

Received: 05.01.2018

Accepted: 03.07.2018

DOI: 10.30516/bilgesci.375269

ISSN: 2651-401X

e-ISSN: 2651-4028

2(2), 120-127, 2018

## B-Spline Eğri Uydurmada Optimum Serbest Düğüm Noktalarının Seçilmesi için Guguk Kuşu Arama Algoritması

İsmail Koç<sup>1\*</sup>, Özkan İnik<sup>2</sup>

**Özet:** Genellikle eğriyi yeniden oluşturmak olarak bilinen eğrilere veri noktaları uydurma, bilgisayar destekli tasarım / imalat alanında (CAD / CAM) önemli bir problemdir. 3D lazer tarama ile elde edilen genellikle yüksek boyutlu ve gürültülü bir diziden oluşan veri noktalarının serbest forma sahip bir parametrik eğriye (tipik olarak bir B-spline) uydurulması gereken tersine mühendislik alanında bu problemle sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için çok sayıda yöntem mevcut olmasına rağmen, şu ana kadar problemin tatmin edici genel bir çözümü elde edilebilmiş değildir. Bu çalışmada, eğri uydurma problemini çözmek için, doğadaki diğer evcil kuşların yuvalarına yumurtalarını bırakan guguk kuşlarından esinlenilerek geliştirilmiş optimizasyon yöntemlerinden biri olan Guguk kuşu arama algoritması (CS) kullanılmıştır. Veri noktalarından eğri elde etmek için ise tersine mühendislik kullanılmıştır. Ayrıca, düğüm yerleri ve düğüm sayısı eğri tahmininde serbest bırakılmış olup, CS yöntemi ile bu parametreler arama uzayında rastgele seçilmiştir. Bu şekilde en küçük hata oranına sahip eğri tahmininin elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda eğri uydurma için, literatürde sıklıkla kullanılan beş farklı fonksiyon tercih edilmiştir. Deneysel sonuçlarda, her bir fonksiyon için orijinal eğri ve tahmin edilen eğri karşılaştırmalı olarak sunulmuş olup, elde edilen sonuçlar çoğu fonksiyon için CS yöntemi ile tahmin edilen eğrilerin orijinal eğrilere çok benzer sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

**Keywords:** B-spline Eğri Uydurma, Guguk kuşu Arama algoritması (CS), Serbest düğüm yerleştirme, Optimizasyon, TersİNE mühendislik

## Cuckoo Search Algorithm for Optimal Choice of Free Knots in B-spline Data Fitting

**Abstract:** Fitting data points to curves commonly known as curve reconstruction a significant problem in computer aided design/manufacturing (CAD/CAM). This problem is frequently encountered in the field of reverse engineering where a free-form parametric curve (typically a B-spline) with a set of (usually a high-dimensional and noisy) data points, obtained by 3D laser scanning, has to be fitted. Although there are a number of methods to come up with this problem, until now there has not been a satisfactory general solution to the problem. In this study, the cuckoo search algorithm (CS), one of the optimization methods inspired by a bird species named cuckoo that leave their eggs in the nest of other host birds, is used to solve the problem of curve fitting. Reverse engineering is used to obtain the curve from the data points. In addition, the knot positions and number of knot are free variables of the problem in the estimation of the curve, and these parameters are randomly selected in the search space by the CS method. In this way, the curve estimate

<sup>1</sup> Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

<sup>2</sup> Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tokat, Türkiye

\*Corresponding author (İletişim yazarı): [ozkan.inik@gop.edu.tr](mailto:ozkan.inik@gop.edu.tr)

Citation (Atf): Koç, İ., İnik, Ö., 2018. B-Spline Eğri Uydurmada Optimum Serbest Düğüm Noktalarının Seçilmesi için Guguk Kuşu Arama Algoritması. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 2 (2): 120-127.

with the smallest error rate is aimed to obtain in this study. Five different functions frequently used in the literature for curve fitting are preferred in the experimental studies. In the experimental results, the original curve and the predicted curve for each function are presented comparatively, and the results obtained show that for most functions, the curves predicted by the CS method produce very similar results to the original curve.

**Keywords:** B-spline Curve Fitting, Cuckoo Search algorithm (CS), Free knot placement, Optimization, Reverse Engineering

## 1. Giriş

Veri uydurma, geometrik modelleme (Hoschek, Lasser vd., 1993, de Boor 2001, Piegl ve Tiller 2012) ve bilgisayar destekli tasarım / imalat (CAD / CAM) gibi alanlarda çok önemli bir araştırma konusudur (Barnhill, 1992, Pottmann vd., 2005, Patrikalakis ve Maekawa 2009). Fiziksel bir nesnenin taranması ile elde edilen nokta bulutundan tekrar nesnenin dijital bir modelini oluşturmak için tersine mühendislik kullanılır. Bu yüzden tersine mühendislik veri uydurma probleminde temel bir araç haline gelmiştir (Varady vd., 1997, Farin vd., 2002, Gálvez ve Iglesias 2012, Gálvez vd., 2012). Çoğu zaman, verilerin altında yatan fonksiyon karmaşıktır ve bu nedenle basit bir fonksiyonla bu verilerin temsili zordur (Gálvez ve Iglesias 2011). Bu gibi durumlarda, çok esnek, yaygın olarak bulunabilen, güçlü matematiksel özelliklere (yerel modifikasyon, projektif değişmezlik, güçlü dışbükey gövde vb.) sahip oldukları ve çok çeşitli şekilleri temsil edebildikleri için B-spline'lar en çok tercih edilen yaklaşım fonksiyonlarıdır (Farin 2002, Yuan vd., 2013). Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ve Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE), B-spline'lar ve bunların genelleştirilmiş formları NURBS (Ma ve Kruth, 1995, Ma ve Kruth, 1998, de Boor, 2001, Piegl ve Tiller, 2012), nesnenin şeklini/geometrisini tasarlamak ya da ölçüm verilerinden fiziksel parçaların geometrik modellerini yeniden oluşturmak için kullanılır. B-spline'lar ayrıca sinyal işleme ve görüntü işleme gibi alanlarda genellikle gürültülü sinyalleri işlemek veya karmaşık fonksiyonları yaklaştırmak için kullanılır (Unser vd., 1993, Precioso, Barlaud vd., 2003).

Eğri uydurma probleminde B-spline parametrelerinin uygun bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir (Piegl ve Tiller, 2012). Özellikle düğüm seçimi eğrinin şekli üzerinde önemli bir etki oluşturmaktadır (Farin, 2002). Düğüm sabitlenirse, en küçük kareler yöntemi ile B-spline tahmini, basit bir doğrusal optimizasyon problemine eşdeğerdir. Bununla birlikte, düğümler serbest değişken olarak ele alınırsa, B-spline'lar ile veri uydurmada daha

başarılı olurlar (de Boor vd., 1968, Burchard, 1974, Jupp, 1978, Molinari vd., 2004). Serbest düğümlerin kullanımı, optimal düğüm noktaları için analitik ifadelerin bulunmamasından ve en küçük kareler yöntemi ile amaç fonksiyonunun birçok yerel optimumu olmasından etkilenmektedir (Rice ve Saloin, 1969, Jupp, 1978). Bundan dolayı, yani düğüm noktalarının serbest bırakılmasıyla B-spline eğri uydurma problemi aynı zamana birden fazla çözüm bulunabilecek hale gelir; diğer bir deyişle, problemin birden fazla (global ve/veya yerel) iyi çözümleri bulunmaktadır. Bu nedenle, global optimuma ne zaman ulaşıldığını belirlemek çok zordur. Serbest düğümlerle işlem yapmanın dezavantajı ise, optimal düğüm vektörünün sıklıkla birden fazla düğüm (birden fazla çeşitliliğe sahip düğümler) içermesidir. Bu da tahmin edilen eğrinin düzgün olmayan bir davranışına neden olabilir. Özetlemek gerekirse, düğümlerin serbest bırakılması veri uyumunu geliştirir, ancak bununla birlikte bu yöntem çözülmesi çok zor olan çok modlu ve çok değişkenli doğrusal olmayan sürekli arama uzayında çalışan bir optimizasyon problemine neden olur (Dierckx, 1995).

Son 20 yılda B-spline ile veri uydurma konusunda yoğun araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Düğüm yerleştirme problemi üzerine çok umut verici araştırmalar, metaheuristik teknikler üzerine kuruludur. Yoshimoto ve ark. (2003) veri uydurma problemini gerçek kodlama tekniği yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir (Yoshimoto, Harada vd., 2003). Sarfraz ve Raza (2001) Genetik algoritmalar ve spline kullanarak fontların taslağını yakalama üzerine bir çalışma yapmışlardır (Sarfraz ve Raza 2001). Ülker ve Arslan (2009) B-spline eğri tahmininde Yapay Bağışıklık sistemini kullanarak otomatik düğüm yerleştirme yapmışlardır (Ülker ve Arslan 2009). Yoshimoto ve ark. (1999) genetik algoritma yöntemiyle veri uydurma problemi için otomatik düğüm yerleştirme üzerine çalışmışlardır (Yoshimoto, Moriyama vd., 1999). Gálvez ve Iglesias (2011) serbest düğümlere sahip B-spline'lar ile veri uydurma problemini parçacık sürü optimizasyon tekniği ile çözmüşlerdir (Gálvez ve Iglesias 2011). Gálvez ve Iglesias (2013) eğri

uydurma için yeni bir iteratif hibrit bir GA-PSO yaklaşımı önermişlerdir (Gálvez ve Iglesias 2013). Ayrıca, Gálvez ve ark. (2015) B-spline veri uydurmada serbest düğüm seçimi için elitist klonal seçim algoritmasını önermişlerdir (Gálvez vd., 2015).

Bu çalışmada ise eğri uydurma problemini çözmek için, son zamanlarda geliştirilmiş optimizasyon tekniklerinden biri olan Guguk kuşu arama (CS) algoritması kullanılmıştır. Düğüm yerleri ve düğüm sayısı herhangi bir kısıtlamaya ihtiyaç duyulmadan algoritma tarafından serbest bir biçimde seçilmiştir. Bu şekilde eğri uydurma probleminin çözümünün gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda eğri uydurma için, literatürde sıklıkla kullanılan beş farklı fonksiyon tercih edilmiş ve elde edilen sonuçlar, CS yönteminin eğri uydurma problemleri için alternatif bir araç olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmanın yapısı şöyledir: ilk önce, B-spline eğrileri ve Guguk Kuşu Optimizasyon Algoritması 2. bölümde kısaca anlatılmıştır. 3. bölümde CS yöntemi ile B-spline eğrisinin elde edilmesi verilmiştir. 4. bölümde deneysel çalışmalar sunulmuş olup, 5. bölümde ise sonuçlar verilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. B-spline Eğrileri

Gerçek nesnelerin dijital ortama taşınip tekrardan modellenmesi birçok farklı alvea kullanılmaktadır. Gerçek nesnelere elde edilen noktalardan nesnenin bilgisayar ortamında tekrar elde edilmesi B-spline eğrileri ile gerçekleştirilmektedir. Matematiksel olarak  $k$ . dereceden bir B-spline eğrisinin tanımlanması Eşitlik 1'deki gibidir.

$$C(t) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t) \quad (1)$$

Burada  $P_i$   $i$ . kontrol noktasını ve  $t$  ise düğüm vektörünü ifade eder. B-spline temel fonksiyonu ( $N_{i,k}$ ) ise Eşitlik (2)'deki gibidir (Cox, 1972, De Boor, 1972).

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t-t_i)}{t_{i+k-1}-t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{(t_{i+k}-t)}{t_{i+k}-t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t) \quad (2)$$

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & t_i \leq t < t_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2. Guguk Kuşu Arama Algoritması

Guguk kuşu arama (CS) algoritması Yang ve Deb (2009) tarafından sürekli problemlerin çözümü için geliştirilmiştir (Yang ve Deb, 2010). Ön çalışmalar, algoritmanın çok umut verici olduğunu ve PSO gibi mevcut algoritmalarından daha iyi performans sergileyebileceğini göstermiştir. CS yönteminin temeli üç ideal kurala dayandırılmaktadır:

- Her guguklu bir vea bir yumurta bırakır ve rastgele seçilmiş bir yuvaya bırakılır;
- Yüksek kaliteli yumurta (çözümler) ile en iyi yuvalar gelecek nesillere taşınır;
- Mevcut ev sahibi yuvalarının sayısı sabittir ve bir ev sahibi,  $p_a \in [0,1]$  olasılık dahilinde yabancı bir yumurta keşfedebilir. Bu durumda ev sahibi kuş, yumurtayı atabilir veya yuvayı terk ederek yeni bir yerde tamamen yeni bir yuva inşa edebilir.

Bu üç kural esas alınarak, CS yönteminin temel adımları Şekil 1'de gösterilen sözde kod ile özetlenebilir.

```

begin
f(x) amaç fonksiyonu olmak üzere;  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ 
 $n$  adet ev sahibi yuvaya sahip başlangıç popülasyonu üret.
 $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
while ( $t < \text{Maksimum İterasyon}$ )
L'evy uçuşu ile rastgele bir guguk kuşu al.
Uygunluk değerini hesapla ( $F_j$ )
İndisi  $j$  olan rastgele bir yuva seç ( $j <= n$ )
if ( $F_j > F_j$ ),
 $j$ . yuvayı yeni çözümlerle değiştir.
end
Kötü yuvaların bir kısmını  $p_a$  olasılığına göre terk et.
[ve L'evy uçuşları ile yeni konumlarında yenilerini oluştur]
En iyi çözümleri sakla.
Çözümleri sırala ve en iyi sonucu bul.
End while

```

Şekil 1. CS yönteminin sözde kodu (Yang ve Deb 2010)

### 3. Guguk Kuşu Arama Algoritması ile B-Spline Eğrilerinin Elde Edilmesi

Günümüzde bilgisayar destekli tasarım ve modelleme birçok teknolojik gelişmenin temelini oluşturmaktadır. Gerçek nesnelerin bilgisayar

ortamında oluşturulması modelleme ve tasarım alanlarının temelini oluşturmaktadır. Matematiksel işlevler modelleme ve tasarımda, gerçek dünyadaki nesnelere elde etmek için çözüm bulmada yeterli olmamaktadır. Elde edilmek istenen nesneyi tasarlarken birçok parametre olabilir. Dolayısıyla, bu tür problemleri çözmek için yapay zeka teknikleri geliştirilmiştir. Bu makalede, bilgisayarlı modelleme alanında kullanılan B-spline eğri tahmininde CS yöntemi kullanılmıştır. Çözümü aranan problem, verilen bir nokta bulutunu en ideal şekilde temsil edecek eğrinin bulunmasıdır. Önerilen yöntemin daha iyi anlaşılması için, B-spline eğri uydurma probleminin ana çerçevesi aşağıdaki adımlarda anlatılmıştır.

1. Üzerinde eğri uydurulacak nokta bulutu  $F_i$ , ( $i = 0,1,2, \dots, G$ ) şeklinde olsun. Bu nokta bulutu içinde CS algoritması ile ( $Q_i$ , ( $i = 0,1,2, \dots, g$ )  $g < G$ ) gibi bazı noktalar düğüm noktası olarak seçilir.

2. Düğüm noktaları belirlendikten sonra düğüm vektörü hesaplanır. Literatürde birçok düğüm vektörü hesaplama yöntemi mevcuttur. Bu çalışmada B spline eğri parametrisasyonunda daha esnek olduğu için Centripetal metodu (Lee, 1989) kullanılmıştır. Centripetal düğüm hesabı Eşitlik 4-6'ya göre yapılmaktadır.

$$\beta_0 = 0, \beta_g = 1 \tag{4}$$

$$\beta_i = i - 1 + \frac{\sqrt{|Q_i - Q_{i-1}|}}{\sum_{j=0}^g \sqrt{|Q_j - Q_{j-1}|}} \tag{5}$$

$$|Q_i - Q_{i-1}| = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \tag{6}$$

$\beta$  Centripetal düğüm,  $x_i$  ve  $y_i$   $i$ . noktanın kordinat değerlerini temsil etmektedir.

3. Centripetal düğüm vektörü hesaplandıktan sonra, B-spline düğüm noktaları Eşitlik 7'deki gibi hesaplanır.

$$u_{j+d} = \frac{1}{d} \sum_{i=j}^{j+d} u_i \quad j = 1, \dots, g - d \tag{7}$$

Burada  $d$  ifadesi, B-spline eğri derecesini ifade etmektedir.

4. B-spline eğriler  $P=QxR$  matris formunda ifade edilebilirler. Eşitlikteki  $R$ , B-spline harmanlama (Eşitlik 2 ve 3) fonksiyonlarından elde edilir.  $P$  ise

B-spline kontrol noktalarını ifade eder ve  $P=QxR-I$  eşitliği ile hesaplanır.

5.  $P$  değeri hesaplandıktan sonra B-spline Eğri tahmini Eşitlik 8 kullanılarak yapılır.

$$S(t) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t) \tag{8}$$

6. Son olarak tamin edilen veriler ile gerçek veriler arasındaki toplam hata Eşitlik 9 ile elde edilir.

$$\text{Hata} = \sqrt{\sum_{i=0}^G (F_i - S_i)^2} \tag{9}$$

Önermiş olduğumuz yöntem ile en az hata bulmak için yukarıdaki adımlar tekrarlanır. En ideal B-spline eğrisini bulmak için kullanılan uygunluk fonksiyonları sırasıyla Eşitlik 10-12'de verilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(g(t_i) - f(t_i))^2} \tag{10}$$

$$AIC = n * \ln(MSE) + 2(2 * Nod + p) \tag{11}$$

$$BIC = n * \ln(MSE) + \ln(n) * 2 * (2 * Nod + p) \tag{12}$$

Burada MSE ortalama karesel hata,  $g(t_i)$  tahmin edilen değerler,  $f(t_i)$  gerçek değerler, AIC (Akaike 1973, Akaike 1974) Akaike bilgi kriteri, BIC (Schwarz 1978) Bayes bilgi kriteri,  $Nod$  düğüm sayısını ve  $p$  ise eğri derecesini ifade etmektedir.

#### 4. Deneysel Çalışmalar

Eğri uydurma problem için literatürde kullanılan 5 farklı fonksiyon ele alınmıştır. Fonksiyon tanımları ve değer aralıkları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** B-spline eğri uydurma problemi için kullanılacak fonksiyonlar

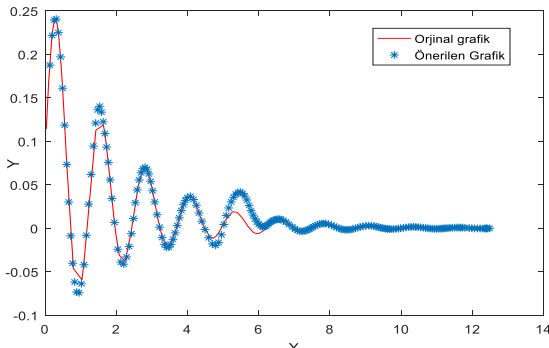
Fonk. No	Tanım	Değer Aralığı
1	$F(x) = 0.2e^{-0.5x} \sin 5x + 4$	$x \in [0, 4\pi]$
2	$F(x) = \frac{10x}{(1 + 100x^2)}$	$x \in [-2, +2]$
3	$F(x) = 0.5 + 0.5e^{-5(x-\frac{\pi}{2})^2} \sin(4\pi x)$	$x \in [0, \pi]$
4		$x \in [0, 1]$

	$F(x) = \frac{1}{2.3935} \left( 1.5 \exp\left(-\frac{(x-0.1)^2}{0.3}\right) + 0.1 \exp\left(-\frac{(x-0.5)^2}{2}\right) + 2 \exp\left(-\frac{(x-0.8)^2}{0.02}\right) \right)$	
5	Titanium Heat Data Fonksiyonu. Matlab R2017a ile elde edilmiştir.	

Yapılan çalışmalar Matlab R2017a platformunda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için 8 GB Ram ve Intel Core i5 işlemcisine sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Bütün fonksiyonlar için B-spline derecesi 3, CS yöntemi için popülasyon boyutu 50 ve iterasyon sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Her bir fonksiyon için algoritma 5 kez bağımsız olarak çalıştırılmıştır. Her bir çalıştırma için sırasıyla düğüm sayısı, minimum MSE (Min. MSE), maksimum MSE (Max MSE), ortalama MSE (Ort. MSE), BIC, AIC ve hesaplama süresi elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 2’de verilmiştir. Örnek olarak Tablo 2’ye baktığımızda *Fonksiyon 1* (Fonk. 1) için düğüm sayısı 93, min MSE 0.009334, max MSE 0.012873, ort. MSE 0.010591, BIC 1261 AIC 403 ve hesaplama süresi 3.1875 saniye olarak elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Kullanılan 5 farklı fonksiyon için elde edilen değerler

	Fonk.1	Fonk.2	Fonk.3	Fonk.4	Fonk.5
Nokta Sayısı	200	90	200	200	49
Düğüm Sayısı	93	30	88	88	26
Min MSE	0.009334	0.00975	0.01103	0.0153	0.01417
Max MSE	0.012873	0.01505	0.01749	0.0238	0.06844
Ort. MSE	0.010591	0.01247	0.01318	0.0178	0.03290
BIC	1261	280	1216	1237	441
AIC	403	96	418	439	258

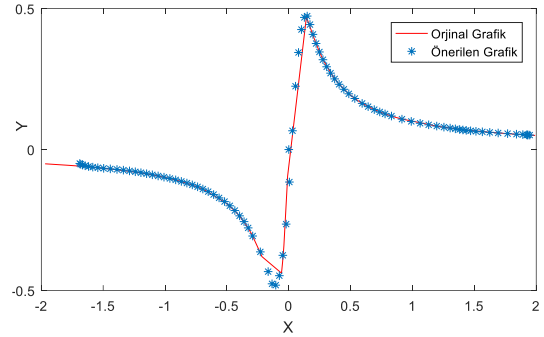


**Şekil 2.** *Fonksiyon 1* için gerçek ve tahmini eğriler

Tablo 3’teki *Fonksiyon 1*’in sonuçlarına bakıldığında, Min MSE değeri diğer araştırmacıların elde etmiş olduğu sonuçtan yüksek olmasına karşın Max MSE değeri ile Ort. MSE değeri çok daha düşük çıkmıştır.

**Tablo 3.** *Fonksiyon 1* için önerilen algoritma ile elde edilen sonuçların diğer çalışmalarla karşılaştırılması

O. Valenzuela ve ark. 2013			
Düğüm Sayısı	Min MSE	Max MSE	Ort. MSE
10	0.00241	0.0915	0.0208
Önerilen Algoritma			
Düğüm Sayısı	Min MSE	Max MSE	Ort. MSE
93	0.00933	0.012873	0.010591

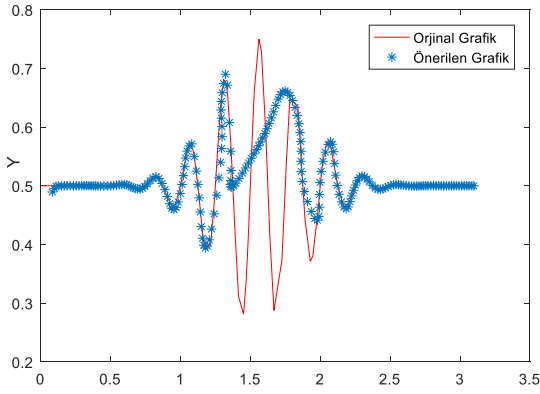


**Şekil 3.** *Fonksiyon 2* için gerçek ve tahmini eğriler

Tablo 4’deki *Fonksiyon 2*’in sonuçlarına bakıldığında, MSE değeri diğer araştırmacıların elde etmiş olduğu sonuçtan daha düşük çıkmıştır.

**Tablo 4.** *Fonksiyon 2* için önerilen algoritma ile elde edilen sonuçların diğer çalışmalarla karşılaştırılması

	Schwetlick ve Schutze, 1995	Yuan Yuan ve ark.2013.	Önerilen Algoritma
MSE	0.0739568	0.067471	0.009752

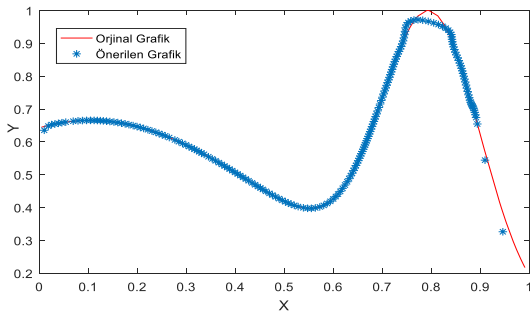


**Şekil 4.** Fonksiyon 3 için gerçek ve tahmini eğriler

Fonksiyon 3 için elde edilen sonuçların diğer çalışmalarla karşılaştırılması Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'e bakıldığında Min MSE değeri daha yüksek çıkmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi şeklin zorluğundan dolayı önerilen algoritma B-spline eğrisini tam olarak elde edememiştir. Fakat Ort. MSE ile Max. MSE değerleri diğer çalışmalara göre daha düşük olarak elde edilmiştir.

**Tablo 5.** Fonksiyon 3 için önerilen algoritma ile elde edilen sonuçların diğer çalışmalarla karşılaştırılması

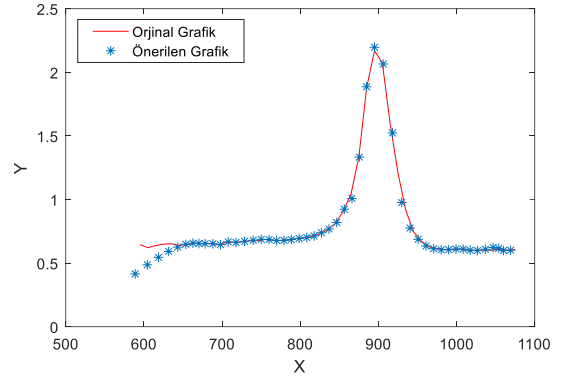
O. Valenzuela ve ark.2013			
Düğüm Sayısı	Min MSE	Max MSE	Ort. MSE
10	0.0094	0.2170	0.0649
Önerilen Algoritma			
Düğüm Sayısı	Min MSE	Max MSE	Ort. MSE
88	0.01103	0.01749	0.0131



**Şekil 5.** Fonksiyon 4 için gerçek ve tahmini eğriler

Fonksiyon 4 için elde edilen B-spline eğrisi Şekil 5'te verilmiştir. Fonksiyon 4 literatürde kullanılmasına rağmen ilgili araştırmacılar tarafından gerekli bulgular sunulmamıştır (Yuan, Chen vd., 2013). Bu çalışmada Fonksiyon 4 için elde edilen bulgular Tablo 2'de sunulmuştur.

Fonksiyondan elde edilen eğriye ayrıca görsel olarak bakıldığında CS ile hemen hemen gerçek eğri ile benzer bir eğri elde edilmiştir.



**Şekil 6.** Fonksiyon 5 için gerçek ve tahmini eğriler Literatürde Titanium Heat Data olarak geçen Fonksiyon 5 için elde edilen eğri Şekil 6'da verilmiştir. Eğri ile ilgili veriler ise Tablo 6'da sunulmuştur. Elde edilen hata oranıyla diğer araştırmacıların hata oranı birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.** Fonksiyon 5 için önerilen algoritma ile elde edilen sonuçların diğer çalışmalarla karşılaştırılması

	De Boor ve Rice 1968	Jupp 1978	Yuan Yuan ve ark.2013	Önerilen Algoritma
Knot Value	5	5	6	30
Min MSE	0.01305	0.01227	0.01174	0.01417

#### 4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada doğadaki bazı guguk kuşu türlerinin parazit davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş olan CS algoritması ile B-spline eğri tahminini gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada 5 farklı test fonksiyonu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer sonuçlarla kıyaslanmıştır. Ayrıca CS ile elde edilen eğriler orijinal eğriler ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Deneysel sonuçlar incelendiğinde önerilen algoritmanın Fonksiyon 3 hariç diğer 4 fonksiyondan elde ettiği eğri ile gerçek eğriler birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Önerilen yöntemin literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Bu sebepten dolayı CS yönteminin, B-spline eğri tahmininde alternatif bir optimizasyon yöntemi olduğu görülmüştür.

## Kaynaklar

- Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. Second international symposium on information theory, Budapest, Akademiai Kiado.
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. . IEEE Transactions on Automatic Control 19(16):716–723.
- Barnhill, R. E. (1992). Geometry processing for design and manufacturing, SIAM.
- Burchard, H. G. (1974). Splines (with optimal knots) are better. *Applicable Analysis* 3(4): 309-319.
- Cox, M. G. (1972). The numerical evaluation of B-splines. *Journal of Mathematic Application* 10: 134-149.
- De Boor, C. (1972). On calculating with B-splines. *Journal of Aproximate Theory* 10: 50-62.
- De Boor, C. (2001). *A Practical Guide to Splines (Applied Mathematical Sciences Vol. 27)*, Springer-Verlag, New York.
- De Boor, C. R., J. R. (1968). *Least Squares Cubic Spline Approximation Variable Knots*. Computer Science Technical Reports, Purdue University.
- De Boor, C., Rice, J.R., (1968). *Least squares cubic spline approximation: 1. Fixed knots*. CSD Tr. 20. Computer Science Department" Purdue University, Lafayette, Indiana.
- Dierckx, P. (1995). *Curve and surface fitting with splines*, Oxford University Press.
- Farin, G. E. (2002). *Curves and surfaces for CAGD: a practical guide*, Morgan Kaufmann.
- Farin, G.E., Hoschek, J., Kim, M.-S. (2002). *Handbook of computer aided geometric design*, Elsevier.
- Gálvez, A., Iglesias, A. (2011). Efficient particle swarm optimization approach for data fitting with free knot B-splines. *Computer-Aided Design* 43(12): 1683-1692.
- Gálvez, A. Iglesias, A. (2012). Article swarm optimization for non-uniform rational B-spline surface reconstruction from clouds of 3D data points. *Information Sciences* 192: 174-192.
- Gálvez, A., Iglesias, A. (2013). A new iterative mutually coupled hybrid GA–PSO approach for curve fitting in manufacturing. *Applied Soft Computing* 13(3): 1491-1504.
- Gálvez, A., Iglesias, A., Avila, A., Otero, C., Arias, R., Machado, C. (2015). Elitist clonal selection algorithm for optimal choice of free knots in B-spline data fitting. *Applied Soft Computing* 26: 90-106.
- Gálvez, A., Iglesias, A., Puig-Pey, J. (2012). Iterative two-step genetic-algorithm-based method for efficient polynomial B-spline surface reconstruction. *Information Sciences* 182(1): 56-76.
- Hoschek, J., Lasser, D., Schumaker, L.L. (1993). *Fundamentals of computer aided geometric design*, AK Peters, Ltd.
- Jupp, D.L.B. (1978). *Approximation to Data by Splines with Free Knots*. *SIAM Journal on Numerical Analysis*: 328-343
- Lee, E.T.Y. (1989). *Choosing Nodes in Parametric Curve Interpolation*. *Computer-Aided Design* 21(6): 363-370.
- Ma, W., Kruth, J.-P. (1995). Parameterization of randomly measured points for least squares fitting of B-spline curves and surfaces. *Computer-Aided Design* 27(9): 663-675.
- Ma, W. Kruth, J.-P. (1998). *NURBS curve and surface fitting for reverse engineering*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 14(12): 918-927.
- Molinari, N., Durand, J.-F., Sabatier, R. (2004). Bounded optimal knots for regression splines. *Computational statistics & data analysis* 45(2): 159-178.
- Patrikalakis, N. M., Maekawa, T. (2009). *Shape interrogation for computer aided design and manufacturing*, Springer Science & Business Media.
- Piegl, L., Tiller, W. (2012). *The NURBS book*, Springer Science & Business Media.
- Pottmann, H., Leopoldseder, S., Hofer, M., Steiner, T., Wang, W. (2005). *Industrial geometry: recent advances and applications in CAD*. *Computer-Aided Design* 37(7): 751-766.
- Precioso, F., Barlaud, M., Blu, T., Unser, M. (2003). Smoothing B-spline active contour for fast and robust image and video segmentation.

- Image Processing, 2003. ICIP 2003. Proceedings. 2003 International Conference on, IEEE.
- Rice, J.R., Saloin, M. (1969). The approximation of functions, Addison-Wesley Reading, Mass.
- Sarfraz, M., Raza, S.A. (2001). Capturing outline of fonts using genetic algorithm and splines. Information Visualisation, 2001. Proceedings. Fifth International Conference on, IEEE.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics* 6(2): 461-464.
- Schwetlick, H., Schutze, T. (1995). Least-Squares Approximation by Splines with Free Knots. *Bit* 35(3): 361-384.
- Unser, M., Aldroubi, A., Eden, M. (1993). B-spline signal processing. II. Efficiency design and applications. *IEEE transactions on signal processing* 41(2): 834-848.
- Ülker, E., Arslan, A. (2009). Automatic knot adjustment using an artificial immune system for B-spline curve approximation. *Information Sciences* 179(10): 1483-1494.
- Valenzuela, O., Pasadas, M., Rojas, I., Guillen, A. Pomares, H. (2013). Automatic Knot Adjustment For B-Spline Smoothing Approximation Using Improved Clustering Algorithm. 2013 Ieee International Conference on Fuzzy Systems (Fuzz - Ieee 2013).
- Varady, T., Martin, R.R., Cox, J. (1997). Reverse engineering of geometric models—an introduction. *Computer-aided design* 29(4): 255-268.
- Yang, X.-S. Deb, S. (2010). Engineering optimisation by cuckoo search. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation* 1(4): 330-343.
- Yoshimoto, F., Harada, T., Yoshimoto, Y. (2003). Data fitting with a spline using a real-coded genetic algorithm. *Computer-Aided Design* 35(8): 751-760.
- Yoshimoto, F., Moriyama, M., Harada, T. (1999). Automatic knot placement by a genetic algorithm for data fitting with a spline. *Shape Modeling and Applications, 1999. Proceedings. Shape Modeling International'99. International Conference on, IEEE.*
- Yuan, Y., Chen, N., Zhou, S. (2013). Adaptive B-spline knot selection using multi-resolution basis set. *IIE Transactions* 45(12): 1263-1277.