

## AKILLI HAVA-YER BOMBALARI İÇİN REGRESYON MODELİNE DAYALI ATIŞ KONTROL HESAPLAMALARI

Fatih GERİDÖNMEZ\* ve Tuğrul ADIGÜZEL†  
TÜBİTAK SAGE, Ankara

### ÖZET

*Akıllı bombalar için atış kontrol hesaplamaları, hedefin istenen etki koşullarında vurulabilmesi için, platformun silahı bırakabileceği bölgeyi belirler. Atış kontrol çözümünün çeşitli görsel ve işitsel yöntemlerle pilota sunulması ile pilotun uçağı bu bölgeye yönlendirmesi beklenir. Özellikle hava sahası üstünlüğünün bulunmadığı durumlarda, tehdit hava savunma unsurlarından sakınabileceği atış yapabilir bölgeyi uçak üzerinde pilota sunmak, pilotun görevini minimum risk ile tamamlayabilmesi için önemli bir yardımcı sistem sağlar. Atış kontrol çözümünün sayısal benzetimler üzerinden hesaplanması, dinamik hesaplamaların doğası gereği oldukça yüksek miktarda işlem yükü gerektirir. Bununla birlikte atış kontrol çözümünün etkin bir şekilde kullanılabilmesi için olabildiğince hızlı güncellenmesine ihtiyaç vardır. Atış kontrol çözümü hesaplama gereksinimini hızlı bir şekilde karşılamak için en uygun yaklaşımlardan biri, atış kontrol çözümü bölgesi ile atış değişkenleri arasındaki ilişkiyi benzetim verileri üzerinden öğrenen regresyon modelleri kullanmaktır. Bu makalede, pilotun hava-yer tipi akıllı bombalar için atış kontrol kararlarına yardımcı olacak sistem için istatistiksel modellemeye dayalı bir çözüm yaklaşımı ve bu yaklaşımın temel uygulama basamakları sunulmuştur.*

### GİRİŞ

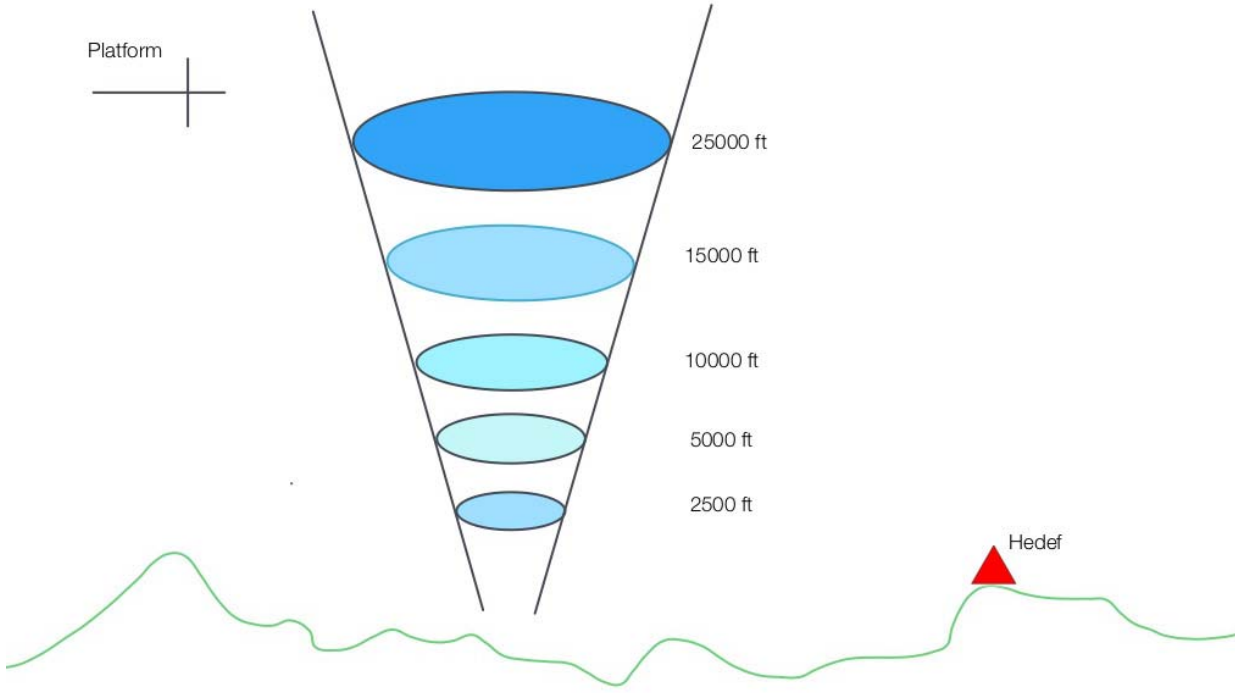
Hava-yer tipi akıllı bombalar, uçaktan, yeryüzü hedeflerinin imhası amacıyla atılan, mühimmatın kendi elektroniği ve yönelim kontrolü ile hedefe güdümlenebildiği silahlardır.

Atış kontrol problemi, silah platformu ve hedef koşullarına göre etkin bir vuruş için atışta uygulanması gereken silah durumunu gösterir. Güdümlü silah sistemleri, mühimmatın yörüngesini şekillendirebilme yeteneği sayesinde, aynı platform ve hedef koşullarına karşılık birçok atış kontrol çözümü sağlar.

Bu makalede önerilen atış kontrol çözümünde amaç, savaş pilotlarının oldukça hızlı değişen hava harekâtı koşullarında silahlarını etkin kullanabilmelerine imkân sağlayan bilgiyi hızlı bir şekilde hesaplamak ve pilota kolay anlaşılır bir şekilde sunmaktır. Önerilen yaklaşım, kavramsal tanımlamalar ve hesaplama çözümü önerisi üzerinden iki ana başlık altında sunulmuştur. Kavramsal tanımlamalar bölümünde sistem bileşenleri ve hesaplamalara konu edilecek değişkenler verilmiştir. Diğer bölümde atış kontrol hesaplamalarının hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi için veri üretimi, model oluşturma, doğrulama ve uygulama yöntemleri gösterilmiştir. Sonuç bölümünde önerilen atış kontrol sisteminin performansı ve işlem yüküne ilişkin değerlendirmeler sunulmuştur.

\* Başuzman Araştırmacı, Uçuş Mekanîği Birimi, E-posta: fatih.geridonmez@tubitak.gov.tr

† Uzman Araştırmacı, Uçuş Mekanîği Birimi, E-posta: tugrul.adiguzel@tubitak.gov.tr



Şekil 1: Bırakma İrtifasına Bağlı Atıyab Gösterimi

### ATIŞ KONTROL KAVRAM VE TANIMLAMALARI

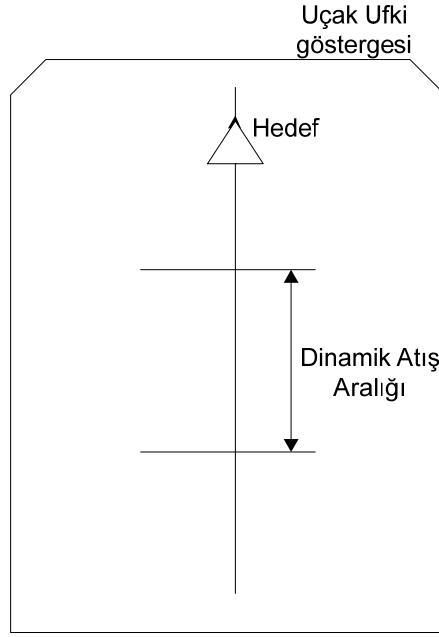
Akıllı bombaların atış kontrol çözümleri, temel olarak silahın atıldığı andaki platformun başı, yüksekliği, hızı ve hedeften yükseklik farkı değerlerinden etkilenir. Bununla birlikte hedefin vurulması istenen yön, çarpma açısı ve hızı gibi etki değişkenleri de atış kontrol çözümünü değiştirir. Tüm bu değişkenlerin, daha önce teyit edilmiş bir aralıktaki değerlerine karşılık atış kontrol çözümü, hedefe göre birçok konum için sağlanır. Tüm bu çözüm konumlarını içeren bölgeye, ilgili atış kontrol değişkenlerine karşılık gelen “atış yapılabilir bölge (atyab)” denir. Atış kontrol sisteminin, atış ve hedef koşullarına karşılık gelen atıyab sınırlarını hızlı bir şekilde hesaplayarak, pilotu atış kontrol çözümüne yönlendirmesi gerekir.

#### Atış Yapılabilir Bölge

Genel atıyab çözümü, Şekil 1’de kaba çizimi gösterilen, dikey ekseninde koni benzeri bir hacim ifade eder. Bu hacim ya da iki boyutta alan, uçağı harekât ortamında kullanan pilot için, uçtuğu irtifada ve hızda mühimmatı bırakabileceği bir mesafe olarak algılanabilir. Daha açık bir ifadeyle pilot için bırakma bölgesi gerçekte tek boyutlu bir bilgidir. Şekil 2’de pilotun süre veya mesafe gibi algılayabileceği böyle bir aralık gösterilmiştir. Bu bilgi belli bir parametreye bağlı olarak değiştirildiğinde üç boyutlu bir bilgi ortaya çıkar. Örneğin irtifaya bağlı atıyab değişimi Şekil 1’de görüldüğü gibi 3 boyutlu bir koniye benzemektedir.

#### Dinamik Atış Aralığı ve Ayakizi

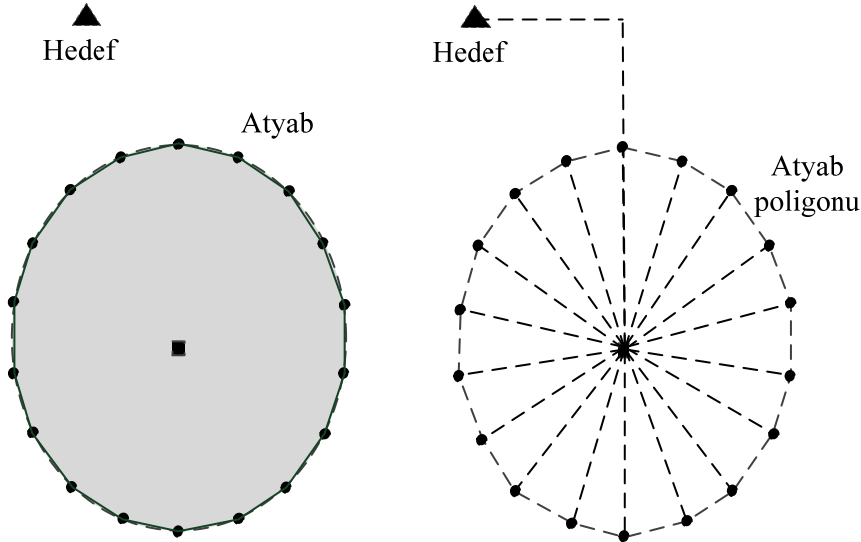
Harekât ortamındaki pilot için önemli olan, “hava üstünlüğü sağlanmamış bir bölgede belli bir istikamette gidilirse atıyab’a girilebilir”, “o an atış yapılabilir” veya “mevcut hız, baş, irtifa korunursa, örneğin 5 saniye boyunca, atış yapılabilir” gibi atış kontrol bilgisinin sağlanmasıdır. Pilota harekât ortamında bu bilgiyi sunmak için basit ve anlamlı bir yöntem olarak dinamik atış aralığı gösterimi önerilebilir. Dinamik atış aralığı, mühimmat ayak izinin hedefi kapsamı durumunda pilota anlamlı bir uyarı sunmayı amaçlamaktadır. Mühimmat ayak izi, mühimmatın anlık koşullar ile bırakılması durumunda yeryüzünde vurabileceği potansiyel hedef konumlarını kapsayan alanı ifade eder. Mühimmat ayak izi uçağın irtifası, başı, hızı ve hedefi vuruş parametreleri değişmediği sürece değişmeden yeryüzünde uçakla birlikte hareket eden bir bölgedir. Hedefin, ayakzine göre durumunu gösteren dinamik atış aralığı hesabı için atıyab da kullanılabilir. Uçuş istikametinin atıyab kesişimi ile ayakzinin hedeften uçuş istikametine olan kesişim aralıkları birbirine eşdeğerdir.



Şekil 2: Sembolik Dinamik Atış Aralığı Gösterimi

### ATIŞ KONTROL HESAPLAMALARI

Hedefe göre herhangi bir konumun atış kontrol çözümü sağlayıp sağlamadığı sayısal benzetimler üzerinden değerlendirilir. Bununla birlikte, atış kontrol sisteminde anlık olarak uçaktan alınan yer hızı ve irtifa değerine karşılık, tanımlı hedefi istenen etki ile vuruş için atyab hesaplanmalıdır. Sayısal benzetimlerde yapılan dinamik hesaplamalarının yüksek işlem yükü nedeniyle böyle bir ortam üzerinden operasyonel atış kontrol bilgisi sağlamak oldukça zordur. Bu çalışmada atış kontrol problemi için benzetim verisini kullanarak atış değişkenleri ile atyab çözüm eşleşmesini istatistiksel modellere uyduran bir yöntem önerilmiştir. Böylece işlem karmaşıklığı oldukça düşük olan model hesaplamaları ile atış kontrol bilgisi hızlı bir şekilde elde edilebilir.



Şekil 3: Atyab Poligon Gösterimi

### Atyab Verisi Oluşturma

Sayısal bir değerle ifade edilebilen atyab verisi oluşturmak için, atış değişkenlerine karşılık gelen atyab, Şekil 3'de gösterildiği gibi 2 boyutta bir merkezi konum etrafındaki poligona örtüştürülmüştür. Bu şekilde benzetimler üzerinden elde edilecek atyab, hedefe göre sağa/yukarı

değer mesafesi (referans merkez) ve poligonun köşelerinin referans merkeze mesafesi değerlerini içeren bir vektör sayısal değeri ile verilebilir. Böylece istatistiksel modellemede kullanılacak gerçek atyab verisi, mühimmat hareket benzetimi kullanılarak belirlenen atyab üzerinden hesaplanır. Hareket benzetimi kullanılarak, belli bir atış kontrol değişken değer seti için hedefin belli bir yönde vurulabileceği en uzak ve en yakın mesafeler bulunur. Yakın ve uzak menzil mesafesinin merkezi atyab referans merkezi olarak belirlenir. Yine hareket benzetimi kullanılarak, referans merkezden poligon köşe sayısına göre belli açılarla ayrılan yönelimlerde hedefin vurulabildiği en uzak mesafeler bulunarak, ilgili atış değişkenlerine karşılık gelen atyab poligonu elde edilmiş olur. Bu prosedür tüm atış değişkenlerinin geçerli değer aralığı için belli bir sıklıkta tekrarlanarak silah için atyab gerçek veri seti üretilir.

### Atyab Modelleme

Atyab üzerinde etkili olan atış değişkenlerine karşılık atyab poligonu parametre değerlerini modellemede MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines) yöntemi kullanılmıştır. MARS parametreler arasındaki bağıntıların otomatik olarak hesaplanabilmesini sağlar [Friedman, 1991]. Parametreler arasındaki bağıntıları, istatistiksel regresyona dayalı veri kümelerini kullanarak, sayısı önceden bilinmeyen baz fonksiyonlarının ağırlıklandırılmış toplamı olarak belirler [Zhang ve Singer, 2010]. MARS, özellikle çok boyutlu modelleme problemlerine uygun bir regresyon prosedürüdür [Hastie, Tibshirani ve Friedman]. MARS yöntemi ile modelleme sonunda elde edilen regresyon modeli (1) denklemi ifade edilebilir. Burada  $B_i$  terimleri,  $t_{ij}$  bağlantı noktalarındaki baz fonksiyonlarıdır.  $c_i$  terimleri ise model hesaplamasında baz fonksiyonlarını ağırlıklandıran katsayılarıdır.

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

MARS yöntemi ile modelleme süreci iki aşamada gerçekleştirilir. İlk olarak ileri fazda, gerçek veri setinde kullanılan atış değişken değerlerine karşılık, modelleyici tarafından müsaade edilen mertebelerde parçalı lineer baz fonksiyonu kombinasyonları üretilir. Bu baz fonksiyonları ile tüm veri setine lineer regresyon yöntemi ile oturtulan aşırı uyumlu bir model oluşturulur. Geri faz veya budama fazı olarak adlandırılan ikinci aşamada, her bir baz fonksiyon bileşeninin önem mertebesi değerlendirilerek, hangi baz fonksiyonlarının modelde kalması, hangilerinin elenmesi gerektiğine karar verilir [Craven ve Wahba, 1979].

### Model Doğrulama

Model tahmin performansı, atış değişkenlerinin tanımlı değer aralığında rasgele girdi değerleri ve buna karşılık sayısal benzetimler ile hesaplanan atyab verisi üzerinden değerlendirilir. Model tahmin doğruluğu, modelden üretilen atyab poligonu ile sayısal benzetimlerden elde edilen gerçek verinin geometrik olarak ne kadar örtüştüğünü gösterir. Doğruluk değeri iki ayrı sayısal ölçüt üzerinden değerlendirilir. Birinci ölçüt (2) denklemi ile verilen model tahmininin gerçek atyab poligonunun ne kadarlık bölümünü kapsadığını sınavan “doğru kapsama alanı (DKA)” değeridir. [0,1] aralığında değişen bu değer yüksek olması model tahmininin doğruluğunun da yüksek olduğu anlamına gelir [Yoon, Park, Kim ve Ryu, 2010].

$$DKA = A(P_{\text{tahmin}} \cap P_{\text{test}}) / A(P_{\text{test}}) \quad (2)$$

İkinci ölçüt ile model tahmininin ne kadarlık bölümünün gerçek atyab poligonu dışında kaldığı değerlendirilir. (3) denklemi ile verilen “Yanlış kapsama alanı (YKA)” olarak adlandırılan bu ölçütün küçük değerleri model tahmin kalitesinin yüksek olduğunu gösterir [Yoon, Park, Kim ve Ryu, 2010].

$$YKA = A(P_{\text{tahmin}} \cap P'_{\text{test}}) / A(P_{\text{tahmin}}) \quad (3)$$

### Deney Sonuçları

Önerilen modelleme yönteminin değerlendirilmesinde kullanılmak üzere takip güdümü ile sürülen yuvarlanma ekseninde kararlı jenerik bir silah sistemi için 5 serbestlik dereceli benzetim ortamı hazırlanmıştır. Atış değişkenleri için belli bir değer aralığında, benzetimci üzerinden atyab verisi üretilmiştir. Elden edilen bu veri setini ilişkilendiren mars modeli oluşturularak model doğruluğu,

tanımlanan aralıklarda tek biçimli dağılımda rasgele seçilen değerlere karşılık hesaplanan atyab test verisi üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1: Model Özellikleri ve Tahmin Değerlendirmesi

Modelleme	
Model Girdi Boyutu	4
Model Çıktı Boyutu	16
Model Bileşen Sayısı	264
Maksimum Baz Mertebesi	2
Modelleme Veri Sayısı	750
Test Veri Sayısı	144
Ortalama Doğru Kapsama Alanı	% 89.74
Ortalama Yanlış Kapsama Alanı	% 08.42

## SONUÇ

Bu makalede hava-yer tipi akıllı bombalar özelinde atış kontrol problemi tanımlanarak, atış kontrol hesaplamalarının, birkaç döngü üzerinden az bir işlem yükü ile hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesine imkân tanıyan parametrik olmayan istatistiksel modellemeye dayalı bir çözüm önerisi sunulmuştur. Yapılan örnek uygulama sonuçları, yöntemin az sayıda benzetim verisi kullanılarak da iyimser atış kontrol çözümleri sağlayabileceğini göstermiştir. Veri sıklığının artırılması ve model üzerinde daha fazla analiz yapılması ile model performansının da iyileştirilmesi beklenebilir.

## Kaynaklar

- Craven, B. ve Wahba, G., 1979. *Smoothing Noisy Data With Spline Functions. Estimating the Correct Degree of Smoothing by the Method of Generalized Cross Validation*, Numerische Mathematik, 31, 317-403.
- Friedman, J.H., 1991. *Multivariate Adaptive Regression Splines*, The Annals of Statistics, 19, 1-141.
- Hastie, T., Tibshirani, R. ve Friedman, J., 2009, *The Elements of Statistical Learning 2nd Ed.*, Springer, NY.
- Yoon, K.S., Park, J.H., Kim, I.G. ve Ryu, K.S., 2010. *New Modeling Algorithm for Improving Accuracy of Weapon Launch Acceptability Region*, IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference, Salt Lake City, UT, USA.
- Zhang, H. ve Singer, B.H., 2010, *Recursive Partitioning and Applications 2nd Ed.*, Springer, NY.