



TEK EKLEMLİ ESNEK ROBOT KOLUNUN SIRALI KONTROL İLE DENETLENMESİ

H. Ali ERTAŞ^{1*}, Onur ÖRNEK²

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Sıralı Kontrol,
Giriş Şekillendirme,
PID Kontrol,
Hibrit Kontrol.

Öz

Mekanik sistemler çalışmaları esnasında titreşimlere ve bozucu etkilere maruz kalırlar. Bu etkilerden kurtulmak için çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Sıralı kontrol, PID kontrol ve giriş şekillendirmeyi bir araya getiren bir kontrol yöntemidir. Temelinde giriş şekillendirme kullanarak sistemin hızlı ve titreşimsiz bir şekilde istenen referans değerine ulaşması sağlandıktan sonra, anahtarlama yardımıyla PID kontrole geçilerek sistemin bozucu etkilere karşı dayanıklı olmasını sağlamak yatar. Sıralı kontrol, PID kontrol ve giriş şekillendirmeyi optimum zamanlarda kullandığı için, her iki kontrol yönteminin avantajlarından faydalanırken, dezavantajlarından kurtulmayı amaçlar. Sıralı kontrolün, doğru uygulandığında, her iki kontrol yönteminin birlikte kullanıldığı hibrit kontrol yöntemlerinden avantajlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada tek eklemlili esnek robotun transfer fonksiyonu MATLAB-Simulink ortamında modellenmiştir. Modellenen sisteme sırasıyla basamak giriş, giriş şekillendirme, PID kontrol ve sıralı kontrol uygulanarak sistem yanıtları elde edilmiş, çıkışlar performans açısından karşılaştırılarak sistem performansının iyileştirilmesi için öneriler sunulmuştur.

CONTROL OF A SINGLE LINK FLEXIBLE MANIPULATOR USING SEQUENCED CONTROL

Keywords

Sequenced Control,
Input Shaping,
PID Control,
Hybrid Control.

Abstract

Mechanical systems are subject to various vibrations and disturbances while working. To get rid of such effects certain control systems have been developed. Sequenced control is a technique that utilizes both PID control and input shaping. It uses input shaping to have the system reach the reference point quickly and without causing vibrations and then switches to PID control to allow the system to be protected against disturbances. Because sequenced control uses PID control and input shaping at optimum times it aims to make use of both of their advantages while negating their disadvantages. When done properly, it's proven to produce better results than the hybrid control techniques which use both input shaping and PID control together. In this study, transfer function of a single link flexible manipulator has been put into a Simulink Model and it has been subjected to step input, zero vibration input shaping, PID control and sequenced control and the system outputs has been compared. Suggestions have been provided to further improve system performance.

Alıntı / Cite

Ertas, H., Örnek, O., (2022). Tek Eklemlili Esnek Robot Kolunun Sıralı Kontrolle Denetlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 495-503.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. A. Ertas, 0000-0002-8788-9011
O. Örnek, 0000-0002-9879-0674

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	06.07.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	04.01.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	16.01.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.06.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: ertas@cumhuriyet.edu.tr, +90-346-219-1010 (1320)

1. Giriş (Introduction)

Dinamik sistemleri kontrol etmek için uygulanan kuvvetler çeşitli titreşimlere sebep olur. Bu titreşimlerin ve sisteme sonradan etki edecek olası bozucu etkilerin yok edilmesi için çeşitli kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kontrol sistemlerini genel olarak açık çevrim, kapalı çevrim ve her iki yöntemin birleşimi olan hibrit kontrol sistemleri olarak üç ana grupta toplamak mümkündür.

Açık çevrim kontrol yöntemleri sistemin doğru bir şekilde matematiksel modellenmesi ve istenen çıkış için doğru girişin hesaplarak sisteme uygulanması temeline dayanır. Genel olarak, istenen çıkışı çok hızlı bir şekilde üretmelerine rağmen, modelleme hataları ve bozucu etkilere karşı tamamen savunmasızlardır. Giriş şekillendirme bu açık çevrim kontrol tekniklerinden bir tanesidir ve temelinde sisteme uygulanacak olan giriş sinyalinin dolaylı olarak oluşacak olan titreşimlerin, giriş sinyalinin parçalara ayrılarak uygulanmasıyla kendi kendine yok edilmesi esasına dayanır.

Kapalı çevrim kontrol yöntemlerine bakıldığında, temelinde sistemin istenen bir referans değerine ulaştırılmak için bir kontrol sinyaliyle uyarılması ve sistem çıkışının sensörler aracılığıyla sürekli olarak gözlenerek olası hataların yeni kontrol sinyalleriyle düzeltilmesi yatar. PID kontrol, üzerinde uzun yıllar çalışılmış ve yaygın kullanıma sahip en bilinen kapalı çevrim kontrol yöntemlerinden biridir. Açık çevrim kontrol yöntemlerine göre doğası gereği daha yavaş cevap vermesine rağmen sistemi olası bozucu etkilere karşı dayanıklı hale getirmesi göz ardı edilemeyecek kadar önemli bir avantajdır.

Hibrit kontrol yöntemleri açık ve kapalı çevrim kontrol tekniklerini çeşitli şekillerde bir araya getirerek her ikisinin de avantajlı yönlerinden yararlanmayı amaçlar. Hibrit kontrol yöntemlerinden bazıları bu iki kontrol sistemini sürekli olarak birlikte kullanırken, bazıları sırayla ya da gerekli olduğu zamanlarda anahtarlama yöntemiyle devreye alarak kullanma temeline dayanır. Sıralı kontrol, Örnek ve Ertaş'ın (2020) çalışmasında öne sürdüğü, açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol yöntemlerinin sırayla kullanılmasına dayanan bir kontrol yöntemidir. Temelinde bir anahtar yardımıyla her iki kontrol yönteminin de yalnızca en avantajlı olduğu zamanlarda devreye alınarak hem kapalı çevrim kontrol yöntemlerine göre daha hızlı, hem de açık çevrim kontrol yöntemlerinin aksine bozucu etkilere dayanıklı bir sistem elde etmek yatar.

Tek eklemlili esnek robot kolu nonlineer titreşimlere sebep olması nedeniyle üzerinde çok farklı yöntemler denenmiş bir kontrol problemi. Bu çalışmada tek eksenli esnek robot kolu Simulink üzerinde modellenerek üzerinde giriş şekillendirme, PID kontrol ve sıralı kontrol yöntemleri denenerek çıkış performansları incelenmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Bu konu hakkındaki bilimsel çalışmaları üç ana başlıkta toplamak mümkündür: Giriş şekillendirme hakkında yapılan çalışmalar, PID kontrol ve diğer kapalı çevrim kontrol yöntemleri hakkında yapılan çalışmalar ve her iki yöntemin bir araya getirildiği hibrit kontrol sistemleri hakkında yapılan çalışmalar. Yapılan literatür taramasında her bir yöntemdeki temel ilkeler ve güncel gelişmeler incelenerek çalışmaya yön verilmiştir.

Singhose ve Singh (2002) çalışmasında giriş şekillendirme tekniğinin temellerini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Ünsal ve Gürleyük (2012) herhangi bir sistem için gerçek zamanlı giriş şekillendirici tasarımı yapılırken atılması gereken adımları detaylı bir şekilde göstermiştir. Ramon ve Comin (2018) Simulink üzerinde farklı giriş şekillendirme tekniklerinin endüstriyel testini yapmış, farklı yöntemlerin performanslarını karşılaştırmıştır. Parman vd. (2020) esnek uzay araçlarının hareketlerinin iki sabit genlikli giriş şekillendirme darbesiyle kontrol edilebileceğini göstermiştir. Duc La ve Kien Trong (2019) yük taşıyan crane sisteminde giriş şekillendirme ve radyal yayı bir arada kullanarak sistem titreşimlerinin azaltılabileceğini kanıtlamış, sistem performansını yalnızca yay ve yalnızca giriş şekillendirme kullanılan sistemlerle karşılaştırmıştır. Ertaş (1995) doktora tezinde, robotik bir sistemde esnek manipülatörler kullanıldığında, robot kolunun esnekliğinden dolayı oluşan titreşimlerin çıkışa olan negatif etkilerini ve çıkışta oluşan saptmaları incelemiştir. Yavuz ve Kapucu (2012) esnek sistemlerin kontrolünde titreşimleri azaltmak için hibrit giriş şekillendirme teknikleri kullanmıştır. Thomsen ve Soe-Knudsen (2021) endüstriyel robot kollarında titreşimleri azaltmak için çok modlu zamana göre değişen giriş şekillendirme tekniklerinin kullanılabileceğini göstermiştir.

Tumari vd. (2013) köprülü vinç sistemlerinde salınımların azaltılması için PID ve hibrit giriş şekillendirme tekniklerinin birlikte kullanılabileceğini göstermiştir. Oliveira vd. (2018) çalışmasında belirsiz (öngörülemez) titreşimlere sahip sistemlerin kontrolünde PID posicast yöntemini kullanmıştır. Bu yöntemde sisteme uygulanan giriş öncelikle giriş şekillendirici tarafından şekillendirilip PID kontrolöre gönderilmektedir. Bu kontrol yöntemine genel olarak closed loop input shaping de denilmektedir. Huey (2006) doktora tezinde PID kontrol ve giriş

şekillendirmenin akıllı bir şekilde bir araya getirilmesi için farklı çözüm önerilerinde bulunmuştur. Bu önerilerin içinde giriş şekillendirmenin PID kontrol geri besleme döngüsünün içinde ve dışında olduğu çeşitli teknikler bulunmaktadır. Her yöntemin kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Oliveira ve Vrancic (2012) çalışmasında eksik sönümlü (underdamped) sistemlerde giriş şekillendirme ve PID kontrolün sırayla kullanılarak sistemden daha iyi bir performans alınabileceğini öne sürmüştür. Örnek ve Ertaş (2020) esnek sistemlerin kontrolünde PID kontrol ve giriş şekillendirmeyi sırayla kullanarak her ikisinin de avantajlarını barındırıp dezavantajlarından kurtulan sıralı kontrol yönteminin matematiksel temellerini atmıştır, tetikleme mekanizmasının akıllı hale getirilmesi sağlandığında, sıralı kontrol yönteminin her iki kontrol yönteminden daha avantajlı olacağını göstermiştir. Örnek ve Ertaş (2020)'ın çalışmasında giriş şekillendirmenin PID kontrole göre daha hızlı yanıt verdiği, ancak bozucu etkilere karşı savunmasız olduğu görülmüş, bu iki kontrol sistemini sıralı bir şekilde bir araya getirerek hem PID kontrolden daha hızlı hem de giriş şekillendirmenin aksine bozucu etkilere dayanıklı bir kontrol yönteminin geliştirilebileceği gösterilmiştir.

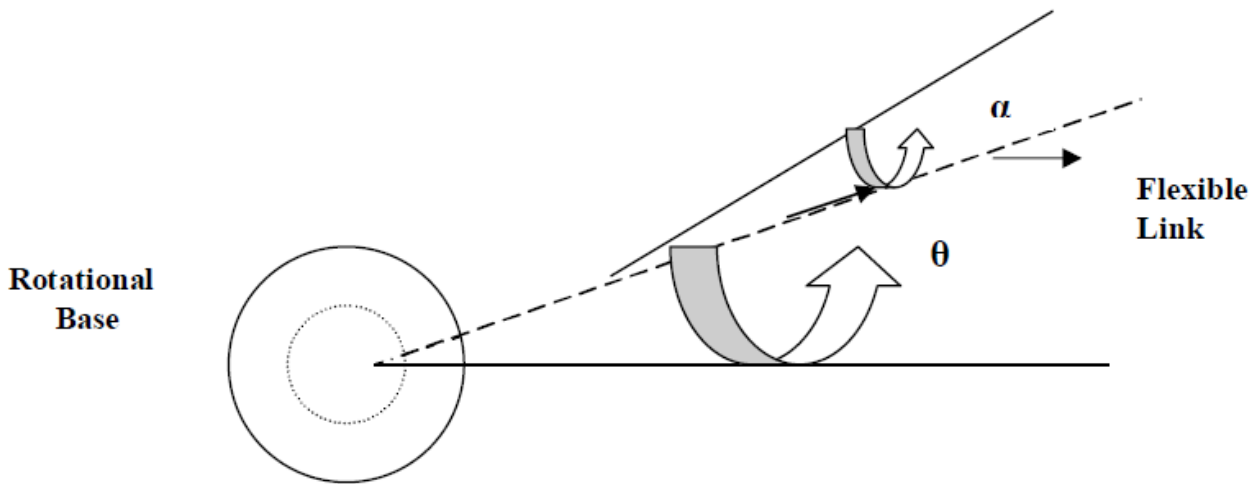
Yapılan literatür taramasında esnek robot kollarının kontrolünde sıralı kontrol ya da benzerlerinin kullanıldığına rastlanmamıştır. Bu sebeple bu çalışmada Örnek ve Ertaş (2020)'ın öne sürdüğü sıralı kontrol sistemi, esnekliği ve nonlineer davranışları sebebiyle kontrolü oldukça zor olan tek eklemlili esnek robot koluna uygulanarak sistemin performansı incelenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada tek eklemlili esnek robot kolunun transfer fonksiyonu MATLAB-Simulink ortamına aktarılmıştır. Elde edilen sisteme sırasıyla basamak giriş, sıfır titreşim giriş şekillendirme (Zero vibration input shaping), PID kontrol ve sıralı kontrol uygulanarak çıkışları elde edilmiştir. Farklı kontrol yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları incelenerek, sistem performansının geliştirilmesi için öneriler sunulmuştur.

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Tek eklemlili esnek robot kolunun matematiksel modelinin ve transfer fonksiyonunun elde edilmesinde Rana ve Deepika (2014)'nin çalışmasından yararlanılmıştır. Sistemin Şekil 1 (Rana ve Deepika)'de verildiği gibi serbest cisim diyagramı elde edildiğinde θ açısı radyan cinsinden motor açısını, α ise yine radyan cinsinden esnek koldaki bükülme açısını ifade etmektedir.



Şekil 1. Tek eklemlili esnek robot kolu (Single link flexible manipulator)

Eşitlik (1) Rana ve Deepika (2014)'de sistemin giriş gerilimi ve θ açısına bağlı transfer fonksiyonu, Tablo 1'de ise sistemin temel parametreleri verilmiştir. Sistemin kinematik denklemleri, potansiyel ve kinetik enerji ifadeleri, Lagrange denklemleri ve transfer fonksiyonunun detaylı bir şekilde elde edilmesinin anlatımı için Rana ve Deepika (2014)'nin çalışmasına göz atılabilir. Bu çalışmada Rana ve Deepika (2014) elde ettiği transfer fonksiyonu temel alınarak farklı kontrol yöntemlerinin çıkış performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

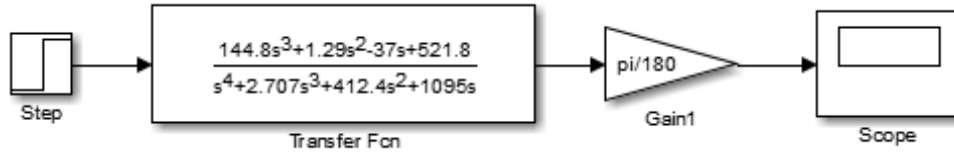
$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V_m} = \frac{144.8s^3 + 1.29s^2 - 37.0s + 521.8}{s^4 + 2.707s^3 + 412.4s^2 + 1095s} \quad (1)$$

Tablo 1. Tek eklemli esnek robot kolunun parametreleri (Parameters of single link flexible manipulator)

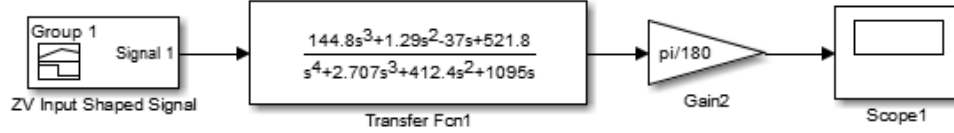
Esnek kolun kütlesi, $m = 0.065$ kg	Esnek kolun uzunluğu, $L = 0.3$ m
Uç işlevcisi kol uzunluğu sapması, $d = \alpha \cdot L$	Armatür direnci, $R_m = 2.6 \Omega$
Yüklü durumda eylemsizlik momenti eşleniği, $J_{eq} = 0.099$ kg.m ²	Eklem eylemsizlik momenti, $J_{arm} = 0.00195$ kg.m ²
Viskoz sönümlenme katsayısı eşleniği, $B_{eq} = 1.99$	Dişli kutusu verimi, $\eta_m = 0.69$
Motor verimi, $\eta_m = 0.69$	Motor tork katsayısı, $K_t = 0.00767$
Geri e.m.f. tork sabiti, $K_m = 0.00767$	Dişli oranı, $K_g = 70$
Eklem doğal frekansı, $f_c = 3.2$ kHz	Eklem sertlik katsayısı, $K_{stiff} = 2 \llbracket f_c \cdot J_{arm}$
Armatür giriş gerilimi = V_m	

3.2. Basamak Giriş Ve Giriş Şekillendirme Cevapları (Step Response And Input Shaping Response)

Transfer fonksiyonu elde edilen sistem MATLAB-Simulink üzerinde modellenerek sisteme sırasıyla basamak giriş (Step input) ve sıfır titreşim giriş şekillendirme (Zero vibration input shaping) uygulanmıştır. Şekil 2'de basamak giriş uygulanan sistem Şekil 3'te giriş şekillendirme uygulanmış sistem gösterilmiştir. Sistemdeki kazanç (gain) blokları çıkışın radyandan dereceye çevrilmesi için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar bölümünde sisteme uygulanan step ve sıfır titreşim giriş şekillendirme sinyalleri gösterilmiş, sistemin çıktıları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



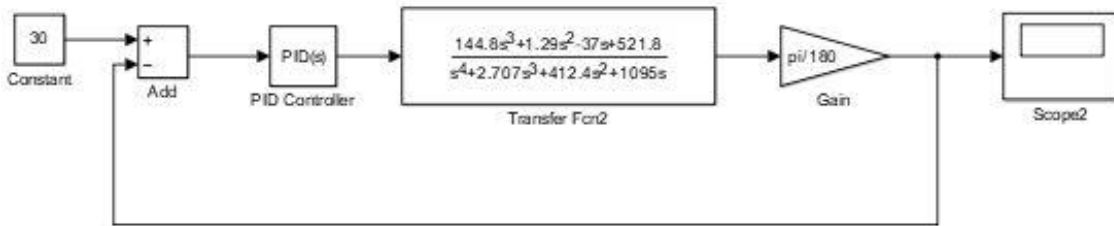
Şekil 2. Basamak giriş uygulanan sistemin Simulink modeli (Simulink model of the system with step input)



Şekil 3. Giriş şekillendirme uygulanan sistemin Simulink modeli (Simulink model of input shaped system)

3.3. PID Kontrol Cevabı (PID Control Response)

Bu bölümde sisteme PID kontrol uygulanmıştır. Referans değeri olarak 30 derece seçilmiştir. PID parametre seçiminde kontrolörün sisteme uyguladığı giriş gerilimine dikkat edilmiştir. 200V'a kadar dayanıklı DC motor kullanılacağı kabulüyle seçim yapılmıştır. Yaklaşık olarak 1 derece/saniye hıza yakın değerler tercih edilmiş ve kontrol esnasında 200V üzerinde sistem girişinin uygulanmamasına dikkat edilmiştir. Şekil 4'te PID kontrollü sistemin Simulink modeli gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar bölümünde sisteme uygulanan giriş sinyali ve sistemin PID kontrol çıkışı incelenmiştir.

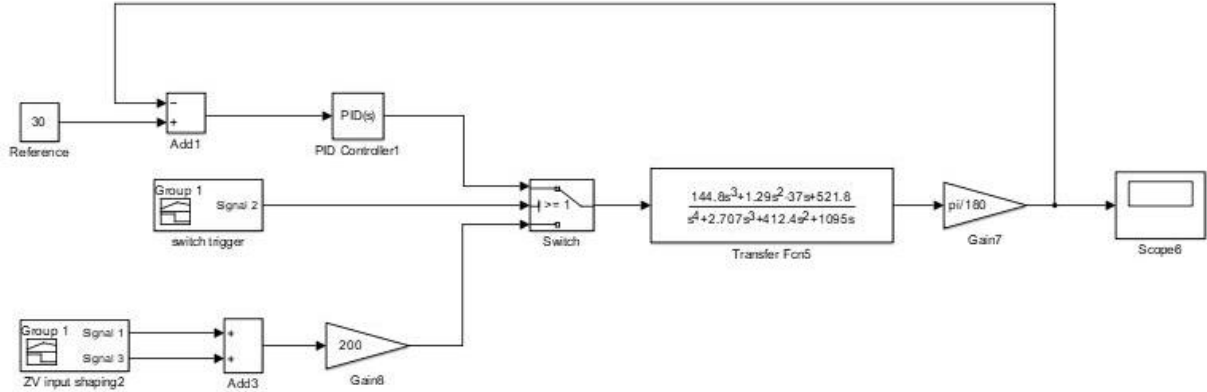


Şekil 4. PID kontrollü sistemin Simulink modeli (Simulink model of PID controlled system)

3.4. Sıralı Kontrol Cevabı (Sequenced Control Response)

Bu bölümde sisteme PID kontrol ve giriş şekillendirmenin sırayla kullanıldığı sıralı kontrol uygulanmıştır. Sistemin en az salınım ve aşım ile 30 dereceye gelerek sabitlenmesi amaçlanmaktadır. Öncelikle sisteme sıfır titreşim giriş

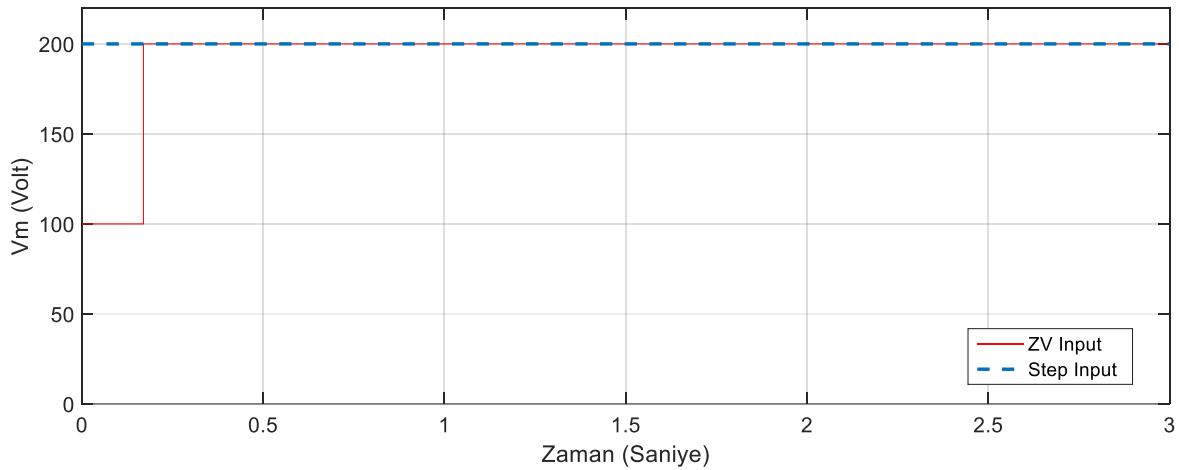
şekillendirme sinyali uygulanmıştır. Sistem 30 dereceye yaklaştığında yine giriş şekillendirilmiş “Dur” sinyali uygulanmıştır. Sistemin hızı bilindiğinden giriş şekillendirme işleminin hemen sonrasında Şekil 5’te görülen “Switch trigger” isimli sinyal üretici ile anahtar tetiklenerek ve PID kontrolör devreye alınmıştır. Bu sayede hızlı ve minimum titreşimle istenen dereceye oturtulan sistemde kalan titreşimlerin sıfırlanması, sistemin 30 dereceye oturtulması ve olası bozucu etkilere karşı dayanıklı olması amaçlanmıştır. Şekil 5’te sistemin Simulink modeli, deneysel sonuçlar bölümünde ise sisteme uygulanan giriş sinyali ve sistem çıkışları verilmiştir.



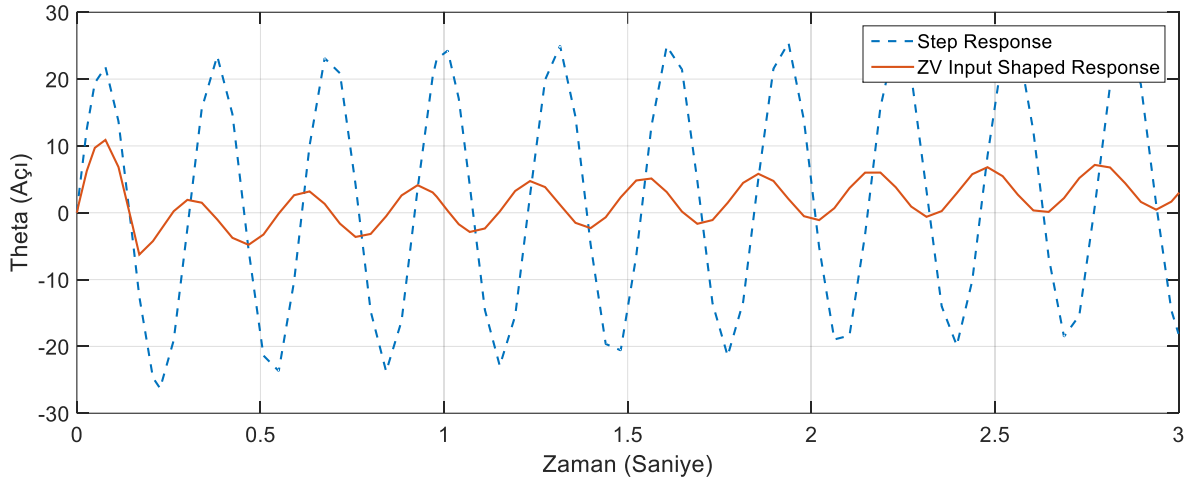
Şekil 5. Sıralı kontrol uygulanmış sistemin Simulink modeli (Simulink model of sequenced controlled system)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Sisteme öncelikle basamak giriş uygulanarak çıkışı elde edilmiş, ardından sıfır titreşim giriş şekillendirme (Zero vibration input shaping) uygulanmıştır. Her iki durum için sisteme uygulanan girişler Şekil 6’da, elde edilen çıkışlar Şekil 7’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde giriş şekillendirmenin çıkış titreşimlerini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Bu bakımdan giriş şekillendirmenin basamak girişe göre avantajlarının olduğunu söylemek mümkündür. Sisteme giriş şekillendirme uygulamak için gerekli matematiksel altyapı Singhose ve Singh (2002)’in çalışmasında detaylı bir şekilde incelenmiştir.

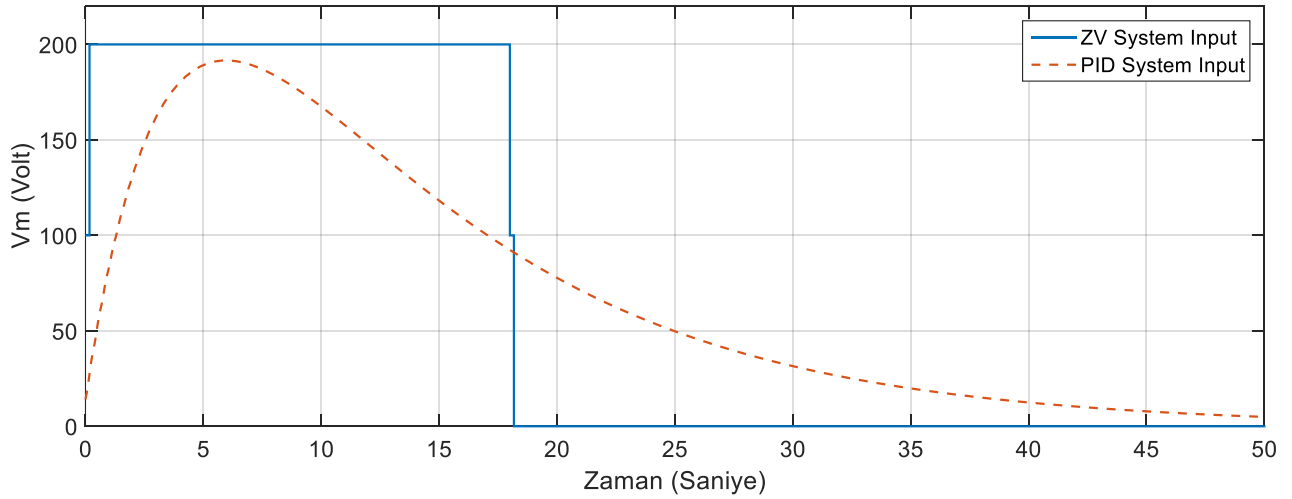


Şekil 6. Basamak giriş ve giriş şekillendirme uygulanan sistemler için giriş gerilimleri (Input voltages of the system for step input and input shaped systems)

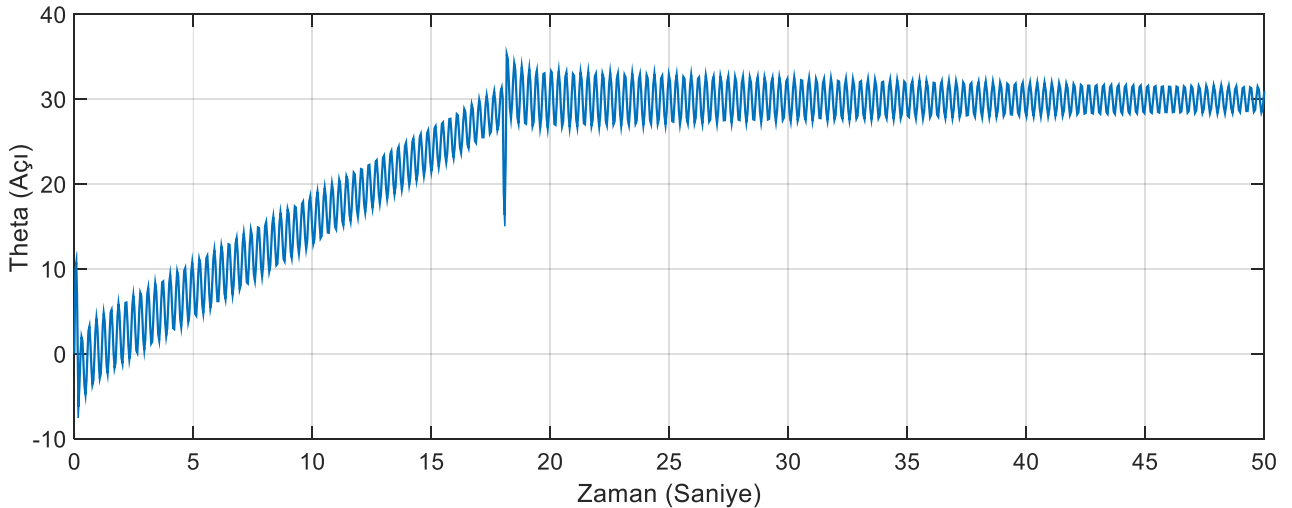


Şekil 7. Basamak giriş ve giriş şekillendirme uygulanan sistemler için çıkış sinyalleri (Output signals for step input and input shaped systems)

Ardından sisteme yalnızca giriş şekillendirme uygulanarak sistemin 30 derecede durması amaçlanmıştır. Şekil 3'te Simulink görünümü verilen ve giriş şekillendirme ile denetlenen sisteme uygulanan giriş sinyali Şekil 8'de düz çizgi ile gösterilmiştir. Şekil 9'da ise aynı sistemin çıkış grafiği verilmiştir. Sistemin 18 saniye civarında 30 dereceye yaklaştığı ve sonra uygulanan "Dur" komutuyla birlikte 30 derece civarında sönümlü salınımlı bir hareket yaptığı görülmüştür.



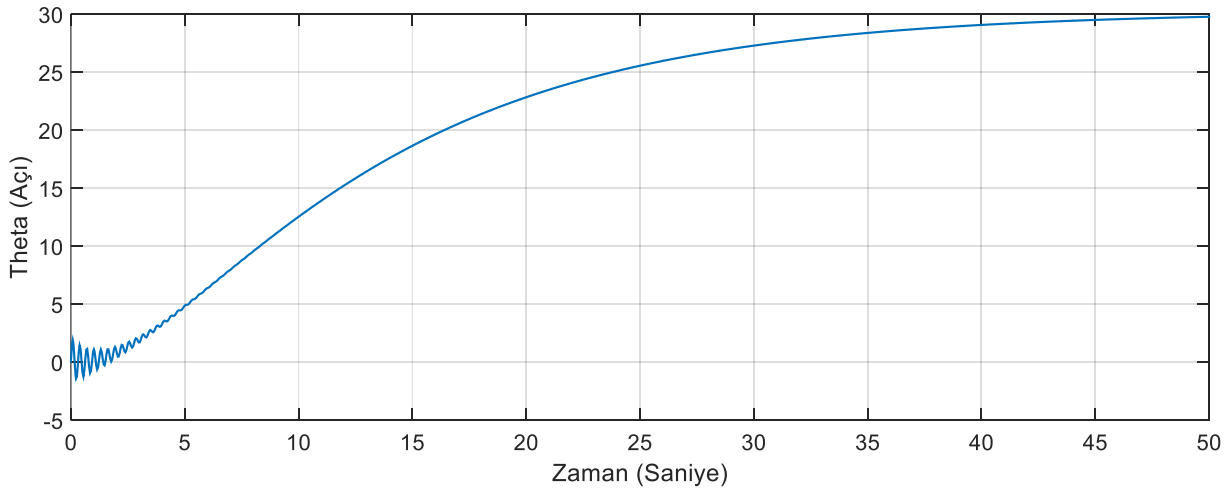
Şekil 8. 30 derecede durdurulmak istenen sistemlere uygulanan giriş şekillendirme ve PID kontrol giriş gerilimleri (Input voltages for PID controlled and input shaped systems with 30 degrees reference points)



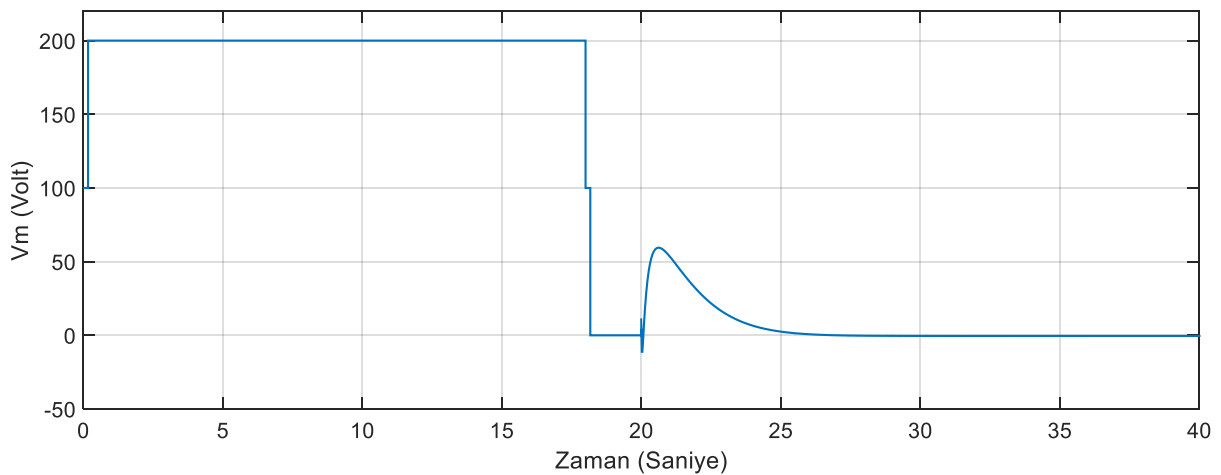
Şekil 9. Giriş şekillendirme ile 30 derecede durdurulmak istenen sistem için çıkış (Output signal for input shaped system with 30 degrees reference point)

PID kontrol uygulanarak 30 derecede durdurulmak istenen sistemin Simulink modeli Şekil 4'te verilmiştir. Sisteme uygulanan giriş sinyali Şekil 8'de kesikli çizgilerle gösterilmiş, sistem çıkışı ise Şekil 10'da verilmiştir. Sistemin oturma zamanının 50 saniye olduğu görülmektedir. Sistem giriş şekillendirmeye göre oldukça yavaş hareket etmektedir, ancak karşılaşılan titreşimler çok daha küçüktür. PID parametreleri değiştirilerek sistemin daha hızlı hareket etmesi, daha kısıda istenen referans değerine oturması sağlanabilir. Ancak bu çalışmada PID parametreleri seçilirken, sistemde kullanılacak motora 200V'dan daha büyük bir giriş geriliminin uygulanmaması gerekmektedir. Bu sebeple PID kontrolörün sisteme uyguladığı maksimum gerilime dikkat edilmiştir. Bu kısıtlama çevrevesinde Simulink PID tuner yardımıyla sistemin en hızlı cevap vereceği ve mümkün olan en az aşımaya sebep olarak PID parametreleri seçilmiştir.

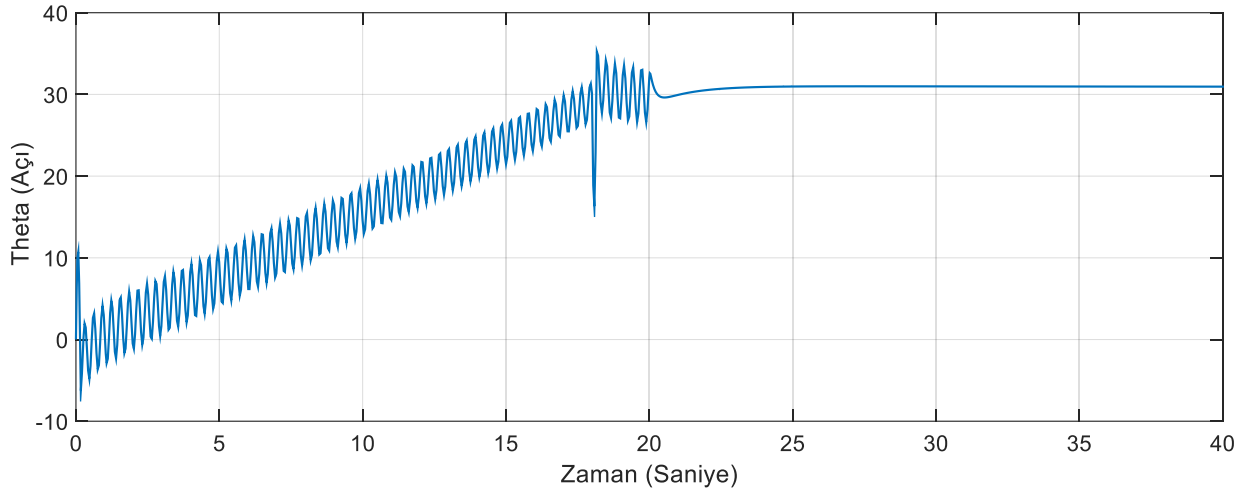
Şekil 11'de sıralı kontrol uygulanan sistemin giriş gerilimi, Şekil 12'de ise aynı sistemin çıkış sinyali verilmiştir. Sistem 30 dereceye gelene kadar giriş şekillendirme uygulanmış, sistem istenen değere geldiğinde anahtar yardımıyla PID kontrole geçilmiştir. Sistem PID kontrole göre daha hızlı yanıt vermiştir. PID kontrole geçiş sağlandıktan sonra ise hem titreşimlerin sönümlendiği, hem de sistemin bozucu etkilere karşı dayanıklı olduğu görülmektedir. PID kontrole geçene kadar oluşan titreşimlerin makul aralıkta olduğunun kabul edildiği durumlarda sıralı kontrolün her iki yöntemden daha avantajlı bir yöntem olduğu söylenebilir. Giriş şekillendirme esnasında oluşan titreşimlerin daha da azaltılması için farklı giriş şekillendirme teknikleri kullanılabilir. Ancak bunun sistemin cevap hızını yavaşlatacağı bilinmektedir. Bu bakımdan sistem detaylı şekilde incelenerek optimum giriş şekillendirme tekniği ve kabul edilebilir titreşim değerleri seçilmelidir.



Şekil 10. PID kontrol uygulanarak 30 derecede durdurulmak istenen sistem için çıkış (Output signal for PID controlled system with 30 degrees reference point)



Şekil 11. Sıralı kontrol ile 30 derecede durdurulmak istenen sisteme uygulanan giriş sinyali (Input signal for sequenced controlled system with 30 degrees reference point)



Şekil 12. Sıralı kontrol uygulanarak 30 derecede durdurulmak istenen sistem için çıkış sinyali (Output signal for sequenced controlled system with 30 degrees reference point)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Giriş şekillendirme uygulanan sistemde çıkışın basamak girişe göre çok daha küçük titreşimlere sebep olduğu görülmüştür. Giriş şekillendirme uygulanan sistemin titreşimleri tamamen yok edemediği gözlenmiştir. Farklı giriş şekillendirme teknikleri kullanılarak modelleme hatalarının ve çıkış titreşimlerinin yok edilmesi mümkündür.

PID kontrol çıkış titreşimlerini çok küçük seviyelere getirmiştir ve çıkışta kabul edilebilecek miktarda kalıcı durum hatası gözlenmektedir. PID parametreleri değiştirilerek bunun daha küçük değerlere çekilmesi ya da yok edilmesi mümkündür. Performansların karşılaştırılması amacıyla yalnızca PID kontrol uygulanan durumda ve sıralı kontrolün uygulandığı durumda PID parametreleri değiştirilmemiştir.

Sıralı kontrolün PID kontrole göre daha hızlı cevap verdiği görülmüştür. Sistem istenen değere oturduktan sonra PID kontrolör devreye alındığı için bozucu etkilere karşı da bir dayanım sağlanmıştır. Farklı giriş şekillendirme teknikleri uygulanarak giriş şekillendirme salınımlarının azaltılması mümkündür. Ancak bunun karşılığında sistemin cevap süresi uzayacaktır.

Sisteme yalnızca giriş şekillendirme uygulandığında hızlı cevap alındığı gözlenmiştir. Ancak oluşacak herhangi bir bozucu etki karşısında sistem çaresiz kalacaktır. Sisteme yalnızca PID kontrol uygulandığında ise sistemin bozucu etkilere karşı dayanıklı olacağı bilinmektedir, ancak bunun karşılığında sistem giriş şekillendirmeye göre daha yavaş hale gelecektir. Sıralı kontrol sistemin büyük hareketlerinde giriş şekillendirmenin hızlı tepki süresinden yararlanırken, sistem istenen değere geldiğinde PID kontrolörü devreye alarak hareket esnasında ya da sonrasında oluşabilecek bozucu etkilere karşı PID kontrolden yararlanmayı amaçlamaktadır. Bu sayede hem açık çevrim hem de kapalı çevrim kontrol yöntemlerinin temel avantajlarını bir araya getirirken dezavantajlarından kurtulur.

Gelecek çalışmalarda iki sistem arasında geçişi sağlayan anahtarlama sisteminin karar mekanizmasının akıllı hale getirilerek her koşulda her iki kontrol yönteminden de avantajlı olan bir yöntemin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Akademik çalışmalarımı birlikte yürüttüğüm Onur ÖRNEK'e teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Duc La, V., Kien Trong, N., 2019. Combination of Input Shaping and Radial Spring-Damper to Reduce Tridirectional Vibration of Crane Payload, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 310-321.
- Ertaş, H., 1995, Tek Kollu Esnek Manipülatörlerde Uç Sapmalarının Simülasyonu, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri

- Huey, J. 2006. The Intelligent Combination of Input Shaping and PID Feedback Control, School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology, PhD Thesis, Georgia, Atlanta 285p.
- Oliveira P., Vrancic, D., 2012. Underdamped Second-Order Systems Overshoot Control, IFAC Proceedings Volumes, 45(3), 518-523.
- Oliveira J., Oliveira, P., 2018. PID Posicast Control for Uncertain Oscillatory Systems: A Practical Experiment, IFAC PapersOnLine, 51-4, 416-421.
- Örnek, O., Ertaş H., 2020. Sıralı Kontrol; Giriş Şekillendirme (Input Shaping) ve PID Kontrolü Bir Araya Getiren Yeni Bir Kontrol Yöntemi, European Journal of Science and Technology, 2020 (4), 188-196.
- Parman, S., Go T., 2020. Two Constant Amplitude Pulses' Input Shaper to Maneuver an Attitude of Precise-Oriented Flexible Spacecraft, Journal of Sound and Vibration, 465, 115011.
- Rana, D. S., Deepika., 2014. Modelling, Stability Analysis and Control of Flexible Single Link Robotic Manipulator, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 3, Issue 2, February 2014
- Ramon, P., Comin D., 2018. Simulink Implementation of Industrial Test of Input Shaping Techiques, Control Engineering Practice, 79, 1-21.
- Singhose, W., Singh, T., 2002. Tutorial on Input Shaping / Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures, American Control Conference 2002.
- Thomsen, D., Soe-Knudsen, R., 2021. Vibration Control of Industrial Robot Arms by Multi-Mode Time-Varying Input Shaping, Mechanism and Machine Theory, 155, 104072.
- Tumari M., Shabudin, L., Zawawi, M., Shah, A., 2013. Active Sway Control of a Gantry Crane Using Hybrid Input Shaping and PID Control Schemes, 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research, 50 012029.
- Ünsal S., Gürleyük S., 2012. Gerçek Zamanlı Giriş Şekillendirici Tasarımı, ELECO'2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyomu, Bursa.
- Yavuz, H., Kapucu, S., 2012. Hybrid Input Shaping to Suppress Residual Vibration of Flexible Systems, Journal of Vibration and Control, January 2012.