

Taşıt savrulma dinamiği kontrol sistemlerinde zaman gecikmesi etkisinin zaman gecikmesi gözleyicisi kullanılarak telafi edilmesi

Compensation of time delay effect in vehicle yaw stability control systems by using communication disturbance observer

Mümin Tolga EMİRLER^{1*}, Bilin AKSUN GÜVENÇ², Levent GÜVENÇ³

¹Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Okan Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

tolgaemirler@yahoo.com

²Otomotiv Araştırma Merkezi, Otonom Sürüş Laboratuvarı, Ohio State Üniversitesi, Columbus, OH, USA.

aksunguenc.1@osu.edu

³Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ohio State Üniversitesi, Columbus, OH, USA.

guenc.1@osu.edu

Geliş Tarihi/Received: 28.01.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 30.07.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.66492

Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Zaman gecikmesi kontrol sistemleri tasarımında dikkate alınması gereken sistemin performansını azaltan ve en kötü durumda da sistemi kararsız yapan etkenlerden birisidir. Zaman gecikmesi telafisi için literatürde pek çok yöntem önerilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı Smith tahmincisidir. Smith tahmincisi kolaylıkla uygulanabilse de tahmincinin kullandığı zaman gecikmesi modeli ile sistemdeki gerçek zaman gecikmesi farklılaştıkça gecikme telafisi performansı düşmektedir. Bu metodun alternatifi olarak zaman gecikmesi gözleyicisi önerilmiş ve literatürde daha önce bilateral teleoperasyon sistemlerine, robotik manipülatörlere ve iletişim ağı tabanlı yürüyüş şekli rehabilitasyon cihazlarına uygulanmıştır. Bu çalışmada ise zaman gecikmesi gözleyicisinin taşıt savrulma dinamiği kontrolüne uygulanması ele alınmıştır. Zaman gecikmesi gözleyicisinin performansı zamanla değişen gecikmeler için çeşitli simülasyon çalışmalarıyla test edilmiş, ayrıca sonuçlar Smith tahmincisiyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Zaman gecikmesi, Taşıt dinamiği kontrolü, Smith tahmincisi, Bozucu gözleyicisi, Parametre uzayı yaklaşımı

Abstract

Time delay is a control system design factor, which reduces the performance of the system and makes the system unstable in the worst case. Many methods have been proposed in the literature for time delay compensation and the Smith predictor is the most widely used. Although the Smith predictor is easy to implement, the delay compensation performance degrades as the time delay model used by the predictor differs from the actual time delay in the system. Communication disturbance observer has been proposed as an alternative method to the Smith predictor and it has been applied to the bilateral teleoperation systems, robotic manipulators and network-based gait rehabilitation systems. This paper deals with the application of communication disturbance observer to the vehicle yaw stability control. The performance of communication disturbance observer is tested for time varying delays by using several simulations and the results are compared with the Smith predictor results.

Keywords: Time delay, Vehicle dynamics control, Smith predictor, Disturbance observer, Parameter space approach

1 Giriş

Zaman gecikmesi, sistemlerin frekans cevabına faz gecikmesi ekleyerek kararlılıklarını azaltan ve en kötü durumda sistemi kararsızlığa götüren kontrol sistemleri tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir etkidir. Literatürde Smith tahmincisi gibi oldukça iyi bilinen metotlarla zaman gecikmesi telafisi üzerine çalışmalar bulunmaktadır [1]-[3]. Smith tahmincisi ve bu yöntem üzerine geliştirilen yöntemler zaman gecikmesi telafisinde oldukça güçlü, anlaşılması ve uygulanması kolay yöntemlerdir. Bu yöntemlerin en büyük dezavantajı, yöntemin düzgün çalışabilmesi için tam (kesin) zaman gecikmesi modeline ihtiyaç duyulmasıdır. Model ile gerçek zaman gecikmesi birbirinden farklılaştıkça tahmincinin performansı düşmektedir [4].

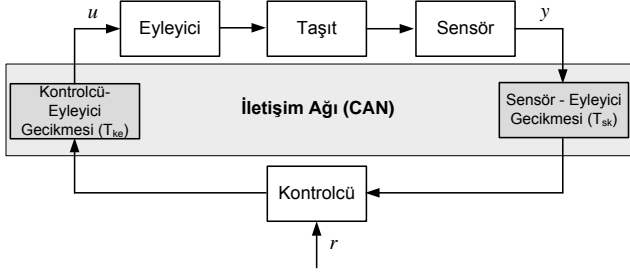
Smith tahmincisine alternatif olarak geliştirilen yöntemlerden bir tanesi zaman gecikmesi gözleyicisidir. Bu yöntem ilk kez 2004 yılında Natori vd. tarafından bilateral teleoperasyon sistemlerinde zaman gecikmesini telafi etmek için önerilmiştir [5]. Yöntemin önemli özelliklerinden biri tam (kesin) zaman gecikmesi modeline ihtiyaç duymaması ve hatta zamanla

değişen gecikme durumlarında da iyi sonuçlar vermesidir. Yöntem daha sonra tek ve iki serbestlik dereceli döner manipülatörlere [6],[7] ve iletişim ağı tabanlı yürüyüş şekli rehabilitasyon cihazlarına [8], kablosuz hareket kontrol sistemlerine [9],[10] ve TCP/IP protokolü yoluyla birbirine bağlı teleoperasyon sistemlerinin kontrolüne [11] uygulanmıştır.

Zaman gecikmesi pek çok otomotiv kontrol sisteminde görülmektedir. Bunlara örnek olarak rölanti devri kontrolü [12]-[14], anti-jerk kontrolü [15], kooperatif adaptif seyir kontrolü [16],[17] ve CAN (Controller Area Network) tabanlı aktif güvenlik sistemleri (ABS (Antilock Brake System), TCS (Traction Control System) ve ESC (Electronic Stability Control)) verilebilir. CAN tabanlı aktif güvenlik sistemleri iletişim ağı kontrol sistemlerinin iyi bir örneğidir. İletişim ağı kontrol sistemleri sağladıkları güvenlik, esneklik, uygun maliyet ve kolay yönetilebilirlikle otomobiller ve uçaklar gibi karmaşık sistemlerde kullanılmaktadır. Ancak kapalı çevrim kontrollü sistemlere iletişim ağlarının entegre edilmesi, iletişim ağı kaynaklı zaman gecikmelerinden ötürü sistemde

performans kaybına ve bazen kararsızlığa sebep olabilmektedir [18].

Şekil 1'de taşıtlarda kullanılan iletişim ağı kontrol sisteminin temel bileşenleri verilmiştir. İletişim ağı kaynaklı iki zaman gecikmesi bulunmaktadır: bunlar kontrolcü ile eyleyici arasındaki gecikme T_{ke} ve sensör ile kontrolcü arasındaki gecikme T_{sk} 'dir.



Şekil 1: Taşıtlarda kullanılan iletişim ağı kontrol sistemlerinin temel bileşenleri.

Bu çalışmada CAN tabanlı taşıt savrulma dinamiği kontrolünde zaman gecikmesinin etkisi ZGG (Zaman Gecikmesi Gözleyicisi) kullanılarak telafi edilmeye çalışılmıştır. Zamanla değişen gecikmeler için ZGG'siz ve ZGG eklenmiş sistemin cevabı çeşitli simülasyonlar yapılarak incelenmiştir. Zaman gecikmesi telafisi için Smith tahmincisi ile ZGG'nin performansı karşılaştırılmıştır. Ayrıca zaman gecikmesi marjinine göre parametre uzayı tabanlı kontrol sistemi tasarım denklemleri elde edilmiş ve PI kontrol sistemi tasarımı bu yolla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma yazarların önceki çalışmasının [19] genişletilmiş halidir.

Çalışmanın bundan sonraki bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de zaman gecikmesi gözleyicisi tanımlanmıştır. Bölüm 3'te taşıt savrulma dinamiği kontrolü problemi ve kullanılacak sistem modeli kısaca anlatılmıştır. Bölüm 4'te ZGG taşıt savrulma dinamiği kontrolüne uygulanmıştır. Zaman gecikmesi marjinine göre kontrol sistemi tasarımı ve ZGG için Q filtresinin kesim frekansının seçilmesi bu bölümde anlatılmıştır. Bölüm 5'te dört farklı simülasyonla ZGG test edilmiş ve performansı Smith tahmincisi ile karşılaştırılmıştır. Bildiri Bölüm 6'de verilen sonuçlarla sonlandırılmıştır.

2 Zaman gecikmesi gözleyicisinin yapısı

ZGG, zaman gecikmesi tahmini ve telafisi haricinde bozucu gözleyiciye benzer bir yapıya sahiptir. BG (Bozucu gözleyici), kontrol sistemleri alanında iyi bilinen modelleme hatalarının etkilerini azaltan ve bozucu etkiyi gidermede kullanılan bir yaklaşımdır. Bozucu gözleyici ilk kez 1987 yılında Ohnishi tarafından önerilmiş ve 1991 yılında Umeno ve Hori tarafından iyileştirilmiştir [20],[21].

BG yaklaşımında, nominal sistem modelinin tersi Şekil 2'de görüldüğü gibi bozucuyu tahmin için kullanılmaktadır. Bu tahmin edilen sinyal, sistemde bozucunun etkisini gidermek için kullanılabilir.

Bozucu tahmini denklemleri alttaki gibi çıkarılabilir. Nominal sistem çıkışı y , nominal sistem modeli G_n , sistem girişi u ve giriş bozucusu d 'ye göre alttaki gibi yazılabilir.

$$y = G_n(u - d) \quad (1)$$

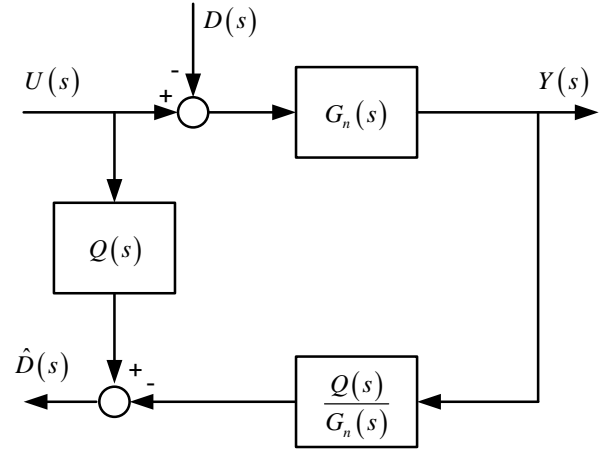
Denklem (1) d 'ye göre alttaki gibi yazılabilir:

$$d = u - G_n^{-1}y \quad (2)$$

Gerçek fiziksel sistemlerde, sistem çıkışları nedenselliği (causality) sağlayacak şekilde sadece önceki ve/veya şuan ki girişlere dayalı olmalıdır. Denklem (2)'de olduğu gibi nominal sistemin tersi alındığı zaman bu durum problem yaratabilir. Bunun önüne geçebilmek için tahmin edilen bozucu \hat{d} alttaki gibi ifade edilebilir:

$$\hat{d} = Q(u - G_n^{-1}y) \quad (3)$$

burada Q filtresi alçak geçiren bir filtredir. Nominal sistemin derecesine göre Q/G_n oranını nedensel kılacak şekilde Q alçak geçiren filtresinin derecesi belirlenir. Alçak geçiren Q filtresi yardımıyla belli bir kesim frekansına kadar tahminin yapılması sağlanmaktadır. Bu frekanstan sonra tahmin yapılmaya çalışılmamakta böylece dayanıklı kararlılık gözetilmektedir (Bkz. [22]).



Şekil 2: Bozucu gözleyici yapısı, [4].

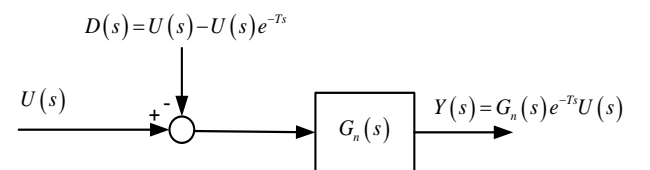
ZGG'nin yapısı bozucu etken tanımı ve zaman gecikmesi telafisi haricinde BG'ye benzemektedir. Zaman gecikmeli sistemdeki $(G_n(s)e^{-Ts})$ zaman gecikmesi, sisteme etkiyen bozucunun bir parçasıymış gibi Şekil 3'teki gibi gösterilebilir. Görüldüğü gibi sistem bu şekilde yazıldığında yine aynı çıkış elde edilmektedir $(Y(s) = G_n(s)e^{-Ts}U(s))$. Burada gösterilen bozucu, iletişim ağı bozucusu adıyla anılır ve zaman tanımlı bölgesinde alttaki gibi yazılabilir:

$$d(t) = u(t) - u(t - T) \quad (4)$$

Benzer şekilde Laplace formunda alttaki gibi yazılabilir:

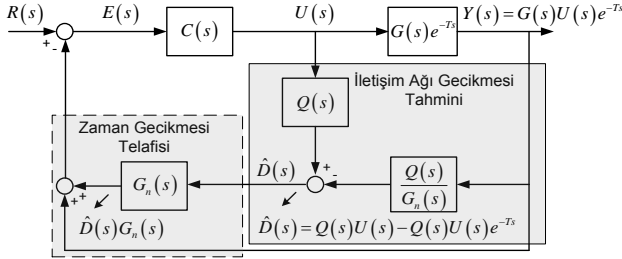
$$D(s) = U(s) - U(s)e^{-Ts} \quad (5)$$

burada u sistem girişini, T zaman gecikmesini, d ise iletişim ağı bozucusunu göstermektedir.



Şekil 3: İletişim ağı bozucusu.

Şekil 4'te görüldüğü gibi ZGG iki kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar iletişim ağı bozucusu tahmini ve zaman gecikmesi telafisidir. İletişim ağı bozucusu BG'de olduğu gibi Denklem (3) kullanılarak tahmin edilebilir. Daha sonra bu tahmin geri besleme sinyalindeki zaman gecikmesi etkisini telafi etmek için kullanılır.



Şekil 4: Zaman gecikmesi gözleyicisinin yapısı, [4].

Şekil 4'te görülen referans girişi r ile sistem çıkışı y arasındaki kapalı çevrim transfer fonksiyonu alttaki gibi yazılabilir:

$$G_{yr} = \frac{CGe^{-Ts}}{1 + CG_nQ + CGe^{-Ts}(1 - Q)} \quad (6)$$

burada G belirsizlikte içeren sistem modelini, G_n ise nominal (istenen) sistem modelini ve C kontrol sistemini göstermektedir. Denklem (6)'da görüldüğü gibi birim kazançlı alçak geçiren Q filtresi kullanılarak belirlenen frekans değerine kadar paydadaki (sistemin karakteristik denklemindeki) zaman gecikmesi etkisi giderilebilir.

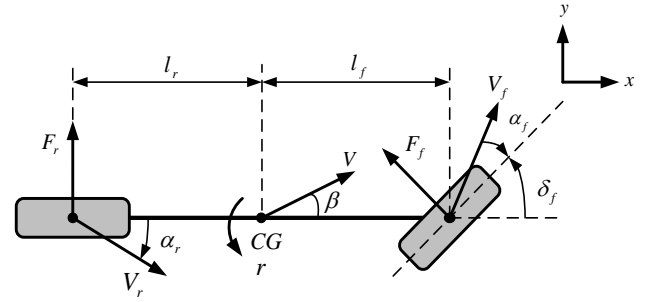
3 Taşıtlı savrulma dinamiği kontrolü

Taşıtlı şasesinde beklenmedik savrulma momenti değişimleri taşıtlı tehlikeli yanal hareketlerine sebep olabilir. Bu ani savrulma momenti değişimleri yol sürtünmesinin değişmesinden, agresif sürüş şekline, ani yan rüzgar alımından vb. nedenlerden kaynaklanabilir. Bu tip durumlarda taşıtlı kararlılığının artırılması taşıtlı savrulma dinamiği kontrolünün araştırma alanına girmektedir. Taşıtlı kararlılığını arttırmak için çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bunlara örnek olarak tekil frenleme, aktif ön tekerlek kontrolü ve aktif arka tekerlek kontrolü verilebilir. Konuyla ilgili daha fazla bilgi [23], [24] nolu kaynaklarda ve bu kaynaklardaki diğer yayınlarda bulunabilir. Bu çalışmada kablosuz direksiyon vasıtasıyla aktif ön tekerlek kontrolü göz önüne alınmıştır.

Taşıtlı savrulma dinamiğinin modellenmesinde ve kontrol sistemi tasarımında bisiklet modeli adı verilen tek izli taşıtlı modeli kullanılabilir. Tek izli taşıtlı modelinde ön ve arka tekerlekler tek bir tekerleğe indirgenerek ifade edilmektedir. Bu model tekerlek davranışlarının lineer bir değişim gösterdiği günlük sürüş koşullarında taşıtlı yanal dinamiğini iyi bir şekilde yansıtmaktadır [25]. Şekil 5'te tek izli taşıtlı modeli geometrisi, parametreleri ve değişkenleri gösterilmektedir.

Ön tekerlek açısı δ_f ile savrulma açısı r arasındaki transfer fonksiyonu G_f , tek izli taşıtlı modelinin doğrusallaştırılmasıyla alttaki gibi yazılabilir [25]:

$$G(s) = \frac{r(s)}{\delta_f(s)} = \frac{b_1s + b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (7)$$



Şekil 5: Tek izli taşıtlı modeli.

buradaki katsayılar şu şekilde tanımlanabilir:

$$b_1 = \mu C_f l_f m V^2, b_0 = \mu^2 C_f C_r (l_f + l_r) V, a_2 = J m V^2$$

$$a_1 = \mu (C_f (J + l_f^2 m) + C_r (J + l_r^2 m)) V$$

$$a_0 = \mu^2 C_f C_r (l_f + l_r)^2 + \mu (C_r l_r - C_f l_f) m V^2$$

Burada, μ tekerlek-yol sürtünme katsayısını, m taşıtlı kütesini, J taşıtlı atalet momentini, V taşıtlı hızını, C_f ve C_r sırasıyla ön ve arka tekerlekler için toplam dönüş katılığını, l_f taşıtlı ön aksı ile taşıtlı ağırlık merkezi arasındaki mesafeyi, l_r taşıtlı arka aksı ile taşıtlı ağırlık merkezi arasındaki mesafeyi göstermektedir. Parametrelerin sayısal değerleri şu şekildedir: $\mu = 1$, $m = 1296 \text{ kg}$, $J = 1759 \text{ kgm}^2$, $l_f = 1.25 \text{ m}$, $l_r = 1.32 \text{ m}$, $C_f = 84000 \text{ N/rad}$, $C_r = 96000 \text{ N/rad}$.

Taşıtlı savrulma açısal hızı ile direksiyon açısı arasında istenen değişim göz önüne alınarak zaman gecikmesi telafisinde kullanılacak nominal transfer fonksiyonu G_n , birinci mertebeden transfer fonksiyonu olarak alttaki gibi seçilebilir:

$$G_n = \frac{K_n}{\tau_n s + 1} \quad (8)$$

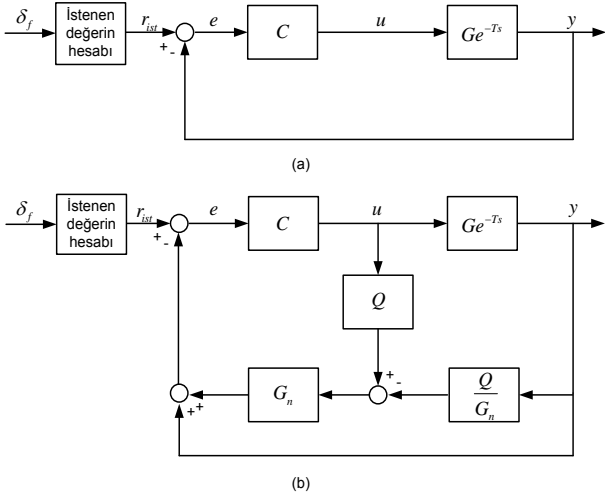
burada τ_n nominal taşıtlı savrulma dinamiğini yansıtmak üzere seçilen zaman sabitini ve $K_n = \frac{b_0}{a_0}$ ise nominal statik kazancı göstermektedir.

4 Zaman gecikmesi gözleyicisinin taşıtlı savrulma dinamiği kontrolüne uygulanması

Şekil 6'da ZGG'siz ve ZGG'li taşıtlı savrulma dinamiği kontrol sistemi blok diyagramı gösterilmiştir. Taşıtlı savrulma dinamiği kontrolünde amaç taşıtlı savrulma açısal hızını referans (istenen) değere göre kontrol etmektir. Referans savrulma açısal hızı nominal model G_n kullanılarak hesaplanabilir. Referans ve ölçülen değer farkı olarak hesaplanan savrulma açısal hızı hata değeri e kontrolcüden geçirilerek taşıtlı savrulma hareketini kararlı hale getiren kontrol sinyali u elde edilir. Bu bildiride kontrolcü C bir PI kontrolcü olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan PI kontrol sistemi üzerine ZGG tasarımı yapılarak eklenmiştir.

4.1 Zaman gecikmesi marjinine göre parametre uzayında kontrol sistemi tasarımı

PI kontrol sisteminin tasarımı için zaman gecikmesi marjini dikkate alan parametre uzayı tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Parametre uzayı yöntemiyle tasarım konusunda daha fazla bilgi [22] ve [25] nolu kaynaklarda bulunabilir.



Şekil 6: Taşıt savrulma dinamiği kontrol sistemi blok diyagramı. (a): ZGG'siz, (b): ZGG'li, [26].

Zaman gecikmesi marjini alttaki gibi tanımlanabilir [27]:

$$T_{maks} = \frac{PM}{\omega_{gc}} \quad (9)$$

burada T_{maks} sistem kararsız hale geçmeden tolere edilebilecek zaman gecikmesini, PM faz marjini ve ω_{gc} kazanç geçiş frekansını göstermektedir.

Kazanç geçiş frekansında (ω_{gc}), çevrim kazanç transfer fonksiyonu $L(s)$ alttaki gibi yazılabilir:

$$L(j\omega_{gc}) = |L(j\omega_{gc})| e^{j\angle L(j\omega_{gc})} \quad (10)$$

Kazanç marjininin ve faz marjininin tanımı kullanılarak sırasıyla $|L(j\omega_{gc})| = 1$ ve $\angle L(j\omega_{gc}) = -\pi + PM$ olarak yazılabilir. Bu bilgiler kullanılarak denklem (10)

$$L(j\omega_{gc}) = e^{j(-\pi + PM)} \quad (11)$$

olarak ifade edilebilir. Euler formülü ($e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$) ve denklem (9) kullanılarak çevrim kazanç transfer fonksiyonu reel ve imajiner kısımlardan oluşacak şekilde alttaki gibi ifade edilebilir:

$$L(j\omega_{gc}) = -\cos(T_{maks}\omega_{gc}) - j\sin(T_{maks}\omega_{gc}) \quad (12)$$

Çevrim kazancı transfer fonksiyonunun reel ve imajiner kısımları denklem (12)'nin sağ tarafına eşitlenerek alttaki tasarım denklemleri elde edilebilir:

$$Re\{L(j\omega, k_p, k_i)\} = -\cos(T_{maks}\omega) \quad (13)$$

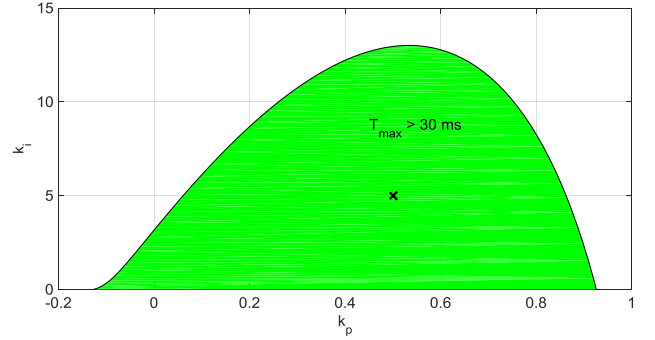
$$Im\{L(j\omega, k_p, k_i)\} = -\sin(T_{maks}\omega) \quad (14)$$

Denklem (13) ve (14), ω frekansına bağlı olarak iki serbest parametre olarak seçilen kontrol katsayıları k_p ve k_i için çözülebilir. ω frekansı taranarak istenen maksimum zaman gecikmesini tolere edebilecek kontrol katsayısı değerleri iki boyutlu parametre düzleminde gösterilebilir.

CAN hattı zaman gecikmesinin maksimum değeri 30 ms [18] alınarak pozitif kontrol katsayısı değerleri için hesaplanan parametre uzayı çözüm bölgesi Şekil 7'de gösterilmiştir. Burada yeşil bölge sistem kararsız olmadan 30 ms zaman

gecikmesini tolere edebilecek (k_p, k_i) değerlerini göstermektedir.

ZGG'nin performansını test etmek için iki adet PI kontrol katsayısı seti seçilmiştir. Bunlardan ilki zaman gecikmesini tolere etmeyecek şekilde $(k_{p1}, k_{i1}) = (3, 15)$, ikincisi ise zaman gecikmesini tolere edecek şekilde $(k_{p2}, k_{i2}) = (0.5, 5)$ olarak parametre uzayı çözüm bölgesinden seçilmiştir. Şekil 7'de seçilen kontrol katsayıları çarpı ile işaretlenmiştir. İlk seçilen set, zaman gecikmesinin kontrolcü tasarımı sırasında bilinmediği durumu yansıtmaktadır.



Şekil 7: $k_p - k_i$ parametre uzayı zaman gecikmesi sınırı.

4.2 ZGG için Q filtresi kesim frekansının seçilmesi

Q filtresinin kesim frekansının seçimi model regülasyonu ve bozucu etkisinin engellenmesi istenen frekans bandına, yüksek frekanstaki sensör gürültüsü etkisinin engellenmesine, dayanıklı kararlılığa ve eyleyici bant genişliğine bağlı bir tasarım parametresidir [22].

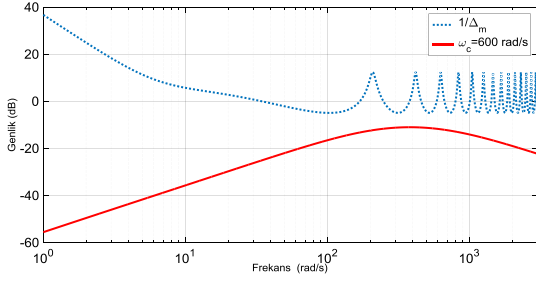
ZGG için dayanıklı kararlılığı gözönüne alan Nyquist kararlılık kriteri tabanlı bir koşul [4] nolu kaynakta geliştirilmiştir. Bu koşul alttaki biçimde ifade edilebilir:

$$\left| \frac{CG_n(1-Q)}{1+CG_n} \right| < \left| \frac{1}{\Delta_m} \right|, \forall \omega \quad (15)$$

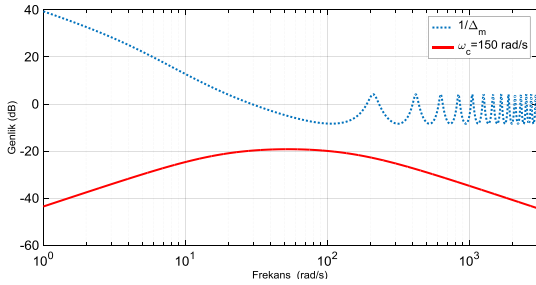
burada C kontrol sistemini, G_n nominal sistem modelini, $Q = \omega_c/(s + \omega_c)$ alçak geçiren ZGG filtresini ve Δ_m çarpımsal (multiplicative) belirsizliği göstermektedir. Zaman gecikmeli sistem için çarpımsal belirsizlik alttaki gibi ifade edilebilir:

$$\Delta_m = \frac{Ge^{-T_{maks}S} - G_n}{G_n} \quad (16)$$

Denklem (15)'teki koşulu sağlayacak kapalı çevrim sistemi dayanıklı kararlı yapacak şekilde alçak geçiren Q filtresinin kesim frekansı seçilebilir. Önceki bölümde bahsedilen iki farklı PI kontrol sistemi içeren ZGG'li sistemler için bu koşul uygulanarak Q filtresinin kesim frekansı sırasıyla 600 rad/s ve 150 rad/s olarak seçilmiştir. Şekil 8 ve 9'da seçilen kesim frekanslarıyla denklem (15)'teki koşulun sağlandığı diğer bir ifadeyle eğrilerin kesismeyerek denklem (15)'teki dayanıklı kararlılık eşitsizliğinin sağlandığı görülmektedir. ZGG'nin gerçek sistemlere uygulanmasında Q filtresinin bant genişliği kullanılan eyleyicinin bant genişliğiyle de sınırlanmaktadır. Uygulamada bu durum da dikkate alınmalıdır.



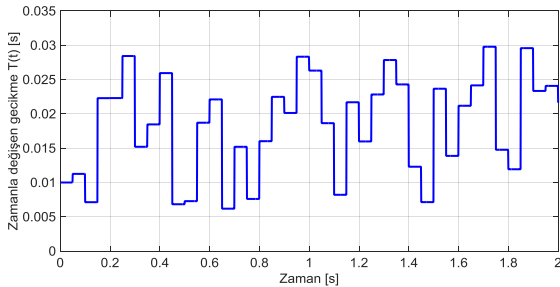
Şekil 8: $(k_{p1}, k_{i1}) = (3, 15)$ ve seçilen 600 rad/s kesim frekanslı Q filtresi için dayanıklı kararlılık durumu.



Şekil 9: $(k_{p2}, k_{i2}) = (0.5, 5)$ ve seçilen 150 rad/s kesim frekanslı Q filtresi için dayanıklı kararlılık durumu.

5 Simülasyon sonuçları ve performans analizi

CAN hattında bulunan zamanla değişen iletişim ağı kaynaklı gecikme, kontrolcü-eyleyici arasındaki gecikme T_{ke} ile sensör-kontrolcü arasındaki gecikmenin T_{sk} toplamı olarak ifade edilebilir. CAN hattı kaynaklı zamanla değişen iletişim ağı gecikmesi 6 ms ile 30 ms arasında alınabilir [18]. Şekil 10'da bu zamanla değişen sınırlı gecikme görülmektedir.



Şekil 10: CAN iletişiminde zamanla değişen gecikme $T(t)$.

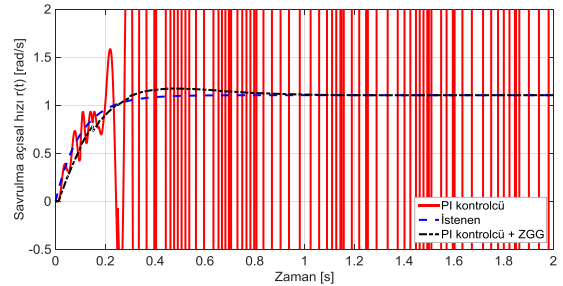
Bu çalışmada, ZGG'nin performansını test etmek için çeşitli simülasyon çalışmaları yapılmıştır. İlk iki simülasyonda farklı PI kontrol katsayıları için Şekil 10'da görülen zamanla değişen gecikme için istenen, ZGG'siz ve ZGG'li savrulma açısız hızı değerleri karşılaştırılmıştır. Üçüncü simülasyonda taşıt savrulma dinamiği problemi için Smith tahmincili ve ZGG'li sisteminin sonuçları kararlılık ve performans açısından karşılaştırılmıştır. Dördüncü simülasyonda ise sinüzoidal ön tekerlek açısı girişi için ZGG'siz ve ZGG'li PI kontrol sistemi kullanılarak taşıt savrulma açısız hızı değerleri ve kontrol işaretleri karşılaştırılmıştır.

5.1 Zamanla değişen gecikmede ZGG'nin etkisi

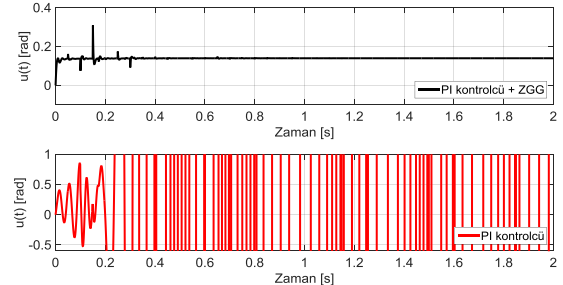
Bu simülasyon çalışmasında, Şekil 6'da gösterilen ZGG'siz ve ZGG'li taşıt savrulma dinamiği kontrol sistemleri kurulmuş ve taşıt savrulma açısız hızları istenen, ZGG'siz ve ZGG'li kontrol

sistemleri için elde edilmiştir. CAN hattında Şekil 10'da gösterilen 6 ms ile 30 ms arasında zamanla değişen gecikme söz konusudur. Taşıta ön tekerlek açısı olarak (δ_f) 8 derece verilmiştir. Taşıt hızı 30 m/s olarak alınmıştır. Burada PI kontrol katsayıları CAN hattı zaman gecikmesini tolere edemeyecek şekilde $(k_{p1}, k_{i1}) = (3, 15)$ olarak seçilmiştir. Bu seçimdeki amaç, kontrol sistemi tasarımı sırasında zaman gecikmesinin bilinmediği durumu yansıtarak en kötü durumda ZGG'nin performansını test etmektir.

Şekil 11'de görülen sonuçlara göre zamanla değişen gecikme durumunda sadece PI kontrolcü kullanıldığında sistem kararsızlığa gitmektedir. ZGG'nin eklendiği durumdaysa sistem kararlı kalmakta ve istenen modele yakınsamaktadır. Şekil 12'de sadece PI kontrolcü kullanıldığında ve ZGG'li PI kontrollü sistemdeki kontrol işareti değişimi görülmektedir. ZGG'nin eklenmediği durumda kontrol işareti belli bir değere oturamamaktadır.



Şekil 11: Zamanla değişen gecikme durumunda savrulma açısız hızı sonuçları.

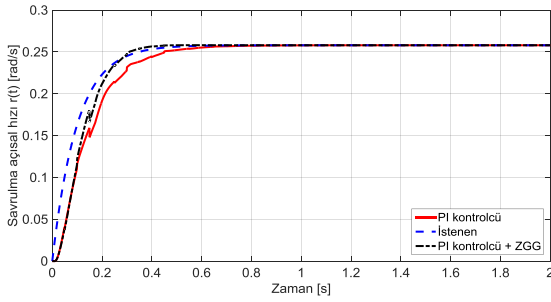


Şekil 12: Zamanla değişen gecikme durumunda kontrol işareti değişimleri.

5.2 Zaman gecikmesini tolere eden PI kontrol sistemiyle birlikte ZGG'nin kullanımı

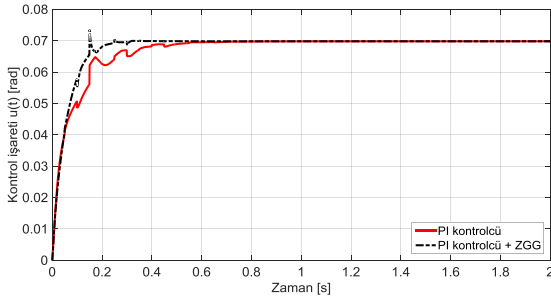
Bu ikinci simülasyon çalışmasında, önceki simülasyona benzer bir çalışma yapılmıştır. Daha az agresif bir manevra olacak şekilde taşıt ön tekerlek açısı girişi (δ_f) 4 derece olarak verilmiştir. Taşıt hızı 10 m/s olarak alınmıştır. PI kontrol katsayıları CAN hattı zaman gecikmesini tolere edecek şekilde $(k_{p2}, k_{i2}) = (0.5, 5)$ olarak Şekil 7'de gösterilen parametre uzayı çözümünden seçilmiştir.

Şekil 13'te görülen sonuçlara göre zaman gecikmesini tolere edecek şekilde parametre uzayında tasarlanmış PI kontrol sistemiyle gecikme etkisi giderilebilmekte ve kapalı çevrim kontrollü sistem kararlı kılınabilmektedir. ZGG'nin sisteme eklendiği durumda geçici rejim bölgesinde istenen değerlere daha iyi bir yakınsama sağlanabilmektedir.



Şekil 13: Zaman gecikmesinin PI kontrol sistemiyle tolere edildiği durumda savrulma açısai hızı sonuçları.

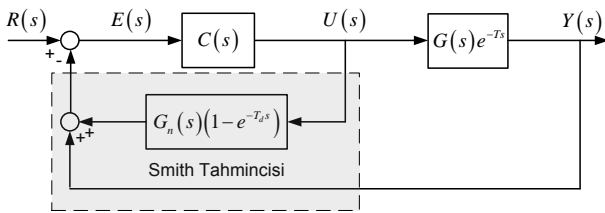
Şekil 14'te bu simülasyon için sadece PI ve ZGG'li PI kontrollü sistemlerin kontrol işareti değişimleri görülmektedir. ZGG'nin eklendiği durumda geçici rejim bölgesinde kontrol işaretinin değeri sadece PI kontrollü sisteme göre biraz daha yüksek kalmakta; ancak, daha düzgün bir kontrol işareti elde edilmektedir.



Şekil 14: Zaman gecikmesinin PI kontrol sistemiyle tolere edildiği durumda kontrol işareti değişimleri.

5.3 Smith tahminci ile ZGG'nin karşılaştırılması

Şekil 15'te yapısı gösterilen Smith tahminci zaman gecikmesi telafisinde kullanılan en yaygın metotlardan biridir. Daha önce belirtildiği gibi Smith tahminci zaman gecikmesi modelini kullanmakta ve kullanılan model ile sistemdeki gerçek zaman gecikmesi arasındaki fark artıka tahmincinin gecikmeyi telafi etme performansı düşmektedir.



Şekil 15: Smith tahminci yapısı.

Şekil 15'te gösterilen Smith tahminci eklenmiş kontrollü sistem için referans giriş r ile sistem çıkışı y arasındaki transfer fonksiyonu alttaki gibi yazılabilir:

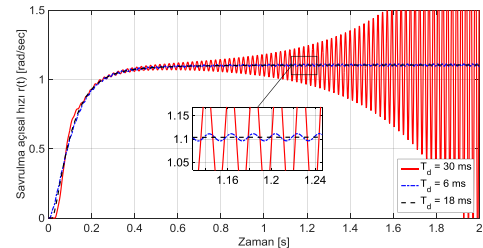
$$G_{yrSmith} = \frac{CGe^{-Ts}}{1 + CG_n(1 - e^{-T_d s}) + CGe^{-Ts}} \quad (17)$$

Denklem (17) ile gösterilen kapalı çevrim transfer fonksiyonu $G_{yrSmith}$ incelendiğinde ve sistem modeli ile nominal modelin aynı olduğu varsayıldığında ($G = G_n$), Smith tahmincinde kullanılan tahmini gecikme T_d 'nin sistem

performansını etkilediği görülmektedir. T_d 'nin değeri, sistemdeki zaman gecikmesi T ile aynı olduğunda karakteristik denklemde zaman gecikmesi elemanı (üstel eleman) kalmamaktadır. Smith tahmincinin görevini iyi bir şekilde gerçekleştirebilmesi için sistemdeki gecikme değeri T 'nin tasarım sırasında bilinmesi ve T_d 'nin buna göre seçilmesi gerekmektedir. Diğer yandan denklem (6)'da gösterilen ZGG'li kapalı çevrim transfer fonksiyonu G_{yr} incelendiğinde zaman gecikmesi tahminine ihtiyaç duyulmadığı seçilen Q filtresiyle zaman gecikmesi elemanının karakteristik denklemden elenebildiği görülmektedir. Zaman gecikmesi tahminine ihtiyaç duyulmaması ZGG'nin zamanla değişen gecikmelerde de kullanımına imkan sağlayarak Smith tahmincinine göre önemli bir avantaj sağlamaktadır.

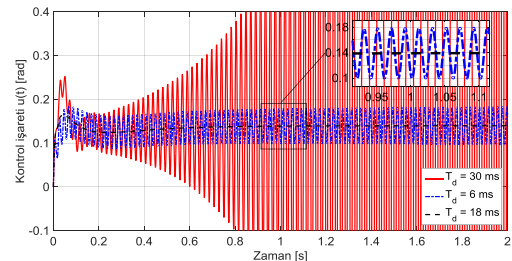
Smith tahmincinin performansını test etmek için bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Smith tahmincinde kullanılan zaman gecikmesi modelindeki tahmini gecikme (T_d) CAN hattında zamanla değişen gecikmelerin (6 ms, 30 ms) ortalama değeri olarak 18 ms alınmıştır. Daha sonra sistemdeki gecikme (T)'nin farklı değerleri için simülasyonlar yapılmıştır. Burada PI kontrol katsayıları $(k_{p1}, k_{i1}) = (3, 15)$ olarak alınmıştır.

Şekil 16'da gösterilen sonuçlara göre zaman gecikmesi modelinde kullanılan tahmini gecikme (T_d) ile sistem gecikmesi (T) aynı olduğu zaman Smith tahmincisi zaman gecikmesini iyi bir şekilde telafi etmiştir. Ancak model ile gerçek gecikme arasındaki fark artıka telafi kötüleşmiş ve hatta 30 ms gecikme için sistem kararsız davranış göstermiştir.



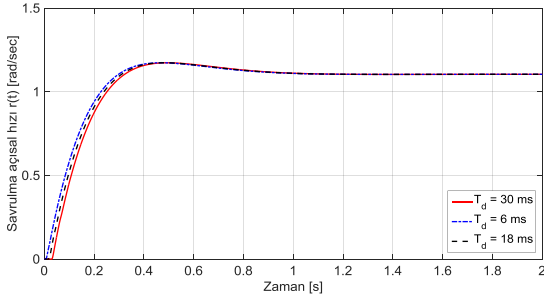
Şekil 16: Çeşitli zaman gecikmeleri için Smith tahmincili sistemin sonuçları.

Şekil 17'de Smith tahmincili sistemde çeşitli zaman gecikmeleri için elde edilen kontrol işareti değişimleri görülmektedir. Sadece Smith tahmincisi modelinde kullanılan gecikme ile sistem gecikmesi aynı olduğu zaman salınımsız bir kontrol işareti oluşmaktadır.



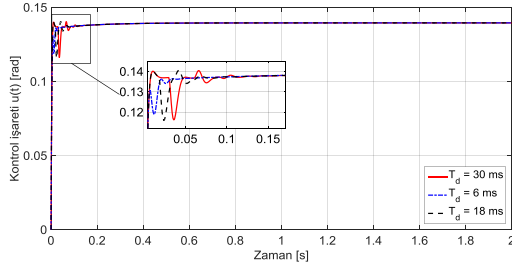
Şekil 17: Çeşitli zaman gecikmeleri için Smith tahmincili sistemin kontrol işareti değişimleri.

Aynı simülasyon, farkı görmek için Smith tahmincisi yerine ZGG kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Şekil 18'de görüldüğü gibi aynı zaman gecikmesi değerleri için ZGG çok daha iyi bir performans göstermiş ve sistem kararlılığı sağlanmıştır.



Şekil 18: Çeşitli zaman gecikmeleri için ZGG'li sistemin savrulma açışal hızı sonuçları.

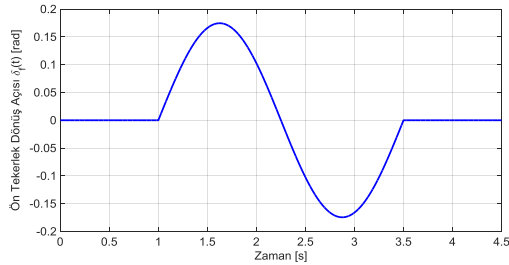
Şekil 19'da ise ZGG'li sistemde farklı zaman gecikmelerinde elde edilen kontrol işaretleri değişimleri görülmektedir. Sadece geçici rejim bölgesinde kontrol işareti değişimi farklılık göstermiş daha sonra kontrol işareti tüm gecikme değerleri için aynı değere oturmuştur.



Şekil 19: Çeşitli zaman gecikmeleri için ZGG'li sistemde kontrol işareti değişimleri.

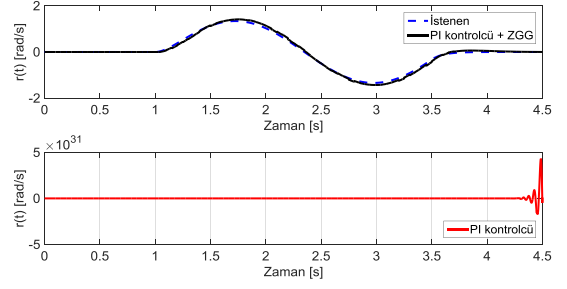
5.4 Sinüzoidal ön tekerlek açısı girişi durumunda ZGG'nin etkisi

Bu dördüncü simülasyon çalışmasında sinüzoidal ön tekerlek açısı girişi için ZGG'siz ve ZGG'li kontrol sistemleri için sonuçlar elde edilmiştir. Taşıta ön tekerlek açısı (δ_f) olarak genliği 10 derece olan 0.4 Hz frekanslı sinüzoidal giriş uygulanmıştır. Bu giriş radyan cinsinden Şekil 20'de gösterilmiştir. Simülasyonda taşıt hızı 30 m/s olarak alınmıştır. CAN hattında 6 ms ile 30 ms arasında zamanla değişen gecikme dikkate alınmıştır. Burada PI kontrol katsayıları $(k_{p1}, k_{i1}) = (3, 15)$ olarak kullanılmıştır.



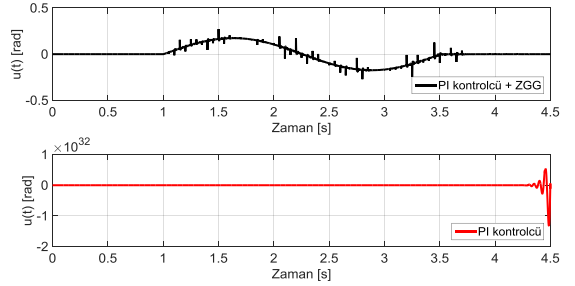
Şekil 20: Sinüzoidal ön tekerlek açısı girişi.

Şekil 21'de görülen savrulma açışal hızı sonuçlarına göre, sadece PI kontrolcü kullanıldığında sistem zaman gecikmesinin etkisiyle kararsızlığa gitmektedir. ZGG'nin eklendiği durumda sistem kararlı olmaktadır ve taşıt savrulma açışal hızı istenen savrulma açışal hızı değerlerine yakınsamaktadır.



Şekil 21: Sinüzoidal ön tekerlek açısı girişi durumunda savrulma açışal hızı sonuçları.

Şekil 22'de sinüzoidal ön tekerlek açısı girişi simülasyonu için kontrol işareti değişimi ZGG eklenmemiş ve ZGG eklenmiş PI kontrol sistemi için verilmiştir. Sadece PI kontrol sistemi kullanıldığı durumda kararsızlığa giden kontrol sinyali görülmektedir.



Şekil 22: Sinüzoidal ön tekerlek açısı girişi durumunda kontrol işareti değişimleri.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada CAN tabanlı taşıt savrulma dinamiği kontrolünde zaman gecikmesi etkisini telafi edecek zaman gecikmesi gözleyicisi önerilmiştir. ZGG'siz ve ZGG'li taşıt savrulma dinamiği kontrolü sistemlerinin cevapları elde edilerek karşılaştırılmıştır. ZGG'li sistemin zamanla değişen gecikme etkisini çeşitli girişler için telafi ederek sistemi kararlı kıldığı görülmüştür. ZGG, literatürde zaman gecikmesi telafisi için sıklıkla kullanılan Smith tahmincisi ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ZGG'nin zamanla değişen gecikmeyi başarıyla telafi etmesi ve tam (kesin) zaman gecikmesi modeline ihtiyaç duymaması yüzünden Smith tahmincisine göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca zaman gecikmesi marjinine göre parametre uzayında kontrol sistemi tasarımı için analitik denklemler elde edilmiş ve PI kontrol sistemi tasarımında kullanılmıştır. ZGG sadece CAN tabanlı taşıt savrulma dinamiği kontrolünde değil, kooperatif adaptif seyir kontrolü gibi zaman gecikmesinin önem kazandığı başka taşıt dinamiği kontrolü (otomotiv kontrolü) problemlerinde de uygulanabilir. Bu konuların üzerinde ilerleyen çalışmalarda durulacaktır.

7 Kaynaklar

- [1] Smith OJM. "A controller to overcome dead time". *ISA Journal*, 6(2), 28-33, 1959.
- [2] Rao AS, Chidambaram M. "Enhanced Smith predictor for unstable processes with time delay". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(22), 8291-8299, 2004.

- [3] Normey-Rico JE, Camacho EF. "Unified approach for robust dead-time compensator design". *Journal of Process Control*, 19(1), 38-47, 2009.
- [4] Emirler MT, Aksun Güvenç B, Güvenç L. "Communication disturbance observer approach to control of integral plant with time delay". *IEEE Asian Control Conference (ASCC)*, İstanbul, Turkey, 23-26 June 2008.
- [5] Natori K, Tsuji T, Ohnishi K, Hace A, Jezernik K. "Robust bilateral control with internet communication". *IEEE Industrial Electronics Society Conference (IECON)*, Busan, South Korea, 2-6 November 2004.
- [6] Natori K, Ohnishi K. "A design method of communication disturbance observer for time-delay compensation, taking the dynamic property of network disturbance into account". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(5), 2152-2168, 2008.
- [7] Natori K, Oboe R, Ohnishi K. "Stability analysis and practical design procedure of time delayed control systems with communication disturbance observer". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 4(3), 185-197, 2008.
- [8] Zhang W, Tomizuka M. "Compensation of time delay in a network-based gait rehabilitation system with a discrete-time communication disturbance observer". *IFAC Proceedings Volumes*, 46(5), 555-562, 2013.
- [9] Zhang W, Tomizuka M, Wei Y-H, Leng Q, Han S, Mok AK. "Robust time delay compensation in a wireless motion control system with double disturbance observers". *IEEE American Control Conference (ACC)*, Chicago, IL, USA, 1-3 July 2015.
- [10] Zhang W, Tomizuka M, Wu P, Wei Y-H, Leng Q, Han S, Mok AK. "A double disturbance observer design for compensation of unknown time delay in a wireless motion control system". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26(2), 675-683, 2018.
- [11] Zeinaly Z, Ramezani A, Ozgoli S. "Design and implementation of a modified communication disturbance observer for teleoperation systems". *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25(2), 1522-1540, 2017.
- [12] Hrovat D, Sun J. "Models and control methodologies for IC engine idle speed control design". *Control Engineering Practice*, 5(8), 1093-1100, 1997.
- [13] Jankovic M, Kolmanovsky I. *Developments in Control of Time-delay Systems for Automotive Powertrain Applications*. Editors: Balachandran B, Kalmar-Nagy T, Gilsinn DE. Delay Differential Equations: Recent Advances and New Directions, 55-90, New York, NY, USA, Springer Science+Business Media, 2009.
- [14] Kang E, Hong S, Sunwoo M. "Idle speed controller based on active disturbance rejection control in diesel engines". *International Journal of Automotive Technology*, 17(6), 937-945, 2016.
- [15] Baumann J, Torkzadeh DD, Ramstein A, Kiencke U, Schlegl T. "Model-based predictive anti-jerk control". *Control Engineering Practice*, 14(3), 259-266, 2006.
- [16] Güvenç L, Uygan İMC, Kahraman K, Karaahmetoğlu R, Altay İ, Şentürk M, Emirler MT, Hartavi Karcı AE, Aksun Güvenç B, Altuğ E, Turan MC, Taş ÖŞ, Bozkurt E, Özgüner Ü, Redmill K, Kurt A, Efendioğlu B. "Cooperative adaptive cruise control implementation of team Mekar at the Grand Cooperative Driving Challenge". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3), 1062-1074, 2012.
- [17] Öncü S, Van de Wouw N, Nijmeijer H. "Cooperative adaptive cruise control: Tradeoffs between control and network specifications". *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Washington, DC, USA, 5-7 October 2011.
- [18] Latrach C, El Hajjaji A, Rabhi A, Kchaou M. "Vehicle dynamics decentralized networked control". *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, İstanbul, Turkey, 2-5 August 2015.
- [19] Emirler MT, Aksun Güvenç B, Güvenç L. "Zaman gecikmesi gözleyicisinin taşıt savrulma dinamiği kontrolüne uygulanması". *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK)*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 21-23 Eylül 2017.
- [20] Ohnishi K. "A new servo method in mechatronics". *Trans. Jpn. Soc. Elect. Eng.*, 107, 1093-1100, 1987.
- [21] Umeno H, Hori Y. "Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 38(5), 363-368, 1991.
- [22] Güvenç L, Aksun Güvenç B, Demirel B, Emirler MT. *Control of Mechatronic Systems*. 1st ed. London, UK, The IET, 2017.
- [23] Aksun Güvenç B, Güvenç L, Karaman S. "Robust yaw stability controller design and hardware-in-the-loop testing for a road vehicle". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(2), 555-571, 2009.
- [24] Emirler MT, Kahraman K, Şentürk M, Acar OU, Aksun Güvenç B, Güvenç L, Efendioğlu B. "Lateral stability control of fully electric vehicles". *International Journal of Automotive Technology*, 16(2), 317-328, 2015.
- [25] Ackermann J, Blue P, Bünte T, Güvenç L, Kaesbauer D, Kordt M, Muhler M, Odenthal D. *Robust Control: The Parameter Space Approach*. 2nd ed. London, UK, Springer-Verlag, 2002.
- [26] Emirler MT. *Advanced Control Systems for Ground Vehicles*. PhD Thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, Turkey, 2015.
- [27] Skogestad S, Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. 2nd ed. New York, Wiley, 2005.