

# Algılayıcısız Dalga Tabanlı Parametre Sezimi ve Konum Kestirimi

Islam S.M. Khalil<sup>1</sup>, Emrah D. Kunt<sup>2</sup>, Asif Sabanovic<sup>3</sup>

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Mekatronik Programı  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

<sup>1</sup>kahalil@su.sabanciuniv.edu <sup>2</sup>edkunt@su.sabanciuniv.edu <sup>3</sup>asif@sabanciuniv.edu

## Özetçe

Bu çalışmada, mekanik dalgalar, algılayıcısız bir yöntem ile doğal geri besleme olarak dinamik bir sistem boyunca yayılım sergileyen mekanik dalgaların bütün sistem bilgilerini sistemin bir sınır koşuluna geri taşıdığı dikkate alınarak sistem parametrelerinin yanında sistem dinamiğinin de belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Mekanik dalgalar hassas bir şekilde kestirilir, analiz edilir ve düzgün bir şekilde yorumlanır ise sistemden belirli bilgileri alabilmek için sisteme herhangi bir algılayıcı bağlamaksızın mekanik dalgalar doğal bir şekilde bu geri besleme sürecinde kullanılabilir. Bu bildiride sistem parametrelerinin ve toplu ögeli esnek sistem konumlarının kestirimi amacıyla mekanik dalgalar kullanılmıştır.

In this work, mechanical waves are used in order to estimate dynamics of any flexible lumped system along with its parameters without taking any measurement from the system. By considering mechanical waves that propagate through the dynamical system as a natural feedback that carries all system information back to one of the system boundary conditions. And instead of attaching any sensor or performing any parameter identification process to obtain certain information from the system, mechanical waves are estimated, analyzed and decoupled in order to extract system dynamics and parameters. In this paper, waves are used in order to estimate flexible system parameters and states.

## 1. Giriş

Bir denetim görevini algılayıcısız bir şekilde gerçekleştirmenin bir yolu da sistem boyunca doğal bir geri besleme olarak yayılım gösteren ve eyleyiciden gözlem ve kestirimi yapılabilen mekanik dalgaları göz önüne almaktır. [1] Ek olarak, bu dalgalar sistemden mümkün olduğu kadar çok bilgi edinebilmek amaçlı sistemden eyleyiciye yansıyan dalgaların farklı etkilerin katılıkları, sönüm katsayıları ve haricen uygulanan kuvvet ve bozucu etkenler gibi tüm sistem detaylarını taşıdığı göz önüne alınarak çözümlenebilmektedir. Başka bir deyişle, yansıyan dalga, sistem parametrelerinin yanında sistem dinamiklerini de bağlaşıklık bir şekilde taşımaktadır. Zor olan süreç her bir bilginin yansıyan dalgadan çıkarımı nasıl yapılmalıdır ki haricen uygulanan kuvvetlerin, konumların kestirimi yapılabilir ve sistem parametreleri tanımlanabilmelidir. Yansıyan dalgalara literatürde farklı yaklaşımlar mevcuttur.

Bazıları yansımaları eyleyici üzerinde her bir eklemde red-dedilebilen ve böylece gürbüz hareket denetleyicilerin elde edilebileceği bozucu etkenler olarak ele almıştır [2]. Bu yöntem, denetim probleminin ivme denetimine dönüştürülerek hareket denetim görevini gürbüz bir şekilde gerçekleştirebilmek açısından verimli sonuçlar vermektedir [3],[4]. Diğer yandan bazıları eyleyicilerin mekanik dalgaları hem başlatma hem de sönümlendirme amaçlı kullanılabileceğini önermiştir [5],[6]. Mekanik dalgalar yük arabasının hareketinin yükten ve yüke doğru hareket eden dalgaları başlatıcı ve/veya sönümlendirici olarak ele alınarak köprülü vinçlerin analizi ve denetiminde kullanılmıştır [7],[8]. Ayrıca, mekanik dalgalar dışa giden ve dönen dalgalar olarak ayrıştırılmış ve yük arabasının hareketi ile her biri farklı bir şekilde ele alınmıştır. Asgari dinamik stratejisi [9]'da incelenmiş ve  $n$  durum değişkeni yerine her bir kütle için iki değişken kullanılmış, sadece eyleyici hareketi zaman üzerinde sistemin nasıl tepki verdiği bakılarak iki bileşene ayrılmıştır. Esnek yapıların denetimi için dalga tabanlı denetim ile doğrusal karesel düzengeci, Bang-Bang denetimi ve girdi biçimlendirilmesi gibi farklı yöntemlerin karşılaştırılması [10]'da sunulmuştur. İlk yöntem bütün sistem durumlarına veya kestirimlerine ihtiyaç duyarken diğerleri kesin ve tam modele gereksinim duymaktadır. Diğer yandan, dalga tabanlı yaklaşım  $n$  serbestlik dereceli bir sisteme de herhangi bir değişiklik yapılmadan uyarlanabilmektedir. Dalga tabanlı etkin titreşim denetimi [11]'de düzensiz sönümlü bir kütle yay sistemine uygulanmıştır. Bu bildiride, yansıyan mekanik dalgalar, sisteme herhangi bir algılayıcı takmaksızın toplu ögeli esnek bir sistemde parametrelerin, katı ve esnek konumların kestirimi için kullanılmıştır. Bildiri şu şekilde düzenlenmiştir, 2. bölümde mekanik dalga yayılımı bir aktarım fonksiyonu yorumlamasıyla tartışılmış ve Ohnishi gözlemcisi kullanılarak belirlenmiştir. Parametre ve katı yapı yerdeğişimi kestirimleri 3. bölümde gerçekleştirilmiştir. 4. bölümde esnek konumlar incelenmiş ve deney sonuçları ve sonuçlar 5. ve 6. bölümlerde verilmiştir.

## 2. Esnek Yapılarda Dalga Yayılımı

### 2.1. Dalga Denklemi Yorumlanması

Mekanik dalgalar esnek yapılar boyunca aşağıdaki tek boyutlu dalga denklemine göre yayılım gösterirler

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + B \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} - v^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \mathbf{f}(t,x) \quad (1)$$

bu denklemde  $B$  sönüm katsayısı,  $f(t, x)$  giriş kuvvet fonksiyonu ve  $v$  dalga yayılım hızıdır.

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

ve dalga denkleminin çözümü şu şekildedir

$$u(x, t) = \frac{1}{2} \{f(x + vt) + f(x - vt)\} + S + R \quad (3)$$

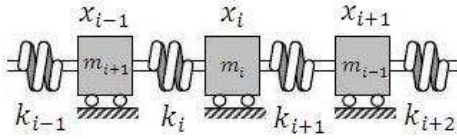
$$S \triangleq \frac{1}{2v} \int_{x-vt}^{x+vt} g(s) ds$$

$$R \triangleq \frac{1}{2v} \int_0^t \int_{x-v(t-\tau)}^{x+v(t-\tau)} f(s, \tau) ds d\tau$$

$B = 0$  varsayıldığında  $g(s)$  dalganın başlangıç hızıdır. Dalga denkleminin çözümü göstermektedir ki, herhangi bir başlangıç dalgası  $f(x + vt)$  ve  $f(x - vt)$  olmak üzere zıt yönlere hareket eden iki eşit parçaya ayrıştırılabilir. Ayrıca (3)'ün doğrusallığı sistem boyunca yansımaların ve evirtimlerin olduğu sınır koşullarına yakın yerlerde iki noktada tekrar birbirlerini oluşturabileceklerini göstermektedir. [12].

## 2.2. Aktarım Fonksiyonu Yorumlanması

(1)'in fiziksel anlamını yorumlamanın bir diğer yolu da Şekil 1'de gösterilen simetrik toplu ögeli sistemi incelemektir.



Şekil 1: Toplu Ögeli Esnek Sistem.

her bir kütle hareketini komşusu ile bağdaştıran aktarım fonksiyonu  $G(s)$  [11]

$$X_{i+1}(s) = G(s)X_i(s) \quad (4)$$

ve  $i^{nci}$  kütle için hareket denklemi şu şekildedir;

$$m\ddot{x}_i = k(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) \quad (5)$$

Laplace dönüşümü alındığında  $G(s)$  cinsinden karesel bir denklem elde edilir

$$G^2(s) - (ms^2 + 2k)G(s) + k = 0 \quad (6)$$

Karesel denklem çözüldüğünde

$$G_{1,2}(s) = 1 + \frac{1}{2} \frac{s^2}{2\omega_n^2} \pm \sqrt{\frac{s^2}{2\omega_n^2} \left(1 + \frac{s^2}{2\omega_n^2}\right)} \quad (7)$$

elde edilir ve her bir kütle hareketi için genel çözüm iki bileşenin üstüştürümüdür.

$$X_i(s) = \alpha_i(s)G_1(s) + \beta_i(s)G_2(s) \quad (8)$$

$$\xi(x + vs) \triangleq \alpha_i(s)G_1(s)$$

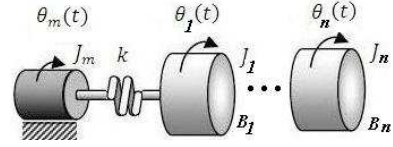
$$\xi(x - vs) \triangleq \beta_i(s)G_2(s)$$

$$X_i(s) = \xi(x - vs) + \xi(x + vs) \quad (9)$$

$\alpha_i(s)$  ve  $\beta_i(s)$  gelişigüzel, ve (9) tarafından verilen çözüm (3)'deki dalga denklemi çözümünden elde edilen sonuca benzer olarak  $i^{nci}$  kütle konumunun zıt yönlere aynı hızla hareket eden iki bileşenin üstüştürümünün bir sonucu olduğunu ifade etmektedir. Dalga yayılımına hükmeden bu çözüm doğrusaldır ve dalgaların iki eşit parçaya ayrılmış ve zıt yönlere hareket etmekte olduklarını ve çarpışma anında birbirlerini doğrusal bir şekilde herhangi bir sistem sınır koşulunda veya yakınında oluşturacaklarını belirtmektedir.

## 2.3. Yansıyan Dalga ve Sistem Dinamikleri

Mekanik dalgalar (3) veya (9)'a göre davranıyorlar ise, toplu ögeli esnek yapıdaki mekanik dalgaların fiziksel betimlenmesi nasıl olacaktır? Şekil 2,  $n$  serbestlik dereceli toplu ögeli esnek eylemsizlik sistemi göstermektedir ve hareket denklemleri şu şekildedir.



Şekil 2: Toplu Ögeli Esnek Eylemsizlik Sistemi.

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + k\theta = \tau \quad (10)$$

$\tau$  girdi torkları yöneyi,  $\theta$  genelleşmiş sistem kordinat yöneyi,  $J, B$  ve  $K$  sırasıyla eylemsizlik, sönüm ve katılık matrisleridir. İlk toplu ögeli eylemsizlik kütle hareket denklemi çıkarılacak olursa

$$J_m\ddot{\theta}_m + B(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1) + k(\theta_m - \theta_1) = \tau_1 \quad (11)$$

elde edilir ve eyleyici üzerindeki yansıyan tork dalgası şu şekildedir

$$\tau_{\text{ref}} \triangleq B(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1) + k(\theta_m - \theta_1) \quad (12)$$

ve (10)'dan yansıyan torku da şu şekilde ifade edebiliriz

$$\tau_{\text{ref}} = \sum_{i=1}^n J_i\ddot{\theta}_i + \tau_{\text{ext}_i} \quad (13)$$

burada  $n$  sistemin genelleşmiş kordinat sayısı,  $\tau_{\text{ext}_i}$  her bir toplu ögeli kütlede harici bozucu etkidir. Doğrusal toplu ögeli sistemlerde eyleyici üzerindeki yansıyan kuvvet şu şekilde ifade edilir

$$f_{\text{ref}} \triangleq B(\dot{x}_m - \dot{x}_1) + k(x_m - x_1) \quad (14)$$

$$f_{\text{ref}} = \sum_{i=1}^n m_i\ddot{x}_i + f_{\text{ext}_i} \quad (15)$$

Burdan eyleyici üzerindeki yansıyan tork dalgasının bütün sistem dinamiklerini içerdiği çıkmaktadır. Ek olarak (13)'ün Laplace dönüşümünü alacak olursak, dalga ile sadece sistem

dinamikleri değil aynı zamanda dalga frekans spektrumuna bakılarak esnek sistemin salınım kipleri de belirlenebilir.

$$\mathbf{T}_{ref}(j\omega) = \sum_{i=1}^n J_i s^2 \ddot{\theta}_i(j\omega) + T_{ext_i}(j\omega) \quad (16)$$

## 2.4. Yansıyan Dalga Kestirimi

Bir sistemin yansıyan tork dalgasının girdi tarafında bulunduğu zamanki durum uzay gösterimi şu şekildedir;

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{b}u + \mathbf{e}d \\ y &= \mathbf{c}x \end{aligned} \quad (17)$$

bu denklemde  $\mathbf{e}$  yansıyan tork dalgasının dağıtım vektörüdür. Parametre değişimi göz önünde bulundurulursa

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{A}_o + \Delta\mathbf{A} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{b}_o + \Delta\mathbf{b} \end{aligned} \quad (18)$$

$\Delta\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{A}$ 'daki ve  $\Delta\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{b}$ 'deki değişimlerdir ve yeni durum uzayı denklemleri şu şekildedir;

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (\mathbf{A}_o + \Delta\mathbf{A})x + (\mathbf{b}_o + \Delta\mathbf{b})u + \mathbf{e}d \\ &= \mathbf{A}_o x + \mathbf{b}_o u + (\Delta\mathbf{A}x + \Delta\mathbf{b}u + \mathbf{e}d) \end{aligned} \quad (19)$$

ve (19)'un sağdaki kısımdaki üçüncü terimi hem yansıyan tork dalgasını hem de parametre değişim bozucu etkenini ifade etmektedir,

$$\tilde{d} \triangleq \Delta\mathbf{A}x + \Delta\mathbf{b}u + \mathbf{e}d \quad (20)$$

eyleyici parametreleri değerlendirildiğinde (20) şu şekilde ifade edilebilir

$$\begin{aligned} \tilde{d} &= \tau_{ref} + \Delta k_t i_m - \Delta J_m \ddot{\theta}_m \\ &= k(\theta_m - \theta_a) + B(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_a) + \Delta k_t i_m - \Delta J_m \ddot{\theta}_m \end{aligned} \quad (21)$$

$\Delta k_t$  ve  $\Delta J_m$  nominal eyleyici tork sabitinde ve eyleyici ataletindeki değişimlerdir,

$$\begin{aligned} J_m &= J_{m0} + \Delta J_m \\ k_t &= k_{t0} + \Delta k_t \end{aligned} \quad (22)$$

eyleyici üzerindeki toplam bozucu etkenin, eyleyici akımı ve hızı kullanılarak şu şekilde kestirimi yapılabilir,

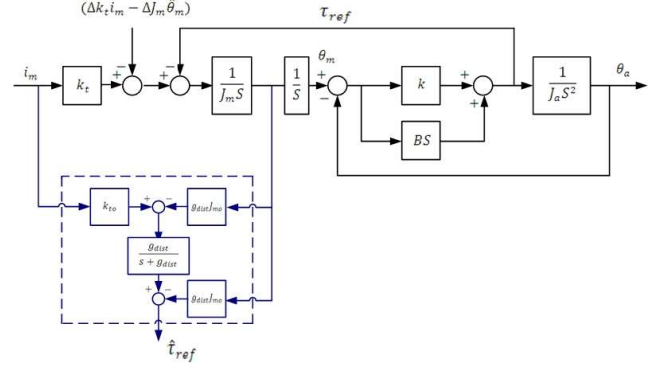
$$(J_{m0} + \Delta J_m) \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = (k_t + \Delta k_t) i_m - \tau_{ref} \quad (23)$$

$\tau_{ref} \gg \Delta k_t i_m + \Delta J_m \ddot{\theta}_m$  varsayılarak, Şekil 3 yansıyan torkun kestirim sürecini göstermektedir ve kestirilmiş tork  $g_{dist}$  kesim frekanslı alçak geçiren süzgeç ile filtrelenmiştir.

## 3. Parametre Kestirimi

### 3.1. Katı Gövde Hareket Kestirimi

Toplu öğeli esnek sistemlerin hareketleri katı veya esnek olabildiği için, sistemdeki kuvvet fonksiyonu frekansına göre [12], girdi frekansı sistem rezonans frekansından uzağa düşüyor ise esnek sistem bir katı gövde hareketi ile salınacaktır. Bu özel durumda bütün toplu öge kütleler arasındaki hareket oranı



Şekil 3: Yansıyan Tork Kestirimi

aynıdır ve yansıyan dalgadan sisteme hiçbir algılayıcı eklenmeden aşağıdaki denklem aracılığı ile hesaplanabilir [13],

$$\hat{\theta}(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n J_i} \int_0^t \int_0^t \hat{\tau}_{ref} dt dt \quad (24)$$

veya doğrusal hareket

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} \int_0^t \int_0^t \hat{f}_{ref} dt dt \quad (25)$$

$\hat{\theta}(t)$  ve  $\hat{x}(t)$ ,  $\theta(t)$  ve  $x(t)$ 'nin sırasıyla kestirilmiş konumlarıdır.

### 3.2. Parametre Kestirimi

(26)'deki gerçek konumu kullanmak yerine katı sistem konumunun kestirimi kullanılmaktadır

$$\hat{\tau}_{ref} = k(\theta_m - \hat{\theta}) + B(\dot{\theta}_m - \dot{\hat{\theta}}) \quad (26)$$

Konum ve hız farklarını aşağıdaki gibi tanımlandığında

$$\begin{aligned} \xi &\triangleq (\theta_m - \hat{\theta}) \\ \eta &\triangleq (\dot{\theta}_m - \dot{\hat{\theta}}) \end{aligned}$$

$\xi$  eyleyici ve kestirilmiş sistem konumları arasındaki farkı gösteren veri noktalarını içeren bir yöney,  $\eta$  bu veri noktalarının zamana göre türevleridir. (26)'yı yeniden yazacak olursak

$$\hat{\tau}_{ref} = k \xi + B \eta \quad (27)$$

$\hat{\tau}_{ref}$  kestirilmiş yansıyan tork data noktalarının yöneyi, (27)'yi aşağıdaki şekilde dizey formunda yazarsak

$$\begin{bmatrix} \xi & \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K \\ B \end{bmatrix} = \hat{\tau}_{ref} \quad (28)$$

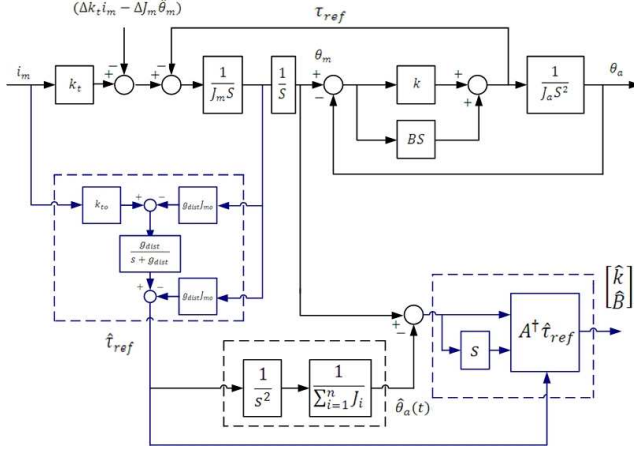
denklem sayısı bilinmeyen sayısından daha fazla olan artık belirtilmiş bir sistemdir ve böyle sistemler için en iyi çözüm ceza fonksiyonunu küçülten çözümdür. Başka bir deyişle, sönüm katsayısı ve eklem katılığı gibi bazı sistem parametreleri yansıyan dalgadan problemi sistem parametreleri üzerinde bir yenileme problemine dönüştürerek kestirimi yapılabilir. Veri dizeyini şu şekilde tanımlar isek,

$$\mathbf{A} \triangleq \begin{bmatrix} \xi & \eta \end{bmatrix}$$

sistem parametreleri şu şekilde hesaplanabilir

$$\begin{bmatrix} \hat{K} \\ \hat{B} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^\dagger \hat{\tau}_{ref} \quad (29)$$

$\mathbf{A}^\dagger$ ,  $\mathbf{A}$ 'nın yalancı tersi (pseudo inverse), ve (29)'un çözümü esnek yapı boyunca katılık ve sönüm katsayıları birbiriyle en iyi sistem parametrelerini verir. Şekil 4 eyleyici parametre ölçümlerine dayalı parametre kestirim sürecini göstermektedir.



Şekil 4: Parametre Kestirim Süreci.

## 4. Esnek Hareket Kestirimi

### 4.1. Özyineli Hareket Kestirimi

Denklem (24) göstermektedir ki, esnek toplu ögeli sistemin katı gövde hareketinin kestirimi elde edilebilir fakat esnek kipleri uyaran bir girdi olması durumunda başka bir deyişle girdi sistemin rezonans frekansında bir enerjiye sahip olursa diğer esnek kipler nasıl olacaktır? Esnek kipler uyarılacak ve toplu ögeli kütleler sistem kipsel matrisine göre birbirinden farklı şekilde hareket edeceklerdir.

(12) şu şekilde yazılabilir

$$\hat{B} \dot{\theta}_o - \hat{B} \dot{\theta}_1 + \hat{k} \theta_o - \hat{k} \theta_1 = \hat{\tau}_{ref} \quad (30)$$

terimleri aşağıdaki gibi düzenlenir

$$\hat{B} \dot{\theta}_1 + \hat{k} \theta_1 = \hat{B} \dot{\theta}_o + \hat{k} \theta_o - \hat{\tau}_{ref} \quad (31)$$

ve sağdaki kısmı şu şekilde tanımlarırsa

$$\alpha \triangleq \hat{B} \dot{\theta}_o + \hat{k} \theta_o - \hat{\tau}_{ref}$$

esnek veya genel birinci toplu ögeli kütle konumu için çözülebilen birinci dereceden türetik bir denklem elde edilir. (31)'i çözersek

$$\hat{\theta}_1(t) = e^{-\frac{\hat{k}}{\hat{B}}t} \int_0^t \beta e^{\frac{\hat{k}}{\hat{B}}t} dt \quad (32)$$

elde ederiz ve bu denklemde

$$\beta \triangleq \frac{\alpha}{\hat{B}}$$

(10)'dan ikinci hareket denklemine ihtiyaç duyan ikinci toplu ögeli kütle konumunun genel kestirimine gidecek olursak (10)

$$\hat{B} \dot{\theta}_2 + \hat{k} \theta_2 = \gamma \quad (33)$$

bu denklemde

$$\gamma \triangleq J_1 \hat{\theta}_1 - \hat{B}(\dot{\theta}_o - \hat{\theta}_1) - \hat{k}(\theta_o - \hat{\theta}_1) + \hat{B} \hat{\theta}_1 + \hat{k} \hat{\theta}_1$$

şeklindedir. (33)'ü  $\theta_2(t)$  için çözer isek

$$\hat{\theta}_2(t) = e^{-\frac{\hat{k}}{\hat{B}}t} \int_0^t \zeta e^{\frac{\hat{k}}{\hat{B}}t} dt \quad (34)$$

elde ederiz. Burada

$$\zeta \triangleq \frac{\gamma}{\hat{B}}$$

'dir. üçüncü toplu ögeli kütle konumunun kestirimi şu şekilde verilmektedir.

$$\hat{\theta}_3(t) = e^{-\frac{\hat{k}}{\hat{B}}t} \int_0^t \varepsilon e^{\frac{\hat{k}}{\hat{B}}t} dt \quad (35)$$

bu denklemde

$$\varepsilon \triangleq \frac{\delta}{\hat{B}}$$

$$\delta \triangleq J_2 \hat{\theta}_2 - \hat{B}(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) - \hat{k}(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) + \hat{B} \hat{\theta}_2 + \hat{k} \hat{\theta}_2$$

'dir Yukarıdaki denklemden şu sonuç çıkarılabilir ki, esnek toplu ögeli konumların kestirimi özyineli bir biçimde yapılmaktadır ve bütün süreç yansıyan tork kestirimi ile başlayan, katı gövde hareket kestirimi ve sistem parametrelerinin kestirimi ile devam eden ve final esnek konum kestirimleri için özyineli bir süreç ile sona eren bir kestiriciler zincirine dayanmaktadır. Genelde esnek toplu ögeli kütle konumlarının kestirimleri şu formül ile verilmektedir.

$$\hat{\theta}_i(t) = e^{-\frac{\hat{k}}{\hat{B}}t} \int_0^t \Omega e^{\frac{\hat{k}}{\hat{B}}t} dt \quad (36)$$

Yukarıdaki denklemde

$$\Omega \triangleq \frac{\Psi}{\hat{B}}$$

$$\Psi \triangleq g(J_{i-1}, \hat{\theta}_{i-1}, \hat{\theta}_{i-1}, \hat{\theta}_{i-1}, \hat{k}, \hat{B})$$

'dir.

### 4.2. Bütün Kestirim Algoritmasının Özeti

1. Sistem rezonans frekansında bir enerjiden bağımsız girdi üretebilmek için kontrol girdisinin filtrelenmesi ve Fourier sentezi
2. Eyleyici akım ve hız değerlerinin kullanılarak yansıyan tork dalgasının,  $\hat{\tau}_{ref}$ , kestirimi
3. Şağıdaki denklem kullanılarak katı gövde konumunun belirlenmesi

$$\hat{\theta}(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n J_i} \int_0^t \int_0^t \hat{\tau}_{ref} dt dt$$

4. En iyi katılık ve sönüm katsayılarının aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanması

$$\begin{bmatrix} \hat{K} \\ \hat{B} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^\dagger \hat{\tau}_{ref}$$

5. Aşağıdaki özyineli formülün kullanılarak esnek konumların kestirimlerinin hesaplanması

$$\hat{\theta}_i(t) = e^{-\frac{\hat{k}}{B}t} \int_0^t \Omega e^{\frac{\hat{k}}{B}t} dt$$

## 5. Deneysel Sonuçları

Deneyler 2 ve 3 serbestlik dereceli hem eylemsiz ve doğrusal toplu ögeli kütle yay sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tablo 1 konum kestirim deneyinde kullanılan parametreleri göstermektedir ve bu parametre sezim deneyinden önce gerçekleştirilmelidir. Tablo 2 katı hareket kestirimi ile birlikte kestirilmiş tork ölçümü gerektiren parametre kestirim deneylerinde kullanılan deneysel parametreleri göstermektedir.

Tablo 1: Deneysel Parametreler

Konum Kestirim Deneyi		
Parametreler	Eylmsz. Kütle Den.	Doğrusal Kütle Den.
$J_1, m_1$	6192.707 gcm <sup>2</sup>	2641.8 g
$J_2, m_2$	200.17 gcm <sup>2</sup>	2641.8 g
$g_{dist}$	100 rad/sn	100 rad/sn
Örnek. zamanı	1msn	1msn

Şekil 5,6 son kütle rastgele bir yörüngede hareket ederken toplu ögeli kütlelerin kestirilmiş ve gerçek konumları arasındaki farkı göstermektedir. Şekil 5 eylemsizlik kütlelerinin, Şekil 6 ise doğrusal kütlelerin hareket kestirimlerini göstermektedir. Kestirim süreci çift tümleve dayandığı için, ne kadar küçük olsa da herhangi bir hatanın varlığı tümlev alma süreci ile hata birikecek ve büyüyeceğinden kestirim değerlerinin gerçek değerlerinden zamanla ıraksamasına yol açacaktır.

Parametre tanılama süreci için deneyler üç kere gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 3'te özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan yayların teorik katılık değerleri aşağıdaki formülden elde edilebilmektedir

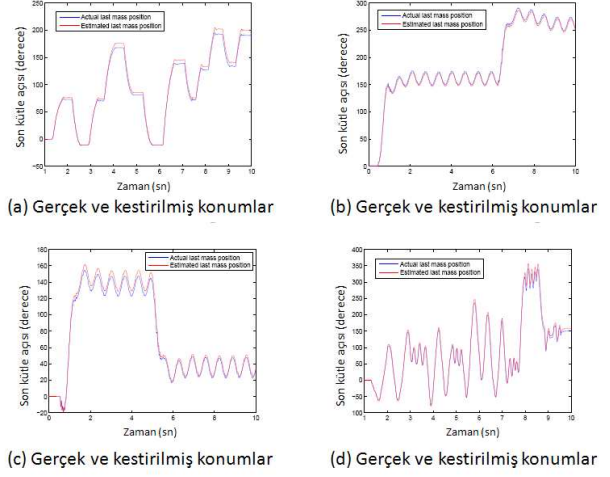
$$K = \frac{Gd}{8c^3n} \quad (37)$$

$G$  katılık büyüklüğü (modulus of rigidity),  $d$  bobin çapı,  $c$  yay indeksi ve  $n$  terimlerin etkin sayısı, ve katılık şu şekilde hesaplanabilir

$$K = \frac{70 \times 10^9 \times 2}{8 \times \left(\frac{8}{2}\right)^3 \times 21} = 1.627 \text{ kN/m}$$

Tablo 2: Deneysel Parametreler

Parametre	Değer
$k_t$	40.6 mNm/A
$J_m$	209 gcm <sup>2</sup>
$J_1$	200.17 gcm <sup>2</sup>
$J_2$	6192.707 gcm <sup>2</sup>
$g_{dist}$	100 rad/sn
Hız AGS	100 rad/sn



Şekil 5: Eylemsizlik Toplu Ögeli Sistem için Konum Kestiriminin Deneysel Doğrulanması

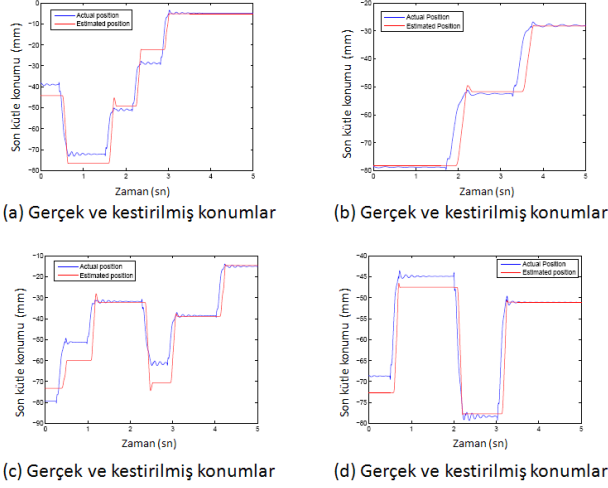
Tablo 3: Parametre Sonuçları

Parametre Kestirim Deneyi		
Deney	K (kN/m)	B (Nsn/m)
1. Deney	2.3416	0.08545
2. Deney	1.7822	0.08552
3. Deney	1.7653	0.08570

Şekil 7, 3'te gösterilen en iyi parametreler kullanılarak sentezlenmiş dalga ile gerçek ölçülmüş yansıyan dalganın karşılaştırılmasını göstermektedir.

## 6. Sonuçlar

Bu makalede, esnek dinamik sistem eyleyicileri üzerindeki yansıyan dalgalar, sistem parametrelerini ve toplu ögeli sistem kütlelerin konumlarının algılayıcısız bir şekilde belirlenmesi için kullanılmış ve sistemin algılayıcı eklentilerinden bağımsız kalmasını sağlamıştır. Süreç sadece iki ölçüme dayanmaktadır; eyleyici akım ve hız ölçümleri. Bu iki parametre kullanılarak, yansıyan dalga kestirimi yapılabilmekte, sönüm ve katılık sistem boyunca birbiriyle ise bundan toplu ögeli sistemin katı konumları kestirilebilmekte ve yansıyan dalga kestirimi ve katı konum kestirimleri kullanılarak en iyi sistem parametreleri elde edilebilmektedir. Ve son olarak özyineli bir denklem herbir toplu ögeli kütle için genel esnek hareketlerinin hesaplanmasına sağlamaktadır. Bu makalede önerilen algoritma yansıyan tork, katı konum ve parametreler için bir kestirici zincirine ve eğer kuvvet girdisi sistemin esnek kiplerinden birini uyardıysa genel esnek hareket için özyineli bir hesaplama ihtiyacı duymaktadır. Süreç, herhangi bir hata varlığında tümlev almanın bu hatanın birikmesine ve kestirilmiş değerlerin gerçek konum değerinden ıraksamasına yol açacağından katı gövde kestirim sürecindeki çift tümlev alıcıdan zarar görmektedir. Ancak, tümlev alma sürecine bir başlangıç hatası olmadan



Şekil 6: Doğrusal Toplu Ögeli Sistem için Konum Kestiriminin Deneysel Doğrulanması

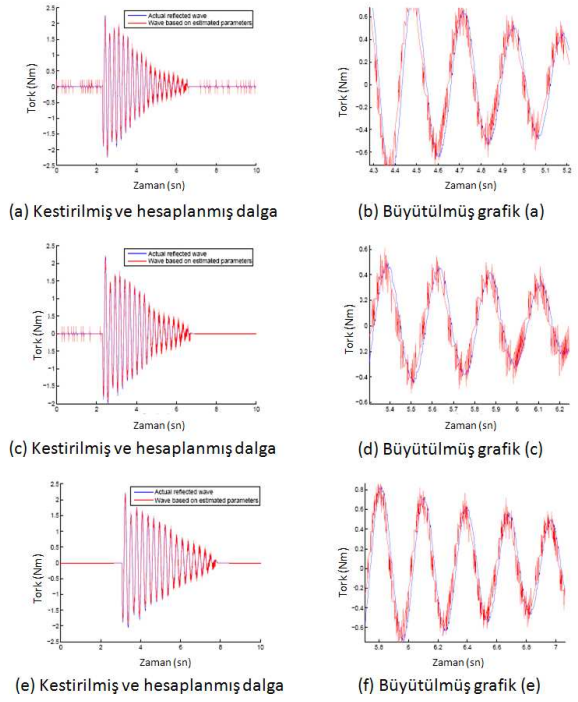
başlamak zor olduğundan böyle bir sorunun çözümü bu hatanın zamanla olan gelişimini incelemek ve elemektir fakat henüz gerçekleştirilmemiştir. Bu hatanın oluşmasındaki bir diğer sebep de eyleyicideki parametre değişimlerinin göz ardı edilmesi varsayımı ve bozucu etkenin yansıyan dalga olarak kabul edilmesi fakat gerçekte parametre değişimleri de bozucu etken içerisinde kendi payına sahiptir. Bu makalede sunulan sonuçlar göstermektedir ki, yansıyan dalgalar toplu ögeli esnek sistem konumlarının kestiriminde ve bu kestirimler de sistemde gerçek ölçüm yerine geri besleme amaçlı kullanılabilir. Bu birtakım sebepler yüzünden sistemden ölçüm alınmasının zor olduğu durumlarda avantajlı olabilmektedir. Bu makalede yansıyan dalga ölçümüne ve bunu takip eden kestiricilere dayanan toplu ögeli esnek sistemlerin konum kestirimi için bir algoritma sunulmuştur. Makaledeki sonuçlar göstermektedir ki kesin bir denetim problemini başarmak için kestirilmiş konum bilgisi gerçek ölçüm yerine kullanılabilir.

## 7. Teşekkür

Yazarlar proje numarası 00183.STZ.2007-2 olan SanTez projesi tarafından sağlanan finansal destek için teşekkür eder.

## 8. Kaynakça

- [1] Kouhei Ohnishi, Masaaki Shibata, Toshiyuki Murakami, "Motion Control for Advanced Mechatronics", *ASME*, vol. 1, 1996, pp 56-67.
- [2] Toshiyuki Murakami and Kouhei Ohnishi, "Observer-Based Motion Control" *IEEE*, vol. 1, 1993, pp 1-6.
- [3] A.Sabanovic, "Sliding Modes in power electronics and motion controlsystems", in *29th IEEE Conference, Industrial Electronics Society (IECON'03)*, Roanoke, VA, 2003, pp. 997-1002.
- [4] M. Matsuoka, T. Murakami and K. Ohnishi, "Vibration suppression and disturbance rejection control of flexible



Şekil 7: Deneysel Sistem Parametre Tanılaması.

link arm," in *Proc Int. Conf. IEEE Industrial Electronics Society (IECON'95)*, vol. 2, 1995, pp 1260-1265.

- [5] William J.O'Connor, "Wave-Based Analysis and Control of Lump-Modeled Flexible Robots," in *Proc Int. Conf. IEEE Industrial Electronics Society (IECON'95)*, vol. 2, 1995, pp 1260-1265.
- [6] William J.O'Connor, "Control of flexible mechanical systems:Wave-based techniques," vol. 1, 2007, pp 4192-4202.
- [7] William J.O'Connor, "A gantry crane problem solved," in *ASME Journal Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 4, 2003, pp 569-576.
- [8] William J.O'Connor, "Gantry crane control:a novel solution explored and extended," in *Proc American Control Conference 02*, Alaska, 8 May 2002.
- [9] William J.O'Connor, "Wave-echo control of lumped flexible systems," in *Journal of Sound and Vibration*, vol. 298, 2006, pp 1001-1018.
- [10] David J.Mckeown, William J.O'Connor, "Wave-Based Control-Implementation and Comparisons," in *Proc American Control Conference 07*, New York City, 11-13 July 2007.
- [11] H.O.Nagase, "Wave-Based analysis and wave control of damped mass-spring systems," vol. 2, 2001, pp 2574-2579.
- [12] "Partial differential Equations-An Introduction", pp. 32-52, John Wiley, Ninetheth ed., 1992

- [13] Islam S.M.Khalil and Asif Sabanovic "Sensorless wave based control of flexible structures using actuator as a single platform for estimation and control," in *International review of automatic control*, January 2009.