

Denizaltıların Deniz Etkilerine Karşı Yeniden Yapılanabilir Kayar Kipli Denetleyiciler Yardımı ile Derinlik Kontrolü

Ufuk Demirci¹, Feza Kerestecioğlu²

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Deniz Harp Okulu, Tuzla, İstanbul
udemirci@dho.edu.tr

²Elektronik Mühendisliği Bölümü
Kadir Has Üniversitesi, Cibali, İstanbul
kerestec@khas.edu.tr

Özetçe

Yeniden yapılanabilir denetleyiciler son yıllarda arızaya müsahahalı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada deniz durumunun sualtı araçlarının derinlik kontrolündeki olumsuz etkilerinin giderilmesi amacıyla kayar kipli denetim tekniği eşdeğer veya düzeltici kazanç kısımları üzerinde uyarlanı denetim yöntemleri ayrı ayrı kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımlarda ortak olan husus deniz durumu etkilerinin bir doğrusal gözetleyici yardımı ile takip edilerek sistem dinamiği üzerindeki etkileri bir bozucu dağıtım matrisi oluşturularak ortaya konulmuş ve bu matristeki bozucu etki kadar kayar kipli denetleyicinin eşdeğer veya düzeltici kazanç kısımları modifiye edilerek deniz durumunun sualtı aracının derinlik kontrolündeki olumsuz etkileri ortadan kaldırılmıştır. Bu çalışmanın katkısı, önerilen bozucu etkilere müsahahalı uyarlanabilir denetleyiciler yardımı ile sistem performanslarının en kötü ortam şartlarında dahi muhafaza edilmesi veya kontrolden çıkmasının engellenmesinin örneklerle açıklanmasıdır.

1. Giriş

Otonom olarak denetleyicilerin yeniden yapılandırılması günümüzde mevcut sistemlerin karmaşık yapısı gereği çok önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır[1]. Bu karmaşık sistemler çevresel şartlardan kaynaklanan bozulmalar nedeni ile sürekli çalışmalarının garanti edilebilmesi için gürbüzlğe ihtiyaç duymaktadırlar. Bu çalışmada kayar kipli denetim yöntemini temel denetleyici [2] olarak kullanan aktif yeniden yapılanabilir yeni denetleyiciler önerilmektedir.

Beklenmeyen bozulmalardan kaynaklanan belirsizlikler doğrusal gözetleyici yardımı ile elde edilmektedir. Denetleyici belirsizlik bilgisine göre yeniden yapılandırılmakta ve denetleyicinin kararlılığı kayar kipli denetim metodunun gürbüzlük özelliği ile garanti edilmektedir. Kayar kipli denetleyicinin gürbüzlük özelliği küçük bozulmaları karşılayabilir. Önerilen denetleyiciler yardımı ile sürekli gözlemlenen bozulma bilgisine göre kendini değiştirebilen denetleyiciler yardımı ile daha büyük bozulmalar karşılanabilir. Önerilen her iki yaklaşımda çok iyi bilinen

kayar kipli denetim yöntemini temel denetleyici olarak kullanan aktif denetim metodlarıdır. Bu çalışmada önerilen denetleyici yaklaşımları daha önce bir doğrusal sistem modeli üzerinde ve sistem arızaları durumundaki performansları ile gösterilmiştir [3]. Ancak her iki yaklaşımın uygulama alanı olarak sualtı araçlarında kullanılması bu çalışma ile gerçekleştirilmektedir.

Kayar kipli denetleyicinin düzeltici veya eşdeğer kazanç vektörü, gözetleyici yardımı ile sistem dinamiği gözlemlenerek sistem dinamiği değişimine neden olan bir arıza veya çevresel etki durumunda bahse konu arıza veya çevresel etkiyi karşılayacak kadar yeniden yapılandırılmaktadır.

Sistem dinamiğinde beklenmedik değişiklikler ilave bir bozulma olarak işlem gördüğünden bozulma dağılım bilgisi yardımı ile kayar kipli denetleyicinin gürbüzlüğü iki ayrı yaklaşımla artırılmaktadır.

Kayar kipli denetleyicilerin en olumsuz özelliklerinden olan çatrırdama nominal system dinamiği için yumuşak bir doğrusal olmayan anahtarlama fonksiyonu kullanılarak giderilmektedir. Çatrırdama, bozulmalara açık bir sistem için istenmeyen etkilerin ortadan kaldırılması nedeniyle denetim faaliyeti artacağından kaçınılmaz bir olgudur.

Nominal veya bozulmaya maruz sistem dinamiği için çevrimiçi yeniden yapılanabilir denetleyicinin kararlılığı temel denetleyici için kayar kipli denetleyici kullanıldığından garanti edilmektedir. Önerilen yaklaşımlarda tanımlanan kayar manifold boyunca kararlılığın garanti edildiği bir Lyapunov fonksiyonu tanımlanmaktadır [4].

2. Problemin Açıklanması

2.1. Sığ Suda Dalmış Denizaltı Faaliyeti

Periskop kullanımı veya dizel çalıştırarak bataryaların şarj edilmesi faaliyetleri nedeniyle konvansiyonel denizaltılar için dalmış durumda sığ suda seyir icra etmek çok hayati bir faaliyettir. Deniz durumunun denizaltı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle deniz sathına yakın dalmış denizaltılarda derinlik kontrolü daha zor gerçekleştirilmektedir. Önerilen yeni

yaklaşımın etkinliği sıg suda dalmış olan ve deniz dalgalarının olumsuz etkilerine maruz kalan denizaltıların derinlik kontrolü problemi ile gösterilmektedir. Sıg suda dalmış denizaltılar daha çok deniz dalgalarından etkilenmekte olduğundan deniz akıntılarının etkileri bu çalışmada ihmal edilmiştir.

Çalışmada kullanılan denizaltı modeli [5]'de detaylı olarak incelenmiş olan denizaltı modelidir. Bahse konu denizaltı modelinin Türk Denizaltıcılığında baş ve kış ufki dümenler olarak adlandırılan iki adet kontrol yüzeyi bulunmaktadır. Ayrıca tirim sarnıçlarındaki deniz suyu miktarı sabit bir kontrol girdisi olarak kullanılmaktadır. Ancak tirim sarnıçlarındaki deniz suyu miktarının mevcut uygulamada olduğu şekilde tirim tablosunda belirlendiği şekilde dalışa başlanmadan önce belirlenerek uygulandığı kabul edilmektedir. Derinlik ölçümü bir hidrostatik basınç algılayıcısı (umk metre) ile baş-kış yalpa açısı ise dönü ölçer sistem (cayro) ile ölçülmektedir. Denizaltının başlangıçta ileri yolda düşük süratte seyrettiği kabul edilmektedir. Ayrıca denizaltının yalpa ekseninde kararlı olduğu ve yalpa hareketi için kontrol ihtiyacı olmadığı öngörülmektedir. Bu nedenle Türk Denizaltıcılığında amudi dümen olarak bilinen dümen yardımcı ile kontrol edilen yanlama hareketinin baş-kış yalpa hareketinden bağımsız olduğu kabul edilmektedir.

Dalmış durumda sıg suda bulunan denizaltı deniz duruma bağlı olarak deniz kuvvetleri ve deniz momentlerinin etkilerine maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler sinüs biçimli dalga örüntülerinin birinci ve ikinci derece kısımlarından oluşmaktadır. Birinci derece kuvvetler denizaltı gövdesi boyunca birbirlerinin etkilerini ortadan kaldırdıklarından denetleyici tasarımında ihmal edilebilirler. Dalga etkilerinin ikinci derece kısımları denizaltıyı yüzeye (satha) doğru çekme eğilimi göstermektedirler. Bu kuvvete çekme kuvveti adı verilmektedir. Çekme kuvveti etkileri denizaltı dalış derinliği arttıkça azalmaktadır.

Denizaltıların hareket denklemleri doğrusal olmayan diferansiyel denklemler olarak ifade edilebilir ve altı serbestlik derecesinde incelenir [6]. Bu çalışmada kontrol faaliyeti yalpa ve yatay yalpa eksenlerinde uygulanmadığından denetleyici tasarımında baş-kış yalpa ve denize dik olan eksen denklemleri kullanılmaktadır. Doğrusal model ile çalışmak daha basit olacağından baş-kış yalpa ve denize dik eksenlerdeki denklemler bir denge noktası etrafında doğrusal hale getirilmiştir.

Daha gerçekçi bir denetleyici tasarımı gerçekleştirilebilmek amacıyla denizaltının modellenmesinde deniz dalgalarının etkileri de dikkate alınmıştır. Deniz durumu dalga yüksekliklerine bağlı olarak 0'dan 9'a kadar tanımlanmaktadır. Bu çalışmada 1 (sakin-çirpıntılı) ile 6 (çok sert fırtına) arasındaki deniz durumları modellenerek farklı deniz dalga yükseklikleri için denetim performansı incelenmektedir. Önerilen yeniden yapılanabilir denetim yapısı denizaltının derinlik kontrolü amacıyla uygulanmıştır. Çekme kuvvetinin ve dalgaların etkisi ile denizaltının derinlik kontrolünü sağlaması ve belirlenen derinlikte dalmış durumunu koruması amaçlanmaktadır.

2.2. Denizaltı Dinamikleri

Denizaltı modelinin türetilmesi ayrıntılı olarak [5]'de incelenmiştir. Denizaltının z- eksenindeki hareket denklemi (normal kuvvet)

$$\dot{w}(t) = \frac{Z'_w U}{L m_3} w(t) + \frac{1}{m_3} (Z'_\theta + m') U \dot{\theta}(t) + \frac{Z'_\theta L}{m_3} \dot{\theta}(t) + \frac{Z'_{\delta B} U^2}{L m_3} \delta B(t) + \frac{Z'_{\delta S} U^2}{L m_3} \delta S(t) + \frac{2}{\rho L^3 m_3} Z_{wave}(t) + W_e(t) \cos \theta \cos \phi - \frac{2}{\rho L^3 m_3} \quad (1)$$

denklemden $w(t)$ denizaltının z-ekseni boyunca sürati, θ baş kış yalpa açısı, ρ deniz suyu yoğunluk değeri, L denizaltının tam boyu, m denizaltının ağırlığı, U ileri yol sürati, δB baş ufki dümen kontrol değeri, δS kış ufki dümen kontrol değeri, Z_{wave} denize dik dalga nedeniyle oluşan anlık kuvvet, $m' = 2m / \rho L^3$, $m_3 = m - Z'_w$ ve $W_e(t) = M_e(t) \cdot g$ 'dir. Burada $M_e(t)$ dalış tirim sarnıcının ağırlığı ve g yerçekimi ivmesidir.

y-ekseni boyunca hareket denklemi (baş kış yalpa momenti)

$$\dot{\theta}(t) = \frac{M'_w}{L I_2} \dot{w}(t) + \frac{M'_w U}{L^2 I_2} w(t) + \frac{M'_\theta U}{L I_2} \dot{\theta}(t) + \frac{M'_\theta U^2}{L^2 I_2} \delta B(t) + \frac{M'_{\delta S} U^2}{L^2 I_2} \delta S(t) + \frac{2mg(z_G - z_B)}{\rho L^5 I_2} \theta(t) + \frac{M_{wave}(t)}{\frac{\rho}{2} L^5 I_2} \quad (2)$$

denklemden z_G ve z_B denizaltı boyutları, M_{wave} baş kış yalpa ekseninde dalga nedeniyle oluşan anlık moment, $I_2 = I'_{G_y} - M'_\theta$ ve I'_{G_y} yerçekimi merkezindeki atalet momentidir. (1) ve (2) nolu denklemlerdeki tüm üstlü ifadeler hidrodinamik katsayılardır.

(1) ve (2) nolu denklemler ile 7nci bölümdeki hidrodinamik katsayılar ve denizaltının boyutları kullanılarak aşağıdaki denklemler elde edilir,

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) = & -2.45313 \times 10^{-2} w(t) + 1.5174 Q(t) + 4.6192185 \times 10^{-2} \delta B(t) - 7.9592688 \times 10^{-2} \delta S(t) \\ & + 1.62 \times 10^{-2} \theta(t) - 2.2 \times 10^{-9} M_{wave}(t) + 3.06 \times 10^{-6} Z_{wave}(t) + 9.8 \times 10^{-5} M_{e_{max}}, \\ \dot{\theta}(t) = & 3.3720 \times 10^{-4} w(t) - 7.71345 \times 10^{-2} Q(t) + 4.79688 \times 10^{-4} \delta B(t) - 2.184535 \times 10^{-3} \delta S(t) \\ & - 0.003975 \theta(t) + 5.42 \times 10^{-10} M_{wave}(t) - 2.20 \times 10^{-9} Z_{wave}(t) - 7.14 \times 10^{-8} M_{e_{max}} \end{aligned} \quad (3)$$

burada $\dot{Q}(t) = \dot{\theta}(t)$ ve $U = 8.43$ Ft/sn.'dir.

Durum değişkenleri baş kış yalpa açısal hızı ve denize dik eksenindeki denizaltı (dalma) hızı olan denklemler denizaltı dinamiğinin durum denklemleridir. (3)'den denizaltı dinamiğinin durum uzayı denklemleri aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{Bu}(t) + \mathbf{Rd}(t) \quad (4)$$

bu denklemden

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= [w(t), Q(t), \theta(t)]^T, \\ \mathbf{u}(t) &= [\delta B(t), \delta S(t), M_{e_{max}}]^T, \\ \mathbf{d}(t) &= [Z_{wave}(t), M_{wave}(t)]^T. \end{aligned}$$

$\mathbf{x}(t) \in \mathfrak{R}^n$ durum değişken vektörü, $\mathbf{u}(t) \in \mathfrak{R}^r$ denetim giriş vektörü $\mathbf{y}(t) \in \mathfrak{R}^m$ çıkış ölçüm vektörüdür ve A, B matrislerinin değerleri (3)'den elde edilebilir. $\mathbf{d}(t) \in \mathfrak{R}^h$ vektörü z-ekseni boyunca deniz dalgalarının kuvvetini ve y-eksenindeki deniz dalgaları momentini içeren bozulma vektörüdür. \mathbf{R}_n matrisi ise bozulma dağılım matrisidir.

2.3. Deniz Modeli

Dalmış durumdaki denizaltılar denizin neden olduğu kuvvetlere ve momentlere maruz kalırlar. Bu kuvvetler sinüzoidal dalga örüntülerinin birinci ve ikinci dereceden bölümlerinden oluşurlar[7]. Birinci derece kuvvetler denizaltı gövdesi boyunca birbirlerinin etkilerini ortadan kaldırdıklarından denetleyici tasarımında etkileri gözardı edilebilir. Bu çalışmada verilen deniz modeli ITTC tarafından kabul edilen deniz dalga modelidir ve deniz seviyesi hareketlerinin tayfını aşağıdaki şekilde gösterir [8],

$$S(\omega) = 8.1 \times 10^{-3} \omega^{-5} \exp\left(-\frac{3.11}{H_s^2} \omega^{-4}\right) \quad (m^2 s) \quad (5)$$

burada H_s metre olarak dalga yüksekliği, ω rad/sn olarak frekansı ve $g = 9.81 m/s^2$ 'dir.

Deniz dalgalarının gemi dinamikleri üzerinde bozucu etken olarak iki tip etkisi vardır; bir tanesi kuvvet dinamikleri üzerindeki bozucu etken diğeri moment dinamikleri üzerindeki bozucu etkendir [9] ve aşağıdaki şekilde modellenebilir,

$$Z_{wave}(t) = \left[2.2772 \times 10^5 - 1.4552 \times 10^4 \sum_{i=1}^N F_i \sin \omega_{ei} t \right] \cdot \sum_{i=1}^N F_i \sin \omega_{ei} t, \quad (6)$$

$$M_{wave}(t) = 1.7780 \times 10^7 \cdot \sum_{i=1}^N F_i \cos \omega_{ei} t.$$

$Z_{wave}(t)$ ve $M_{wave}(t)$ 'in hesaplanması $\omega_{ei} (i=1, \dots, N)$ gibi N farklı frekans için $S(\omega)$ 'nin örneklenmesine ve bahse konu frekanslardaki F_i 'lerin (denizaltı dalış derinliğindeki duruş rotasından kaynaklanan kuvvet) elde edilmesine dayanmaktadır [5], [10].

2.4. Eyleyici Dinamikleri

(4)'deki denizaltı modeli üç adet eyleyici tarafından sisteme uygulanan üç adet denetim sinyalini içermektedir. Elektrohidrolik eyleyici olan iki tanesi baş ve kıç ufki dümenleri sürmede kullanılmaktadır. Üçüncü giriş için eyleyici ise dalış tirim sarnıcını imla ve boşaltmada kullanılan tulumbadır. Eyleyiciler mekanik cihazlar olduğundan denetim faaliyetleri sınırlıdır. Denizaltı modelindeki baş ve kıç ufki dümenlerin sınırları $\pm 30^\circ$ 'dir. Baş ve kıç ufki dümenlerin dinamiği bir sayısal süzgeç ile aşağıdaki şekilde gösterilebilir [5],

$$x_h(k+1) = 0.885x_h(k) + 0.115u_h(k) \quad (7)$$

burada x_h kumanda edilen ufki dümen açısı ve u_h gerçekleşen dümen açısıdır.

3. Yeniden Yapılanabilir Kayar Kipli Denetleyici Tasarımı

Önerilen denetleyiciler kayar kipli denetleyicinin [11] değiştirilmiş iki ayrı versiyonudur. Denizaltı dinamikleri baş kıç yalpa açısı $\theta(t)$ bilinen bir bozulma gibi değerlendirilerek ve dalış tirim sarnıcındaki su miktarı $M_{e_{aux}}$ baş ve kıç ufki dümen giriş değerlerinden ayrı olarak hesaplanarak, iki girişli iki durumlu yapıya azaltılmıştır. Azaltılan denizaltı dinamiklerinin durum uzay modeli aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\dot{\mathbf{x}}_n(t) = \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n(t) + \mathbf{B}_n \mathbf{u}(t) + \mathbf{R}_n \mathbf{d}(t) + \mathbf{F} \theta(t) \quad (8)$$

burada

$$\mathbf{x}_n(t) = [w(t), Q(t)]^T, \\ \mathbf{u}(t) = [\delta B(t), \delta S(t), M_{e_{aux}}]^T,$$

olarak gösterilir. (3) ve (8) arası denklemlerden,

$$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} -0.0245313 & 1.5174 \\ 0.0003372 & -0.0771345 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_n = \begin{bmatrix} 0.046192185 & -0.079592688 \\ 0.000479688 & -0.002184535 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0.0162 & 0 \\ 0 & -0.003975 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Denklemler (8)'deki sistem için durum kestirimleri Luenberger gözlemleyici ile aşağıdaki şekilde bulunabilir,

$$\hat{\mathbf{x}}_n(t) = (\mathbf{A}_n - \mathbf{L})\hat{\mathbf{x}}_n(t) + \mathbf{B}_n \mathbf{u}(t) + \mathbf{F} \theta(t) + \mathbf{L} \mathbf{x}_n(t), \quad (10)$$

Durum kestirim hatası tanımlanarak (9) ve (10)'dan aşağıdaki şekilde gösterilebilir,

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \dot{\mathbf{x}}_n(t) - \dot{\hat{\mathbf{x}}}_n(t), \quad (11) \\ = [(\mathbf{A}_n - \mathbf{L})\mathbf{e}(t) + \mathbf{R}_n \mathbf{d}(t)],$$

Denklemler (11)'den bozulma dağılım bilgisi aşağıdaki şekilde elde edilebilir,

$$\mathbf{R}_n \mathbf{d}(t) = \dot{\mathbf{e}}(t) - (\mathbf{A}_n - \mathbf{L})\mathbf{e}(t) \quad (12)$$

Belirsizliğin üst sınırı verildiğinde kayar kipli denetleyicinin sistem dinamiklerindeki belirsizliklere gürbüz yapılabileceği bilinmektedir [4]. Aşağıda önerilen iki ayrı denetleyici yaklaşımında model uyumsuzluğu veya bozulmalardan kaynaklanan belirsizliklerin üst sınırları için ilave bir bilgiye ihtiyaç bulunmamaktadır. Denklem (12)'den elde edilen bozulma bilgisi kayar kipli denetleyicinin düzeltici veya eşlenik denetim kısımlarına ilave bir terim olarak kullanılmaktadır.

3.1. Birinci Yaklaşım: Değiştirilen Düzeltici Denetim Kısmı

Birinci yaklaşım denetleyicinin düzeltici denetim kısmına ilave edici bir kısım olarak çıkartılan bozulma dağılım bilgisinin kullanılmasıdır.

Sistemin (8)'deki tüm durumlarının verilen yörüngeleri aynı anda takip edebilmelerinin sağlanabilmesi için manifold aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [19],

$$\mathbf{s}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t) + \Lambda \int \tilde{\mathbf{x}}(t) dt \quad (13)$$

Burada \mathbf{s} kayar yüzey vektörü, Λ kayar yüzeylerin eğimlerini tanımlayan kare matris, $\tilde{\mathbf{x}}$ durum vektörü için takip hatasıdır ve aşağıdaki şekilde gösterilir,

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_n - \mathbf{x}_d \quad (14)$$

Aşağıdaki şekilde bir Lyapunov fonksiyonu tanımlandığında,

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s} \quad (15)$$

$\dot{\mathbf{V}} = \dot{\mathbf{s}} \mathbf{s} < 0$ ($\forall t > 0$) şartı sağlandığında tüm sistem cevabı için kararlılık sağlanması kayar kipli denetimin önemli özelliklerindedir[4],[11]. Kayar yüzey fonksiyonunun birinci türevi (8), (13) ve (14)'den,

$$\dot{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n(t) + \mathbf{B}_n \mathbf{u}(t) + \mathbf{F} \theta(t) - \dot{\mathbf{x}}_d(t) + \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t), \quad (16)$$

Giriş sinyali yalnız bırakıldığında,

$$\mathbf{B}_n \mathbf{u}_{eq}(t) = [-\mathbf{A}_n \mathbf{x}_n(t) - \mathbf{F} \theta(t) + \dot{\mathbf{x}}_d(t) - \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t)], \quad (17)$$

veya

$$\mathbf{u}_{eq}(t) = \mathbf{B}_n^{-1} [-\mathbf{A}_n \mathbf{x}_n(t) - \mathbf{F} \theta(t) + \dot{\mathbf{x}}_d(t) - \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t)]. \quad (18)$$

\mathbf{u}_{eq} istenilen yörüngeleri sistem durumlarının takibini garantileyen denetleyicinin eşlenik kısmıdır. (18)'deki tüm terimler bozulma bilgisi hariç bilinmektedir. Burada $\mathbf{R}_n \mathbf{d}$ (12)'den bulunan kestirimi ile değiştirilebilir. Kayar şartı sağlamak için kayar kipli denetleyicilerde bir düzeltici denetim kısmı kullanılır. Düzeltici denetleyici ile beraber denetleyicinin denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir [6], [11],

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_{eq}(t) - \mathbf{B}^{-1} [(\mathbf{k}) \text{sat}(\frac{\mathbf{s}}{\Phi})] \quad (19)$$

\mathbf{k} düzeltici kazanç vektörüdür ve anahtarlama yüzey vektörü $\mathbf{s}(t)$ 'de kayar bir rejimi garantilemek maksadıyla kullanılır. $\text{sat}(\mathbf{s})$ kayar yüzey vektörü \mathbf{s} 'nin herbir değişkenine göre doyum fonksiyonudur.

Bozulma dağılım bilgisi $\mathbf{R}_n \mathbf{d}$ denetleyici denklemine ilave edildiğinde denetleyici yeniden yapılanabilir. Yani uyarıların bir yapıda çalışır ve deniz dalgalarının neden olacağı olumsuz etkileri karşılayabilir. \mathbf{k} kazanç vektörü için istenen şart (18) ve (19)'u (17)'de kullanarak aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}}(t) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{B}_{fault}^{-1} [-\mathbf{A}_{fault} \mathbf{x}(t) + \dot{\mathbf{x}}_d(t) - \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t)] - \dot{\mathbf{x}}_d(t) \\ &\quad + \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{B} \mathbf{B}_{fault}^{-1} \mathbf{k} \text{sgn}(\mathbf{s}), \quad (20) \\ &= (\mathbf{A} \mathbf{x}(t) - \mathbf{B} \mathbf{B}_{fault}^{-1} \mathbf{A}_{fault} \mathbf{x}(t)) \\ &\quad + (\mathbf{I} - \mathbf{B} \mathbf{B}_{fault}^{-1}) (-\dot{\mathbf{x}}_d(t) + \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t)) - \mathbf{B} \mathbf{B}_{fault}^{-1} \mathbf{k} \text{sgn}(\mathbf{s}). \end{aligned}$$

Bu durumda \mathbf{k} vektörü aşağıdaki şartı sağlamalıdır,

$$\mathbf{k} \geq \left\| \mathbf{B}^{-1} \mathbf{B}_{fault} \mathbf{A} \mathbf{x}(t) - \mathbf{A}_{fault} \mathbf{x}(t) + (\mathbf{B}^{-1} \mathbf{B}_{fault} - \mathbf{I}) (-\dot{\mathbf{x}}_d(t) + \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t)) \right\| + \eta \mathbf{I}, \quad (21)$$

Eğer sistem matrisinde bir belirsizlik varsa ancak giriş matrisinde yoksa, diğer bir deyişle $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{fault}$, bu durumda,

$$\mathbf{k} \geq \left\| \mathbf{A} \mathbf{x}(t) - \mathbf{A}_{fault} \mathbf{x}(t) + (\mathbf{I} - \mathbf{I}) (-\dot{\mathbf{x}}_d(t) + \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t)) \right\| + \eta \mathbf{I}, \quad (22)$$

Sonuç olarak,

$$\mathbf{k}_{fault} \geq \mathbf{R}_n(t) \mathbf{d} + \eta, \quad (23)$$

(19)'daki düzeltici kazanç vektörü \mathbf{k} deniz durumunun artması ve dolayısıyla deniz dalgalarının olumsuz etkileri arttığında bozulma dağılım bilgisi ile olmadığında nominal vektör ile yer değiştirilmektedir. Bozulma bilgisi gözlemleyici ile tespit edildiğinde, aşağıda gösterildiği şekilde bozulma dağılım vektörünü kullanacak şekilde kayar kipli denetleyicinin düzeltici denetleyici kazanç kısmı değişmektedir.

$$\mathbf{k} = \begin{cases} \mathbf{k}_{nom} = \eta & \text{nominal durum} \\ \mathbf{k}_{fault} = \mathbf{R} \mathbf{d} + \eta & \text{bozulma durumu} \end{cases} \quad (24)$$

η nominal durum için kullanılan kazanç değerlerine sahip pozitif vektördür. Burada $\mathbf{R}_n \mathbf{d}$ yerine (12)'den elde edilen bozulma dağılım matrisi kestirimi kullanılmaktadır.

3.2. İkinci Yaklaşım: Değiştirilen Eşlenik Denetim Kısmı

Bu yaklaşımda ise denetleyicinin eşlenik denetleyici kısmına kestirilen bozulma dağılım bilgisi ilave edilir. Aynı yöntemle (8) ve (12) kullanılarak [3],

$$\dot{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n(t) + \mathbf{B}_n \mathbf{u}(t) + \mathbf{R}_n \mathbf{d}(t) + \mathbf{F} \theta(t) - \dot{\mathbf{x}}_d(t) + \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t), \quad (25)$$

Giriş kısmı (25)'den çekilerek,

$$\mathbf{B}_n \mathbf{u}_{eq}(t) = [-\mathbf{A}_n \mathbf{x}_n(t) - \mathbf{R}_n \mathbf{d}(t) - \mathbf{F} \theta(t) + \dot{\mathbf{x}}_d(t) - \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t)], \quad (26)$$

veya

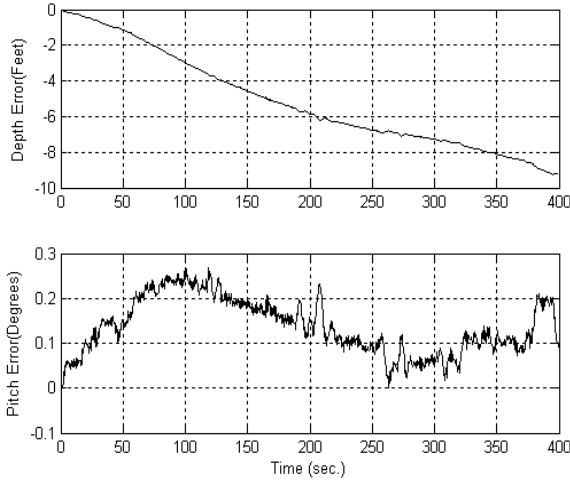
$$\mathbf{u}_{eq}(t) = \mathbf{B}_n^{-1} [-\mathbf{A}_n \mathbf{x}_n(t) - \mathbf{R}_n \mathbf{d}(t) - \mathbf{F} \theta(t) + \dot{\mathbf{x}}_d(t) - \Lambda \tilde{\mathbf{x}}(t)]. \quad (27)$$

Bu yaklaşımda ise (27)'den anlaşılacağı gibi her bir bozulma dağılım vektör terimi standart kayar kipli denetleyicinin eşlenik denetleyici kısmına ilave edilmektedir. Bir başka şekilde ifade edilecek olursa, deniz durumunda değişiklik olduğunda denetleyici sistem dinamiklerini eşlenik denetleyici kısmından uyarlamaktadır.

4. Benzeşim Çalışmaları

Benzeşimler Matlab-SIMULINK yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Benzeşimler esnasında 0'dan 30 feet derinliğe 400 sn'de dalışı gösteren bir denizaltı dalış profili kullanılmıştır. İlk olarak standart bir kayar kipli denetleyici nominal denizaltı modelinin derinlik kontrolü için tasarlanmış ve en kötü durum olan deniz durumu 6'daki bozulma durumundaki performansı incelenmiştir.

Şekil 1'den görüleceği üzere denetleyici performansı yeterli olmayıp denizaltı deniz yüzeyinden ayrılıp dalış geçememektedir.



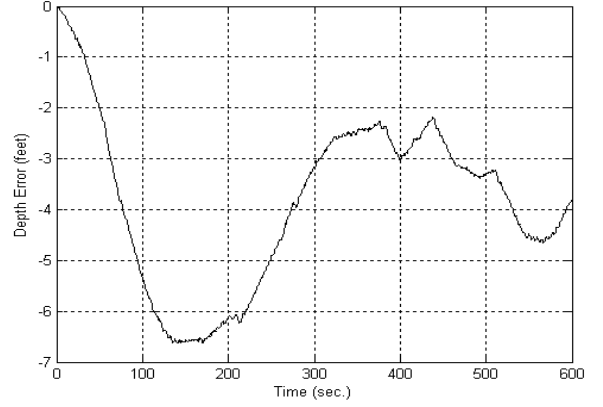
Şekil 1: Standart kayar kipli denetleyici ile deniz durumu 6 için derinlik ve baş-kıç yalpa hata değerleri

(19)'da gösterilen birinci yaklaşım ile denetleyicinin düzeltici denetim kısmının değiştirilmesi yaklaşımı ile gerçekleştirilen denetleyici ile deniz durumu 6 için yapılan benzeşim sonuçları Şekil 2'de incelendiğinde denetim faaliyetinin arttığı açıkça gözlenmektedir.

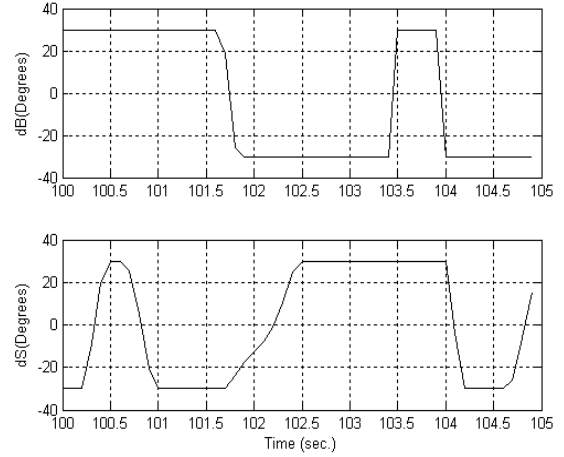
Standart kayar kipli denetleyici ile karşılaştırıldığında derinlik hatasındaki performans artımı gözlenebilmektedir. Denetim faaliyeti artmakta Şekil 3'deki 5 saniyelik benzeşim

incelendiğinde bazı yerlerde baş ve kıç ufki dümenlerin sınırlarına geldiği ve doyuma ulaştığı görülmektedir.

Bu istenmeyen bir durum olmakla beraber deniz durumu 6'da denizaltının dalmış durumdaki durumunu muhafaza edebilmesi için gerekli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2: Birinci yaklaşım (değiştirilen düzeltici denetleyici kısmı) ve deniz durumu 6 için derinlik hatası.

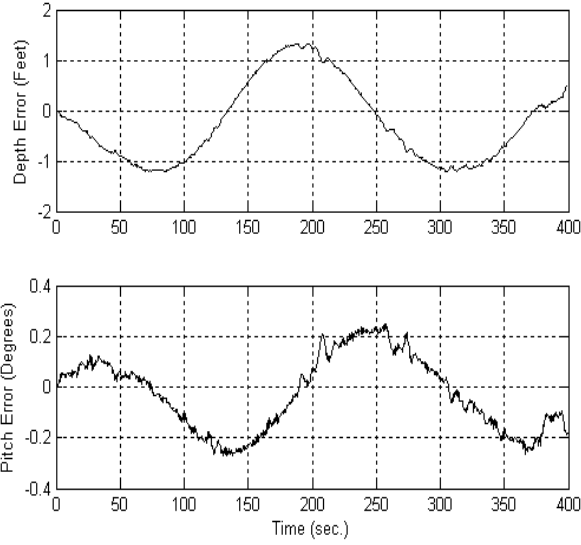


Şekil 3: Birinci yaklaşım ve deniz durumu 6 için baş ve kıç ufki dümen değerleri.

İkinci yaklaşımla tasarlanan ve kayar kipli denetleyicinin eşlenik denetim kısmının deniz durumu etkilerine karşı uyarlanırc biçimde değiştirilmesi yaklaşımı ile tasarlanan denetleyici ile yapılan benzeşimlerdeki derinlik hataları ile standart kayar kipli denetleyici ve birinci yaklaşımda önerilen kayar kipli denetleyicinin düzeltici denetim kısmının deniz durumu etkilerine karşı uyarlanırc biçimde değiştirildiği denetleyicinin derinlik hataları karşılaştırıldığında ikinci yaklaşımla tasarlanan denetleyici ile Şekil 4'den de görülebileceği gibi derinlik hatası nispi olarak oldukça azalmış ve daha iyi sonuçlar alınmıştır.

Bu durumda derinlik hatası 1ft civarında oldukça küçük bir değerde muhafaza edilebilmektedir. Standart kayar kipli

denetleyici ile hata değeri 10 ft civarında iken önerilen birinci yaklaşımda azami 6.5 ft olmaktadır.



Şekil 4: İkinci yaklaşım (değiştirilen eşlenik denetleyici kısmı) ve deniz durumu 6 için derinlik hatası.

5. Sonuçlar

Bilinen kayar kipli denetleyicilerden farklı ve öncelikli olarak deniz dalgalarının denizaltılar üzerindeki olumsuz etkilerini gidermek amacıyla iki ayrı yaklaşıma sahip yeniden yapılanabilir kayar kipli denetleyiciler önerilmiştir. Birinci yaklaşım kayar kipli denetleyicinin düzeltici denetim kısmına kestirilen deniz dalga bozulma bilgisinin kestirimini ilave ederek denetleyici değiştirilmektedir. Bu yaklaşım ile yapılan benzeşimlerde derinlik hatası sonuçları bilinen standart kayar kipli denetim benzeşim derinlik hatası sonuçları ile kıyaslandığında daha iyi performans vermiştir.

Diğer taraftan ikinci yaklaşım ise kestirilen deniz dalga bozulma bilgisini kayar kipli denetleyicinin eşlenik kısmına ilave ederek deniz dalgalarının etkilerini azaltmaktadır. Diğer benzeşim çalışmalarında kullanılan denetleyicilerle karşılaştırıldığında ikinci yaklaşım en iyi sonuçları vermektedir. Benzeşimler ile önerilen denetim yaklaşımlarının büyük boyutlu bir sualtı aracı olan denizaltılarda kullanılabileceği gösterilmiştir. Aynı yaklaşımların daha küçük boyutlardaki insansız sualtı araçlarının sığ sularda deniz dalgalarının etkilerine maruz kaldığı durumlardaki denetim problemlerinin çözümünde de kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

6. Kaynakça

- [1] Rauch, H.E., "Autonomous Control Reconfiguration," *IEEE Control Syst. Mag.*, Dec., 1995.
- [2] Patton, R.J., "Fault-tolerant Control Systems: The 1997 situation," Proc. SAFEPROCESS 97, Hull, UK, s:1033-1054, 1997.

- [3] Demirci, U., Kerestecioğlu, F., "Fault Tolerant Control with Re-configuring Sliding-mode Schemes," *Turkish Journal of Electrical Engineering*, 13, s: 175-187, 2005.
- [4] Khalil, H.K., *Nonlinear systems*, 3rd Edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2002.
- [5] Dumlu, D., Istefanopulos, Y., "Design of an Adaptive Controller for Submersibles via Multimodel Gain Scheduling," *Ocean Engineering*, Vol. 22, s: 593-614, 1995.
- [6] Fossen, T.I., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, NY, 1994.
- [7] Richards, R.J., Stoten, D.P., "Depth Control of a Submersible Vehicle," *Int. Shipbuilding Progr.*, Vol 29, No.326, s: 30-40, 1982.
- [8] Sükan, L.M., *Açık Deniz Yapılarının Hidrodinamikleri*, İstanbul Teknik Üniversitesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul, 1985.
- [9] Borgman, L.E., "Ocean Wave Simulation for Engineering Design," *Journal of Waterways and Harbours Division, ASCE*, WW4, s: 557-583, 1969.
- [10] Mandzuka, S., "Mathematical Model of a Submarine Dynamics at the Periscope Depth," *Brodogradnja*, 36, 5-6, 1998.
- [11] Slotine, J.J.E., Li, W., *Applied Nonlinear Control* Prentice Hall, 1991.

7. Denizaltı Hidrodinamik Katsayıları

7.1. Normal Kuvvet

$$\begin{aligned} Z'_w &= -0.0110 & Z'_{\dot{w}} &= -0.0075 & Z'_\theta &= -0.0045 \\ Z'_\theta &= -0.0002 & Z'_{\delta B} &= -0.0025 & Z'_{\delta S} &= -0.0050 \end{aligned}$$

7.2. Dikey Yalpa Momenti

$$\begin{aligned} M'_w &= 0.0030 & M'_{\dot{w}} &= -0.0002 & M'_\theta &= -0.0025 \\ M'_\theta &= -0.0004 & M'_{\delta B} &= 0.0005 & M'_{\delta S} &= -0.0025 \\ I'_y &= 5.6867 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

7.3. Deniz Dalga Kuvvetleri

$$\begin{aligned} C_{M1} &= 0.35 & C_{Z1} &= 1.28 & C_{Z2} &= 0.77 \\ L &= 286 Ft. & \nabla &= 7.6 \times 10^4 Ft^3 & \rho &= 2.0 slugs / Ft^3 \\ U &= 8.43 Ft / sn. \end{aligned}$$