



BİR MOBİL SİLAH PLATFORMUNDA SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN ATIŞ KALİTESİNE ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Cem ONAT^{1*}, Berk TOPÇUOĞLU², Umut ARDA³, Mustafa AKTEMUR⁴

¹ Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adıyaman
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-4295-4860>

² HEMA Endüstri A.Ş. ARGE Merkezi, Gazi Osman Paşa Mah., 4. Cad., No:5, Çerkezköy/
Tekirdağ, ORCID No : <http://orcid.org/0009-0002-1514-0914>

³ HEMA Endüstri A.Ş. ARGE Merkezi, Gazi Osman Paşa Mah., 4. Cad., No:5, Çerkezköy/
Tekirdağ, ORCID No : <http://orcid.org/0009-0009-1164-5414>

⁴ HEMA Endüstri A.Ş. ARGE Merkezi, Gazi Osman Paşa Mah., 4. Cad., No:5, 59500, Çerkezköy/
Tekirdağ, ORCID No : <http://orcid.org/0009-0009-2025-2479>

Anahtar Kelimeler

Öz

*Süspansiyon sistemi,
titreşim, tam taşıt
modeli, doğrusal
olmayan model*

Bu çalışmada, üzerinde seri atış yapabilen bir silah taşıyan 6X6 silah platformunda süspansiyon sisteminin atış kalitesine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, gövdesine rijit olarak bağlanmış bir silah bulunan askeri aracın atış sırasında oluşan geri tepme kuvvetlerini de kapsayan dokuz serbestlik dereceli tam taşıt modeli kurulmuştur. Operasyon sırasında cephane ve yakıt tüketimine bağlı olarak aracın kütle değerinin ve ağırlık merkezinin yerinin değişmesi modelde hesaba katılmıştır. Farklı atış senaryolarında yapılan simülasyonlar ile birim zamanda yapılabilecek maksimum atış sayısı tespit edilmiştir.

* conat@adiyaman.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1422802

EVALUATION ON THE EFFECT OF SUSPENSION SYSTEM TO POINTING QUALITY IN A MOBİL WEAPON PLATFORM

Keywords

Suspension system, vibration, full car model, nonlinear modelling

Abstract

In this study, the effect of the suspension system on the shooting quality of the 6X6 gun platform carrying a gun has been examined. For this purpose, a nine-degree-of-freedom full vehicle model was established, which also includes the recoil forces that occur during firing of a military vehicle with a cannon rigidly attached to its body. The change in mass value and center of gravity of the vehicle due to ammunition and fuel consumption during operation is taken into account in the model. The maximum number of shots that can be fired per unit time was determined through simulations made in different shooting scenarios.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 20.01.2024

Kabul Tarihi : 26.03.2024

Research Article

Submission Date : 20.01.2024

Accepted Date : 26.03.2024

Extended Abstract

It is no doubt, vehicles with a good suspension system provide superior performance in different road and operating conditions. Suspension systems in civilian vehicles are designed to offer an appropriate trade-off between roadholding and comfort performance indicators. In addition to these two main performances, the suspension deflection performance indicator, which is a constructive constraint, is another indicator that should be taken into consideration by engineers. In military vehicles intended for personnel-material transfer, comfort performance is ignored and designs focused on handling performance are in question. However, if there is a weapon system on the body of the military vehicle, the suspension system must be designed by taking into account the vehicle body vibrations. Even if the vehicle is stationary, the recoil forces resulting from the shots will cause vibrations in the vehicle body. The resulting body vibrations will also negatively affect the rapid shooting quality.

In this study, the suspension system of a 6x6 unmanned ground vehicle carrying a rapid-firing weapon system on its body was designed. This study differs from the 6x6 full vehicle model previously examined in the literature in two different aspects. First, a model based on fuel and ammunition consumption was used. The second is to integrate the recoil force and related reaction moments during firing of the weapon system into the model and examine the effect of the suspension system on the shooting quality.

The weapon system can move around the vertical axis in the range of $[0^\circ 360^\circ]$ and around the horizontal axis in the range of $[-20^\circ 40^\circ]$. In the study, firstly, a full vehicle model with nine degrees of freedom was established. In the model, the body mass, mass moments of inertia and the change in the center of gravity of the vehicle when fuel and ammunition are fully loaded and empty are taken into account. The recoil force resulting from gun shots and the resulting reaction moments are also taken into account in the model.

The system model was built on the physical model created by considering that each wheel-axle assembly moves only vertically, and the vehicle body makes a total of three movements: vertical, heading and yawing. Nine interconnected differential equations forming the system model were solved with the analysis block created in the Matlab-Simulink environment. Simulations were made in two different categories. In the first category of simulations, the vehicle was passed through a sinusoidal bump. Thus, the performance of the suspension system is demonstrated. In the second category of simulations, the shooting error due to the recoil force of the weapon system in different firing situations was revealed. Suspension performance is revealed through the vertical displacement of the vehicle body (x_1), suspension deflection of the front right wheel (sd_1) and wheel deformation (td_1). Accordingly, the bump road response of the vehicle in empty condition is given in Figure 3.

There is no lower limit for the shooting period. The operator can set the firing period any way below the upper limit. The reaction force resulting from each shot is 10 kN and the reaction time is 0.1 s. The situations to be used in the simulation set are given in Table 3. Accordingly, this simulation category will consist of a total of 36 simulation sets. Numbering of the simulation sets was done using row and column numbers, respectively.

The main factor that will determine the quality of the shot will be the vehicle body vibrations that will occur due to the recoil force during the shots. For this purpose, considering simulation sets 22 and 34 will be sufficient for the purpose of the study. The body vibrations in simulation set number 22 are given in Figure 7. In this case, since the barrel is in the direction of vehicle advancement, the recoil force does not cause wobbling. In this respect, the $\gamma=180^\circ$ position is a suitable position for aiming quality. However, head impact vibrations adversely affect the aiming quality and cause errors.

As a result of the study, the shooting quality capacity of the vehicle in 36 different situations was revealed. Accordingly, the shooting quality is completely dependable depending on the suspension system. Moreover, and more importantly, the error can be predicted through the suspension system model in response to the number of shots per unit time parameter. Aiming assistant systems can be developed for this purpose. Another conclusion from the article is that in order to achieve a full hit from the current platform, a shot must be fired every 4 seconds at most. Systems that aim at moving targets may be studied in future studies.

1. Giriş

Şüphesiz ki iyi bir süspansiyon sistemine sahip taşıtlar farklı yol ve işletme şartlarında üstün performans sağlarlar. Şimdiye kadar pasif, yarı-aktif ve aktif süspansiyon sistemleri için birçok tasarım ve uygulama çalışması yapılmıştır (Ozbek, Burkan ve Yagiz 2020; Yagiz, 2004). Bu çalışmalar aktif ya da yarı-aktif kontrol mimarisi için kontrolcü tasarımına yöneliktir ve taşıt titreşimlerinin etüdüne yönelik araştırmacılar için oldukça kıymetlidir. Sivil amaçlı taşıtlarda süspansiyon sistemi yol tutuş ve konfor performans göstergeleri arasında uygun bir ödünleşme sunacak şekilde tasarlanırlar (Onat, Küçükdemiral, Sivrioğlu ve Yüksek, 2007; Onat, Küçükdemiral, Sivrioğlu, Yüksek ve Cansever, 2009; Ping, Wang ve Zhang, 2018). Bu iki ana performansın yanında konstrüktif bir kısıt olan süspansiyon sapması performans göstergesi de yine mühendisler için göz önüne alınması gereken bir başka göstergedir (Nguyen ve Nguyen, 2023). Personel-malzeme intikali amaçlı askeri araçlarda konfor performansı göz ardı edilerek yol tutuş performansı odaklı tasarımlar söz konusu olmaktadır (Demir, 2003). Ancak askeri aracın gövdesi üzerinde bir silah sistemi mevcutsa taşıt gövde titreşimlerinin de mutlaka göz önüne alınarak süspansiyon sisteminin tasarlanması gerekir. Zira taşıt duruyor olsa bile atışlardan kaynaklanan geri tepme kuvvetleri taşıt gövdesinde titreşimlere sebep olacaktır. Oluşan gövde titreşimleri de seri atış kalitesini olumsuz yönde etkileyecektir.

Bu çalışmada, gövdesi üzerinde seri atış yapabilen bir silah sistemi taşıyan 6x6 mobil silah platformunun süspansiyon sistemi tasarlanmıştır. Demir, taşıtın seyir ve atış durumlarındaki dinamik ve gerilme analizleri teorik ve deneysel olarak yapmıştır (Demir, 2003). Ancak ele alınan askeri taşıt havan topu taşıdığından herhangi bir şekilde atış kalitesine ilişkin hesaba yer verilmemiştir. Zira havan topu seri atış yapmaz ve kaba olarak hedef gözetir. Seri atış yapabilen ve havan topuna göre oldukça düşük çaplı silahlarda iyi bir nişan kalitesi beklenir. Literatürde daha önce incelenmiş 6x6 tam taşıt modelinden üç farklı hususta bu çalışma ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi yakıt ve cephane tüketimine bağlı bir model kullanılmıştır. İkincisi, taşıt üzerinde seri halde atış yapabilen silah sistemi taşımaktadır. Sonuncusu ise silah sisteminin atışı sırasında geri tepme kuvveti ve buna bağlı tepki momentlerinin de modele entegre edilmesi ve süspansiyon sisteminin atış kalitesine etkisinin incelenmesidir.

Silah sistemi düşey eksen etrafında $[0^\circ \ 360^\circ]$, yatay eksen etrafında $[-20^\circ \ 40^\circ]$ aralığında hareket edebilmektedir. Çalışmada, ilk olarak, dokuz serbestlik dereceli tam taşıt modeli kurulmuştur. Modelde taşıtın yakıt ve cephane tam dolu ve boş durumlarındaki gövde kütlesi, kütleli atalet momentleri ve ağırlık merkezinin değişimi hesaba katılmıştır. Silah atışlarından kaynaklı geri tepme kuvveti ve buna bağlı ortaya çıkan tepki momentleri de modelde göz önüne alınmıştır.

l_1	Sol tekerlek izine ağırlık merkezinin dik uzaklığı
l_2	Sağ tekerlek izine ağırlık merkezinin dik uzaklığı
l_f	Ön aksın ağırlık merkezine dik uzaklığı
l_r	Arka aksın ağırlık merkezine dik uzaklığı
l_m	Orta aksın ağırlık merkezine dik uzaklığı
θ	Silah namlusunun yere göre açısı $[-20^\circ + 40^\circ]$
γ	Silah namlusunun tarama açısı $[0^\circ 360^\circ]$
r_x, r_y, r_z	Tepki noktasının taşıt gövdesi ağırlık merkezine göre yer vektörünün bileşenleri
T_A	Atış periyodu
L_A	Etkili menzil
E_A	Atış hatası

Altı adet tekerlek-aks sistemi düşey hareketi ve üç adet de gövde hareketi olmak üzere sistem dokuz serbestlik derecelidir. Sistemin diferansiyel denklemleri D'Alembert prensibi ile elde edilmiştir ve Denklem 1-9'da verilmektedirler. Değişkenlerin üzerindeki her bir noktanın zamana göre bir türevi ifade ettiğine dikkat ediniz.

$$\begin{aligned}
& m_1 \ddot{x}_1 + k_2(x_1 + l_f \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_5) + c_2(\dot{x}_1 + l_f \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_5) + \\
& k_4(x_1 + l_m \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_7) + c_4(\dot{x}_1 + l_m \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_7) + \\
& k_6(x_1 - l_r \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_9) + c_6(\dot{x}_1 - l_r \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_9) + \\
& k_1(x_1 + l_f \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_4) + c_1(\dot{x}_1 + l_f \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_4) + \\
& k_3(x_1 + l_m \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_6) + c_3(\dot{x}_1 + l_m \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_6) + \\
& k_5(x_1 - l_r \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_8) + c_5(\dot{x}_1 - l_r \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_8) + F_{ly} = 0
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
& J_2 \ddot{\beta} + l_f k_2(x_1 + l_f \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_5) + l_f c_2(\dot{x}_1 + l_f \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_5) + \\
& l_m k_4(x_1 + l_m \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_7) + l_m c_4(\dot{x}_1 + l_m \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_7) - \\
& l_r k_6(x_1 - l_r \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_9) - l_r c_6(\dot{x}_1 - l_r \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_9) + l_f k_1 \\
& (x_1 + l_f \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_4) + l_f c_1(\dot{x}_1 + l_f \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_4) + l_m k_3 \\
& (x_1 + l_m \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_6) + l_m c_3(\dot{x}_1 + l_m \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_6) - \\
& l_r k_5(x_1 - l_r \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_8) - l_r c_5(\dot{x}_1 - l_r \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_8) + M_{tz} = 0
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 & J_3 \ddot{\alpha} + l_2 k_2 (x_1 + l_f \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_5) + l_2 c_2 (\dot{x}_1 + l_f \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_5) + \\
 & l_2 k_4 (x_1 + l_m \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_7) + l_2 c_4 (\dot{x}_1 + l_m \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_7) + \\
 & l_2 k_6 (x_1 - l_r \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_9) + l_2 c_6 (\dot{x}_1 - l_r \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_9) - \\
 & l_1 k_1 (x_1 + l_f \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_4) - l_1 c_1 (\dot{x}_1 + l_f \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_4) - \\
 & l_1 k_3 (x_1 + l_m \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_6) - l_1 c_3 (\dot{x}_1 + l_m \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_6) - \\
 & l_1 k_5 (x_1 - l_r \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_8) - l_1 c_5 (\dot{x}_1 - l_r \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_8) + M_{tx} = 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 & m_4 \ddot{x}_4 - k_1 (x_1 + l_f \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_4) - \\
 & c_1 (\dot{x}_1 + l_f \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_4) + k_7 (x_4 - x_{r1}) = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 & m_5 \ddot{x}_5 - k_2 (x_1 + l_f \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_5) - \\
 & c_2 (\dot{x}_1 + l_f \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_5) + k_8 (x_5 - x_{r11}) = 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 & m_6 \ddot{x}_6 - k_3 (x_1 + l_m \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_6) - \\
 & c_3 (\dot{x}_1 + l_m \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_6) + k_9 (x_6 - x_{r2}) = 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 & m_7 \ddot{x}_7 - k_4 (x_1 + l_m \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_7) - c_4 \\
 & (\dot{x}_1 + l_m \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_7) + k_{10} (x_7 - x_{r22}) = 0
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 & m_8 \ddot{x}_8 - k_5 (x_1 - l_r \sin(\beta) - l_1 \sin(\alpha) - x_8) - c_5 \\
 & (\dot{x}_1 - l_r \dot{\beta} \cos(\beta) - l_1 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_8) + k_{11} (x_8 - x_{r3}) = 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 & m_9 \ddot{x}_9 - k_6 (x_1 - l_r \sin(\beta) + l_2 \sin(\alpha) - x_9) - \\
 & c_6 (\dot{x}_1 - l_r \dot{\beta} \cos(\beta) + l_2 \dot{\alpha} \cos(\alpha) - \dot{x}_9) + k_{12} (x_9 - x_{r33}) = 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

Silah atışlarından kaynaklanan tepki kuvveti (F_t) bileşenlerinin silah sisteminin iki adet konum parametresine bağlı olarak ifadeleri Denklem 10-12' de verilmektedir.

$$F_{ty} = -|\vec{F}_t| \sin(\theta) \tag{10}$$

$$F_{tx} = |\vec{F}_t| \cos(\theta) \cos(\gamma) \tag{11}$$

$$F_{tz} = -|\vec{F}_t| \cos(\theta) \sin(\gamma) \tag{12}$$

Tepki kuvvetinin uygulama noktasının gövde ağırlık merkezine göre konumunu gösteren yer vektörünün bileşenleri r_x , r_y ve r_z olmak üzere tepki kuvvetinin taşıt gövdesi ağırlık merkezinde oluşturduğu moment ifadesi Denklem 13'de verildiği gibi olacaktır.

$$\vec{M}_t = (r_y F_{tz} - r_z F_{ty})\vec{i} + (r_z F_{tx} - r_x F_{tz})\vec{j} + (r_x F_{ty} - r_y F_{tx})\vec{k} \quad (13)$$

Buradan M_t tepki momentinin bileşenleri denklem 14-16'da verilmektedir.

$$M_{tx} = r_y F_{tz} - r_z F_{ty} \quad (14)$$

$$M_{ty} = r_z F_{tx} - r_x F_{tz} \quad (15)$$

$$M_{tz} = r_x F_{ty} - r_y F_{tx} \quad (16)$$

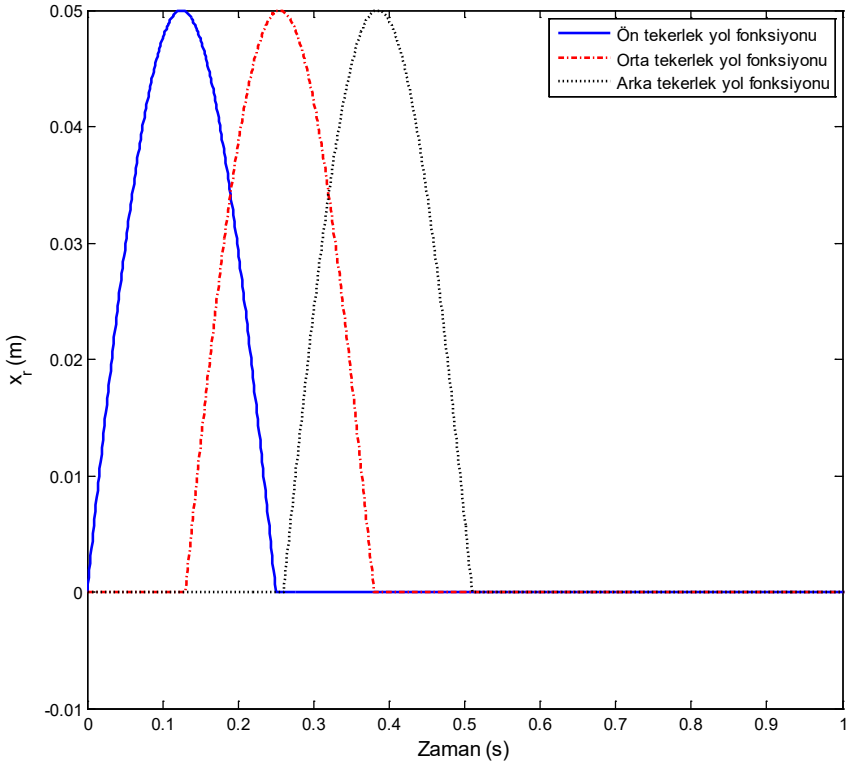
3. Simülasyonlar

Sistem modelini oluşturan birbirine bağlı dokuz adet diferansiyel denklem Matlab-Simulink ortamında oluşturulan analiz bloğu ile çözülmüştür. Analiz bloğunda, çözümler değişken adım aralığında ODE45 çözücüsüyle gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar iki farklı kategoride yapılmıştır. Birinci kategoride, taşıt süspansiyon sisteminin genel performansını değerlendirmek için Şekil 2'de verilen 5 cm genişliğinde sinüzoidal formda bir kasis üzerinden boş ve dolu durumlarında geçirilmiştir. Bu simülasyon kategorisinde askeri taşıt atış halinde değildir. Simülasyon parametreleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Simülasyon Parametreleri

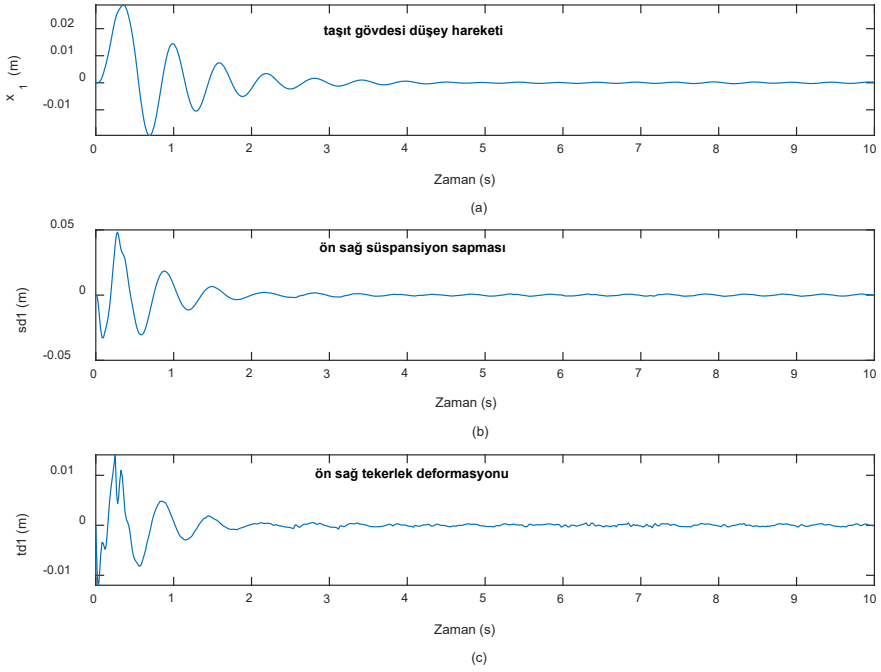
Parametre	Boş durum	Dolu durum
m_1	2041,2 kg	2494,8 kg
J_2	2165,18 kgm ²	2646 kgm ²
J_3	493,67 kgm ²	603,29 kgm ²
$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$	45,36 kN/m	45,36 kN/m
$k_7, k_8, k_9, k_{10}, k_{11}, k_{12}$	189 kN/m	189 kN/m
$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$	1890 Ns/m	1360,8 Ns/m
l_1	0,71 m	0,78 m
l_2	0,71 m	0,64m

l_f	0,94 m	0,85 m
l_r	1,03m	1,12 m
l_m	0,45 m	0,36 m
r_x	0,25 m	0,3 m
r_y	0,81 m	0,83 m
r_z	0,0 m	0,0 m
L_A	500 m	500 m



Şekil 2. Yol Fonksiyonu

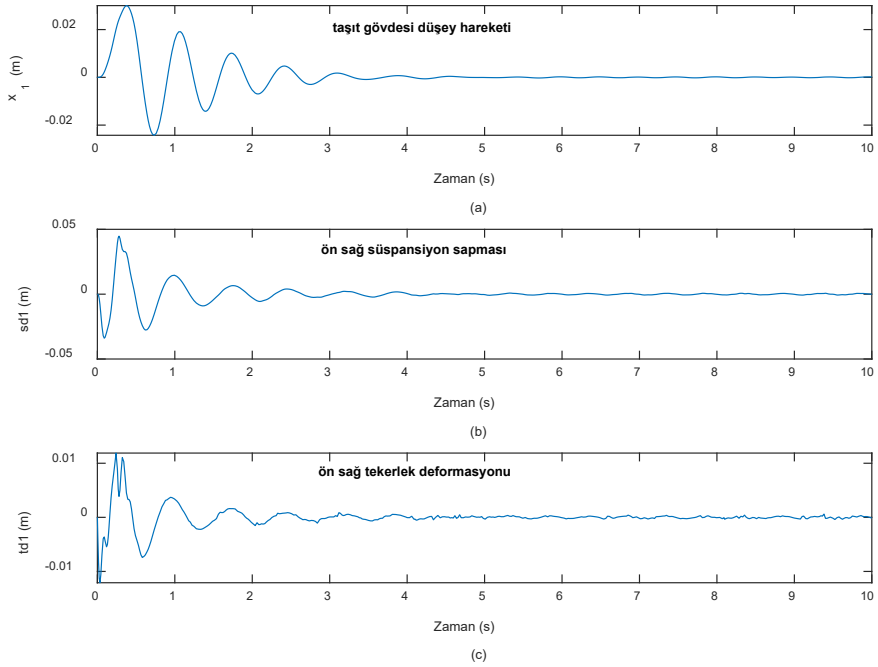
Süspansiyon performansı, taşıt gövdesinin düşey deplasmanı (x_1) ön sağ tekerleğin süspansiyon sapması (sd_1) ve tekerlek deformasyonu (td_1) göstergeleri üzerinden ortaya konulmuştur. Buna göre taşıtın boş durumdaki kasis yol cevabı Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Boş Durumda Kasis Yol Performansları (a) Gövde Düşey Hareketi, (b) Süspansiyon Sapması, (c) Tekerlek Deformasyonu

Şekil 3 (a)'dan, taşıt gövdesinin en fazla 2,7 cm hareket edip 4 saniye içinde titreşimli hareketinin sönümlendiği görülmektedir. Şekil 3 (b)'den, süspansiyon sapmasının maksimum değerinin 4,6 cm olduğu görülmektedir. Ortalama bir süspansiyon stroğunun ± 8 cm olduğu düşünüldüğünde süspansiyon sapması makul değer aralığında kalmıştır. Şekil 3 (c)'de ise ön sağ tekerleğin deformasyonu verilmektedir. Tekerlek maksimum deformasyonunun 1,4 cm olduğu görülmektedir. Tekerleğin 1,4 cm'lik deformasyonu da yol ile temasının kesilmediğine işaret etmektedir.

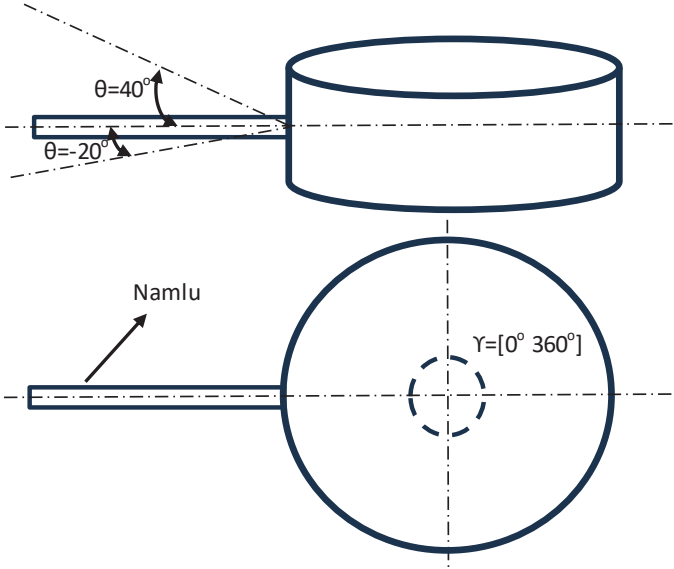
Şekil 4'de taşıtın tam dolu durumunda kasisli yol cevabı verilmektedir.



Şekil 4. Dolu Durumda Kasis Yol Performansları (a) Gövde Düşey Hareketi, (b) Süspansiyon Sapması, (c) Tekerlek Deformasyonu

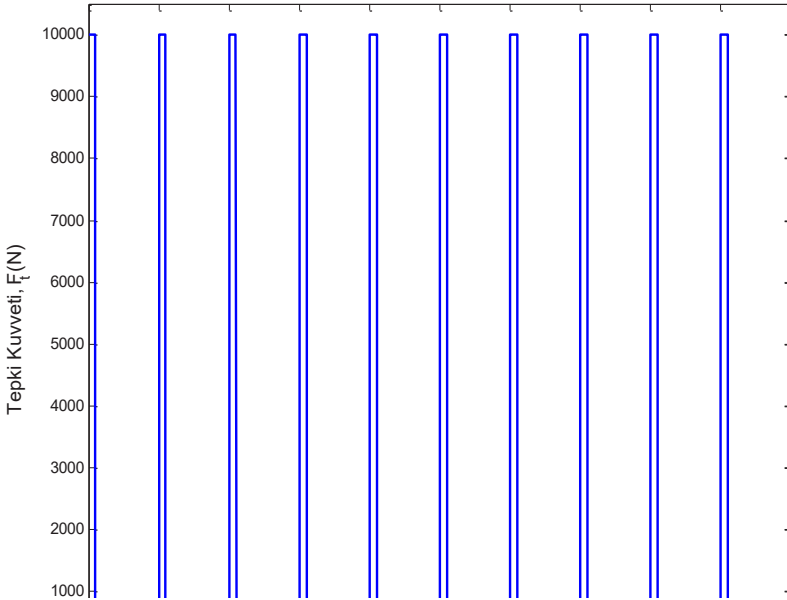
Şekil 4 (a)'dan, taşıtın tam dolu durumunda, 5 cm'lik kasisten geçerken taşıt gövdesinin en fazla 2,9 cm hareket edip 4,2 saniye içinde titreşimli hareketinin sönümlendiği görülmektedir. Şekil 4 (b)'de, ön sağ süspansiyon sapması verilmektedir. Buradan, süspansiyon sapması maksimum değerinin 4,3 cm olduğu görülmektedir. Şekil 4 (c)'den, tekerlek deformasyonunun maksimum değerinin 1,4 cm olduğu görülmektedir. Söz konusu performanslar boş durumdakine yakın değerlerdedir. Ancak gövde titreşiminin boş duruma göre kötüleştiği görülmektedir.

İkinci kategori simülasyonlarda ise taşıt durağan halde atış yapmaktadır. Şekil 5'de silah sisteminin şematik üst ve yan görünüşü verilmektedir. Simülasyonlar sistemin altı farklı pozisyonunda üç farklı atış periyodu (T_A) için boş ve dolu durumlarında yapılmıştır.



Şekil 5. Silah Sisteminin Genel Görünüşü

Atışlar seri halde en fazla saniyede iki tane olmaktadır. Şekil 6'da saniyede bir atış durumunda oluşan tepki kuvveti gösterilmektedir.



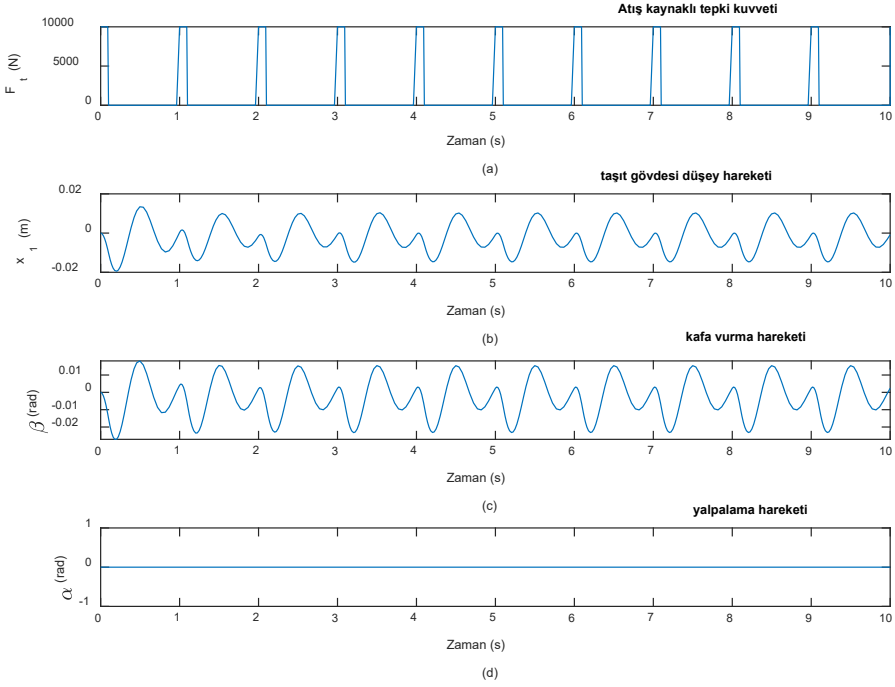
Şekil 6. 1 Atış/s Periyodu İçin Tepki Kuvveti

Atış periyodunun alt sınırı bulunmamaktadır. Operatör atış periyodunu üst sınırın altında herhangi bir şekilde belirleyebilmektedir. Her bir atıştan kaynaklı tepki kuvveti 10 kN'dır ve tepkinin süresi 0,1 s'dir. Simülasyon setinde kullanılacak durumlar Tablo 3'de verilmektedir. Buna göre bu simülasyon kategorisi toplam 36 simülasyon setinden oluşacaktır. Simülasyon setlerinin numaralandırılması sırasıyla satır ve sütun numaraları kullanılarak yapılmıştır. Örneğin 34 numaralı simülasyon seti 3. satır, 4. sütundaki namı pozisyonu ($\theta=-20^\circ$ $Y=225^\circ$), atış periyodu ($T_A=1$ Atış/s) ve yükleme durumunu (dolu) göstermektedir.

Tablo 3. Atış Kalitesi Simülasyon Seti

	1	2	3	4	5	6
1	$\theta=-20^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Boş durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Boş durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Boş durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Dolu durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Dolu durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Dolu durum
2	$\theta=40^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Boş durum	$\theta=40^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Boş durum	$\theta=40^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Boş durum	$\theta=40^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Dolu durum	$\theta=40^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Dolu durum	$\theta=40^\circ$ $Y=180^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Dolu durum
3	$\theta=-20^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Boş durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Boş durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Boş durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Dolu durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Dolu durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Dolu durum
4	$\theta=40^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Boş durum	$\theta=40^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Boş durum	$\theta=40^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Boş durum	$\theta=40^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Dolu durum	$\theta=40^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Dolu durum	$\theta=40^\circ$ $Y=225^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Dolu durum
5	$\theta=-20^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Boş durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Boş durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Boş durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Dolu durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Dolu durum	$\theta=-20^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Dolu durum
6	$\theta=40^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Boş durum	$\theta=40^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Boş durum	$\theta=40^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Boş durum	$\theta=40^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=2$ Atış/s Dolu durum	$\theta=40^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=1$ Atış/s Dolu durum	$\theta=40^\circ$ $Y=270^\circ$ $T_A=0.5$ Atış/s Dolu durum

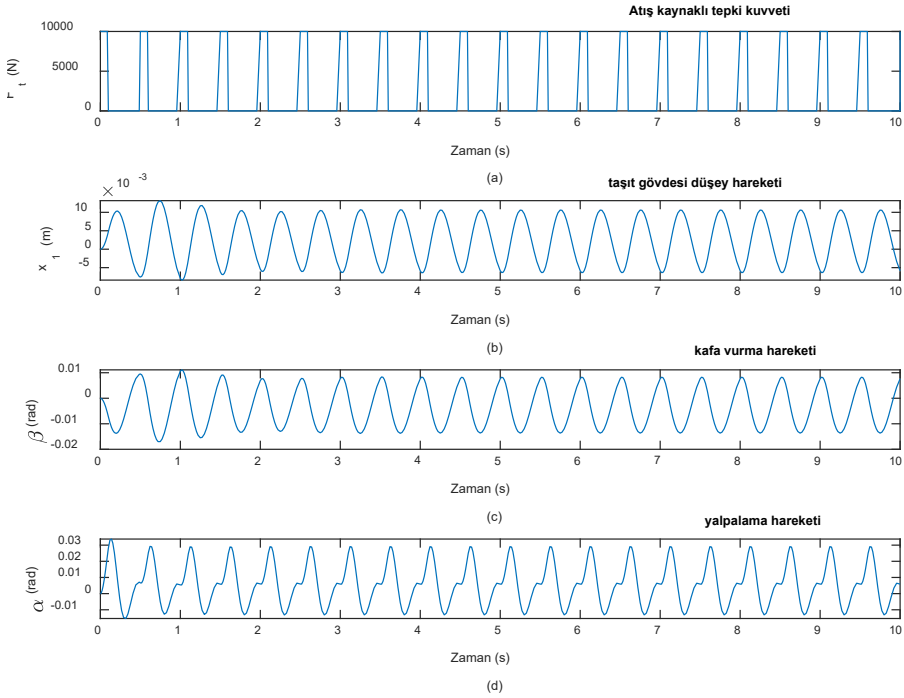
Atış kalitesini belirleyecek ana faktör atışlar sırasında geri tepme kuvvetine bağlı olacak taşıt gövde titreşimleri olacaktır. Bu amaçla 22 ve 34 numaralı simülasyon setlerini göz önüne almak çalışmanın amacı bakımından yeterli olacaktır. 22 numaralı simülasyon setinde gövde titreşimleri Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 7 (a)'da verilen saniyede bir seri atış durumuna karşılık gövdenin düşey, kafa vurma ve yalpalama hareketleri sırasıyla Şekil 7 (b), (c) ve (d)'de verilmektedir. Şekil 7 (b) ve (c)'de gövde düşey hareketi ve kafa vurma hareketinin yaklaşık 4 saniye kadar geçici rejim karakteristiklerinin görüldüğü ardından sürekli rejime oturduğu görülmektedir. Bu simülasyon seti durumunda, namı taşıt ilerleme yönünde olduğundan tepme kuvveti yalpalamaya sebep olmamaktadır. Bu durum, yapılan simülasyon ve modelleme çalışmalarının doğruluğuna referans teşkil ettiği için de önemlidir. $Y=180^\circ$ pozisyonu bu bakımdan nişan kalitesi için elverişli bir pozisyonudur. Ancak oluşan kafa vurma titreşimleri nişan kalitesini kötü yönde etkileyerek hataya sebep olacaktır.



Şekil 7. 22 Numaralı Simülasyon Seti İçin (a) Tepki Kuvveti, (b) Gövde Düşey Hareketi (c) Kafa Vurma Hareketi (d) Yalpalama Hareketi

34 numaralı simülasyon seti için taşıt gövde titreşimleri Şekil 8'de verilmektedir. Bu durumda silah sistemi saniyede 2 adet atış yapmaktadır. Simülasyon süresince toplam 20 adet atış kaydedilmiştir. 34 numaralı simülasyon setinde gövde titreşimleri Şekil 8'de verilmektedir. Şekil 8 (a)'da verilen saniyede iki seri atış durumuna karşılık gövdenin düşey, kafa vurma ve yalpalama hareketleri sırasıyla Şekil 8 (b), (c) ve (d)'de verilmektedir. Namlunun açısından dolayı bu durumda yalpalama hareketi de meydana gelmektedir. Şekil 8'den, tüm gövde hareketlerinde yaklaşık 8 saniye kadar geçici rejim gözlenmektedir.

22 ve 34 numaralı simülasyon seti sonuçları taşıtın dolu ve boş durumlarda atış kalitesinin karşılaştırılmasına yönelik ikincil bir imkan da sağlamaktadır. Buna göre taşıt boş durumdayken gövde titreşimlerinin sürekli rejime girmesi daha erken olmaktadır. Bu da boş durumda daha kaliteli atış yapılabileceğini göstermektedir.



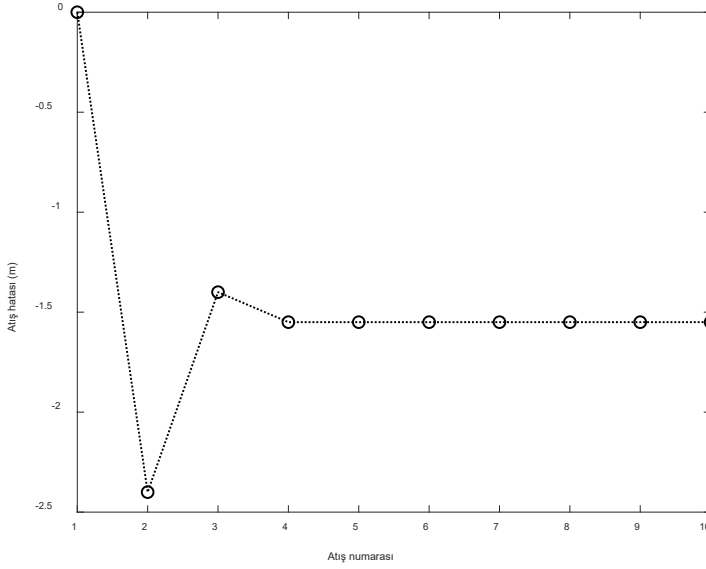
Şekil 8. 34 Numaralı Simülasyon Seti İçin (a) Tepki Kuvveti, (b) Gövde Düşey Hareketi (c) Kafa Vurma Hareketi (d) Yalpalama Hareketi

Şekil 7 ve 8'den atış periyodu T_A 'nın oldukça önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Atış kalitesinin belirlenmesi için tam atışın yapıldığı andaki gövde konumu (x_1 , β ve α) belirleyici olmaktadır. Namlunun ilgili pozisyonu referans alınarak atış hatası Denklem 17'de verilen bağıntı ile belirlenebilir. Burada, silah sisteminin etkili atış menzilinin (L_A) 500 metre olduğu göz önüne alınmıştır. Bu bağıntı, atış hatasını namlu ucunun 500 metre karşısında, namlu eksenine dik bir $x'y'$ düzlemine (nişan ekranına) göre hesaplar.

$$E_A = x_1 + L_A \tan(\beta) \cos(\tau) + L_A \tan(\alpha) \sin(\tau) \quad (17)$$

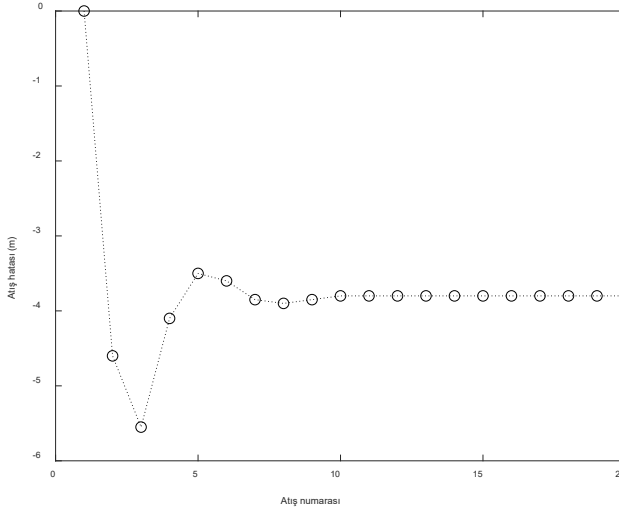
Dikkat edilirse x_1 teriminin hata üzerindeki etkisi milimetre seviyesini geçmemektedir. Bu tip askeri araçlardan milimetre seviyesinde nişan performansı beklenmediğinden söz konusu terim ihmal edilebilir.

Şekil 9'da 22 numaralı simülasyon seti için atış hataları atış numarasına göre verilmektedir. Buna göre 10 saniyede 10 adet atış yapılmıştır. En büyük hata 2. atışta -2,4 m olarak kaydedilmiştir. Sonrasında sistem -1,55 m'lik hata ile sürekli rejime girmiştir.



Şekil 9. 22 Numaralı Simülasyon Seti İçin Atış Hatası Grafiği

34 numaralı simülasyonda kaydedilen atış hatası grafiği Şekil 10'da verilmektedir. Bu simülasyon setinde saniyede 2 defa atış yapılmıştır. Buna göre simülasyon süresince toplam 20 adet atış yapılmıştır. En büyük hata değeri 3. atıştaki -5,55 m'dir. Sonrasında sistem -3,80 m'lik hata ile sürekli rejime girmiştir.



Şekil 10. 34 Numaralı Simülasyon Seti İçin Atış Hatası Grafiği

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, üzerinde seri atış yapabilen ağır silah bulunan mobil bir platform süspansiyon sisteminin atış kalitesine etkisi incelenmiştir ve atış dinamiği elde edilmiştir. Bu amaç için askeri taşıtın gövde titreşimleri dokuz serbestlik dereceli tam taşıt modeli üzerinden ortaya konulmuştur. Atış kalitesi süspansiyon sistemine bağlı olarak tamamen ortaya konabilir olduğu gösterilmiştir. Ayrıca ve daha önemlisi, birim zamandaki atış sayısı parametresine karşılık süspansiyon sistemi modeli üzerinden hatanın öngörülebilir olduğu ortaya konulmuştur. Bunun için nişan alma asistan sistemleri geliştirilebilir. Hali hazırdaki platformdan tam isabet kaydedebilmek için en fazla 4 saniyede bir atış yapılması gerektiği makeden çıkan başka bir başka sonuçtur. İleriki çalışmalarda hareketli hedefleri nişanlayan sistemler çalışılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Hitit Defence Endüstri A.Ş. desteğiyle yapılmıştır. Verdikleri destek sebebiyle ilgili Kuruluşa teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Demir C., (2003). Altı Tahrikli (6x6) Askeri Bir Aracın Silah Atış Pozisyonlarında ve Arazide Seyir Halinde Dinamik Durumunun İncelenmesi”, YTÜ, Doktora Tezi, İstanbul.
- Nguyen D. N. ve Nguyen T. A. (2023). The Dynamic Model and Control Algorithm for the Active Suspension System, *Mathematical Problems in Engineering*, 2023, Article ID 2889435, pp 1-9. <https://doi.org/10.1155/2023/2889435>
- Onat C., Kucukdemiral I. B., Sivrioglu S., ve Yuksek I. (2007). LPV Model Based Gain-Scheduling Controller for a Full Vehicle Active Suspension System, *JVC/Journal of Vibration and Control*, 13(11), pp. 1629–1666. <https://doi.org/10.1177/1077546307078784>
- Onat C., Kucukdemiral I. B., Sivrioglu S., Yuksek I., ve Cansever G. (2009). LPV gain-scheduling controller design for a nonlinear quarter-vehicle active suspension system, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 31(1), pp. 71–95. <https://doi.org/10.1177/0142331208090630>
- Ozbek C., Ozgunes O. C., Burkan R. ve Yagiz N. (2020). Design of a fuzzy robust-adaptive control law for active suspension systems, *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 45:194, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01433-y>
- Ping, X.B., Wang, P. ve Zhang J.F. (2018). A Multi-step Output Feedback Robust

MPC Approach for LPV Systems with Bounded Parameter Changes and Disturbance. *Int. J. Control Autom. Syst.*, 16, pp. 2157–2168. <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0630-0>

Yagiz N., (2004). Comparison and Evaluation of Different Control Strategies on A Full Vehicle Model with Passenger Seat Using Sliding Modes. *International Journal of Vehicle Design*, 34(2), pp. 168-182. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2004.003900>