



Sabit Hız İle Yörünge Takibi Sağlayan Dört Çubuk Mekanizmasının Hız Kontrolü

Speed Control of Four-Bar Mechanism Providing Trajectory Tracking with Constant Velocity

Halit Hülako^{1*}, Orhan Çakar²

¹ Hakkari Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, halithulako@hakkari.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8194-5433>

² Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, cakaro@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6947-3875>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 10 Eylül 2022
Revizyon 2 Aralık 2022
Kabul 20 Aralık 2022
Online 31 Aralık 2022

Anahtar Kelimeler:

*Dört Çubuk Mekanizması,
Değişken Hız Kontrolü,
Mekanizma Kontrolü,
Matlab Simscape Multibody.*

ÖZ

Yüksek maliyetli otomatik seri üretim makinelerinin sabit hız gerektiren işlemlerinde DC motor ile tahrik edilen dört çubuk mekanizmaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Yörüngesi üzerinde sabit hız ile ilerleyen mekanizmaların tasarımları zordur ve ayrıca farklı hız talepleri durumunda da mekanizmanın yeniden boyutlandırılması gerekmektedir. Alternatif olarak mekanizmayı tahrik eden motor hızı kontrol edilerek bu talep gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada, dört çubuk mekanizmasında biyel üzerindeki bir noktanın sabit bir hız ile yörüngesi üzerinde ilerleyebilmesi problemi göz önüne alınmıştır. Bu amaçla krank hızı istenilen yörünge takip hızını sağlayacak şekilde kontrol edilmiştir. Matlab Simscape arayüzü yardımı ile sistem modellenmiş ve krank hızının kontrolünde PID kontrol algoritması kullanılmıştır. Dört çubuk mekanizması için simülasyon modeli oluşturulmuş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 September 2022
Received in revised form 2 December 2022
Accepted 20 December 2022
Available online 31 December 2022

Keywords:

*Four-Bar Linkage,
Variable Velocity Control,
Mechanism Control,
Matlab Simscape MultiBody*

ABSTRACT

The four-bar mechanisms driven by DC motor are widely used in the processes of high-cost automatic mass production machines that require constant speed. It is difficult to design the mechanism moving on its prescribed trajectory with constant velocity, and however a new design is necessary when a different velocity is desired. Alternatively, this demand can be realized by controlling the speed of motor driving the mechanism. In this study the problem of a coupler point on the four-bar mechanism moving on its trajectory with a constant velocity is considered. For this purpose, the crank speed was controlled to provide the desired trajectory tracking speed. The system were modeled with the help of Matlab Simulink Simscape toolbox and PID control algorithm has been used to control crank angular velocity. A simulation model was created for the four-bar mechanism and successful results were obtained.

Doi: 10.24012/dumf.1173407

* Sorumlu Yazar

Giriş

Seri imalat yapan makinelerde genellikle yüksek imalat hızı, sabit hız, ürüne has işlem yörüngeleri oluşturma, düşük maliyet gibi gereksinimler vardır. Dört çubuk mekanizmaları endüstride yaygın olarak kullanılan mekanizmalardan biri olup ihtiyaca göre hareket, fonksiyon ve yörünge üreten olarak sınıflandırılır [1]. Bu mekanizmalar, giriş uzuvlarının yani kranklarının sabit hızda döndüğü kabul edilerek tasarlanırlar. Bilindiği üzere dört çubuk mekanizmasında giriş uzvunu tahrik eden motora sabit voltaj verilse bile mekanizmanın kendi dinamiğinden dolayı, giriş uzvunun istenen hızı etrafında dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu hız dalgalanmaları mekaniksel olarak kranka volan eklenerek kısmen giderilebilmektedir. Ancak günümüzde özellikle yüksek hızlı, hafif ve esnek uzuvlu mekanizmaların kullanım gereksinimi nedeni ile bu yeterli olamamaktadır. Günümüzde ölçüm araçları ve kontrol mühendisliğinin gelişimi ile birlikte bu hız dalgalanmaları mekanizmayı tahrik eden motorun kontrolü ile daha etkili bir şekilde giderilebilmektedir. Bunun için krank hızı anlık olarak ölçülüp referans değer ile karşılaştırılarak mevcut hataya göre uygun kontrol sinyali üretilir ve mekanizmayı tahrik eden motora uygulanarak hız dalgalanması giderilmeye çalışılır. Tao ve Sadler [2], DC motor ile tahrik edilen dört çubuk mekanizmasının krank hızında meydana gelen hız dalgalanmalarını PID kontrol algoritmasını kullanarak gidermeye çalışmıştır. Aynı amaçla bulanık mantık [3], kayan kipli kontrol [4], hareketli kayan kipli kontrol [5], geri adımlama (backstepping) kontrol [6] ve bu kontrol tekniklerinin karma bir şekilde uygulandığı [7],[8] çalışmalar mevcuttur.

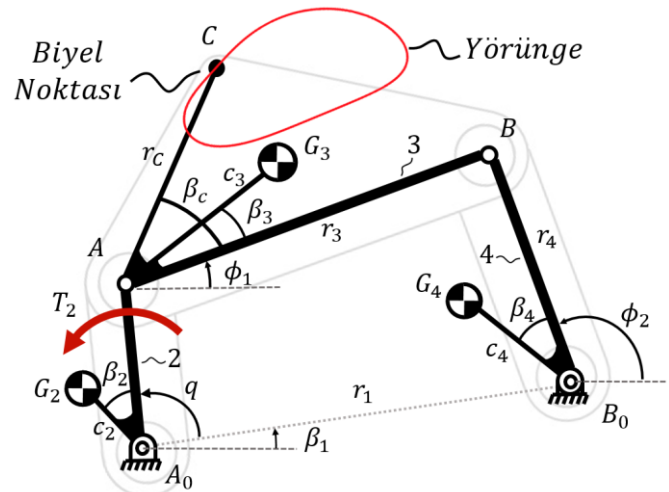
Yörünge oluşturan dört çubuk mekanizmaları endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür mekanizmalarda çoğunlukla biyel olarak isimlendirilen ara bağlantı uzvu üzerindeki bir noktadan faydalanılır ve bu noktanın çizdiği yörüngeler biyel eğrileri olarak isimlendirilir. Şekil 1’ de yörünge üreten dört çubuk mekanizmasının kinematik diyagramı verilmiştir. İki ve dört uzuvlarını birbirine bağlayan üç numaralı uzuv yani biyel üzerindeki C noktası bulunduğu geometrik yere göre farklı eğriler oluşturmaktadır. Giriş uzvu sabit hızda hareket ettirildiğinde bu noktanın hızı, uzuv boylarına ve C ‘nin geometrik konumuna bağlı olarak takip ettiği yörünge üzerinde değişkenlik göstermektedir.

Ancak endüstride bu noktanın takip ettiği yörüngeyi belirli bir kısmında veya tamamında sabit bir hızla hareket etmesinin istendiği durumlarda vardır. Bölgesel bir kısımda sabit hız verebilen mekanizmalar tasarlamak [9],[10] mümkün olmakla birlikte mekanizmanın dinamiğinden dolayı kontrol olmadan bu da tam olarak sağlanamaz. Gerçek uygulamalarda krank hızını ölçmek kolay iken bir yörünge üzerinde hareket eden bir noktanın hızını ölçmek oldukça zor ve maliyetlidir. Bu bakımdan biyel noktasının yörüngeyi sabit bir hızla takip etmesi değişken krank hızı ile sağlanabilir. Bu da mekanizmayı süren motorun kontrolü ile gerçekleştirilebilir. Bunun için bu biyel noktasının hızı ile krank hızı arasındaki kinematik bağıntıdan değişken krank hızı profili elde edilir ve bu hız profili referans alınarak krank hızı kontrol edilebilir. Peón-Escalante vd. [11], dört çubuk

mekanizmasında biyel üzerinde bir noktanın takip ettiği yörünge üzerindeki sabit hızla ilerlemesini sağlamak için krankın hızını kontrol etmeye çalışmışlardır. Bunun için DC motor ile sürülen dört çubuk mekanizmasının dinamiği analitik olarak elde edilmiş ve PID algoritması ile istenilen değişken krank hızı sağlanmaya çalışılmıştır. Kısa bir süre önce de Bañuelos vd. [12], aynı problem için yaptıkları deneysel çalışmalarını sunmuşlardır. Bu çalışmalarında biyel noktasının hızı anlık kamera görüntüleri ile belirlenmiş ve PID kontrol algoritması kullanılmıştır.

Mekanizmaların analizinde alışılan yol sistemin matematiksel modelinin elde edilmesi ve bunların sayısal yöntemlerle çözülmesidir. Ancak özellikle serbestlik dereceleri yüksek karmaşık dinamik sistemlerin analizleri zordur. Dinamik problemleri çözmenin diğer bir yolu da simülasyon programlarıdır. Matlab bu tür çalışmalar için geniş bir ortam sağlayabilmektedir. Matlab Simulink ile hem kontrol yapısı hem de işleyen dinamik model aynı ortamda blok yapılarla oluşturulup çalıştırılabilmektedir. Simscape Multibody ise kuvvet, sensör, mafsal ve uzuvlar gibi bloklar ile sistem modellendikten sonra hareket denklemini formüle eder ve aynı zamanda çözer [13]. Böylece kullanıcının mekanizmanın karmaşık dinamik denklemlerini elde etmesine gerek kalmamaktadır.

Bu çalışmada, DC motor ile tahrik edilen bir dört çubuk mekanizmasında biyel üzerindeki bir noktanın takip ettiği yörünge boyunca belirlenen sabit bir hızda hareketinin sağlanması problemi dikkate alınmıştır. Özellikle biyel noktasının hızı ile krank hızı arasındaki kinematik ilişki elde edilmiştir. Buna göre belirlenen bir hız için elde edilen değişken krank hızı profili referans alınarak PID kontrol tekniği ile krank hızı kontrol edilmiştir. Farklı olarak bu çalışmada mekanizmanın karmaşık dinamik denklemleri analitik olarak elde edilmeyip analiz için Matlab Simscape Multibody arayüzünden faydalanılmıştır. Belirli bir biyel noktası hızı için sayısal benzetim çalışması yapılmıştır.



Şekil 1: Dört çubuk mekanizmasının kinematik diyagramı

Kinematik Modelleme

Bu bölümde kontrol için referans olmak üzere krank hızı ile biyel üzerindeki noktanın hızı arasındaki kinematik ilişki elde edilecektir. Bunun için önce mekanizmanın vektörel çevrim denklemlerinden skaler bağ denklemleri ve uzuvların hızlarını giriş uzvunun hızına bağlı olarak bulunmasına yarayan hız etki katsayıları elde edilmiştir. Şekil 1'deki dört çubuk mekanizmasının vektörel çevrim denklemi üstel formdaki karmaşık sayılar ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{A}_0\mathbf{A} + \mathbf{AB} = \mathbf{A}_0\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_0\mathbf{B} \quad (1)$$

$$r_2 e^{iq} + r_3 e^{i\phi_1} = r_1 + r_4 e^{i\phi_2} \quad (2)$$

Bu vektörel denklemden iki adet skaler denklem elde edilir.

$$f_1(q, \phi_1, \phi_2) = r_2 \cos q + r_3 \cos \phi_1 - r_1 - r_4 \cos \phi_2 = 0 \quad (3)$$

$$f_2(q, \phi_1, \phi_2) = r_2 \sin q + r_3 \sin \phi_1 - r_4 \sin \phi_2 = 0 \quad (4)$$

Burada r_i , $i=1,2,3,4$ uzuv boylarını, q krank açısını ve ϕ_i , $i=1,2$ sırasıyla 3 ve 4 nolu uzuvların açılarını göstermektedir. Verilen bir q için bilinmeyen konum parametreleri ϕ_1 ve ϕ_2 bu iki denklemin çözümünden elde edilebilir. Diğer taraftan 3 ve 4 numaralı uzuvların açısal hızları $\dot{\phi}_1$ ve $\dot{\phi}_2$, krank hızı \dot{q} ya bağlı olarak hız etki katsayıları kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{\phi}_1 = g_1 \dot{q}, \quad \dot{\phi}_2 = g_2 \dot{q} \quad (5)$$

Hız etki katsayıları ise aşağıdaki gibi hesap edilir:

$$\mathbf{g} = -\mathbf{J}^{-1}\mathbf{f}' \quad (6)$$

Burada vektör ve matrisler kalın harflerle yazılmış olup \mathbf{J} Jakobi matrisi, \mathbf{g} hız etki katsayıları vektörü ve \mathbf{f}' bağ denklemlerinin giriş değişkeni q ya göre türevini ihtiva eden vektördür.

$$\mathbf{g} = \{g_1, g_2\}^T, \quad \mathbf{f}' = \left\{ \frac{\partial f_1}{\partial q}, \frac{\partial f_2}{\partial q} \right\}^T \quad (7)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial \phi_j}, \quad (i, j = 1, 2) \quad (8)$$

Dört çubuk mekanizması için bu parametreler aşağıdaki gibidir [5]:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -r_3 \sin \phi_1 & r_4 \sin \phi_2 \\ r_3 \cos \phi_1 & -r_4 \cos \phi_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{f}' = \begin{bmatrix} -r_2 \sin q \\ r_2 \cos q \end{bmatrix}$$

Denklemlerin (6)'nın çözülmesi ile dört-çubuk mekanizması için hız katsayıları aşağıdaki gibi bulunur:

$$g_1 = -\frac{r_2 \sin(q-\phi_2)}{r_3 \sin(\phi_1-\phi_2)}, \quad (10)$$

$$g_2 = -\frac{r_2 \sin(q-\phi_1)}{r_4 \sin(\phi_1-\phi_2)} \quad (11)$$

Biyel üzerindeki C noktasının konum vektörü:

$$\mathbf{A}_0\mathbf{C} = \mathbf{A}_0\mathbf{A} + \mathbf{AC} \quad (12)$$

$$r_c = r_2 e^{iq} + r_c e^{i(\phi_1+\beta_c)} \quad (13)$$

Bu denklemin zamana göre türevi C noktasının hızını verecektir:

$$V_c = ir_2 \dot{q} e^{iq} + ir_c \dot{\phi}_1 e^{i(\phi_1+\beta)} \quad (14)$$

Bu denklemin gerçel ve sanal kısımları ayrı ayrı yazılarak hızın bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$V_{c_x} = -r_2 \dot{q} \sin q - r_c \dot{\phi}_1 \sin(\phi_1 + \beta_c) \quad (15)$$

$$V_{c_y} = r_2 \dot{q} \cos q + r_c \dot{\phi}_1 \cos(\phi_1 + \beta_c) \quad (16)$$

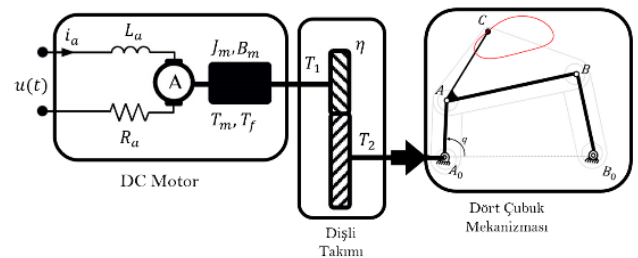
Bu denklemlerden krank hızı, C noktasının hızına bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\dot{q} = \sqrt{\frac{V_{c_x}^2 + V_{c_y}^2}{r_2^2 + r_c^2 g_1^2 + 2r_2 r_c g_1 \cos(q - \phi_1 - \beta_c)}} \quad (17)$$

Denklemler (17) verilecek bir $V_c (= V_{c_x}^2 + V_{c_y}^2)$ hızına bağlı olarak krankın her bir konumu q için krank hızının alması gereken değeri verecektir. Böylece C noktasının yörüngesi boyunca sabit bir hızla hareket edebilmesi için değişken krank hızı profili elde edilebilir. Bu değişken krank hızı kontrol algoritması için referans olacaktır. Bir başka deyişle krank hızı bu profili sağlayacak şekilde kontrol edilirse biyel noktasının istenilen sabit hız ile hareket etmesi sağlanabilecektir. Burada gerekli olan konum ve hız bilgileri Matlab Simscape Multibody simülasyon ortamında oluşturulan mekanizma modelinden elde edilmektedir. Aşağıdaki bölümde incelenen sistemin Simulink ile modellenmesi ve kontrol edilmesi açıklanmıştır.

Dinamik Modelleme Ve Kontrol

Daha önce de ifade edildiği gibi dinamik analiz için alışılmış olarak mekanizmanın hareket denklemleri elde edilir ve bu denklemler sayısal olarak çözülür. Krank hızının kontrolü için de mekanizmayı tahrik eden motorun modeli redüktör ile birlikte sisteme dahil edilir. Bu çalışmada, farklı olarak mekanizmanın karmaşık hareket denklemleri elde edilmeyecek olup bu iş Matlab Simscape Multibody Simülasyon arayüzüne bırakılacaktır. Bu çalışmada mekanizmanın DC motor ile tahrik edildiği ve motorun bir redüktör ile kranka bağlandığı göz önüne alınmıştır. DC motor, redüktör ve mekanizmadan oluşan mekatronik sistem şematik olarak Şekil 2' de gösterilmiştir.



Şekil 2: DC motor-redüktör-mekanizma modeli

Bir DC motorun matematiksel modeli Kirschhof'un gerilim yasasına göre Denklem (18) ile verilir [2]-[5]:

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + n K_g \dot{q} \quad (18)$$

Burada V_a giriş gerilimi, R_a , L_a ve i_a sırasıyla armatür direnci, indüktansı ve akımıdır. K_g motor gerilim sabiti ve n redüktörün giriş hızının çıkış hızına ve aynı zamanda çıkış torkunun giriş torkuna oranıdır:

$$n = \frac{T_2}{T_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (19)$$

Diğer taraftan DC motor ve redüktörden oluşan sistemin çıkış milindeki tork ifadesi Newton'un II. hareket yasasına göre aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$T_2 = n(-n J_m \ddot{q} - n B \dot{q} + T_m - T_f) \quad (20)$$

Bu tork aynı zamanda mekanizmayı tahrik etmek için kranka uygulanan torktur. Burada J_m rotorun kütle atalet momenti, B yataklardaki viskoz sürtünme, T_f fırça sürtünmesi, dişlilerdeki sürtünme ve kuru yatak sürtünmelerini ihtiva eden mekaniksel kayıp torkudur. Motor tarafından üretilen tork T_m ise motor tork sabiti K_m olmak üzere aşağıdaki gibidir:

$$T_m = K_m i_a \quad (21)$$

DC motor-redüktör ve dört çubuk mekanizmasından oluşan sistemin kontrol yapısı Şekil 3' te gösterilmiştir. $V_{C_{ist}}$, C biyel noktasının istenen yörünge takip hızıdır. Hız yörünge jeneratörünün çıkışı olan $\dot{q}_{yör}$ ise Denklem (17) ile elde edilen referans krank hızıdır. Kontrolör çıkışında, $u(t)$ sinyali motor girişine uygulanan gerilimdir. Bu voltaj sinyaline karşılık motor dinamiğinden türetilen tork dört

çubuk mekanizması girişine yani kranka uygulanmaktadır. Mekanizmanın çıkışından alınan konum değerleri yörünge üreticiye geri beslenirken krank hızı referans değerle karşılaştırılarak kontrolcüye gönderilir.

Bu çalışmada krank hızını kontrol etmek için PID kontrol algoritması kullanılmış olup $u(t)$ kontrol işareti aşağıdaki gibi ifade edilir:

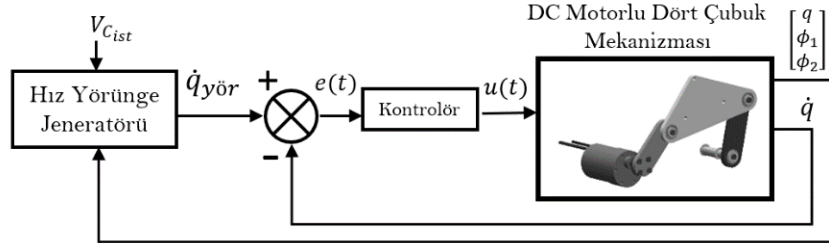
$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (22)$$

Burada K_p oransal kazanç (proportional gain), K_d türevsel kazanç (derivative gain), K_i integral kazanç (integral gain) ve $e(t)$ ise hata olup bu çalışmada krankın referans hızı $\dot{q}_{yör}$ ile anlık hızı \dot{q} arasındaki fark ile ifade edilmiştir:

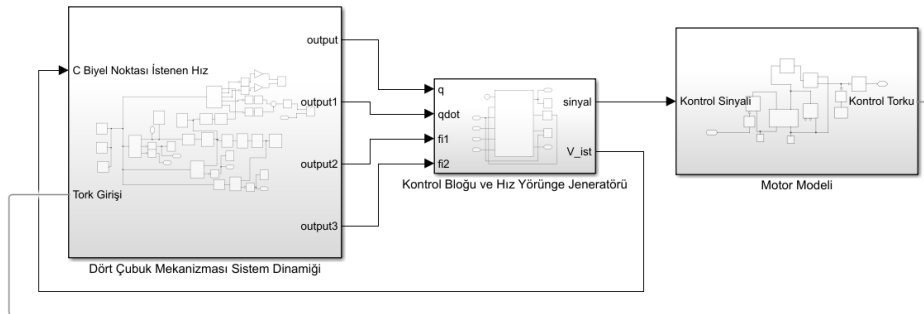
$$e(t) = \dot{q}_{yör} - \dot{q} \quad (23)$$

Sistemin Simulink Modeli

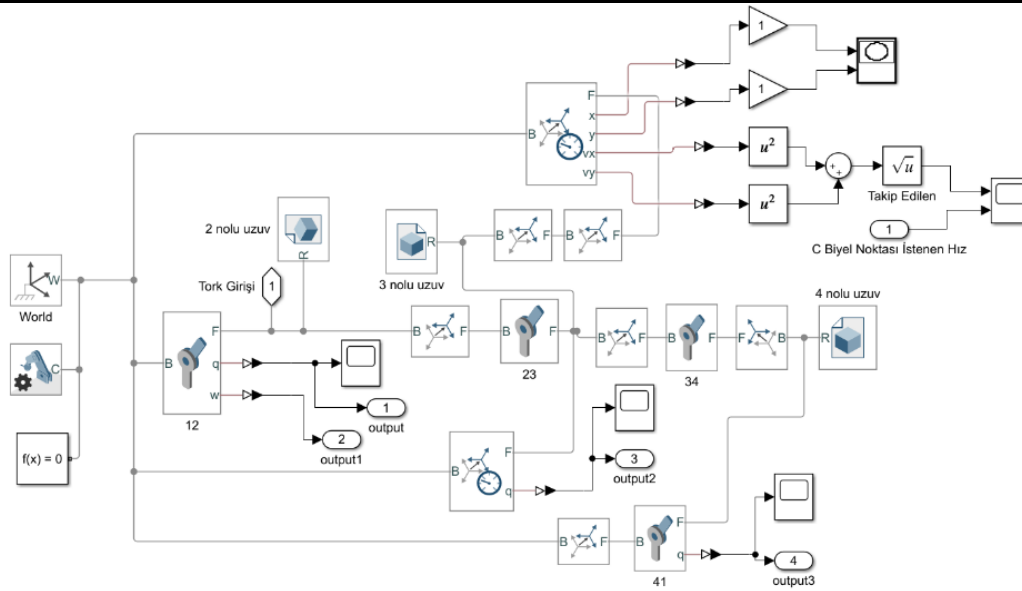
İncelenen sistemin Matlab Simulink Simscape ile oluşturulan modelinin ana blok yapısı Şekil 4' te verilmiştir. Ana model mekanizma bloğu, hız yörünge üretici ve kontrol bloğu ile DC motor modelinden oluşmaktadır. **Kontrol ve Hız Jeneratörü** bloğu **Dört Çubuk Mekanizması Sistem Dinamiği** bloğundan beslenmektedir. Gerekli olan açısal hız ve konum bilgileri bu bloktan alınmaktadır. **Kontrol bloğu ve Hız Yörünge Jeneratörü** çıkışındaki kontrol sinyali **Motor Modeli** girişine verilmektedir. **Motor Modeli** çıkışındaki tork kontrol sinyali **Dört Çubuk Mekanizması Sistem Dinamiği** bloğunu beslemektedir. Bu blokların iç yapısı da sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 de verilmiştir.



Şekil 3: DC motor-redüktör ve dört çubuk mekanizmasından oluşan sistemin kontrol yapısı



Şekil 4: DC motor kontrollü, değişken hız yörüngesini izleyen dört çubuk mekanizmasına ait ana model yapısı



Şekil 5: Dört Çubuk Mekanizması Sistem Dinamiği alt sistemine ait blok diyagramı.

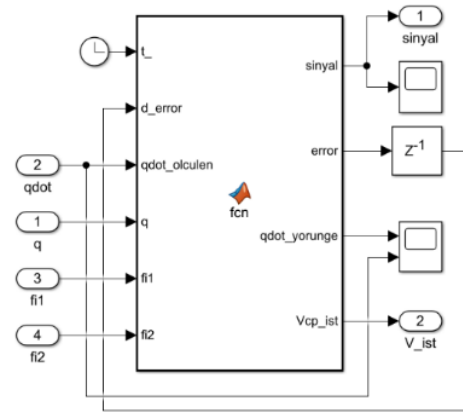
Şekil 5' te verilen blok yapısı mekanizmanın hem kinematikliğini hem de dinamikliğini içermektedir ve mekanizmaya ait tüm konum ve hız bilgileri alınabilmektedir.

Mekanizma bloğu, genel olarak mekanizmayı oluşturan katı cisimler, mafsallar ve bunları konumlandırmak için kullanılan **Rigid Transform** bloklarından oluşmaktadır. Katı cisimler, SolidWorks gibi katı modelleme programları ile oluşturulabildiği gibi doğrudan Simulink'in hazır kütüphanesinden de eklenebilirler. Simscape Multibody ortamında bulunan bu 3B nesnelere ait bloklarda kütle değeri girildikten sonra, kütle merkezi, kütle atalet momenti gibi bilgiler otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu bilgiler daha katı cismin 3B modeli oluşturulurken belirlenen noktalarına yerleştirilen referans eksene bağlı olarak türetilmektedir. Yine uzuvların konumları ve hızları gibi kinematik bilgiler bu referans eksenlere bağlı olarak alınabilmektedir. Mekanizmadaki mafsallar da komşu iki uzuv üzerindeki eksenler arasına yerleştirilir. Şekil 5' te "12", "23", "34" ve "41" ile gösterilen bloklar dört çubuk mekanizmasına ait mafsal bloklarını temsil etmektedir. Mekanizmayı tahrik eden tork girişi ve sürtünmeler de bu mafsal bloklarında tanımlanabilmektedir. Böylece Simscape Multibody uzayında birbirine bağlanan nesnelere simülasyon çalıştığında kuvvetlerin etkisiyle konumları değişir. Mafsallar yönelimleri değişen eksenlerin değişim miktarını sürekli takip eder.

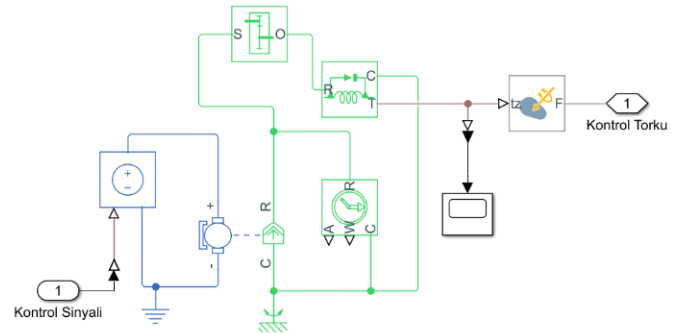
2 nolu uzvun takip etmesi gereken hız yörünge jeneratörü ve kontrol algoritmasının uygulandığı **Kontrol Bloğu ve Hız Yörünge Jeneratörü** isimli Matlab fonksiyon bloğu Şekil 6' da verilmiştir. Bu fonksiyon giriş uzvunun izlemesi gereken referans hız yörüngesini hesaplayabilmek için gerekli mekanizmaya ait konum bilgilerini (q, ϕ_1, ϕ_2) Şekil 5' teki mekanizma bloğundan almaktadır. PID algoritması da bu blok içerisinde yer almaktadır. Buradan elde edilen kontrol sinyali bu bloğun çıkışıdır.

Matlab Simscape' te oluşturulan DC motor ve redüktöre ait dinamik modelin blok şeması da Şekil 7' de verilmiştir. DC

motor bloğunda rotor ataleti, sönüm, indüktans, direnç gibi motora ait parametrelerin değerleri girilmektedir. Bu bloğun girişi kontrol bloğundan gelen kontrol sinyaline bağlıdır. Bu bloğun çıkışı mekanizmayı süren kontrol torkudur. Bu tork "12" isimli döner mafsala bloğuna verilmektedir.



Şekil 6: Kontrol Bloğu ve Hız Yörünge Jeneratörü alt sistemine ait fonksiyon bloğu



Şekil 7: DC Motor Modeli alt sistemine ait blok diyagramı

Sayısal Benzetim Çalışması

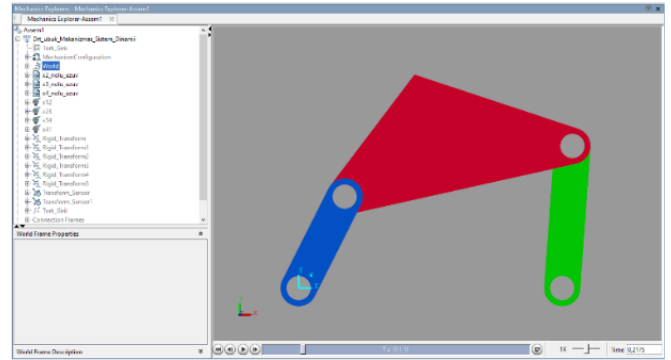
Bu bölümde, DC motor-redüktör-mekanizma dan oluşan sistemin kontrolü için yukarıda oluşturulan Simulink modeli kullanılarak sayısal benzetim çalışması yapılmıştır. Mekanizma ve DC motora ait parametreler Tablo 1’ de verilmiş olup bu parametreler Simulink modelinde ilgili bloklarda tanımlanmıştır. Uzun boyları ve kütle değerleri [11] nolu referanstan alınmıştır. Mekanizmanın 3B katı modeli SolidWorks ile oluşturulmuş ve Simscape ile Simulink ortamına aktarılmıştır. Uzunların kütsel atalet moment değerleri doğrudan Simulink tarafından uzun biçim ve kütle bilgilerinden otomatik olarak elde edilmiştir. Mekanizma mafsallarında sürtünme olmadığı ve yerçekimin mekanizmanın çalışma düzleminde aşağı doğru etki ettiği varsayılmıştır. Motor mili çıkışında 1:50 oranında hız düşümü sağlayan bir redüktör bulunmaktadır. Motor voltajı 12 V olduğundan kontrol gerilimi bu voltaj ile sınırlanmıştır.

Benzetim çalışmasındaki biyel üzerindeki C noktasının takip ettiği yörünge Şekil 1’ de görülen ile aynı olup istenilen sabit hız $V_{C_{ist}}=0.3$ m/s olarak alınmıştır. Bu çalışmada tasarlanan PID kontrolcüde oransal, türevsel ve integral katsayıları deneme yanılma tekniği ile sırasıyla $K_p=0.3$, $K_d=0.1$, $K_i=2$ olarak belirlenmiştir.

Mekanizmanın giriş uzvu sıfır radyan konumunda durgun halde iken simülasyon başlatılmıştır. Yani başlangıç şartları sıfır alınmıştır. Şekil 8’de sistem çalışırken alınan bir ekran görüntüsü verilmiştir. C biyel noktasının 1.5 saniye boyunca olan hız değişimi Şekil 9’ da verilmiştir. Görüldüğü üzere, simülasyon boyunca C biyel noktasının istenilen hız değeri olan 0.3 m/s etrafında yaklaşık ± 0.002 m/s civarında oldukça küçük salınımlar yapmaktadır. En büyük aşma değeri 0.341 m/s, kontrolün kabul edilebilir tolerans aralığına yerleşme zamanı 0.42 s ve yükselme zamanı ise 0.008169 s olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre C noktasının hızı V_C , istenilen referans hız değeri etrafında ihmal

edilebilecek kadar küçük bir hata payı ile başarılı bir şekilde kontrol edilmiştir.

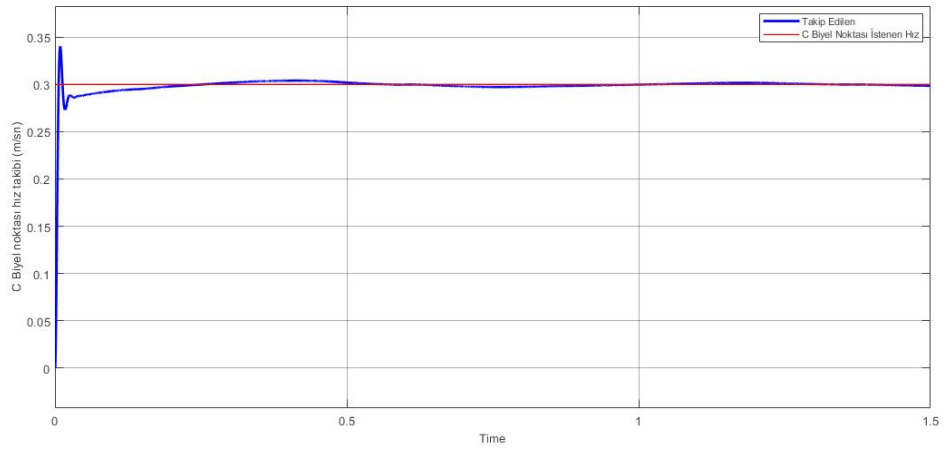
C biyel noktasının yörüngesi boyunca $V_{C_{ist}}=0.3$ m/s sabit hızda hareket edebilmesi için gerekli değişken krank hızı profili $\dot{q}_{yör}$ ile sistemin kontrol edilmesi sonucu elde edilen krank hızı \dot{q} nın karşılaştırması da Şekil 10’ da verilmiştir. Bu grafikte de her iki hızın hemen hemen örtüştüğü görülmektedir. Kontrol süresince 2 numaralı giriş uzvuna uygulanan T_2 kontrol torkunun zamanla değişim grafiği Şekil 11’ de verilmiştir. Buna göre durgun haldeki dört çubuk mekanizmasını istenen hızda harekete geçirmek için en fazla 0.75 Nm tork uygulanması gerekmektedir. Yerleşme zamanından sonra gerekli tork ± 0.1 Nm civarında salınım yapmaktadır. DC motor girişine uygulanan kontrol geriliminin zamanla değişim grafiği de Şekil 12’ de verilmiştir. Sistemin ilk hareketinde 1.5 V’ luk bir gerilime ihtiyaç varken sonrasında 0.18 V civarında değişim göstermektedir. Bu düşük tork ve gerilim değerlerinin seçilen mekanizmanın hafifliğinden ve motor devir sayısının yüksek olmasından kaynaklandığını belirtmek gerekir.



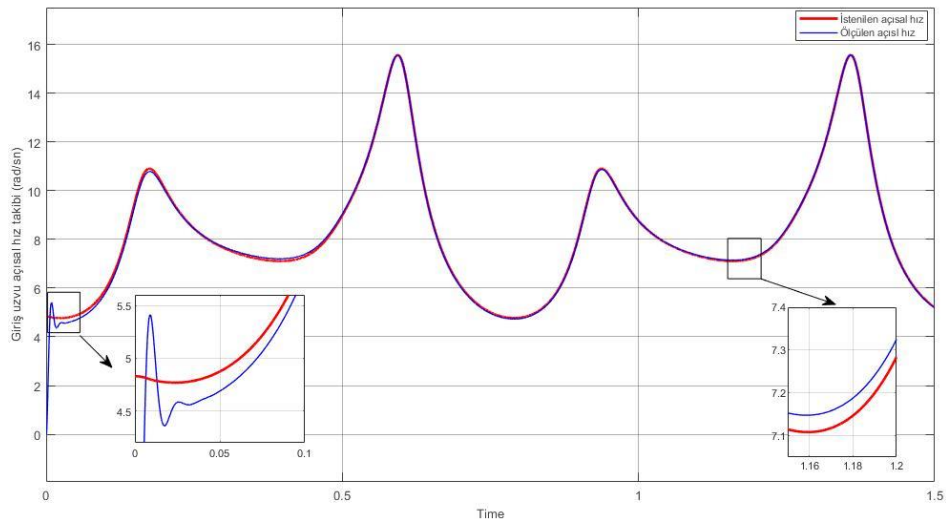
Şekil 8: Matlab Simscape Multibody’de tasarlanan Dinamik sisteme ait üç boyutlu simülasyon modeli

Tablo 1: Dört çubuk mekanizması ve DC motor modeline ait parametre değerleri

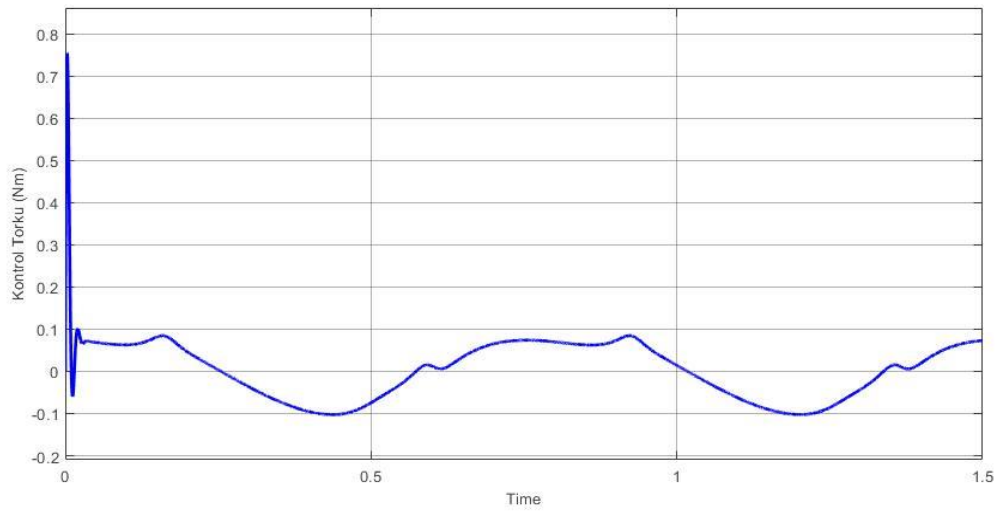
Mekanizma parametreleri						
Parametre	Uzun no (i)					
	1	2	3	4		
r_i (mm)	108.91	42.26	96.44	58.78		
c_i (mm)		21.13	0.04781	29.39		
m_i (kg)		0.03349	0.2586	0.00547		
J_i (kg-m ²)		0.00000962	0.000224	0.0000023		
β_i (rad)	0.0	0.0	0.2268	0.0		
DC Motor parametreleri						
R	L	K_m	K_g	J_m	T_f	B
(Ω)	(H)	(Nm/A)	(Vs)	(kgm ²)	(Nm)	(Nms)
0.0379	0.0001	6.9724e-4	6.9724e-4	3.409e-7	0.00	1.132e-6
Güç (kW)	Tork (Nm)	Hız (rpm) (redüktörlü)	Voltaj (V)	Akım (A)		
0.04	1.47	330	12	<6.0		



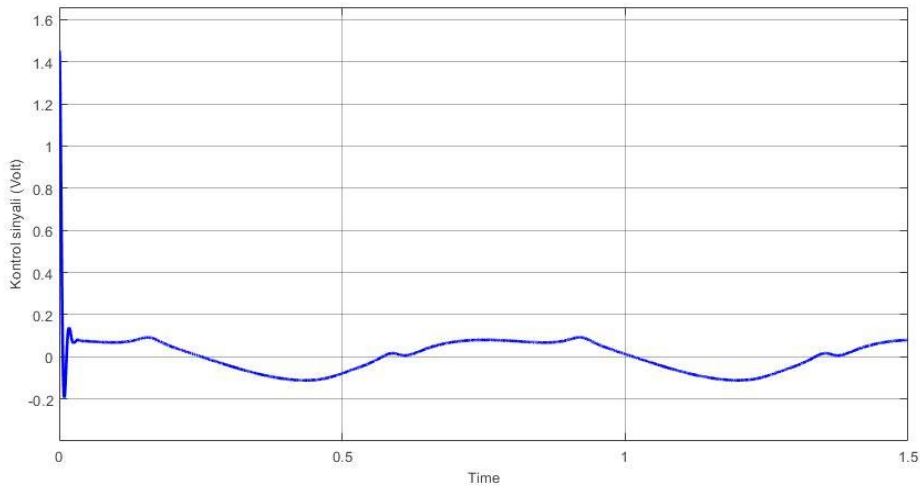
Şekil 9: C biyel noktasının istenen ve kontrol sonucu elde edilen hızlarının karşılaştırılması.



Şekil 10: Sabit yörünge hızı için gerekli krank hızı ile kontrol sonucu elde edilen krank hızının karşılaştırılması.



Şekil 11: Sabit yörünge hızı için kranka uygulanması gereken T_2 kontrol torkunun zamanla değişimi.



Şekil 12: Mekanizmayı tahrik eden DC motora uygulanan kontrol geriliminin zamanla değişimi.

Sonuç

Bu çalışmada bir dört çubuk mekanizmasında C biyel noktasının yörüngesi boyunca sabit hızla hareket etmesi için gerekli değişken krank hızı profili elde edilmiş ve PID yöntemi ile kontrolü yapılmıştır. Bu amaçla Matlab Simscape arayüzü kullanılmıştır. Böylece mekanizmanın karmaşık dinamik denklemlerinin elde edilmesine gerek kalmadan analiz yapılabilmektedir. Yapılan sayısal benzetim çalışmasında giriş uzvu krank, değişken olan açısal hız profilini takip etmiş ve C biyel noktası tüm yörüngesi boyunca istenilen $V_{C_{ist}}=0.3$ m/s hızından çok küçük sapmalarla hareket edebilmiştir. Böylece incelenen sistemin karmaşık dinamik modeli oluşturulmadan basit bir şekilde Simscape Multibody kullanılarak oluşturulabileceği ve sonuçların yüksek doğrulukla elde edilebileceği gösterilmiştir. Bununla beraber gerçek bir sistem üzerinde de deneyerek sonuçların incelenmesi faydalı olacaktır. Bu bağlamda yazarların gerçek bir model üzerinde deneysel çalışmalarını devam ettirmektedir.

Kaynakça

- [1] E. Söylemez, *Makine Teorisi-I Mekanizma Tekniği*, MMO yayınevi, 2021.
- [2] J. Tao and J.P. Sadler, “Constant speed control of a motor driven mechanism system”, *Mechanisms and Machine Theory*, vol. 30, no. 5, pp. 737-748, 1995.
- [3] Ö. Gündoğdu and K. Erentürk, “Fuzzy Control of a dc motor driven four-bar mechanism”, *Mechatronic*, Cilt:15, s:423-438, 2005.
- [4] G. Şevkat ve S. Telli, “Elektrik Motoru İle Tahrik Edilen Dört Çubuk Mekanizmasının Kayan Kip Hız Kontrolü”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Dergisi*, Cilt:13, No:2, s: 15-26, 2008.
- [5] O. Çakar and A.K.Tanyildizi, “Application of moving sliding mode control for a DC motor driven four-bar mechanism”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol.10, no. 3, pp. 1-13, 2018.
- [6] M. Salah, A. Al-Jarrah, E. Tatlicioglu et al. “Robust Backstepping Control for a Four-Bar Linkage Mechanism Driven by a DC Motor”, *J Intell Robot Syst*, vol. 94, pp. 327-338, 2019.
- [7] G.O Koca, Z.H Akpolat and M. Özdemir, “Type-2 fuzzy sliding mode control of a four-bar mechanism”, *Int J Model Simul*, vol. 31, pp. 60-68, 2011.
- [8] A. Al-Jarrah, M. Salah, K.S. Banihani, et al. “Applications of various control schemes on a four-bar linkage mechanism driven by a geared DC motor”, *WSEAS Trans Syst Contr*, vol. 10, pp. 584-597, 2015.
- [9] C.F. Chang, “Synthesis of adjustable four-bar mechanisms generating circular arcs with specified tangential velocities”, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 36, no. 3, pp. 387-395, 2001.
- [10] H.S. Yan and R.C. Soong, “Kinematic and dynamic design of four-bar linkages by links counterweighing with variable input speed”, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 36, no. 9, pp. 1051-1071, 2001.
- [11] R. Peón-Escalante, M. Flota-Bañuelos, L.J. Ricalde, C. Acosta, G. S. Perales, “On the coupler point velocity control of variable input speed servo-controlled four-bar mechanism”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol.8, no.11, pp.1-9, 2016.
- [12] M. Flota-Bañuelos, R. Peón-Escalante, L.J. Ricalde, B.J. Cruz, R. Quintal-Palomo, J. Medina, “Vision-based control for trajectory tracking of four-bar linkage”, *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*, vol. 43, no.324, pp. 1-11, May. 2021.
- [13] Matlab,2021,(n.d.).<https://www.mathworks.com/products/simmechanics.html>.