

# Gerçek Zamanlı Giriş Şekillendirici Tasarımı

## Design of Real Time Input Shaper

Sinan ÜNSAL<sup>1</sup>, Sırrı Sunay GÜRLEYÜK<sup>2</sup>

Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
Mühendislik Fakültesi  
Bülent Ecevit Üniversitesi, 67100, İncivez, Zonguldak  
<sup>1</sup>sinanunsal@gmail.com, <sup>2</sup>sgurleyuk@yahoo.com

### Özet

*Titreşim, neredeyse tüm mühendislik dallarında karşılaşılan ciddi bir sorundur. Titreşimin azaltılmasına yönelik açık çevrim ve kapalı çevrim birçok kontrol yöntemi bulunmaktadır. Giriş şekillendirme, bu yöntemler içerisinde açık çevrim tekniklerden birisidir. Dinamik sistemler önceden tasarlanmış bir hareket senaryosu yapabileceği gibi operatör tarafından önceden belirlenmemiş şekilde de çalıştırılabilir. Operatörler tarafından komutların anlık olarak uygulanması kontrolün gerçek zamanlı olarak tasarlanmasını gerektirir. Bu çalışmada giriş şekillendirme tekniğinin dinamik sistemlerde gerçek zamanlı olarak tasarımına değinilmiştir. Farklı darbe sayısına sahip giriş şekillendiriciler gerçek zamanlı olarak tasarlanarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.*

### Abstract

*Vibration is a serious problem which is encountered in almost all engineering fields. There are many open-loop and closed-loop control methods to reduce the vibration. Input shaping is one of the open-loop techniques in these control methods. Dynamic systems can make a pre-designed scenario of movement. Furthermore, they can be operated as predetermined by the operator. As the commands are instantaneously implemented by the operators; this situation requires the design of the real-time control. In this study, it's been mentioned about designing of input shaping technique as real-time in dynamic systems. Design has been implemented as real-time with input shapers which have different number of impulses; then obtained results are compared.*

### 1. Giriş

Dinamik sistemler, hareketleri sonucunda genellikle büyük miktarlarda ve uzun süre devam eden titreşimler üretir. Titreşimin azaltılması için bu sistemlerin kontrolünde açık çevrim, kapalı çevrim ve uyarlamalı kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Kapalı çevrim ve uyarlamalı yaklaşımlar geri besleme bilgisini gerektirir. Ancak burada, geri besleme bilgisinin doğru olarak ölçülmesi gerekmektedir. Diğer

yaklaşım ise, sisteme göre tasarlanan açık çevrim kontroldür. Bazı durumlarda, bu yaklaşımlar sistem yapısına göre birlikte kullanılabilir.

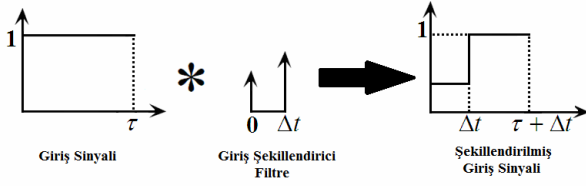
Birçok araştırmacı kapalı çevrim kontrol sistemleri ile titreşimi azaltma üzerine çalışmışlardır [1-2]. Ancak uygulamada toz, kir, nem ve ölçüm sisteminin zamanla ayarının değişmesi gibi bozucu etkiler geri besleme bilgisinin doğru olarak ölçülmesini engellemektedir. Giriş şekillendirme tekniği, bu tip uygulama alanlarında titreşimin azaltılmasına yönelik kullanılan bir açık çevrim kontrol yöntemidir. Tekniğin geri besleme bilgisini ve ilave kontrol elemanlarını gerektirmemesi kapalı çevrim kontrol yöntemlerine göre avantajdır. Sistem modelinin veya davranışının bilinmesi, bu tekniğin uygulanabilmesi için yeterlidir.

Bu çalışmada, artık titreşimin yok edilmesine veya azaltılmasına yönelik uygulanan giriş şekillendirme tekniği anlatılmıştır. İlk kısımda giriş şekillendirme tekniğinin genel yapısından bahsedilmiş, ardından tekniğin matematiksel denklemleri ve tasarımda göz önünde bulundurulacak kısıtlamalar ortaya konulmuştur. Son olarak tekniğin, hareketi bilinen bir senaryodaki ve gerçek zamanlı tasarımlarının nasıl yapıldığı anlatılmıştır.

### 2. Giriş Şekillendirme Tekniği

Giriş şekillendirme, mekanik sistemlerin hareketleri sırasında oluşturdukları titreşimi azaltmak için uygulanan bir tekniktir [3]. Bu teknikte sistem girişine uygulanan komut, zamanda ötelenmiş birden çok komuta dönüştürülür. Giriş komutu, giriş şekillendirici adı verilen filtre üzerinden geçirilerek sisteme uygulanır. Bu filtre, matematiksel olarak tasarlanmış darbe dizilerinden oluşur. Şekillendirilmiş komut, istenmeyen salınımları yok ederek sistemin titreşimsiz hareketini sağlar.

Metodun ilk uygulaması, 1950'lerin sonlarına doğru geliştirilen Posicast kontroldür [4]. Bu metotta giriş şekillendirici, Şekil 1'de gösterildiği gibi; aralarında  $\Delta t$  kadar zaman farkı bulunan iki darbe şeklinde ifade edilmiştir. Dolayısıyla giriş sinyali, giriş şekillendirici ile konvüle edildikten sonra ikili darbe biçimine dönüşmüş olur.



Şekil 1: Posicast kontrol tekniği

Posicast kontrol, sistem modelleme hatalarına karşı hassas olduğundan uzun yıllar boyunca gerçek sistemlerde kullanılması tercih edilmemiştir. Sonraki yıllarda Singer ve Seering (1990), model hatalarına karşı daha dayanıklı şekillendiriciler geliştirmişlerdir [5]. Böylece giriş şekillendirme tekniği, birçok endüstriyel uygulama için kullanışlı bir hale gelmiştir. Hassas koordinat ölçme makineleri [6], robotik kolların kontrolü [7], frezeleme işlemleri ve CNC tezgâhları [8-9], uydu sistemleri [10], yüksek hızlı kamera sistemleri [11] bu uygulama alanlarından bazılarıdır. 20. yüzyılın sonlarına doğru, giriş şekillendirme yöntemi vinç sistemlerinin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan birçok çalışmada vinç sisteme bağlı uç kütlelerin titreşiminin azaltılması amaçlanmıştır [12-16]. Ayrıca operatör kontrollü vinç sistemlerinde uç kütlelerin engellere çarpmadan ve titreşimsiz kontrolü üzerine de çalışmalar yapılmıştır [17].

### 3. Giriş Şekillendirici Denklemleri

Dinamik sistemler girişlerine uygulanan darbe genliklerine ve sistem parametrelerine bağlı olarak titreşim üretirler. Oluşan bu titreşime artık titreşim adı verilir. İkinci dereceden bir sistemin,  $t_0$  anında uygulanan darbeye karşı cevabı aşağıdaki gibidir.

$$y(t) = \left[ \frac{A\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)} \right] \sin\left(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} (t-t_0)\right) \quad (1)$$

Burada  $A$  uygulanan darbenin genliğini,  $\omega_n$  sistemin doğal frekansını,  $\zeta$  sistemin sönüm oranını göstermektedir. Sistemin  $n$  adet darbenin uygulanmasından sonra oluşturacağı cevap aşağıdaki gibidir.

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{A_i\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_i)} \right] \sin\left(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} (t-t_i)\right) \quad (2)$$

Burada  $t_i$ , darbenin uygulanma süresini,  $i$  darbe sırasını ve  $n$  ise son darbeyi ifade etmektedir. (2) denklemindeki  $n$  adet darbenin oluşturacağı toplam artık titreşim genliği  $R$  ile gösterilirse, bu ifade trigonometrik denklemler kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$R = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t_n} \sqrt{C^2 + S^2} \quad (3)$$

(3) denkleminde kosinüslü terimler  $C$  ve sinüslü terimler  $S$  ile gösterilmiş olup,  $t_n$  zamanından sonra oluşacak artık titreşim; yüzdesel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V = e^{-\zeta\omega_n t_n} \sqrt{C^2 + S^2} \quad (4)$$

Burada,

$$C = \sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega_n t_i} \cos(\omega_n t_i) \quad (5)$$

$$S = \sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega_n t_i} \sin(\omega_n t_i) \quad (6)$$

olarak ifade edilir.

Giriş şekillendiriciler, içerdikleri darbe genliklerine ve tasarlandıkları titreşim değerlerine göre adlandırılırlar. Darbe genliklerinin işaretine göre pozitif veya negatif şekillendiriciler; tasarlandıkları titreşim değerine göre ise ekstra hassas veya sıfır titreşim şekillendiriciler bulunmaktadır. (4) denkleminde  $n$  adet darbe için, sonsuz sayıda  $A_i$  ve  $t_i$  çözümü bulmak mümkündür. Kullanıcının gereksinimlerine göre en uygun çözümün elde edilebilmesi için denklemindeki bazı parametreler için kısıtlamalar konulmalıdır. Giriş şekillendirici tasarımında; titreşim, gürbüzlük, zaman ve genlik kısıtlamaları olmak üzere göz önünde bulundurulması gereken dört temel kısıtlama bulunmaktadır [18]. Giriş şekillendirici darbe genlikleri ve zaman değerleri, kısıtlama denklemlerinin çözümüyle elde edilmektedir [19]. Artık titreşim kısıtlamaları, dinamik sistemin hareketi sonunda oluşturacağı titreşime yönelik kısıtlamalardır. Gürbüzlük kısıtlamaları, sistemin parametre değişimlerine karşı duyarsızlığının bir ölçüsüdür. Başka bir ifadeyle sistemlerin çalışmaları sırasında daha önceden tasarlanan parametrelerinde değişimler meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı sistemlerin uygulama esnasında bu parametre değişimlerine mümkün olduğunca toleranslı olması istenir. Zaman kısıtlaması, tasarlanacak şekillendiricinin uygulama süresi ile ilgili bir kısıtlamadır. Şekillendiricinin mümkün olan en kısa zamanda şekillendirme işlemini yapması istenir. Darbe genlik kısıtlamasında, giriş komutunun şekillendirici girişinde ve çıkışında aynı değerde olması için darbe genliklerinin toplamının birim genlikte olması gerekir.

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1 \quad (7)$$

Titreşim kısıtlamalarında (4) denklemi sıfıra eşitlenip çözümler yapıldığında sıfır titreşim şekillendiriciler elde edilir. Buradan pozitif darbe genlikli ZV (2 darbe), ZVD (3 darbe), ZVDD (4 darbe) ve  $n$  darbeli sıfır titreşim giriş şekillendiriciler oluşturulur [5]. Şekillendirici isimlerinin sonundaki "D" harfleri (5) ve (6) denklemlerinin doğal frekansa göre türevinin alınıp, kısıtlama denklemlerine ilave edileceğini ifade etmektedir [5]. Tablo 1'de  $n$  adet darbe için giriş şekillendirici darbe genlikleri genelleştirilmiştir.

Tablo 1: Şekillendirici Darbe Genliklerinin Hesaplanması

	ZV (n=2)	ZVD (n=3)	ZVDD (n=4)	n Darbeli Şekillendirici
$A_1$	$\frac{1}{1+K}$	$\frac{1}{1+2K+K^2}$	$\frac{1}{1+3K+3K^2+K^3}$	$\frac{\binom{n-1}{0} K^0}{(K+1)^{n-1}}$
$A_2$	$\frac{K}{1+K}$	$\frac{2K}{1+2K+K^2}$	$\frac{3K}{1+3K+3K^2+K^3}$	$\frac{\binom{n-1}{1} K^1}{(K+1)^{n-1}}$
$A_3$	-	$\frac{K^2}{1+2K+K^2}$	$\frac{3K^2}{1+3K+3K^2+K^3}$	$\frac{\binom{n-1}{2} K^2}{(K+1)^{n-1}}$
$A_4$	-	-	$\frac{K^3}{1+3K+3K^2+K^3}$	$\frac{\binom{n-1}{3} K^3}{(K+1)^{n-1}}$
$A_n$	-	-	-	$\frac{\binom{n-1}{n-1} K^{n-1}}{(K+1)^{n-1}}$

Şekillendirici kaç darbeden oluşursa oluşsun ilk darbe  $t_1 = 0$  anında uygulanır. Devamında uygulanacak darbelerin zamanları için,

$$t_n = \frac{(n-1)\pi}{\omega_d} \quad (8)$$

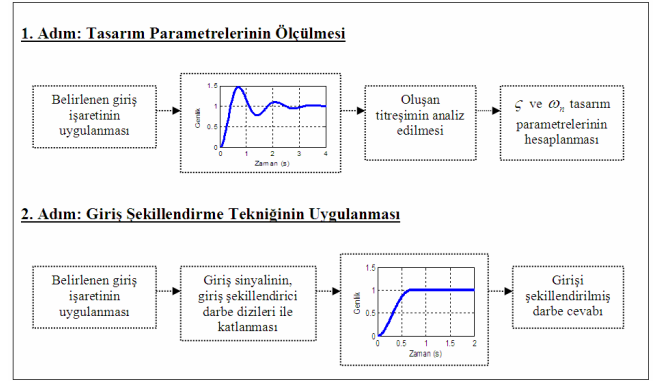
formülasyonu genelleştirilebilir. Burada  $n$  şekillendiricinin darbe sayısını ifade etmektedir. Tabloda verilen  $K$ , doğal frekans ve sönüm oranına bağlı olan ve hesaplama kolaylığı sağlayan bir katsayıdır.

$$K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (9)$$

Tablodaki  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  şekillendirici darbe katsayıları;  $K$  ve  $n$ 'ye bağlı kombinasyon ve binom açılımı olarak yazılabilir.

#### 4. Gerçek Zamanlı Giriş Şekillendirici Tasarımı

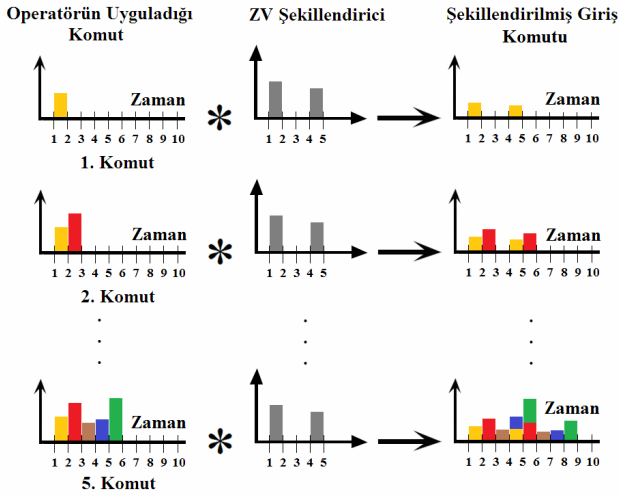
Giriş şekillendirme tekniği ilave sensörlere veya geri besleme bilgisine ihtiyaç duymaz. Bunun için sistemden bazı gerçek ölçümlerin yapılması yeterlidir. Bunlar sistemin doğal frekansı ve sönüm oranıdır. Bu iki parametre kullanılarak giriş şekillendirici filtre katsayıları elde edilebilir. Giriş şekillendirme tekniği önceden tasarlanmış bir hareket senaryosu için uygulanabileceği gibi; gerçek zamanlı olarak da tasarlanıp sisteme uygulanabilir. Gerçek zamanlı uygulamalar, çoğunlukla operatör kontrollü sistemlerde kullanılmaktadır. Bu teknik, operatöre yardımcı kontrol tekniği olarak birçok araştırmacı tarafından uygulanmıştır [12-17]. Bu bölümde öncelikle, bilinen bir hareket süresi için giriş şekillendirici tasarımından kısaca bahsedilecektir. Ardından gerçek zamanlı tasarımın nasıl yapıldığı anlatılacaktır.



Şekil 2: Hareket süresi bilinen giriş şekillendirici tasarım aşamaları

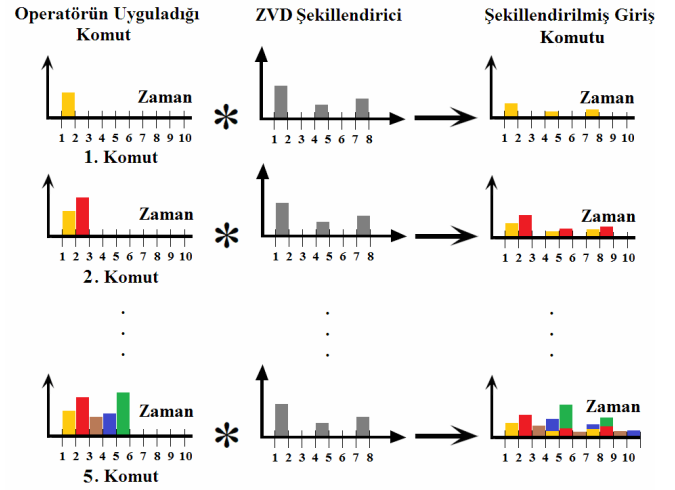
Şekil 2'de, sistemin bilinen bir hareket süresinde oluşturacağı titreşimi yok etmeye yönelik uygulama aşamaları gösterilmiştir. Bu tasarımın ilk adımında sisteme daha önceden belirlenen giriş sinyali uygulanır. Dinamik sistemin hareketi sonucu oluşan titreşim analiz edilerek, tasarım için gerekli olan parametreler hesaplanır. Hesaplanan bu değerler Tablo 1'de yerine yazılarak giriş şekillendirici darbe genlikleri ve uygulama zamanları hesaplanır. Bu tasarım, hareketi tekrar eden veya komut uygulama süresi sabit olan sistemlerde kullanılabilir. Örneğin 2 saniye periyot ile hareket ettirilen bir robot kolunun kontrolünde veya her seferinde 500 ms hareket ettirilen bir sistemin kontrolü için bu tasarım kullanılabilir. Bu tasarım sadece tasarlanan parametrelerde titreşimsiz hareketi sağlayabilir. Belirlenen giriş işaretinin değiştirilmesi, dış bozucu etkisi veya sistem parametre değişimleri gibi durumlarda titreşimsiz hareket sağlanamayabilir.

Operatör kontrollü dinamik sistemler, uygun zamanda ve doğrultuda uygulanan komutlar ile yönetilir. Yönetilen sisteme göre komutlar, biri diğerinin bitmesini beklemeden sürekli olarak uygulanabilir. Komutlar hangi sıklıkla uygulanırsa uygulansın, her bir komutun hareketini geçişimsiz olarak yapması istenir. Bunu sağlayabilmek için giriş şekillendirme tekniği, gerçek zamanlı olarak tasarlanır ve sisteme uygulanır. Gerçek zamanlı giriş şekillendiriciler, bilinen hareket süresi için tasarlanan şekillendiriciler ile benzer şekilde oluşturulmaktadır. Basit olarak bir gerçek zamanlı şekillendirici, birden çok küçük şekillendiricilerin birlikte uygulanmasıyla oluşturulur. Bu tasarımdaki giriş şekillendirici darbe genlikleri Tablo 1'den yararlanılarak hesaplanabilir. Gerçek zamanlı şekillendiricide uygulanan komutlar sırayla giriş şekillendirici filtre üzerinden geçirilirler. Ardından elde edilen şekillendirilmiş komutlar birbiri ardınca sisteme uygulanırlar. Birinci komut şekillendirilip sisteme uygulandıktan sonra ikinci komut aynı şekilde şekillendirilip sisteme uygulanır. Son komut uygulanana kadar algoritma bu şekilde devam eder. Bu işlem basit bir mikro denetleyici ile yapılabilir.



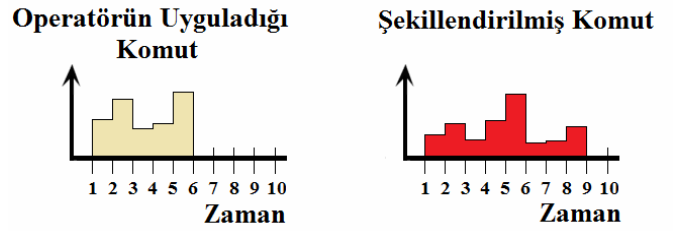
Şekil 3: n=2 ( ZV ) için Gerçek Zamanlı Giriş Şekillendirme Tekniğinin Uygulanması

Operatörün uyguladığı beş komut için gerçek zamanlı iki darbeleri şekillendirme işlemi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'e göre bazı komutların zaman boyutunda birbirleriyle çakıştıkları görülmektedir. Bu durum, o komut parçasının kendisinden önceki komut parçasıyla birlikte işleme alınacağı gösterir. Uygulanan tüm komutlar, şekillendirici filtreden geçirilerek gerçek zamanlı olarak belleğe kaydedilir. Uygulama sırasında, filtreden geçirilen komutlar bellekteki mevcut komut ile toplanır. Bu işlem devam ederken de, bellekteki mevcut komut gerçek zamanlı olarak sisteme uygulanır. Burada dikkat edilmesi gereken belleğin hafızasının aşılmasıdır. Bunun önüne geçmek için bellek hafızasının geçmişi belli bir yerden sonra silinir ve böylece yeni gelecek komutlar için hafızada yer açılmış olur [20].

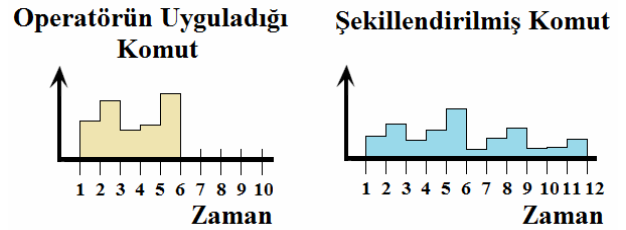


Şekil 4: n=3 ( ZVD ) için Gerçek Zamanlı Giriş Şekillendirme Tekniğinin Uygulanması

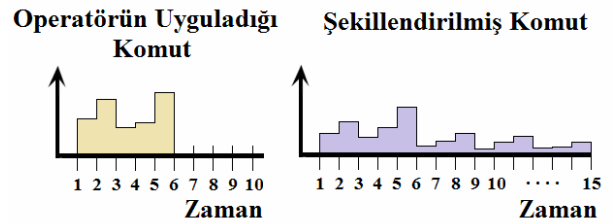
Şekil 3'te sisteme uygulanan komut profili bu kez Şekil 4'te gösterilen üç darbeleri şekillendirici ile konvüle edilerek şekillendirilmiş komut profili oluşturulmuştur. Şekillendirici filtre üç darbeden oluştuğu için operatörün uyguladığı komutlar, zamanda birbirlerinden ötelenmiş üç komuta dönüştürülmüştür.



Şekil 5: n=2 ( ZV ) için şekillendirilmemiş ve şekillendirilmiş komut profilleri



Şekil 6: n=3 ( ZVD ) için şekillendirilmemiş ve şekillendirilmiş komut profilleri



Şekil 7: n=4 ( ZVDD ) için şekillendirilmemiş ve şekillendirilmiş komut profilleri

Şekil 5, 6 ve 7’de operatörün uyguladığı şekillendirilmemiş komut ile giriş şekillendirici filtreden geçirildikten sonra elde edilen şekillendirilmiş komut profilleri gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, giriş şekillendiricinin darbe sayısı arttıkça şekillendirilmiş komutun uygulama süresinin uzadığı görülmektedir. Tasarımda önemli olan giriş şekillendirici filtrenin darbe sayısıdır. Komut profilinin alacağı şekil doğrudan bu sayıyla bağlantılıdır. Giriş şekillendirici filtre kaç darbeden oluşursa oluşsun, ardışık darbeler arasındaki süre eşittir. İlk darbe daima sıfır anında uygulanır ve darbe uygulama zamanları (8) denklemine uygun olarak hesaplanır. Gerçek zamanlı giriş şekillendirme için önerilen bu tasarımda göz önünde bulundurulması gereken bir diğer nokta da, filtrenin en az iki darbeden en çok da  $n$  darbeden oluşabileceğidir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, giriş şekillendirme yönteminin farklı darbe sayılarına sahip giriş şekillendiriciler ile gerçek zamanlı tasarımlarının nasıl yapıldığı anlatılmış ve bu tasarımlar kıyaslanmıştır. Teorik olarak bir giriş şekillendirici sonsuz sayıda darbe içerebilir. Ancak, şekillendiricinin darbe sayısı arttıkça; şekillendirilmiş komutun uygulama süresinin uzadığı görülmüştür. Bundan dolayı kullanıcının gereksinimlerine uygun en kısa süredeki şekillendiricinin tasarlanması yararlı olacaktır. Çalışmada, iki ve üç darbeli şekillendiriciler ile tasarımlar; Şekil 3 ve 4’te gösterilmiştir.  $n$  adet darbeden oluşan bir giriş şekillendiricinin tasarımı için de gerekli hesaplamalar Tablo 1’de genelleştirilmiştir. Kullanıcı belirlediği darbe sayısındaki şekillendiriciyi önerilen bilgiler ışığında tasarlayabilir. Bu çalışma, içerisinde negatif darbeleri barındıran şekillendiricilerin tasarımını da kapsayacak şekilde genişletilebilir.

## 6. Kaynaklar

- 1) Kotnik P.T., Yurkovich S. and Ozguner, U., “Acceleration feedback for control of a flexible manipulator arm”, *Journal of Robotic Systems*, 5(3), pp. 181 – 196, 1988.
- 2) Zuo K. and Wang D., “Closed Loop Shaped-Input Control of a Class of Manipulators with a Single Flexible Link”, IEEE Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp. 782-787, 1992.
- 3) Smith J., Kozak K. and Singhose W.E., “Input Shaping for a Simple Non-Linear System”, American Control Conference, Anchorage, AK, pp: 821-6, 2002.
- 4) Smith O.J.M., “Feedback Control Systems”, McGraw-Hill Book Company Inc., New York: s. 331-345, 1958.
- 5) Singer N.C. and Seering W.P., “Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, March, pp: 76-82, 1990.
- 6) Singhose W., Singer N. and Seering W., “Improving repeatability of coordinate measuring machines with shaped command signals”, *Precision Engineering*, 18:138–146, 1996.
- 7) Grosser K., Fortgang J. and Singhose W., “Limiting high mode vibration and rise time in flexible telerobotic arms”. In *Conf. On Systems, Cybernetics, and Informatics*, Orlando, FL., 2000.
- 8) Fortgang J., Marquez J., and Singhose W., “Application of Command Shaping on Micro-mills”, In *2004 Japan-USA Flexible Symposium on Automation*, Denver, CO, 2004.
- 9) Fortgang J., Singhose W., Marquez J., and Perez J., “Command Shaping for Micro-Mills and CNC Controllers”, American Control Conference, Denver, pp. 4531-4536, 2005.
- 10) Banerjee A.K., “Dynamics and Control of the WISP Shuttle-Antenna System”, *Journal of Astronautical Sciences*, 1: 73-90, 1993.
- 11) Wiederrich, J.L. and Roth, B., “Design of Low Vibration Cam Profiles”, Conference on Cams and Cam Mechanisms, Liverpool, England, Vol. 1., 1974.
- 12) Singer N., Singhose W. and Kriekku E., “An Input Shaping Controller Enabling Cranes to Move Without Sway”, in ANS 7th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Augusta, GA, pp. 225-31, 1997.
- 13) Singhose W., Porter L., Kenison M. and Kriekku E., “Effects of Hoisting on the Input Shaping Control of Gantry Cranes”, *Control Engineering Practice*, vol. 8, pp. 1159-1165, 2000.
- 14) Sorensen K., Singhose W. and Dickerson S., “A Combined Controller for Precision Crane Positioning with Minimal Sway”, in *IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, 2005.
- 15) Khalid A., Huey J., Singhose W., Lawrence J. and Frakes D., “Human Operator Performance Testing Using an Input-Shaped Bridge Crane”, *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 128, pp. 835-841, 2006.
- 16) Ahmad M.A., Zulkifely Z., Zawawi M.A., “Experimental Investigations of Input Shaping Schemes for Sway Control of a Gantry Crane System”, *Second International Conference on Computer and Network Technology*, pp. 483-486, 2010.
- 17) Frakes D., Grosser K., Fortgang J. and Singhose W.E., “Simulating Motion of an Operator-Controlled Gantry Crane in a Cluttered Work Environment”, in IMECE Conference, Orlando, FL, 2000.
- 18) Singhose, W.E., Command Generation For Flexible Systems, PhD Thesis, Massachusetts Institute Of Technology, 1997.
- 19) Gürleyük S.S., “Optimal Unity-Magnitude Input Shaper Duration Analysis”, *Archive of Applied Mechanics*, Vol.77, No.1, pp.63-71, 2007.
- 20) Singhose, W. and Seering, W., *Command Generation for Dynamic Systems*, William Singhose, Cambridge, 2007.