



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



6 serbestlik derecesine sahip 3-CCC tipi robot için iki tasarım önerisi ve çalışma uzayı karşılaştırması

Two design proposals and working space comparison for 3-CCC type robot with 6 degrees of freedom

Yazar(lar) (Author(s)): Savaş YILMAZ¹, Serdar KÜÇÜK², Metin TOZ³

ORCID¹: 0000-0003-3559-4198

ORCID²: 0000-0002-5543-7539

ORCID³: 0000-0001-9752-2718

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yılmaz S., Küçük S. ve Toz M., “6 Serbestlik derecesine sahip 3-CCC tipi robot için iki tasarım önerisi ve çalışma uzayı karşılaştırması”, *Politeknik Dergisi*, 25(4): 1621-1632, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.931177

6 Serbestlik Derecesine Sahip 3-CCC Tipi Robot İçin İki Tasarım Önerisi ve Çalışma Uzayı Karşılaştırması

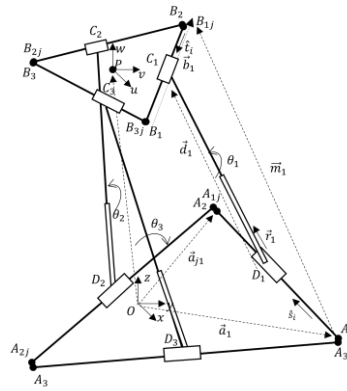
Two Design Proposals and Working Space Comparison for 3-CCC Type Robot with 6 Degrees of Freedom

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Farklı mekanizma tasarımı / Different mechanism design
- ❖ Daha geniş çalışma uzayı / Wider working space

Grafik Özet (Graphical Abstract)

$D_4^3 A_1^3$ robot tipi için iki adet tasarım önerisinde bulunulmuştur. Bu tasarımların çalışma uzayları hesaplanarak başka bir çalışmada elde edilen çalışma uzayı ile karşılaştırılmıştır. / Two design proposals have been made for $D_4^3 A_1^3$ robot types. The working spaces of these designs are calculated and compared with the working space obtained elsewhere.



Şekil.1. Önerilen $D_4^3 A_1^3$ tipi robot mekanizması /Figure.1. Recommended $D_4^3 A_1^3$ type robot mechanism

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın temel amacı, $D_4^3 A_1^3$ robot tipi için farklı mekanizmalar önererek çalışma uzayını genişletmek. / The main purpose of this study is to expand the working space by proposing different mechanisms for $D_4^3 A_1^3$ robot types.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Önerilen tasarımların ters kinematik denklemleri vektör yöntemi kullanılarak hesaplanmış Matlab programı yardımıyla çalışma uzayları hesaplanmıştır. / The inverse kinematic equations of the proposed designs were calculated using the vector method and the working spaces were calculated with the help of the Matlab program.

Özgünlük (Originality)

Bu çalışma, önerilen tasarımların çalışma uzayları karşılaştırmasına yönelik yapılmış ilk çalışmadır / This study is the first study to compare the working spaces of the proposed designs.

Bulgular (Findings)

Elde edilen sonuçlar ile daha büyük çalışma uzayı hacimleri elde edilebileceği gösterilmiştir. / It has been shown that larger working space volumes can be obtained with the obtained results.

Sonuç (Conclusion)

Başka bir çalışmada elde edilen çalışma uzayı ile önerilen tasarımlarla elde edilen çalışma uzayı karşılaştırılarak önerilen tasarımların daha geniş bir çalışma uzayına sahip oldukları gösterilmiştir. / By comparing the working space obtained in another study with the working space obtained with the proposed designs, it was shown that the proposed designs have a larger working space.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

6 Serbestlik Derecesine Sahip 3-CCC Tipi Robot İçin İki Tasarım Önerisi ve Çalışma Uzayı Karşılaştırması

Araştırma Makalesi / Research Article

Savaş YILMAZ¹, Serdar KÜÇÜK², Metin TOZ³

¹Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi, Teknik Eğitim Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

²Biyomedikal Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

³Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 01.05.2021 ; Kabul/Accepted : 02.08.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 06.08.2021)

ÖZ

Bu çalışmada 6 serbestlik derecesine sahip 3D3A sınıfı paralel robot yapılarından 3-CCC tipi asimetrik paralel mekanizmanın ters kinematik analizleri yapılmış ve iki adet tasarım önerisinde bulunulmuştur. Önerilen tasarımların çalışma uzayları hesaplanmıştır.

Tasarımlarda D_4 tipi kısıt ile sağlanan CPAC (P: Aktif prizmatik eklem) bacak yapısı ve A_1 tipi kısıt ile sağlanan CPAC (A: Aktif dönel eklem) bacak yapısı kullanılmıştır. Ayrıca tek bir bacakta iki aktif eklem kullanılarak elde edilen CPAC (A: Aktif dönel eklem, P: Aktif prizmatik eklem) bacak yapısı da tasarımlarda kullanılmıştır. Bu robot tipi literatürde 3-CCC mekanizma olarak da geçmektedir. İlk tasarım önerisinde sabit ve hareketli platformlar kenarları silindirik eklem olan eşkenar üçgenler olacak şekilde belirlenmişlerdir. Platformlar birbirine 3 adet CCC bacak tipiyle bağlanmıştır. İkinci tasarım önerisinde XY, XZ ve YZ düzlemlerine yerleştirilmiş olan sabit silindirik eklemler ile nokta uç işlevcisine sahip olan hareketli platform, 3 adet CCC bacak tipiyle bağlanmıştır. Sabit ve hareketli platformda kullanılan silindirik eklem uzunlukları iki tasarımda da aynı tutulmuştur. Çalışma uzayları hesaplanırken uç işlevcinin ulaşabileceği sınır noktaları belirlenerek içeride kalan bölge üzerinde 5 mm aralıklarla tarama yapılmış ve ulaşılabilirliği kontrol edilmiştir. Hareketli platform önce sabit 0° tutularak sonra $-30^\circ + 30^\circ$ açıları arasında döndürülerek çalışma uzayları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarla, farklı tasarımlar yapılarak çalışma uzayının genişletilebildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: 6 SD, çalışma uzayı, ters kinematik analiz, asimetrik paralel robot.

Two Design Proposals and Working Space Comparison for 3-CCC Type Robot with 6 Degrees of Freedom

ABSTRACT

In this study, inverse kinematic analysis of 3-CCC type asymmetric parallel mechanism, which is one of the 3D3A class parallel robot structures with 6 degrees of freedom, was made and two design proposals were performed. Working spaces of the proposed designs have been calculated. In the designs, CPAC (P: Active prismatic joint) leg structure provided with D_4 type constraint and CPAC (A: Active rotational joint) leg structure provided with A_1 type constraint were used. In addition, the CPAC (A: Active rotational joint, P: Active prismatic joint) leg structure obtained by using two active joints in a single leg was also used in the designs. This robot type is also referred to as a 3-CCC mechanism in the literature. In the first design proposal, the fixed and mobile platforms were determined to be equilateral triangles with cylindrical joints. Platforms are connected to each other by 3 CCC leg types. In the second design proposal, the movable platform with fixed cylindrical joints placed in XY, XZ and YZ planes and pointwise end-effector is connected with 3 CCC leg types. The lengths of the cylindrical joints used in the fixed and mobile platform were kept the same in both designs. While calculating the working spaces, the limit points that the end functionalist can reach were determined and the inside area was scanned at 5 mm intervals and its accessibility was checked. Working spaces are calculated by first holding the mobile platform fixed at 0° and then rotating it between $-30^\circ + 30^\circ$ angles. With the results obtained, it has been seen that the working space can be expanded with different designs.

Keywords: 6-DOF, working space, inverse kinematic analysis, asymmetric parallel robot.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

21. yüzyılda hayatımızın her alanına giren teknolojiyle birlikte ihtiyaçlar hızlı bir şekilde artmaya başlamıştır. Hayatın her alanında işleri kolaylaştıracak yeni ve daha verimli çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle insan gücünün kullanıldığı iş alanlarında robot teknolojileri

kullanımının önemi artmaya devam etmektedir. Sadece güç olarak değil, hassasiyet ve verimlilik olarak da bu teknoloji önem arz etmektedir. Paralel robotlar gücümüzde kullanılmaya devam eden ve hala yeni türleri geliştirilen robot mekanizmalarıdır. Sabit bir platform ile hareketli bir platformun iki veya daha fazla eklem uzuvlarıyla birbirlerine bağlanmasıyla oluşan mekanizmalar paralel mekanizmalar olarak adlandırılmaktadır [1]. Paralel robotların seri robotlara

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : savasyilmaz32@hotmail.com

göre birçok avantajı bulunmaktadır. En önemli avantajlarından biri yüksek hassasiyet ve yüksek yük taşıma kapasitelerine sahip olmalarıdır. Ancak seri robotlar kadar geniş çalışma uzayına sahip değildirler [2]. 6 serbestlik derecesine sahip paralel robot ilk olarak 1965 yılında Steawert tarafından uçuş simülatörü olarak önerilmiştir [3]. El-Badawy ve Youssef 6 serbestlik derecesine sahip stewart platform mekanizmasını gövdeli dinamikler yaklaşımını kullanarak modellemiş ve simülasyon çalışması yapmışlardır [4]. Kim ve arkadaşları 6 serbestlik derecesine sahip mekanizma herhangi bir dönme ekseninde, sınırsız 360 derece sürekli dönüş ve sonlu X, Y ve Z eksenine öteleme hareketini sağlama üzerinde çalışma yapmışlardır [5]. Qiang ve arkadaşları toplam oryantasyon çalışma alanı için 6-SD paralel manipülatörün çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [6]. İner ve Küçük, genel stewart platform mekanizmalarının tasarım, analiz ve benzetiminin yapılabileceği STEWSIM isimli simülasyon aracını geliştirmişlerdir [7]. Dafaoui ve arkadaşları, kuvvet geri besleme kontrolünü gerçekleştirebilecek 6 serbestlik derecesine sahip bir paralel robot mimarisi sunmuşlardır [8]. Toz ve Küçük, 195 adet 6 SD GSP mekanizmasının ters Jacobian matrislerini 1 açısız ve 4 mesafe kısıtlamasını dikkate alarak 4 temel bacak tipi için hesaplamışlardır [9]. Ayrıca SPS, SPC, CPS ve CCC bacak tipleri için genel stewart platformu tasarım, analiz ve simülasyonu için MATLAB GUI tabanlı GSPDAP isimli bir yazılım aracı geliştirmişlerdir [10]. Nguyen ve arkadaşları 6 SD stewart platform tabanlı robotik bir bileğin kinematik analizini ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir [11]. Yang ve Han bir uzamsal 6-SD paralel manipülatörün çalışma alanındaki güçlü dinamik bağlantı özelliğini, modal ayırma teorisi ve frekans tepkileri karakteristik analiz yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir [12]. Wnag ve arkadaşları paralel 6 serbestlik dereceli stewart platformunun ters kinematığını homojen koordinat dönüşümüne dayalı matematiksel analiz yöntemi ile incelemişlerdir [13].

Bu çalışma sonuçlarının karşılaştırılmasında ele alınan, Toz ve Küçük'ün sınıflandırmış oldukları 6 serbestlik derecesine sahip olan robot tiplerinden başka bir yapı da 3-CCC mekanizmadır [14].

3-CCC mekanizma 6 serbestlik derecesine sahip $D_4^3A_1^3$ tipi asimetrik bir paralel mekanizmadır. Mekanizmada kullanılan D_4 tipi kısıt, mekanizmanın temel çerçevesi ile uç işlevci platformu arasında bir açısız kısıt oluşturmak için CPAC (P: Aktif prizmatik eklem) bacak yapısına, A_1 tipi kısıt ise CPAC (A: Aktif dönel eklem) bacak yapısına sahiptir. İkisi tek bir bacak yapısında CCC (C: Aktif silindirik eklem) şeklinde kullanılmıştır. Bu bacak yapısında prizmatik eklem, üst ve alt silindirik eklemlerine devamlı olarak diktir. Gao ve arkadaşları 6 serbestlik derecesine sahip 3850 adet GSP mekanizması önermiştir [15]. Toz ve Küçük [14] bunlar arasından 195 tanesini seçerek dört farklı grup altında toplamışlardır. 3D3A sınıfı robot yapıları bu gruptan bir tanesidir.

Bu çalışmada 3D3A sınıfında yer alan 20 adet robot tipinden bir tanesi olan $D_4^3A_1^3$ tipi mekanizma üzerinde çalışılmıştır. Belirtilen mekanizma yapısı literatürde bacak tipinden dolayı 3-CCC tipi paralel mekanizma olarak da görülmektedir. Gan ve arkadaşları 3-CCC mekanizmanın ileri kinematik hesaplamalarını yapmışlardır [16]. Ayrıca geometri analizine dayalı olarak bir CCC uzvu ve bir 3-CCC paralel mekanizması tasarlayarak hareket kabiliyetlerini ve geometrik kısıtlarını, vida teorisi ve geometrik denklemler kullanarak ayrı ayrı ele almışlardır [17]. Toz ve Küçük 3-CCC mekanizmasının sabit yönelimli olarak ve sabit uç noktada yönelimsel çalışma uzaylarını PSO algoritması kullanarak eniyilemişlerdir [18].

Li ve Angeles vida teorisini kullanarak 6 SD 3-CCC paralel kinematik mekanizmanın kinematik ve izotropi tasarımı yapmışlardır. Ayrıca 3-CCC mekanizmanın ileri kinematığı, tekilliği, çalışma uzayı ve kabiliyet analizlerini yapmışlardır [19, 20].

Bu çalışmanın temel amacı, 3-CCC robot tipi için farklı mekanizmalar önerilerek çalışma uzayını genişletmektir. Çalışmada 3-CCC mekanizmasının tasarımı ve çalışma uzayı analizi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak mekanizmada kullanılan bacak uzunluklarının en küçük ve en büyük değerleri ile sabit ve hareketli platformlarda kullanılan silindirik eklem uzunlukları belirlenmiştir. Bu belirlemelerde Toz ve Küçük'ün [18] $D_4^3A_1^3$ tipi ve 3 bacaklı bir GSP'nin geometrik eniyilmesi sonucu buldukları değerler kullanılmış ve bu çalışmanın sonucu ile doğru bir karşılaştırma yapılması sağlanmıştır. Belirlemeler sonucunda mekanizma için iki tasarım önerisinde bulunulmuştur. İlk tasarım önerisinde sabit platform XY düzleminde olacak şekilde, sabit ve hareketli platformlar kenarları silindirik eklem olan eşkenar üçgenler olarak belirlenmiştir. Her iki platform birbirine 3 adet CCC bacak tipiyle bağlanmıştır.

İkinci tasarım önerisinde ise XY, XZ ve YZ düzlemlerine yerleştirilmiş olan sabit silindirik eklemler ile nokta uç işlevcisine sahip olan hareketli platform, 3 adet CCC bacak tipiyle bağlanmıştır. Bu tasarımda hareketli ve sabit platformun birbirlerine bağlantı noktaları değiştirilerek Toz ve Küçük'ün [18] tasarımından farklı olması sağlanmıştır. İki tasarım için de çalışma uzayları hesaplanmış ve elde edilen çalışma uzayı sonuçları referans çalışma ile karşılaştırılmıştır. Çalışma uzayı belirlenirken uç işlevcinin ulaşabileceği sınır noktaları içerisinde kalan bölge üzerinde 5 mm aralıklarla tarama yapılmış ve ulaşılabilirliği kontrol edilmiştir. Hareketli platform önce sabit (0°) tutularak sonra -30° +30° açıları arasında döndürülerek çalışma uzayları hesaplanmıştır. Birinci tasarımda -30° +30° arası açılar 10°'lik adımlarla taranırken ikinci tasarımda 5°'lik adımlarla taranmıştır. Önerilen tasarımların ters kinematik denklemleri vektör yöntemi ve çalışma uzayları MATLAB yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Makalede kullanılan yöntemin detaylandırıldığı ikinci bölümünde, 3-CCC mekanizmasının geometrik

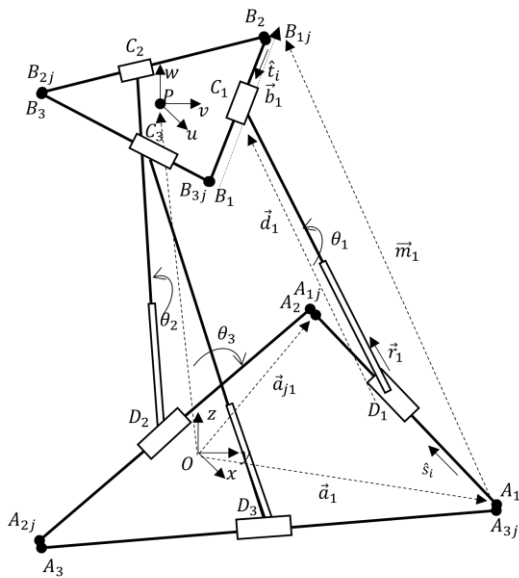
özellikleri ve ters kinematik hesabı sunulmuştur. Üçüncü bölüm olan bulgularda ise önerilen iki tasarım ve bu tasarımlar için elde edilen çalışma uzayları ortaya konulmuştur. Ve elde edilen bulgular referans çalışma ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek sonuçlandırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu bölümde, 3-CCC tipi mekanizma kapsamında mekanizmanın ters kinematik analizi, C ve D noktalarının bulunması ile silindirik eklemlerin paralellik durumu ele alınmaktadır.

2.1. 3-CCC Tipi Mekanizma (3-CCC Type Mechanism)

Bu çalışmaya konu edilen 3-CCC mekanizmasının geometrik yapısı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. $D_4^3A_1^3$ tipi asimetrik robot mekanizması ($D_4^3A_1^3$ type asymmetric robot mechanism)

Şekilde $A_1, A_{1j}, A_2, A_{2j}, A_3, A_{3j}$ noktaları sabit platform üzerinde bulunan silindirik eklemlerin uç noktalarını gösteren sabit noktalardır. P noktası uç işlevciyi, $B_1, B_{1j}, B_2, B_{2j}, B_3, B_{3j}$ noktaları ise hareketli platform üzerinde bulunan silindirik eklemlerin bağlantı noktalarını ifade etmektedir. Ayrıca, D_1, D_2, D_3 noktaları sabit platformda bulunan pasif silindirik eklemlerin; C_1, C_2, C_3 noktaları ise hareketli platformda bulunan pasif silindirik eklemlerin konumlarını göstermektedir. $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ prizmatik eklem üzerinde bulunan aktif açısal eklemlerin dönme açılarıdır. d_1, d_2, d_3 ise prizmatik eklemlerin bulunduğu bacak uzunluklarıdır.

Mekanizmaya iki adet koordinat sistemi yerleştirilmiştir. Bunlar ana koordinat sistemi olan $O(x, y, z)$ ve hareketli platform üzerinde olan ve uç işlevci üzerinde konumlandırılan $P(u, v, w)$ 'dir.

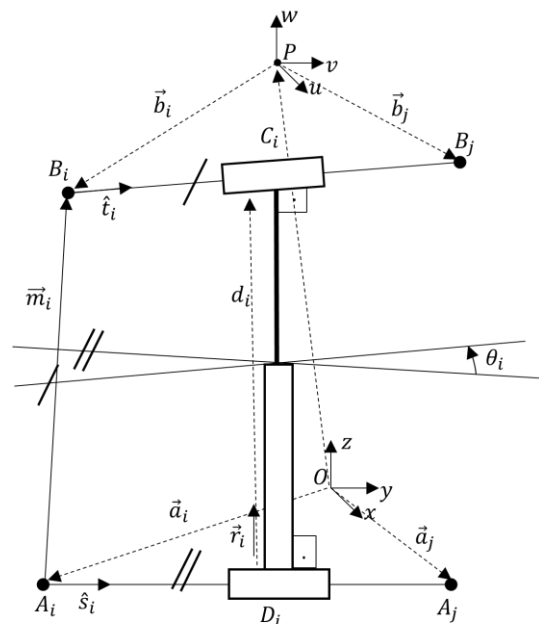
Uç işlevci koordinat sisteminin temel çerçeve koordinat sistemine göre yönelimi Roll-Pitch-Yaw açı seti kullanılarak tanımlanmıştır. λ açısı x eksenine, β açısı y eksenine, α açısı z eksenine etrafındaki dönme açıları ifade etmektedir [21].

$$R_{XYZ} = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\lambda) \quad (1)$$

$$R_{XYZ} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \lambda - \sin \alpha \cos \lambda & \cos \alpha \sin \beta \cos \lambda + \sin \alpha \sin \lambda \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \lambda + \cos \alpha \cos \lambda & \sin \alpha \sin \beta \cos \lambda - \cos \alpha \sin \lambda \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \lambda & \cos \beta \cos \lambda \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.1.1. Mekanizmanın ters kinematik analizi (Inverse kinematic analysis of mechanism)

Mekanizmanın ters kinematik denklemlerini hesaplamak için Şekil 2'de gösterilen D_4 ve A_1 bacak yapılarında bulunan aktif eklem değişkenlerinin değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Buradaki aktif eklem değişkenleri d_i ve θ_i 'dir



Şekil 2. CCC bacak yapısı vektörel gösterimi (CCC leg structure vector representation)

Sabit platforma konumlandırılan $O(x, y, z)$ koordinat sisteminin orijin noktasından A_1 ve A_{1j} noktalarına çizilen vektörler sırasıyla \vec{a}_i ve \vec{a}_j olarak gösterilmiştir. Hareketli platform üzerinde konumlandırılan $P(u, v, w)$ koordinat sisteminin orijin noktasından B_1 ve B_{1j} noktalarına çizilen vektörler sırasıyla \vec{b}_i ve \vec{b}_j olarak gösterilmiştir.

İlk olarak robot bacağıının sol tarafı için aşağıdaki çevrim denklemi yazılır [21].

$$\vec{a}_i + \vec{m}_i = \vec{P} + R\vec{b}_i \quad (3)$$

A_i ve B_i noktaları arasında bulunan \vec{m}_i vektörünü bulabilmek için aşağıdaki eşitlik kullanılır [21].

$$\vec{m}_i = \vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \quad (4)$$

\hat{s}_i , $B_i B_j$ boyunca uzanan birim vektör ve \hat{t}_i , $A_i A_j$ boyunca uzanan birim vektördür. Aşağıdaki eşitlikler yazılarak \hat{s}_i ve \hat{t}_i vektörleri bulunabilir.

$$\hat{s}_i = \frac{\vec{a}_j - \vec{a}_i}{|\vec{a}_j - \vec{a}_i|} \quad (5)$$

$$\hat{t}_i = \frac{\vec{b}_j - \vec{b}_i}{|\vec{b}_j - \vec{b}_i|} \quad (6)$$

\vec{a}_i ile aynı doğrultuda bir \vec{r}_i vektörü aşağıdaki vektör çarpımı eşitliğiyle ifade edilebilir [21].

$$\vec{r}_i = \hat{s}_i \times R\hat{t}_i \quad (7)$$

$\vec{B}_i \vec{B}_j$ ile $\vec{A}_i \vec{A}_j$ doğru parçaları arasındaki \vec{d}_i vektörü, iki doğruya devamlı olarak diktir ve bundan dolayı \vec{m}_i ve \vec{d}_i vektörlerinin \vec{r}_i vektörü üzerindeki izdüşümleri daima birbirine eşittir. Bu eşitlik aşağıdaki gibi nokta çarpımla ifade edilerek iki tarafın karesi alınır; [21]

$$(\vec{d}_i \cdot \vec{r}_i)^2 = (\vec{m}_i \cdot \vec{r}_i)^2 \quad (8)$$

Denklem (7) ve (4), Denklem (8)'de yerlerine konularak $i = 1, 2, 3$ olmak üzere mekanizmanın bacak uzunluğu kısıtı için ters kinematik denklemi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$|\vec{d}_i| = \sqrt{\frac{((\vec{P} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i) \cdot (\hat{s}_i \times R\hat{t}_i))^2}{|\vec{r}_i|^2}} \quad (9)$$

A_1 tipi bacak yapısında aktif eklem, $\vec{B}_i \vec{B}_j$ ile $\vec{A}_i \vec{A}_j$ doğru parçaları arasındaki açıyı belirleyen açısal eklemdir. θ_i açısını bulabilmek için \hat{t}_i ve \hat{s}_i birim vektörlerinin nokta çarpımları kullanılabilir [21].

$$R\hat{t}_i \cdot \hat{s}_i = |R\hat{t}_i| |\hat{s}_i| \cos \theta_i \quad (10)$$

$|R\hat{t}_i| = 1$ ve $|\hat{s}_i| = 1$ 'dir. $i = 1, 2, 3$ olmak üzere mekanizmanın açı kısıtı için ters kinematik denklemi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [21].

$$\theta_i = \cos^{-1}(R\hat{t}_i \cdot \hat{s}_i) \quad (11)$$

2.1.2. C ve D noktalarının bulunması (Finding C and D points)

Ters kinematik analiz yapılırken verilen uç işlemci konumu kullanılarak aktif eklemlerin değişkenleri hesaplanır. CCC bacak yapısında bir önceki bölümde aktif değişkenler olan \vec{d}_i ve θ_i hesaplanmıştır. Fakat \vec{d}_i ve θ_i değişkenlerinin hesaplanabilir olması CCC için istenen P uç noktasına ulaşılabilir anlamını taşıyabilir. Bunun için C ve D noktalarının bulunarak $\vec{B}_i \vec{B}_j$ ve $\vec{A}_i \vec{A}_j$ doğru parçaları üzerinde bulunup bulunmadıkları kontrol edilmelidir.

$\vec{B}_i \vec{B}_j$ ve $\vec{A}_i \vec{A}_j$ vektörleri ile bunları dik kesen bir $\vec{D}_i \vec{C}_i$ vektörünün kesişimleri D_i ve C_i noktalarıdır. $\vec{B}_i \vec{B}_j = \vec{Q}_B$, $\vec{A}_i \vec{A}_j = \vec{Q}_A$, $\vec{D}_i \vec{C}_i = \vec{T}_i$ olacak şekilde tanımlamalar yapılmış ve aşağıdaki eşitlikler yazılmıştır.

$$\vec{Q}_B = (B_{jx} - B_{ix}, B_{jy} - B_{iy}, B_{jz} - B_{iz}) \quad (12)$$

$$\vec{Q}_A = (A_{jx} - A_{ix}, A_{jy} - A_{iy}, A_{jz} - A_{iz}) \quad (13)$$

$$\vec{T}_i = \vec{C}_i - \vec{D}_i \quad (14)$$

\vec{Q}_A ve \vec{Q}_B vektörlerinin doğrultman denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir. Gerekli işlemler yapılarak k ve v katsayıları bulunabilir.

$$\vec{C}_i - \vec{B}_i = k\vec{Q}_B \quad (15)$$

$$\vec{D}_i - \vec{A}_i = v\vec{Q}_A \quad (16)$$

$$\frac{C_{ix} - B_{ix}}{Q_{Bx}} = \frac{C_{iy} - B_{iy}}{Q_{By}} = \frac{C_{iz} - B_{iz}}{Q_{Bz}} = k \quad (17)$$

$$\frac{D_{ix} - A_{ix}}{Q_{Ax}} = \frac{D_{iy} - A_{iy}}{Q_{Ay}} = \frac{D_{iz} - A_{iz}}{Q_{Az}} = v \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \vec{C}_i &= (C_{ix}, C_{iy}, C_{iz}) \\ &= (kQ_{Bx} + B_{ix}, kQ_{By} + B_{iy}, kQ_{Bz} + B_{iz}) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \vec{D}_i &= (D_{ix}, D_{iy}, D_{iz}) \\ &= (vQ_{Ax} + A_{ix}, vQ_{Ay} + A_{iy}, vQ_{Az} + A_{iz}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \vec{T}_i &= (kQ_{Bx}B_{ix} + B_{ix} - vQ_{Ax} \\ &\quad - A_{ix}, kQ_{By} + B_{iy} \\ &\quad - vQ_{Ay} - A_{iy}, kQ_{Bz} \\ &\quad + B_{iz} - vQ_{Az} - A_{iz}) \end{aligned} \quad (21)$$

\vec{Q}_A ve \vec{T}_i vektörleri birbirlerine dik oldukları için nokta çarpımları 0'dır. Aynı şekilde \vec{Q}_B ve \vec{T}_i vektörleri de birbirlerine diktir noktasal çarpımları 0'dır.

$$\vec{Q}_B \cdot \vec{T}_i = 0 \quad (22)$$

$$\vec{Q}_A \cdot \vec{T}_i = 0 \quad (23)$$

Denklem (12) ve (13)'deki \vec{Q}_B ve \vec{Q}_A vektörlerinin bileşenleri ve Denklem (21), (22) ve (23)'de yerlerine konularak işlemler yapılırsa;

$$\begin{aligned} Q_B \cdot T_i &= Q_{Bx}(kQ_{Bx} + B_{ix} - vQ_{Ax} \\ &\quad - A_{ix}) \\ &\quad + Q_{By}(kQ_{By} + B_{iy} \\ &\quad - vQ_{Ay} - A_{iy}) \\ &\quad + Q_{Bz}(kQ_{Bz} + B_{iz} \\ &\quad - vQ_{Az} - A_{iz}) = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} Q_A \cdot T_i &= Q_{Ax}(kQ_{Bx} + B_{ix} - vQ_{Ax} \\ &\quad - A_{ix}) \\ &\quad + Q_{Ay}(kQ_{By} + B_{iy} \\ &\quad - vQ_{Ay} - A_{iy}) \\ &\quad + Q_{Az}(kQ_{Bz} + B_{iz} \\ &\quad - vQ_{Az} - A_{iz}) = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} Q_B \cdot T_i &= k(Q_{Bx}^2 + Q_{By}^2 + Q_{Bz}^2) \\ &\quad + v(-Q_{Ax}Q_{Bx} \\ &\quad - Q_{Ay}Q_{By} \\ &\quad - Q_{Az}Q_{Bz}) \\ &\quad + Q_{Bx}(B_{ix} - A_{ix}) \\ &\quad + Q_{By}(B_{iy} - A_{iy}) \\ &\quad + Q_{Bz}(B_{iz} - A_{iz}) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} Q_A \cdot T_i &= k(Q_{Ax}Q_{Bx} + Q_{Ay}Q_{By} \\ &\quad + Q_{Az}Q_{Bz}) \\ &\quad + v(-Q_{Ax}^2 - Q_{Ay}^2 \\ &\quad - Q_{Az}^2) \\ &\quad + Q_{Ax}(B_{ix} - A_{ix}) \\ &\quad + Q_{Ay}(B_{iy} - A_{iy}) \\ &\quad + Q_{Az}(B_{iz} - A_{iz}) \end{aligned} \quad (27)$$

Elde edilen eşitliklerde kolaylık olması açısından değerleri bilinen değişkenler aşağıdaki gibi gruplandırılarak işlemler yapılmıştır.

$$O_1 = Q_{Bx}^2 + Q_{By}^2 + Q_{Bz}^2 \quad (28)$$

$$O_2 = -Q_{Ax}Q_{Bx} - Q_{Ay}Q_{By} - Q_{Az}Q_{Bz} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} O_3 &= Q_{Bx}(B_{ix} - A_{ix}) \\ &\quad + Q_{By}(B_{iy} - A_{iy}) \\ &\quad + Q_{Bz}(B_{iz} - A_{iz}) \end{aligned} \quad (30)$$

$$R_1 = Q_{Ax}Q_{Bx} + Q_{Ay}Q_{By} + Q_{Az}Q_{Bz} \quad (31)$$

$$R_2 = -Q_{Ax}^2 - Q_{Ay}^2 - Q_{Az}^2 \quad (32)$$

$$\begin{aligned} R_3 &= Q_{Ax}(B_{ix} - A_{ix}) \\ &\quad + Q_{Ay}(B_{iy} - A_{iy}) \\ &\quad + Q_{Az}(B_{iz} - A_{iz}) \end{aligned} \quad (33)$$

$$v = \frac{O_1 R_3 - O_3 R_1}{O_2 R_1 - O_1 R_2} \quad (34)$$

$$k = \frac{O_2 R_3 - O_3 R_2}{O_1 R_2 - O_2 R_1} \quad (35)$$

k ve v katsayılarının bulunması ile D_i ve C_i noktalarının konumları kolaylıkla bulunabilir. Fakat bacak yapısının uygulanabilir olabilmesi için bu noktaların $\overline{B_i B_j}$ ile $\overline{A_i A_j}$ doğru parçaları üzerinde bulunmaları gerekmektedir. Bunun için k ve v katsayılarının aşağıdaki şartı sağlamaları gerekmektedir. Şartın sağlanamaması durumunda uygulanabilir bir bacak yapısı oluşmamış ve istenen uç nokta konumuna ulaşamaz anlamı çıkmaktadır.

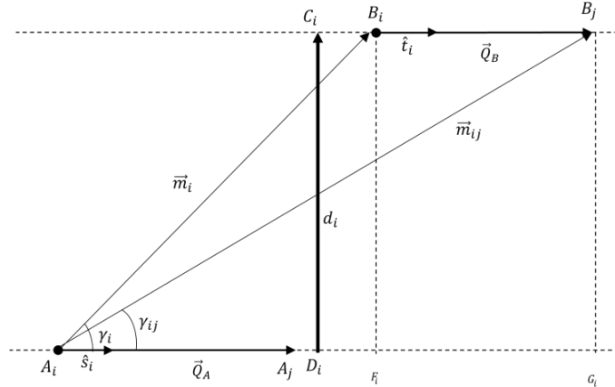
$$0 < k < 1 \quad (36)$$

$$0 < v < 1 \quad (37)$$

2.1.3. Silindirik eklemlerin paralellik durumu (Parallelism state of cylindrical joints)

$\overline{B_i B_j}$ ile $\overline{A_i A_j}$ doğru parçalarının paralel olması durumunda k ve v katsayıları 0 olacaktır. Bundan dolayı D_i ve C_i noktalarının konumları belirlenememektedir. Bacak yapısının uygulanabilir olabilmesi $\overline{B_i B_j}$ ile $\overline{A_i A_j}$ doğru parçalarını dik kesen bir $\overline{D_i C_i}$ doğru parçasının varlığı kontrol edilmelidir.

Bununla birlikte paralellik durumunda $\hat{t}_i = \hat{s}_i$ olacağından dolayı Denklem (7)'ye göre $\vec{r}_i = 0$ sonucu elde edilecek ve Denklem (9)'a göre $|\vec{d}_i|$ uzunluğu da bulunamayacaktır.



Şekil 3. \vec{Q}_A ve \vec{Q}_B vektörlerinin paralellik durumu (Parallel state of vectors \vec{Q}_A and \vec{Q}_B)

Şekil 3'deki gibi bir paralellik durumunda $|\vec{d}_i|$ uzunluğu aşağıdaki eşitliklerle bulunabilir.

$$\vec{m}_i \cdot \vec{Q}_A = |\vec{m}_i| |\vec{Q}_A| \cos \gamma_i \quad (38)$$

$$\gamma_i = \cos^{-1} \frac{\vec{m}_i \cdot \vec{Q}_A}{|\vec{m}_i| |\vec{Q}_A|} \quad (39)$$

$$|\vec{d}_i| = |\vec{m}_i| \sin \gamma_i \quad (40)$$

$\overline{B_i B_j}$ ile $\overline{A_i A_j}$ doğru parçalarının paralel olması bu doğrular üzerindeki her nokta için $\overline{D_i C_i}$ doğru parçasıyla diklik şartının sağlanabildiği anlamına gelir. $\overline{D_i C_i}$ doğru parçasının diğer doğrularla kesişim noktalarının olabilmesi için $\overline{B_i B_j}$ doğru parçasının $\overline{A_i A_j}$ doğru parçası üzerindeki izdüşümüne bakılır. Şekil 3'de izdüşümün uç noktaları F_i ve G_i ile gösterilmiştir.

F_i noktasının konumunun bulunabilmesi için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\vec{m}_i \cdot \vec{Q}_A = |\vec{m}_i| |\vec{Q}_A| \cos \gamma_i \quad (41)$$

$$|A_i F_i| = |\vec{m}_i| \cos \gamma_i \quad (42)$$

Denklem (42), Denklem (41)'de yerine konursa $|A_i F_i|$ uzunluğunun elde edilebileceği eşitlik elde edilmiş olur.

$$|A_i F_i| = \frac{\vec{m}_i \cdot \vec{Q}_A}{|\vec{Q}_A|} \quad (43)$$

Bulunan $|A_i F_i|$ değeri \vec{A}_i vektörü ile toplanırsa F_i noktası elde edilir.

$$F_i = \vec{A}_i + |A_i F_i| \hat{s}_i \quad (44)$$

G_i noktasının konumunun bulunabilmesi için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\vec{m}_{ij} \cdot \vec{Q}_A = |\vec{m}_{ij}| |\vec{Q}_A| \cos \gamma_{ij} \quad (45)$$

$$|A_i G_i| = |\vec{m}_{ij}| \cos \gamma_{ij} \quad (46)$$

Denklem (46), Denklem (45)'de yerine konursa $|A_i G_i|$ uzunluğunun elde edilebileceği eşitlik elde edilmiş olur.

$$|A_i G_i| = \frac{\vec{m}_{ij} \cdot \vec{Q}_A}{|\vec{Q}_A|} \quad (47)$$

$|A_i G_i|$ değeri \vec{A}_i vektörü ile toplanırsa G_i noktası elde edilir.

$$G_i = A_i + |A_i G_i| \hat{s}_i \quad (48)$$

$\overline{B_i B_j}$ doğru parçasının $\overline{A_i A_j}$ doğru parçasındaki izdüşümleri bulduktan sonra $\overline{F_i G_i}$ doğru parçasının $\overline{A_i A_j}$ doğru parçası ile herhangi bir kesişiminin olup olmadığını aşağıdaki şartların yerine gelmesine bağlıdır. Şartların sağlanması uygulanabilir bir bacak yapısının olabileceğini göstermektedir.

$$|F_i| \leq |A_i| \quad \&\& \quad |G_i| \leq |A_i| \quad (49)$$

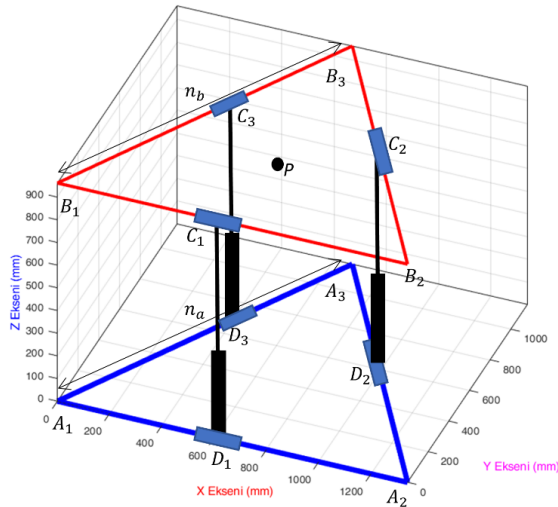
$$|F_i| \leq |A_j| \quad \&\& \quad |G_i| \leq |A_j| \quad (50)$$

3. BULGULAR (FINDINGS)

Bu bölümde, önerilen iki tasarım ile çalışma uzayı analizleri sunulmuştur.

3.1. Önerilen Birinci Tasarım ve Çalışma Uzayı Analizi (Recommended First Design and Work Space Analysis)

Bu bölümde seçilen mekanizma için iki farklı tasarım önerilmiş ve bu tasarımların çalışma uzayları hesaplanmıştır. İlk tasarım ve bu tasarıma ait ölçüler sırasıyla Şekil 4 ve Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 4. Önerilen ilk $D_4^3A_1^3$ tipi mekanizmanın vektörel gösterimi (Vectorial representation of the first proposed $D_4^3A_1^3$ type mechanism)

Bu tasarımda Toz ve Küçük'ün XY, XZ ve YZ yüzeylerine yerleştirmiş oldukları sabit platformdaki silindir eklemleri, XY yüzeyine eşkenar üçgen olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sabit platformdaki silindir eklemlerin uzunlukları referans çalışmadaki eklemlerin uzunlukları ile aynı seçilmiştir. Toz ve Küçük'ün birbirine dik olarak kullandıkları hareketli platformdaki silindir eklemler, bu tasarımda eklemlerin uzunlukları referans çalışmadaki hareketli platformda bulunan

silindir eklemlerin uzunlukları ile aynı olmak üzere eşkenar üçgen olacak şekilde belirlenmiştir. Platformlar, birbirine paralel olan eklemler üzerinden 3 adet CCC bacak tipiyle bağlanmıştır. Kullanılan CCC bacakların en uzun ve en kısa değerleri de referans çalışmadaki değerlerle aynı seçilmiştir. Bütün uzunluk değerlerinin aynı seçilmesinin amacı mevcut uzuvların farklı bir şekilde kullanılmasıyla tasarlanan mekanizma ile sabit platformdaki eklemlerin konum eniyilemesine ihtiyaç kalmadan daha geniş bir çalışma uzayı elde etmektir.

Çizelge 1. Kullanılan uzunluk değerleri[18] (Used length values)

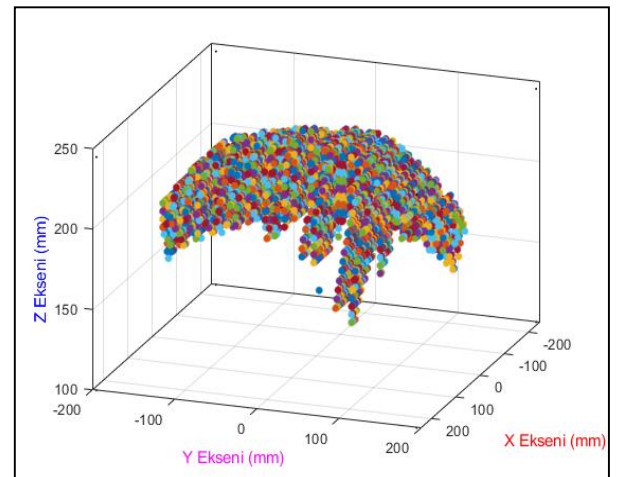
$d_{i(min)}$	$d_{i(max)}$	n_a	n_b
188	243	333	250

Tasarımda Çizelge 1'de gösterilen Toz ve Küçük'ün [18] geometrik eniyileme sonucu buldukları uzuv uzunlukları değerleri yuvarlanarak kullanılmıştır. Mekanizmada uç işlevci noktasal değil platform şeklinde olduğundan dolayı uç işlevci platformun orta noktasında P noktası olarak belirlenmiştir.

Çalışma uzayı hesabında uç işlevcinin konumu 5mm aralıklarla değiştirilmiştir. Hareketli platform önce sabit (0°), sonra X, Y ve Z eksenleri etrafında $-30^\circ +30^\circ$ dereceleri arasında 10° lik adımlarla döndürülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2, Çizelge 3 ve Şekil 5, Şekil 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2. Birinci tasarım için 0° dönme ile elde edilen çalışma uzayı hacmi (Working space volume obtained with 0° rotation for the first design)

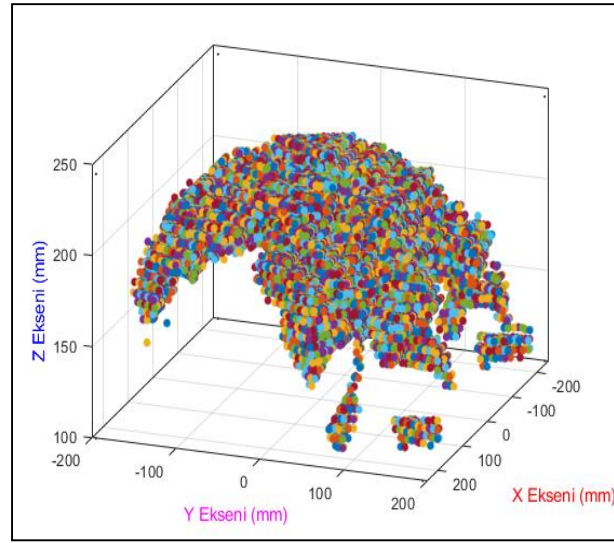
0° Dönme	Ulaşılan Nokta Sayısı	9.171
	Hacim (mm^3)	1.146.375



Şekil 5. Birinci tasarım için 0° dönme ile elde edilen çalışma uzayı (Working space obtained with 0° rotation for the first design)

Çizelge 3. Birinci tasarım için $-30^\circ + 30^\circ$ arası dönme ile elde edilen çalışma uzayı hacmi (The working space volume obtained with the rotation between $-30^\circ + 30^\circ$ for the first design.)

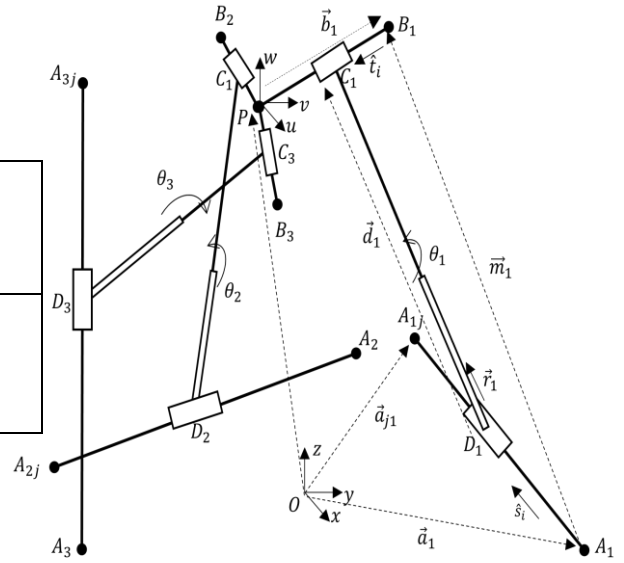
$-30^\circ + 30^\circ$ arası dönme (10° adımlarla)	Ulaşılan Nokta Sayısı	23.661
	Hacim (mm^3)	2.957.625



Şekil 6. Birinci tasarım için $-30^\circ + 30^\circ$ arası dönme ile elde edilen çalışma uzayı (The working space obtained with the rotation between $-30^\circ + 30^\circ$ for the first design)

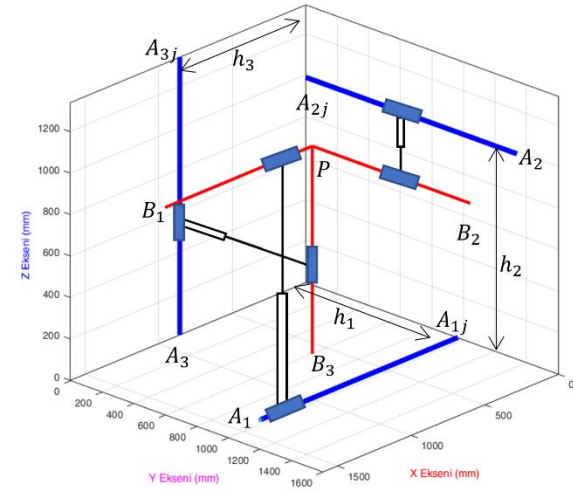
3.2. Önerilen İkinci Tasarım Ve Çalışma Uzayı Analizi (Recommended Second Design and Work Space Analysis)

İkinci önerilen tasarım Şekil 7'de vektörel olarak gösterilen mekanizmadır. Mekanizmanın ters kinematik denklemleri $B_j = P$ olmak üzere Denklem (9) ve (11) ile aynıdır.



Şekil 7. Önerilen ikinci 3-CCC tipi mekanizmanın vektörel gösterimi (Vectorial representation of the second proposed 3-CCC type mechanism)

Kullanılan mekanizma Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. İkinci önerilen mekanizma (Second proposed mechanism)

Tasarımda Toz ve Küçük'ün [18] eniyileme sonucu buldukları eklem, bacak uzunluğu ve konum değerleri yuvarlanmış ve Çizelge 4'de gösterilen haliyle kullanılmışlardır.

Çizelge 4. Toz ve Küçük'ün eniyileme değerleri [18] (Optimization values of Toz and Küçük)

$d_{i(\min)}$ (mm)	$d_{i(\max)}$ (mm)	$ A_i A_j $ (mm)	$ B_i B_j $ (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)
188	243	333	250	240	246	213

Mekanizmanın çalışma uzayı hesabında uç işlevinin konumu 5mm aralıklarla değiştirilmiştir. Hareketli platform önce sabit (0°) tutularak, sonra X, Y ve Z eksenleri etrafında -30° $+30^\circ$ dereceleri arasında 5° lik adımlarla döndürülmüştür.

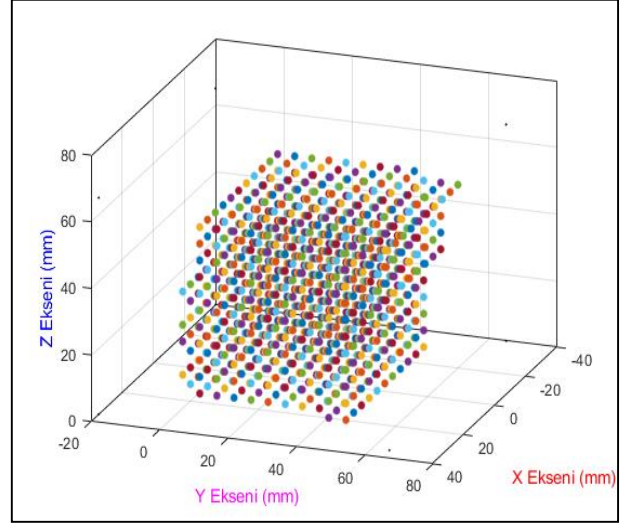
Bu tasarımın Toz ve Küçük'ün [18] çalışmalarında kullanmış oldukları tasarımdan farkı, hareketli platformdaki B_1, B_2, B_3 konumlarının değiştirilerek kullanılmasıdır. İki mekanizma arasındaki farklar şu şekilde sıralanabilir; Şekil 11'de gösterilen Toz ve Küçük'ün tasarımında XY düzleminde bulunan silindir eklem, hareketli platformun z eksenini boyunca uzanan silindir eklemi ile bağlanmışken önerilen tasarımda X eksenini boyunca uzanan silindir eklemi bağlanmıştır. YZ düzleminde bulunan silindir eklem, hareketli platformun X eksenini boyunca uzanan silindir eklemi ile bağlanmışken önerilen tasarımda Y eksenini boyunca uzanan silindir eklemi bağlanmıştır. XZ düzleminde bulunan silindir eklem, hareketli platformun Y eksenini boyunca uzanan silindir eklemi ile bağlanmışken önerilen tasarımda Z eksenini boyunca uzanan silindir eklemi bağlanmıştır. Çizelge 5'e bakıldığında iki tasarım arasındaki farklar daha net görülebilmektedir. Mekanizma üzerinde yapılan çalışma sonuçları Çizelge 6, Çizelge 7 ve Şekil 9, Şekil 10'da gösterilmiştir.

Çizelge 5. Toz Küçük tasarımı ile önerilen tasarım arasındaki bacak bağlantı farkları (Leg connection differences between Toz ve Küçük design and proposed design)

	XY	YZ	XY
Toz Küçük tasarımı	Z	X	Y
Önerilen tasarım	X	Y	Z

Çizelge 6. İkinci tasarım için 0° dönme ile elde edilen çalışma uzayı hacmi (Working space volume obtained with 0° rotation for the second design)

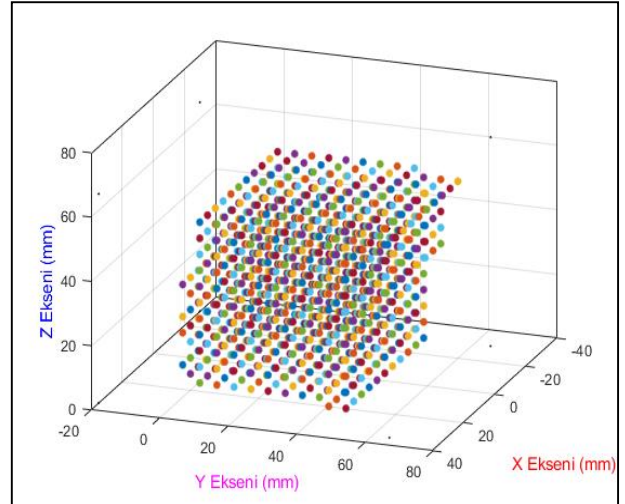
0° Dönme	Ulaşılan Nokta Sayısı	1.372
	Hacim (mm^3)	171.500



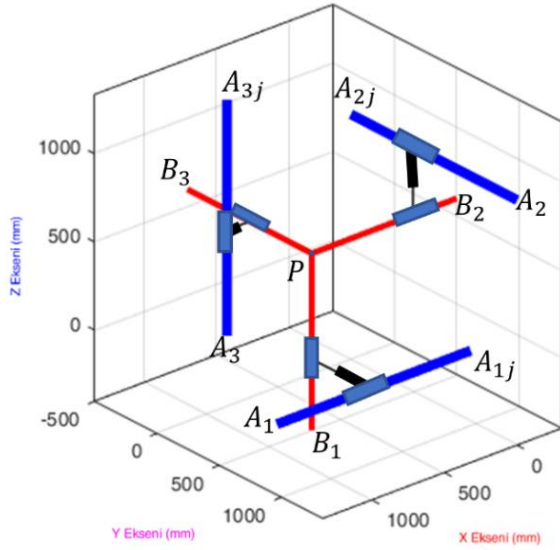
Şekil 9. İkinci tasarım için 0° dönme ile elde edilen çalışma uzayı (Working space obtained with 0° rotation for the second design)

Çizelge 7. İkinci tasarım için -30° $+30^\circ$ arası dönme ile elde edilen çalışma uzayı hacmi (Working space volume obtained with rotation between -30° $+30^\circ$ for the second design)

-30° $+30^\circ$ arası dönme (5° adımlarla)	Ulaşılan Nokta Sayısı	1.375
	Hacim (mm^3)	171.875



Şekil 10. İkinci tasarım için -30° $+30^\circ$ arası dönme ile elde edilen çalışma uzayı (For the second design, the working space obtained by rotating between -30° $+30^\circ$)

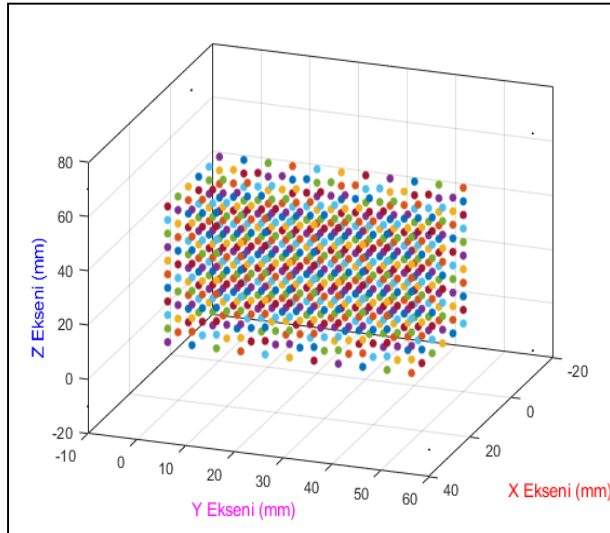


Şekil 11. Toz ve Küçük'ün kullandıkları tasarım (The design used by Toz and Küçük)

T_{oz} ve Küçük'ün [18] eniyileme değerleriyle yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 8, Çizelge 9 ve Şekil 12, Şekil 13'de gösterilmiştir.

Çizelge 8. T_{oz} ve Küçük'ün tasarımı için 0° dönme ile elde edilen çalışma uzayı hacmi (Working space volume obtained with 0° rotation for the design of T_{oz} and Küçük)

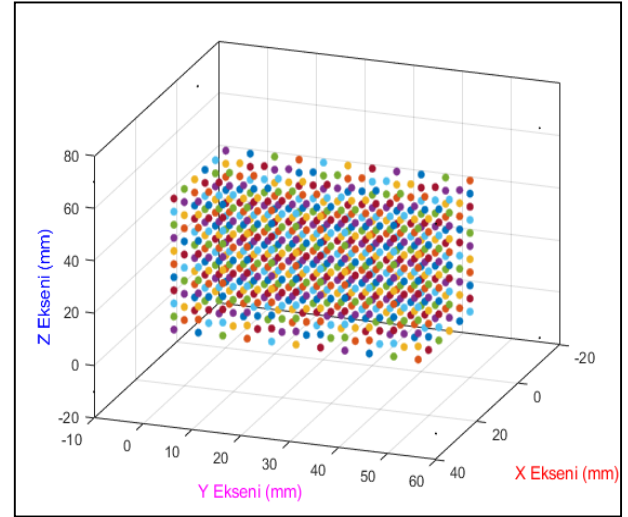
0° Dönme	Ulaşılan Nokta Sayısı	726
	Hacim (mm ³)	90.750



Şekil 12. T_{oz} ve Küçük'ün tasarımı için 0° dönme ile elde edilen çalışma uzayı (Working space obtained with 0° rotation for the design of T_{oz} and Küçük)

Çizelge 9. T_{oz} ve Küçük'ün tasarımı için $-30^\circ + 30^\circ$ arası dönme ile elde edilen çalışma uzayı hacmi (Working space volume obtained by rotating between $-30^\circ + 30^\circ$ for the design of T_{oz} and Küçük)

$-30^\circ + 30^\circ$ arası dönme (10° adımlarla)	Ulaşılan Nokta Sayısı	858
	Hacim (mm ³)	107.250



Şekil 13. T_{oz} ve Küçük'ün tasarımı için $-30^\circ + 30^\circ$ arası dönme ile elde edilen çalışma uzayı (For the design of T_{oz} and Küçük, the working space obtained by rotation between $-30^\circ + 30^\circ$)

Üç farklı mekanizma için elde edilen sonuçlar Çizelge 10'da karşılaştırılmıştır. Önerilen iki tasarımda da çalışma uzayı hacmi ilk mekanizmaya göre daha büyük değerlerdedir.

Çizelge 10. Sonuçların karşılaştırması (Comparison of results)

	Sabit Dönme (0°) (mm ³)	$-30^\circ + 30^\circ$ arası dönme (mm ³)	$-30^\circ + 30^\circ$ dönmede Toz ve Küçük'ün tasarıma göre fark (%)
Önerilen 1. tasarım	1.146.375	2.957.625	2657,69
Önerilen 2. tasarım	171.500	171.875	60,26
Toz ve Küçük tasarım	90.750	107.250	

Her iki tasarımında çalışma uzaylarına bakıldığında Toz ve Küçük'ün tasarımının çalışma uzayına göre daha geniş bir hacme sahip olduğu görülmüştür.

İkinci tasarım, Toz ve Küçük'ün tasarımının bacak bağlantı yerlerinin değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu tasarımda 0° döndürme ile -30° +30° dereceleri arasında döndürmede elde edilen çalışma uzayı hacimlerinde çok küçük bir fark bulunmasına karşın Toz ve Küçük'ün tasarımındaki fark daha yüksektir. Bu da gösteriyor ki hareketli platformun döndürülerek kullanılması açısından Toz ve Küçük'ün mekanizmasının daha uygun olduğunu fakat çalışma uzayı açısından düşünüldüğünde önerilen tasarımın daha uygun olduğu görülmüştür.

Ayrıca eşkenar üçgen şeklinde tasarlanan mekanizmanın diğer mekanizmaların çalışma uzayı hacimlerine göre çok belirgin bir fark oluşturduğu görülmüştür. Konum ve açı değişimleri çözünürlüğü daha yüksek tutularak bir tarama yaptırılırsa daha geniş bir çalışma uzayı elde edilecektir.

Birinci önerilen tasarım için farklı uzuv uzunlukları için bir eniyeme yapılarak daha büyük çalışma uzaylarına ulaşılabilir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada 6 serbestlik derecesine sahip 3D3A sınıfı paralel robot yapılarından $D_4^3A_1^3$ tipi asimetrik paralel mekanizma için iki farklı tasarım önerisinde bulunulmuş ve bunların ters kinematik analizleri ve çalışma uzayları sunulmuştur. Mekanizmada D_4 ve A_1 kısıtlarına sahip olan CCC bacak yapısı kullanılmıştır. D_4 kısıtı CPAC bacak yapısına, A_1 kısıtı CPAC yapısına sahiptir. İlk tasarım önerisinde kenarları silindirik eklem olan sabit ve hareketli platformlar eşkenar üçgenler olarak belirlenerek 3 adet CCC bacak tipiyle bağlanmıştır. Uç işlevci olarak hareketli platformun orta noktası belirlenmiştir. İkinci tasarım önerisinde sabit silindirik eklemler XY, XZ ve YZ düzlemlerine yerleştirilmiştir. Diğer mekanizmanın aksine noktasal bir uç işlevciye sahip olan hareketli platform, birbirine dik 3 adet silindirik eklemden oluşmaktadır. Platformlar birbirlerine 3 adet CCC bacak tipiyle bağlanmıştır.

Her iki tasarımda da sabit ve hareketli platformda kullanılan silindirik eklem uzunlukları Toz ve Küçük'ün [18] değerleri ile aynı seçilmiştir. Bu şekilde doğru bir karşılaştırma yapılabilmesi sağlanmıştır. Çalışma uzayları hesabı için uç işlevci 5 mm aralıklarla yer değiştirilerek tarama yapılmış ve ulaşılabilirliği kontrol edilmiştir. Hareketli platform önce sabit (0°) sonra -30° +30° açıları arasında döndürülmüştür. Elde edilen sonuçlara bakıldığında önerilen tasarımlardan elde edilen çalışma uzaylarının Toz ve Küçük'ün [18] tasarımından daha geniş bir hacme sahip olduğu görülmüştür.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal/özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Savaş YILMAZ: Makalenin tüm aşamalarının oluşturulması, çalışma ile ilgili literatür taraması, kinematik hesaplar ile çalışma uzayı analizlerinin yapılması işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Serdar KÜÇÜK: Makale konusu ve yapısı hakkında danışmanlık sağlamıştır.

Metin TOZ: Makale yazımında yönlendirici destekle birlikte teknik ve yazım düzeltmelerinde danışmanlık sağlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Tsai L.-W., "Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators", *A Wiley-Interscience*, Canada, (1999).
- [2] Merlet J.-P.; Gosselin C.; and Huang T., "Robotics and the handbook", *Springer*, Würzburg, (2016).
- [3] Stewart D. , "A Platform with Six Degrees of Freedom", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 180: 371–386, (1965).
- [4] El-Badawy, A. and Youssef, K. *In On modeling and simulation of 6 degrees of freedom Stewart platform mechanism using multibody dynamics approach*", *ECCOMAS Multibody Dynamics 2013*, Zagreb, 751-760, (2013).
- [5] Kim J. , Cho Y. M. , Park F. C. , and Lee J. M. , "Design of a parallel mechanism platform for simulating six degrees-of-freedom general motion including continuous 360-degree spin", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52: 347–350, (2003).
- [6] Qiang H. , Wang L. , Ding J. , and Zhang L. , "Multiobjective Optimization of 6-DOF Parallel Manipulator for Desired Total Orientation Workspace", (2019).
- [7] Inner B. and Kucuk S. , "A novel kinematic design, analysis and simulation tool for general Stewart platforms", *Simulation*, 89: 876–897, (2013).
- [8] Dafaoui E. , Amirat Y. , Pontnau J. , and Fran C. , "Analysis and Design of a Six-DOF Parallel Manipulator, Modeling, Singular Configurations, and Workspace", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14: 78–92, (1998).
- [9] Toz M. and Kucuk S. , "Development of derivation of inverse Jacobian matrices for 195 6-DOF GSP", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24: 4142–4153, (2016).
- [10] Toz M. and Kucuk S. , "Parallel manipulator software tool for design, analysis, and simulation of 195 GSP mechanisms", *Computer Applications in Engineering Education*, 23: 931–946, (2015).

- [11] Nguyen C. C. , Antrazi S. C. , Zhou Z. L. , and Campbell C. E. , "Analysis and implementation of a 6 DOF Stewart Platform-based robotic wrist", *Computers and Electrical Engineering*, 17: 191–203, (1991).
- [12] Yang C. and Han J. , "Dynamic coupling analysis of a spatial 6-DOF electro-hydraulic parallel manipulator using a modal decoupling method", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10: (2013).
- [13] Wei W. , Xin Z. , Li-li H. , Min W. , and You-bo Z. , "Inverse kinematics analysis of 6-DOF Stewart platform based on homogeneous coordinate transformation", *Ferroelectrics*, 522: 108–121, (2018).
- [14] Toz M. and Kucuk S. , "Dexterous workspace optimization of an asymmetric six-degree of freedom Stewart – Gough platform type manipulator", *Robotics and Autonomous Systems*, 61: 1516–1528, (2013).
- [15] Gao X. , Lei D. , Liao Q. , and Zhang G. , "Generalized Stewart – Gough Platforms", *IEEE Transactions on Robotics*, 21: 141–151, (2005).
- [16] Gan D. , Liao Q. , and Wei S. , "Forward Kinematics Analysis of the New 3-CCC Parallel Mechanism", (2015).
- [17] Gan D. , Liao Q. , Dai J. S. , and Wei S. , "Design and kinematics analysis of a new 3CCC parallel mechanism", *Robotica*, 28: 1065–1072, (2010).
- [18] Toz M. and Kucuk S. , "Dimensional optimization of 6-DOF 3-CCC type asymmetric parallel manipulator", *Advanced Robotics*, 1–13, (2014).
- [19] Li W. and Angeles J. , "Full-mobility three-CCC parallel-kinematics machines: Kinematics and isotropic design", *Journal of Mechanisms and Robotics*, 10: (2018).
- [20] Li W. and Angeles J. , "Full-mobility 3-CCC parallel-kinematics machines: Forward kinematics, singularity, workspace and dexterity analyses", *Mechanism and Machine Theory*, 126: 312–328, (2018).
- [21] Toz M., "6 Serbestlik Dereceli Asimetrik Paralel Robotların Çalışma Uzayı Eniyilemesi Ve Benzetim Yazılımının Gerçekleştirilmesi", *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, (2013)