 'ler ise hareketli platformun köşelerine denk gelir. (Şekil 9.) Bu problemi matematiksel olarak ifade edersek



Şekil 9. SPM'nin kinematik analizinde kullanılan model

$A_i B_i = A_i O + OC + CB_i$  denklemi elde edilir ki burada O sabit tabandaki referans eksen takımının merkezi, C ise hareketli platformdaki eksen takımının merkezidir. Bu durumda  $A_i O$  ve  $CB_i$  vektörleri tasarım

aşamasında belirlenmiş olur, OC'yi ise hareketli platformun konumu belirler. Bu da demek ki  $A_iB_i$  vektörü tasarım ve platformun o anki konumundan belirlenebilir. Böylece bacak boyları,  $\rho_i$  bacak boyu vektörü olmak üzere

$\rho_i^2 = \|A_iB_i\|^2$  olarak hesaplanabilir. Merlet burada hareketli platformun pozisyonu ile bacak boyları arasında birebir ilişki olduğu konusuna dikkati çekmiştir. Ters kinematik probleminin hesap zamanı milisaniye mertebesindedir, yani oldukça kısadır.

Hareketli platformun yönelmesi ( $\gamma, \beta, \alpha$ ) gibi Euler açılarıyla tanımlandığında,  $X$  vektörü ise genelleştirilmiş koordinatları verdiğinde, genelleştirilmiş koordinat değişimlerini bağ boyu değişimleriyle ilişkilendiren  $J_e^{-1}$  (ters Jakobyen) matrisi tanımlanmıştır. Euler açıları ters Jakobyeni adı verilen bu matrisin hesaplama zamanı da milisaniye mertebesindedir. Ayrıca bağ hızlarını hareketli platformun doğrusal ve açısal hızlarıyla ilişkilendiren bir ifade türetilmiştir. Ters kinematik ifadelerini kullanarak, istenilen konum ve yönelmeyi verecek girişleri hesaplamak kolaydır. Düz kinematik problemde ise çözümü tek olmayan nonlineer denklemlerin çözülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Merlet bu denklemleri 4 değişik metotla çözmüştür. Bunlardan ilki iteratif bir metoddur.  $X^0$  gibi bir tahmini değerle araştırmaya başlanılır, bağların boyları istenilen hassasiyette bir sonuç verdiğinde iterasyon durdurulur. Bu metotta ulaşılan matematiksel ifade  $X^{k+1} = X^k - J_e^{-1} (G(X^k) - \rho m)$  dir ki  $G(X^k)$  genelleştirilmiş koordinatların bir fonksiyonu,  $\rho$  ölçülen bacak boyudur. Bu yöntemde  $J_e$  matrisinin,  $J_e^{-1}$ 'in tersinin hesaplanarak bulunması gerektiğinden kullanışlı bir yöntem değildir. Her adımda matris tersi hesaplamak zor olduğundan çözüm civarında  $J_e$ 'nin sürekli olduğu ve değişimlerinin az olduğu varsayılarak sabit bir  $J_e$  kullanılması uygun görülmüştür. Hesap zamanları göz önüne alındığında, bahsi geçen dört yöntem içinde gerçek zamanlı kontrole en uygun olanı budur. Hesap zamanı en kısa yöntem olmamasına karşın yakınsama aralığı diğer yöntemlerden daha geniştir. İkinci iteratif yöntemde genelleştirilmiş koordinatlar yönelme cinsinden ifade edilerek değişken sayısı düşürülmüş ve algoritmanın daha kısa sürede sonuca ulaşması hedeflenmiştir. Bu yöntemin dezavantajı yakınsama aralığının küçük olmasıdır, yani iterasyona ancak gerçek çözüme çok yakın bir tahminle başlandığında sonuç vermektedir. Eğer çözüme çok yakın bir tahminde bulunulursa bu yöntem en hızlı çözüm verendir. Bir diğer iteratif yöntemde hareketli platformun dönme vektörü tanımlanmış, iterasyonun matematiksel ifadesi  $X^{k+1} = X^k + J_o (\rho - G(X^k))$  şeklinde verilmiştir ancak Jakobyene ilave olarak  $R$  dönme matrisinin hesaplanması gereği hesap zamanını uzatmaktadır. Bu yöntemin avantajı yakınsama probleminin hiç olmamasıdır. İteratif yöntemler yaklaşık bir çözüm bilindiğinde belirli hata payı içerisinde çözüm bulmada işe yaralarına rağmen verilen bacak

boyları için alınabilecek tüm konfigürasyonları bir arada vermezler. Bu açıdan bakıldığında polinom yöntemi daha faydalıdır. Üçgen biçimli hareketli platforma sahip mimarilerde düz kinematik problem 16. dereceden polinom çözümüne indirgenebilir, bu da demektir ki problemin en fazla 16 çözümü olabilir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta, ortaya çıkan çözümlerin hepsinin fiziksel olarak gerçekleştirilebilir olmadığıdır. Bacak boyu kısıtları, eklem dönme kısıtları ve bacakların birbiriyle içiçe geçmesi durumu gibi mekanik kısıtlar söz konusu olduğunda, çözüm fiziksel olarak gerçekleştirilebilir değildir. Polinom metodu ise en yavaş metoddur, çözüm zamanı diğer metotlardan bir mertebe yüksektir. Bu yöntem, tüm sonuçları veren tek yöntem olmasına karşın, yalnızca hesap hızının önemsiz olduğu durumlarda kullanılmalıdır.

Liu ve arkadaşları [5] ise SPM'nin düz kinematığını başka bir yöntemle çözmüşlerdir. Buna göre üç tane nonlineer denklemin eş zamanlı olarak çözülmesi gerekmektedir. Bu denklemler,  $X_{T1}$ ,  $X_{T2}$  ve  $X_{T3}$  mimariye ve eklem açılarına bağlı değişkenler,  $X_p$  ve  $Y_p$ 'ler ile  $a^2$  ise yine mimariye bağlı büyüklükler olmak üzere, aşağıdaki gibidir.

$$a^2 + 2X_{T1}X_{T2} - 2X_{T1}[X_{P1} + \sqrt{3}(Y_{P1} - Y_{P2})] - 2X_{P2}X_{T2} - [(\sqrt{3}X_{P1}Y_{P2})^2 + (h_1^2 + h_2^2) - 4X_{P1}^2 - X_{P2}^2] + 2\sqrt{[h_1^2 - 4(X_{T1} - X_{P1})^2][h_2^2 - (X_{T2} - X_{P2})^2]} = 0 \quad (17)$$

$$a^2 - 4X_{T1}X_{T3} - 2X_{T1}[X_{P1} - 3X_{P3} + \sqrt{3}(Y_{P1} - Y_{P2})] - 2X_{T3}[-3X_{P1} + X_{P3} + \sqrt{3}(Y_{P1} - Y_{P3})] - [(\sqrt{3}(X_{P1} + X_{P3}) - Y_{P1} + Y_{P3})^2 + (h_1^2 + h_3^2) - 4X_{P1}^2 - 4X_{P3}^2] + 2\sqrt{[h_1^2 - 4(X_{T1} - X_{P1})^2][h_3^2 - 4(X_{T3} - X_{P3})^2]} = 0 \quad (18)$$

$$a^2 + 2X_{T2}X_{T3} - 2X_{T3}[X_{P3} + \sqrt{3}(Y_{P2} - Y_{P3})] - 2X_{P2}X_{T2} - [(\sqrt{3}X_{P3} - Y_{P2} + Y_{P3})^2 + (h_2^2 + h_3^2) - X_{P2}^2 - 4X_{P3}^2] + 2\sqrt{[h_2^2 - (X_{T2} - X_{P2})^2][h_3^2 - 4(X_{T3} - X_{P3})^2]} = 0 \quad (19)$$

Yukarıda verilen denklemler nonlineer oldukları için çözümleri ancak sayısal yöntemlerle mümkündür. Bu çalışmada Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır çünkü çözümün yakınında bu yöntem hızlı bir biçimde yakınsar. Bu çalışmada önerilen yöntemle 16. polinom çözüme zorunluluğu ortadan kalkmıştır.

Sreenivasan ve çalışma arkadaşları [8] 6-6'lık SPM'nin düz kinematik problemine kapalı formda cebirsel denklemlerle çözüm getirmişlerdir. 6-6'lık model üzerinde çalışan araştırmacılar, üst platformun tabana göre aslında yalnızca iki temel konumu olduğunu, bu temel konfigürasyonların transpozlarıyla birlikte dört ve bu dört konfigürasyonun tabana göre simetrikleriyle birlikte sekiz konfigürasyon elde edildiğini ortaya çıkarmışlardır. Buna göre sekiz dönme matrisi, ve üst platformun bunlardan her birine karşılık gelen ikişer konum vektörü vardır. Bu çalışmada elde edilen en yüksek mertebeli polinom dördüncü dereceden olduğu için tüm işlemler sembolik olarak yürütülebilir. Bu çalışmadaki taban ve

üst platform benzer altıgenlerdir. Daha genel mimarilerden söz edilseydi daha yüksek dereceden polinomlar ortaya çıkacağından sayısal yöntemlerin kullanılması gerekecekti. Sonuçta bir tane dördüncü derece iki tane de ikinci derece denklem elde edilmiştir. Bu denklemler çözülerek 8 dönme matrisi elde edilir. Bahsedilen üç denklem, r'ler dönme matrislerinin elemanları, g'ler ise bunların fonksiyonu olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$r_{12}^4 - \{2g_5\}r_{12}^3 - \{2-g_5^2-2g_4g_6\}r_{12}^2 + \{2g_5-2g_4g_5g_6\}r_{12} + \{1+g_4^2g_6^2-g_4^2-g_5^2-g_6^2\}=0 \quad (20)$$

Burada bulunan her  $r_{12}$  değeri için, aşağıdaki denkleme belirlenecek 2 farklı  $r_{13}$  değeri vardır.

$$r_{13}=\pm(1-g_4^2-r_{12}^2)^{1/2} \quad (21)$$

Mümkün olan 16 konfigürasyon birbiriyle geometrik olarak ilgili olduğundan yalnızca iki dönme matrisinin ve konum vektörlerinin yarısının hesaplanması yeterlidir. Aynı yıl yapılan bir başka çalışmada Wohlhart [14] da küresel Stewart platformunun düz kinematığı üzerinde çalışmıştır. Küresel Stewart platformda üç eyleyici tek bir küresel eklem vasıtasıyla hareketli platformun tek bir noktasının konumunu değiştirirken diğer üç bacak da hareketli platformu bu nokta etrafında döndürerek yönelmesini kontrol eder. Bu çalışmada da bir giriş bacak boyu değeri için platformun 16 değişik konfigürasyona sahip olabileceği sonucuna varılmıştır.

Dasgupta ve Mruthyunjaya [15] 6-6'lık SPM'nin düz kinematik problemine kanonik formda çözüm getirmiş, kinematik denklemlerin toplam 64 çözümü olduğu için mekanizmanın en fazla 64 farklı konfigürasyona sahip olabileceğini belirtmiştir. Altısı ikinci dereceden, üçü birinci dereceden dokuz bilinmeyenli denklem takımını basitleştiren araştırmacılar bunlar dördüncü dereceden üç bilinmeyenli üç denklem haline de getirmişlerdir. Dönüşüm matrisi R

$$R = [n \ o \ a] = \begin{bmatrix} nx & ox & ax \\ ny & oy & ay \\ nz & oz & az \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\text{şeklinde, ötelenme vektörü } t = [t_x \ t_y \ t_z]^T \quad (23)$$

şeklinde ifade edilirse, S'nin bacak boyu olduğu, A, B ve C katsayılarının da mimariye ve geometriye bağlı olduğu hatırlanırsa, dokuz denklem aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$n_x^2+n_y^2+n_z^2=1 \quad (24)$$

$$o_x^2+o_y^2+o_z^2=1 \quad (25)$$

$$t_x^2+t_y^2+t_z^2=S_1^2 \quad (26)$$

$$n_x o_x + n_y t_y + n_z o_z = 0 \quad (27)$$

$$n_x t_x + n_y t_y + n_z t_z = A_1 t_x + A_2 n_x + A \quad (28)$$

$$o_x t_x + o_y t_y + o_z t_z = B_1 t_x + B_2 n_x + B_3 o_x + B_4 t_y + B_5 n_y + B_6 o_y + B \quad (29)$$

$$C_{41}t_x + C_{42}n_x + C_{43}o_x + C_{44}t_y + C_{45}n_y + C_{46}o_y = C_4 \quad (30)$$

$$C_{51}t_x + C_{52}n_x + C_{53}o_x + C_{54}t_y + C_{55}n_y + C_{56}o_y = C_5 \quad (31)$$

$$C_{61}t_x + C_{62}n_x + C_{63}o_x + C_{64}t_y + C_{65}n_y + C_{66}o_y = C_6 \quad (32)$$

Bu denklemler daha önceki formülasyonlara göre daha sade şekilde olduklarından hesaplama yükü de azalmıştır. Aynı araştırmacılar [16] 6-6'lık SPM'nin kinematığına kinematik denklemleri çıkarıp çözmek yerine yalnızca geometriyi hesaba katarak da çözüm aramıştır. Bu yeni yöntem, yalnızca geometriyi hesaba katarak tahminde bulunan ve tahmin edilen geçici çözümlerin düzeltilmesine yarayan bir algoritma ile çözüm aramaya dayanır.

Ku [4], Nanua ve arkadaşlarının çıkarmış olduğu oktahedral SPM'nin kinematik denklemlerini Newton-Raphson yöntemine dayalı kolay bir yöntemle çözmüştür. Oktahedral SPM, bacakların tabana da üst platforma da ikişerli gruplar halinde bağlandığı, her iki platformun da üçgen biçimli olduğu mekanizmadır. (Şekil 8.) Bu çalışmadaki amaç, polinom yöntemindeki cebirsel işlem yükü ve o metotta mutlaka kullanılması gereken Bezout metodu ile zaman kaybetmek yerine bir kaç iterasyon adımında çözüm verecek ve bilgisayar uygulamasında zorluk çıkarmayacak bir yöntem geliştirmektir. [13] ile aynı model üzerinde çalışıldığından aynı denklemlere ulaşıldı, ancak çözüm yönteminde denklemler Taylor serisine açılıp Newton-Raphson yöntemi uygulandığından çözüme birkaç iterasyon adımında, daha kolay ve hızlı bir şekilde ulaşıldı. Sonuçların doğruluğu sayısal örneklerle ispatlandı. Zhao ve Peng [17] de paralel mekanizmaların düz kinematığını sayısal bir yöntemle çözdü. Geliştirilen yöntemin avantajı, istenilen hassasiyete sahip sonuca hızlı bir biçimde ulaşabilmesidir. Jakobovic ve Jelenkovic [18] kinematik probleminin Newton-Raphson veya Powell yöntemi gibi optimizasyon algoritmaları ile de çözülebileceğini, en kısa bacak boyunun en fazla  $10^{-12}$  katı mertebesinde hataya izin verildiği takdirde metodun gerçek çözümlere yakınsadığını belirtmiştir. Genel haldeki SPM'nin yanısıra özel mimariye sahip bazı paralel mekanizmalar hakkında da çalışmalar yapılmıştır. Tsai ve arkadaşları [19] 3-PRS (prizmatik-dönel-küresel) paralel mekanizmanın (şekil 10) düz kinematik problemini çözüp, ulaştıkları birbirine bağlı üç trigonometrik denklemi iki farklı yöntemle çözmüşlerdir. Bahsi geçen trigonometrik denklemler

$$F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 + F_3 \sin \theta_1 + F_4 \sin \theta_2 + F_5 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + F_6 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + F_7 = 0 \quad (33)$$

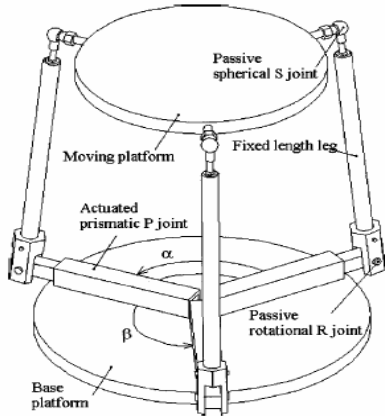
$$G_1 \cos \theta_1 + G_2 \cos \theta_2 + G_3 \sin \theta_1 + G_4 \sin \theta_2 + G_5 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + G_6 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + G_7 = 0 \quad (34)$$

$$H_1 \cos \theta_1 + H_2 \cos \theta_2 + H_3 \sin \theta_1 + H_4 \sin \theta_2 + H_5 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + H_6 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + H_7 = 0 \quad (35)$$

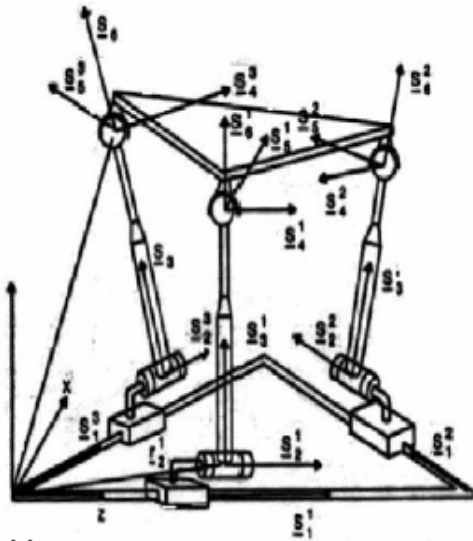
şeklinde. Burada  $\theta$  açıları eklem açıları, F, G ve H katsayıları ise mekanizmanın mimarisi ve geometrisi ile ilgili değerlerdir. Araştırmacıların uyguladığı



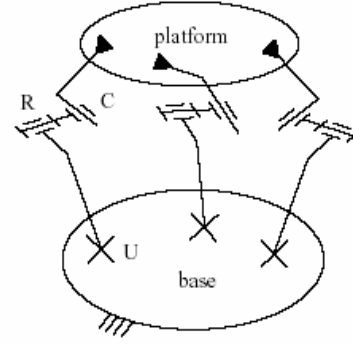
yöntemlerden ilki Bezout sadeleştirme metodu, diğeri kısıtların hesaba katıldığı optimizasyon metodudur. Mümkün olan tüm çözümler kontrol edilmeden sonuç verebildiği için optimizasyon yöntemi kullanmanın daha hızlı sonuç verdiği bildirilmiştir. Kim ve Park, [20] SPM'nin ve diğeri 6-6'lık paralel mekanizmaların küçük çalışma uzayı problemini yenmek için ortaya atılan, her biri bir pasif küresel bir de pasif dönele mafsal içeren üç seri zincirle birbirine bağlanmış hareketsiz taban ve hareketli üst platformdan oluşan 3-RS paralel mekanizmanın (şekil 11) düz kinematığını incelemiştir. Kinematik denklemler 16. dereceden polinom haline getirilmiştir. Di Gregorio [21] 3-URC (şekil 12) bileği adını verdiği, eyleyicileri tabanda olan dönele eklemlere ve pasif silindirik eklemlere sahip üç eşit bacaklı küresel mekanizmanın düz kinematik problemini çözmüştür. Callegari ve Tarantini [22], gerekli kısıtlar uygulandığında yalnızca ötelenmeye izin veren 3-RPC paralel mekanizmasının düz ve ters kinematığını kapalı formda çözüp çalışma uzayındaki tekil noktaları belirlemiştir. Di Gregorio [23] uzayda yalnızca öteleme yapan paralel mekanizma mimarisinde önerilerde bulunmuştur ancak bunlar uzayda dönme hareketini gerçekleştiremedikleri için havacılık simülatörlerinde kullanımları uygun değildir.



Şekil 10. 3-PRS mekanizması



Şekil 11. 3-RS mekanizması



Şekil 12. 3-URC mekanizması

### 3. DİNAMİK

Paralel mekanizmaların dinamik problemi, giriş kuvvet ve momentleri ile uçtaki hareketli platformun hareketi arasındaki ilişkiyi inceler. Düz dinamik problemi, eklemlerin konumu, hızı, momentini ve sistemin kütle dağılımı verildiğinde hareketli platformun ivmesini bulmayı amaçlarken, ters dinamik problemi ise uçtaki platformun ivmesi, eklemlerin konumu, hızı, momentini ve sistemin kütle dağılımı verildiğinde bu ivmeyi sağlayacak eklemlerin kuvvet ve momentlerini bulmayı amaçlar. Paralel mekanizmaların dinamik modellemesi çok önemlidir çünkü simülatörlerdeki mekanizmaların gerçek uçuşta pilotun hissedeceği kuvvetleri oluşturabilmesi için yüksek hassasiyete sahip olmaları gerekmektedir. Paralel mekanizma dinamiğinde izlenebilecek iki ana yol Newton-Euler metodu ve Lagrange metodudur. Bunlardan başka virtüel iş metodu ve Kane'in dinamik denklemini kullanarak da SPM dinamiğini çözmüş olan araştırmacılar vardır. Dikkat edilmesi gereken nokta, hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, aynı dinamik denklem sisteminin elde edileceğidir [4].

Newton-Euler metodunda bir sistemi meydana getiren tüm parçaların dinamiği ayrı ayrı hesaplanır ve hareketin ani veya sonsuz küçüklikte yönleri incelenir. Bu demektir ki, Newton-Euler metodu diferansiyel bir methodur. Hesaplamalar sırasında vektörler, yani hız ve kuvvetler kullanılır. Bu methodda karmaşık türev hesaplamalarına gerek duyulmaması Lagrange methoduyla karşılaştırıldığında bir üstünlüktür. Newton-Euler metodunda izlenilmesi gereken yol, her bağ için bir serbest cisim diyagramı çizmek ve ardından Newton-Euler denklemlerini uygulamaktır. Böylece tüm kısıt kuvvet ve momentleri bulunur.

Dasgupta ve Mruthyunjaya [24] 6-UPS ve 6-SPS SPM'nin kapalı formda dinamik denklemlerini Newton-Euler methoduyla çıkarmıştır. Kullanılan yöntemde ilk olarak bir bacağın kinematik ve dinamiği çözülür, sonra bacağın üst noktasındaki kısıt kuvveti bulunur ve en son olarak da hareketli üst platformun kinematik ve dinamiği çözülür. Bunlar kısıt kuvvetleri

ve hareketli platformun denklemleriyle birleştirildiğinde, SPM'nin dinamik denklem sistemi elde edilmiş olur.

6-UPS SPM'nin dinamik denklemleri, toplu halde

$$J \begin{bmatrix} t'' \\ \alpha \end{bmatrix} + \eta = HF + \begin{bmatrix} RF_{ext} \\ RM_{ext} \end{bmatrix} \quad (36)$$

şeklinde verilebilir. Burada J sisteme ait toplam atalet matrisi,  $\eta$  sitemde oluşan moment ve kuvvet artık terimler vektörü,  $RF_{ext}$  dış kuvvet,  $RM_{ext}$  ise dış moment, H giriş çıkış kuvvet dönüşüm matrisidir.

Bu yöntemin özelliğı, tüm dinamik kuvvetleri, yani atalet, merkezkaç, koriolis, yer çekimi ve viskoz sürtünme kuvvetleri içerdiğinden dolayı modelin eksiksiz olmasıdır. Aynı araştırmacılar Newton-Euler metodunu kullanarak SPM'nin ters dinamik problemini de çözmüşlerdir [25]. Bu çalışmada her bacak için 13 bilinmeyenli 12 dinamik denklem elde edilmiştir. Bu 12 denklemi bacağın üst ve alt parçaları için yazılan üçer kuvvet denklemi ve üçer moment denklemi oluşturur. 13 bilinmeyeni ise prizmatik eklemdeki 6 bilinmeyen kuvvet ve moment, üniversal eklemdeki 3 kuvvet ve bir moment ve küresel eklemdeki 3 kuvvet oluşturur. Diğer çalışmalarına benzer olarak, [25]'teki model tüm dinamik kuvvetleri hesaba dahil eder. Bu çalışmada 6 değişkenli 6 doğrusal denklem elde edilmiştir, böylece giriş kuvvetlerinin direk olarak bulunması son derece kolaydır. SPM'nin ters dinamik denklemlerini

$Hx = c$  şeklinde vermek mümkündür. Burada c,  $RF_{ext}$ , atalet, açısal hız ve platformun kütesinin bir fonksiyonudur. Bu eyleyici kuvvetleri cihazı kontrol etmek için yeterlidir. SPM'nin kontrolü için tüm kısıt kuvvet ve momentlerinin hesaplanması gerekmez de [26] mekanizmanın tasarımı için bu değerler de bilinmelidir.

Lagrange metodu, tüm sistemin kinetik ve potansiyel enerjisinden faydalanır, uygulaması daha kolaydır. Lagrange dinamiğinde sistem sonlu bir zaman aralığında incelendiğinden metod bir integral metodudur. Yöntem enerji bağıntılarından yararlandığından, hesaplamalarda skaler değerler kullanılır. G. Leuret ve arkadaşları [27] SPM'nin düz dinamik problemini bu yöntemle çözmüştür. Üst ve alt platformun ve bacakların kinetik ve potansiyel enerjileri bulunduktan sonra Lagrange formülü uygulanmıştır. Lagrange denklemleri sistemin tüm enerjisini hesaba katar. Denklemlerin genel hali

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta K(q, q')}{\delta q'} \right) - \frac{\delta K(q, q')}{\delta q} + \frac{\delta P(q)}{\delta q} = \tau \quad (37)'dir.$$

Burada K sistemin toplam kinetik enerjisi, P sistemin toplam potansiyel enerjisi,  $q$  genelleştirilmiş koordinatlar,  $\tau$  da sisteme uygulanan momenttir. Yukarıdaki denklemden

$M(q)q'' + V(q)q' + G(q) = \tau$  (38) formunda dinamik denklem sistemi elde edilir. Pang ve Shahinpoor [28] ise SPM'ye benzer 3 serbestlik dereceli bir paralel mekanizmanın dinamiğini Lagrange yöntemiyle çözmüştür. Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilen denklemler kapalı formda ifade edilebilmelerine rağmen kısmi türevlerin hesabı sırasında çok fazla sembolik işlem yapılması gerekmektedir.

Wang ve Gosselin ise [26], SPM'nin dinamik analizinde virtüel iş metodundan faydalanmıştır. İlk olarak doğrusal ve açısal ivmeleri kullanarak atalet kuvvet ve momentleri hesaplanmış, ardından tüm mekanizmanın statik dengede olduğu varsayılarak virtüel iş metodu uygulanmış, en son olarak da giriş kuvvet ve momentleri bulunmuştur. Dikkat edilmesi gereken nokta, kısıt kuvvet ve momentlerinin hesaplanması gerekmediğinden bu yöntemin hesaplama zamanı açısından son derece verimli olduğudur. Buna rağmen Liu ve çalışma arkadaşları [29] bu yöntemin ters dinamik hesaplarında kullanışlı olduğunu fakat düz dinamik hesaplarında karmaşık olduğunu belirtmiştir. Liu ve arkadaşları, SPM'nin dinamiğini Kane'in dinamik denklemlerinden faydalanarak çözmüşlerdir. Bu yöntemde ilk olarak her bacak ve hareketli platform bağımsız elemanlar olarak ele alınır ve dinamik denklemleri çıkarılır. Ardından tüm parçaların dinamik denklemleri birleştirilir ve böylece kısıtlı sistemin dinamik denklemleri elde edilmiş olur.

#### 4. TEKİLLİKLER VE ÇALIŞMA UZAYI

Paralel mekanizmaların kullanımı son derece yaygın olmasına rağmen, kinematik hesapları ve konfigürasyonları karmaşık olduğundan dolayı çalışma uzaylarını belirlemede kullanılacak genel bir yaklaşım mevcut değildir, ancak tasarım aşamasında bu çalışma uzayının hesaplanması şarttır. Çalışma uzayı, hareketli platformdaki eksen takımı merkezinin ulaşabileceğı bölge olarak tanımlanabilir. SPM'nin ulaşacağı uzay, mimarisinin sebep olduğu geometrik kısıtlara, eklem mobilitesindeki kısıtlara ve bağların birbirleriyle içiçe geçip geçmemesine bağlıdır [30]. Bunun sebebi, çalışma uzayının belirlenmesinde düz kinematik denklemlerin kullanılmasıdır ve yukarıda da belirtildiğı gibi paralel mekanizmaların düz kinematığı son derece karmaşık bir problemdir. Çalışma uzayı, paralel mekanizmanın hareketli platformunun ağırlık merkezine yerleştirilmiş olan bir koordinat sisteminin ulaşabileceğı bölge olarak tanımlanır.

Literatürde, birden fazla türde çalışma uzayından söz edilir. Örneğın erişilebilir çalışma uzayı hareketli platformun merkezinin ulaşabileceğı tüm noktalar, yönelme uzayı belirli bir nokta etrafında hareketli platformun merkezinin alabileceğı yönlerdir [31]. Çalışma-uzayı konusunda yapılan çalışmalar 2 ana grupta toplanabilir. Bunlardan birincisi, platformun belli bir yönelmede sabit tutulup x, y ve z eksenlerinde

yapabileceğı ötelemelerin sınırlarını gösteren konumsal çalışma uzayı analizidir. İkinci grupta ise, hareketli platformun ağırlık merkezi sabit bir noktada tutulup x, y ve z eksenlerine göre yapabileceğı yönelmelerin sınırlarını gösteren yönelme çalışma uzayı incelenir. Son yıllarda yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu yönelme çalışma uzayı üzerindedir [32]. SPM'nin mimarisi çalışma uzayının büyüklük, şekil ve simetrisini etkiler çünkü bacak hızlarıyla hareketli platform hızını birbiriyle ilişkilendiren dönüşüm matrisi bunlara bağlıdır [33]. Hareketli platformun doğrusal hızı ile altı giriş eklemının doğrusal ve açısal hızını birbiriyle ilişkilendiren Jakobyen matrisi, 6 serbestlik dereceli bir SPM'de 6\*6 boyutunda bir matristir [34]. SPM'nin çalışma uzayı analizindeki bir başka zorluk da 6 serbestlik dereceli mekanizmanın 6 boyutlu çalışma uzayının grafiksel olarak ifade edilememesidir. Çalışma uzayı, grafiksel olarak ancak 6 boyutlu uzayın daha düşük boyutlu alt kümeleri halinde gösterilebilir. Diğer bir deyişle, 3'ü öteleme 3'ü dönme olmak üzere 6 serbestliğe sahip mekanizmanın bu serbestliklerinden üçü sabit tutulur, ve o esnada sabit olmayan diğer üç boyutun çalışma uzayını nasıl etkilediğı gösterilebilir [31].

Paralel mekanizmaların analizi, tasarımı, hareket planlaması ve kontrolünde karşılaşılan en önemli problem tekillik problemidir. Paralel mekanizmaların kapalı döngülü yapılarından dolayı hareketleri kısıtlanır ve çalışma uzaylarında tekillikler oluşur. Kapalı döngülü yapı, eklemlerle bağlı en az bir döngünün oluştuğı cisimlerdir. Tekillikler, düz veya ters kinematik problemin çözümünün olmadığı noktalar. Tekillik noktalarında giriş hızıyla çıkış hızı arasındaki bağıntıyı veren dönüşüm matrisinin rankı düşer [35]. Jakobyen yöntemiyle tekillikleri bulmak, Jakobyen matrisinin determinantının bulunmasının zor olmasından dolayı karmaşıktır [36], ancak Collins ve McCarthy [37], üçgen biçimli taban ve üst platforma sahip uzaysal hareketli mekanizmanın tekilliklerini Jakobyen matrisi (dönüşüm matrisi) yöntemiyle bulmuştur. Dönüşüm matrisinin özelliklerinin incelenmesiyle tekilliklerin sınıflandırılması mümkündür. Angeles ve arkadaşları da [38] 3 bacaklı ve 6 serbestlik dereceli, her bacağında 2 eyleyiciye sahip bir paralel mekanizmanın tekilliklerini yine bahsedilen yöntemle, yani eyleyici hızlarıyla hareketli platform hızı arasındaki ilişkiyi veren bağıntıdaki dönüşüm matrisini inceleyerek bulmuştur.

Paralel mekanizmaların tekillik noktalarının bulunması bir açıdan daha önemlidir. Bu noktalar mekanizmanın ani olarak kontrol edilemeyen bir serbestlik derecesi kazandığı noktalardır. Bu sebepten bu noktalardan kaçınmak gerekir. Platformun kontrolü, mekanizmanın tasarımı, tekilliklere uğramayan yol planlaması ve tekillik içermeyen çalışma uzayının bulunması için bu noktaların

bulunması şarttır. Kim ve Chung [39] genel SPM'nin tekilliklerini bulmak için analitik bir çalışma yaparak üçüncü dereceden bir polinoma ulaşmıştır. Bu polinom

$$C_1x^3 + C_2y^3 + C_3z^3 + C_4x^2y + C_5x^2z + C_6xy^2 + C_7y^2z + C_8xz^2 + C_9yz^2 + C_{10}xyz + C_{11}x^2 + C_{12}y^2 + C_{13}z^2 + C_{14}xy + C_{15}yz + C_{16}zx + C_{17}x + C_{18}y + C_{19}z + C_{20} = 0 \quad (39)$$

şeklinindedir. Burada x, y ve z konum değişkenleridir. Bu tekillik denkleminin özelliğı genel olmasıdır, yani SPM üzerinde yapılacak herhangi bir modifikasyon sonrasında da kullanılabilir, bu da bulunan denklemin SPM tasarımı ve inşası sırasında kullanışlı olacağına işaretidir. Çalışma uzayını ve tekillikleri belirleyen analitik çözüm olursa, bu sadece simülasyon değil, hareket planlaması ve optimal tasarımda da faydalı olur. Bessala ve arkadaşları [40] düzlemsel paralel mekanizmaların çalışma uzayının analitik olarak belirlenebilmesine rağmen uzaysal SPM'nin çalışma uzayının analitik denklemlerinin uzun ve karmaşık olduğunu belirtmiştir. Bu sebepten, yani SPM'nin çalışma uzayının bulunmasında ve tekillik analizinde analitik denkleme ulaşmak zor olduğundan, bu noktaların bulunmasında genellikle sayısal analiz yapılmıştır [41]. D. Zlatanov ve arkadaşları [42,43] genel bir mekanizmanın kinematik tekilliklerinin tanımlanmasını, ve sınıflandırmasını anlık kinematik bilgisi kullanarak yapmıştır. Huang ve arkadaşları [44] SPM'nin tekillik analizini, en çok kullanılan iki yöntem olan Jakobyen yöntemi ve geometri dışında bir yolla, rijit cisim kinematığından hareketle bulmuş ve tekillikleri hesaplamıştır.

## 5. KISITLI SERBESTLİK DERECELİ MEKANİZMALAR

Joshi ve Tsai'nin [34] belirttiğı gibi, kısıtlı serbestlik dereceli mekanizmalar olarak da adlandırılan, serbestlik derecesi 6'dan düşük olan mekanizmaların, inşaları daha kolay, maliyetleri daha düşük, kontrol algoritmaları daha kolay ve yüksek hız kapasiteleri daha yüksek olduğu için üretim hızı ve maliyetin temel problem olduğu durumlarda avantajlıdır. Uçak simülatörlerinde kullanılmalarına rağmen, literatürde oldukça ilgi toplamışlardır. Bu araştırmacılar, kısıtlı serbestlik dereceli mekanizmaların tekil noktalarını bulmak amacıyla genel bir metod geliştirmişlerdir. Kısıtlı dereceli sistemlerin Jakobyenleri oluşturma temeline dayanan bu yöntem sayesinde, Jakobyen matrisine bakarak tekillik türünün bilinmesine de imkan sağlar.

Carretero ve çalışma arkadaşları [33] 3 serbestlik dereceli paralel mekanizmanın çalışma uzayını belirlemiştir. Bu mekanizma uçak simülatörlerinde kullanılsa da bazı uygulamalarda 6 serbestlik derecesine ihtiyaç yoktur, bu durumlarda da maliyeti düşürme açısından 3 serbestlik dereceli mekanizmalar kullanılabilir. Bu çalışmanın anafikri, dexterous

çalışma uzayının, aktif ve pasif eklem kısıtlarının bir sonucu olan ulaşılabilir çalışma uzayının bir alt kümesi olduğudur. Dexterous uzay, belirli dexterity durumlarına sahip uzaydır, bir diğer deyişle burada mekanizma tekil konumlardan korunmuş olur. Mekanizmanın mimari parametrelerinin değişmesinin çalışma uzayının büyüklüğünü etkilediği gösterilmiştir. 6-3 SPM'nin dexterous çalışma uzayını sayısal yöntemlerle bulan Du Plessis ve Snyman [45], kullandıkları yöntemin her robota uygulanabilme avantajına sahip olmasına rağmen yüksek hassasiyet istendiğinde hesaplama eforunun yüksek olduğunu belirtmiştir.

Romdhane ve arkadaşları [41] da 3 ötelenme serbestlik dereceli bir mekanizmayı incelemiş, kinematik analiz sonucunda tekil noktaları bulmuş, tekillikleri mimariye bağlı ve konfigürasyona bağlı olarak sınıflandırmıştır. Bu araştırmacılar, diğer çalışmalardan farklı olarak, tekil noktaların bulunmasında sayısal yöntemlerden değil de vektör analizi ve geometriden faydalanmışlardır. SPM'nin tekillikleri, bağ hızlarını hareketli platform hızıyla ilişkilendiren dönüşüm matrisine bağlı olarak gruplandırılabilir [35]. Di Gregorio ve Parenti-Castelli de [46,30] 3 ötelenme serbestliğine sahip 3-UPU mekanizmasının ve U-2PUS paralel mekanizmalarının tekilliklerini ve ulaşabilecekleri çalışma uzaylarını analitik olarak bulmuştur. Çalışma uzayları incelenirken yalnızca ötelenme veya yalnızca dönme serbestliğine sahip mekanizmalar da incelenmelidir çünkü uzayda 3'ü ötelenme, 3'ü de dönme olmak üzere 6 yönde genel hareket yapan bir mekanizma, biri yalnızca 3 yönde ötelenme diğeri de yalnızca 3 yönde dönme yapan iki mekanizmanın seri olarak bağlanmasıyla inşa edilebilir. Yang ve arkadaşları [47] 3 bacaklı paralel mekanizmaların tekillik analizini pasif eklemlerin hızlarından faydalanarak yapmış, tekillikleri düz, ters ve birleşik olmak üzere sınıflandırmıştır. Liu ve arkadaşları [48] dönel eyleyicilere sahip 3 serbestlik dereceli bir mekanizma olan HALF paralel mekanizmasının tekilliklerini bulmuştur. Serbestlik derecesi 6'dan küçük olan mekanizmaların tüm tekillikleri kolaylıkla bulunabildiğinden, özellikle endüstride bu tip robotlar gün geçtikçe daha çok ilgi toplamaya başlamıştır. Dönme kapasitesi yüksek bir robot istendiğinde HALF robotu son derece kullanışlıdır, ancak havacılık simülatörlerinde 3 yönde ötelenme 3 yönde de dönmenin gerçekleşmesi istendiğinden bu tür uygulamalarda kullanılamaz.

## 6. ALTI SERBESTLİK DERECELİ MEKANİZMALARIN ÇALIŞMA UZAYI VE TEKİLLİKLERİ

Liu ve arkadaşları [49], paralel mekanizmaların diferansiyel formdaki geometrik kısıt fonksiyonlarından faydalanarak tekillikleri bulmuş ve bunları sınıflandırmıştır. Kim ve çalışma arkadaşları

da [50] 6 serbestlik dereceli paralel mekanizmaların çalışma uzayını geometrik yaklaşımla bulmuştur. Geometrik yaklaşımdan kasıt, çözüm için gerekli olan tüm bilginin hareketli platformun boyutu, eklemlerin konumları veya bacak boyları gibi mekanizma geometrisi ile ilgili bilgi olmasıdır. Bu çalışmanın özelliğı, çalışma uzayı belirlenirken konum ve yönelme bilgisine ihtiyaç duyulmadan yalnızca tasarım değişkenlerinin yeterli olmasıdır. Örneğın, Wen ve O'Brian [51], 3 bacaklı düzlemsel ve uzaysal mekanizmaların tekilliklerini geometrik olarak bulurken koordinatlardan bağımsız bir yol izlemiştir. Pernkopf ve Husty [36] SPM'nin tekilliklerini geometrik yaklaşımla bulmuştur. Wolf ve Shoham da [52], paralel mekanizmaların tekilliklerini geometriden faydalanarak bulmuştur. Altıdan daha düşük serbestlik dereceli mekanizmalara da uygulanabilen bu yöntem ile 6\*6'lık bir matris oluşturularak tekil konfigürasyonlar ve bu konfigürasyonlarda mekanizmanın davranışı incelenir. Tekilliklerin bulunmadığı bölgelerin bulunması ile mekanizmanın herhangi bir yörünge üzerinde tekilliklere uğramadan hareket etmesi mümkündür.

W. Dang ve T. Min [53] 6-3 SPM'nin çalışma uzayı sınırlarını, hareketli platformun tabana paralel olduğu hali ele alarak analitik olarak 0.03 hassasiyetle belirlemiştir. Bu çalışma genel SPM için yapılmış olmadığı halde araştırmacılar bu yöntemin genel hale de uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Wang ve arkadaşları [54], kinematik analizini yaptıkları 6 serbestlik dereceli mekanizmanın çalışma uzayı sınırlarını belirleyen bir algoritma geliştirmişlerdir. Angeles ve çalışma arkadaşları [55] ise her bacağına iki eyleyiciye sahip 3 bacaklı özel bir mekanizma tipi olan 6 serbestlik dereceli RRRS mekanizmasının tekillik analizini yapmış, tekillikleri sınıflandırmıştır. Ayrıca, tekilliklerin üstesinden gelebilmek için paralel mekanizmalarda modüler yapı kullanımını önermişlerdir. Majid ve arkadaşları [56], genel SPM ile karşılaştırıldığında daha basit bir yapıya ve daha yüksek rijitliğe sahip olan 6 serbestlik dereceli 3-PPSR mekanizmasının çalışma uzayı ve tekillik analizini yapmıştır. Merlet [57], paralel manipülatörlerin çalışma uzaylarının bulunma metodlarını ayırıklaştırma (diskretizasyon) metodu, geometrik method ve Jacobian matris metodu olarak üç ana sınıfta toplamış, genel haldeki 6 bacaklı SPM'nin yönelme uzayını tüm mekanik kısıtlamaları hesaba katarak bulmuştur. Bu mekanik kısıtlar bacak boylarının üst ve alt limitlerinin olması, pasif eklemlerde mekanik sınırlamalar olması ve bağların birbirleriyle çarpışarak hareketlerini engellemesidir. Ayırıklaştırma metoduna göre çalışma uzayı, uç organın yani hareketli platformun kademe kademe artırılarak hareket ettirilmesinin değerlendirilmesi, link uzunluklarının saptanması için ters kinematik denklemlerinin çözülmesi ve eklem limitleri ve link kesişmelerine karşılık hesaplanan link uzunluklarının

kontrol edilmesiyle hesaplanır. Özellikle yüksek çözünürlüklü çalışma uzayı haritasının çıkarılması gerektiğı zaman ayrıklaştırma metodu fazla zamana ihtiyaç duyar ve verimli değildir. Geometrik yaklaşımda, mekanik kesişmeler göz ardı edilerek çalışma uzayı sınırına erişilmesi ve eyleyicilerden en az birinin limit değerlerine ulaşp ulaşmadığını kontrol edilmesi sonucu çalışma uzayına ulaşılır. Bu metodun özelliğı, eyleyicinin sınırlarına ilave olarak çalışma uzayının diğ er fiziksel sınırlamalarını da işleme kapasitesine sahip olmasıdır.

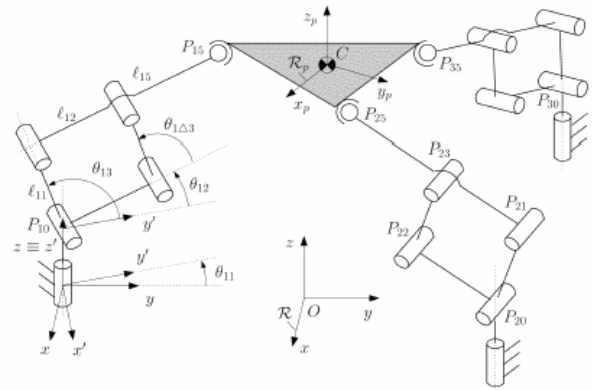
Yönelme uzayı, sabit bir nokta etrafında hareketli platformun yapabileceğı tüm dönmelerdir. Bodescu ve arkadaşları [58,59], yalnızca öteleme serbestliğine sahip 3-UPU ve yalnızca yönelme serbestliğine sahip 3-UPS mekanizmalarının çalışma uzayı optimizasyonunu yapmıştır. Optimizasyon parametreleri olarak da prizmatik eklemlerdeki boy değ işimi ve hareketli platformun merkeziyle tabanın ve hareketli platformun köşeleri arasındaki mesafelerin farkı alınmıştır. Modüler yapı kullanımı önerildiğ inden, yalnızca ötelenme ve yalnızca yönelme yapabilen mekanizmaların çalışma uzaylarının incelenmesi de bu tür parçalardan meydana gelen mekanizmaların tasarımı açısından gereklidir. Bonev ve Ryu [60] 6 serbestlik dereceli mekanizmalar için 3 boyutlu yönelme uzayını, yani sabit bir nokta etrafında mobil platformun ulaşabileceğı yönleri diskretizasyon metodu ile bulmuştur. Li ve arkadaşları [61], 6-3 SPM'nin tekillik problemini çözerken, tekillikler açısından eşdeğ er olan düzlemsel bir eşdeğ er mekanizmadan faydalanmış, böylece SPM'nin tekillik problemi, daha kolay bir problem olan düzlemsel mekanizmanın konum analizi probleminde dönmüştür.

## 7. ÖNERİLER

Merlet [62] SPM'nin optimizasyonu problemini ele almış, mekanizmanın mimarisi ile ilgili 48 optimizasyon parametresi belirlemiştir. Bunlardan 18'i altıgen tabanın köşelerinin uzaydaki koordinatları, 18'i altıgen biçimli hareketli platformun uzaydaki koordinatları, 6'sı bacakların nominal boyları, 6'sı da bacak boylarının boylarında oluşan ve lineer sensörler tarafından ölçülen değ işimlerdir. SPM'nin optimizasyonu probleminde genel olarak ulaşılmak istenen amaç, çalışma uzayını, hassasiyeti, katılığı maksimize etmek ve verilen eyleyici kuvvet ve ivmelerine karşılık hareketli platformda maksimum kuvvet ve ivme elde etmektir. Monsarrat ve Gosselin [63] 3 bacaklı, 6 serbestlik dereceli, bacakları beş çubuklu bağlardan oluşan yeni bir tasarım önermiştir. (Şekil 13.) Bu mekanizmanın özelliğı statik olarak dengeli olması, yani mekanizma herhangi bir konfigürasyonda hareketsiz halde iken eyleyici kuvvet veya momentine gerek duymamasıdır. İlk olarak sabit yönelme durumundaki mekanizmanın tekil noktalar içermeyen çalışma uzayını maksimize eden

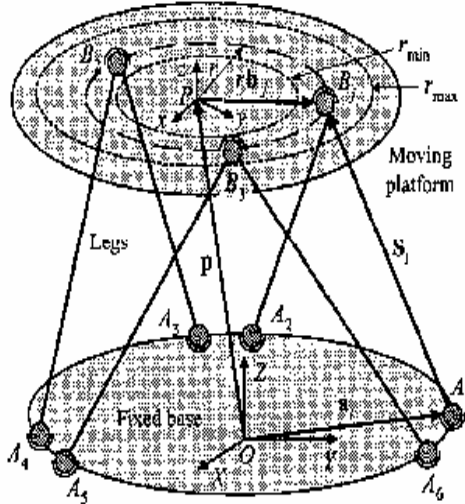
araştırmacılar, önerilen mimari uç ş simülörlerinde de kullanıma uygun olduğ undan üç yönde ötelenme ve üç yönde yönelme yapılan genel durum için de çalışma uzayını diskretizasyon metoduyla maksimize etmişlerdir. Araştırmacılar, kullandıkları yöntemin tekilliklerinin yeri kapalı formda bilinen dengeli ve dengesiz sistemlere uygulanabileceğini belirtmiştir.

Jin ve arkadaşlarının [64] önerdiği 3 bacaklı paralel mekanizma mimarisi tercihli olarak harekete geçirilebilir, yani eyleyicilerin doğrusal veya açıs al hareket yapmasına bağı olarak hareketli platform yalnızca küresel hareket, yalnızca öteleme veya uzayda 6 serbestlik dereceli hareket yapabilir. Hareketli platformdaki ötelenme ve dönme



Şekil 13. Bir paralel mekanizma önerisi

hareketin birbirinden bağımsız olarak tek tek kontrol edilebilmesini sağlar. Bu çalışmada çeşitli harekete geçirme durumları için tekillik analizi yapılmış, tekillikler düz, ters ve birleşik olarak sınıflandırılmıştır. Önerilen mimari, yüksek hassasiyet gerektiren işlerde kullanılmaya uygundur. Paralel mekanizmanın çalışma uzayını geliştirmeyi amaçlayan bir başka öneri ise, Lee ve arkadaşlarının [65] getirdiğı, hareketli platformun merkezi ile bacağın hareketli platforma bağılandığı nokta arasındaki mesafenin eyleyiciler tarafından değ işebildiğı SPM mimarisinin (şekil 14) kullanılmasıdır. Bu şekilde elde edilen değ işebilen kollu mekanizmanın çalışma uzayı, klasik haldeki bir mekanizmanınkinin 1.5 katından daha geniştir. Mekanizma konfigürasyonunu değ iştirmek, kinematik analizde ortaya çıkan Jakobyen matrisini değ iştireceğı gibi bacaklar ve platform arasındaki kuvvet ve moment iletimini de değ iştirir.



Şekil 14. Önerilen bir paralel mekanizma mimarisini

Tekil noktalarla başa çıkabilmek için Chen ve arkadaşları [66] eklem-eşleştirme önermişlerdir. Buna göre bir eyleyici birden fazla eklemi aynı anda harekete geçirebilir. Böylece, mekanizmanın mimarisini değiştirmeye gerek kalmadan, yalnızca eşleşme parametrelerini değiştirerek tekil noktaların konumunu değiştirmek mümkün olacaktır. Arai ve arkadaşlarının [67] önerisi ise bağ parametrelerini değiştirerek çalışma uzayını genişletmektir. Buradaki fikir, tek bir makinenin bağ parametrelerini değiştirip tüm çalışma uzayını kapsayacak küçük çalışma uzaylarına sahip mekanizmalar elde etmek, dolayısıyla tek mekanizma varken tekilliklerden dolayı ulaşılamayacak noktalara sahip çalışma uzayı yerine daha büyük bir uzay kapsayabilmektir. Bu yöntem 6 serbestlik dereceli mikromanipülasyon mekanizmalarına uygulanabilse de havacılık simülörlerinde uygulanabilmesi zordur. Miller [68], mekanizmanın boyutları sabit tutularak motor eksenlerinin yönlerinin çalışma uzayı şekli ve hacmine olan etkisini incelemiştir. Böylece en büyük çalışma uzayını verecek motor eksen konfigürasyonuna ulaşmıştır.

Hay ve Snyman [69], daha önceden belirlenmiş bir çalışma uzayına sahip düzlemsel bir mekanizma tasarlamak için iki farklı yöntem belirlemiştir. Bunlardan ilki kısıtsız bir optimizasyon problemi ve önceden belirtilmiş çalışma uzayını tamamen içermeyen, yaklaşık bir sonuç verir. İkincisi ise bir kısıtlı optimizasyon problemi ve sonuç, istenen çalışma uzayını tamamen kapsar. Burada önerilen sayısal yöntemler yalnızca düzlemsel mekanizmalara uygulanmış olmalarına karşın, metodun iyi sonuçlar vermesi, daha karmaşık mekanizmalara da uygulanabilirliği konusunda umut vermektedir.

## 8. YOL PLANLAMASI

Cortes ve Simeon [70] fazla değinilmeyen bir konu olan yol planlama üzerine yaptıkları çalışmalarında, kapalı çevrimli mekanizmaların çalışma uzaylarının

belirlenmesine gerek kalmadan olasılıksal yol planlaması yapılan genel bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem sayesinde, gerçek zamanlı olarak, mekanizma bacalarının birbirleriyle kesişmediği veya çarpışmadığı hareketler üretmek mümkündür. Bu yöntemle, ayrıca, engellerin var olduğu durumlarda yol planlaması problemi çözmek de mümkündür. Bu yöntem geliştirilerek, yol planlaması esnasında mekanizma tekilliklerine uğramayan hareket sağlamak faydalı olacaktır. Merlet [71] iki nokta yani mekanizmanın iki konumu arasındaki düz çizginin tamamen çalışma uzayında kalıp kalmadığını bulan bir algoritma geliştirmiştir. Dash ve arkadaşları ise [72] paralel mekanizmanın çalışma uzayı içerisinde tekilliklere uğramadan yol planlaması yapmak için bir sayısal yöntem geliştirmiştir. Buna göre, çalışma uzayı içerisindeki tekil noktalar gruplanır, engel oldukları varsayılır ve bu engellerin üzerinden veya yakınından geçmeden hareket planlanır. Araştırmacılar, bu yöntemin dönel ve prizmatik eklemlerden meydana gelmiş her paralel mekanizmaya uygulanabileceğini belirtmiştir.

## 9. NERO-GENETİK ALGORİTMALAR

Stewart platform mekanizmasının yukarıda bahsedilen kinematik, dinamik, tekillik ve çalışma uzayı problemlerini çözmek için genetik algoritmalar ve yapay sinir ağlarından da yararlanılabilir. Genetik algoritmalar, doğadaki doğal seleksiyon mekanizması prensibiyle çalışan ve daima bir çözüme yakınsayan arama ve optimizasyon metodlarıdır. Birbirine yarışan muhtemel çözümler çeşitli parametreler cinsinden ifade edilirler ve bir topluluk oluştururlar. Kromozom adı verilen bu potansiyel çözümlerin yani veri dizilerinin gerçek çözüme yakınlığı, daha önceden belirlenmiş bir uygunluk fonksiyonu vasıtasıyla test edilir. Seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon sayesinde toplulukta kromozom çeşitliliğini artar ve evrimsel gelişme sağlanmış olur. Kromozomların, yani çözümün evrimsel gelişimi, gerçek çözüme yakınsamayı sağlar. Toogood ve arkadaşları, bu yöntemle 3 serbestlik dereceli dönel mekanizma için engellerin mevcut olduğu bir ortamda yol planlaması yapmıştır. Daima bir çözüme yakınsamasına rağmen bu yöntemin tek dezavantajı hesap zamanının gerçek zamanlı yol planlamaya uygun olmamasıdır [73]. Su ve arkadaşları [74,75,76] genetik algoritmalar yardımıyla, teleskop ince ayarında kullanılan SPM'nin kinematik parametrelerinin optimizasyonunu ve tekillik analizini ve 6 serbestlik dereceli SPM'nin tekillik analizini yapmıştır. Böylece, gerçekte karmaşık bir problem olan tekilliklerin bulunması problemi, bir optimizasyon problemine dönmüştür.

Yapay sinir ağları da yine doğadaki sinir ağlarından esinlenerek tasarlanmış, paralel çalışan elemanlardan oluşan ağlardır. Doğadaki gibi, ağ fonksiyonu, nöron adı verilen elemanlar arasındaki bağlantılar yani ağırlıklar ve biaslar tarafından belirlenir. Bir yapay

sinir ağının nöronlarının bağlantı ağırlıkları ve biasları değiştirilerek belirli bir fonksiyonu gerçekleştirmesi mümkündür. Diğer bir deyişle, yapay sinir ağları belli girişlerin belli çıkışları vermesi için eğitilir. Yee ve Lim [77] yapay sinir ağlarını kullanarak SPM'nin düz kinematik problemini 1° ve 1 mm hassasiyete kadar çözmüştür. Durali ve Shameli de [78] 6-6 SPM'nin düz kinematik problemini yapay sinir ağlarıyla % 1.3 hata ile çözmüş, çözümü geliştirmek için çeşitli sayısal yöntemlerden faydalanarak hatayı % 0.004'e kadar düşürmeyi başarmıştır. Ağ eğitilirken giriş değeri olarak bacak boyları, çıkış değeri olarak da hareketli platformun konum ve yönelmesi verilmiştir. Çalışma zamanı açısından da yöntem oldukça avantajlıdır, öyle ki çözüm için gereken zaman milisaniye mertebesinde. Yapay sinir ağlarının tek dezavantajı, eğitim aşamasında ağıın çalışma uzayının tamamından veriyle eğitilmesi, böylece saatler mertebesinde zamana ihtiyaç duymasındır.

## 10. SONUÇ

Yukarıda geniş özeti verilen, paralel mekanizmaların hakkında yapılan çalışmaların bugün geldikleri nokta, gerçek zamanlı konumlandırma ve yönelme açısından hala yetersizdir. Kullanılan eklem tipleri mekanizmanın çalışma uzayı hacmini etkilediğinden, çalışma uzayını artıracak yeni eklem tasarımları üzerinde çalışmak gereklidir. Düz kinematik problemin çözümlerinden fiziksel olarak gerçekleştirilebilir olanları birbirine bağlayan, tekillik içermeyen yörüngeleri bulmak için göz önünde bulundurulması gereken iki kriteri, yani tekillik ve eklemlerin içiçe geçmesi kriterlerinin ikisini birden kapsayan bir test mevcut değildir. Çalışma uzayı, tekillik ve yörünge planlaması problemlerine global bir çözüme ihtiyaç vardır. Bu aşamadan sonra yapılacak çalışmalarda kinematik ve dinamiğin geliştirilmiş bir çözüm fonksiyonuna ve buna dayanan çalışma uzayı, yol planlaması kontrollü algoritmalara ihtiyaç vardır. Kinematik ve dinamik, geliştirilmiş bir analitik ifadeyle çözülürken, çalışma uzayı ve yol planlaması ise nero-genetik algoritmalarla gerçek zamanlı olarak çözülebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom", Proc. Instn. Mech. Engrs, **180**(15), 371-386,1965.
- [2] D. Ku, "Direct Displacement Analysis of a Stewart Platform Mechanism", Mechanism and Machine Theory, **34**(3), 453-465, 1999.
- [3] J. P. Merlet, "Direct Kinematics of Parallel Manipulators", IEEE Transactions on Robotics and Automation, **9**(6), 842-846 (1993).
- [4] Y. K. Yiu, H. Cheng, Z. H. Xiong, G.F.Liu ve Z.X.Li, "On the Dynamics of Parallel Manipulators", Proceedings of the 2001 IEEE

- International Conference on Robotics and Automation, 2001.
- [5] K. Liu, J. M. Fitzgerald ve F. L. Lewis, "Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, **40**(2), 282-293, 1993.
- [6] K. Lee ve D.K. Shah, "Kinematic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator", IEEE Journal of Robotics and Automation, **4**(3), 354-360, 1988.
- [7] X. Shi ve R.G. Fenton, "Solution to the Forward Instantaneous Kinematics for a General 6-dof Stewart Platform", Mechanism and Machine Theory, **27**(3), 251-259, 1992.
- [8] C. Innocenti ve V. Parenti-Castelli, "Direct Position Analysis of the Stewart Platform Mechanism", Mechanism and Machine Theory, **25**(6), 611-621, 1990.
- [9] B. Dasgupta ve T.S. Mruthyunjaya, Mechanism and Machine Theory, **35**, 15-40, 2000.
- [10] L. Romdhane, "Design and Analysis of a Hybrid Serial-Parallel Manipulator", Mechanism and Machine Theory, **34**, 1037-1055, 1999.
- [11] T. Arai, K. Yuasa, Y. Mae, K. Inoue, K. Miyawaki ve N.Koyachi, "A Hybrid Drive Parallel Arm for Heavy Material Handling", IEEE Robotics and Automation Magazine, 45-54, 2002.
- [12] R. S. Stoughton, T. Arai, "A Modified Stewart Platform Manipulator with Improved Dexterity", IEEE Transactions on Robotics and Automation, **9**(2), 166-173, 1993.
- [13] P. Nanua, K.J. Waldron, V. Murthy, "Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform", IEEE Transactions on Robotics and Automation, **6**(4), 438-444, 1990.
- [14] K. Wohlhart, "Displacement Analysis of the General Spherical Stewart Platform", Mechanism and Machine Theory, **29**(4), 581-589, 1994.
- [15] B. Dasgupta ve T.S. Mruthyunjaya, "A Canonical Formulation of the Direct Position Kinematics Problem for a General 6-6 Stewart Platform", Mechanism and Machine Theory, **29**(6), 819-827, 1994.
- [16] B. Dasgupta ve T.S. Mruthyunjaya, "A Constructive Predictor-Corrector Algorithm for the Direct Position Kinematics Problem for a General 6-6 Stewart Platform", Mechanism and Machine Theory, **31**(6), 799-811, 1996.
- [17] X. Zhao ve S. Peng, "Direct Displacement Analysis of Parallel Manipulators", Journal of Robotic Systems, **17**(6), 341-345, 2000.
- [18] D. Jakobovic ve L. Jelenkovic, "The Forward and Inverse Kinematics Problems for Stewart Parallel Mechanisms", International Scientific Conference on Production Engineering, II-001 - II-012, 2002.

- [19] M. S. Tsai, T. N. Shiau, Y. J. Tsai ve T. H. Chang, "Direct Kinematic Analysis of a 3-PRS Parallel Mechanism", *Mechanism and Machine Theory*, **38**, 71-83, 2003.
- [20] J. Kim ve F. C. Park, "Direct Kinematic Analysis of 3-RS Parallel Mechanisms", *Mechanism and Machine Theory*, **36**, 1121-1134, 2001.
- [21] R. Di Gregorio, "Kinematics of a New Spherical Parallel Manipulator with Three Equal Legs: The 3-URC Wrist", *Journal of Robotic Systems*, **18**(5), 213-219, 2001.
- [22] M. Callegari ve M. Tarantini, "Kinematic Analysis of a Novel Translational Platform", *Transactions of the ASME*, **125**, 308-315, 2003.
- [23] R. Di Gregorio, "Translational Parallel Manipulators: New Proposals", *Journal of Robotic Systems*, **19**(12), 595-603, 2002.
- [24] Dasgupta, B. and Mruthyunjaya T.S., "Closed-Form Dynamic Equations of the General Stewart Platform Through the Newton-Euler Approach", *Mechanism and Machine Theory*, Vol.33, 1998, 993-1012.
- [25] Dasgupta, B. and Mruthyunjaya T.S., "Newton-Euler Formulation for the Inverse Dynamics of the Stewart Platform Manipulator", *Mechanism and Machine Theory*, Vol.33, 1998, 1135-1152.
- [26] J. Wang ve C. M. Gosselin, "A New Approach for the Dynamic Analysis of Parallel Manipulators", *Multibody System Dynamics*, **2**, 317-334, 1998.
- [27] G. Lebre, K. Liu ve F. L. Lewis, "Dynamic Analysis and Control of a Stewart Platform Manipulator", *Journal of Robotic Systems*, **10**(5), 629-655, 1993.
- [28] H. Pang ve M. Shahinpoor, "Inverse Dynamics of a Parallel Manipulator", *Journal of Robotic Systems*, **11**(8), 693-702, 1994.
- [29] M. J. Liu, C. X. Li, C. N. Li, "Dynamics Analysis of the Gough-Stewart Platform Manipulator", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **16**(1), 2000.
- [30] R. Di Gregorio, *Journal of Robotic Systems* **19**(1), 37-43, 2002.
- [31] F. Pernkopf ve M. Husty, "Workspace Analysis of Stewart-Gough Manipulators Using Orientation Plots", *Proceedings of MUSME 2002, the International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics*, 2002.
- [32] El- M Dafaoui, Y. Amirat, J. Pontnau, C. François, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **14**(1), 1998.
- [33] J.A. Carretero, M.Nahon, R.P.Podhoreski, Pr. of the 1998 IEEE/RSI International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1998.
- [34] S. A. Joshi ve L. W. Tsai, "Jacobian Analysis of Limited-Dof Parallel Manipulators", *Transactions of the ASME*, **124**, 254-258, 2002.
- [35] C. Gosselin, J. Angeles, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **6**(3), 281-290, 1990.
- [36] F. Pernkopf ve M. L. Husty, "Singularity Analysis of Spatial Stewart-Gough Platforms with Planar Base and Platform", *Proceedings of DETC'02 2002 ASME Design Engineering Technical Conference*, 1-8, 2002.
- [37] C. L. Collins ve J. M. McCarthy, *IEEE*, 473-478, 1997.
- [38] J. Angeles, G. Yang ve I. M. Chen, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **8**(4), 469-475, 2003.
- [39] D. Kim ve W. Chung, "Analytic Singularity Equation and Analysis of Six-Dof Parallel Manipulators Using Local Structurization Method", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **15**(4), 1999.
- [40] J. Bessala, P. Bidaud, F. Ben Oueddou, *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996.
- [41] L. Romdhane, Z. Affi ve M. Fayet, *Journal of Mechanical Design*, **124**, 419-426, 2002.
- [42] D. Zlatanov, R. G. Fenton ve B. Benhabib, "Singularity Analysis of Mechanisms and Robots via A Motion-Space Model of the Instantaneous Kinematics", *IEEE*, 980-985, 1994.
- [43] D. Zlatanov, R. G. Fenton ve B. Benhabib, "Singularity Analysis of Mechanisms and Robots via A Velocity-Equation Model of the Instantaneous Kinematics", *IEEE*, 986-991, 1994.
- [44] Z. Huang, L. H. Chen ve Y. W. Li, *Journal of Robotic Systems*, **20**(4), 163-176, 2003.
- [45] L. J. Du Plessis, J. A. Snyman, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **52**, 345-369, 2001.
- [46] R. Di Gregorio, V. Parenti-Castelli, *Journal of Mechanical Design*, **124**, 259-264, 2002.
- [47] G. Yang, I. M. Chen, W. Lin ve J. Angeles, "Singularity Analysis of Three-Legged Parallel Robots Based on Passive-Joint Velocities", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **17**(4), 413-422, 2001.
- [48] X. J. Liu, J. Kim ve K. K. Oh, "Singularity Analysis of the HALF Manipulator with Revolute Actuators", *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 767-772, 2003.
- [49] G. Liu, Y. Lou, Z. Li, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **19**(4), 579-594, 2003.
- [50] D. L. Kim, W. K. Chung ve Y. Youm, "Geometrical Approach for the Workspace of 6-Dof parallel Manipulators", *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997.
- [51] J. T. Wen, J. F. O'Brien, "Singularities in Three-Legged Platform-Type Parallel



- Mechanisms”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 19(4), 720-726, 2003.
- [52] A. Wolf ve M. Shoham, “Investigation of Parallel Manipulators Using Linear Complex Approximation”, Transactions of the ASME, 125, 564-572, 2003.
- [53] W. Dang ve T. Min, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001.
- [54] Z. Wang, Z. Wang, W. Liu ve Y. Lei, “A Study on Workspace, Boundary Workspace Analysis and Workpiece Positioning for Parallel Machine Tools”, Mechanism and Machine Theory, 36, 605-622, 2001.
- [55] J. Angeles, G. Yang, I. M. Chen, 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, 2001.
- [56] M. Z. A. Majid, Z. Huang ve Y. L. Yao, “Workspace Analysis of a Six-Degrees of Freedom, Three-Prismatic-Prismatic-Spheric-Revolute Parallel Manipulator”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16, 441-449, 2000.
- [57] J. P. Merlet, “Determination of the Orientation Workspace of Parallel Manipulators”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 13, 143-160, 1995.
- [58] M. Badescu ve C. Mavroidis, “Workspace Optimization of 3-Legged UPU and UPS Parallel Platforms with Joint Constraints”, Journal of Mechanical Design, 126, 291-300, 2004.
- [59] M. Badescu, J. Morman ve C. Mavroidis, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3678-3683, 2002.
- [60] I. A. Bonev, J. Ryu, Mechanism and Machine Theory, 36, 2001.
- [61] Y. Li, Z. Huang ve L. Chen, “Singular Loci Analysis of 3/6-Stewart Manipulator by Singularity-Equivalent Mechanism”, IEEE, 1881-1886, 2003.
- [62] J. P. Merlet, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3726-3731, 1996.
- [63] B. Monsarrat, C. M. Gosselin, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 19(6), 954-966, 2003.
- [64] Y. Jin, I. M. Chen ve G. Yang, “Structure Synthesis and Singularity Analysis of a Parallel Manipulator Based on Selective Actuation”, Pr. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4533-4538, 2004.
- [65] S.H.Lee, J.B.Song, W.C.Choi ve D.Hong, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3666-3671, 2002.
- [66] I. M. Chen, J. Angeles, Theingi ve C. Li. Oh, “The Management of Parallel-Manipulator Singularities Using Joint Coupling”, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 773-778, 2003.
- [67] T. Arai, K. Takayama, K. Inoue, Y. Mae, Y. Koseki, Pr. of the 2000 IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000.
- [68] K. Miller, “Maximization of Workspace Volume of 3-Dof Spatial Parallel Manipulators”, Journal of Mechanical Design, 124, 347-350, 2002.
- [69] A. M. Hay ve J. A. Snyman, “Methodologies for the Optimal Design of Parallel Manipulators”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 59, 131-152, 2004.
- [70] J. Cortes ve T. Simeon, “Probabilistic Motion Planning for Parallel Mechanisms”, Pr. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4354-4359, 2003.
- [71] J. P. Merlet, IEEE, 2166-2171, 1994.
- [72] A. K. Dash, I. M. Chen, S. H. Yeo ve G. Yang, “Singularity-Free Path Planning of Parallel Manipulators Using Clustering Algorithm and Line Geometry”, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 761-766, 2003.
- [73] R. Toogood, H. Hao ve C. Wong, “Robot Path Planning Using Genetic Algorithms”, IEEE, 489-494, 1995.
- [74] Y. X. Su, B. Y. Duan, B. Peng ve R. D. Nan, “Singularity Analysis of Fine-Tuning Stewart Platform for Large Radio Telescope Using Genetic Algorithm”, Mechatronics, 13, 413-425, 2003.
- [75] Y. X. Su, B. Y. Duan ve C. H. Zheng, “Genetic Design of Kinetically Optimal Fine Tuning Stewart Platform for Large Spherical Radio Telescope”, Mechatronics, 11, 821-835, 2001.
- [76] Y. X. Su, C. H. Zheng ve B. Y. Duan, “Singularity Analysis of a 6-Dof Stewart Platform Using Genetic Algorithm”, IEEE, 2002.
- [77] C. Yee ve K. Lim, “Forward Kinematics Solution of Stewart Platform Using Neural Networks”, Neurocomputing, 16, 333-349, 1997.
- [78] M. Durali ve E. Sharneli, “Full Order Neural Velocity and Acceleration Observer for a General 6-6 Stewart Platform”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 333-338, 2004.
- [79] S. V. Sreenivasan, K. J. Waldron, P. Nanua, “Closed-Form Direct Displacement Analysis of a 6-6 Stewart Platform”, Mechanism and Machine Theory, 29(6), 855-864, 1994.
- [80] J. A. Carretero, R. P. Podhorodeski, M. A. Nahon ve C. M. Gosselin, “Kinematic Analysis

and Optimization of a New Three Degree-of-Freedom Spatial Parallel Manipulator”, Journal of Mechanical Design, 122, 17-24, 2000.

[81] P. Martin, J. R. Millan, Robotics and Autonomous Systems, 31, 227-246, 2000.

[82] S. N. Yurt, 6-3 Stewart Platform Mekanizmasının Kinematik, Dinamik Analizi ve Kontrolu, Doktora Tezi, 2002.

## ÖZGEÇMİŐLER

### Elmas ANLI

1999-2003 arasında İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakóltesi, Uzay Mühendisliğı bölümünde lisans eğitimi almıştır. Halen İTÜ Uçak-Uzay Mühendisliğı bölümünde yüksek lisans yapmaktadır. İlgilendiğı konular paralel mekanizmalar ve yapay sinir ağılarıdır.

### Hüseyin ALP

1991-1995 yılları arasında İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakóltesi, Uzay Mühendisliğı bölümünde lisans eğitimi almıştır. 1995-1996 arasında hazırlık eğitimi alıp, 1996-1998 arasında İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakóltesi, Uzay Mühendisliğı bölümünde yüksek lisans eğitimi almıştır. Halen İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakóltesi, Uzay Mühendisliğı bölümünde doktora eğitime devam etmektedir. İlgilendiğı konular paralel ve seri mekanizmalardır.

### Sait N. YURT

1991 yılında İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğı bölümünden mezun olmuştur. 1995 yılında İTÜ Uzay Bilimleri ve Teknolojisi bölümünde yüksek lisans eğitimi tamamlamıştır. 2002 yılında İTÜ Uçak Mühendisliğı bölümünde doktorasını tamamlamıştır. İlgilendiğı konular sistem dinamiğı ve kontroldür.

### İbrahim ÖZKOL

1987 yılından beri İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakóltesi’nde çalışmaktadır. 1996 yılında Doçent ünvanını almıştır. Çalışma alanları aerodinamik, dinamik ve ısı transferidir.