

PAPER DETAILS

TITLE: Stewart Platformu Esasli Bir Takim Tezgahi İçin Alternatif Mafsal Tasarimi Ve Kinematik Analizi

AUTHORS: Ömer ERKAN

PAGES: 1100-1109

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/816205>



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Stewart Platformu Esaslı Bir Takım Tezgahı İçin Alternatif Mafsal Tasarımı Ve Kinematik Analizi

 Ömer ERKAN

Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

**Sorumlu yazar e-mail: omererkan@duzce.edu.tr*

DOI : 10.29130/dubited.494909

ÖZET

Stewart platformları endüstride bir çok alanda kullanılmaktadır. Takım tezgahı olarak kullanılmaları ise son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Birçok tezgah üreticisi daha hassas ve işlevsel olan bu yapıdaki takım tezgahların araştırma ve geliştirme faaliyetlerini sürdürmektedir. Yapılan çalışmada 6x6 Stewart esaslı takım tezgahı tasarımının 3B modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde alternatif bir mafsal tasarımı gerçekleştirilmiştir. Alternatif mafsalın mevcut durumda kullanılan ve maliyeti yüksek olan küresel mafsallara göre düşük olan maliyetiyle ön plana çıktığı ve kolayca uygulanabildiği ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra Stewart esaslı takım tezgahının istenen sabit ve hareketli platform çaplarıyla beraber istenen koordinat bilgilerine göre ters kinematik yöntem kullanarak uzuv boylarını hesaplayabilen bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılımda çeşitli koordinat verileri için uzuv boyları hesaplanmıştır. Alternatif mafsal tasarımı 3B tezgah modeline başarıyla bütünleştirilirken, uzuv boyları da geliştirilen yazılımda başarıyla hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Stewart platformu, takım tezgahı, Mafsal, Kinematik analiz*

Alternative Joint Design And Kinematic Analysis For A Machine Tool Based On Stewart Platform

ABSTRACT

Stewart platforms are used in many areas in the industry. They are used as machine tools in recent years. Many machine manufacturers continue their research and development activities of machine tools in this structure which are more precise and functional. In this study, 3D model of 6x6 Stewart based machine tool design was generated. An alternative joint design has been realized in the model. It is stated that the alternative joint is prominently applied and can be easily applied at the cost which is low compared to the spherical joint used in the current situation. In addition to this, a software has been developed that can calculate leg lengths by using inverse kinematics method according to desired coordinate information with desired fixed and moving platform diameters of Stewart based machine tool. In the developed software, the length of the legs has calculated for various coordinate data. The alternative joint design has been successfully integrated into the 3D machine model, and the length of the legs have been successfully calculated in the developed software.

Keywords: *Stewart platform, Machine tool, Joint, Kinematic analysis*

I. GİRİŞ

Paralel kinematik takım tezgahları, paralel kinematik makinelerin bir çeşidi olarak araştıran ve geliştirenler tarafından sıklıkla çalışılmaktadır. Paralel kinematik mekanizmalar hali hazırdaki geleneksel tezgahlara göre yüksek rijitlik, hareket eden kütlenin hafifliği, yüksek hız, yüksek potansiyel hassasiyet, kolay montaj gereksinimi ve basit mekanik özellikleri ile üstünlük sağlamaktadırlar [1-5]. Bu özellikleri nedeniyle paralel kinematik mekanizmalar mevcut imalat paradigmasını değiştirme imkanı sunar. Aynı zamanda daha yüksek modülerlik, yeniden ayarlanabilirlik ve yüksek hassasiyetli tezgah olma potansiyeli vardır. Diğer potansiyel avantajları arasında yüksek maharet, basit ve az sayıda bağlantı elemanı gereksinimi, çok fonksiyonlu imalat kabiliyeti ve küçük ebatları bulunmaktadır [6].

Çeşitli enstitü ve şirketler bu tür takım tezgahlarını geliştirmek için çalışmalar yapmışlardır. Giddings ve Lewis, Ingersoll Freze tezgahları, Hexel ve Geodetic Uluslar arası Teknoloji Ltd. Giddings ve Lewis Variax modeli girişimi ile hegzapod tezgah yapımına ilk öncülük eden firmadır [7]. Bunun yanında endüstriyel ilgi gelişerek sürmektedir [8].

Ng vd. yapmış olduğu çalışmada mikro işlemede konumlama ve montaj işlemleri için kullanılacak 3 bacaklı bir mikro paralel kinematik manipülatör geliştirilmiştir. Paralel manipülatörlerin yapısal karakteristikleri ile ilgili olarak değerlendirmelerde de bulunmuşlardır. Ayrıca PKM (Parallel Kinematic Machine)'lerin dönme ve öteleme hareketleri de tanımlanmıştır. Bu sonuçlar esas alınarak bir hibrit 3-UPU paralel manipülatör tasarlanıp imal edilmiştir. Kinematik algoritma ve çalışma alanı görselleştirmesi bu manipülatör için belirtilmiştir. Mikro PKM nin modellenmesi ve işlemleri büyük ölçüde normal boyutlardaki Stewart platformuna benzerdir. Modüler bir tasarım yöntemi bu mikro PKM nin konstrüksiyonu için tanıtılmıştır. Ayrıca kalibrasyon sonuçları tartışılmıştır. PKM nin kalibrasyonu CMM (Coordinate Measuring Machine) kullanılarak yapılmıştır. Platformun hassasiyeti ve tekrar edilebilirliği 100 mikron olarak tanımlanmıştır [9].

Chang, TRR-XY hibrit yapıda bir takım tezgahını incelemiştir. TRR-XY paralel ve seri mekanizmalardan meydana gelip her ikisinin de avantajını barındırmıştır. Kesici takım hareketleri 3 serbestlik derecesine sahip bir mekanizma ile yapılırken, tabla hareketleri de hassas seri bir XY tablası ile yapılmıştır. Ters kinematik ve dinamik modellerinin teorisi belirlemiş, açısal çalışma uzayı ve tekillikleri analiz edilmiştir. Ayrıca tahrik edilen kuvvetlerin ters dinamik analizleri de ele alınmıştır. İki hata modeli geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi imalat hatası modeli ikincisi ise kontrol parametre hatası modelidir. Deneyleri gerçekleştirmek ve teoriyi doğrulamak için prototip bir takım tezgahı tasarlanmıştır. İşleme deneylerinde ilk olarak 240×220×60 mm boyutlarında serbest yüzeye sahip bir ayakkabı kalıbının her iki yarımı da işlenmiştir. Bu işlem için kaba işlemede 6 mm çapında parmak freze ve 1mm kesme derinliği seçilirken ince işlemede 3mm çapında bir parmak freze kullanılmıştır. Diğer işleme deneyinde ise 150×150×15 mm boyutlarında dairesel takım yolu içeren bir iş parçası kaba olarak 6 mm çapında parmak fereze ile ve ince işlemede 3 mm çapında bir parmak freze ile işlenmiştir. Dairesel takım yolu dıştan içe doğru oluşturulmuştur. Üç boyutlu ölçüm cihazından alınan verilere göre her iki iş parçası da -0,16 ve +0,06 mm aralığında bir boyutsal hassasiyete sahip olduğu belirlenmiştir [10].

Shen ve diğerleri, eğilme ve burulma açısı ile açıklanan 5 eksenli paralel kinematik tezgahın takım yolunun dönüşümünü yapmak için değiştirilmiş bir spline yöntemi tasarlanmıştır. Beşinci dereceden spline denklem, adı verilen bu yöntem düzgünlük gereksinimi için hem doğrusal hem de döner

yörüngelerde inşa edilmiştir ve dönüşümün kalitesi, bozulma önleyici stratejiyle ve spline parametrelerinin yeniden belirlenmesiyle koordine edilerek daha da güçlendirilmiştir. Gerçek takım yolu ve makine modeline dayanan simülasyon, önerilen algoritmanın tüm takım yolu bileşenlerinin rahat ve pürüzsüz bir hızlanma gerçekleştirdiğini, sistemdeki şoku azalttığını ve kesimden sonra yüzey hatalarını azalttığını kanıtlanmıştır. Sonuç olarak dönüşüm yönteminin, eğilme ve burulma açısına sahip Paralel kinematik takım tezgahları için yeni bir algoritma sağlayabildiğini ve endüstriyel imalat ve üretimdeki gelişimlerini destekleyebileceğini göstermişlerdir [13].

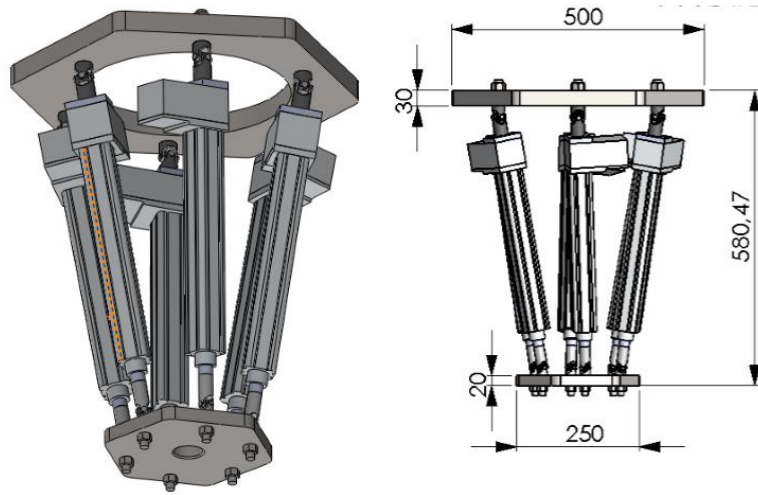
Sun ve Lian,, performans endeksleri, performans belirsizliğine dayalı kısıtlayıcı koşullar ve performanslar arasındaki ortak dengeyi kurarak Paralel kinematik takım tezgahının rijitlik ve kütle optimizasyonunu sunmaktadır. İlk olarak, anlık enerji bazlı rijitlik endeksleri ve hareket halindeki kütle hedefler olarak tanımlanmıştır. Sayısal olarak pahalı analiz yerine, optimizasyon verimliliğini artırmak için hedefler ve parametreler arasındaki analitik eşleme modelleri araştırılmıştır. Daha sonra, konstrüksiyon sırasındaki üretim hatalarından kaynaklanan parametre belirsizliğinin etkileri göz önüne alınmış ve kısıtlayıcı koşullar olasılık yöntemi ile formüle edilmiştir. Parçacık sürüşü optimizasyonuna (PSO) dayanarak çok amaçlı bir optimizasyon uygulanmıştır Son olarak, bu optimizasyon yaklaşımı, beş serbestlik dereceli paralel kinematik takım tezgahı ile örneklendirilmiş ve onaylanmıştır. Kütlesi% 17,17 oranında artmasına rağmen rijitlik optimizasyondan öncekinden yaklaşık 3 kat daha iyi olduğu tespit edilmiştir [14].

Fernandes ve Selvakumar, tıbbi uygulamalar için paralel bir manipülatör geliştirmişlerdir. Bu çalışma temel olarak protez operasyonları için gerekli olan kemik delme uygulaması için kinematik ve dinamik bir paralel manipülatör modeli tasarlamaya ve geliştirmeye odaklanmıştır. Uygulamanın ihtiyacına göre, yaklaşık X ve Y ekseninde dönen ve Z ekseninde boyunca çevrilen üç prizmatik-universal-universal (3PUU) paralel manipülatör tasarlanmıştır. Bununla birlikte kavramsal bir tasarım geliştirmeyi, hem ters hem de ileri kinematik türetmeyi, paralel manipülatörün çalışma alanını ve dinamiklerini değerlendirmişlerdir. Geometrik yaklaşımla ters kinematik elde edilirken, Langrangian yöntemi kullanılarak ters dinamikler elde edilmiştir. Ters kinematik kullanılarak çalışma alanı ve tahrik elemanı dinamikleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak tasarlanan manipülatörün ilerde daha da geliştirilmesiyle tıbbi bir yardımcı olabilmesinin yolu açılmıştır [15].

PKTT (Paralel Kinematik Takım Tezgahı)'lerin endüstride bir imalat ekipmanı olarak kabulü yavaş gerçekleşmektedir. Bu engelin en büyük teknik sebeplerinden biri öteleme veya dönme hareketlerinde hareketli platformun değişken yapısal rijitliğidir. Bu yüzden paralel kinematik takım tezgahlarının kullanımı geleneksel takım tezgahlarına göre basit değildir. Genel bir Stewart platformunun kinematik ve dinamik analizleri kapsamlı olarak çalışılırken takım tezgahı uygulaması olarak Stewart platformu çok az çalışmada karşımıza çıkmaktadır. Stewart platformu esaslı takım tezgahı geliştirebilmek için iyi bir tasarım ve matematiksel hesaplara ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda yapılan çalışmada tasarım alternatifleri değerlendirilmiş ve ters kinematik analiz yöntemi kullanılarak bacak boylarını hesaplayan bir yazılım geliştirilmiştir.

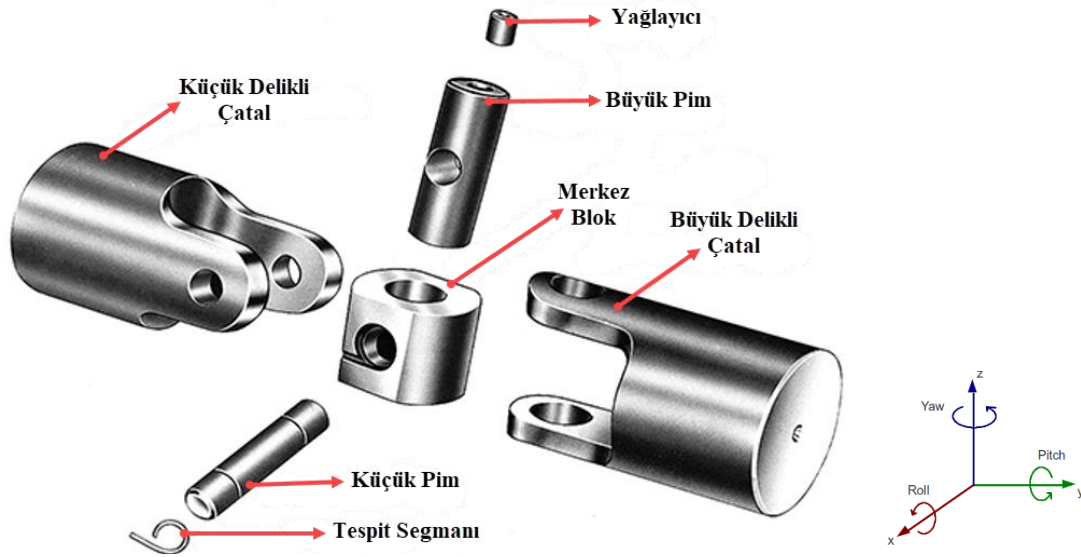
II. TASARIM

Stewart platformundan esinlenilmiş takım tezgahının 3B katı modeli Solidworks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan modelin genel görüntüsü ve temel ölçüleri Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tasarlanan katı model ve temel ölçüler.

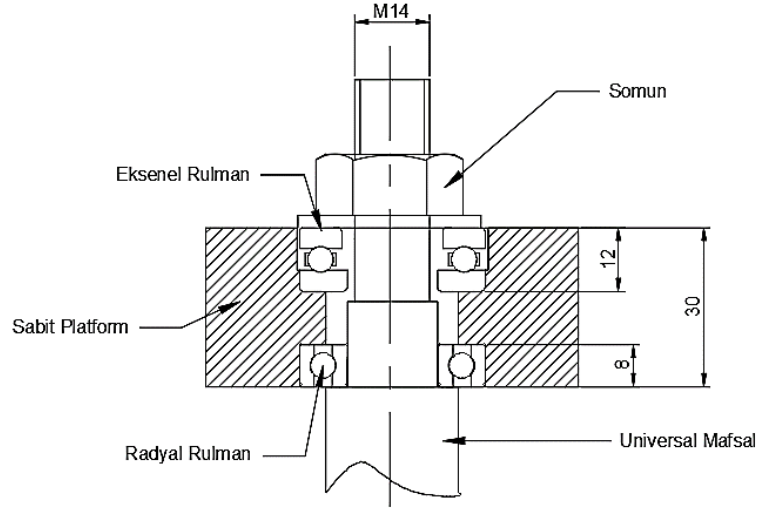
Şekil 1 incelendiğinde Stewart esaslı takım tezgahı modelinin altı adet tahrik elemanına sahip olduğu görülmektedir. Altı tahrik elemanı bağımsız bir şekilde hareketli platforma bağlandığından 6x6 olarak isimlendirilmektedir. Tahrik elemanlarının sabit ve hareketli platforma bağlanması için özel küresel mafsallar kullanılmaktadır. Bu mafsalların maliyetlerinin çok yüksek olması alternatif mafsal tasarımlarının yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda X,Y ve Z eksenlerinde dönme kabiliyetine sahip mafsal tasarımı yapılmıştır. Sektörde U, universal veya kardan mafsal olarak adlandırılan mafsalların standart hali Şekil 2’ de gösterilmektedir. Bu mafsalların maliyetleri düşük olup farklı çeşitlerde üretilebilmektedir. Hassasiyet konusunda küresel mafsallar kadar olmasa da küçük bir mekanik boşluğa ve rijitliğe sahiptirler.



Şekil 2. Universal mafsal ve bileşenleri [11].

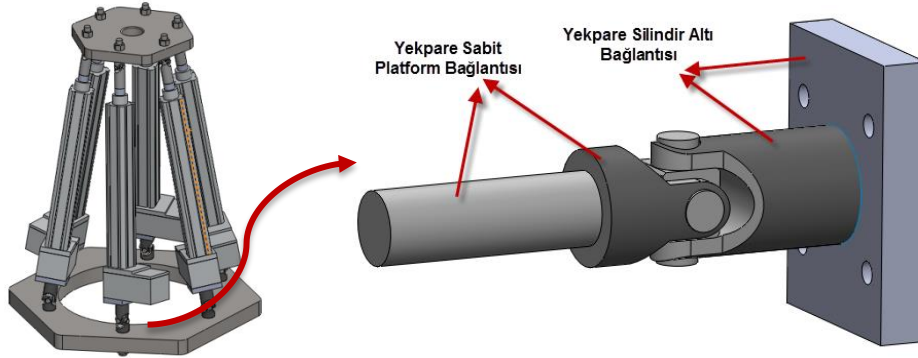
Universal mafsallar X ve Y (Roll ve Pitch) eksenlerinde dönme kabiliyetine sahipken Z (Yaw) ekseninde dönemezler. PKTT’nin 6 eksen hareket kabiliyetine sahip olması istendiğinden bu mafsalların Z ekseninde dönmesi gerekmektedir. Bu durumdan yola çıkılarak universal mafsallar bağlı bulundukları platformlarda (Sabit ve hareketli) radyal rulmanlar vasıtasıyla yataklanmıştır. Böylece Z ekseninde de dönme hareketi kazandırılmıştır. Eksenel rulmanlar ise mafsalların somun ile platformlara bağlantısında dönme hareketini kolaylaştıracak şekilde konumlandırılmıştır. Aynı

bağlantı şekli hareketli platformda da kullanılmış olup kullanılan rulman ölçüleri küçük ve bağlantı somunu M12 ölçüsündedir. Sabit platforma montajlanan universal mafsallın detayı Şekil 3’ te gösterilmektedir.



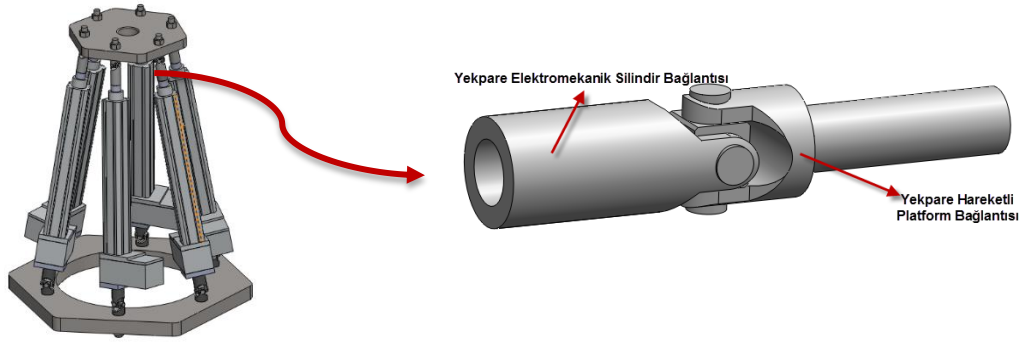
Şekil 3. Universal mafsallın sabit platforma montajı.

Standart üretimi yapılan universal mafsallar tasarımı yapılan PKTT modelinde doğrudan kullanılmadığından bu tasarıma özel universal mafsallar imal edilmesi gerekmektedir. Bir tarafı elektromekanik silindirin altına, diğer tarafı ise sabit platforma bağlanacak şekilde planlanıp tasarlanmıştır. Tasarlanan u mafsall Şekil 4’ te gösterilmektedir.



Şekil 4. Sabit platform için tasarlanan universal mafsall.

Benzer şekilde üst platforma bağlanacak universal mafsallar da özel tasarlanarak 3B modele montajlanmıştır. Bu mafsallın 3B modeldeki yeri ve detayı Şekil 5’ te gösterilmektedir. Elektromekanik silindirlerin ucu M12 erkek vidalı olduğundan üst platforma bağlanacak universal mafsala kılavuz çekilerek bağlantı sağlanmıştır. Üst platforma bağlanan kısım ise rulman ile yataklanarak alt platforma benzer şekilde montajlanmıştır.



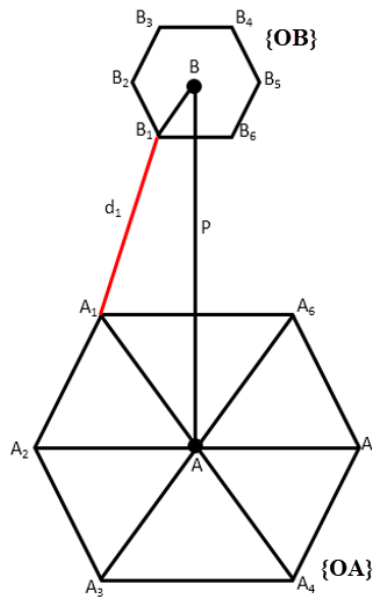
Şekil 5. Sabit platform için tasarlanan universal mafsals.

Tasarlanan 3B modelin 6 serbestlik derecesinde çalışıp çalışmadığı Solidworks Motion hareket analiz modülü kullanılarak kontrol edilmiştir. Modelin hareketi doğrulanmıştır.

III. KİNEMATİK ANALİZ

Paralel kinematik ve seri kinematik sistemlerin denklemlerinin oluşturulmasında sıklıkla iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki düz kinematik yöntem, ikincisi ise ters kinematik yöntemdir. Seri kinematik yapıli sistemlerde düz kinematik çözümleme kolaylıkla uygulanabilmektedir. İşlem yükünün ağır olmasından ve çok sayıda sonuç bulunmasından dolayı paralel kinematik yapıli sistemlerde düz kinematik çözümleme tercih edilmemektedir. Düz kinematik çözümleme, belirlenen eyleyici verilerinden hareketle uç işlevcinin konumunu bulmayı amaçlamaktadır. Ters kinematik çözümlemedeki gaye ise, belirlenen uç işlevci konumundan eyleyicilerin verilerinin bulunmasına dayanmaktadır [12]. Tasarımı yapılan Stewart platformu tabanlı olan 6x6 yapıdaki paralel kinematik takım tezgahı modelinin (PKTT) ters kinematik çözümlemesi yapılmıştır.

Şekil 6' da 6x6 Stewart mekanizmasına sahip PKTT modelinin üst ve alt platformlarındaki mafsals noktaları ve bacak boyu vektörü gösterilmektedir.



Şekil 6. 6x6 Stewart platformu vektörel gösterimi.

Şekil 6' den görüleceği gibi d1 bacak vektörünün normu aşağıdaki şekilde bulunabilir;

$$d1 = \|P + B1 - A1\| \quad (1)$$

Şekil 6'da gösterilen {OB} koordinat sistemi {OA} koordinat sistemine göre konumu üst platformun x ekseninde etrafında yapmış olduğu dönme açısı (α), y ekseninde etrafında (β), z ekseninde etrafında yapmış olduğu dönme açısı (γ) bilindiği varsayılarak denklem (1) - (5) deki gibi hesaplanır. Rotasyon matrisleri Roll, pitch ve yaw açı setine göre alınmıştır.

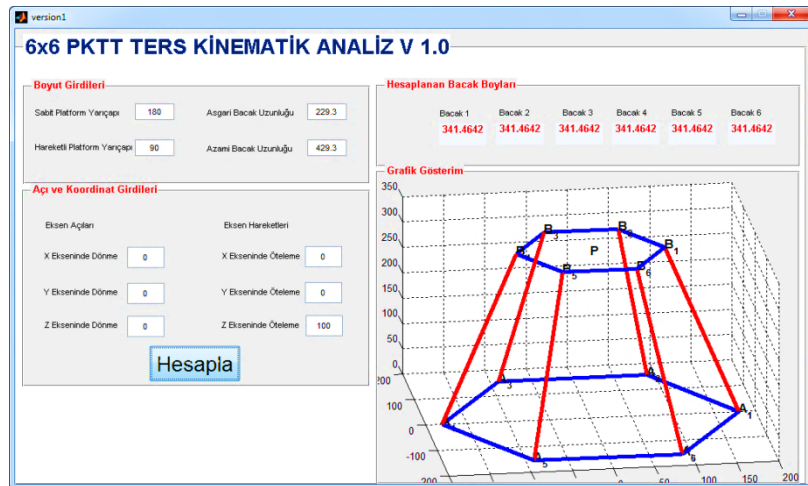
$$R = Rot\alpha.Rot\beta.Rot\gamma \quad (2)$$

$$Rot\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Rot\beta = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Rot\gamma = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

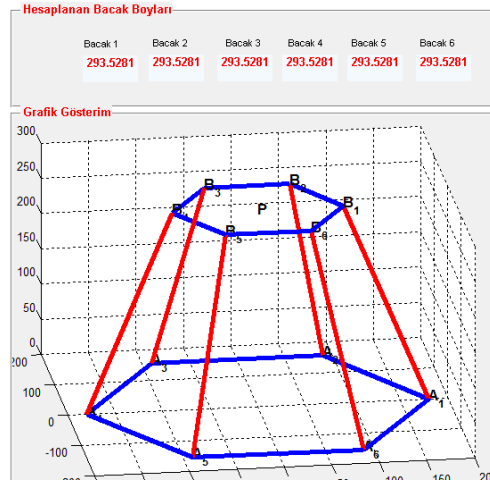
Ters kinematik çözümleme yöntemi uç işlevcinin koordinat verilerinden faydalanılarak sistemin tahrik elemanlarının hareket mesafelerinin bulunmasını amaçlamaktadır. Matlab yazılımında bacak boylarını hesaplayan bir program geliştirilmiştir. Şekil 7' de ise yazılan programın arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 7. Ters kinematik çözümlemesi için hazırlanan Matlab arayüzü.

Aynı yazılımda azami bacak boyu aşıldığında grafik gösterim köşesinde bacakların mafsallardan koptuğu gösterilmektedir. Böylece çalışma uzayının aşıldığı kullanıcı tarafından gözlemlenebilir.

Yazılan program verilen eksen koordinatlarına ve açılara göre bacak boyunu bulmakla beraber hareketli platformun alacağı konumu grafiksel olarak çizdirmektedir. Bu sayede yazılıma işlenen değerlerin doğruluğu gözden geçirilmektedir. Sabit platformun yarıçapı 250 mm, hareketli platformun yarıçapı 125 mm dir. Şekil 9’da üst platform hiçbir eksende dönme hareketi yapmamış ve öteleme hareketini de sadece Z ekseninde 50 mm olarak gerçekleştirmiştir. Bacak boyları bu örnek hareket sonucunda; $d_1=d_2=d_3=d_4=d_5=d_6=293,5281$ mm olarak gerçekleşmiştir. Bu örnek hareket sonucunda programın çizdirdiği grafik Şekil 8’ de gösterilmiştir.



Şekil 8. Hesaplanan bacak boyları ve grafiksel gösterimi.

PKTT’ nin bacak boyları hesaplanırken farklı öteleme hareketlerinden ve dönme açılarından yararlanılarak programa hesaplama yaptırılmıştır. Farklı öteleme ve dönme değerleri kombinasyonlarına bağlı olarak yazılım tarafından hesaplanan bacak boyları Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Örnek koordinat verilerine göre hesaplanan bacak boyları

*H.N.	Koordinat Verileri						Bacak Boyları					
	Eksen Öteleme Hareketleri (mm)			Eksen Dönme Hareketleri (°)			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	X	Y	Z	Rx	Ry	Rz						
1	0	0	50	0	0	0	293,52	293,52	293,52	293,52	293,52	293,52
2	0	0	150	0	0	0	389,91	389,91	389,91	389,91	389,91	389,91
3	0	50	50	0	0	0	282,23	290,10	305,21	312,50	305,21	290,10
4	50	50	50	5	5	0	279,04	283,69	306,77	323,57	319,16	297,76
5	50	50	50	10	10	0	271,62	286,46	316,84	330,93	317,45	288,73
6	50	50	100	0	0	8	337,75	330,21	341,87	360,20	367,13	356,30
7	30	60	80	5	5	5	305,45	315,51	339,15	351,90	342,55	319,82
*H.N: Hareket Numarası												

Tablodan görüldüğü üzere R_x , R_y ve R_z açısal değerlerinin 0° ve öteleme hareketinin X ile Y ekseninde 0 mm Z ekseninde 150 mm olduğunda tüm bacak boylarında 389,91 mm olarak gerçekleşmiştir. Hesaplanan bu değer Tablo 1’de verilen açı ve öteleme hareketleri içerisindeki en büyük bacak boyudur. En küçük bacak boyu ise R_x ile R_y açısal değerinin 10° R_z değerinin 0° , öteleme hareketinin X,Y ve Z ekseninde 50 mm olduğunda 1 numaralı bacak boyu 271,62 mm olarak gözlemlenmiştir.

IV. SONUÇLAR

Stewart platformu esaslı olarak tasarımı yapılan takım tezgahı modelinde kullanılan yüksek maliyetli mafsallar yerine mevcut durumda farklı sektörlerde kullanım alanı bulan universal mafsallar özelleştirilip tezgah modeline başarıyla uygulanmıştır. Bilgisayar ortamında yapılan hareket simülasyonunda 6 Serbestlik derecesinde hareket edebildiği görülmüştür. Tasarlanan alternatif mafsallar universal mafsallarla beraber radyal ve eksenel rulmanlarla desteklenerek serbestlik dereceleri artırılmıştır. Böylece 6x6 yapıdaki bir paralel kinematik takım tezgahının çalışma mantığına (Tüm eksenlerde öteleme ve dönme kabiliyetine) uygun hale getirilmiştir. Bunların yanında tasarımı yapılan alternatif mafsalların maliyeti yüksek olan (400 USD) küresel mafsalların yerine yaklaşık 500 TL’ lik maliyetiyle önemli ölçüde cazip hale gelmiştir.

Kinematik analiz kısmında ise Stewart platformu esaslı takım tezgahları için sabit ve hareketli platformların çapları ile birlikte istenen dönme ve öteleme hareketine göre bacak boyunu bulan bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım üzerinde çeşitli koordinat verilerine göre bacak boyları başarıyla bulunmuştur.

V. KAYNAKLAR

1. Böer, C.R., Molinari, T.L., Smith, K.S, ” Parallel kinematic machines”. London, Springer, 1999.
2. Rehsteiner, F., Neugebauer, R., Spiewak, S., Wieland, F., “Putting parallel kinematics machines (pkm) to productive work.” *Ann CIRP* vol. 48, no. 1, pp. 345–350, 1999.
3. Warnecke, H.J., Neugebauer, R., Wieland, F., “Development of hexapod based machine tool.” *Ann CIRP* vol. 47, no. 1, pp. 337–340, 1998.
4. Zhang, D., Gosselin, C.M., “Kinetostatic modelling of n-dof parallel mechanisms with prismatic actuators.” *Trans ASME Journal of Mechanical Design* vol. 123, no. 3, pp. 375–381, 2001.
5. Xi, F., Zhang, D., Mechefske, C., Lang, S.Y.T., “Global kinetostatic modelling of tripod-based parallel kinematic machines.” *Mechanism and Machine Theory* vol. 39, no. 4, pp. 357–377, 2004.
6. Zhang, D., 2009. “ *Parallel Kinematic Machine Tools*”, New York Dordrecht Heidelberg London, Springer.

7. Aronson, R.B. “Hexapods: Hot or ho hum?” *Manufacturing Engineering* vol. 10, pp. 60–67, 1997.
8. Owen, J., “Tomorrow’s machines in paris.” *SME Manufacturing Engineering* vol. 123, no. 2, pp. 118–129, 1999.
9. Ng, C.C., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., “Design and Development of 3-DOF Modular Micro Parallel Kinematic Manipulator” Singapore-MIT Alliance, 2005.
10. Chang, T.H., “Design and performance evaluation of hybrid parallel link machine tools”, Keio University, PhD Thesis, 2003.
11. Anonim, (10 Aralık 2018). [Online]. Erişim: <https://curtisuniversal.com/products/replacement-parts/>
12. Yıldız, İ, “3×3 kuvvet geri beslemeli bir Stewart platformunun kinematik analizi, bağ-grafik modellenmesi ve simülasyonu” Yıldız Technical University- Graduate School Of Natural And Applied Sciences- Department of Mechanical Engineering, MSc Thesis, 2007.
13. Shen, X., Xie, F., Liu, X., Xie, Z., “A smooth and undistorted toolpath interpolation method for 5-DoF parallel kinematic machines” *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 57 347–356, 2019.
14. Sun, T., Lian, B., “Stiffness and mass optimization of parallel kinematic machine” *Mechanism and Machine Theory* vol. 120, pp. 73–88, 2018.
15. Fernandes, J., Selvakkumar, A., “Kinematic and Dynamic Analysis of 3PUU Parallel Manipulator for Medical Applications” *Procedia Computer Science*, vol. 133, pp. 604–611, 2018.