

DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONU İLE SÜRÜLEN SİSTEMLERE GİRDİ ŞEKİLLENDİRME TEKNİĞİNİN UYGULANABİLİRLİĞİ

¹Çağın TAŞKIN , ²Ali KILIÇ , ³Sadettin KAPUCU 

^{1,2,3}Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, TÜRKİYE
¹taskin.cagin@gmail.com, ²akilic@gantep.edu.tr, ³kapucu@gantep.edu.tr

(Geliş/Received: 24.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2019)

ÖZ: Bu çalışmada, darbe genişlik modülasyonu ile sürülen esnek sistemlerde oluşan artık titreşimin azaltılması amacıyla, alternatif bir girdi şekillendirme metodu sunulmuştur. Sistem doğal frekansı ve sönüm oranı gibi parametrelerinin tam olarak bilinmemesi ya da hatalı tahmin edilmesi durumunda dahi gürbüz bir girdi şekillendirme metodu oluşturulmaya çalışılmıştır. Birim genlik kullanılarak elde edilen girdi şekillendirme metoduyla çok sayıda darbeye sahip girdi şekillendirici üretilebilir ve bu girdi şekillendirici sistemdeki artık titreşimi yok edebilmektedir ya da azaltabilmektedir. Girdi şekillendirme tekniklerinde, darbe zamanları tekniğin performansını belirlemektedir. Önerilen metotta darbe zamanları referans hareket profilinin, değişken frekanslı üçgen dalgalarla kesiştirilmesiyle bulunur. Önerilen metot, çok bilinen sıfır titreşim metodu ile karşılaştırılıp, sunulan girdi şekillendirme metodunun performans karakteristiği ve sistemin cevabıyla ilgili grafikler sunulmuştur. Ayrıca girdi şekillendirme tekniğinin, seyahat süresinin daha kısa olması istenilen durumlarda da gürbüz olarak çalıştığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Girdi şekillendirme tekniği, Darbe genişlik modülasyonu, Artık titreşim sönümleme

Applicability of Command Shaping Techniques to the Pulse Width Modulation Driven Systems

ABSTRACT: In this study, an alternative input shaping method is proposed to reduce residual vibration to the pulse width modulation delivered flexible systems. An input shaping method is proposed which works robust even system parameters such as system natural frequency and damping ratio are not known or wrongly estimated. It is possible to generate unity magnitude input shaper with high number of pulses within this method. This input shaper can eliminate or reduce residual vibration. Time locations have an importance on performance of input shaping techniques. Time locations of impulses are found by intersection points of reference motion profile and triangle wave. This proposed method is compared with well-known zero vibration method, performance characteristics of proposed input shaping technique and diagrams about the system response are demonstrated. Furthermore, it's shown that proposed input shaping method works robustly even travelling time is reduced.

Key Words: Input shaping technique, Pulse width modulation, Residual vibration reduction

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Esnek sistemler birçok alanda önemli görevler yerine getirmek için kullanılırlar. Bu sistemler hassas hareket kontrolü elde edilebilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Esnek sistemlerin hareketleri kalıcı titreşimler oluşturup, hareket kontrolünü zorlaştırabilir. Oluşan kalıcı titreşimlerin azaltılması ya da yok edilmesi önemli kontrol konularından biridir. Bu problemin ortadan kaldırılması için kapalı çevrim ve

açık çevrim kontrol teknikleri bu alanda kullanılan yöntemlerdendir. Kapalı çevrim kontrol teknikleri ölçüm ekipmanlarının kullanılmasını gerektirdiğinden, işlem yükünü arttıran tekniklerdir. Bu sebeple, kapalı çevrim kontrollü dinamik sistemler daha pahalı ve işlem yükü açısından karmaşık bir sistem haline gelebilir. Diğer yandan açık çevrim kontrol teknikleri, kapalı çevrim kontrol tekniklerinden farklı olarak, belirli metotlarla uygun hareket profillerinin tasarlanıp, artık titreşimi sifıra yaklaştırmayı amaçlar.

Smith tarafından yapılan çalışmalarda, basamak girdi komutunun iki adımda birbirinden farklı zamanlarda verilmesiyle artık titreşimin sönümlenmesi amaçlanmıştır (Smith, 1958). Şahinkaya matematiksel yöntemlerle fonksiyonlara bağlı bir metot geliştirmiştir (Şahinkaya, 2001). Alıcı ve arkadaşları hareket süresinin kısıtlanması ve düzeltilmesi metotlarını çeşitli ivme profilleriyle önermişlerdir (Alıcı ve diğ., 1999). Kapucu ve Kaplan, rampa, sikloid ve versin fonksiyonlarının birleşiminden oluşan fonksiyonun sisteme girdi komutu olarak verilmesinden oluşan bir metot sunmuştur (Kapucu ve Kaplan, 2005).

Başka bir yaklaşım ise açık çevrim kontrol tekniklerinden olan girdi şekillendirme tekniğidir. İlk olarak Singer ve Seering, çalışmalarında birbirinden farklı zamanlarda ve büyüklüklerde sisteme gönderilen etkilerin istenilen sistem girdi komutlarıyla birleştirilmesiyle, kalıcı titreşimin sönümlenmesini amaçlamıştır (Singer ve Seering, 1990). Daha sonra, bu çok bilinen tekniğin, gürbüz şekilde çalışan rampa-rampa sikloid-rampa versin girdi komutu ile karşılaştırılmalı çalışmasını Kapucu ve arkadaşları sunmuştur (Kapucu ve diğ., 2008).

Darbe genişlik modülasyonu tekniği ile girdi şekillendirme yöntemi ise zamana bağlı olarak değişen fonksiyonları birim genlikte sinyallere dönüştürülmesidir. Biediger çalışmasında sıfır titreşim girdi şekillendirme yöntemi ile darbe genişlik modülasyonu yöntemini beraber kullanmıştır (Biediger, 2006). Aynı seyahat süresi içerisinde, sisteme gönderilen darbelerin sayısının, sistem cevabına bağlı değişimini sunmuştur. Bir diğer çalışmada ise Gürleyük, sabit frekanslı ve değişken genlikteki referans sinyali ile frekansı değiştirilen taşıyıcı sinyal yardımıyla birim genlikte darbeler elde ederek darbe genişlik modülasyonu yöntemiyle girdi şekillendirme tekniği sunmuştur (Gürleyük, 2011).

Bu çalışmada, esnek sistemlerde oluşan artık titreşimin azaltılması amacıyla, darbe genişlik modülasyonu tekniğinden yararlanılarak, birim genlikli girdi şekillendirme tekniği önerilmiştir. Referans hareket profili olarak sikloid-rampa versin-rampa kullanılıp, artan frekanslı üçgen sinyal ile kesleştirilmesiyle darbe zamanları belirlenip birim genlikli sinyallere dönüştürülmüştür. Önerilen yöntemin karşılaştırılması amacıyla, sıfır titreşim girdi şekillendirme fonksiyonu benzer şekilde darbe genişlik modülasyonu tekniğiyle birim genlikli sinyallere dönüştürülmüştür. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Önerilen yöntemin kütle-yay-sönümleyici dinamik sistemi için frekansının sönümlü salınım frekansına oranının 12'den büyük olması durumunda %5 artık titreşim seviyesinin altında kaldığı görülmektedir. Ayrıca, önerilen girdi şekillendirme tekniğinin, seyahat süresinin azaltılması durumunda da frekans oranı 13'den büyük olması durumunda gürbüz bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Sunulan yöntem gezer vinç gibi dinamik sistemlerin yanında, belirli amaçları yerine getirmek için tasarlanmış hassas hareket kontrolü gerektiren robotik uygulamalar ve benzeri tüm mekanik sistemler için kullanılabilir. Yukarıda bahsedilen tüm sistemler belirli bir kapsamda, kütle-yay-sönümleyici ile modellenebilmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada, temel model ele alınmıştır. Ayrıca sıfır titreşim girdi şekillendirme yönteminin kullanıldığı tüm sistemler için uygun olup daha gürbüz çalışan bir yöntem sunulmuştur.

SİSTEMİN HAREKET DENKLEMİ (EQUATION OF MOTION OF THE SYSTEM)

Bu çalışmada kullanılan sistem 2. mertebeden kütle-yay-sönümleyici olarak belirlenmiştir. Sistemin hareket denklemi için kullanılan parametreler Gürleyük'ün çalışmasından alınmıştır (Gürleyük, 2011). Sistemin hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

1 numaralı denklemde, m kütle, c sönümleme katsayısı, k yay sabitidir.

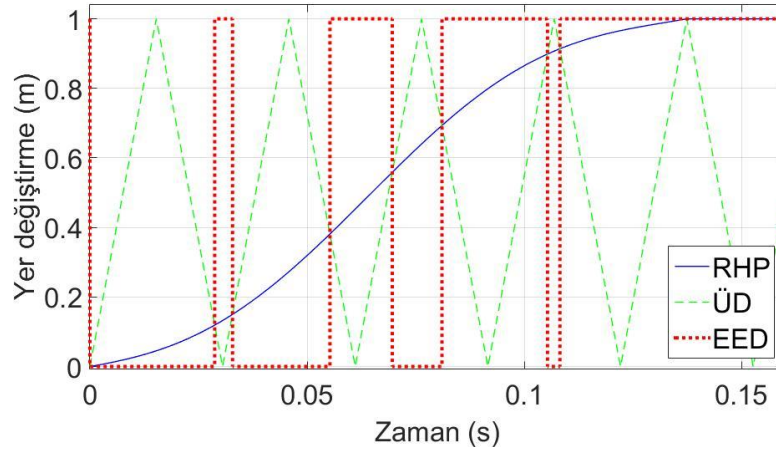
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \frac{c}{m} = 2\zeta\omega_n$$

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2)$$

2 numaralı denklem grubuna göre, sistemin doğal frekansı, $\omega_n = 22,9476$ radyan/saniye, ζ sönüm oranı 0,0891'dir. Sistemin sönümlü doğal frekansı, $\omega_d = 22,8563$ radyan/saniyedir.

Birim Genlik Darbe Genişlik Modülasyonu Oluşturma Yöntemi (Method Of Generating Unity Magnitude Pulse Width Modulation Impulses)

Analog sinyalleri dijital sinyallere dönüştürmek için kullanılan tekniklerden birisi de Darbe Genişlik Modülasyonu tekniğidir. Birim genlik Darbe Genişlik Modülasyonu tekniği istenilen kuvvetin ara bir değer olmaksızın, eyleyici limitlerinde sisteme verilmesi ve ya hiç verilmemesi durumudur. Bu teknik, rastgele seçilen bir S-eğrisinin, üçgen sinyallerle kesiştirilmesiyle elde edilen darbe zamanlarına uygun olarak, birim genlikli sinyaller üretilmesi temeline dayanır.



Şekil 1. Darbe Genişlik Modülasyonu ile birim genlikli darbe oluşturulması. RHP: Referans Hareket Profili, ÜD: Üçgen Dalgalar, EED: Elde Edilen Darbe (frekans oranı 9'dur).

Figure 1. Generating unity magnitude pulses with respect to Pulse Width Modulation technique. RHP: Reference Motion Profile, UD: Triangular Wave, EED: Generated Pulses (frequency ratio is 9).

Referans Hareket Profili (Reference Motion Profile)

Sistemin referans hareket profilinin tasarlanması için Kapucu'nun önerdiği formül kullanılıp belirlenen seyahat süresince, sikloid-rampa versin - rampa fonksiyonlarının ayrı ayrı aldığı mesafelerin toplamı, alınan toplam mesafeye eşittir (Kapucu ve Kaplan, 2005).

$$y(t) = \frac{Y_1 Rt}{2\pi} + \frac{Y_2}{2\pi} [Rt - \sin(Rt)] + \frac{Y_3 Rt}{2\pi} + \frac{Y_3}{2\pi} [(1 - \cos(Rt))] \quad (3)$$

3 numaralı denkleme göre, t zaman, $\tau_d = 2\pi/\omega_d$ sistemin sönümlü titreşim periyodu, $\tau = \tau_d/2$ seyahat süresi sistemin sönümlü titreşim periyodunun yarısı olarak belirlenmiştir. $R = 2\pi/\tau$. Üstteki denklemin düzenlenmesiyle oluşan zamana bağlı fonksiyon dördüncü denklem olarak verilmiştir.

$$y(t) = \frac{LRt}{2\pi} - \frac{Y_2}{2\pi} \sin(Rt) + \frac{Y_3}{2\pi} (1 - \cos(Rt)) \quad (4)$$

Dördüncü denklemde, rampa fonksiyonunun aldığı yol Y_1 , sikloid fonksiyonunun aldığı yol Y_2 , rampa versin fonksiyonunun aldığı yol Y_3 'tür. Beşinci denklemde, L alınan toplam yol, fonksiyonların aldığı

toplam yola eşittir. Mesafelerin hesaplanması için kullanılan denklemler altıncı denklem grubu olarak verilmiştir.

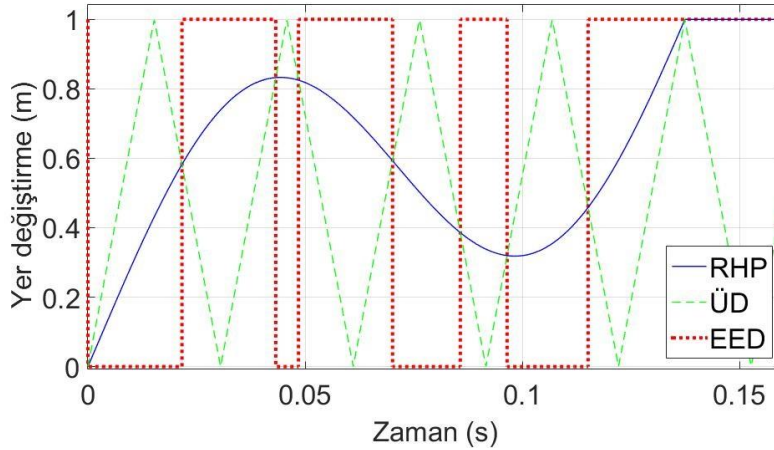
$$L = Y_1 + Y_2 + Y_3 \quad (5)$$

$$Y_1 = \left(\frac{LR(R - 2\zeta\omega_n)}{\omega_n^2} \right) = \left(\frac{L\tau_n(\tau_n - 2\zeta\tau)}{\tau^2} \right)$$

$$Y_2 = L \left(1 - \frac{R^2}{\omega_n^2} \right) = L \left(1 - \frac{\tau_n^2}{\tau^2} \right) \quad (6)$$

$$Y_3 = \left(\frac{L2\zeta R}{\omega_n} \right) = \left(\frac{L2\zeta\tau_n}{\tau} \right)$$

Verilen denklemlere göre sunulan fonksiyon, üçgen dalga ile beraber Şekil 2'de sunulmuştur. Üçgen dalga frekansının, sistemin sönümlü salınım frekansına oranı frekans oranı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Girdi komutu olarak kullanılan referans hareket profili. RHP: Referans Hareket Profili, ÜD: Üçgen Dalgalar, EED: Elde Edilen Dalgalar (frekans oranı 9'dur).

Figure 2. Proposed reference motion profile. RHP: Reference Motion Profile, UD: Triangular Wave, EED: Generated Pulses (frequency ratio is 9).

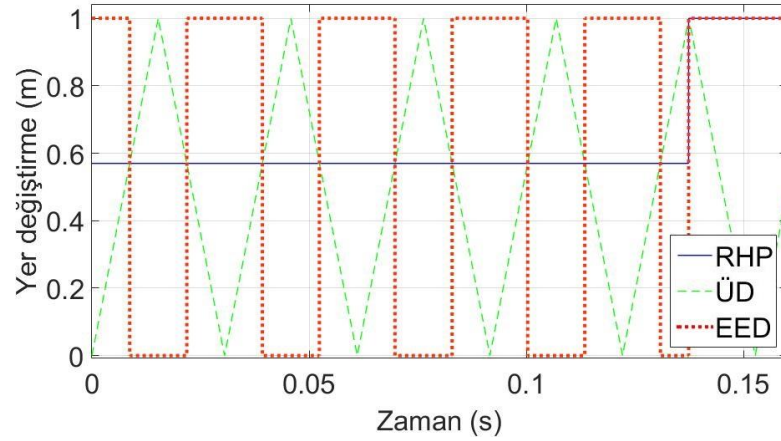
Sıfır Titreşim Girdi Şekillendirici (Zero Vibration Input Shaper)

Çok bilinen sıfır titreşim girdi şekillendirme tekniği olan Singer ve Seering'in önerdiği metot (Singer ve Seering, 1990), önerilen metotla karşılaştırılmak amacıyla kullanılacaktır. Birbirinden farklı zamanlarda sisteme gönderilen iki darbenin, artık titreşimi azaltması prensibine dayanan bu yöntem, sistem parametrelerinin tam olarak bilindiği durumda kullanılabilir. Sistem parametrelerinin tam olarak bilinmemesi durumunda sistemde oluşabilecek artık titreşimi azaltmamaktadır.

$$t_1 = 0, \quad t_2 = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (7)$$

$$E = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}, \quad A_1 = \left(\frac{H}{1+E} \right) \quad (8)$$

7 numaralı denklem grubuna göre, ilk darbe zamanı $t_1 = 0$, ikinci darbe zamanı $t_2 = 0,1374$ saniyedir. 8 numaralı denklem grubuna göre, ilk darbenin büyüklüğü, $A_1 = 0,5698$ ve ikinci darbenin büyüklüğü $H = 1$. Elde edilen değerlere göre oluşan fonksiyon, üçgen dalga ve elde edilen darbeler Şekil 3'de gösterilmiştir.

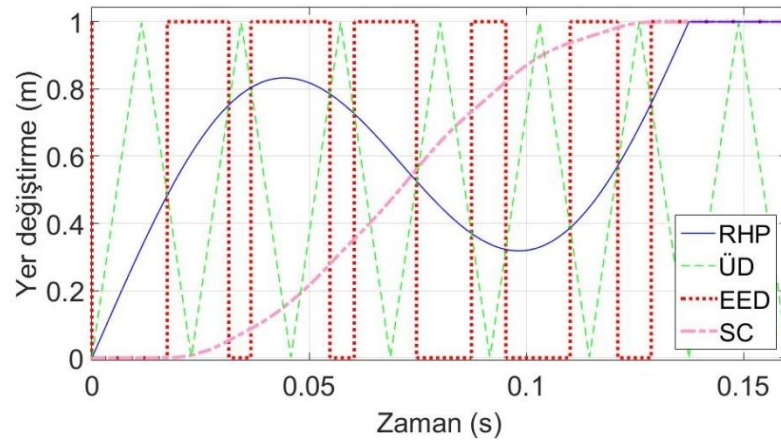


Şekil 3. Sıfır titreşim girdi fonksiyonu, RHP: Referans Hareket Profili, ÜD: Üçgen Dalgalar, EED: Elde Edilen Dalgalar birim genlikli darbeler (frekans oranı 9'dur)

Figure 3. Zero vibration input shaping function. RHP: Reference Motion Profile, UD: Triangular Wave, EED: Generated Pulses (frequency ratio is 9).

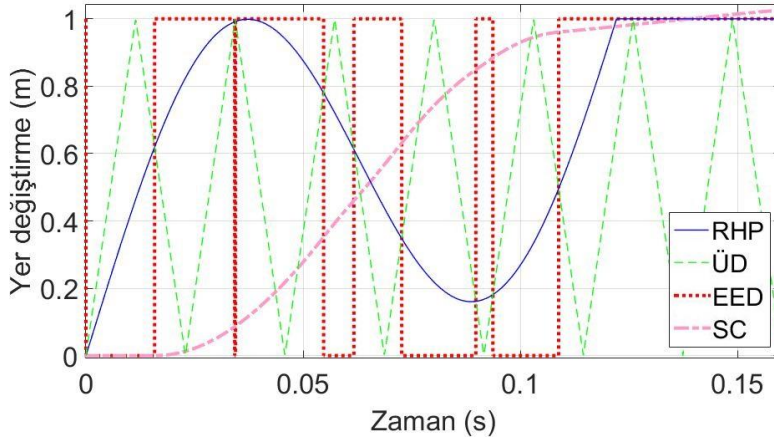
BENZETİM (SIMULATION)

Sunulan çalışmada, kütle-yay-sönümleyici model olarak kullanılmıştır. Önerilen tekniğin uygulanması için, frekans oranı 1'den 25'e kadar artırılarak elde edilen darbeler sisteme girdi komutu olarak verilmiştir. Sistemde oluşan artık titreşimin, frekans oranına bağlı grafiği sıfır titreşim girdi şekillendirme metoduyla karşılaştırmalı olarak şekil 6'da sunulmuştur. Ayrıca şekil 4 ve 5'te, frekans oranı 12 seçilerek seyahat süresi 0,1374 ve 0,1222 saniye olarak aynı teknik uygulanmıştır. Karşılaştırmak amacıyla örnekleme frekansı aynı seçilmiştir. Sonuç bölümünde seyahat süresi kısa olan şekillendiricinin %5 artık titreşim oranının altında ya da titreşimi tamamen sönümleyerek çalıştığı frekans oranından bahsedilecektir.



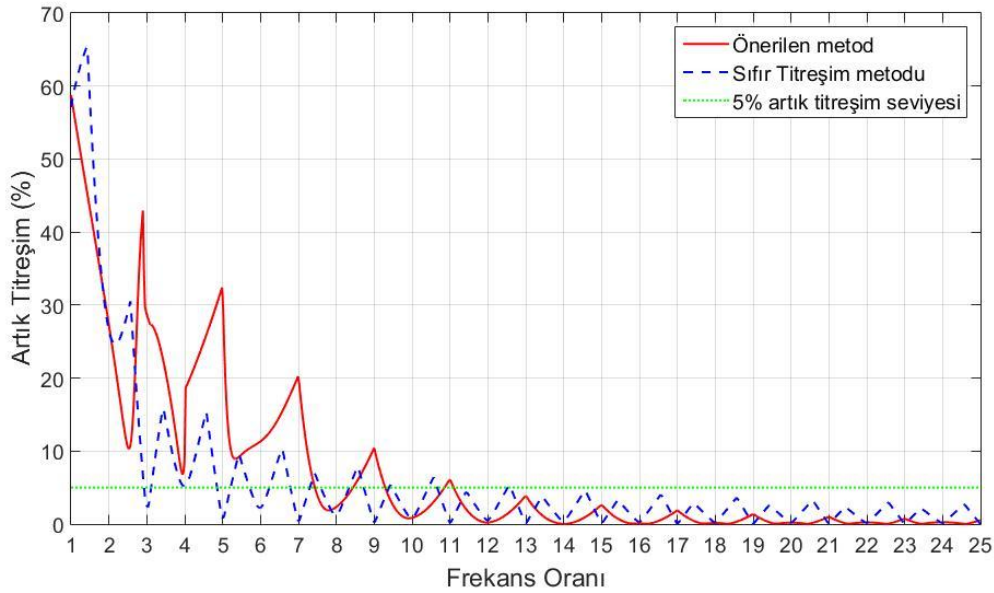
Şekil 4. Seyahat süresi 0,1374 saniye olan girdi komutu ve sistem cevabı. RHP: Referans Hareket Profili, ÜD: Üçgen Dalgalar, EED: Elde Edilen Dalgalar, SC: Sistem Cevabı (frekans oranı 12'dir)

Figure 4. Proposed input command has 0.1374 second travelling time and system response. RHP: Reference Motion Profile, UD: Triangular Wave, EED: Generated Pulses, SC: System Responses (frequency ratio is 12)



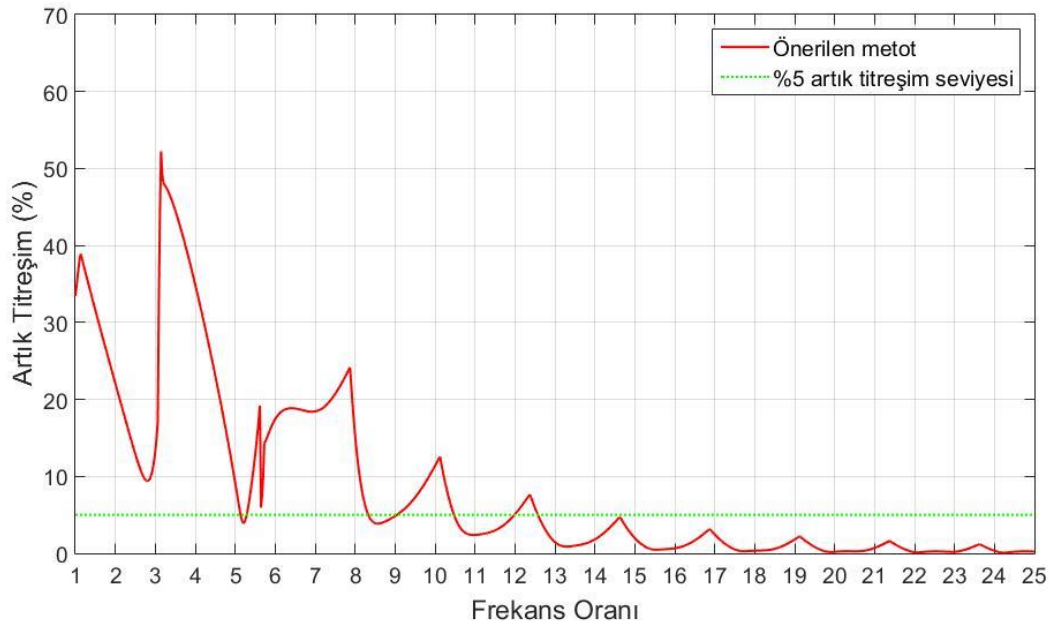
Şekil 5. Seyahat süresi 0,1222 saniye olan girdi komutu ve sistem cevabı. RHP: Referans Hareket Profili, ÜD: Üçgen Dalgalar, EED: Elde Edilen Dalgalar, SC: Sistem Cevabı (frekans oranı 12'dir)

Figure 5. Proposed input command has 0.1222 second travelling time and system response. RHP: Reference Motion Profile, UD: Triangular Wave, EED: Generated Pulses, SC: System Responses (frequency ratio is 12)



Şekil 6. Sunulan metot ile sıfır titreşim metodunun artık titreşim-frekans oranı grafiği (seyahat süresi $\tau = 0,1374$ saniye)

Figure 6. Residual vibration-frequency ratio diagram of proposed method and zero vibration method (input shaper has 0.1374 seconds travelling time)



Şekil 7. Sunulan metodun artık titreşim-frekans oranı grafiği (seyahat süresi $\tau = 0,1222$ saniye)

Figure 7. Residual vibration-frequency ratio diagram of proposed method (input shaper has 0.1222 seconds travelling time)

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada esnek sistemlerde oluşan artık titreşimin azaltılması amacıyla uygulanabilir bir girdi şekillendirme yöntemi önerilmiştir. Kütle-yay-sönümleyici dinamik sistemi üzerinde denenen bu yöntem, sıfır titreşim girdi şekillendirme tekniğiyle karşılaştırılmıştır. Her iki metotla elde edilen birim genlikteki, girdi sinyallerinin oluşturduğu sistem cevabı aynı grafikte sunulmuştur. İki metodun da performans karakteristiği 1-25 frekans oranı aralığında istenilen değer için karşılaştırılabilir. Önerilen yöntem frekans oranı 12'den fazla olması durumunda %5 artık titreşim seviyesinin altında olduğu görülmektedir. İstenilen seviyelerdeki titreşim düzeylerine hangi frekans oranlarıyla uygulanabileceği görülmektedir. Düşük frekans oranındaki kararsız bölgenin dışında, gürbüz bir şekilde çalıştığı, karşılaştırmalı olarak görülmektedir, sonuç Şekil 6'da gösterilmiştir.

Diğer önemli sonuç ise, önerilen teknikte, seyahat süresi azaltılabilmektedir. Bunu göstermek amacıyla da $\tau = \tau_d/2$ 'den $\tau = \tau_d/2.25$ 'e azaltıldığı durumda tekniğin gürbüz bir şekilde çalışmasıdır. Elde edilen ikinci sonuca göre ve Şekil 7'de verildiği gibi frekans oranının 13'den fazla olması durumunda %5 artık titreşim seviyesinin altında olduğu görülmektedir. Seyahat süresinin kısaltıldığı durumda da tekniğin uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İlk durumla karşılaştırıldığında, girdi şekillendiricinin %5 artık titreşim seviyesinin altında kalması için frekans oranının bir miktar daha artırılması gerekmektedir. Seyahat süresinin azaltılması sıfır titreşim girdi şekillendirme metodu ile mümkün değilken, önerilen girdi şekillendirme tekniğinin seyahat süresinin azalması halinde de artık titreşimin %5 seviyesi altına indirdiği ya da yok ettiği görülmektedir.

Sunulan iki sonuca göre, frekans oranı ve sönüm oranı gibi sistem parametrelerinin tam olarak bilinmediği ya da yanlış tahmin edildiği durumlarda dahi gürbüz bir şekilde çalışan, esnek sistemlere uygulanabilir bir girdi şekillendirme tekniği sunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alıcı, G., Kapucu, S., Bayseç, S., 1999, "Swing-free transportation of suspended objects with robot manipulators", *Robotica*, Cilt 17, No 5, ss. 513-521.
- Biediger, E. A. O., S., 2006, *Vibration reduction using command generation in formation flying satellites*, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

- Gürleyük, S. S., 2011, "Designing unity magnitude input shaping by using PWM technique", *Mechatronics*, Cilt 21, No 1, ss. 125-131.
- Kapucu, S., Kaplan, M., "Hafif Sönümlmeli Esnek Sistemlerin Girdi Komutu Biçimlendirme Tekniği ile Artık Titreşimlerinin Azaltılması", 12. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 347-354, 9-11 Haziran 2005.
- Kapucu, S., Yıldırım, N., Yavuz, H., Bayseç, S., 2008, "Suppression of residual vibration of a translating-swinging load by a flexible manipulator ", *Mechatronics*, Cilt 18, No 3, ss. 121-128.
- Singer, N.C., Seering W.P., 1990, "Preshaping command inputs to reduce system vibration", *Journal of dynamic systems, measurement, and control*. Vol. 112, No.1, pp. 76-82.
- Smith, O. J., 1958, *Feedback Control Systems*, Mc.Graw-Hill, New York.
- Şahinkaya, M. N., 2001, "Input shaping for vibration-free positioning of flexible systems", *Proceedings of the Institution of mechanical engineers part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Cilt 215, No 5, ss. 467-481.