

Yeni Nesil Topçu Silahları İçin Benzetime Dayalı Hızlı Bir Atış Kontrol Hesaplama Yöntemi

A Simulation Based Fast Fire Control Computation Method for New Generation Artillery Shells

Fatih Geridonmez, Tuğrul Adıgüzel

Tübitak SAGE, Ankara

fatih.geridonmez@tubitak.gov.tr, tugrul.adiguzel@tubitak.gov.tr

Özet

Yeni nesil topçu mühimmatları hedefine yönelebilen akıllı silahlardır. Bu tip silah sistemleri için atış kontrol problemi, silahın atış koşulları ile ateş altına alabileceği bölgenin bulunması olarak tanımlanabilir. Atış kontrol çözümünün sayısal benzetimler üzerinden hesaplanması, dinamik hesaplamaların doğası gereği yüksek işlem gücü ve süresi ister. Bununla birlikte, atış kontrol çözümünün operasyonel olarak kullanılabilmesi, olabildiğince hızlı güncellenmesine bağlıdır. Atış kontrol çözümlemesinin hızlı bir şekilde yapılabilmesi için en uygun yaklaşımlardan biri, benzetim verileri üzerinden çözüm karakteristiğini öğrenen parametrik olmayan regresyon modelleri kullanmaktır. Bu çalışmada, yeni nesil topçu silahları için sayısal benzetimler üzerinden istatistiksel regresyona dayalı bir atış kontrol hesaplama yöntemi sunulmuştur.

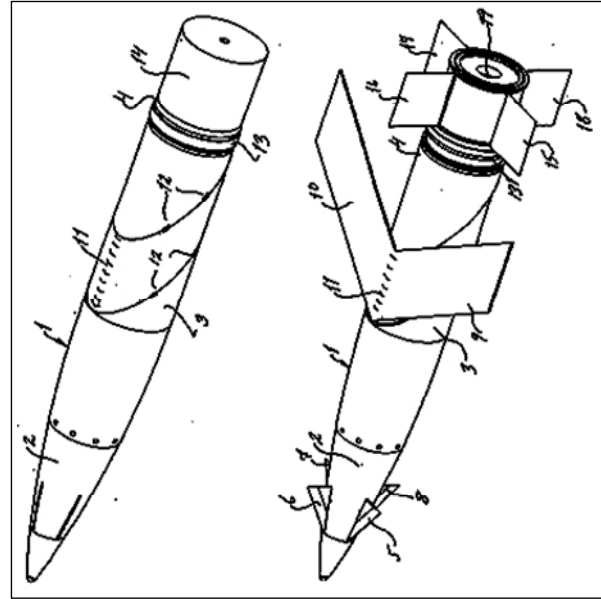
Abstract

The new generation artillery projectiles are weapons that have the ability to navigate to the pre-defined target locations. Fire control solution for a weapon of this type can be defined as a region where the target could be hit with a specific firing condition. The solutions extracted via dynamical simulations require huge computation power and time. On the other hand, the solution has to be up-to-date in order to be realistic and operational. A proper way to compute the fire control solution in such a low time period is to train a non-parametric regression model off-line with a simulated dataset and embedding the model to the weapon's fire control computer as a calculation server. In this study, a fast fire control computation method for the new generation artillery shells, based on statistically regressing to numerical simulations, is presented.

1. Giriş

Yeni nesil topçu silahları, mühimmatın uçuşu esnasında devreye giren hareketli kanatçıkları sayesinde yönelimini kontrol kabiliyetine sahiptir. Yüklü sensör ve diğer elektronik birimleri ile önceden tanımlanan veya dışarıdan işaretlenen hedefleri yüksek hassasiyetle bulabilirler. Bununla birlikte stabilizasyon ve süzülme yüzeyleri sayesinde menzilleri klasik tipteki benzerlerine göre oldukça artar. Şekil 1'de jenerik bir

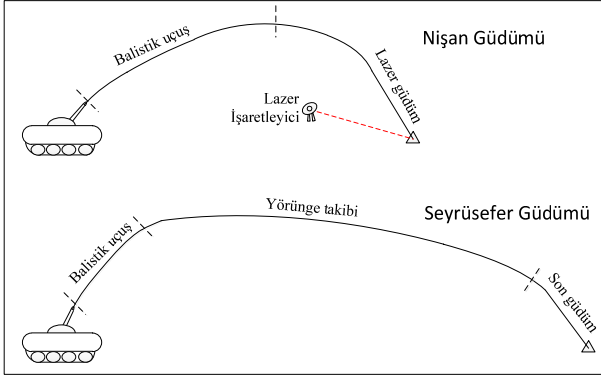
yeni nesil güdümlü mühimmatın kavramsal tasarım çizimleri gösterilmiştir [1]. Bu tipte silahlar sensör yükleri ve çalışma prensiplerine göre kabaca iki sınıfa ayrılabilir. Şekil 2'de bu iki ayrı sınıftaki silahların kaba çalışma prensipleri gösterilmiştir. Lazer arayıcı başlık içeren mühimmatlar, son güdüm safhasında hedefi gösteren lazer işaretini takip ederek hedefini yüksek hassasiyetle bulur. GPS(Global Positioning System), ataletsel ölçüm birimi gibi seyrisfer sensörleri ile güdümlenen silahlar otomatik olarak oluşturulan yörüngeleri takip ederek hedefine ulaşır [2].



Şekil 1: Yeni nesil topçu mühimmatı kavramsal örneği.

Balistik atış yapılan klasik tipte silahlar için atış kontrol problemi, çıkış hızına göre mühimmatın silah istasyonundan hedefe ulaşması için silahın atış yönelim açılarının hesaplanmasıdır [3]. Bu tip silahlar, balistik gezinmeleri gereği tek bir başlangıç durumuna karşılık tek bir karşı konum hedef alabilir. Dolayısıyla herhangi bir hedef konum için silahın atış kontrol bilgisayarında girilen koşullara karşılık gelen çözüm hesaplanarak operatöre sunulur veya istasyonun bu çözüme yönelmesi sağlanır. Güdümlü yeni nesil silahlar, yörüngelerini şekillendirebilen kabiliyetleri sayesinde bir başlangıç durumu

için birçok hedef konuma ulaşma imkânına sahiptir. Bu potansiyel hedef konumları örgüsü satıhta bir alan oluşturur. Operatöre bu alanı atış kontrol bilgisayarında hızlı bir şekilde güncelleyerek sunmak silahın işlevselliğini arttıracaktır. Bununla birlikte tüm potansiyel hedef konumları örgüsünü sayısal benzetimler üzerinden hesaplamak çok fazla işlem yükü getirir.



Şekil 2: Yeni nesil topçu silahı çalışma prensibi.

Bu çalışmada yeni nesil güdümlü topçu silahlarının atış koşullarına bağlı olarak ateş altına alabileceği bölge, atış koşuluna karşılık gelen “ayak izi” olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlama üzerinden, mühimmat atış koşulları ile karşılık gelen ayak izi sınırlarını modelleme yaklaşımına dayalı bir atış kontrol çözümü hesaplama yöntemi sunulmuştur. Bir sonraki bölümde ilgili hesaplama yöntemi ve yöntemin gerçekleştirme basamakları anlatılmıştır. Üçüncü bölümde örnek bir jenerik silah sistemi benzetimi için elde edilen uygulama sonuçları gösterilmiştir. Sonuç bölümünde çalışmaya ilişkin kısa değerlendirmeler verilerek makale sonlandırılmıştır.

2. Atış Kontrol Hesaplama Yöntemi

Bu bölümde jenerik bir yeni nesil top mühimmatının atış kontrol hesaplama prosedürünün temel basamakları verilmiştir.

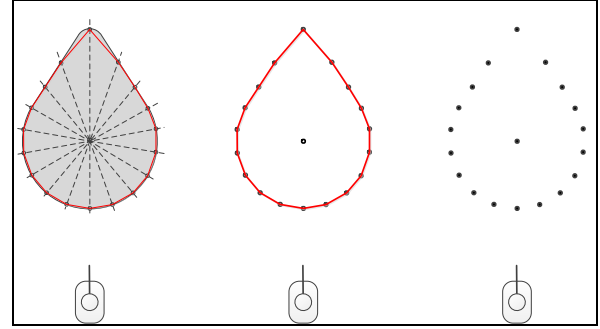
2.1. Atış Kontrol Problemi Tanımı

Silahın her bir atış koşulu için ateş altına alabileceği konumların tamamını içeren bölge, o atış koşuluna karşılık gelen ayak izini gösterir. Atış kontrol çözümü için ilgili koşullara karşılık gelen ayak izi bölgesi hesaplanır. Ayak izi genellikle amorf bir şekilde ortaya çıkar, dolayısıyla sınırlarının tanımlanması zordur. Bu çalışmada ayak izi bölgesi, sayısal olarak tanımlanabilmek için bölgeye örtülen n köşeli bir poligon ile ifade edilmiştir. Elemanları silaha göre poligonun merkezi konumu ve poligonun her bir köşesinin bu merkezi konuma mesafesi olan bir vektör, ayak izi bölgesini temsil eden poligonu gösterir. Böylece atış kontrol problemi, silah atış koşullarını ayak izi bölgesi vektörüne eşleme işlemine indirgenmiştir. Şekil 3’de ayak izi bölgesinin sayısallaştırma işlemi, temsili bir ayak izi üzerinde gösterilmiştir.

2.2. Benzetim Verisi Üretimi

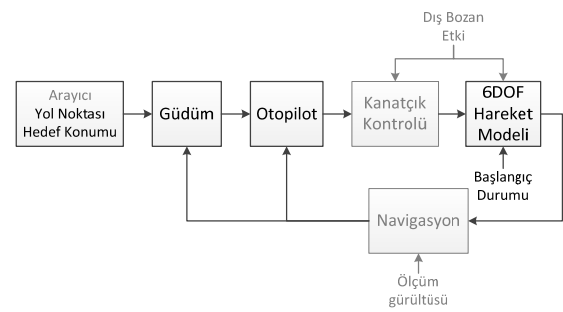
Silahın herhangi bir atış koşuluna karşılık gelen ayak izi poligonu verisini elde edebilmek için, jenerik yapısal özellikleri olan bir mühimmatın sayısal benzetim ortamı hazırlanmıştır. Mühimmatın hareket benzetimi iki temel

aşamada gerçekleştirilmiştir. Balistik faz olarak adlandırılan birinci aşamada mühimmat hareketi, başlangıç koşullarından mühimmatın yükselişi sonlanana dek nokta kütle hareket modeli üzerinden bulunmuştur. İkinci aşama olan güdüm fazından mühimmatın hareketi, balistik fazdaki mühimmatın son durumundan üretilen başlangıç koşulları ile 6 serbestlik dereceli hareket modeli üzerinden güdüm/kontrol/seyrüsefer döngüsü kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4’de güdümlü silah sistemi benzetim döngüsü gösterilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen benzetimlerde dış bozan etkiler ve ölçüm gürültüleri göz ardı edilmiştir. Aynı zamanda kanatçık kontrolü birimi de kullanılmayarak mühimmatın kontrol momentlerini doğrudan sağlayabildiği varsayılmıştır.



Şekil 3: Ayak izi sayısallaştırma.

Gerçek ayak izi verisi, mühimmat hareket benzetimi ile bulunur. Hareket benzetimi kullanılarak, silahın belli bir yönelimi ve mühimmatın namlu ilk hızı için, belli bir yükseklik sathında vurulabilecek en uzak ve en yakın hedef mesafesi bulunur. Yakın ve uzak menzil mesafesinin merkezi, mühimmat ayak izi referans merkezi olarak belirlenir. Yine hareket benzetimi kullanılarak, ayak izi referans merkezinden belli açılarla ayrılan doğrultularda hedefin vurulabileceği en uzak mesafeler belirlenir, böylece ilgili koşullara karşılık gelen mühimmat ayak izi verisi üretilmiş olur. Bu prosedür silahın tüm namlu yönelim açıları ve mühimmat çıkış hız değer aralığı için belli bir sıklıkta tekrarlanır. Tüm bu benzetimler sonucunda mühimmata ait ayak izi gerçek veri seti elde edilir.



Şekil 4: Mühimmat benzetim döngüsü.

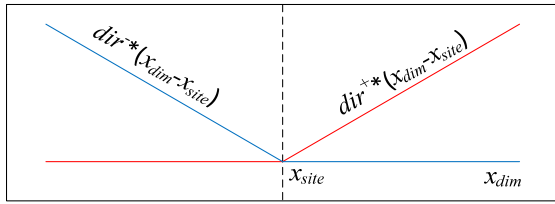
2.3. Veri Modelleme

Modelleme aşamasında, ayak izi bölgesinin konumu ve şekli üzerinde etkili olan namlu, mühimmat, vuruş değişkenleri ve çevresel koşullar ile ayak izi verisini ilişkilendiren bir fonksiyon aranır. Model fonksiyonun tanım ve görüntü değişkenlerinin çok boyutlu olması nedeniyle modelleme yönteminin de çok değişkenli doğada olması beklenir.

Problem çok boyutlu ve veri değişim karakteristiğinin oldukça karmaşık olması yöntemin aynı zamanda modele dair minimum bilgi ile işletilebilmesini gerektirir. MARS(Multivariate Adaptive Regression Splines) yöntemi veri sınıflandırma ve modelleme için yaygın olarak kullanılan çok değişkenli ve uyarlamalı bir parametrik olmayan istatistiksel regresyon yöntemidir. MARS, lineer regresyon analizini geliştirerek parametreler arasındaki bağıntıları otomatik olarak hesaplayan bir yaklaşım sunar [4]. Özellikle çok boyutlu modelleme problemlerine uygun bir regresyon prosedürüdür [5]. Yöntem, parametreler arasındaki bağıntıları, regresyon veri kümelerini kullanarak, ağırlıklandırılmış parçalı lineer baz fonksiyonlarının toplamı şeklinde ifade eder [6]. Bu çalışmada mühimmat atış koşullarını, mühimmat ayak izi gösterim bileşenlerine eşleyen model çıkarımı için MARS yöntemi kullanılmıştır.

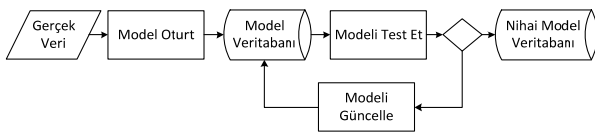
$$f(iv) = \sum_{i=1}^N c_i B_i; B_i(iv) = \prod_{j=1}^{m_i} h(iv_j - t_{ij}) \quad (1)$$

MARS modeli (1) denklemi ile verilebilir. Burada B_i terimleri, t_{ij} kırılma noktalarında parçalı lineer baz fonksiyonlarıdır. c_i terimleri ise baz fonksiyonların modele katkısını belirleyen ağırlıklandırma katsayılarıdır. Baz fonksiyon, veri gözlem değerinde kırılımı olan, kırılım noktasından sağa veya sola lineer değişen, geri kalan değerleri 0 olan fonksiyondur. Aynı kırılım noktasında fonksiyonun lineer değişen kesitini, fonksiyonun yön parametresi belirler. Aynı kırılım noktasında yönü farklı iki baz fonksiyonun toplamı ile baz fonksiyon çifti elde edilir. Şekil 5’de örnek bir baz fonksiyon çifti gösterilmiştir.



Şekil 5: Baz fonksiyon çifti.

Modelleme süreci üç temel aşamada gerçekleştirilir. Şekil 6’da MARS modelleme prosedürünü gösteren akış şeması verilmiştir.

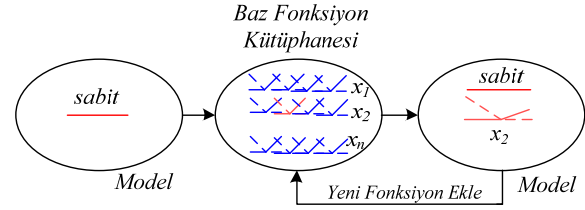


Şekil 6: Modelleme akış şeması.

Birinci aşamada tüm bağımsız değişken değerlerinde kırılımı olan lineer bağımsız baz fonksiyon çiftlerini içeren bir kütüphane oluşturulur.

İleri faz olarak adlandırılan ikinci aşamada, baz fonksiyon çiftleri, veri setine istatistiksel olarak en iyi örtüşme kistasına göre modele eklenerek, veri değerlerine aşırı duyarlı bir karmaşık regresyon modeli üretilir. Şekil 7’de örnek bir ileri faz prosedürü gösterilmiştir. Bu aşamada her bir baz fonksiyon çifti, lineer regresyon yöntemine göre minimum kare hata

değerini verecek şekilde veri setine örtüştürülür. Sonrasında istatistiksel olarak en iyi örtüşen baz fonksiyon çifti modele eklenir. Kalan baz fonksiyonlardan istatistiksel olarak veri setine en iyi örtüşeni aranır ve modele eklenir. Bu süreç modelleyici tarafından konulan ileri faz fonksiyon bileşeni sayısı kısıtına ulaşılan dek işletilir. Böylece veri setine aşırı örtüşen model elde edilmiş olur.



Şekil 7: Modelleme ileri fazı.

Geri faz veya budama fazı olarak adlandırılan ikinci aşamada, modelde yer alan baz fonksiyonlardan modelin doğruluğuna en az katkısı olanlar modelden elenir. Bu aşamadaki işlemler de yinelemeli bir yapıda gerçekleştirilir. Her bir baz fonksiyon bileşeni modelden çıkarıldığında modelin istatistiksel doğruluk değeri hesaplanarak, modelin doğruluğunu en az etkileyen baz fonksiyonu modelden çıkarılır. Yeni modelin istatistiksel bir çapraz geçerlilik terimi hesaplanır. Çapraz geçerlilik terimi modelin karmaşıklık mertebesini ifade eder. Çapraz geçerlilik değeri belli bir eşğin üzerine çıkana dek model budama süreci işletilir. Bu sürecin sonunda karmaşıklığı ve doğruluğu optimal bir model elde edilmiş olur. Bu çalışmada modellemenin budama fazında genelleştirilmiş çapraz geçerlilik ölçütü (Generalized Cross Validation, GCV) kullanılmıştır [7].

$$GCV = \underbrace{\left(1 - \frac{K(M)}{N}\right)^{-2}}_{\text{ceza terimi}} \underbrace{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2}_{\text{hata terimi}} \quad (2)$$

Denklem (2) ile verilen GCV hesaplamasında y_i gerçek veri değeridir. K , modelleyici tarafından sürülen modelin mertebe (karmaşıklık) ceza etki parametresi ile geçerlilik ölçütünün ceza ağırlığını ayarlar. K parametresinin büyük seçilmesi geçerlilik ölçütü değerini tersine etkileyeceğinden, modelin mertebesinin düşük kalmasına (daha az sayıda baz fonksiyonu) neden olur. M , modelde yer alan lineer bağımsız baz fonksiyonu sayısını gösterir. N gerçek veri sayısıdır. y_i gerçek veri değerini, $f(x_i)$ model tahminini gösterir.

MARS modellemesi için açık kaynak olarak sunulan, hem betik dil tabanlı geliştirme ortamı, hem de modelleme yapabilecek açık kaynak kütüphanelere sahip olan R-Project aracı kullanılabilir [8]. R-Project’de hazırlanmış örnek bir modelleme betiği Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1: R-project örnek betik kodu (komut satırı)

```
#mda ve earth paketlerini yükle
library(mda)
library(earth)
#### Gerçek Veri Oku ####
data=NULL
gercekVeri<-
read.table("GercekVeri.Rdata",header=TRUE)
```

```
### MARS Algoritması ile modelleme Yap ###
## Gerçek verinin ilk iki parametresini kullan ve 21.
Paramtre için model oluştur###
model<-earth(gercekVeri[,1:2],gercekVeri[,2:21])
```

2.4. Model Tahmini Hesaplaması

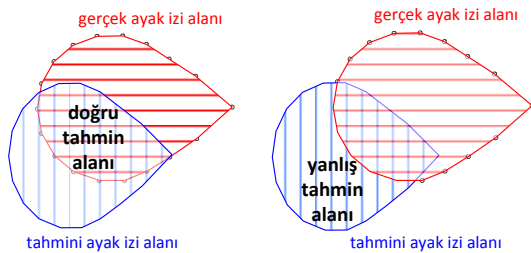
MARS modeli, modelin içerdiği tüm baz fonksiyonlarının mertebesi, hangi değişkene karşılık geldiği, kırılma noktası, lineer değişim yönü ve ağırlık değerlerini içeren bir veritabanı olarak düşünülebilir. Böylece herhangi bir bağımsız değişken değerine karşılık gelen model tahmini MARS veritabanından parametreleri okunan fonksiyonda hesaplanarak üretilir. Çizelge 2’de model tahmini hesaplamasında kullanılan prosedürün sözde kodu verilmiştir.

Çizelge 2: Model tahmini sözde kodu

```
// Model veritabanını ayarla,
Ayarla(mertebeDeğerleri, kırılmaNoktaları,
değişimYönleri, ağırlıkDeğerleri)
// Girdi değerlerini al,
Al(girdi)
// Tahmin döngüsü: model bileşeni sayısınca döngü çevir,
// Her bir bileşen etkisi değerini hesaplayarak model
tahminine ekle
tahmin = tahmin + ağırlıkDeğeri*bileşenEtkisi
// Bileşen döngüsü: bileşenin mertebe sayısınca döngü çevir
bileşenEtkisi = bileşenEtkisi*bazEtkisi
// Bileşene bazfonksiyonu etkisini hesapla
bazDeğeri = değişimYönü*(girdi-kırılmaNoktası)
bazEtkisi = max(bazDeğeri,0)
// Bileşen döngüsü sonu
// Tahmin döngüsü sonu
```

2.5. Model Doğrulama

Atış kontrol modeli bir poligon ile sınırları verilen ayak izi alanını tahmin eder. Dolayısıyla modelin doğruluğu, model tahmininin gerçek veri alanına ne kadar örtüştüğünün yanında ne kadar örtüşmediği üzerinden de değerlendirilmelidir. Bu çalışmada model tahmininin gerçek veri alanını kapsama oranı modelin tahmin doğruluğu, gerçek veri alanının dışında kalan tahmin bölgesi oranı modelin kalitesi olarak tanımlanmıştır. Şekil 8’de doğrulama için kullanılan bölgeleri temsil eden bir örnek veri/tahmin karşılaştırma gösterimi sunulmuştur.



Şekil 8: Model tahmini değerlendirme.

Model tahmin doğruluğunu ve kalitesini analiz etmek için, atış değişkenlerinin tanımlanan bir değer aralığında, rasgele seçilen girdi değerleri için, mühimmat hareket benzetimi kullanılarak test gerçek verisi üretilir. Model doğrulaması, üretilen test verisi, modelin tahmin doğruluğunu ve kalitesini değerlendiren iki ölçüt üzerinden gerçekleştirilir. Model

doğruluğu ölçütü, model tahmininin gerçek ayak izi bölgesinin ne kadarlık bölümünü kapsadığını belirten “doğru kapsama oranı (müspet değer)” değeri ile verilir [9]. [0,1] aralığından değişen bu değer yüksek olması, model doğruluğunun da yüksek olduğunu gösterir.

$$DKO = A(P_{tahmin} \cap P_{test})/A(P_{test}) \quad (3)$$

“Yanlış kapsama oranı (menfi değer)” olarak adlandırılan model tahmin kalitesi ölçütü ile model tahmininin ne kadarının gerçek ayak izi bölgesi dışında kaldığını belirlenir [9]. Yanlış kapsama alanının küçük değerleri model tahmin kalitesinin yüksek olduğunu gösterir.

$$YKO = A(P_{tahmin} \cap P'_{test})/A(P_{tahmin}) \quad (4)$$

3. Deney Sonuçları

Önerilen yöntemin değerlendirilmesi için jenerik bir yeni nesil mühimmat sistemi benzetimi kullanılarak, mühimmatın atış yükseliş açısının ve çıkış hızının belli bir aralıktaki değer kombinasyonlarına karşılık gelen ayak izi gerçek verisi üretilmiştir. Uygun modelleme parametreleri belirlenerek, Çizelge 3’de verilen sayıda bileşen içeren, atış açısı ve hızı değişkenlerini ayak izi poligon vektörüne eşleyen parçalı lineer regresyon eğrileri modeli oluşturulmuştur. Model doğruluğunu test etmek için, tanımlanan girdi değişkenleri değer aralığında tek biçimli dağılıma uygun test noktaları seçilmiştir. Seçilen değişken değerlerinde ayak izi test verisi üretilerek, bu veri üzerinden ayak izi model tahmini doğruluğu ve kalitesi değerlendirilmiştir. Çizelge 3’de, elde edilen model tahmini ortalama doğru kapsama oranı ve ortalama yanlış kapsama oranı değerleri sunulmuştur.

Çizelge 3: Örnek sonuçlar

Model Girdi Boyutu	2
Model Çıktı Boyutu	19
Model Bileşen Sayısı	237
Maksimum Baz Mertebesi	2
Modelleme Veri Sayısı	665
Test Veri Sayısı	1862
Ortalama Doğru Kapsama Alanı	% 92.37
Ortalama Yanlış Kapsama Alanı	% 05.61

4. Sonuç

Bu çalışmada yeni nesil topçu silahları için hızlı ve etkin çalışabilecek bir atış kontrol çözüm önerisi sunulmuştur. Önerilen yöntemin tüm uygulama basamakları tanıtılmıştır. Sunulan yöntemin en önemli getirisi, atış kontrol çözümü fonksiyonlarının hızlı hesaplama imkanı vermesi ve kısa kod parçaları halinde gömülü yazılıma aktarılabilmesidir. Bununla birlikte model parametre boyutu ve değerleri değişse dahi platform yazılımı kodunda değişikliğe gerek kalmadan, model veri tabanı üzerinden güncelleme yapılabilir. Çalışmanın sonunda jenerik bir mühimmatın basitleştirilmiş uçuş benzetimi üzerinden gerçekleştirilen örnek bir uygulama için elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Deney sonuçları yöntemin yüksek tahmin doğruluğu ve kalitesi ile çözüm sağlayabildiğini göstermiştir.

5. Kaynaklar

- [1] Hellman, U., "Guided artillery missile with extremely long range", Patent-6748871, 2004. Url: <http://www.freepatentsonline.com/6748871.html> Erişim tarihi: 11.06.2014.
- [2] Salyers, P., "Excalibur-M982", *43rd Gun&Missile Conf*, 2008
- [3] MIL-HDBK-799, Department Of Defense Handbook: Fire Control Systems – General, 1996.
- [4] Friedman, J.H., "Multivariate Adaptive Regression Splines", *The Annals of Statistics*, 19, 1-141, 1991.
- [5] Hastie, T., Tibshirani, R. ve Friedman, J., 2009, *The Elements of Statistical Learning* 2nd Ed., Springer, NY.
- [6] Zhang, H. ve Singer, B.H., 2010, *Recursive Partitioning and Applications* 2nd Ed., Springer, NY.
- [7] Craven, P. ve Wahba, G., "Smoothing Noisy Data With Spline Functions. Estimating the Correct Degree of Smoothing by the Method of Generalized Cross Validation", *Numerische Mathematik*, 31, 317-403, 1979.
- [8] R Project, Earth Package Reference Manual. Url: <http://cran.r-project.org/web/packages/earth/index.html> Erişim tarihi: 28.06.2014.
- [9] Yoon, K.S., Park, J.H., Kim, I.G. ve Ryu, K.S., "New Modeling Algorithm for Improving Accuracy of Weapon Launch Acceptability Region", *IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference*, 2010.