

Askeri Taşıtlarda Atış Doğruluğu için Aktif Süspansiyon Kontrolcüsü Tasarımı

Design of an Active Suspension Controller for Improving Firing Accuracy in Military Vehicles

Cem Onat ^{1*} , Erhan Yılmaz ² 

¹ Adiyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adiyaman, Türkiye

² Adiyaman Belediyesi, Yapı Kontrol Müdürlüğü, 02040, Adiyaman, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, üzerinde silah taşıyan bir kara taşıtı için atış performansına odaklanan aktif süspansiyon sistemi tasarlanmıştır. Atış doğruluğunu etkileyen en önemli parametre, taşıt gövdesinin açılal titreşimidir. Zira silah namlusunun küçük bir açılal yer değiştirmesi bile, etkili menzile içinde önemli nişan alma hatalarına yol açabilir. Bu nedenle kontrolcü taşıt gövdesinin açılal hareketini minimize etmeye odaklı biçimde tasarlanmıştır. Tasarım süreci iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, taşıt gövdesinin açılal hareketini minimize edecek şekilde LQR (Lineer Kareli Regülatör) kontrolcü optimal kontrol teorisi ile hesaplanmıştır. İkinci aşamada, LQR kontrolcüsüne bir alçak geçiren filtre entegre edilmektedir. Dört serbestlik dereceli yarım taşıt sistemi olarak modellenen aktif süspansiyonlu askeri taşıtın atış performansı, pasif süspansiyon ve pür LQR kontrolcülü konfigürasyonlar ile karşılaştırılmal olarak değerlendirilmiştir. Ele alınan askeri taşıta entegre silah sisteminin saniyede en fazla iki atış yapabildiği varsayılmıştır. Ayrı ayrı uygulanan çeşitli yol profilleri ve seri atış koşulları altında ayrıntılı simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar, önerilen alçak geçiş filtresiyle güçlendirilmiş LQR kontrollü aktif süspansiyon sisteminin ateşleme performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: LQR, Optimal Kontrol, Askeri Taşıt, Aktif Süspansiyon, Atış Doğruluğu

Abstract

In this study, an active suspension system focused on firing performance was designed for a land vehicle equipped with a weapon system. The most influential parameter affecting firing accuracy is the angular vibration of the vehicle body. Even a small angular displacement of the weapon barrel can lead to significant aiming errors within its effective range. Therefore, the controller was designed to minimize the angular motion of the vehicle body. The design process was carried out in two stages. In the first stage, a Linear Quadratic Regulator (LQR) controller was designed using optimal control theory to reduce the angular motion of the vehicle body. In the second stage, a low-pass filter was integrated into the LQR controller. The firing performance of the active-suspension military vehicle, modeled as a four-degree-of-freedom half-vehicle system, was evaluated comparatively against passive suspension and pure LQR-controlled configurations. The integrated weapon system was assumed to be capable of firing maximum two rounds per second. Detailed simulation studies were conducted under various road profiles and burst-firing conditions applied separately. The results demonstrated that the proposed low-pass-filter-enhanced LQR-controlled active suspension system significantly improves firing performance.

Keywords: LQR, Optimal Control, Military Vehicle, Active Suspension, Accuracy of Fire

1. Giriş

Taşıtların süspansiyon sistemleri, araç gövdesi ile tekerlekler arasındaki etkileşimi düzenleyerek sürüş konforu ve yol tutuşu doğrudan etkileyen temel sistemlerden biridir. Süspansiyonun ana görevi, yol yüzeyinden kaynaklanan darbeleri sönmölemek, lastiklerin yol ile sürekli temasını sağlamak ve aracın dinamik davranışını kontrol altında tutmaktır [1-5]. Bu sistemler genel olarak yaylar, sönmöleyiciler (amortisörler), bağlantı elemanları ve denge çubuklarından oluşur. Yaylar, yol düzensizliklerinden kaynaklanan enerjiyi depolarken, amortisörler bu enerjiyi sönmöleyerek titreşimlerin kontrolsüz şekilde devam etmesini engeller. Süspansiyon tasarımında konfor ve yol tutuşu arasında her zaman bir denge kurulması gerekir; yumuşak bir süspansiyon yüksek konfor sağlarken, sert süspansiyon daha iyi direksiyon tepkisi ve kararlılık sunar [6-8]. Tasarım kriterleri arasında araç kütlesi, ağırlık dağılımı, kullanım amacı (binek, ticari veya spor araç), hız aralığı ve yol koşulları önemli rol oynar. Ayrıca maliyet, dayanıklılık, bakım gereksinimleri ve üretilebilirlik de mühendislik kararlarını etkileyen faktörlerdir [9].

Üzerinde seri atış yapabilen ağır makineli silah bulunan bir kara taşıtında süspansiyon sistemi ile atış hatası arasındaki ilişki, aracın dinamik davranışı ve titreşim karakteristikleri üzerinden ortaya konulmaktadır [10]. Seri atış sırasında silahın geri tepme kuvvetleri, taşıtların gövdesine periyodik ve yüksek genlikli yükler uygular [11,12]. Bu yükler süspansiyon elemanları tarafından yeterince sönmölenmediğinde gövdede salınım, burulma ve zıplama hareketleri oluşur. Süspansiyonun doğal frekansı ile atış frekansının birbirine yaklaşması durumunda rezonans riski artar ve bu da nişan hattında sapmalara, yani atış hatasının büyümesine neden olur. Özellikle yumuşak ayarlı veya aşırı strok yapan süspansiyonlar, geri tepme sonrası gövdenin gecikmeli toparlanmasına yol açarak seri atış esnasında mermi dağılımını olumsuz etkiler. Buna karşılık aşırı sert süspansiyonlar da yol kaynaklı yüksek frekanslı titreşimleri gövdeye doğrudan ileterek silah platformunun kararlılığını bozabilir. Taşıtların kütlesi, ağırlık merkezi konumu ve süspansiyon geometrisi, geri tepme kuvvetlerinin tekerlekler aracılığıyla zemine nasıl aktarıldığını belirleyen kritik unsurlardır [13]. Düzensiz zemin koşullarında, süspansiyonun tekerlek-zemin temasını süreklilik içinde koruyamaması, atış anında gövdenin anlık konumunun değişmesine ve hedefleme doğruluğunun düşmesine yol açar. Bu nedenle böyle taşıtlarda süspansiyon sistemi, yalnızca sürüş konforu için değil, silah platformunun kararlılığını destekleyecek şekilde titreşim sönmöleme ve gövde kontrolü sağlayan bir alt sistem olarak değerlendirilir. Süspansiyonun dinamik tepkisi ne kadar kontrollü ve öngörülebilir olursa, seri atış sırasında oluşan atış hatası da o ölçüde sınırlı kalır [14].

Askeri taşıtlarda silah geri tepmesi kaynaklı atış hatalarını azaltmada aktif süspansiyon sistemi tasarımı, platform kararlılığını artıran kritik bir mühendislik yaklaşımıdır. Ağır silahların seri atışı sırasında oluşan geri tepme kuvvetleri, taşıtların gövdesinde ani ivmelenmelere ve titreşimlere yol açarak nişan hattının bozulmasına neden olur. Geleneksel pasif süspansiyon sistemleri bu tür değişken ve yüksek enerjili yükleri sınırlı ölçüde sönmöleyebilirken, aktif süspansiyon sistemleri sensörler, eyleyiciler ve kontrol algoritmaları sayesinde gövde hareketlerini gerçek zamanlı olarak düzenleyebilir. Aktif sistemler, atış anını algılayarak süspansiyon sertliğini ve sönmöleme karakteristiğini anlık olarak ayarlayabilir; böylece geri tepmenin gövde üzerindeki etkisi azaltılır ve silah platformu daha dengeli bir konumda tutulur. Bu durum, özellikle seri atışlarda mermi dağılımının daralmasına ve hedefleme doğruluğunun artmasına katkı sağlar. Ayrıca aktif süspansiyon, taşıtların ağırlık merkezi hareketlerini kontrol altında tutarak zemin koşullarından kaynaklanan dış etkilerle silah geri tepmesinin birleşmesini engeller. Bu sayede farklı arazi tiplerinde bile atış performansı daha tutarlı hale gelir. Tasarım açısından bakıldığında, aktif süspansiyonun sadece sürüş dinamiğini değil, silah-taşıtların etkileşimini de kapsayan bütüncül bir sistem olarak ele alınması gerekir. Enerji yönetimi, sistem güvenilirliği ve kontrol kararlılığı gibi unsurlar, askeri kullanım koşulları nedeniyle özel önem taşır. Sonuç olarak aktif süspansiyon sistemleri, geri tepme kaynaklı atış hatalarını azaltarak askeri taşıtların hem ateş gücünü etkin kullanmasına hem de operasyon güvenilirliğinin artmasına önemli katkı sağlar.

Bu çalışmada, üzerinde farklı modlarda seri atış yapabilen bir silah sistemi taşıyan askeri kara taşıtı için aktif süspansiyon kontrolcüsü tasarlanmıştır. Atış kalitesine odaklı biçimde yapılan kontrolcü tasarımında

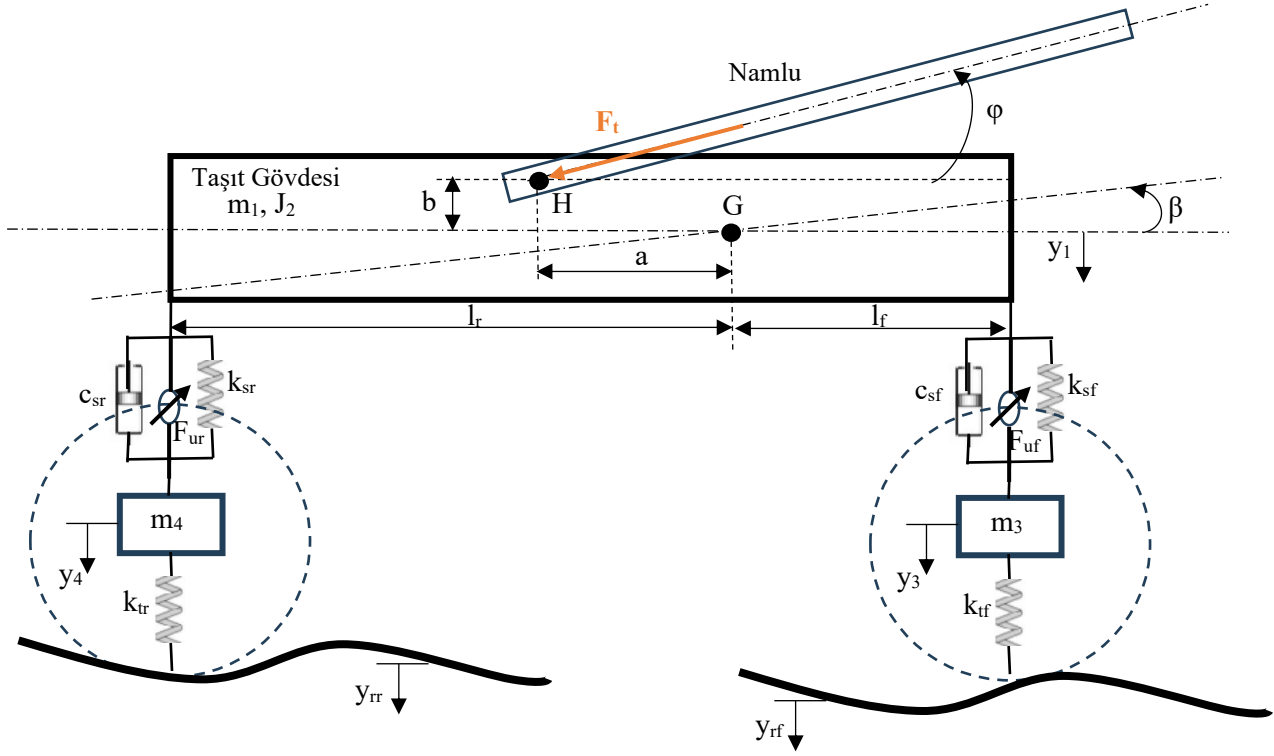
LQR kontrol teorisi kullanılmıştır. Atış kalitesini büyük oranda etkileyen performans taşıt gövdesinin yaptığı açısal titreşim (kafa vurma) hareketidir. Taşıt gövdesinde oluşan küçük bir açısal değişim doğrudan silah namlu açısına eklenmektedir. Onat vd pasif süspansiyonlara sahip bir taşıtın namlu açısındaki küçük bir değişimin silah sisteminin etkili menzili mesafesinde metrelerle ifade edilen atış hatalarına sebep olduğunu göstermişlerdir [8]. Askeri kara taşıtlarında aktif süspansiyon kontrolcüsü tasarımı, pasif süspansiyon sistemlerinin sınırlamalarını aşmak, özellikle atış performansı ve silah stabilizasyonu açısından araç dinamiğini iyileştirmek amacıyla yapılan çalışmalar literatürde seyrek bulunmaktadır. Standart pasif sistemler, ağır silahların geri tepme kuvveti gibi yüksek enerjili dürtü yüklerini yeterince sönmüleyemediği için atış anında gövde salınımı ve nişan hattında sapma gibi olumsuzluklara yol açar; bu nedenle aktif süspansiyon, gerçek zamanlı müdahale kabiliyeti ile öne çıkar. Aktif süspansiyon kontrolü, sensörlerden gelen gövde hız ve konum verilerini kullanarak hidrolik veya elektromekanik eyleyicileri uygun kuvvetler üretmek üzere yönlendirir; bu kapsamda literatürde genellikle LQR (Linear Quadratic Regulator) ve SOF (Static Output Feedback) gibi optimal kontrol stratejileri uygulanmıştır. Örneğin, 8×8 zırhlı muharebe aracı bağlamında yapılan bir çalışmada, LQ tabanlı aktif süspansiyon kontrolörlerinin hem sürüş konforunu hem de kulenin kararlılığını iyileştirdiği gösterilmiş, bu sayede atış ve arazi dinamiği arasındaki etkileşim daha iyi yönetilmiştir [15]. Jeong ve Yim tarafından yapılan bu çalışma askeri taşıt için aktif süspansiyon kontrolcüsü tasarımı kapsamaktadır. Atış kaynaklı titreşimler ve onun sebep olduğu atış hataları üzerinden herhangi bir değerlendirmeyi içermemektedir. Kontrolcü tasarımında başka bir önemli yaklaşım literatürde uyarlamalı kontrol ve gözlemci tabanlı sistemler olarak görülmektedir. Bu yöntemde, sistem modelindeki belirsizlikler ve dış bozucu etkiler (örneğin yol yüzeyinden gelen bozulmalar) gerçek zamanlı olarak tahmin edilip kontrol sinyallerine yansıtılır. Böylece aktif süspansiyon, hem yol koşullarına hem de atış esnasındaki dinamiklere uyum sağlayarak taşıt gövdesinin istenmeyen titreşimlerini bastırır. Bu tür uyarlanabilir denetim yaklaşımlarının etkinliği, aktif sistemlerin pasif modellere kıyasla transmisyon ve gövde davranışlarını daha istikrarlı hale getirdiği sayısal çalışmalarla desteklenmiştir [16]. Ayrıca literatürde, aktif süspansiyon kontrolünde sensör seçimi ve durum tahmini gibi unsurların kontrolcünün başarısı üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır. Sensörlerden elde edilen veriler, gövde ivme, açısal pozisyon ve türevsel nicelikler gibi durum değişkenlerini besler; bu sayede kontrol algoritması, hem düşük frekanslı gövde hareketlerini hem de yüksek frekanslı titreşim bileşenlerini dengelemek üzere uygun kontrol eylemlerini hesaplayabilir. Bazı ileri çalışmalar, klasik PID ya da LQR yaklaşımlarının ötesine geçerek model tahmin kontrollü (MPC) veya robust/ H_∞ kontrol yaklaşımlarını değerlendirmekte olup bu yöntemler özellikle belirsizlikler ve parametre değişimleri altında sistem performansını korumada avantaj sağlar. Bunlar, aktif süspansiyonun hem sürüş konforunu hem de atış kararlılığını optimize eden çok değişkenli kontrol stratejileri sunar [17-19]. Yukarıda anılan çalışmaların hiçbiri seri atış hatası analizlerini içermemektedir. Bu çalışmada, atış hatasına büyük ölçüde sebep olan taşıt gövdesi açısal titreşiminin minimizasyonunu amaçlayan orijinal bir kontrolcü tasarlanmıştır. Önerilen kontrolcünün sentezinde optimal kontrol teorisi kullanılmıştır.

Beş bölümden oluşan bu makale şöyle organize edilmiştir: Bundan sonraki bölümde, dört serbestlik dereceli yarım taşıt modeli elde edilmiştir. Üçüncü bölümde, LQR kontrol teorisi temeline dayanan aktif süspansiyon kontrolcüsünün tasarımı verilmiştir. Dördüncü bölümde, önerilen aktif süspansiyonlu taşıtın atış kalitesi etkinliğini göstermek için yapılan simülasyonların sonuçları verilmiştir. Son bölümde elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Taşıt Modeli

Üzerinde seri atış yapabilen bir top bulunan kara taşıtının yarım taşıt modeli Şekil 1'de verilmektedir. Model dört serbestlik dereceli olarak oluşturulmuştur. Ağırlık merkezi G noktası olan taşıt gövdesi düşey öteleme (y_1) ve açısal kafa vurma hareketi (β) yapabilmektedir. Ön ve arka tekerlek kütleleri sadece düşey yönde hareket (y_3 ve y_4) edebilmektedirler. Çalışmada kullanılan semboller ve açıklamaları Çizelge 1'de verilmektedir. Namlu açısal hareketi (φ) kontrolcü yordamı ile ayarlanmaktadır. Namlu kütlesi taşıt gövdesinin yanında oldukça küçük değerde olması ve taşıtın sadece durağan haldeyken atış yapması

sebebiyle namlu hareketinin beraberinde getirdiği dinamik ihmal edilebilir. Burada namlu hareket milinin yatakladığı nokta H noktasıdır. Dolayısıyla atış kaynaklı geri tepme kuvvetinin (F_t) sisteme etki ettiği nokta bu noktadır.



Şekil 1. Mobil silah platformunun fiziksel modeli.

Şekil 1’de verilen fiziki modele karşılık gelen matematik model birbirine bağlı dört tane ikinci mertebeden diferansiyel denklemden oluşan bir diferansiyel denklem sistemidir. Elde edilen diferansiyel denklemler Denklem 1-4’de verilmektedir.

$$\ddot{y}_1 = \left(\frac{-1}{m_1}\right) [c_{sr}(\dot{y}_1 - \dot{y}_4 + \dot{\beta}l_r) + c_{sf}(\dot{y}_1 - \dot{y}_3 - \dot{\beta}l_f) + k_{sr}(y_1 - y_4 + \beta l_r) + k_{sf}(y_1 - y_3 + \beta l_f) - F_t \sin(\varphi + 180^\circ)] \quad (1)$$

$$\ddot{\beta} = \left(\frac{-1}{J_2}\right) [c_{sr}l_r(\dot{y}_1 - \dot{y}_4 + \dot{\beta}l_r) - c_{sf}l_f(\dot{y}_1 - \dot{y}_3 - \dot{\beta}l_f) + k_{sr}l_r(y_1 - y_4 + \beta l_r) - k_{sf}l_f(y_1 - y_3 + \beta l_f) - bF_t \sin(\varphi + 180^\circ) + aF_t \cos(\varphi + 180^\circ)] \quad (2)$$

$$\ddot{y}_3 = \left(\frac{-1}{m_3}\right) [-c_{sf}(\dot{y}_1 - \dot{y}_3 - \dot{\beta}l_f) - k_{sf}(y_1 - y_3 + \beta l_f) + k_{tf}(y_3 - y_{rf})] \quad (3)$$

$$\ddot{y}_4 = \left(\frac{-1}{m_4}\right) [-c_{sr}(\dot{y}_1 - \dot{y}_4 + \dot{\beta}l_r) - k_{sr}(y_1 - y_4 + \beta l_f) + k_{tr}(y_4 - y_{rr})] \quad (4)$$

Kontrolcü tasarımında optimal kontrol teorisi kullanılacağı için modelin durum değişkeni uzayı formunda ifade edilmesi gerekmektedir. Bunun için Matlab-simulink bilgisayar programı kullanılmıştır. Çizelge 2’de verilen simülasyon parametreleri için, kontrol tasarımında kullanılan modelin durum değişkeni uzayı formuna ait sistem matrisi **A** ve kontrol giriş matrisi **B** ile durum değişkenleri vektörü **x** ve kontrol girişleri vektörü **u** denklem 5-8’de verilmektedir.

Çizelge 1. Semboller listesi

Semboller	Açıklama	Birim
k_{sf}	Ön süspansiyon yay katsayısı	N/m
k_{sr}	Arka süspansiyon yay katsayısı	N/m
k_{tf}	Ön tekerlek rijitliği	N/m
k_{tr}	Arka tekerlek rijitliği	N/m
c_{sf}	Ön süspansiyon sönüm katsayısı	Ns/m
c_{sr}	Arka süspansiyon sönüm katsayısı	Ns/m
m_1	Taşıt gövdesi kütlesi	kg
J_2	Taşıt gövdesi kütleli ataleti	kgm ²
m_3	Ön tekerlek kütlesi	kg
m_4	Arka tekerlek kütlesi	kg
l_f	Ön tekerlek mesafesi	m
l_r	Arka tekerlek mesafesi	m
G	Taşıt gövdesinin ağırlık merkezi	—
H	Atış geri tepme kuvvetinin etkidiği nokta	—
N	Hedef Noktası	—
y_1	Taşıt gövdesinin düşey hareketi	m
φ	Namlu açısı	°
φ_C	Açık çevrim kontrolcünün hesapladığı namlu açısı	°
β	Taşıt gövdesinin kafa vurma hareketi	°
y_3	Ön tekerlek kütlelerinin düşey hareketi	m
y_4	Arka tekerlek kütlelerinin düşey hareketi	m
y_{rf}	Ön yol profili	m
y_{rr}	Arka yol profili	m
F_{uf}	Ön kontrol kuvveti	N
F_{ur}	Arka kontrol kuvveti	N
F_t	Atış kaynaklı tepki kuvveti	N
n	Atış sayısı	adet
E	Mutlak atış hatalarının toplamı	m

Çizelge 2. Simülasyon parametreleri

Semboller	Açıklama	Büyüklik
k_{sf}	Ön süspansiyon yay katsayısı	60 kN/m
k_{sr}	Arka süspansiyon yay katsayısı	60 kN/m
k_{tf}	Ön tekerlek rijitliği	220 kN/m
k_{tr}	Arka tekerlek rijitliği	220 kN/m
c_{sf}	Ön süspansiyon sönüm katsayısı	1 kNs/m
c_{sr}	Arka süspansiyon sönüm katsayısı	1 kNs/m
m_1	Taşıt gövdesi kütlesi	1100 kg
J_2	Taşıt gövdesi kütleli ataleti	700 kgm ²
m_3	Ön tekerlek kütlesi	45 kg
m_4	Arka tekerlek kütlesi	45 kg
l_f	Ön tekerlek mesafesi	1.1 m
l_r	Arka tekerlek mesafesi	1.3 m
a	H'nin G'ye göre düşey konumu	0.2 m
b	H'nin G'ye göre yatay konumu	0.4 m
F_t	Tepki kuvveti genliği	10 kN

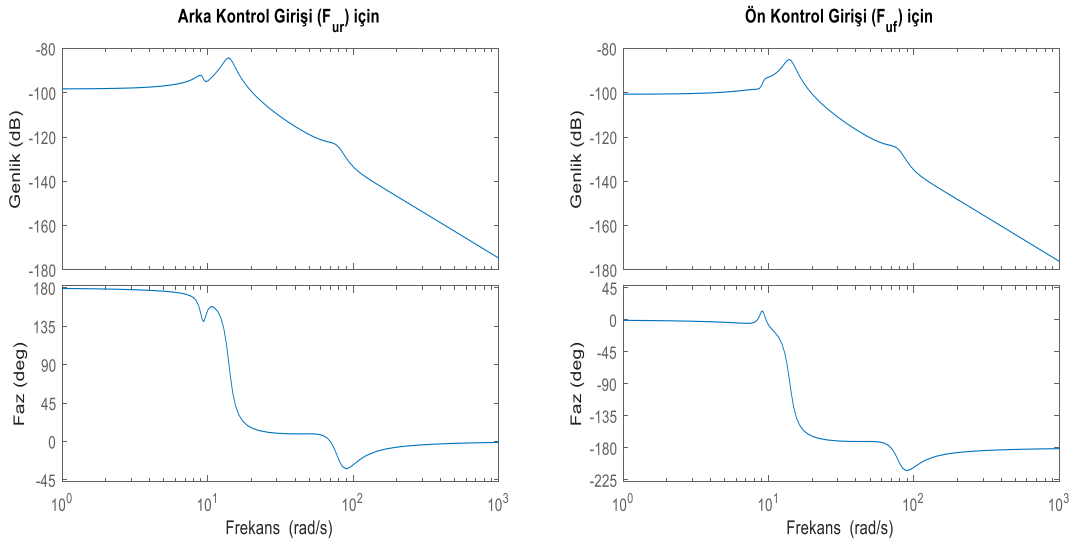
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10.9 & -109 & -1.8 & 0.2 & 54.5 & 0.9 & 54.5 & 0.9 \\ -248.6 & 17.1 & 0.3 & -4.1 & 94.3 & 1.6 & -111.4 & -1.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1466 & 1333 & 22.2 & 24.4 & -6222 & -22.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1733 & 1333 & 22.2 & -28.9 & 0 & 0 & -6222 & -22.2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -0.0009 & -0.0009 \\ 0.0016 & -0.0019 \\ 0 & 0 \\ 0.0222 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.0222 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$x = \begin{bmatrix} y_1 \\ \beta \\ y_3 \\ y_4 \\ \dot{y}_1 \\ \beta \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$u = \begin{bmatrix} f_{ur} \\ f_{uf} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sistemin iki adet eyleyicisi olduğu için kontrolcü girişi sayısı ikidir. Bunun için kontrol giriş matrisi iki sütunlu yapıdadır. Her iki kontrol girişinden taşıt gövdesinin açılma hareketine olan sistem frekans diyagramları Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Sistemin frekans diyagramları

Buradan, her iki giriş için de 10 rad/s frekans civarının rezonans frekansı olduğu görülmektedir. Diğer taraftan bu bölgeyi tümüyle kapsayacak bölgenin 0-18 rad/s frekans aralığındaki bölge olduğu anlaşılmaktadır. Bu diyagramlardan bir başka sonuç da ön kontrol girişinin taşıt gövdesi açılma titreşimini bastırmada daha kritik rol oynadığını göstermesidir. Zira düşük frekans bölgesinde düşük ve düzgün kazanç ile faz davranışının sade ve öngörülebilir olması her zaman bir tercih sebebidir. Arka kontrol girişi de elbette tamamlayıcı bir rol üstlenerek bilhassa bozucu girişlere karşı aktif rol oynar.

3. Kontrolcü Tasarımı

Önerilen kontrolcü iki adımda tasarlanmıştır. İlk adımda optimal kontrol teorisi ile tam durum geri beslemeli kontrolcü katsayıları hesaplanmıştır. Bunun için kullanılan Q ve R matrisleri sırasıyla Denklem 9 ve 10'da verilmektedir. Q matrisi, taşıt gövdesi açılmal yer değiştirmesi ve hızına karşılık gelecek şekilde ağırlıklandırılmıştır. Ardından kontrolcü etkinliğini arttırmak için R matrisindeki kontrolcü parametreleri (1'den başlayarak) sistematik biçimde azaltılarak sonuçta 0.00045 değeri elde edilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.00045 & 0 \\ 0 & 0.00045 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Elde edilen durum uzayı modeli için Denklem 11'de verilen fonksiyoneli minimize eden en uygun kazanç matrisi K , Denklem 12'de verilen Riccati denkleminin çözümü olan S kullanılarak hesaplanır.

$$J(u) = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (11)$$

$$A^T S + S A - [S B] R^{-1} [B^T S] + Q = 0 \quad (12)$$

$u = -Kx$ olmak üzere, tam durum geri beslemeli kontrolcünün kazançlarından oluşan K matrisini veren ifade Denklem 13'de verilmektedir.

$$K = R^{-1} [B^T S] \quad (13)$$

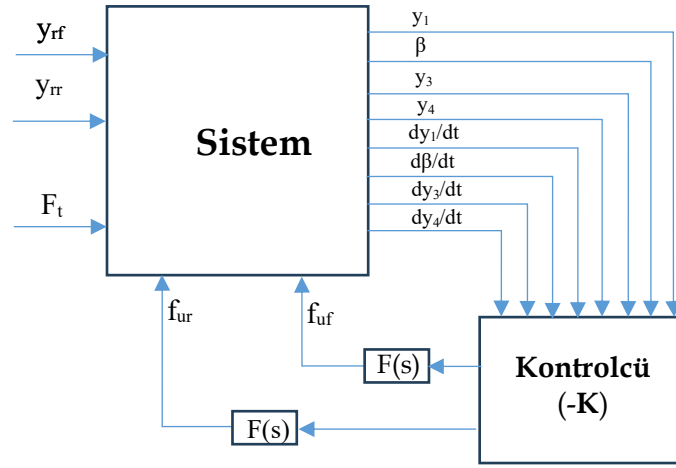
Böylece kontrol tasarımının ilk aşamasında hesaplanan tam durum geri beslemeli kontrolcü katsayıları matrisi Denklem 14'de verildiği gibi elde edilmiştir.

$$K = \begin{bmatrix} 810.7 & 212.9 & -57.9 & 574.9 & -604.4 & 10.7 & 819.1 & -12.5 \\ -420.3 & -287.1 & 43.4 & -642 & 695.6 & -10.9 & -902.5 & 14.8 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Tasarımın son aşamasında taşıt gövdesi titreşimlerinin etkili olduğu frekans bölgesi olan 0-18 rad/s frekans aralığını önceleyen bir filtre tasarlanmıştır. Tasarlanan filtre bu frekans aralığında etkin olan düşük geçiren ikinci dereceden bir filtredir. Filtrenin transfer fonksiyonu (F) Denklem 15'de verilmektedir. Buradaki s Laplace değişkenidir. K_f , filtrenin kalite faktörüdür. K_f değeri, ön tasarım simülasyon çalışması sonucunda $K_f=1$ olarak belirlenmiştir.

$$F(s) = \frac{18^2}{s^2 + \frac{18}{K_f} s + 18^2} \quad (15)$$

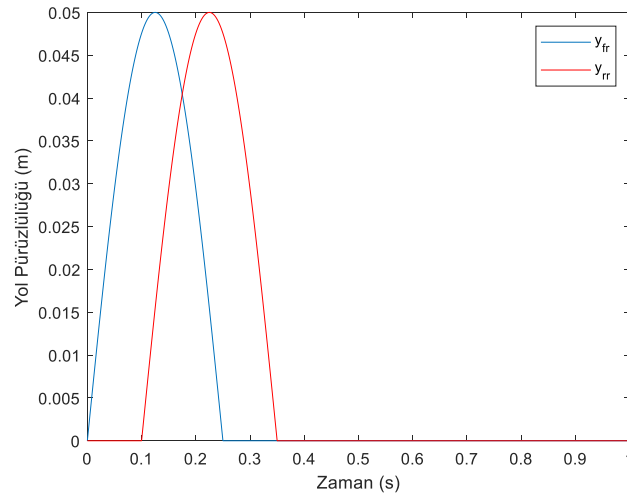
Buna göre önerilen kontrolcülü süspansiyon sisteminin kapalı çevrim şeması Şekil 3'de verilmektedir. Bu tam durum geri beslemeli regülatör bir sistemdir. Ön ve arka tekerin maruz kaldığı yol pürüzlülük fonksiyonları y_{rf} ve y_{rr} sistemin bozucu girişleridir. Diğer bir bozucu giriş de atış kaynaklı geri tepme kuvveti F_t' 'dir. Tepme kuvvetinin yönü namlu açısı ϕ ile ilişkilidir. Sistemin tüm durum değişkenleri (toplam sekiz adet) kontrolcünün girişini teşkil etmektedir. Ön ve arka kontrol girişleri için üretilen LQR kontrol işaretleri tasarlanan filtreden geçirilerek nihai kontrol işaretleri üretilip sisteme kontrol girişi olarak uygulanmaktadır.



Şekil 3. Kapalı çevrim system

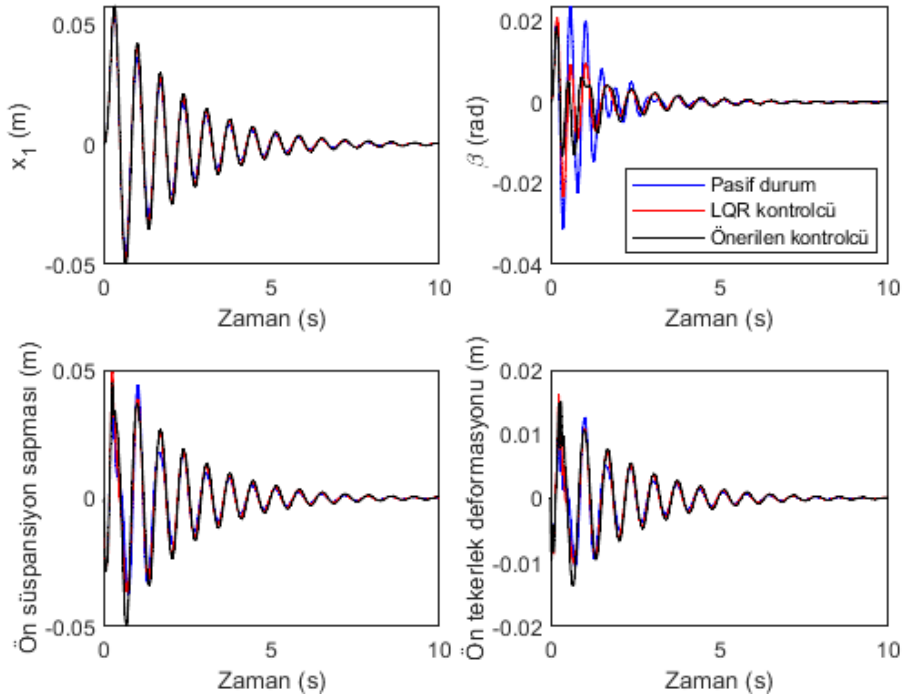
4. Simülasyonlar

Tasarlanan aktif süspansiyon sisteminin etkinliğini test etmek için iki farklı simülasyon seti kullanılmıştır. Bunlardan birincisi yol performansı değerlendirilmesidir. Bu iş için Şekil 4’de verilen yol profilinden taşıt geçirilerek süspansiyon metrikleri ortaya konulmuştur. Karşılaştırma imkânı yaratması bakımından, simülasyonlar üç farklı durum için birlikte yapılmıştır. Bunlar pasif süspansiyon durumu, pür LQR kontrolcülü aktif durum ve önerilen kontrolcülü aktif durumdur.



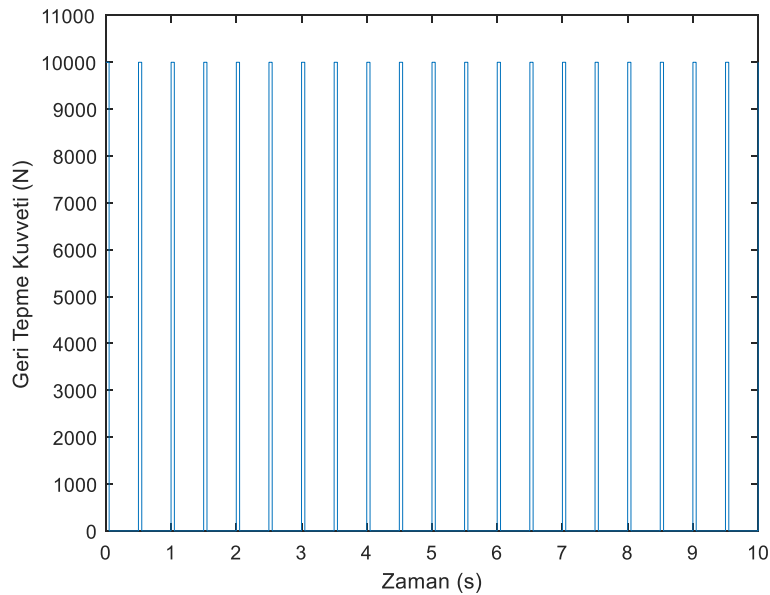
Şekil 4. Yol profili

Bu yol profili beş cm genliğinde sinüzoidal bir kasise işaret etmektedir. Ön ve arka teker arasındaki zaman farkı 0.1 saniye olarak alınmıştır. Taşıtın dingil mesafesinin ($l_f + l_r$) 2.4 metre olduğundan, bu zaman farkı taşıt hızının 24 m/s olarak hesaba katıldığını göstermektedir. Söz konusu yol girişi için süspansiyon sisteminin verdiği cevaplar karşılaştırmalı olarak Şekil 5’de verilmektedir. Tasarlanan kontrolcü taşıt gövdesinin açılma hareketini minimize etmeyi amaçladığından gövdenin düşey titreşimi, süspansiyon sapması ve tekerlek deformasyonu performansları her üç durum için de yaklaşık benzerliktedir. Taşıt gövdesinin açılma titreşiminin maksimum değeri; pasif durumda 0.0312 rad olduğu görülmektedir. Buna karşılık, maksimum açılma hareketin LQR kontrolcülü durumda 0.0235 rad’a ve önerilen kontrolcülü durumda ise 0.0185 rad’a düştüğü görülmektedir. Bu değerler, önerilen kontrolcülü aktif süspansiyonun pasif duruma göre yaklaşık %22 oranında açılma titreşimi bastırıldığına işaret etmektedir.



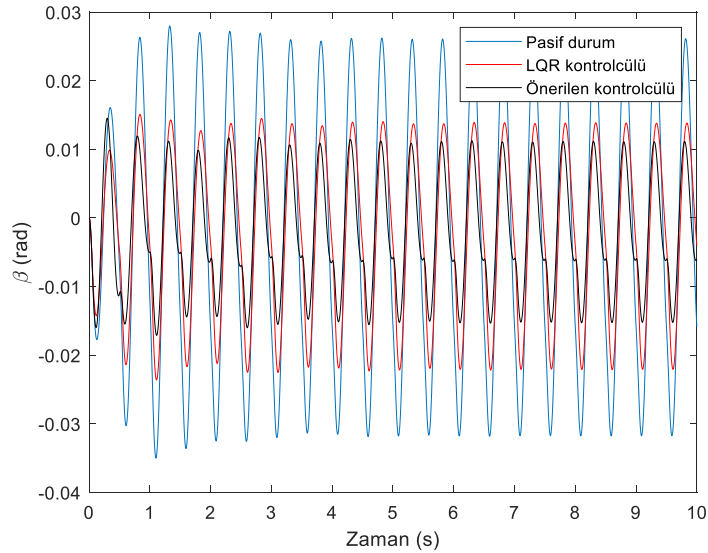
Şekil 5. Süspansiyon performans metrikleri

İkinci simülasyon setinde taşıtın durağan halde olduğu ve namlunun belirli bir açısı için saniyede iki atış yaptığı göz önüne alınmıştır. Bu simülasyon seti önerilen kontrolcülü aktif süspansiyonun atış kalitesine etkisini değerlendirmek için yapılmıştır. Burada namlu açısı $\varphi=45^\circ$ dir. Seri atış modunda taşıt gövdesinin H noktasına etkiyen tepme kuvveti Şekil 6'da verilmektedir. Buradan, tepki kuvvetlerinin 10 kN genlikli darbe fonksiyonu olarak hesaba katıldığı görülmektedir.



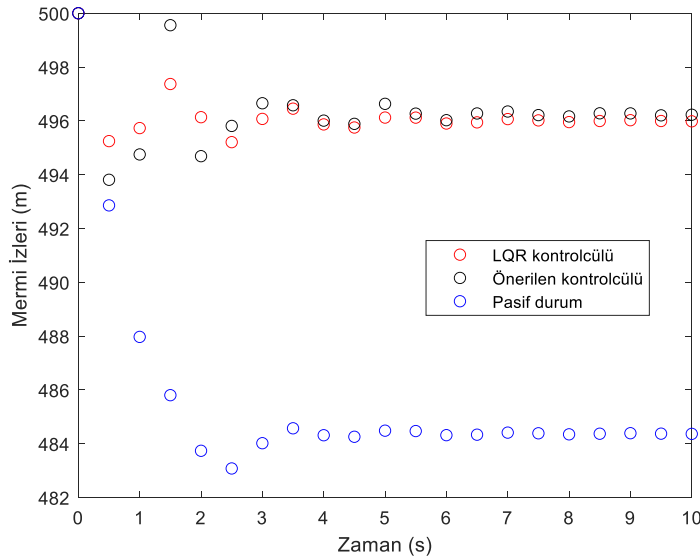
Şekil 6. Farklı atış modlarında taşıt gövdesine etkiyen geri tepme kuvveti

Atış süresince geri tepme kuvvetine bağlı olarak taşıt gövdesinde oluşan açısız titreşimler namlu açısına hata olarak eklenmektedir. Bu durum atış hatasına sebep olmaktadır. Bu simülasyon setinde taşıtın atış esnasında durduğu dolayısıyla ilk atışın hatasız olduğu göz önüne alınmıştır. Şekil 7'de birinci ve ikinci atış modlarında üç farklı durum için taşıt gövdesi açısız titreşimleri verilmektedir.



Şekil 7. Seri atış modunda taşıt gövdesinin açısıl titreşimi

Buradan, maksimum açısıl gövde titreşiminin 0.035 rad olduğu görülmektedir. Buna karşılık LQR kontrolcüsü durumunda 0.024 rad ve önerilen kontrolcüsü durumunda 0.017 rad değerleri elde edilmiştir. Buna göre önerilen kontrolcü taşıt gövdesinin açısıl titreşimlerini pasif duruma göre %51 oranında azaltmayı başarmıştır. Şekil 8'de atış anlarındaki taşıt gövdesi titreşimlerinin namlu açısını saptırması ile elde edilen mermi izleri verilmektedir. Taşıt durağan halde atışa başladığından serinin ilk atışının tam doğrulukta olacağı aşikârdır. Buradan beklendiği gibi önerilen kontrolcü 500 metrelik irtifaya ayarlanmış ilk atışa tüm atış süresince daha yakın kalmayı başardığı görülmektedir.



Şekil 8. Seri atış modunda atış performansı

5. Sonuç

Üzerinde seri atış yapabilen bir silah taşıyan askeri taşıtlarda atış kalitesi geri tepme kuvvetine bağlı olarak ortaya çıkan taşıt gövdesi açısıl titreşiminden doğrudan etkilenir. Zira açısıl titreşim namlunun nişan açısına doğrudan hata olarak yansır. Bu çalışmada sadece atış kalitesine odaklanan bir kontrolcü tasarlanmıştır. Kontrolcü optimal kontrol teorisi kullanılarak elde edilen LQR kontrol sinyallerinin gövde titreşimi frekans aralığında çalışan bir filtreden geçirilmesi ile tasarlanmıştır. Pasif süspansiyon sistemi ile karşılaştırmalı biçimde yapılan simülasyonlar önerilen kontrolcü ile oluşturulacak aktif süspansiyonun atış kalitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Katkı Beyanı

Modellerin kurulması, kontrolcü tasarımları, verilerin analizi ve bulguların yorumlanması: Cem Onat, Literatür taraması, simülasyonların yapılması ve verilerin toplanması: Erhan Yılmaz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] Wang, J, Wang, X, Wang, Q, Ni, T, Zhang, L, Zhang, H. Low-complexity prescribed performance control of hydraulic active suspension systems for intelligent vehicles, *Control Engineering Practice*, 2026; 167: 1-13
- [2] Machowska, D, Nowakowski, A. Advancing active vehicle suspension control: a differential game approach with time-varying delays, *European Journal of Control*, 2026; 88: 1-16
- [3] Nguyen, TA. Research on the Sliding Mode-PID control algorithm tuned by fuzzy method for vehicle active suspension, *Forces in Mechanics*, 2023; 11: 1-8
- [4] Onat, C, Daskin M, Aktif süspansiyon sistemleri için bir elektro-hidrolik eyleyicinin kazanç programlamalı PI kontrolü, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 2018; 9(1): 195-203
- [5] Onat, C, Yüksek İ, Sivrioğlu S, Bir aktif süspansiyon sistemi için H_∞ control timeline dayalı doğrusal olmayan kontrolcü tasarımı, *Mühendis ve Makine*, 2006; 47: 36-43
- [6] Pham, TP, Sename, O, Duong-Thi, TH. PID LPV observer for a semi-active suspension system, *IFAC-PapersOnLine*, 2025; 59: 73-78
- [7] El Majdoub, K, Ammari, O, Giri, F. Adaptive Backstepping Control Design for Semi-Active Suspension of Full Vehicle with Magnetorheological Damper, *Franklin Open*, 2025; 12: 1-18
- [8] Mahmoodabadi, MJ, Nejadkourki, N, Ibrahim, MY. Optimal fuzzy robust state feedback control for a five DOF active suspension system, *Results in Control and Optimization*, 2024; 17: 1-14
- [9] Wu, L, Zheng, B, Zhang, W, Youn, I, Jia, W. Nonlinear attitude tracking control for four-wheel-leg-vehicle with series active suspension, *Journal of the Franklin Institute*, 2024; 361: 1-18
- [10] Onat, C, Topçuoğlu, B, Arda, U, Aktemur, M. Bir mobil silah platformunda süspansiyon sisteminin atış kalitesine etkisinin değerlendirilmesi, *Mühendis ve Makina*, 2024; 715: 341-359
- [11] Ülbegü, T, Seker, S, Erenler, Y. UH-60 Black Hawk Helikopterinın Üç Boyutlu Kokpit Ve Uçuş Simülasyonu, *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 2003; 1: 31-36
- [12] Cakir, MF, Sezer, S, Bayraktar, M. Modeling and simulation of elevation dynamics of main battle tank weapon system with linear graph method, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2024; 49: 11157-11166
- [13] Demir, C. The Vibration Analysis of a Six Wheeled Vehicle, *Sigma*, 2004; 3:129-143
- [14] Wang, Y, Yuan, S, Wang, X, Yang, G. Nonlinear Robust Control of Vehicle Stabilization System with Uncertainty Based on Neural Network, *Electronics*, 2024; 13: 1-26
- [15] Jeong, Y, Yim, S. Design of Active Suspension Controllers for 8× 8 Armored Combat Vehicles, *Machines*, 2024; 12: 1-20
- [16] Kararsız, G, Baştürk, H. Aktif süspansiyon sistemleri için bilinmeyen bozucu etkisi altında uyarlamalı kontrolcü tasarımı, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2018; 24: 1403-1408
- [17] Onat, C, Kucukdemiral, IB, Sivrioğlu, S, Yuksek, I. LPV model based gain-scheduling controller for a full vehicle active suspension system, *Journal of Vibration and Control*, 2007; 13: 1629-1666
- [18] Onat, C, Kucukdemiral, IB, Sivrioğlu, S, Yuksek, I, Cansever, G. LPV gain-scheduling controller design for a non-linear quarter-vehicle active suspension system, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2009; 31: 71-95
- [19] Yagiz, N, Yuksek, I. Sliding mode control of active suspensions for a full vehicle model, *International Journal of Vehicle Design*, 2001; 26: 264-276