

GENİŞ ÇALIŞMA UZAYINA SAHİP KABLO İLE SÜRÜLEN PARALEL ÜÇ BOYUTLU BİR YAZICININ SIMSCAPE İLE BENZETİM MODELİ VE ANALİZİ

Caner SANCAK^{1, a)} ve Mehmet İTİK^{2, b)}

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 61080, TRABZON

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü 35210, İZMİR

^{a)}csancak@ktu.edu.tr, ^{b)}mehmet.itik@deu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, kablo ile sürülen paralel bir robot yapısının üç boyutlu yazıcı olarak kullanılması için tasarlanan bir sistemin benzetim ortamındaki modelini ve analizini sunmaktadır. Bu kapsamda ilk olarak kablo ile sürülen gerçek bir yazıcı sistemi tasarımı yapılmıştır. Sistemin bir modeli Matlab/Simscape benzetim ortamı kullanılarak oluşturulmuştur. Modelin oluşturulmasında gerçek sistem parametreleri kullanılmış ve böylece gerçek sistem ile benzer dinamik davranış göstermesi hedeflenmiştir. Modelleme yapılmasındaki amaç ise üç boyutlu yazıcılarda genellikle kullanılan açık çevrim kinematik kontrol yöntemlerinden ziyade yazıcı dinamiklerinin analizi ile kontrolde daha iyi sonuçların elde edilebilmesine zemin hazırlamaktır. Böylece gerçek sistem kontrolcüsü benzetim ortamından elde edilen bilgiler ile tasarlanabilecek ve sonuçları öngörülebilecektir. Yapılan çalışma sonucunda gerçek sisteme benzer bir model başarılı bir şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin analizi için yazıcı kafası konumlama senaryosu belirlenmiş ve bu senaryonun gerçekleşmesinde gerekli olan eyletici torkları sunulmuştur. Ayrıca, bu model istenilen diğer birçok dinamik analizin yapılabilmesine ve sonuçların değerlendirilebilmesine imkân tanımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Üç boyutlu yazıcı, Kablo tahrikli sistem, Delta robot, Paralel robot

SIMULATION AND ANALYSIS OF A LARGE WORKSPACE CABLE-DRIVEN PARALLEL 3D PRINTER USING SIMSCAPE

ABSTRACT

This study presents the modeling and analysis of a system designed within a simulation environment for the utilization of a cable-driven parallel robot as a three-dimensional (3D) printer. Within this scope, a physical cable-driven printer system is initially designed. A model of the system is developed using the MATLAB/Simscape simulation environment. In constructing the model, actual system parameters are employed to ensure that the simulated system exhibits dynamic behaviour closely resembling that of the physical counterpart. The primary objective of the modeling process is to move beyond the commonly used open-loop kinematic control methods in 3D printing and to provide a base for achieving improved control performance through the analysis of system dynamics. This approach enables the design of a controller for the physical system based on insights derived from the simulation environment, thereby allowing for the prediction and evaluation of system performance prior to implementation. As a result of the study, a model that accurately reflects the behavior of the real system is successfully developed. For the analysis of the proposed model, several printhead positioning scenarios are defined, and the actuator torques required to realize these scenarios are presented. Moreover, the developed model offers the capability to perform various other dynamic analyses, facilitating comprehensive evaluation and validation of system performance.

Keywords: Three-dimensional (3D) printer, Cable-driven system, Delta robot, Parallel robot

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Additive Manufacturing), son yıllarda hızlı prototipleme ve üretim süreçlerinde sağladığı esneklik ve hız sayesinde önemli bir ilerleme kaydetmiş; eğitim, sağlık, dışçılık, eğlence ve mücevherat gibi birçok sektörde yaygın bir kullanım alanı bulmuştur [1]. Bu teknolojinin yaygınlaşmasındaki en büyük etken, farklı tekniklerle çalışan üç boyutlu (3B) yazıcıların gelişimi olmuştur. Bu yazıcılar arasında en ekonomik ve yaygın olarak kullanılan yöntem, Birleştirmeli Yığıma ile Modelleme (FDM) yöntemidir [2].

FDM teknolojisine sahip 3B yazıcılar genellikle kartezyen mekanik yapıya sahiptir. Düşük maliyetli ve basit yapılı olmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bu yazıcılar, bazı dezavantajlar da barındırmaktadır. Özellikle, baskı sırasında eksenlerdeki hata birikimi ve yüksek hızlarda oluşan titreşimler baskı kalitesini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, yazıcının hareketli parçalarında bulunan motorların kütle artışına neden olması, ivmelenme sırasında büyük atalet kuvvetleri oluşturarak titreşimi artırmaktadır [3]. Bu durum, hassasiyetin azalmasına ve düşük ivmeler ise parça baskı hızını düşürerek süresinin uzamasına yol açmaktadır.

Bu problemlere çözüm olarak, endüstride daha çok tut-bırak işlemlerinde kullanılan Delta robotların 3B yazıcı sistemlerine uyarlanması düşünülmüştür [4]. Paralel mekanizmalı olan Delta 3B yazıcılar, eksenlerdeki hata birikimini önlemekte ve daha iyi dinamik performans göstermektedir. Böylece daha yüksek hızda ve hassasiyette baskı yapılmasına imkân tanınmaktadır [3]. Ancak bu sistemlerin de bazı sınırlamaları vardır: Çalışma hacimleri genellikle küçüktür, bu da büyük parçaların üretimini zorlaştırmaktadır. Ayrıca Delta yazıcılarda kullanılan hassas mekanik bileşenler (örneğin harmonik redüktörler ve rulmanlar), bu sistemlerin maliyetini artırmakta ve yaygınlaşmasını önemli ölçüde kısıtlamaktadır.

Eklemeli imalat teknolojisi, küçük ve orta ölçekli parça üretiminde uygunluk seviyesine ulaşmış olsa da büyük ölçekli yapıların üretimi konusunda çalışmalar hâlen erken aşamadır.

Bu alandaki araştırmalar, özellikle üretim hızı, baskı kalitesi ve sistem kararlılığı gibi teknik zorluklarla karşı karşıyadır. Mevcut büyük ölçekli 3B yazıcı sistemleri, geniş üretim hacmine sahip olsalar bile baskı süresinin çok uzun olması ve yüzey kalitesinin düşük kalması gibi performans sorunları yaşamaktadır. Bu amaçla, geleneksel kartezyen yapıdaki yazıcıların fiziksel boyut ve mekanik sınırlamaları nedeniyle yetersiz kaldığı noktada, Kablo ile Sürülen Paralel Robotlar (KSPR) önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

KSPR sistemleri [5,6], çok geniş ve açık hacimlerde çalışabilen, yüksek hareket esnekliği sunan ve modüler olarak ölçeklenebilen bir yapıya sahiptir. Bu özellikleri sayesinde hem sabit bir alana bağlı kalmadan çalışabilirler hem de büyük ölçekli yapıların üretiminde gerekli olan geniş hareket alanını sağlayabilirler. Ayrıca, sistemin kablo ile sürülüyor olması, hareketli parçalardaki kütleleri azaltarak yüksek genlikli titreşimlere neden olabilecek atalet kuvvetlerini düşürmekte, bu da daha stabil ve hızlı bir baskı süreci sunma potansiyeli sunmaktadır. Rijit uzuvlar yerine kabloların kullanılması ile sistem rijitliğini düşürmemek adına hafif ve düşük esneme payına sahip fiber katkılı kablolar tercih edilmeli ve kablolar bası kuvveti taşıyamadığından robotun konfigürasyonu kablo bağlantı noktalarının uygun olarak ayarlanması ile rijitliği sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu rijitlik probleminin üstesinden gelebilmek için genellikle robotun serbestlik derecesinden bir fazla sayıda kablo kullanımı önerilmektedir. Fakat bu durumda artıksıl eyletme söz konusu olduğu için robotun kontrolü zorlaşmaktadır. Artıksıl eyletmenin de önüne geçmek için kablo yerine pasif yay gibi elemanların uygun bir konfigürasyon ile kablo gerginliğini sağlamada kullanılması önerilmektedir.

KSPR'lerin üç boyutlu yazıcılarda kullanımı oldukça yeni bir araştırma alanıdır. Literatürde bu teknolojiyi uygulayan çok az sayıda örnek bulunmaktadır ve mevcut sistemlerin hız, hassasiyet ve kontrol açısından çeşitli kısıtları vardır. Bosscher vd. [7] büyük ölçekli yapı üretimi için 12 kablolu, artıksıl kısıtlanmış bir yapı önermiştir; ancak sistemin yüksek karmaşıklığı ve maliyeti kontrolü zorlaştırmaktadır. Barnett vd. [8] orta ölçekli

heykel üretimi için 6 kablolu tamamen kısıtlı bir yapı geliştirmiştir. Bu çalışmada, düşük baskı hızı, sınırlı çalışma alanı ve deformasyon sorunları önemli dezavantajlar olarak öne çıkmaktadır. Izard vd. [9] tarafından geliştirilen 6 serbestlik dereceli eksik kısıtlı yapı, geniş çalışma alanına sahip olmasına rağmen salınım problemleri nedeniyle baskı kalitesinde düşüş yaşanmıştır. Gueners vd. [10], 8 kablolu ve artıksıl sınırlandırılmış bir yapı geliştirmiştir. Ancak bu yapıdaki fazla kablolar baskı alanını sınırlamıştır ve henüz gerçek bir 3B baskı yapılmamıştır. Zi vd. [11] tarafından geliştirilen sistem ise düşük hızda çalışan, yaylı germe sistemi içeren 6 kablolu tamamen kısıtlı bir yapı olup, baskı doğruluğu sınırlıdır fakat sistem iyileştirmeye ve geliştirmeye açıktır.

Genel olarak yapılan literatür incelemesi, KSPR'lerin 3B yazıcılarda uygulanmasının sınırlı sayıda örnekle temsil edildiğini ve bu örneklerin büyük ölçekli üretim veya yüksek hassasiyetli uygulamalarda yeterli performansa ulaşamadığını göstermektedir. Bu bağlamda, yeni KSPR yapılarının geliştirilmesi, daha etkili kontrol sistemlerinin tasarlanması ve yapısal iyileştirmelerin yapılması, KSPR tabanlı 3B yazıcıların özellikle büyük ölçekli üretimde verimli şekilde kullanılabilmesi için kritik öneme sahiptir.

Eksik-kısıtlanmış KSPR yapıları, efektif çalışma uzayını en geniş sağlayabilen sistemlerdir. Bu yapılarda, uç-işlemci (end-effector) yalnızca gerekli serbestlik derecelerinde hareket ettirilerek kabloların taşınan parçaya temas etmesi engellenmektedir. Ancak eksik-kısıtlanmış yapılarda kablo gerginliği yalnızca yerçekimi kuvveti ile sağlandığından, uç-işlemcinin kontrolü pasif kalmakta ve yüksek hızlarda veya ivmelenmelerde titreşim ve salınım problemleri ortaya çıkmaktadır [12]. Bu durum, özellikle hassasiyet ve kararlılığın kritik olduğu görevlerde KSPR'nin etkinliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle, hem kablo-gövde çarpışmasını önleyecek hem de sistem rijitliğini artırarak yüksek dinamik performans sunabilecek yeni nesil KSPR tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. KSPR sistemlerine yay (elastik eleman) entegre edilmesi bu sorunun aşılacağı göstermektedir. Yaylar sayesinde kablo gerginliği pasif olarak korunmakta, böylece sistemde fazla kablo

kullanımına gerek kalmamaktadır. Bu durum hem tasarım sadeliği hem de kablo-temas riskinin azalması bakımından büyük bir avantaj sağlamaktadır [12,13]. Ayrıca, yalnızca öteleme hareketi gerektiren uygulamalarda uç-işlemcinin yönelim serbestliğini kısıtlamak ve istenmeyen dönmeleri engellemek amacıyla paralel kinematik yapılar (örneğin paralelogram mekanizmaları) kullanılmaktadır. Bu yapılar yay destekli kablo sistemleri ile birleştiğinde, KSPR'lerin yüksek rijitlik ve düşük atalet sunan dinamik yapılar haline gelmesine olanak tanımaktadır. Böylece, özellikle hassas konumlandırma gerektiren görevlerde performans iyileşmekte ve kontrol karmaşıklığı azaltılmaktadır.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen sorunların üstesinden gelebilecek, pasif bir yay ile birlikte paralelogram yapının kullanıldığı ve KSPR teknolojisini barındıran bir üç boyutlu yazıcı tasarımı yapılmış ve yazıcı dinamiği benzetim ortamında modellenmiştir. Literatürde benzer yapıya sahip KSPR'ler bulunmaktadır [11-14]. Bu yapılar kablo bağlantı şekilleri, kabloların zemine bağlantı noktasının hareket edip etmemesi ve esnek elemanın yapısı gibi kısımlarla birbirinden ayrılmaktadır. Dinamik modelleme [11,12] içeren çalışmalarda ise birçok dinamik parametrenin ihmal edilmesiyle oluşturulmuş sade bir analitik model sunulmuştur. Yapılan bu çalışmada ise, Matlab/simscape benzetim ortamı kullanılarak birçok dinamik parametreyi içeren karmaşık denklemlerin oluşturulmasına gerek kalmadan sadece bloklar kullanılarak sistem bir dinamik modeli oluşturulmuştur. Tasarlanan bu yapı ile Delta Robot hareketini taklit etmeye ve yüksek hızlara çıkabilmeye odaklanılmıştır. Elde edilen benzetim modeli bir hareket senaryosu için denenmiş ve gerçek bir sistemde olması öngörülen şekilde sonuçlar elde edilmiştir. Böylece gerçek sisteme ihtiyaç duymadan, dinamik etkileri ve analizini kapsayan ayrıca hassas kontrolcü ayarlama imkânı sunan bir sistem modeli elde edilmiştir.

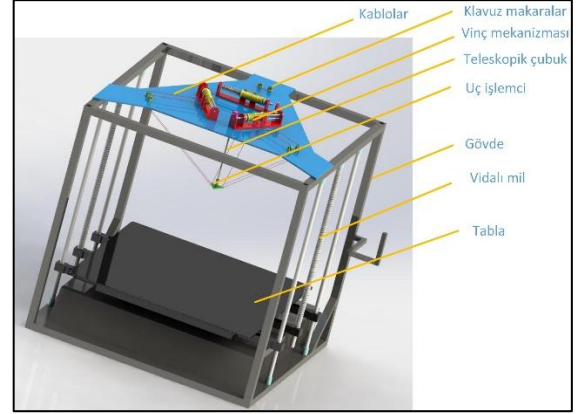
Bu çalışmanın içeriğinde öncelikle KSPR yazıcı tasarımı ve ardından benzetim modeli verilmiştir. Ayrıca elde edilen model için konumlama analizi yapılmış ve bulgular kısmında sunulmuştur. Sonuç kısmında ise elde edilen bulgular tartışılmıştır.

2. KSPR ÜÇ BOYUTLU YAZICI YAPISI

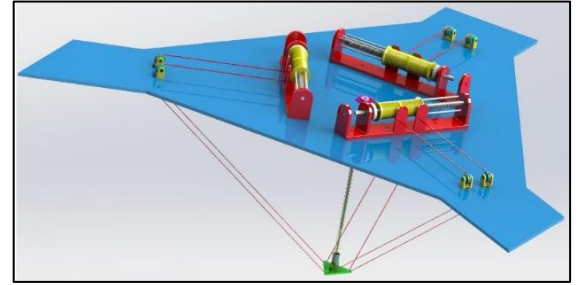
Üç boyutlu yazıcının CAD ortamında tasarlanan katı modeli Şekil 1’de verilmiştir. Yazıcı x , y ve z eksenlerinde hareket eden kablo ile sürülen bir paralel robot aksamına sahiptir. Yazıcının robot kısmı Şekil 2’de ayrıca gösterilmiştir. Bu kısım bir taban (mavi zemin), vinçler, kılavuz makaralar, üç set paralel kablo, bir yay monteli pasif teleskopik uzuv ve bir uç işlemciden oluşmaktadır. Uç işlemci, tabana altı kablo ve teleskopik uzuv aracılığıyla bağlıdır. Altı kablo, üç paralel kablo grubuna bölünmüştür. Her bir paralel kablo seti, tambur aracılığıyla bir servo motor tarafından tahrik edilmektedir. Üç çalışma ünitesi grubu ve paralel kablolar dairesel simetrik olarak dağıtılmıştır. Böylece bir paraleloram yapı [12] oluşturulmuştur. Gerilim kuvveti altındaki paralel kablolar, uç işlemcinin hareket sırasında dönmesini engellemekte, dolayısıyla üç serbestlik derecesinde öteleme hareketi elde edilmektedir. Bu robot alüminyum konstrüksiyondan oluşan bir kafes içerisine alınmış ve bu kafesin alt kısmına yazdırma işlemi için bir tabla konulmuştur. Gerçek sistemde uç işlemciye takılacak bir eritici uç ile filament eritilerek yazma işlemi gerçekleştirilecektir. Filament üst kısımdan verilecek ve teleskopik uzvun içerisinden uç işlemci üzerindeki eritici uca beslenecektir. Yay monteli teleskopik uzuv, eş eksenli olarak monte edilmiş rijit iki uzuv ve sıkıştırılmış bir yaydan oluşmaktadır. Teleskopik uzuv, yayın yönünü düz tutmak ve yayın büzülme aralığını sınırlamak için bir kılavuz çubuk olarak universal mafsal ile tabana bağlanmıştır. Teleskopik uzvun diğer ucu, diğer universal mafsal yoluyla uç işlemcinin merkezine bağlıdır. Teleskopik uzuv üzerinden geçen yay hareket sırasında sıkışarak kablo gerilimi ve hızlanma gereksinimlerini karşılamak için uç işlemciye aşağı yönde kuvvet uygulamaktadır.

3. BENZETİM MODELİ

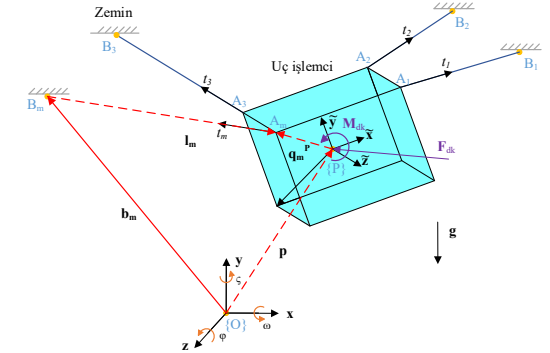
KSPR’ler gerek paralel yapıları ve gerekse kablo ile tahrik edilmeleri sonucu oldukça karmaşık dinamik denklemlere sahiptirler. Ayrıca tam dinamiklerinin elde edilmesi oldukça güç olduğundan genellikle bazı kabuller altında modellenirler. Bu denklemlerin genel bir formu [15] robotun kinematik diyagramı (Şekil 3) ile birlikte verilmiştir.



Şekil 1. Üç boyutlu yazıcının katı modeli



Şekil 2. Kablo ile sürülen paralel robot



Şekil 3. Genel bir KSPR'nin serbest cisim diyagramı [15]

$$M_{eq}\ddot{X} + N(X, \dot{X}) = H\tau \quad (1)$$

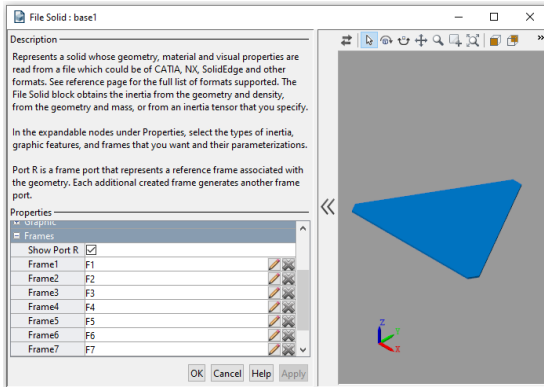
$$M_{eq} = H I_a \left(\frac{\partial \Omega}{\partial \dot{X}} \right) + r_d \begin{bmatrix} m_u I_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I_u \end{bmatrix}$$

$$N(X, \dot{X}) = H \left(I_a \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial \dot{X}} \right) + C \left(\frac{\partial \Omega}{\partial \dot{X}} \right) \right) \dot{X} + H \tau_f + r_d \begin{bmatrix} -m_u g - F_{dk} \\ \dot{\psi} \times I_u \dot{\psi} - M_{dk} \end{bmatrix}$$

Denklemlerde; m_u : uç işlemcinin kütlesi, g : yer çekimi ivmesi, I_u : uç işlemcinin geometrik merkez eksenlerine göre atalet tensörü, ψ : açısal konum, X konum, F_{dk} : dışarıdan uygulanan kuvvet, M_{dk} : dışarıdan uygulanan moment vektörü olarak tanımlanmıştır. Burada, yapı matrisi H uç işlemci hızını kablo hızlarına dönüştüren Jakobiyen matrisinin devriğinin negatifine eşittir. Kabloları saran bir eyletme mekanizmasına ait kütleli atalet

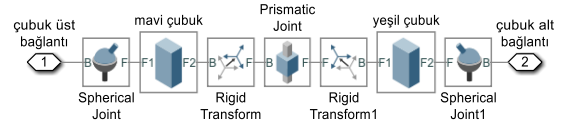
Uç işlemci geometrik orta noktasındaki eksen takımı ise 6 serbestlik dereceli bir mafsal ile yine global eksen takımına bağlıdır. Bağlanan eksen takımları arasında 6 serbestlik dereceli mafsal kullanarak uç işlemcinin uzayda dönme ve öteleme hareketi yapmasına izin verilmiştir. Bu mafsal bloğu kullanılarak mafsalin sönüm ve rijitlik karakteristikleri gibi birçok parametresi ayarlanabilirken aynı zamanda mafsal üzerinde bir sensör varmış gibi mafsalin doğrusal ve açısal konum, hız ve ivme değerleri alınabilmekte, mafsala gelen kuvvetler blok çıktısı olarak okunabilmektedir. Böylece mafsal bloğu kullanılarak birçok dinamik analiz yapılabilmektedir. Bu çalışmada ise, görselde görüldüğü üzere mafsaldan sadece uç işlemci orta noktası x , y , z konumlarının bilgisi alınmıştır. Mekanizmanın paralelogram yapısı dönme hareketine izin vermediği için harekette açısal büyüklükler dikkate alınmamıştır. Ayrıca çalışmada ters kinematik denklem kullanılarak, referans konum değerlerini sağlayacak motor açısı değerleri bloklara açı girdisi (teta) olarak verilmiştir. Bunun için referans blokları ve ayrıca ters kinematik denklem çözümü için bir matlab fonksiyonu (Matlab Function) bloğu kullanılmıştır.

Taban ve uç işlemci bloğu, görseldeki şekilde (Şekil 5) CAD ortamında çizilmiş katı modellerin “file solid” bloğuna aktarılması ile oluşturulmuştur. Aktarımdan sonra ise diğer elemanlar ile bağlantı noktalarını tanımlayabilmek için geometriler üzerine eksen takımları yerleştirilmiştir. Tabanı oluşturan bloğun iç kısmının bir görseli Şekil 6’da verilmektedir. Tabanın 6 keskin köşesine ve tam orta noktasına eksen takımları konulmuştur. Aynı durum uç işlemci bloğu için de geçerlidir.



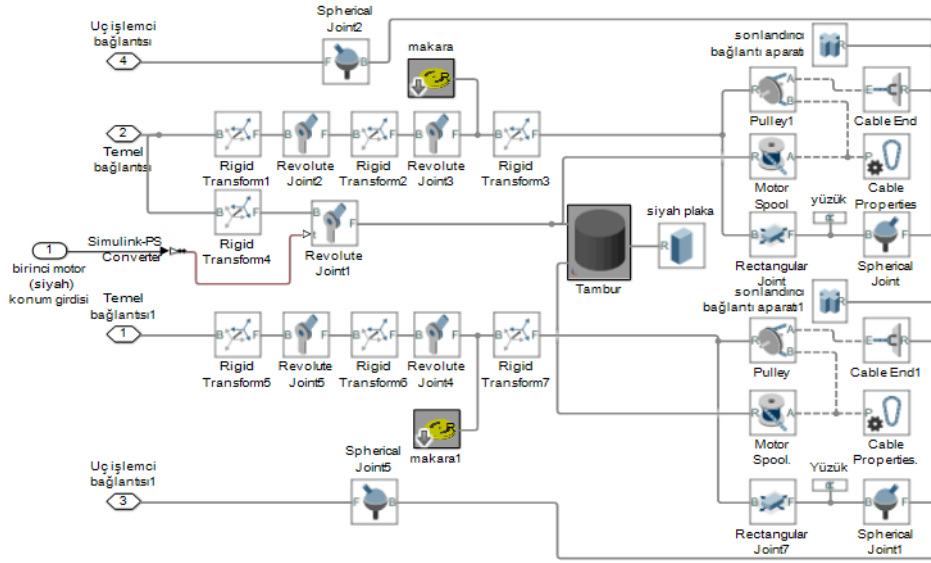
Şekil 6. File solid ile taban ve eksen takımları oluşturma

Teleskopik çubuk-yay sistemi ise iki adet çubuktan ve yay etkisini sağlamak için ise rijitlik sabiti girilmiş olan bir prizmatik mafsaldan oluşmaktadır. Bu sistemin içerisinde yer alan elemanlar Şekil 7’de verilmiştir. Mafsal iki çubuğun tam ortasında olacak şekilde konumlandırılmıştır. Böylece çubuklar ortasında bir yay varmış gibi davranmakta ve birbirlerine göre bir dönme veya z eksenleri dışında başka bir eksende öteleme hareketi olmaksızın birbirlerinin içine geçme veya uzaklaşma hareketi yapabilmektedirler. Eksen takımları ile olan bağlantıları hizalamak için bağlantı eksen takımını döndürmeye veya öteleme işlemine yarayan transformasyon (rigid transform) blokları kullanılmıştır. İkili çubuk sisteminin üst ve alt noktaları ise küresel mafsallar (spherical joint) ile sırasıyla taban ve uç işlemcinin orta kısmındaki eksen takımına bağlanmıştır. Böylece çubuk-yay sistemi bu noktalarda her 3 eksen etrafında dönme hareketine serbest hale getirilmiştir. Uç işlemci hareket ettiğinde çubuk-yay sistemi de global eksen takımına göre farklı açılarda konumlanabilmektedir.



Şekil 7. Teleskopik çubuk-yay sistemi modeli

Motor-ip sistemleri ise bağlantı noktaları hariç birbirinin aynısıdır ve Şekil 8’de görülen tambur, makaralar ve iki ipten oluşmaktadır. İkili ip sistemindeki ipler simetrik olarak tek bir tambura bağlıdır. Tamburun diğer tamburlarla karışmaması için kütesiz bir ek dikdörtgen şekil kullanılmıştır ve tamburla rijit olarak bağlanmıştır. Tambur tabana bir döner mafsal ile bağlanmıştır. Döner mafsal bloğu içerisindeki ayarlamalar 6 serbestlik dereceli blok üzerinde yapılan ayarlamalar gibi tek bir z eksen etrafında dönme için yapılabilmektedir. Ayrıca, mafsala şekildeki gibi konum veya tork girdisi verilerek mafsalin hareket etmesi ve dolayısı ile kabloların tambura sarılması veya bırakılması sağlanabilmektedir. Görselde girdi açısal konum olarak yapıldığı için giriş kısmındaki işaret t ile gösterilmektedir. Mafsalin bağlantı ve takipçi eksen takımları ise sırası ile blok üzerinde B ve F harfleri ile temsil edilmektedir.



Şekil 8 Motor-ip sistemi modeli

Simulink ortamında oluşturulan sinyallerin fiziksel Simscape bloğuna gönderilmesi veya fiziksel bloktan Simulink ortamında sinyal alınabilmesi için bir çevirici bloğu (Simulink-PS converter) kullanılması gerekmektedir. Bir mafsalın her zaman z ekseninde dönmesi gerektiği için yönelim ayarlamada transformasyon blokları kullanılmıştır. Şekilde görülen küçük sarı makaralar ise tabana hem kendi eksenini etrafında dönmeyi hem de tabana göre sağa sola dönmeyi sağlayan iki adet döner mafsal ile bağlanmıştır. Bu bağlantıların yapılmasından sonra ise ip bağlantısı ve özelliklerinin atanması gerçekleştirilmiştir. Bunun için bir ip sarma makarası (cable spool) bloğu kullanılmıştır. Bu bloğun içerisinde makara sarma yarıçapı girilmiştir ve blok bir görsel ifade etmediği için doğrudan tambura bağlanmıştır. Blok çıkışındaki kesikli çizgiler ipi temsil etmektedir. Ayrıca, ipin kısıtlanma durumu ve görsel özellikleri ip özellikleri (cable properties) bloğu ile ayarlanmaktadır. Kurulan sistemde ip tabana makara üzerinden bağlı olduğu için ip, makara (pulley) bloğuna bağlanmış ve bu blok görselleştirme için görsel makara elemanına bağlanmıştır. Makaradan çıkan kablo ise kablo sonlandırma (Cable End) bloğuna bağlıdır. Bu blok ise bir sonlandırıcı bağlantı elemanına ve bu elemanda küresel mafsal ile uç işlemciye bağlıdır. Ek olarak, mekanizma hareket ettirildiğinde görsel makaranın yöneliminin uç işlemcinin hareketi ile değişmesi için görsel makara ve uç işlemci

bağlantı noktasına bir dikdörtgenel mafsal (rectangular joint) ve bu mafsal ile uç işlemcinin dönmesinin sınırlanmaması için beraberinde bir küresel mafsal konulmuştur.

Şekil 5'te görülen bağlantılar blokların ilgili eksen takımlarını birbirine bağlamaktadır. Örneğin taban, her motor-ip sistem ile iki noktadan global eksen takımı ve çubuk-yay sistemi ile birer noktadan bağlantılıdır. Uç işlemci ise motor ip sistemleri ve çubuk-yay sistemi ile bağlıdır. Uç işlemcinin motor ip sistemleri ile 3 noktadan bağlı olmasının nedeni uç işlemcinin üç köşe noktasında paralelogram yapı oluşturmak için iki ayrı motor-ip sisteminin birer ipinin bağlı olmasıdır. Bu ikili bağlanma durumu şekildeki bağlantıların birleşmesi ile de görülebilir.

4. BENZETİM BULGULARI

Elde edilen benzetim modeli kullanılarak çalışma kapsamında bir konumlama senaryosu gerçekleştirilmiştir. Bu konumlama senaryosu için başlangıçta uç işlemci x ve y eksenlerine göre sıfır konumunda iken z ekseninde ise alt bir noktadan (-0.7 m) yukarıya doğru hareket ettirilerek, helisel bir hareket oluşması amaçlanmıştır. Bunun için referans sinyali $x = 0.3\sin(0.9t)$, $y = 0.3\cos(0.9t) * ramp(0.1)$ olarak seçilmiştir. y eksenindeki referansın sıfırdan başlaması için bu referans sinyali 0.1 eğime sahip bir rampa fonksiyonu ile çarpılmıştır. Rampa fonksiyonunun değeri 1

değerine kadar artırılmıştır. Böylece başlangıçta yumuşak bir referans geçişi sağlanmış ve sonrasında kosinüs fonksiyonunun değeri referansı oluşturmuştur.

z eksenine ise $z = -0.7 + \text{ramp}(0.01)$ fonksiyonu ile -0.7 m değerinden -0.5 m değerine kadar 20 saniye içerisinde doğrusal artacak şekilde rampa fonksiyonu kullanılarak oluşturulmuştur. Bu referans sinyalleri bir ters kinematik hesaplama bloğuna gönderilerek verilen referans konumunu sağlamak için gerekli motor dönme açıların (θ) hesabı denklem (2) kullanılarak yapılmıştır.

$$\theta_i^2 = ((x - B_{ix} + q_{ix}^p)^2 + (y - B_{iy} + q_{iy}^p)^2 + (z - B_{iz})^2) / r_d^2 \quad i = 1,2,3 \quad (2)$$

KSPR yazıcıya ait kinematik ve dinamik parametreler Tablo 1-3' te verilmiştir. Dinamik parametrelerde verilmeyen değerler sıfır olarak alınmıştır. Referans takibinde uç işlemcinin konumunun değişimi Şekil 9'da verilmiştir.

Tablo 1. KSPR tabanından ayrılan kabloların ayırım orta noktalarının koordinatları

Koordinat	B_1	B_2	B_3
x	0	-0.3810	-0.3810
y	0.44	-0.22	-0.22
z	0	0	0

Tablo 2. Uç işlemciden ayrılan kabloların ayırım orta noktalarının koordinatları

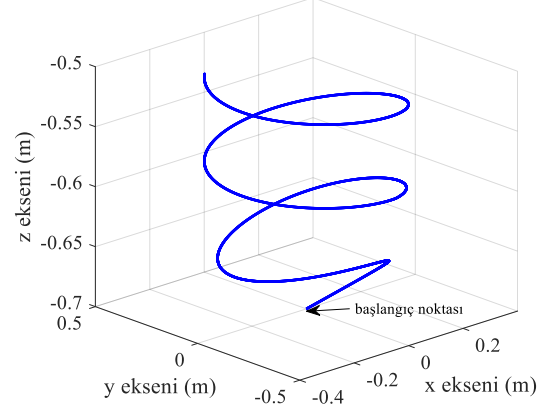
Koordinat	A_1	A_2	A_3
\tilde{x}	0	-0.0135	0.0135
\tilde{y}	0.01559	-0.007794	-0.007794
\tilde{z}	0	0	0

Tablo 3. KSPR için Dinamik parametreler

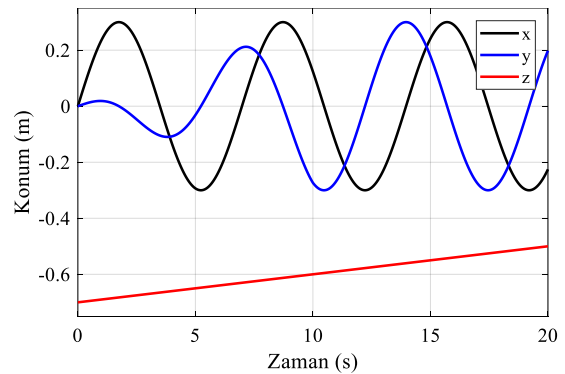
Prizmatik mafsal yay sabiti	100 N/m
Prizmatik mafsal sönüm sabiti	0.0001 Nms
Küresel mafsal sönüm sabiti	0.0001 Nms
τ_{fi}	0.045 Nm
m_{u_i}	0.3 kg
I_{a_i}	0.000178 kgm ²
r_{d_i}	0.032 m
C_i	0.00055 Nms

Şekil 9'da verilen görselin zamana bağlı olarak farklı eksenler için konum takibindeki gösterimi ise Şekil 10'da verilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere uç işlemci verilen referansı düzgün bir şekilde takip etmektedir. Bu sonuç, oluşturulan benzetim modelinin başarılı bir şekilde

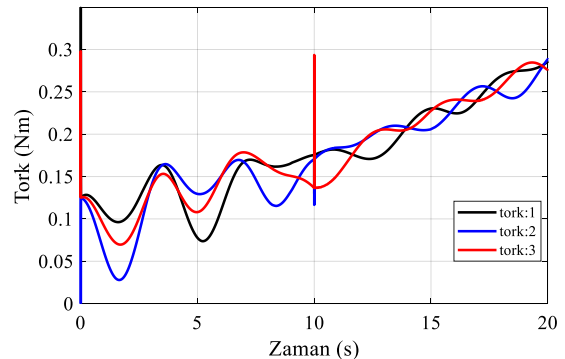
çalıştığını göstermektedir. Referans sinyallerinin fonksiyonları yukarıdaki metinde verilmiştir ve konum değerlerine 10^{-6} m değerinden daha yakın olduğu için şekil üzerinde çizdirilmemiştir. Sistemin kinematik denklem ile kontrol edilmesinden kaynaklanan bu başarılı sonuçtan ziyade, oluşturulan benzetim modelinin avantajı, bu sonucun oluşmasında gerekli motor torklarını (Şekil 11) hesaplayabilmesidir. Şekilde görüldüğü üzere verilen referans takibinde motor torkları pozitif değer almış ve böylece kablo gerilmeleri sağlanarak bir kablo sarkması oluşmamıştır.



Şekil 9. Uç işlemci konum kontrolü



Şekil 10. Uç işlemci x,y,z eksenlerindeki konumu



Şekil 11. Motor torkları

Şekilden de anlaşılacağı üzere bu konum değerleri çalışma uzayı içerisinde ve referans

konumu sağlamada gerekli tork değerleri makul ölçüdedir.

Yapılacak farklı konum takipleri ile farklı sonuçların elde edilmesi mümkündür. Programda kabloların esnemesi verilemediğinden, esnemeye bağlı bir konumlama hatası olmasa da yüksek değişken referansların takibinde özellikle z ekseninde konumlama hataları meydana gelebilir. Bu nedenle kullanılan yay rijitlik katsayısı uygulamalar için önemlidir. Meydana gelebilecek rijitlik düşüklüğü ve titreşim temelli konumlama hatalarının azaltılması için yüksek rijitlikte bir yay seçilmesi önerilebilir. Böylece kablo gerilim kuvvetleri ve dolayısı ile sistem rijitliği artacaktır. Fakat, bu durumda robotu hareket ettirmek için gerekli kablo kuvvetlerinin artması nedeniyle fazladan enerji tüketimi olacaktır. Bu nedenle tasarımda kullanılacak uzuvların ve özelliklerinin seçimi uygulamaya yönelik olarak yapılmalıdır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kablo ile sürülen paralel robot yapısına sahip bir 3B yazıcı tasarlanmış ve matematiksel modeli oldukça karmaşık olan bu yapının bir modeli görsel olarak benzetim ortamında başarılı bir şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin kullanılması ile çalışma kapsamında bir konumlama senaryosu için gerekli motor torkları gösterilmiştir. Böylece bu model ile gerçek bir sistemden beklenen sonuçlara ulaşılabileceği söylenebilir. Benzetim ortamında her mafsala ait yay sabiti ve sönüm faktörü gibi özelliklerin girilebilmesi ile modellemenin oldukça detaylandırılması mümkündür. Ayrıca, mafsallara gelen kuvvetler, hız ve ivme gibi analizler ve diğer birçok dinamik analiz, oluşturulan model kullanılarak yapılabilecektir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 123M892 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

[1] Prince, J. D. (2014). 3D printing: an industrial revolution. *Journal of electronic resources in medical libraries*, 11(1), 39-45.

- [2] Szulzyk-Cieplak, J., Duda, A., & Sidor, B. (2014). 3D printers—new possibilities in education. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 8(24), 96-101.
- [3] Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. J. P. M. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia manuf.*, 35, 1286-1296.
- [4] Yadav, A., Rohru, P., Babbar, A., Kumar, R., Ranjan, N., Chohan, J. S., ... & Gupta, M. (2023). Fused filament fabrication: A state-of-the-art review of the technology, materials, properties and defects. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(6), 2867-2889.
- [5] Qian, S., Zi, B., Shang, W. W., & Xu, Q. S. (2018). A review on cable-driven parallel robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 31(1), 1-11.
- [6] Gosselin, C. (2014). Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives. *Mechanical Engineering Reviews*, 1(1), DSM0004-DSM0004.
- [7] Bosscher, P., Williams II, R. L., Bryson, L. S., & Castro-Lacouture, D. (2007). Cable-suspended robotic contour crafting system. *Automation in construction*, 17, 45-55.
- [8] Barnett, E., & Gosselin, C. (2015). Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot. *Additive Manufacturing*, 7, 27-44.
- [9] Izard, J. B., Dubor, A., Hervé, P. E., Cabay, E., Culla, D., Rodriguez, M., & Barrado, M. (2017). Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots. *Construction Robotics*, 1, 69-76.
- [10] Gueners, D., Chanal, H., & Bouzgarrou, B. C. (2022). Design and implementation of a cable-driven parallel robot for additive manufacturing applications. *Mechatronics*, 86, 102874.
- [11] Zi, B., Wang, N., Qian, S., & Bao, K. (2019). Design, stiffness analysis and experimental study of a cable-driven parallel 3D printer. *Mechanism and Machine Theory*, 132, 207-222.
- [12] Zhu, W., Liu, J., Shi, K., Qi, F., Shen, H., Xu, Z., & Ma, Z. (2022). Optimization design and dynamic stability analysis of 3-DOF cable-driven parallel robot with an elastic telescopic rod. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(9), 4735-4746.
- [13] Zhang, Z., Shao, Z., & Wang, L. (2020). Optimization and implementation of a high-speed 3-DOFs translational cable-driven

parallel robot. *Mechanism and Machine Theory*, 145, 103693.

[14] Behzadipour, S., & Khajepour, A. (2005). A new cable-based parallel robot with three degrees of freedom. *Multibody System Dynamics*, 13(4), 371-383.

[15] Sancak, C. (2022). *Kablo ile sürülen paralel bir robotun tahmin ve öğrenme temelli*

yöntemler ile konum ve düzlem dışı titreşim denetimi., Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[16] <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>, Erişim: 01 Temmuz 2025.