



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI SU DAMLACIKLARI İLE B-SPLİNE
EĞRİ TAHMİNİ

Kübra UYAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2017
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Kübra UYAR tarafından hazırlanan "Akıllı Su Damlacıkları ile B-Spline Eğri Tahmini" adlı tez çalışması 19.01.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy~~ ~~çokluğu~~ ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Yrd. Doç.Dr. Onur İNAN

Danışman

Doç.Dr. Erkan ÜLKER

Üye

Yrd. Doç.Dr. Ersin KAYA

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YILMAZ
FBE Müdürü

Bu tez çalışması OYP tarafından 2015-OYP-075 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Kübra UYAR

19.01.2017

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKILLI SU DAMLACIKLARI İLE B-SPLINE EĞRİ TAHMİNİ

Kübra UYAR

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç.Dr. Erkan ÜLKER

2017, 67 Sayfa

Jüri

**Doç.Dr. Erkan ÜLKER
Yrd. Doç.Dr. Ersin KAYA
Yrd.Doç.Dr. Onur İNAN**

B-spline eğriler genellikle bilgisayar destekli tasarım(CAD), veri görselleştirme, yüzey modelleme ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır. B-spline eğrileri ile veri uydurma ters mühendislikte karşılaşılan zorlayıcı bir problemdir. Buna rağmen B-spline lar esnek olması ve güçlü matematiksel özelliklere sahip olmasından dolayı en çok tercih edilen tahmin eğrisidir. Bu özelliklerinden dolayı çok çeşitli şekilleri etkili bir şekilde sunabilirler. B-spline yaklaşımda kontrol ve düğüm noktalarının tahmini sonuç yaklaşırma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Buna ek olarak, mantıksız bir düğüm vektörü öngörülemez ve kabul edilemez bir şekil sunabilir. Literatürde, optimizasyon problemlerini çözmek için benzetimli tavlama, karınca koloni optimizasyonu ve parçacık sürü optimizasyonu gibi doğal olaylardan ilham alınarak gerçekleştirilen algoritmalara büyük ilgi gösterilmiştir. Ayrıca farklı türdeki eğriler için bazı yaklaşım ve metotlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada doğadaki doğal su damlacıklarının nehir üzerindeki hareketlerinden ilham alınarak gerçekleştirilen bir optimizasyon algoritması olan Akıllı Su Damlacıkları (ASD), B-spline eğri uydurmada kullanılmıştır. Bu algoritma doğal su damlacıklarının bazı temel unsurlarını ve su yatağı ile içinde akan su damlacıklarının eylem ve tepkilerini içermektedir. Bu çalışmada tahmini B-spline eğriyi üretecek optimal düğüm noktaları ASD ile seçilmektedir. Önerilen algoritmanın performansı literatürdeki bazı matematiksel test fonksiyonları kullanılarak test edilmiştir. Deneysel sonuçlar önerilen algoritmanın etkili sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı su damlacıkları algoritması, B-spline eğriler, doğal su damlacıkları, düğüm noktaları, metasezgisel, optimizasyon, sürü zekası, ters mühendislik.

ABSTRACT

MS THESIS

B-SPLINE CURVE APPROXIMATION WITH INTELLIGENT WATER DROPS

Kübra UYAR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN COMPUTER ENGINEERING**

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Erkan ÜLKER

2017,67 Pages

Jury

Assoc.Prof.Dr. Erkan ÜLKER

Asst.Prof Dr. Ersin Kaya

Asst. Prof.Dr. Onur İNAN

B-spline curves are usually used in computer aided design (CAD), data visualization, surface modeling and many other fields. Data fitting with B-spline curves is a challenging problem encountered in reverse engineering. However, B-spline curves are the most preferred approximation curve because they are very flexible and have powerful mathematical properties. Because of this feature, they can offer a large variety of shapes efficiently. Prediction of control and knot points has significant impact on the final approximation. In addition to this, an unreasonable knot vector may introduce unpredictable and unacceptable shape. In literature, there is great interest on the algorithms inspired by natural phenomena such as simulated annealing, ant colony optimization and particle swarm optimization to solve optimization problems. Besides, many approaches and methods have been developed for different types of curves. In this study, Intelligent Water Drops (IWD) algorithm which is a optimization algorithm inspired from natural movement of water droplets in the river has been used in the approximation of B-spline curve. This algorithm contains a few essential elements of natural water drops and actions and reactions that occur between river's bed and the water drops that flow within. In this study, optimal knot points which conduct approximate B-spline curve are selected by IWD. The performance of proposed method is tested by using some test functions in literature. Experimental results show that proposed algorithm gives effective results.

Keywords: Intelligent water drops algorithm, B-spline curves, natural water drops, knot points, metaheuristic, optimization, swarm intelligence, reverse engineering.

ÖNSÖZ

Bu çalışma sürecinde her türlü yardım ve fedakarlığı sağlayan, bana yol gösteren ve yönlendiren, iyi bir şekilde ilerlememi sağlayan, tecrübelerinden yararlanırken göstermiş oldukları hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Ahmet ARSLAN ve Doç. Dr. Erkan ÜLKER hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında sağlamış oldukları öğrenim bursu için TÜBİTAK BİDEB'e teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bana her zaman cesaret veren, üzerimde büyük hakları olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Kübra UYAR
KONYA-2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Önemi	2
1.2 Literatüre Katkısı	3
1.3 Tezin Organizasyonu	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
3.1. Parametrik Eğriler	10
3.1.1. Bezier Eğriler	10
3.1.2. B-Spline Eğriler	12
3.2. B-Spline Eğrilerde Düğüm Tahmini	16
3.3. Sezgisel ve Metasezgisel Algoritmalar	19
3.4. Sürü Zekâsı Optimizasyon Algoritmaları	20
3.5. Akıllı Su Damlacıkları Algoritması	20
3.5.1. Doğal Su Damlacıkları.....	20
3.5.2. Akıllı Su Damlacıkları.....	23
3.5.3. Akıllı Su Damlacıkları Yöntemi'nin İşlem Adımları	26
3.6. B-Spline Eğri Uydurmada Akıllı Su Damlacıklarının Kullanılması.....	29
3.6.1. Problemin Temsili.....	30
3.6.2. Kenar Seçimi.....	30
3.6.3. Lokal Toprak Güncelleme	31
3.6.4. Komşuluk Tabanlı Lokal Arama (Neighborhood-based Local Search) ...	31
3.6.5. Global Toprak Güncelleme.....	34
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	39
4.1. Önerilen Yöntem.....	39
4.2. Uygunluk Fonksiyonları.....	39
4.3. Geliştirilen Uygulama ve Deneysel Sonuçlar	41
4.3.1. Örnek Durum #1: Homojen Olmayan Kavissel Yapılar (Curvature Structures) için Adaptif Olmayan Düğüm Vektörleri ile Karşılaştırma	43
4.3.2. Örnek Durum #2: Schwetlick'in Metodu ile Karşılaştırılması	46
4.3.3. Örnek Durum #3: Adaptif Serbest Düğümlü Spline'ler (AFKS-Adaptive Free-Knots Splines) ve Lasso ile Karşılaştırılması.....	50
4.3.4. Örnek Durum #4: Alternatif Bazı Evrimsel Yaklaşımlar ile Karşılaştırılması	52

4.3.5. Tartışma	58
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
5.1. Sonuçlar.....	59
5.2. Öneriler ve Gelecekteki Çalışmalar	60
KAYNAKLAR	61
EKLER	64
EK-1: ASD ile B-spline Eğri Tahmininin Uygulama Ortamında Gerçekleştirilmesi	64
ÖZGEÇMİŞ	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

p_i	: Kontrol noktaları
$B_{i,n}$: Bernstein harmanlama fonksiyonu
$P(t), P(u)$: Parametrik eğri
$N_{i,n}$: B-spline harmanlama fonksiyonu
t, u	: Parametre
F_i	: Nokta bulutu
Q_i	: Veri noktaları
k	: Eğrinin mertebesi

Kısaltmalar

NURBS	: Non-Uniform Rational B-spline
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	: Bilgisayar Destekli İmalat
AIC	: Akaike'nin bilgi kriteri
BIC	: Bayes bilgi kriteri
ASD	: Akıllı Su Damlacıkları
GA	: Genetik Algoritmalar
PESA	: Pareto Zarflama-Temelli Seçim Algoritması

1 GİRİŞ

Mühendislik tasarımlarını geliştirmek, değiştirmek ve son hale getirmek için bilgisayarın ana unsur olarak kullanıldığı Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ve imalat işlemlerini kapsayan Bilgisayar Destekli İmalat (CAM); çalışma alanları ve problem çözüm yaklaşımları değerlendirildiğinde özellikle mühendislikte en popüler çalışma alanlarından birisidir. Var olan veriler ışığında arzu edilen model faktörlerinin (eğriler, noktalar) ve yapılarının (yüzey vb.) tahmini ve oluşturulması bilgisayar modellemenin problemleri arasındadır. Gerçek dünyadaki birçok nesnenin bilgisayar modelinin oluşturulmasında farklı yaklaşım ve metotlar kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi uzaydaki dağıtık veri noktalarından (nokta bulutu) eğrinin temsil edilmesidir. Nokta bulutlarından veri temsiliyle eğri uydurmada, endüstri standartlarından olan Bezier, B-spline yada NURBS eğri yüzeyler kullanılabilir. Bu çalışmada B-spline eğri modeli kullanılarak verilen nokta bulutuna en az hata ile yaklaşabilen yaklaşım eğrileri elde edilmeye çalışılmıştır. Eldeki çok sayıdaki veriden iyi bir parametrik eğri modeli bulabilmek için değişkenler olarak düğümlerle ilgilenilmiştir. Bunun yanı sıra, B-spline eğri uydurmada model arkasında bulunan eğri; kontrol noktalarının ve düğüm noktalarının tahmini ya da parametreleştirme yöntemleriyle de elde edilebilmektedir.

Yapılan tez çalışmasında sürü temelli yaklaşımların bir örneği olan Akıllı Su Damlacıkları (ASD) algoritmasının eğri uydurmaya nasıl uygulanabileceği üzerinde durulmuştur. Doğada bulunan doğal su damlacıklarının hareketlerinden ilham alınarak geliştirilmiş olan bu algorithmada başlangıç ve bitiş noktaları belirtilerek su damlacığının takip ettiği en iyi yol; eğri uydurmada kullanılacak olan ve var olan eğriyi en iyi şekilde temsil edecek noktalar kümesi (düğümler) olarak kabul edilmiştir.

Öncelikle bilinmeyen bir eğri üzerinde uzandığı yada bu eğriye yakın geçtiği varsayılan düzensiz noktalar kümesi oluşturulmuştur. Daha sonraki aşamada ise bu eğriyi en iyi şekilde tahmin eden parametrik değişkenler ASD algoritması kullanılarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada B-spline eğri uydurma probleminin çözümü için ters mühendislik yaklaşımı kullanılarak eğrinin düğüm vektörü ve kontrol noktaları gibi parametreleri elde edilmiş ve yaklaştırılmış bir eğri modeli oluşturulmuştur. Düğüm seçimi aşamasında ASD yöntemi kullanılmış fakat orjinal ASD algoritması üzerinde bazı modifikasyonlar yapılmıştır (Komşuluk tabanlı lokal arama adımının eklenmesi gibi). Araştırma sonuçlarının somutlaştırılması ve etkili bir şekilde görsel olarak

sunumu için bir uygulama geliştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarla önerilen algoritmanın B-spline eğri tahmini aşamasında etkili bir yaklaşım olduğu gösterilmiştir.

1.1 Tezin Amacı ve Önemi

B-spline eğri uydurma problemi literatürde üzerinde çalışılan önemli konulardan birisidir. Özellikle gürültülü veri kümesi ile B-spline eğri uydurma hem lineer olmayan bir optimizasyon problemi olmasından ve hem de yüksek hesapsal karmaşıklığa sahip olmasından dolayı deterministik olmayan stratejiler gerektirmektedir(Ülker, 2007). Problemin çözümü için bu yöntemin seçilmesinin en önemli sebebi yöntemin esnek ve hızlı yakınsama özelliğine sahip olmasıdır. B-spline eğri uydurma için önerilmiş olan bu algoritma sürü zekası temelli bir yaklaşım olup doğadaki su damlacıklarının hareketlerinden ilham alınarak oluşturulmuştur.

Sürü zekası bazı basit ajanlar yada yapay yaratıkların birlikte işbirliği yaparak karmaşık problemleri çözdüğü yapay zekanın bir çalışma alanıdır. Doğadan ilham alınarak geliştirilen sürü temelli algoritmalar genellikle optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılmaktadır(Shah-Hosseini, 2012a).

Literatürde yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde ASD algoritmasının farklı türdeki problemleri çözmek için kullanıldığı görülmüştür. Bu problemlere gezgin satıcı problemi, araç yönlendirme problemive robot yolu planlama problemiörnek verilebilir(Duan ve ark., 2008; Kamkar ve ark., 2010; Kesavamoorthy ve ark., 2011; Kayvanfar ve Teymourian, 2014; Teymourian ve ark., 2016).

Bu tez çalışmasında düzgün bir eğri bulmak için uydurma hatasının minimizasyonu amaçlanmıştır. Eğrinin düğümlerinin ve doğal olarak kontrol noktalarının bulunması için sezgisel bir yöntem önerilmiştir. Taranan noktalar kümesi ve uydurulan eğri arasındaki uydurma hatasının minimizasyonu için önerilen yöntemde;i) düğüm yerleşimleri ve sayıları ayarlanmış, ii)düğümlere uygun kontrol noktaları belirlenmiş, iii) düğüm ara değerlerini bulan bir parametrizasyon kullanılmış ve parametrik eğri modeli yeniden inşa edilmiştir.

Uygunluk fonksiyonları tanımlanarak eğriyi en iyi şekilde temsil edecek noktaların düğüm olarak seçilmesi sağlanmıştır. Hata değerlerinin hesaplanmasında ve karşılaştırılmasında öklid hatası kullanılmıştır.Düğüm optimizasyonunda iseAkaike'nin Bilgi Kriteri (AIC) ve Bayes Bilgi Kriteri (BIC) kullanılarak aday modeller arasından en iyisi seçilmiştir.

Sayısal örnekler ve elde edilen sonuçların grafiksel sunumu ile önerilen metodun etkinliği ve verimliliği gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda ilgili yöntemin eğri uydurmada başarılı olup iyi sonuçlar verdiği ispatlanmıştır.

1.2. Literatüre Katkısı

Literatüre bakıldığında; parçacık sürü, karınca koloni ve ateş böceği gibi sürü temelli bazı algoritmalar B-spline eğri uydurmadakullanılmıştır(Valenzuela ve Pasadas, 2010; Gálvez ve Iglesias, 2011; Xiao ve ark., 2012; Galvez ve Iglesias, 2013a). Sürü temelli metasezgisel bir algoritma olan ASD ise B-spline eğri uydurmaya ilk defa uygulanmış olup diğer bazı yöntemlerle karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmada var olan ASD yöntemine problemin çözümü açısından önemli olan bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Eğrilik yarıçapı kavramı eklenerek bazı noktaların gereksizce seçilmesi engellenmiştir. Bu değer deneysel sonuçlara bağlı olarak yarı otonom bir şekilde belirlenmiştir. Orijinal ASD 'nin opsiyonel adımlarından biri olan lokal arama için komşuluk tabanlı lokal arama önerilmiş ve daha iyi yolların seçilme ihtimali arttırılmıştır. Algoritma adımlarına eklenmiş olan bir diğer kavram ise lokal arama adımında kullanılacak olan çeşitlilik oranıdır. Su damlacığının takip edeceği yollar çeşitlendirilip daha iyi yolların bulunabilme olasılığı arttırılmaya çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda çeşitlilik oranının yerel minimumlara takılmayı engellediği görülmüştür.

Sezgisel tekniklere dayanan algoritmalar uygun maliyetle optimal parametrelerin bulunmasında iyi bir yaklaşım sağlamaktadır. Sunulan araştırmada taranan noktalar kümesi ve uydurulan eğri arasındaki uydurma hatasının minimizasyonu önerilen yöntem ile sağlanmıştır.

1.3. Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde yapılan çalışma tanıtılmış, amacı ve önemi belirtilmiş ve literatüre katkısından söz edilmiştir.

İkinci bölümde tez çalışmasının konusu olan B-spline eğri uydurma ve ASD yöntemi ile ilgili literatür taranmış ve geçmiş yıllarda yapılmış olan akademik çalışmalardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılacak olan materyal ve B-spline eğri uydurma için kullanılacak olan yöntemden bahsedilmiştir. Bu kapsamda parametrik eğri türlerinden olan ve endüstride sıkça kullanılan Bezier, B-Spline ve NURBS eğrilerden bahsedilmiş olup B-spline eğri düğüm tahmininin nasıl yapıldığı matematiksel olarak açıklanmıştır. Sezgisel ve sürü zekası optimizasyon algoritmalarından bahsedilmiş ve ASD algoritmasının temel adımları sıralanmıştır. Bu bölümün sonunda B-spline eğri uydurmada ASD yönteminin nasıl uygulanacağı anlatılmış ve işlem adımları açık bir şekilde ifade edilmiştir.

Dördüncü bölümde B-spline eğri uydurmada ASD yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Ayrıca ilgili yöntemin performansı ve başarısı literatürde kullanılan bazı benchmark fonksiyonları ile test edilmiştir. Bu yöntemin diğer yöntemlerle karşılaştırılması ve karşılaştırma sonuçları bu bölümde yer almaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçlar ile ilgili analizler yapılmış ve analiz sonuçları ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

Son bölümde sonuçlar özet olarak verilmiş, problemin çözümü için kullanılan yöntemin fonksiyonu vurgulanmış ve ileride yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur. Ayrıca ek olarak araştırma sonuçlarının daha iyi anlaşılması için geliştirilmiş olan uygulama arayüzü ve geliştirme ortamından bahsedilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde farklı eğri türleri için zaman içerisinde birçok yöntem geliştirilmiştir. En küçük hata metodu (Least square metot)(Pinel, 1997), ağırlıklandırılmış en küçük hata (Weighted least square)(Pinel, 1997; Alexa ve ark., 2003), hareketli en küçük kareler (Moving least square)(Levin, 1998; Lancaster ve Salk, 2009)ve Kalman fitresi(Huang ve ark., 2009) gibi farklı optimal kriter ve algoritmalar kullanılmıştır. Fakat optimal düğüm vektörlerinin çözümü ile ilgili çalışmalar yetersiz kalmıştır. Bunun nedenleri şu şekilde sıralanabilir: i) Geniş arama uzayına sahip düğüm optimizasyon problemlerindedüğüm sayısı ve bu düğümlerin konumları belirtilmiş olmalıdır. ii) Temel fonksiyonlar lineer değildir. Optimal yaklaştırmanın hesaplanması lineer olmayan arama uzayından dolayı hesapsal olarak daha zor olmaktadır.

Parametrik ve ilk önerilen eğri türü olan Bezier eğri ve yüzeyler birçok ayrıntılı modelleme probleminin üstesinden gelebilmesine rağmen bazı kısıtlama ve dezavantajlara sahiptir. B-spline eğriler ise bu tür olumsuzlukların üstesinden gelebilmek için yerel etki alanına sahip geçişme fonksiyonu kullanırlar. Buna göre eğrinin şekli bütün noktalara bağlı olmayıp sadece kendisine komşu birkaç kontrol noktasına bağlıdır(Ülker, 2007). B-spline eğrilerinin Bezier eğrilerine göre bir diğer avantajı ise B-spline eğrisinin derecesi ile kontrol noktaları sayısının birbirinden bağımsız olmasıdır. B-spline eğrilerin 1940'larda gündeme gelmesi veDe Boor'un(2006) bu konu ile ilgili çalışmasını yayınlamasıyla birlikte endüstride popülerlik kazanmıştır.B-spline eğrilerinin esneklik ve güçlü matematiksel özelliklerinin olması bu tür eğrilerin farklı akademik çalışmalarda kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Yoshimoto ve ark.(1999)B-spline ile veri uydurmak için iyi düğümleri bulmayı hedefleyen bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Eğri uydurma probleminde sıklıkla karşılaşılan global optimum bulma probleminin üstesinden gelebilmek için genetik algoritma kullanarak bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım ile düğümlerin sayısı ve yerleşimleri eş zamanlı olarak tanımlanabilmiştir.

B-spline eğri tahmini için Li ve ark.(2005) tarafından yapılmış olan çalışmada bir adaptif düğüm yerleşim algoritması tanımlanmıştır. Eğrinin eğrilik karakteristiğini açığa çıkarmak için dijital bir süzgeç kullanılarak yumuşatılmıştır. Son olarak da düğümler otomatik bir biçimde eğriye yerleştirilmiştir.

Tirandaz ve ark.(2011) B-spline eğrileri kullanarak eğri eşleştirme ve karakter tanıma üzerine çalışmışlardır. Yapılan bu çalışmada objenin sınırları üzerindeki baskın (dominant) noktalar Yerel Kavissel Maksimumlar (Local Curvature Maximum - LCM) yöntemiyle, kontrol noktaları ise En Küçük Karesel Hata metodu (least square method) ile hesaplanmıştır. Sonuç olarak, benzer karakterler örnek karakterler veri setinden yararlanılarak belirlenmiştir.

Valenzula ve Pasadas(2010) yapmış oldukları çalışmada kübik spline yaklaştırmada düğüm yerleştirme problemi için benzetimli tavlama yöntemini kullanmışlardır. Veri noktalarının ayırık eğrilikleri, alçak geçiren (low pass) filtreler ile yumuşatılmıştır. Geniş bir veri kümesinden iyi bir B-spline eğri modeli elde edebilmek için düğümler değişkenler olarak alınmış ve bu düğümlerin yerleştirilmesiyapay bağıklık sistemi metodolojisinden ilham alınarak optimize edilmiştir.

Gálvez ve Iglesias(2011) uygun düğüm konumlarını otomatik olarak hesaplayabilmek için literatürdeki en önemli metaheuristik yaklaşımlardan biri olan parçacık sürü optimizasyon algoritmasını uygulamışlardır. Parçacık sürü optimizasyon metodunun algoritmanın performansını etkileyecek bazı parametrelere sahip olduğu ifade edilmiş ve bu parametrelerin teorik sonuçlar ve deneysel gözlemler sonucunda belirlendiği vurgulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bu parametreler özelleştirilmiştir.

Yuan ve ark.(2013b) Lasso yöntemi ile B-spline eğri uydurma için adaptif düğüm yerleştirme konusuna değinmişlerdir. Bu metodun kritik düşüncesi farklı seviyelerde eğriliğe sahip B-spline bazları içeren bir küme oluşturmaktır. Bazların alt kümesi gözlemlenen veriye bağlı olarak Lasso metodu vasıtasıyla seçilmiştir. Düğüm vektörleri baz fonksiyonlarının alt kümesine bağlı olarak tanımlanmıştır.

Valenzula ve ark.(2013) B-spline yumuşatma ile yaklaştırma için gelişmiş kümeleme algoritması kullanarak otomatik düğüm ayarlama üzerine çalışmışlardır. Bu yaklaşıma göre; yumuşatma yaklaştırma metodolojisine bağlı olarak iyi bir yaklaştırma elde edebilmek için bazı önemli noktalar vardır. Özellikle düğümleri çıktı fonksiyonunun çok daha uygun olduğu alanlara yerleştirmek önemlidir. Yapılan bu çalışmada, yaklaştırmanın davranışını belirleyen eşik değeri parametresi tanımlamaya ihtiyaç duyulmadan düğümler yerleştirilmiştir.

Gálvez ve Iglesias(2013a) metaheuristik ve doğal olaylardan ilham alınarak gerçekleştirilen bir yöntem olan Ateş Böceği Algoritması kullanarak B-spline eğri uydurma üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmada bu algoritmanın en belirgin

özelliklerinden biri olan arama mekanizması özelliği vurgulanmıştır. Yapılan bir diğer çalışmada (2013b) üretim endüstrisinde eğri uydurma için genetik algoritmalar ve parçacık sürü optimizasyonu algoritması kullanılarak hibrid bir yöntem geliştirilmiştir. Algoritmanın çalışmasını test etmek için beyzbol topu üzerinde bulunan dikişlerin oluşturduğu eğri modeli kullanılmıştır.

Talebitooti ve ark. (2015) yapmış oldukları çalışmada silindirik tankın şekil tasarımı optimizasyonu için çok amaçlı genetik algoritmalar ile bir çalışma sunmuşlardır. Optimum sayıda nokta kullanılarak silindirik tankın şekil tasarımı yapılmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte uygun bir tasarım için genetik algoritmalarda kullanılan çaprazlama, mutasyon oranı ve birey sayısı gibi parametrelerin değerlerinin ne olması gerektiği üzerinde çalışmalar yapılmış ve sonuçlar vurgulanmıştır.

Galvez ve ark. (2015) B-spline eğri uydurmada optimal bağımsız düğümlerin seçimi için elitist klonal seçme algoritması kullanmışlardır. B-spline eğrilerde düğüm ayarlama (adjustment) problemini çözmek için yapay bağışıklık sistemi paradigması üzerinde durulmuştur. Bu çalışmada çalışma zamanı ve parametrelerin ayarlanması metodun temel kısıtlaması olarak belirtilmiş fakat metasezgisel tekniklerde parametre ayarlamasının problem bazlı bir konu olduğu ve bu problemin kaçınılmaz olduğu vurgulanmıştır.

Schmitt ve Neuner(2015) B-spline eğrilerde düğüm hesabı üzerine yapmış oldukları çalışmada düğümlerin yerleri gibi düğüm sayısının hesaplanmasına izin veren bir yaklaşım sunmuşlardır. Her bir mevcut aralıktaki hata karelerinin kümülatif toplamına bakılarak belli bir lokasyona düğüm eklenmesine karar verilmektedir. Düğümün ekleneceği lokasyon Gauß-Markov modeli kullanılarak optimize edilmektedir. Önerilen yaklaşımın başarısı lineer ve lineer olmayan yaklaşımlarla karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Optimal sayıdaki B-spline kontrol noktalarının seçilmesi için Harmening ve Neuner(2016b) AIC ve BIC değerini kullanmışlardır. Buna ek olarak istatistiksel öğrenme teorisinin (statistical learning theory) yapısal risk minimizasyonu (structural risk minimization) temel alınarak bir metot geliştirilmiştir. Bu çalışma B-spline yüzeylerinin optimum kontrol noktalarının seçimi ile ilgili diğer bir çalışmayla tamamlanmıştır(Harmening ve Neuner, 2016a).

Son olarak Nenov(2016)B-spline eğri ve yüzeylerinin matamatiksel olarak temsil edilebileceğini savunmuştur. Yapılan çalışmada tek düze düğümler kullanılarak

eğri ve yüzeyler uygun en küçük karesel hata kullanılarak ikinci dereceden operatörlerin minimumu olarak tanımlanabilmiştir.

B-spline eğriler ile ilgili yapılan çalışmaların yanı sıra B-spline yüzeyler ile ilgili son yıllarda yapılan bazı çalışmalar da literatürde mevcuttur (Yamaura ve ark., 2015; Yang ve Wang, 2015; Norouzzadeh Ravari ve D. Taghirad, 2016; Peng ve ark., 2016; Yan ve ark., 2016). Yapılan bir çalışmada üç boyutlu bir uzayda dağıtık noktalar kümesi kullanılarak yumuşak (smooth) yüzeyler inşa edilmiştir (Gregorski ve ark., 2000). Aynı çalışma parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak NURBS yüzeyler için gerçekleştirilmiştir (Gálvez ve Iglesias, 2012). Kullanılan metot sayesinde herhangi bir yüzey parçasında alakalı bütün yüzey bilgilerinin (veri noktalarının parametrik değerleri, düğüm vektörleri, kontrol noktaları ve ağırlıkları) alınması sağlanmıştır. Galvez ve ark. (2012) polinomal B-spline yüzey inşası için genetik algoritma tabanlı iteratif iki adımlı bir metot sunmuşlardır. Veri noktalarının parametrik değerlerinin belirlenmesi ve yüzey düğüm vektörlerinin hesaplanmasıyla genetik algoritmalar iki adımda uygulanmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan ASD yönteminin benzer bir kullanımı literatürde yoktur. Yine de ASD yönteminin farklı problemlerin çözümünde kullanıldığı görülmektedir. Literatürde ASD ilk olarak (Shah-Hosseini, 2007) tarafından gezgin satıcı probleminin çözümünde kullanılmıştır. Bu çalışmalarda su damlacıklarının bazı özellikleri optimizasyon problemlerinin çözümü için adapte edilmiştir. Algoritmanın optimal sonuca hızlı yakınsadığı ve tatmin edici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışma ile ilk olarak mühendislik problemlerinde su damlacıklarının kullanılması fikrinin temeli atılmıştır.

Daha sonraki yıllarda bu yöntem farklı optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Shah-Hosseini (2009) ASD algoritması ve bu algoritmanın versiyonlarını gezgin satıcı problemi, çok boyutlu sırt çantası problemi ve otomatik çoklu seviye eşikleme için özelleştirmiştir. Ayrıca ASD yöntemi paralel işlemci çizgeleme (Mokhtari, 2015), tek ve çok amaçlı optimizasyon (Niu ve ark., 2013; Ong ve ark., 2013; Singh ve Saini, 2014; Moncayo–Martínez ve Mastrocinque, 2016), ayrık ve sürekli optimizasyon (Shah-Hosseini, 2008; Shah-Hosseini, 2012b) gibi problemlerin çözümünde kullanılmıştır.

Benzetimli tavlama, genetik algoritmalar, tabu arama ve karınca koloni gibi sezgisel algoritmalar araç yönlendirme problemi için sıkça kullanılmaktadır. Kamkar ve ark. (2010) araç yönlendirme problemi için önerilen yöntemi kullanmışlardır. Bu

çalışmada elde edilen sonuçlar diğer metasezgisel yöntemlerle karşılaştırılmış, ASD'nin optimum çözüme hızlı yakınsadığı ve tatmin edici sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

Shah-Hosseini (2013)'nin yapmış olduğu çalışmada, veri kümeleme için kullanılan K-means algoritması önerilen yöntemle geliştirilmiştir. İteratif tabanlı bir algoritma olan K-means yakınsamada hızlı olmasına rağmen başlangıç koşullarına bağlı olup lokal optimumlara yakalanma olasılığı fazladır. Bu çalışma ile başlangıç koşullarına bağımlılık kaldırılmış olup veri kümelerinin gruplandırılması konusunda başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Niu ve ark.(2013) tarafından yapılan çalışmada çeşitli uygulama alanları bulunan çok amaçlı işyeri planması için akıllı su damlacıkları yaklaşımı probleme uygun olarak özelleştirilmiştir. Yapılan çalışmada aynı zamanda akıllı su damlacıkları ile benzetimli tavlama yöntemleri karşılaştırılmıştır. Probleme yer alan önemli özelliklerin belirlenmesinde önerilen yaklaşımın tatmin edici sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

Thilagavathi ve Thanamani(2014) yapmış oldukları yüksek performanslı bilgi işlem ortamı planlama ile hibrid bir yöntem sunmuşlardır. Ateş böceği algoritması ile birleştirilen ASD ile yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre yaklaşımın başarılı olduğu ve daha az iterasyonla daha iyi sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir.

Graf teorisinde kullanılan bir kavram olan ve planlama, zaman çizelgeleme, tedarik zinciri, lojistik optimizasyonu gibi birçok problemin çözümünde kullanılan graf boyama işlemi Dadaneh ve ark.(2015) nin yapmış olduğu çalışmada akıllı su damlacıkları uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada algoritmanın sonuçları rastgele bir graf ve belli sayıda benchmark fonksiyonu üzerinde test edilmiştir. Ayrıca algoritma parçacık sürü optimizasyonu, karınca koloni optimizasyonu gibi bilinen algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlarda algoritmanın graf boyama için etkili olduğu, iyi sonuçlar verdiği ve diğer yöntemlerle yarışabileceği vurgulanmıştır.

Ayrıca Teymourian ve ark(2016) yetkilendirilmiş araç yönlendirme problemi için iyileştirilmiş akıllı su damlacıkları ile guguk kuşu arama algoritmasını birleştirerek bir çözüm sunmuşlardır. Araç yönlendirme problemini optimize etmek için kullanılan bu algoritmalar yeni özelliklerin ortaya çıkarılmasında etkili sonuçlar vermiştir. Algoritmaların iyileştirilmesinin amacı ise arama sürecinin çeşitlendirmesi ve yoğunlaştırılması arasındaki dengeyi kontrol etmektir. Bu iki algoritmalara ek olarak kullanılan lokal arama ve optimizasyon yöntemleriyle araç yönlendirme problemine çözüm aranmıştır. Kullanılan bazı benchmark fonksiyonları ile yöntemin başarısı gösterilmiş ve önerilen yöntemle benzer problemlerin çözülebileceği vurgulanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, iki ana başlık altında şu ögeler yer almaktadır. a) Bilgisayar destekli tasarım ve üretim alanında parametrik eğrilere sürü temelli optimizasyon algoritmalarının uygulanabilirliğini araştırmak ve b) Düğüm seçimi yapılarak alternatif parametrik eğriler üretmek. Devam eden alt başlıklarda parametrik eğriler olan Bezier ve B-spline eğrilerinin detayları verilmiştir. Sonrasında ise sürü temelli optimizasyon algoritmalarının kısa bir incelemesi ile birlikte önerilen yöntem ile ilgili kapsamlı bilgiler sunulmuştur.

3.1. Parametrik Eğriler

Verilen x ve y , t değerlerinin aralığında $x = f(t)$, $y = g(t)$ şeklinde tanımlanan fonksiyonlar ise, bu denklemde tanımlanmış olan $(f(t), g(t))$ sıralı ikililerin kümesine parametrik eğri denmektedir. Bununla birlikte bir eğriyi bütün olarak ifade etmek yerine belli kontrol noktaları boyunca parçalara ayırarak ifade etmek eğrinin matematiksel olarak gösterimini kolaylaştırmaktadır. Spline fonksiyonu; parçalı tanımlanan, sürekli ve bütün derecelerde türevlenebilir bir polinom fonksiyonudur. Bezier ve B-spline eğrileri parametrik eğri biçimleri olup kontrol noktaları esas alınarak oluşturulur. Kullanılan kontrol noktaları ve temel fonksiyonları ile eğri elde edilebilmektedir.

3.1.1. Bezier Eğriler

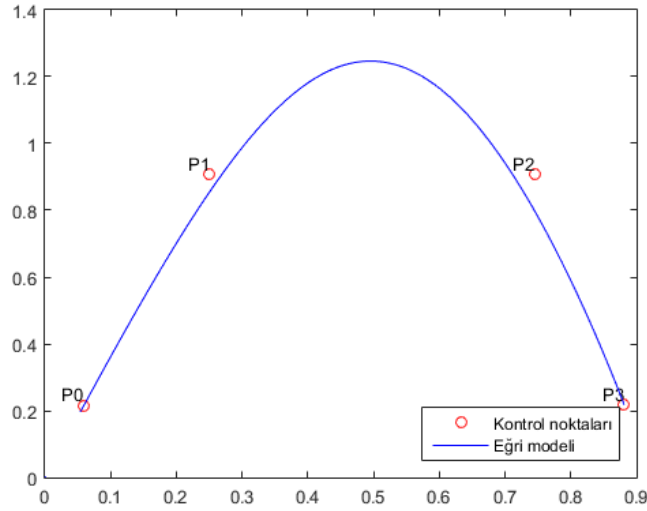
Bezier eğriler ilk defa 1959 yılında Paul de Casteljaou tarafından ileri sürülmüştür. 1970'li yıllarda Renault'taki Fransız mühendis Pierre Bezier (1974) tarafından otomobillerin tasarımında kullanılmasıyla birlikte popülerliği artmıştır.

Bezier eğrilerinin sahip olduğu özellikler sayesinde eğri tasarımında kullanışlı ve uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca bu eğrilerin programlanmasının kolay olması sayesinde birçok alanda büyük oranda kullanılmaktadır. Bu çalışma alanlarına başta bilgisayar grafikleri olmak üzere endüstriyel ve bilgisayar destekli tasarım, 3D modelleme ve vektör temelli çizim örnek verilebilir.

Pierre Bezier, $n + 1$ adet p_i kontrol noktası tarafından kontrol edilen $P(u)$ eğrisini matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlamaktadır (Ülker, 2007):

$$P(u) = \sum_{i=0}^n p_i B_{i,n}(u) \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde verilen $B_{i,n}(u)$ fonksiyonuna geçişme fonksiyonu denir. En basit haliyle 3. dereceden Bezier eğriler dört tane nokta (P_0, P_1, P_2, P_3) ile tanımlanmaktadır: iki uç nokta (P_0, P_3) ve iki kontrol noktası (P_1, P_2). Bu kontrol noktaları eğrinin şeklini tanımlarlar. Şekil 3.1 'e bakıldığında; eğri P_0 da başlar, P_1 e doğru gider ve P_2 istikametine giderek uç nokta olan P_3 e ulaşır.



Şekil 3.1. Kübik Bezier eğri

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi eğri P_1 ve P_2 üzerinden geçmez. Kübik Bezier olup denklemi aşağıdaki gibi açılmaktadır;

$$P(t) = \sum_{k=0}^n P_k B_k^n(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3 \quad (3.2)$$

Bu denklemde $P_k(x_k, y_k)$ vektörleri eğrinin kontrol noktaları olarak adlandırılır. Bezier geçişme fonksiyonlarının genel gösterimi ise aşağıda verilmiştir:

$$B_{i,n}(t) = C(n, i) t^i (1-t)^{n-i} \quad (3.3)$$

Bezier denklemleri t değişkenine bağlı parametrik değişkenler olup x ve y ye göre simetriktir. Ayrıca $[0,1]$ aralığında değişen t parametresi istenilen doğruluğa bağlı olarak $P_0 - P_3$ dilimini parçalara böler. $t = 0$ için $P(0) = P_0$ ve $P(1) = P_3$ tür. Bezier eğrisi başlangıçta $P_0 - P_1$ doğru dilimine bitişte de $P_2 - P_3$ doğru dilimine teğettir. Bezier denklemlerine ait geçişme fonksiyonları Bernstein polinomları olarak da adlandırılır. Geçişme fonksiyonunun değer üretiminde kullanılan $C(n, i)$ binom katsayılarıdır ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$C(n, i) = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (3.4)$$

Buna göre $n + 1$ adet kontrol noktasına sahip n . dereceden Bezier eğrilerinin denklemi daha açık bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n p_i \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (3.5)$$

3.1.2. B-Spline Eğriler

B-spline eğriler kontrol noktaları adı verilen köşe noktaları ile tanımlanmaktadır. Bu noktalar kullanılarak elde edilen eğriler kontrol noktalarından geçmemekte ve eğri bu noktaların konumlarına göre şekillenmektedir.

B-spline eğrileri Bezier eğrilerinin geliştirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Bezier eğrileri özellikle endüstride birçok ayrıntılı modelleme probleminin üstesinden gelebilmesine rağmen bazı kısıtlama ve dezavantajlara sahiptir. B-spline eğrileri bu tür dezavantajların üstesinden gelebilmek için yerel etki alanlarına sahip geçişme fonksiyonları kullanır. Kullanılan bu geçişme fonksiyonları kendilerine ait kısımlar dışında sıfıra eşittir. Bundan dolayı eğrinin şekli kendisine komşu olan birkaç kontrol noktasına bağlıdır. Her bir kontrol noktası için farklı bir geçişme fonksiyonu tanımlanmakta ve eğride yapılması istenen değişiklikler eğriyi lokal olarak etkilemektedir. B-spline eğrilerinin bir diğer avantajı ise bu eğrilerin derecesi ile kontrol noktalarının sayısının birbirinden bağımsız olmasıdır. Çünkü B-spline eğrinin derecesi Bezier eğrilerinde olduğu gibi kontrol noktası sayısına bağlı değildir. B-spline eğrilerde eğrinin derecesi en fazla kontrol noktası sayısı kadar olmaktadır. Bütün bu

avantajlarına karşın B-spline eğrilerinin bir zorluğu programlanmasının Bezier eğrilerine göre biraz daha zor olmasıdır(Ülker, 2007).

B-spline eğrilerinin matematiksel gösterimi Bezier'e benzer olup aşağıdaki gibidir:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n p_i N_{i,k}(u) \quad (3.6)$$

Geçişme fonksiyonlarının farklı olması Bezier ve B-spline eğrileri arasında bazı farklılıkları doğurur. Öncelikle u parametresinin alacağı değerler $[0,1]$ aralığında olmayabilir. Diğer önemli bir fark ise $N_{i,k}$ geçişme fonksiyonlarının derecesinin kontrol noktalarının sayısına bağlı olmamasıdır. Cox-deBoor özyinelemeli fonksiyonları B-spline eğrilerinin temelini oluşturur ve B-spline eğrilerinin geçişme fonksiyonları (3.7) ve (3.8) denklemlerinde verilmiş olan Cox-deBoor fonksiyonları kullanılarak hesaplanır. Her bir kontrol noktası için tanımlanan k .mertebedeni. normalleştirilmiş B-spline temel fonksiyonunun ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1, & t_i < u < t_{i+1} \\ 0, & \text{aksi taktirde} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{t_{i+k} - u}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \quad (3.8)$$

Nümerik hesaplama açısından, yukarıdaki matematiksel ifadede $0/0 \equiv 0$ kabulü yapılmaktadır. Burada $N_{i,k}$ mertebesi k olan i . temel fonksiyonu, u eğrinin parametresini ve t_i düğüm vektörünün elemanlarını temsil etmektedir.

Düğüm vektörü B-spline eğrinin formunu etkileyen önemli parametrelerden bir tanesidir. B-spline eğrisinin üniform, non- üniform veya açık, kapalı bir eğri olup olmadığı düğüm vektörü ile belirlenmektedir. B-spline eğrileri genel olarak 3'e ayrılmaktadır. Bunlar;

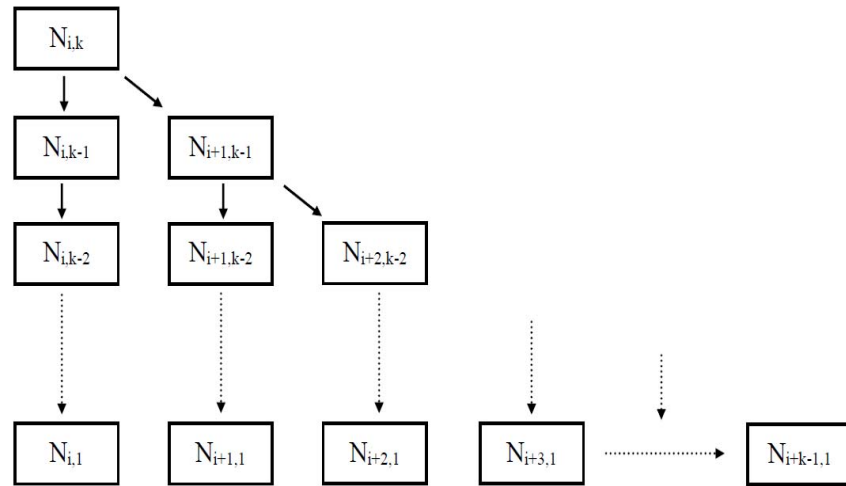
1. Açık Üniform B-spline eğriler
2. Açık Non-Üniform B-spline eğriler
3. Açık/Kapalı Periyodik B-spline eğriler

Düğüm vektörünün elemanlarının eşit aralıklı olup olmamasına bağlı olarak B-spline eğrisinin üniform veya non-üniform bir eğri olup olmadığına karar

verilmektedir. Bununla birlikte periyodik düğüm vektörleri kullanılarak, kapalı B-spline eğrileri oluşturulabilir.

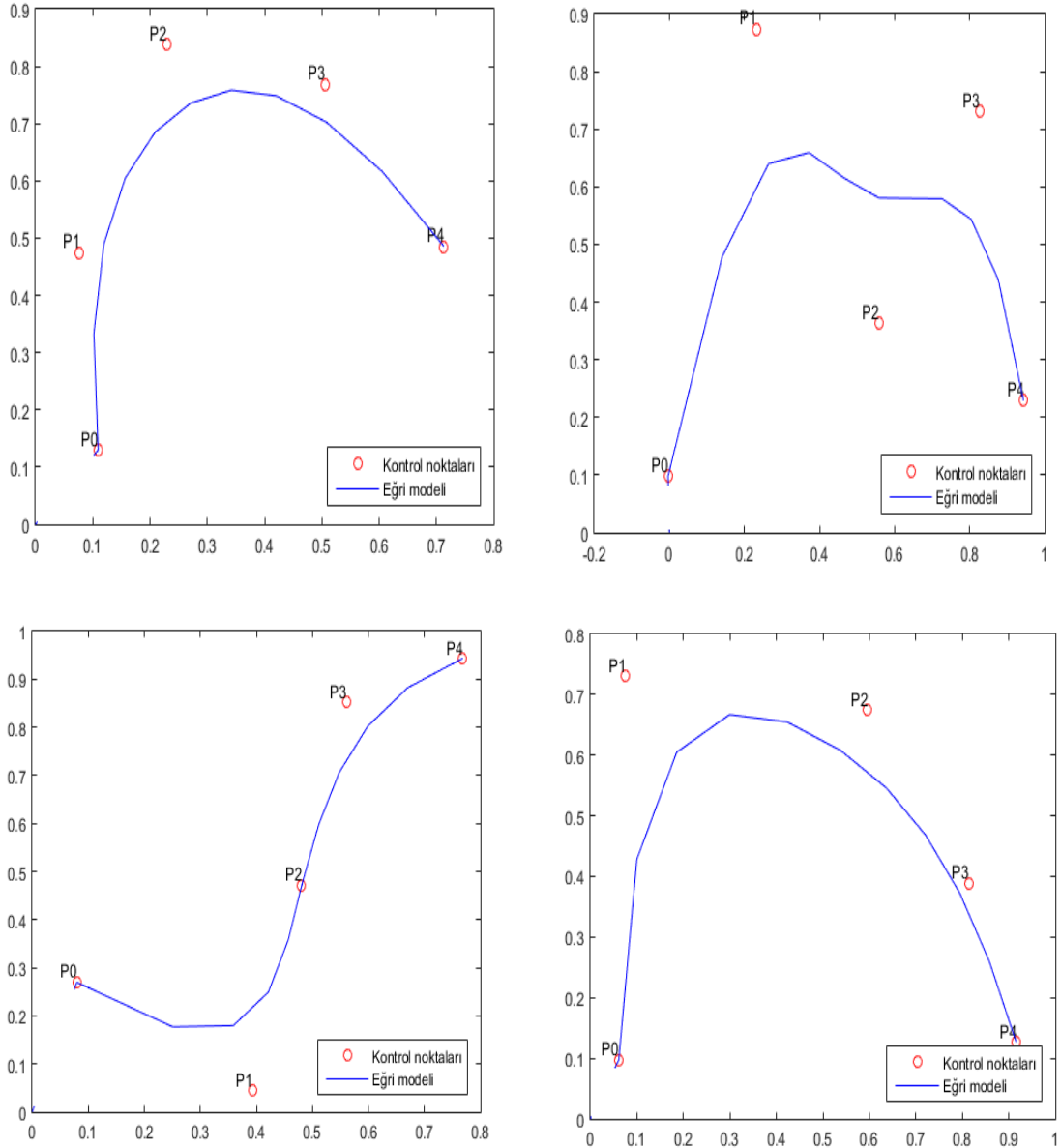
Üniform bir düğüm vektörü eşit aralıkla artan parametre değerlerine sahiptir. Vektörün elemanları 0'dan başlar ve maksimum değere kadar eşit aralıklı olarak artar. Normalleştirilmiş parametre aralığı kullanıldığında ise değerler 0 ile 1 arasında değişecektir. Yapılan çalışmada non-üniform açık B-spline eğrileri kullanılmıştır. Düğüm vektörünün ilk ve son elemanları eğrinin mertebesi kadar tekrar edilerek B-spline eğrisinin ilk ve son kontrol noktalarından geçmesi sağlanmıştır. Periyodik düğüm vektörünün elemanları ise 0 ile maksimum değere kadar değişecek olup elemanlar arasındaki fark eşittir ve tekrar eden düğüm vektörü parametresi yoktur.

Yukarıdaki formülasyona göre; k . dereceden bir temel fonksiyonu hesaplayabilmek için k 'dan düşük bütün derecede tüm temel fonksiyonların hesaplanması gerekmektedir. Şekil 3.2 B-spline temel fonksiyonlarının birbiri ile olan ilişkisini göstermektedir.



Şekil 3.2. $N_{i,k}$ temel fonksiyonunun hesaplanması için gerekli olan temel fonksiyonlar

B-spline eğrilerde eğriyi tanımlayan üç tane temel parametre bulunmaktadır. Bu parametreler kontrol noktaları (p_n), eğri derecesi d ve düğüm vektörüdür. Burada önemli bir nokta ise düğüm vektörünün eğrinin duyarlılığını açıklamasıdır. Bu parametreler farklı şekillerde değiştirildiğinde çeşitli şekillerde B-spline eğrileri elde edilebilir (Ülker, 2007). Aşağıdaki şekilde kontrol noktalarının yerleri değiştirilerek elde edilen eğrilere örnekler sunulmuştur.



Şekil 3.3.Farklı kontrol noktalarının eğrinin şekline etkisi

d dereceli bir Bezier eğrisi tam olarak $d + 1$ tane kontrol noktasına sahipken, d dereceli bir B-spline eğrisi yeterli derecede belirtilmiş sayıda düğümleri sağlayan herhangi bir sayıda kontrol noktasına sahip olabilir. Bu yüzden karmaşık eğri şekillerini tanımlamak için B-spline kullanmak daha avantajlı olacaktır. Bu sayede eğrinin derecesini artırmadan sadece kontrol noktalarının sayısı artırılarak eğriler elde edilebilir.

Bununla birlikte B-spline eğrinin genellemesi olan “tek düze olmayan rasyonel B-spline (Non-uniform Rational B-spline - NURBs)” olarak bilinen diğer bir eğri türü

de bulunmaktadır. NURBs eğrisinin tanımlanması çok sayıdaki kontrol değişkenine bağlı olduğundan oldukça esnek ve güçlüdür.

NURBs eğri, p_i ile temsil edilen $n + 1$ tane kontrol noktası ve bu kontrol noktalarına yerleştirilmiş w_i ağırlıkları ile bir parçalı rasyonel polinom geçişme fonksiyonları kümesinin rasyonel kombinasyonu olarak tanımlanmaktadır.

NURBs eğrilerin matematiksel denklemi (3.9)'da verilmiştir. Bu denklem NURBs eğri elde edilmesinde kullanılan bir denklem olup yüzey modellenmek istendiğinde u parametresine ek olarak v parametresi eklenmelidir.

$$c(u) = \frac{\sum_{i=0}^n p_i w_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,k}(u)} \quad (3.9)$$

Burada u parametrik değişken, $p(u)$ terimi u parametresinde NURBs eğri üzerinde bir noktayı temsil eder ve $N_{i,k}(u)$ ise B-spline geçişme fonksiyonudur.

NURBsahip olduğu ağırlık değerleri ile kendilerinin yerel şeklini etkileyen ekstra serbestlik derecelerine sahiptir. Eğer gelen ağırlık değeri artırılırsa kontrol noktasına doğru çekilir, eğer ağırlık azaltılırsa kontrol noktasından uzağa itilir. Bununla birlikte eğer ağırlık değeri sıfır ise gelen rasyonel geçişme fonksiyonu da sıfırdır ve onun kontrol noktası NURBs şeklini hiçbir şekilde etkilemez.

3.2. B-Spline Eğrilerde Düğüm Tahmini

B-spline uydurma çözüm yaklaşımını daha iyi anlayabilmek için; ele alınan ve izlenen işlem adımlarına değinilmesi, probleme tez çalışması ile getirilen alternatif çözüm yaklaşımının anlaşılması bağlamında faydalı olacaktır.

Genel olarak izlenen yöntem, eldeki noktalar üzerine uygulanan matematiksel işlemlerin kullanıldığı ters mühendislik yöntemleri ile düğüm noktaları verilerinin elde edilmesine dayanmaktadır. Problemin çözümü için kullanılan B-Spline eğrisi düğüm tahmini işlem adımları aşağıda sıralanmaktadır(Ülker, 2007):

1. Başlangıçta dışarıdan verilmiş olan bir nokta bulutunun($F_i, i = 0, \dots, M_u$)var olduğu kabul edilir. Bu nokta bulutu için bazı noktalar ($Q_i, i = 0, \dots, m$ ve $m \leq M_u$) düğüm olarak seçilir. İteratif tabanlı metotlar kullanılacağı için orijinal veri kümesi olan F korunmalıdır. Bu yüzden F dizisi Q dizisine aktarılarak nokta işlemleri bu dizi üzerinde

gerçekleştirilir. Burada M_u eğri uydurulacak nokta adedi olup algoritma adımlarında M_u adet noktadan bazıları seçilerek boyutu $m + 1$ olan ve elemanları $Q(0), Q(1), \dots, Q(m)$ den oluşan Q dizisi belirlenir. Aslında Q dizisi F dizisinin bir alt kümesidir.

2. İkinci aşamada $m + 1$ elemanlı Centripetal düğüm vektörü hesaplanır. Bu hesaplama aşağıda verilen denklemlere göre yapılmaktadır:

$$\bar{u}_0 = 0 \quad \bar{u}_m = 1 \quad (3.10)$$

$$\bar{u}_i = \bar{u}_{i-1} + \frac{\sqrt{|Q_i - Q_{i-1}|}}{\sum_{j=0}^m \sqrt{|Q_j - Q_{j-1}|}} \quad (3.11)$$

$$|Q_i - Q_{i-1}| = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklemlerde yer alan u her bir Centripetal düğümü göstermekte olup yapılan hesaplamalar sonunda Centripetal düğümler vektör şeklinde elde edilmiş olur.

Bu tez çalışmasında; vektördeki düğümlerin belirlenmesinde Centripetal metot kullanılmıştır fakat bu metot haricinde uniform metot ve kiriş uzunluğu metotları literatürde kabul görmüş diğer önemli düğüm parametrizasyonu metotlarıdır.

3. Bir sonraki aşamada elde edilen Centripetal düğümler kullanılarak tahmini B-spline düğümleri oluşturulur. Denklemden d eğrinin derecesini göstermekte olup ilk $d + 1$ ve son $d + 1$ adet dizi elemanı değerleri sabit alınmıştır ve sırasıyla 0 ve 1 'dir. Bu sayede oluşturulacak eğrinin ilk ve son kontrol noktalarından geçmesi sağlanmaktadır. Ara dizi elemanlarının hesaplanması için kullanılan denklem şu şekildedir:

$$U = [0, 0, \dots, 0, u_{d+1}, \dots, u_m, 1, 1, \dots, 1] \quad (3.13)$$

$$u_{j+d} = \frac{1}{d} \sum_{i=j}^{j+d-1} \bar{u}_i, \quad j = 1, \dots, m - d \quad (3.14)$$

Yukarıdaki denklemde \bar{u}_i Centripetal düğümler olup u_j ise tahmini B-spline düğümleridir.

4. Matris işlemleri kullanılarak kontrol noktaları (P) hesaplanmalıdır. Kontrol noktaları B-spline eğri formülü olan $Q = PxR$ denklemi kullanılarak elde edilir. Bu eşitlikte P matrisini elde etmek için öncelikle harmanlama fonksiyonları kullanılarak R matrisi elde edilmelidir. Burada R matrisi n değerlerine göre üretildikten sonra PxR ifadesi üzerinde P matrisini yalnız bırakacak şekilde gerekli matris işlemleri gerçekleştirilir. Bu bağlamda $P = QxR^{-1}$ denklemi kullanılarak kontrol noktaları elde edilebilir.
5. P Kontrol Noktaları matrisinin elde edilmesiyle birlikte, artık tahmin edilen B-spline eğrisi çizilebilir:

$$S(u) = \sum_{i=0}^n (p_i N_{i,d}(u)) \quad (3.15)$$

6. B-Spline eğrisinin tahmin edilmesinin ardından tahmin edilen eğrinin doğruluğunun değerlendirilmesi gerekmektedir. Dışarıdan verilen nokta bulutu ile birlikte tahmin edilen eğri noktalarından yararlanılarak hata değeri hesaplanabilir. Öklitsel hatalar toplamı olarak bilinen bu yaklaşım aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$Hata = \sqrt{\sum_{i=1}^{M_u} |S_i - F_i|^2} \quad (3.16)$$

Bu hesaplama sonunda elde edilen hata değeri sıfır(0) değerine ne kadar yakınsa noktalar o kadar iyi seçilmiş ve eğri iyi tahmin edilmiş demektir. Sonuç olarak ilgili durdurma kriterlerinin (belli bir iterasyon sayısı, belli bir hata değeri yada algoritma ile ilgili bir kriter) seçimine bağlı olarak 1-6 işlem adımları takip edilmelidir.

3.3. Sezgisel ve Metasezgisel Algoritmalar

Yapay zekâda kullanılan sezgisel kavramı İngilizce “heuristic” kelimesinin Türkçe karşılığı olarak kullanılmaktadır. Sezgisellik kelimesi gerçekliği herhangi bir deneye veya hesaplamaya bağlı kalmadan dolaysız olarak içten kavrayabilme, tanıyabilme yetisidir diyebiliriz(2015). Bu algoritmalar, çözüm uzayında optimum çözüme yakınsaması ispat edilemeyen algoritmalarlardır. Başka bir ifadeyle, bu algoritmalar ilgili problemin sonucunun doğruluğunun kanıtlanabilir olup olmadığını önemsemez fakat iyiye yakın çözümler elde etmeye çalışır. Bu tür algoritmalar yakınsama özelliğine sahiptir ve kesin çözümün yakınında bir çözümü garantilerler. Karmaşık bir problemi daha basit hale getirerek tatmin edici sonuçlar vermeyi amaçlar. Bu tür sezgisel algoritmalara A^* algoritması, benzetimli tavlama, parçacık sürü optimizasyonu, karınca koloni optimizasyonu ve yapay arı kolonisi algoritması örnek verilebilir.

Sezgisel algoritmalar genellikle çözümü matematiksel olarak kolay olmayan problemler için tercih edilmektedir. Ele alınan bir problemin karmaşıklığı, o problemin zorluk derecesi hakkında bilgi vermektedir. Buradan hareketle, bir probleme sezgisel algoritma yaklaşımı uygulayabilmek için bu problemin çözülmesi kolay olmayan problemler sınıfında yer alması gerekmektedir. Sezgisel algoritmalar ile kaliteli bir çözüme kabul edilebilir bir zamanda ulaşılabilmektedir ancak optimum çözüme ulaşmak garanti edilememektedir.

Metasezgisel (üst sezgisel) algoritmalar ise sezgisel algoritmalar üzerinde çalışan bir karar mekanizmasıdır. Örneğin bir problemin çözümünde üç farklı yöntem kullanabileceğimizi farz edelim. Bu yöntemlerin hepsinin de kendi içinde avantajlı olan sezgisel algoritmalar olduğunu düşünelim. Bu sezgisel yöntemlerden hangilerinin seçileceğinin seçilmesine metasezgisel algoritma ismi verilir.

Anlaşılabilirlik yönünden sezgisel algoritmaların karar verici açısından çok daha basit olabilmesinden ve optimizasyon problemlerinin kesin çözümü bulma işleminin tanımlanamadığı bir yapıya sahip olmasından dolayı sezgisel algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır(Karaboga ve Gorkemli, 2011). Bununla birlikte kesin çözümü bulma işleminin bir parçası olarak kullanılabilmesi bir diğer ihtiyaç duyulma sebebidir.

3.4. Sürü Zekâsı Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon, belli koşullar altındaki bir problemin çözümü için alternatifler arasından en iyisini seçme işlemidir. Bu bağlamda sezgisel algoritmalar, büyük boyutlu optimizasyon problemleri için kabul edilebilir süre içerisinde optimum yada optimuma yakın çözümler sunabilen algoritmalarlardır. Sezgisel optimizasyon algoritmaları biyolojik tabanlı, fizik tabanlı, sürü tabanlı ya da sosyal tabanlı olabilmektedir.

Özellikle son yıllarda, canlı gruplarının incelenmesiyle sürü zekâsı kavramı ön plana çıkmaya başlamıştır. Sürü zekâsı tabanlı optimizasyon algoritmaları kuş, balık, arı, kedi, ateş böceği, karınca gibi canlı sürülerinin hareketlerinin incelenmesiyle ortaya çıkmıştır.

Sürü, birbiriyle etkileşim içinde olan dağınık yapıli bireyler yığını anlamında kullanılmaktadır. Bu yığında bulunan bireyler insan, karınca, arı, kedi, su damlacığı veya kurt olarak temsil edilebilir. Sürüde bulunan N adet temsilci belli bir amaca yönelik davranışı gerçekleştirmek ve hedefe ulaşmak için birlikte çalışmaktadırlar. Temsilciler arasında sık tekrarlanan davranışlardan “kollektif zekâ” oluşmaktadır. Temsilciler faaliyetlerini idare etmek için basit bireysel kurallar kullanmakta ve grubun kalan kısmıyla etkileşim yolu ile sürü amaçlarına ulaşmaktadır. Burada aslında grup faaliyetlerinin toplamından bir çeşit kendini örgütleme doğmaktadır.

Literatürde, farklı problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılan sürü temelli optimizasyon algoritmaları şu şekilde sıralanabilir: ateş böceği sürü optimizasyon algoritması, karınca koloni optimizasyon algoritması, parçacık sürü optimizasyonu ve yapay arı koloni algoritması.

3.5. Akıllı Su Damlacıkları Algoritması

3.5.1. Doğal Su Damlacıkları

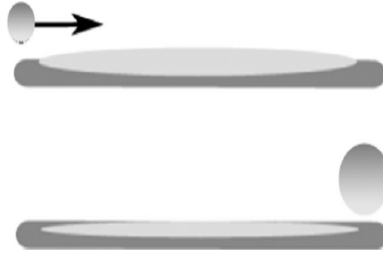
Doğal su damlacıkları doğada denizlerde, göllerde ve akarsularda bulunur. Bu su damlacıkları belirtilen final noktasına göre çevresini değiştirerek en yakın optimal yada en iyi optimal yolu bulmaya çalışır. Hiçbir engel ve bariyerin olmadığı düşünülduğünde su damlacığı düz bir şekilde ideal en kısa yolu bularak final noktasına ulaşır. Bu hareket esnasında çevresu damlacığının takip ettiği yolu etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Gerçek dünyada engel ve bariyerler olacağından gerçek yol ideal yoldan farklı

olacaktır. Akıllı su damlacıkları daha iyi bir yol elde etmek ve ideal yola yaklaşmak için gerçek yolu değiştirmeye çalışır(Shah-Hosseini, 2007).

Su damlacığının iki temel özelliği; taşıdığı toprak miktarı ve bir noktadan diğer noktaya belli bir miktar toprak taşımalarını sağlayan hızıdır. Akarsu üzerinde toprak, yolun hızlı parçalarından yavaş parçalarına doğru taşınır. Hızlı parçalar aslında toprağın fazla aşınmış olduğu derin yollardır.Su damlacığı bir noktadan başka bir noktaya giderken;

- Akarsu yatağındaki toprağın bir kısmı su damlacıkları tarafından toplandığından bu geçiş sırasında su damlacığının hızı yollardaki toprak miktarına bağlı olarak az ya da çok artar.
- Su damlacığının taşıdığı toprak miktarı artar.
- İki nokta arasındaki toprak miktarı yani akarsu yatağındaki toprak miktarı azalır.Aslında burada su yatağındaki toprağın bir kısmı su damlacığına aktarılmış olur.

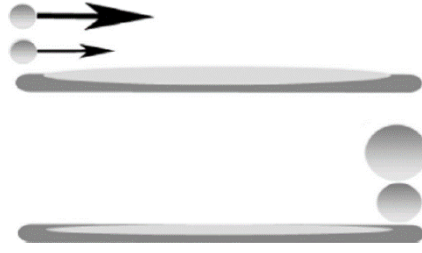
Şekil 3.4 'te verildiği gibi akarsu üzerinde bir noktadan bir başka noktaya hareket eden bir su damlacığı düşünelim.



Şekil 3.4. Su damlacığının yatak üzerinde hareket ederken taşıdığı toprak miktarının artması ve yataktaki toprak miktarının azalması(Shah-Hosseini, 2008)

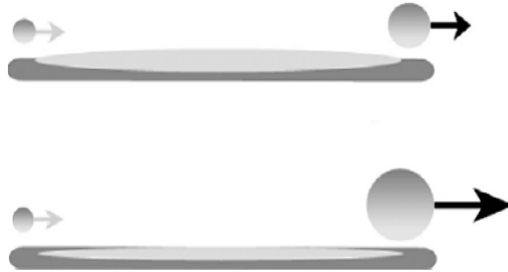
Su damlacığı akarsu üzerinde hareket ederken su yatağından belli bir miktarda toprak taşıyacağından sahip olduğu toprak miktarı artar ve su yatağındaki toprak miktarı aynı oranda azalır. Ayrıca su damlacığının sahip olduğu hız değeri akarsu üzerinde bulunan su yataklarındaki toprağın taşınmasında rol oynayan diğer önemli bir parametredir. Aynı noktadan aynı toprak miktarına sahip su damlacıklarının sahip olduğu hız değerine bağlı olarak son durumda hız değeri büyük olan su damlacığının

daha fazla toprak taşıdığı Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Şekildeki oklar hızı temsil etmekte olup büyük oka sahip su damlacığının hızının daha büyük olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3.5. Aynı yönde hareket eden su damlacıklarının hızlarına bağlı olarak taşıdığı toprak miktarları(Shah-Hosseini, 2008)

Daha önce de belirtildiği gibi su damlacığının sahip olduğu hıza bağlı olarak su yatağındaki toprak miktarı az ya da büyük oranda azalır. Son olarak Şekil 3.6'da gösterildiği gibi farklı yollar üzerinde aynı hız ve toprak miktarına sahip iki farklı su damlacığı olduğunu düşünelim.



Şekil 3.6.Farklı yollarda, aynı hız ve toprak miktarına sahip su damlacıklarının yol sonundaki durumu(Shah-Hosseini, 2008)

Daha az toprağa sahip olan yol su damlacığının daha fazla toprak taşımaya ve daha fazla hız kazanmasına olanak sağlar.

Sonuç olarak akarsularda bulunan su damlacığının belli bir hızı olup, belli bir miktar toprak taşır. Taşınan toprak miktarı su damlacığının hızına bağlıdır. Su damlacığı belli bir yoldan geçtiğinde su yatağından toprak taşınır ve su yatağındaki toprak miktarı azalır. Buradaki en önemli noktalardan bir tanesi de su damlacığının kendisi için en

kolay yolu seçmesidir. ASD algoritmasında zorluk yol üzerinde bulunan toprak miktarı ile belirlenmektedir. Su damlacığı farklı yollarla karşılaştığında seçme mekanizması devreye girer ve daha az toprağa sahip olan yolu seçer. Dolayısıyla bir sonraki iterasyonda bu yolun su damlacıkları tarafından seçilme şansı artar. Bu yol üzerindeki seçim toprak miktarı ile ters orantılı olan olasılık fonksiyonu ile implemente edilir. Özetle, kenardaki toprak miktarı ne kadar azsa o kenarın seçilme olasılığı daha da artmaktadır.

3.5.2. Akıllı Su Damlacıkları

Akıllı su damlacıkları yöntemi; deniz, göl ve akarsularda bulunan doğal su damlacıklarının hareketlerinden ilham alınarak gerçekleştirilen sürü temelli evrimsel bir optimizasyon algoritmasıdır.

Akıllı su damlacıkları ilk defa Shah-Hosseini(2007) tarafından ortaya atılmıştır. Yapmış olduğu çalışmada algoritmanın performansını değerlendirmek için gezgin satıcı problemini akıllı su damlacıkları ile çözmeye çalışmış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir. Bu çalışma aynı zamanda su damlacıkları fikrinin mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılabileceğinin bir başlangıcıdır.

Yapılan tez çalışmasında önerilen algoritma ayrık optimizasyon problemi için sunulmuştur fakat algoritma aynı zamanda sürekli optimizasyon için de kullanılabilir.

Doğada bulunan su damlacıklarının davranışları gözlemlenerek geliştirilen akıllı su damlacıkları doğal su damlacıklarına büyük ölçüde benzer özelliklere sahiptir. Akıllı su damlacıkları iki temel özelliğe sahiptir:

- Su damlacığının taşıdığı toprak miktarı, $soil^{IWD}$.
- Su damlacığının hızı, vel^{IWD} .

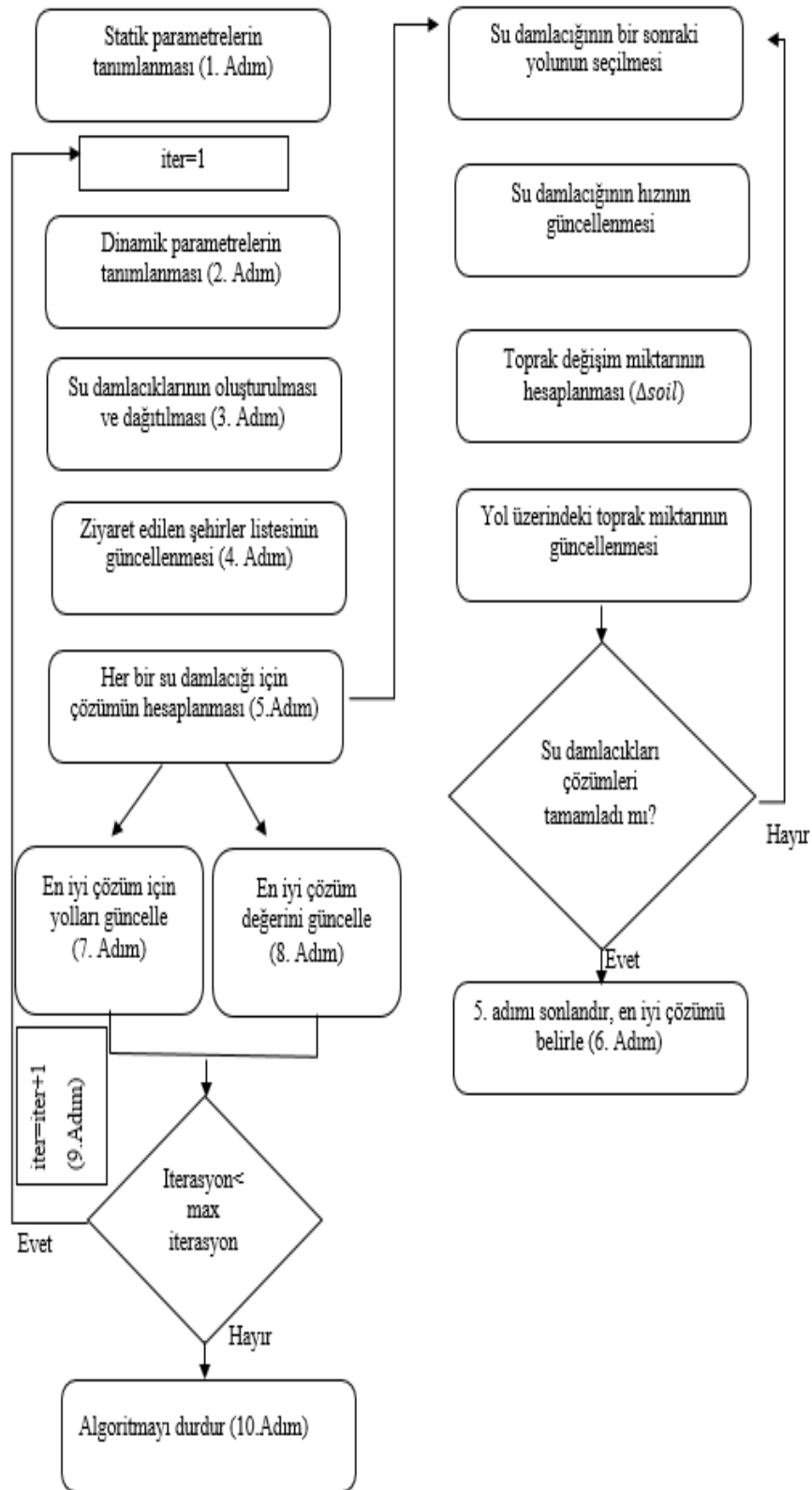
Akıllı su damlacıkları yönteminde; her bir su damlacığı bir çözüm buluncaya kadar başlangıç pozisyonundan başlayarak diğer pozisyonlara taşınır. Her bir iterasyon sonucunda su damlacıkları tarafından bulunan çözümlerden en iyisi saklanır.

Shah-Hosseini H. tarafından belirlenmiş ASD algoritması'nın temel işlem adımları şu şekildedir:

1. Statik parametre değerlerinin atanması

- a) Problemin graf formatında sunumu
- b) Statik parametreler için değer atama
2. Dinamik parametre değerlerinin atanması
3. Su damlacıklarının problem grafi üzerinde dağıtılması
4. Her bir su damlacığı için ziyaret edilen şehir listesinin güncellenmesi
5. Kısmi çözümler için a-d adımlarının takip edilmesi
 - a) i düğümünde bulunan su damlacığı için bir sonraki ziyaret edilecek (daha önce ilgili su damlacığı tarafından ziyaret edilmemiş) olan j düğümünün seçilmesi
 - b) i düğümünden j düğümüne giden her bir su damlacığı için hız değerinin güncellenmesi
 - c) Toprağın hesaplanması
 - d) Toprağın güncellenmesi
6. İlgili iterasyonda su damlacıkları tarafından elde edilen çözümlerden en iyisinin belirlenmesi
7. İlgili iterasyondaki en iyi çözüm için, yol üzerinde bulunan kenarların toprak miktarlarının güncellenmesi
8. En iyi çözümün güncellenmesi
9. İterasyon sayısının artırılması
10. Durma koşulu sağlandığında en iyi çözümün döndürülmesi

Temel işlem adımlarına bağlı olarak Akıllı Su Damlacıkları Algoritması'nın akış diyagramı Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Akıllı su damlacıkları akış diyagramı

Akıllı su damlacıkları ortalama değerler (average values) kullanarak iyi kalitede çözümler üretir. Aynı zamanda bu yöntem esnek olup hızlı yakınsamaktadır. Diğer yandan N düğüm, E kenar ve M itersyondan oluşan yol seçme problemi için algoritmanın zaman karmaşıklığı $O(N)$ olarak hesaplanır. ($O(M * N * E)$)

Son olarak literatürde akıllı su damlacıkları yönteminden referans alınarak geliştirilmiş ASD'nin bazı versiyonları da bulunmaktadır. Bunlara adaptif ASD (2011), geliştirilmiş ASD(2009), modifiye edilmiş ASD (2011) ve nöral ASD(2011) örnek verilebilir.

3.5.3. Akıllı Su Damlacıkları Yöntemi'nin İşlem Adımları

Akıllı su damlacıkları sürekli ve ayrık optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Ayrık niceliklerin optimal olarak düzenlenmesi, gruplanması, sıraya konulması veya seçilmesi ayrık optimizasyon olarak adlandırılırken değişkenler sürekli değerler ise bu tür problemler sürekli optimizasyon olarak adlandırılır. Gezgin satıcı problemi veya araç yönlendirme problemi ayrık optimizasyon problemleri arasında yer alırken fonksiyon minimizasyonu sürekli optimizasyon problemleri arasındadır.

Ayrık optimizasyon problemlerinde parametreler sınırlı değerler alırken sürekli optimizasyon problemlerinde sonsuz değerler alabilmektedir. Sürekli optimizasyon problemlerinde, belli sayıdaki sürekli değişkenlere (parametreler) herhangi bir fonksiyonun minimizasyonu veya maksimizasyonu için ihtiyaç duyulmaktadır. Sürekli optimizasyon için kullanılan ASD algoritmasında gerçek sürekli değişkenler ikili stringler (binary strings) olarak kodlanır. Daha sonraki aşamada ASD; ikili temsil (binary representation) şeklinde verilen fonksiyonu optimize etmeye çalışır. Sonuç olarak, en iyi çözüm final çözümü olarak raporlanır. (Shah-Hosseini, 2012a). Genel olarak işlem adımları ayrık optimizasyon ile aynı olmakla birlikte algoritmanın ilk aşaması olan problem temsili ele alınan problem göre farklılık göstermektedir.

Ayrık problemler için Akıllı Su Damlacıkları'nın işlem adımları gezgin satıcı problemi örneği üzerinde aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Shah-Hosseini, 2007):

1. Algoritma parametreleri olan su damlacığı sayısı (N_{WD}), şehir sayısı (N_c) ve her bir şehrin kartezyen koordinatları ($k_i = [x_i, y_i]^T$) statik olarak tanımlanır. Şehir sayısı ve bu şehirlerin koordinatları probleme göre değişmektedir. Hız güncellemesinde kullanılan parametreler için $a_v = 1000$, $b_v = 0.01$ ve $c_v = 1$

olarak alınmıştır. Toprak güncellemesinde kullanılan parametrelerde ise $a_s = 1000$, $b_s = 0.01$, $c_s = 1$ olarak belirlenmiştir. Her bir kenardaki toprak miktarı başlangıçta eşit alınmıştır. *InitSoil* olarak belirtilen bu değer başlangıçta bütün kenarların sahip olduğu toprak miktarıdır. Ayrıca her bir su damlacığının başlangıçta sahip olduğu *InitVel* olarak temsil edilen hız değeri her bir su damlacığı için aynı alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan *InitSoil* ve *InitVel* değerleri sırasıyla 1000 ve 100'dür. Ayrıca ($Len(T_B)$) ile temsil edilen en iyi tur uzunluğu başlangıçta sonsuz olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte durma kriteri olarak iterasyon sayısı ve hata değeri alınmaktadır. Bu aşamada problemin amacına uygun olarak farklı durma kriterleri de tanımlanabilir.

2. Herbir su damlacığı için $vc(IWD)$ ile temsil edilen ve ziyaret edilen şehirleri tutan boş bir liste yapısı oluşturulur. Her bir su damlacığının hızı *initVel* ve taşıdığı toprak miktarı 0 olarak tanımlanır.
3. Herbir su damlacığı için rastgele bir şehir seçilir ve bu su damlacıkları seçilen şehirlere yerleştirilir.
4. Ziyaret edilen şehirler listesi su damlacıklarının şehirlere yerleştirilmesi ile birlikte güncellenir.
5. Herbir su damlacığı için, i şehrinde bulunan su damlacığının bir sonraki ziyaret edileceği şehir olan j aşağıda verilen olasılığa göre seçilir.

$$P_i^{IWD}(j) = \frac{f(soil(i,j))}{\sum_{k \in vc(IWD)} f(soil(i,k))} \quad (3.17)$$

$$f(soil(i,j)) = \frac{1}{\varepsilon_s + g(soil(i,j))} \quad (3.18)$$

$$g(soil(i,j)) = \begin{cases} soil(i,j) & \text{if } \min_l(soil(i,l)) \geq 0 \\ soil(i,j) - \min_l(soil(i,l)) & \text{else} \end{cases} \quad (3.19)$$

Burada ε_s küçük bir pozitif sayı olup $f(\cdot)$ fonksiyonunda sıfıra bölme hatasını engellemek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu değer 0.01 olarak alınmıştır. $soil(i,j)$ değeri su anki şehir olan i ile bir sonraki şehir olan j arasındaki yolun üzerinde bulunan toprak miktarını temsil etmektedir. Ayrıca $\min(\cdot)$ fonksiyonu ilgili argümanın en küçük değerini döndürür.

6. Her bir su damlacığı için, bulunduğu konum olan i şehrinde seçilen bir sonraki j şehrine hareket ederken su damlacığının hızı aşağıdaki denkleme göre güncellenir.

$$vel^{IWD}(t+1) = vel^{IWD}(t) + \frac{a_v}{b_v + c_v \cdot soil(i,j)} \quad (3.20)$$

Burada $vel^{IWD}(t+1)$ su damlacığının güncellenmiş hızını temsil etmektedir. Verilen denkleme göre; iki şehir arasındaki toprak miktarı ne kadar azsa su damlacığının hızı o miktarda artarken toprak miktarı arttıkça su damlacığının hızı daha az oranda artacaktır.

7. Her bir su damlacığı için hız değişimi hesaplandıktan sonra i ve j şehirleri arasındaki toprak değişiminin hesaplanması gerekmektedir. Bu değişim miktarı;

$$\Delta soil(i,j) = \frac{a_s}{b_s + c_s \cdot time(i,j; vel^{IWD})} \quad (3.21)$$

$$time(i,j; vel^{IWD}) = \frac{\|c(i) - c(j)\|}{\max(\varepsilon_v, vel^{IWD})} \quad (3.22)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem(3.22) i şehrinde j şehrine giderken geçen zamanı hesaplamaktadır. Aynı zamanda $c(.)$ şehirlerin iki boyutlu uzaydaki konumunu temsil etmektedir. Diğer bir ifade olan $\max(.,.)$ verilen argümanlardan hangisi daha büyükse o değeri döndürmektedir. Minimum hız değeri için eşik değeri belirlemek amacıyla ε_v denilen değeri bu problem için 0.0001 olarak alınmıştır.

8. Her bir su damlacığı için, toprak değişim miktarlarının hesaplanmasıyla birlikte kenarların toprak miktarlarının güncellenmesi gerekmektedir. Bu güncelleme işlemi için kullanılan denklem şu şekildedir:

$$soil(i,j) = (1 - \rho) \cdot soil(i,j) - \rho \cdot \Delta soil(i,j) \quad (3.23)$$

$$soil^{IWD} = soil^{IWD} + \Delta soil(i,j) \quad (3.24)$$

Yukarıdaki denklemde belirtilmiş olan $soil^{IWD}$ su damlacığının taşıdığı toprak miktarını ifade etmektedir. Daha sonra su damlacığı i şehirden j şehrine hareket eder.

9. Her bir su damlacığı için 4-8 adımları tekrar edilerek tur tamamlanır. Tur tamamlandıktan sonra her bir su damlacığının takip ettiği yola bağlı olarak tur uzunluğu hesaplanır. Minimum uzunluğa sahip olan tur, en iyi tur olarak kabul edilir ve bu minimum tur T_M olarak temsil edilir.
10. En iyi tur üzerinde bulunan yolların toprak miktarları aşağıdaki denkleme bağlı olarak güncellenir.

$$soil(i, j) = (1 - \rho) \cdot soil(i, j) + \rho \cdot \frac{2 \cdot soil^{IWD}}{N_c(N_c - 1)} \quad \forall (i, j) \in T_M \quad (3.2 \quad 5)$$

11. Eğer minimum tur T_M en iyi tur olan T_B 'ye göre daha kısa ise en iyi tur aşağıdaki gibi güncellenir.

$$T_B = T_M \text{ ve } Len(T_B) = Len(T_M) \quad (3.2 \quad 6)$$

12. Belli bir durma kriteri veya maksimum sayıdaki iterasyon sağlanmadığı sürece 2. adıma gidilir.
13. En iyi tur ve en iyi tur uzunluğunun belirlenmesiyle algoritma sonlanır.

3.6. B-Spline Eğri Uydurmada Akıllı Su Damlacıklarının Kullanılması

B-spline eğri uydurma; belli bir tolerans hata ile bir hedef eğri tahmin eden B-spline eğriyi tahmin etmektir. Bu tez çalışmasında hedef eğrinin iki boyutlu uzayda sıralı ve sık veri noktaları ile tanımlandığı varsayılmıştır.

Eğriyi tahmin etmek için verilen nokta sayısı N bit stringi şeklinde oluşturulan ve su damlacığının ziyaret ettiği şehirler listesinin bir benzeri mantıkla $vc(IWD)$ ile tanımlanır. Her bir bit ilgili su damlacığının karşılık gelen şehir ziyaret edip etmediğini temsil etmektedir. Bu formülasyonda eğer bit değeri 1 ise ilgili şehir ziyaret edilmiş, 0 ise şehir ziyaret edilmemiş demektir. Her bir su damlacığı için bir şehrin ikinci bir defa

ziyaret edilmesini engellemek için bu liste tanımlanmaktadır. Su damlacığının seçebileceği olası şehirler arasında ziyaret edilen şehirlerden biri olmaması gerekir. Aslında buradaki yaklaşım genetik algoritmalarındaki gen ve kromozom kavramlarına eşdeğerdir.

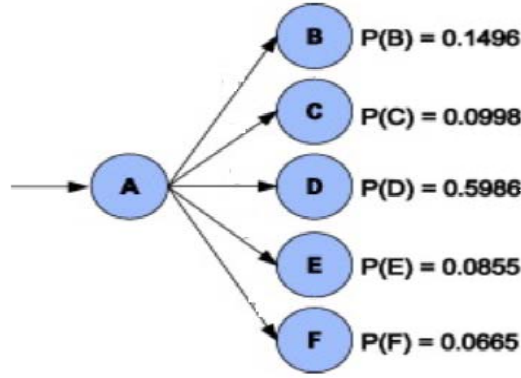
Diğer önemli bir nokta ise ziyaret edilebilecek nokta sayısının probleme bağlı olup su damlacığı sayısının kullanıcıya bağlı olmasıdır. Örneğin gezgin satıcı probleminde su damlacığı sayısı şehir sayısı kadar alınırken üzerinde çalıştığımız B-spline eğri uydurma problemi için su damlacığı sayısı en fazla 10 alınmıştır. Bu çalışma için ziyaret edilebilecek nokta sayısı ise eğriyi temsil etmek için kullanılan nokta sayısı kadardır.

3.6.1. Problemin Temsili

Doğada akarsu veya göllerde bulunan su damlacıklarının hareketlerinin simüle edilmesi ve problemin temsil edilmesi için graf yapısı oluşturulmuştur. Noktalar ziyaret edilebilecek şehirler, kenarlar ise su yatakları olarak kabul edilmiştir. Bütün su damlacıkları için aynı olmak şartıyla bir başlangıç ve bir de bitiş şehri belirlenmiştir. Eğri uydurma problemi için bu şehirler aslında veri noktalarıdır. Algoritmanın çalıştırılmasıyla birlikte her iterasyon sonucunda su damlacıklarının takip ettiği yollar dikkate alınarak bu yollardan en iyisi saklanmıştır. Burada algoritma sonucunda elde edilmiş olan en iyi yol için; yol üzerinde bulunan şehirlere karşılık gelen noktaların eğriyi oluşturmak için seçilen optimal noktalar olduğu ispatlanmıştır.

3.6.2. Kenar Seçimi

Su damlacığı bulunduğu noktadan bir sonraki konumunu belirlerken seçme mekanizması devreye girer. Buradaki en önemli nokta su damlacığının kendisi için en kolay yolu seçmesidir. Su damlacığı farklı yollarla karşılaştığında seçme mekanizması devreye girer ve daha az toprağa sahip olan yolu seçer. Bu yol üzerindeki seçim, toprak miktarı ile ters orantılı olan Denklem (3.17), (3.18) ve (3.19)'daki olasılık fonksiyonu hesaplanarak bulunur. Her bir su damlacığı için en iyi olasılığa sahip komşu bir sonraki ziyaret edilecek noktadır.



Şekil 3.8. Su damlacığının bir sonraki düğümü seçim mekanizması

Şekil 3.8. 'de de belirtildiği gibi su damlacığı A konumunda iken bir sonraki konumunu belirlerken seçme mekanizmasını devreye sokar. Su damlacığının bir sonraki adımında gidebileceği her bir düğümü için olasılık değerleri hesaplanır. Buna göre olasılığı en büyük olan düğüm su damlacığının bir sonraki ziyaret edeceği konumdur.

3.6.3. Lokal Toprak Güncelleme

Su damlacığının bir sonraki ziyaret edeceği nokta belirlendikten sonra su damlacığının hızının belirlenmesiyle birlikte su yatağındaki toprak değişimi hesaplanmış olacaktır. Su yatağındaki toprak değişiminin sebebi akıllı su damlacığının su yatağı üzerinde belli bir hızla giderken belli bir miktardaki toprağı taşımış olmasıdır. Toprak değişiminin hesaplanması ile birlikte su damlacığının geçtiği su yatağının toprak miktarı güncellenir.

3.6.4. Komşuluk Tabanlı Lokal Arama (Neighborhood-based Local Search)

Orjinal ASD algoritmasında opsiyonel olan lokal arama adımı B-spline eğri uydurma problemi için komşuluk tabanlı lokal arama olarak eklenmiştir. Eğri temsili için belirlenen noktalar herbir iterasyonda eğriyi daha az hata ile temsil edecek noktalar ile güncellenmektedir. Bu noktaların belirlenmesi komşuluk tabanlı lokal arama ile gerçekleştirilmektedir. Komşuluk tabanlı lokal aramanın amacı belli komşulukta var olabilecek daha iyi noktaların seçilmesini sağlamaktır. Farklı noktalardaki lokallerde ve belli bir komşulukta yapılan arama ile minimumlara takılma engellenmektedir. Bu aşamada kullanılan kavramlar çeşitlilik oranı ve komşuluk sayısıdır. Ayrıca

eğrilikyarıçapı parametresi gereksiz bazı noktaların seçilmesini engelleyen diğer önemli bir parametredir. Bu kavramlar örnek durum üzerinde aşağıda açıklanmaktadır.

Orjinal eğrinin 101 tane nokta ile temsil edilen bir veri bulutu olduğunu düşünelim. Herhangi bir su damlacığının takip ettiği yol üzerinden kavramlar açıklanacaktır. Örneğin su damlacığının belli bir iterasyonda 1 – 15 – 23 – 31 – 42 – 48 – 59 – 68 – 72 – 89 – 91 – 101 noktaları ile eğriyi en az hata ile temsil ettiğini varsayalım. Lokal arama adımına geçildiğinde işleyiş şu şekilde olmaktadır:

Su damlacığının takip ettiği noktaların bir dizi üzerinde yerleştirilmiş olduğunu varsayalım. Bu su damlacığı için; eğri temsili için kullanılan nokta sayısının 12 olduğu görülmektedir.

1	15	23	31	42	48	59	68	72	89	91	101
---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Çeşitlilik oranı parametresi ilk ve son noktalar değişmemek şartı ile geriye kalan 10 tane noktadan yüzde kaçının komşuluklarına bakılacağını temsil etmektedir. Çeşitlilik oranı parametresi%40 alındığında 10 tane noktadan rastgele seçilen 4 tane noktanın komşuluklarına bakılacak demektir.

1	15	23	31	42	48	59	68	72	89	91	101
---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Komşuluk sayısı ise belirlenen nokta etrafında kaç tane noktaya bakılacağını temsil etmektedir. Bu komşuluktaki noktalardan hangisi eğri için daha uygunsa belirlenen nokta bu nokta ile güncellenir. Komşuluk sayısı 5 alındığında; örneğin 59 noktası için 48 ile 68 noktaları arasından yine rastgele 5 tane nokta belirlenmekte ve bu noktalardan hangisi eğri temsiliinde daha az hataya sahipse 59 noktası ile değiştirilmektedir.

48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Turuncu renk ile belirtilen noktaların bu komşulukta rastgele seçilen noktalar olduğunu düşünelim. Böylece 5 farklı yol oluşmaktadır. Bu yollar ;

1. Yol: 1 – 15 – 23 – 31 – 42 – 48 – **50** – 68 – 72 – 89 – 91 – 101

2. Yol: 1 – 15 – 23 – 31 – 42 – 48 – **53** – 68 – 72 – 89 – 91 – 101
3. Yol: 1 – 15 – 23 – 31 – 42 – 48 – **57** – 68 – 72 – 89 – 91 – 101
4. Yol: 1 – 15 – 23 – 31 – 42 – 48 – **62** – 68 – 72 – 89 – 91 – 101
5. Yol: 1 – 15 – 23 – 31 – 42 – 48 – **65** – 68 – 72 – 89 – 91 – 101

Elde edilen çözümlerden hangisi en az hataya sahipse bu çözüm lokal arama adımı sonunda güncellenmiş yol olarak alınır. Örneğin 3. yol en az hataya sahipse su damlacığının lokal aramadan önce takip ettiği 1 – 15 – 23 – 31 – 42 – 48 – **59** – 68 – 72 – 89 – 91 – 101 yolu lokal arama adımı sonunda 1 – 15 – 23 – 31 – 42 – 48 – **57** – 68 – 72 – 89 – 91 – 101 olarak güncellenir. Burada 59 noktası yerine 48 – 68 komşuluğunda bulunan ve eğriyi daha az hata ile temsil edecek 57 noktası seçilmiştir. Aynı işlem 23,42 ve 91 noktası içinde tekrarlanır ve su damlacığının lokal arama adımı sonucunda takip edeceği yol güncellenmiş olur. Su damlacığının izleyeceği yeni noktalar lokal arama adımından önce izlediği noktalara göre daha az hataya sahiptir. Yani her bir lokal arama sonucunda daha iyi noktalar elde edilmektedir.

Lokal arama adımı ile bağımsız olan eğrilik yarıçapı ise bazı noktaların seçilmesini engellemek için yarı-otonom bir şekilde belirlenen bir parametredir. Orjinal eğri birbirini takip eden sürekli noktalardan oluştuğundan ve amacın en az nokta kullanarak eğriyi en hata ile temsil edecek noktaların belirlenmesi olduğundan eğri temsili için önemsiz olan bazı noktaların gözardı edilmesi gerekmektedir. Eğrilik yarıçapı su damlacığının o anki bulunduğu nokta ile bir sonraki seçilebileceği nokta arasındaki eğim değeridir. Bu eğim değeri eğrilik yarıçapından düşük ise bu nokta su damlacığı tarafından ziyaret edilen noktalar arasına eklenmekte fakat gidilecek bir sonraki nokta olma şansını kaybetmektedir.

Yukarıda da belirtildiği gibi problemin çözümü için orjinal algoritmaya bazı modifikasyonlar yapılmıştır. Eğrilik yarıçapı kavramı ile bazı gereksiz noktaların seçimi engellenmiştir. Bununla birlikte komşuluk tabanlı lokal arama daha iyi yolların seçilme olasılığını arttırmıştır. Komşuluk tabanlı lokal arama adımında kullanılan çeşitlilik oranı ve komşuluk sayısı parametreleri de diğer önemli argümanlardır. Komşuluk sayısı ile yollar çeşitlendirilip daha iyi noktaların seçilme imkanı doğmuştur. Deneysel sonuçlara bakıldığında çeşitlilik oranının lokal minimumlara takılmayı engellediği görülmüştür.

Orjinal ASD algoritmasına eklenmiş olan komşuluk tabanlı lokal arama adımında su damlacıkları tarafından oluşturulmuş olan çözümler mutasyona uğrar. Burada her bir su damlacığının takip ettiği yollar sırasıyla alınır. Bu yol üzerinde çeşitlilik oranına bağlı olarak rastgele noktalar belirlenir ve bu noktalar rastgele başka noktalarla değiştirilir. Değiştirilecek olan her bir nokta için komşuluk sayısına bağlı olarak ilgili nokta civarında rastgele noktalar üretilir. Eğer yeni nokta ile elde edilecek olan eğrinin hata değeri daha düşükse eski nokta yeni nokta ile güncellenir.

Burada dikkat edilmesi gereken husus komşuluk tabanlı lokal arama işleminin o anki iterasyonda bütün su damlacıklarının takip ettiği yollar için uygulanmasıdır. Bu lokal arama işleminden sonra en iyi tur uzunluğu için global toprak güncelleme işlemi gerçekleştirilir(Shah-Hosseini, 2012a).

3.6.5. Global Toprak Güncelleme

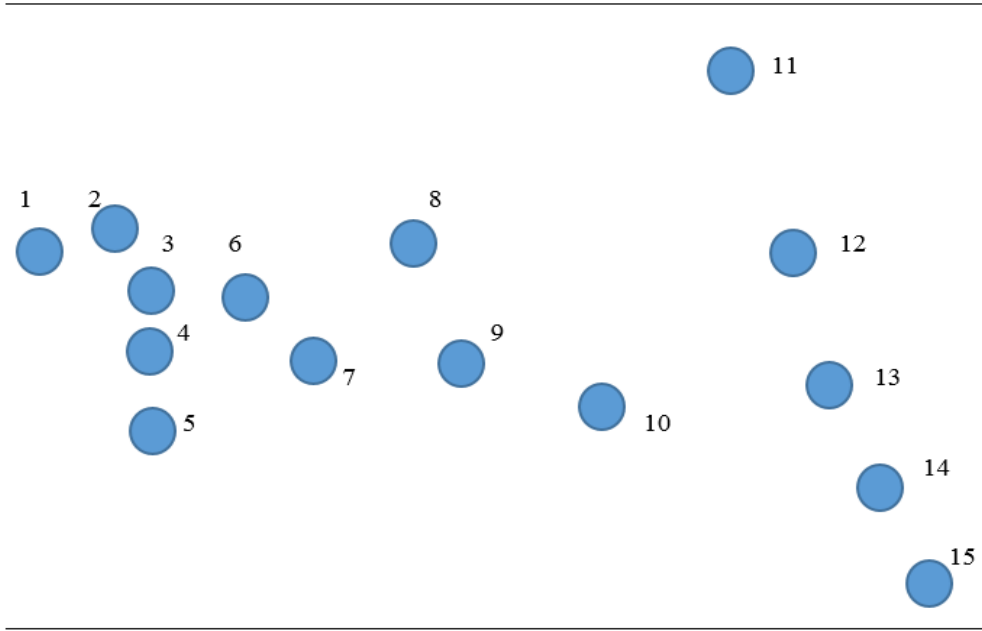
Belli bir iterasyon boyunca devam eden bu algorithmada her iterasyon sonucunda eğriyi en iyi temsil edecek noktalar kümesi belirlenir ve bu değerler saklanır. Her iterasyonda da en iyi çözüm güncellenir. İterasyonlar tamamlandıktan sonra en iyi çözümün belirlenmesiyle birlikte en iyi çözüm üzerinde bulunan su damlacığının takip ettiği yolların (su yataklarının) toprak miktarları güncellenir.

B-spline eğri uydurma probleminin çözümü için önerilmiş olan akıllı su damlacıkları yönteminin gezgin satıcı problemi üzerinde nasıl çalıştığı yukarıdaki “Akıllı Su Damlacıkları Yöntemi’nin İşlem Adımları” başlığı altında sıralanmıştır. B-spline eğri uydurma probleminin çözümü için genel işlem adımları değişmemekle birlikte orjinal algorithmaya bazı modifikasyonlar yapılmıştır.

B-spline eğri uydurma probleminin çözümü için önerilmiş olan yöntemin nasıl uyarlandığını göstermek için 15 tane nokta üzerinde algoritmanın nasıl çalıştığını bakalım. Noktalar iki boyutlu uzayda seçilmiş noktaları temsil etmektedir.

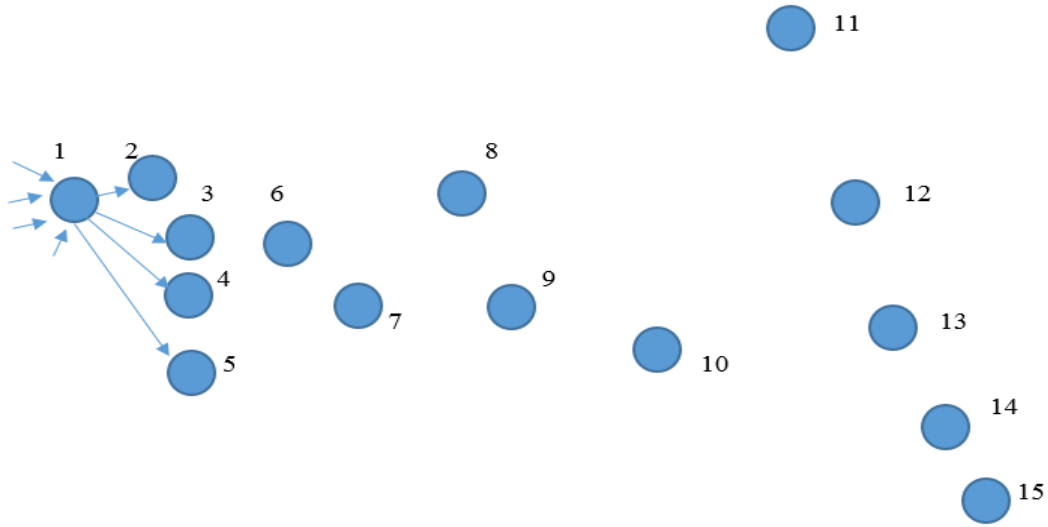
Örnek veri noktaları Şekil 3.9’ da verilmiştir. Öncelikle algoritmanın en önemli parametrelerinden biri olan su damlacığı sayısı 3 ile 10 arasında değişecek şekilde belirlenmiştir. Eğri üzerindeki her bir veri noktası ziyaret edilecek şehir olarak düşünülmüş ve şehir sayısı eğrinin oluşması için gerekli olan toplam veri noktası sayısı olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte toprak ve hız ile ilgili olan bütün statik parametreler aynı şekilde tanımlanmıştır. Diğer bir önemli nokta olan en iyi tur

uzunluğu; eğriyi en iyi şekilde temsil edecek noktalar kümesinin kullanılması ile elde edilen uydurma eğrisinin orjinal eğri ile arasındaki öklitsel hata farkıdır.



Şekil 3.9.15 veri noktasından oluşan eğri modeli

Bu örnek için 4 tane su damlacığı kullanıldığını varsayalım. Yukarıdaki şekle göre 1. ve 15. nokta bütün su damlacıkları tarafından mutlaka ziyaret edilmesi gerektiğinden bütün su damlacıkları 1. noktadan başlamakta ve 15. noktaya geldiğindeturunu tamamlamış sayılmaktadır. Bir iterasyonda herhangi iki su damlacığının aynı yolu takip etme olasılığını ortadan kaldırmak amacıyla 2., 3., 4. ve 5. noktalar rastgele olarak su damlacıklarının bir sonraki ziyaret ettiği şehir olarak belirlenmiştir.



3.10. Su damlacıkları ve ziyaret ettikleri şehirler (Oklar su damlacıklarını temsil etmektedir.)

Yukarıdaki şekilde de görüleceği gibi 2., 3., 4. ve 5. şehirler rastgele olarak belirlenmiştir. Böylece şu ana kadar su damlacıklarının takip ettiği yollar Çizelge 3.1 deki gibidir diyebiliriz.

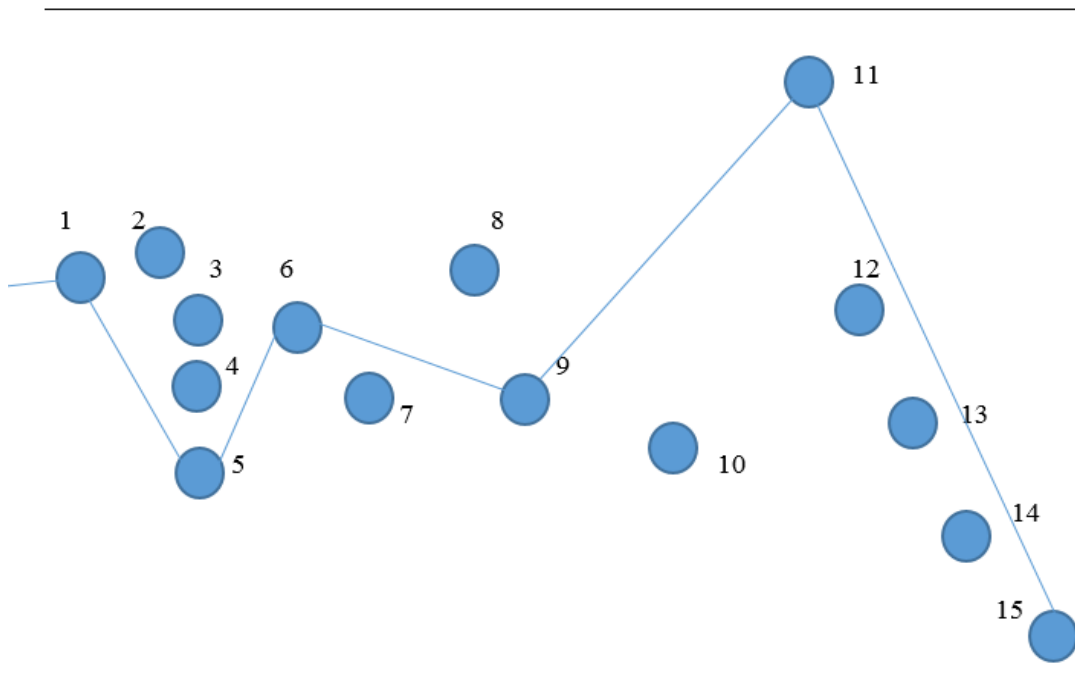
Çizelge 3.1. Su damlacıklarının şu ana kadar takip ettiği yollar

Su damlacığı	Yol
1	1 – 3 ...
2	1 – 2 ...
3	1 – 4 ...
4	1 – 5 ...

Bir sonraki aşamada (3.17) denklemine bağlı olarak su damlacıklarının ziyaret edeceği bir sonraki şehirler belirlenir. Denklemden de belirtildiği gibi olasılık değeri en büyük olan şehir bir sonraki şehir olarak alınır. Burada şehirler arasındaki toprak miktarı belirleyicidir. Su damlacığının ziyaret edeceği bir sonraki şehir belirlenirken seçme mekanizması devreye girer. Şu an bulunduğu şehir ile olası şehir arasındaki toprak miktarı ne kadar azsa bir sonraki şehir için su damlacığı o şehri tercih eder (Kenar seçimi). Bir sonraki şehir belirlendikten sonra bu iki şehir arasındaki toprak miktarı güncellenir (Lokal toprak güncelleme). Burada dikkat edilmesi gereken nokta su damlacığının ziyaret ettiği bir noktayı bir daha ziyaret edememesidir.

Bütün su damlacıkları turunu tamamladığında yani 15. noktaya ulaştığında en iyi tur belirlenir. Her bir su damlacığı için takip ettiği şehirler eğriyi oluşturmak için kullanılacak noktalar olarak kabul edilir. Bu noktalar kullanılarak elde edilen uydurma eğrisi ile orjinal eğri arasındaki öklitsel hata hesaplanır. En az hataya sahip noktalar kümesi en iyi tur olarak belirlenir ve en iyi tur üzerindeki şehirler arasındaki toprak miktarları güncellenir (Global toprak güncelleme).

İlgili iterasyon sonucunda su damlacıklarının takip ettiği şehirlerin Çizelge 3.2'deki gibi olduğunu varsayalım.



Şekil 3.11. En iyi noktalar kümesi temsili

Çizelge 3.2. Su damlacıklarının iterasyon sonucunda takip ettiği yollar

Su damlacığı	Yol	Öklitsel hata değeri
1	1 – 3 – 7 – 8 – 12 – 14 – 15	0.256
2	1 – 2 – 6 – 8 – 12 – 14 – 15	0.2698
3	1 – 4 – 7 – 8 – 9 – 11 – 15	0.1256
4	1 – 5 – 6 – 9 – 11 – 15	0.1025

Çizelge 3.2 'de su damlacıklarının takip ettiği yollara bağlı olarak bu noktalar kullanılarak elde edilen eğri ile orjinal eğri arasındaki hata değerleri de hesaplanmıştır. Burada en küçük öklid hatasına sahip olan 4. su damlacığının en iyi yolu takip ettiği görülmektedir. Demek ki su damlacığı 1 – 5 – 6 – 9 – 11 – 15 yolu üzerinden

geçmiş ve turunu tamamlamıştır. Dolayısıyla 1 – 5, 5 – 6, 6 – 9, 9 – 11 ve 11 – 15 şehirleri arasındaki toprak miktarları güncellenir ve bir sonraki iterasyonda bu şehirlerin seçilme olasılığı artırılmış olur. Bu turdaki en iyi çözümün hata değerine bağlı olarak en iyi tur değeri güncellenir. Bundan sonraki aşamada durma kriterlerine bağlı olarak işlem adımları tekrarlanır.

Burada vurgulanması gereken diğer bir önemli nokta ise komşuluk tabanlı lokal arama adımdır. Su damlacıkları turunu tamamladıktan sonra lokal arama işlemine geçilir. Çeşitlilik oranı ile her bir su damlacığının takip ettiği yol üzerinde bazı noktalar belirlenir. Her bir nokta civarında komşuluk sayısına bağlı olarak rastgele noktalar üretilir. Bu noktalardan hangisi eğriyi temsil etmek için daha uygunsa önceki nokta bu nokta ile güncellenir.

Algoritma sonucunda referans alınmış olan eğriyi en iyi şekilde temsil edecek optimal sayıdaki noktalar kümesi belirlenmiş olur.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Önerilen Yöntem

Bu tezde, akıllı su damlacıkları algoritması ile B-spline düğümlerinin seçilmesi ve eğrinin uydurulması problemi üzerinde çalışılmış ve bazı deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde var olan bazı benchmark fonksiyonları kullanılarak algoritmanın performansı değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların herbiri için kullanılmış olan benchmark fonksiyonları ilgili bölümlerde ifade edilmiştir.

Test aşamasında doğal su damlacıklarının bazı temel özellikleri adapte edilerek B-spline eğri uydurma problemi çözülmüştür. Eğri uydurma için gerekli olan optimal noktalar; önerilen yöntem ve ters mühendislik yaklaşımları kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalara göre, önerilen algoritma optimal sonuca yakınsamakta ve tatmin edici sonuçlar vermektedir.

4.2. Uygunluk Fonksiyonları

Yapılan çalışmada amaç var olan eğrinin çizilebilmesi için eğriyi temsil edebilecek en az sayıdaki en iyi düğümlerin tespit edilmesidir. Buna göre eğriyi temsil eden en iyi düğüm noktaları en iyi çözümdür.

Farklı yöntemler kullanılarak elde edilen çözümlerin karşılaştırılabilmesi için performans ölçütü olarak uygunluk fonksiyonları tanımlanmıştır. Tez çalışmasında beş tane uygunluk fonksiyonu kullanılarak yöntemler arasında performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bunlardan birincisi hata kareleri toplamının ortalamasıdır. Literatürde MSAE (Mean Squared Approximation Error) olarak bilinen bu ifade matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$MSAE = \sum_{i=1}^n (g(t_i) - f(t_i))^2 / n \quad (4.1)$$

Burada $g(t_i)$ iki boyutlu uzayda x_i değerine karşılık gelen uydurulmuş eğrideki y_i değerini, $f(t_i)$ ise x_i değerine karşılık gelen orjinal eğrideki y_i değerini ve n değeri ise orjinal eğrideki toplam nokta sayısını temsil etmektedir.

Diğer bir uygunluk fonksiyonu ise hata kareleri toplamı olarak bilinen ve MSE (Mean Square Error) olarak temsil edilen fonksiyondur. Bu fonksiyonun matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$MSE = \sum_{i=1}^n (g(t_i) - f(t_i))^2 \quad (4.2)$$

Çalışmada kullanılan bir diğer uygunluk fonksiyonu hata kareleri ortalamasının karakökü olarak bilinen ve RMSE (Root Mean Square Error) olarak temsil edilen fonksiyondur. Bu fonksiyonun matematiksel gösterimi ve aşağıdaki gibidir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g(t_i) - f(t_i))^2}{n}} \quad (4.3)$$

Bunlardan farklı olarak kullanılan diğer uygunluk fonksiyonları Akaike bilgi kriteri ve Bayes bilgi kriteridir. AIC ve BIC olarak ifade edilen bu bilgi kriterleri şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$AIC = N \log_e SE + 2(2Nod + m) \quad (4.4)$$

$$BIC = N \log_e SE + \log(N) \cdot (2Nod + m) \quad (4.5)$$

Burada Neğri yaklaştırmada kullanılan nokta sayısını, Nod B-spline eğri oluşturmak için kullanılan iç düğüm(interior knot) sayısını, m var olan veriye göre uydurulacak olan B-spline eğrisinin mertebesini, Denklem (4.6)'da matematiksel olarak ifade edilen SE ise en iyi çözüm için hata karelerinin toplamını temsil etmektedir.

$$SE = \sum_{k=1}^{K^*} (y_k - F(\bar{x}_k))^2 \quad (4.6)$$

AIC ve BIC uygunluk fonksiyonlarının en büyük avantajı hata sınırları ve yumuşatma faktörleri gibi sübjektif parametreleri kullanmamasıdır. Aslında bu fonksiyonlar yumuşatma faktörleri rolünü otomatik bir şekilde oynar. Son olarak bu fonksiyonlar en iyi modeli tanımlamak için basit ve anlaşılır prosedürler sağlar (Gálvez ve Iglesias, 2011).

Simülasyon sonuçlarında elde edilen hata değerleri için; daha küçük değerler daha iyi uygunluk değerleri demektir. Bu çalışmada uygunluk fonksiyonları örneklerimizdeki en iyi modeli seçmek ve diğer alternatif yaklaşımlarla karşılaştırmak üzere kullanılacaktır.

4.3. Geliştirilen Uygulama ve Deneysel Sonuçlar

ASD algoritmasında her bir su damlacığı çevresini gözlemleyerek belli bir yol izler ve final noktasına ulaşır. Bu gözlem esnasında su damlacığı adım adım belli yolları takip ederek çözüm üretir. Önerilen algoritma, B-spline eğri uydurma probleminin çözümü için graf formatında sunulmuştur. Buna göre; su damlacıkları graf üzerindeki kenarlardan geçerek düğümleri ziyaret etmektedir. Böylece su damlacıkları sürüsü lokal herüstik bir yaklaşımla graf üzerinde akarak optimal yada yakın optimal sonuçlar bulmaya çalışmaktadır.

Bu bölümde B-spline eğri uydurma probleminin çözümü kapsamında önerilen metasezgisel algoritmanın performansını göstermek amacıyla bazı sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Problemin çözümü için doğadaki doğal su damlacıklarının hareketlerinden ilham alınan ASD algoritması kodlanmıştır. Söz konusu eğrinin düğüm tahmini aşamasında, ters mühendislik yaklaşımları ve optimizasyon işlem adımları birleştirilmiştir. Önerilen algoritmada kullanılan bazı parametre ve değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Algoritma parametreleri(*:Aralıktaki bütün değerler simülasyonlarda kullanılmıştır)

Parametre	Değer
Veri noktası sayısı	> 8
Eğri derecesi	3
İterasyon sayısı	< 20
Eğrilik yarıçapı	Değişken
Su damlacığı sayısı	[3,10]*
Tolerans hata	0.0001
Komşuluk sayısı	[1,20]*
Çeşitlilik oranı (%)	[5,100]*

Çizelge 4.1’de; veri noktası sayısı, eğriyi oluşturmak için gerekli olan nokta sayısını; durma kriteri olarak kabul edilen tolerans hata ise en iyi çözüm için öklid hata değerini temsil etmektedir.

B-spline eğri uydurma probleminin çözümü için önerilen algoritmada kullanılan statik parametre değerleri şu şekildedir:

Çizelge 4.2. Akıllı su damlacıkları statik parametre değerleri(*:Aralıktaki bütün değerler simülasyonlarda kullanılmıştır.)

a_s	b_s	c_s	a_v	b_v	c_v	$InitVel$	$initSoil$	ρ	ε_s	ε_v
1000	0.01	1	1000	0.01	1	100	1000	[0.5 – 0.9]*	0.01	0.0001

Ek olarak, bütün simülasyonlar kübik B-spline eğrileri ile test edilmiştir. Dolayısıyla eğri derecesi bütün simülasyonlar için 3 ve eğrinin mertebesi de (derece+1)4 olarak alınmıştır. Algoritmanın durma kriterleri ise ya iterasyon sayısı ya da 0.0001 olarak alınan eğri için tolerans hata değeridir.

Yapılan deneysel çalışmalarda her bir durum için ilgili algoritma 50 defa çalıştırılmış ve elde edilen en iyi sonuçlar diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

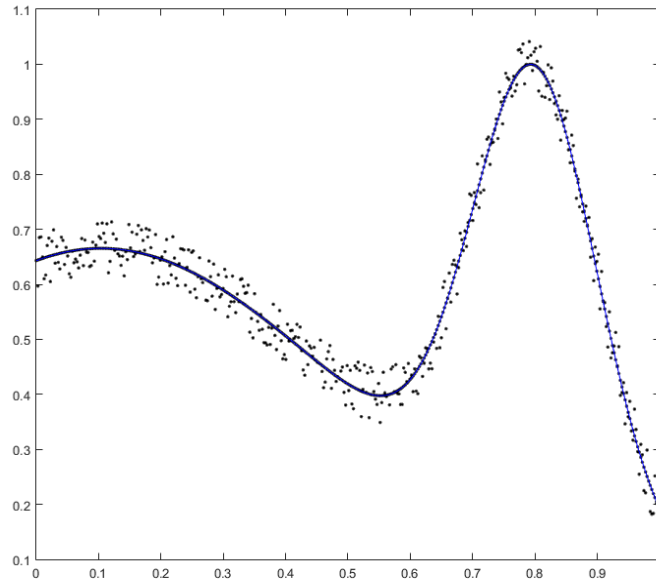
Bu çalışmadaki bütün deneyler 2.4 GHz. Intel Core i7 ve 12 GB RAM’ e sahip bir işlemci üzerinde test edilmiştir. İlgili algoritmanın kaynak kodu popüler bilimsel bir program olan MATLAB R2015a kullanılarak implemente edilmiştir. MATLAB arayüzünün seçilmesindeki amaç bu görev için çok uygun bir araç olmasıdır. Çünkü MATLAB hızlı bir programlama arayüzü olup özellikle matris işlemlerinde çok etkilidir.

Devam eden bölümde, önerilen algoritmanın performansını göstermek için literatürden seçilmiş olan bazı uygun örneklere yer verilmiştir.

4.3.1. Örnek Durum #1: Homojen Olmayan Kavissel Yapılar (Curvature Structures) için Adaptif Olmayan Düğüm Vektörleri ile Karşılaştırma

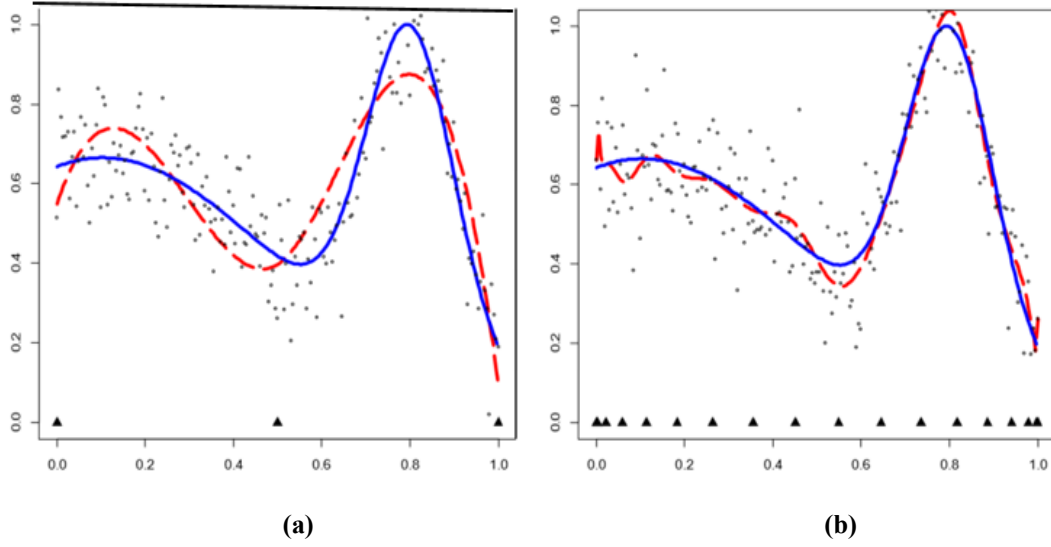
Homojen olmayan eğrilik yapısına sahip bir fonksiyon kullanılarak yapılan çalışmada Yuan ve ark.(2013b) seyrek ve sık düğüm vektörleri kullanarak eğriyi elde etmişlerdir. Bu deneysel çalışmada gürültülü ve sürekli bir eğri tercih edilmiş olup (4.7) numaralı denklemde yer alan fonksiyon 200 veri noktası ile $[0,1]$ aralığında örneklenmiştir. Bununla birlikte her bir nokta için $-0.05 \leq \gamma \leq 0.05$ aralığında rastgele gürültü eklenmiştir. Kullanılan eğrinin grafiksel gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir.

$$g(t) = \frac{1}{2.3935} \left(1.5 \exp\left(-\frac{(t-0.1)^2}{0.3}\right) + 0.1 \exp\left(-\frac{(t-0.5)^2}{2}\right) + 2 \exp\left(-\frac{(t-0.8)^2}{0.02}\right) \right), t \in [0,1] \quad (4.7)$$



Şekil 4.1.g fonksiyonunun grafiksel gösterimi

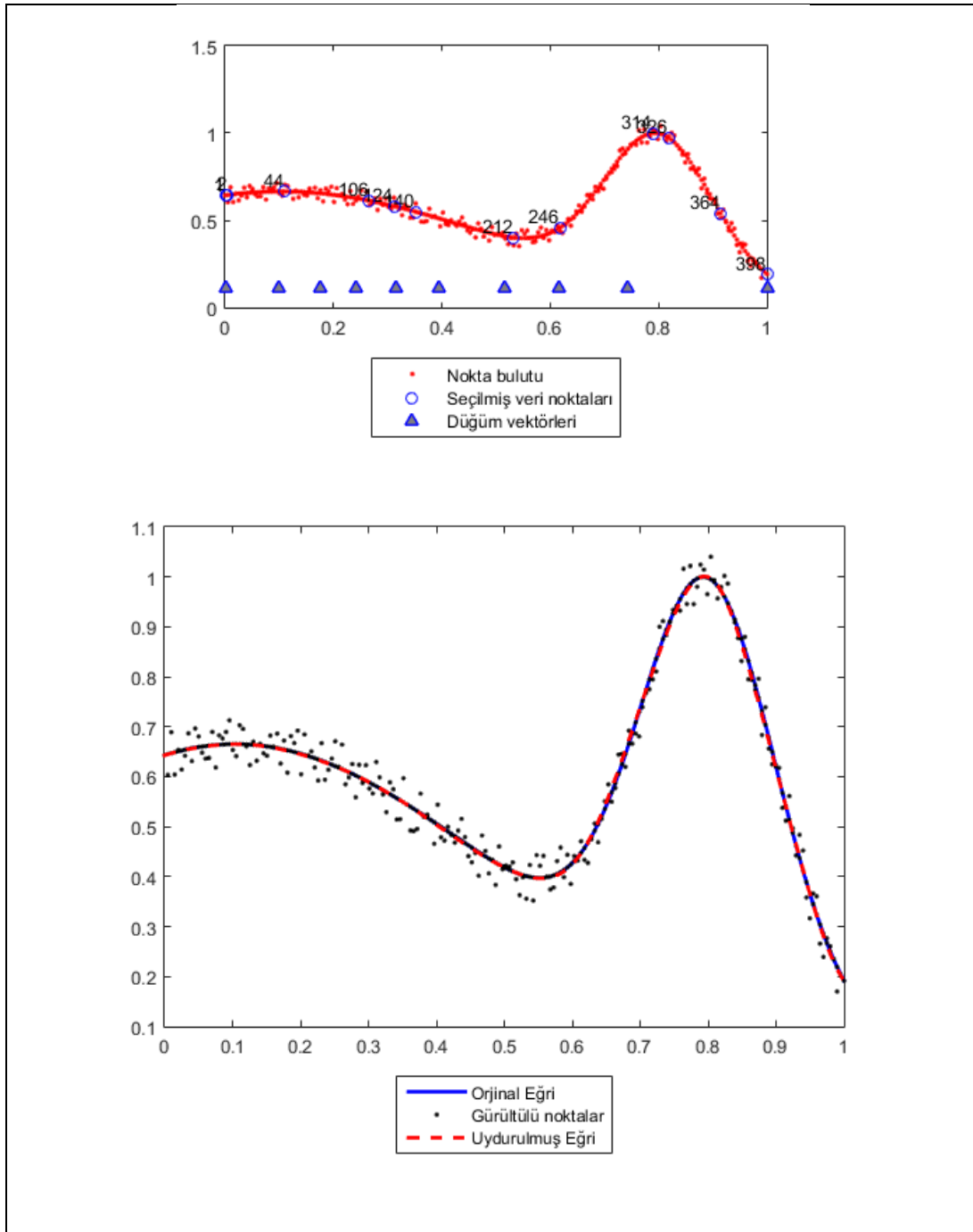
Bu çalışmada veriyi uydurmak için sırasıyla seyrek ve sık düğüm vektörleri kullanılmış ve bazı sonuçlar elde edilmiştir. Düğümlerin yerleri Chebyshev metodu kullanılarak belirlenmiştir. Bu iki düğüm vektörlerine bağlı olarak elde edilen B-spline yaklaşım performansı Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekilde de görüleceği gibi; seyrek ve sık düğüm vektörlerine bağlı olarak elde edilen uydurma eğrileri orjinal eğriyi iyi bir şekilde temsil edememişlerdir (Yuan ve ark., 2013a).



Şekil 4.2. Seyrek (a) ve sık (b) düğüm vektörleri ile elde edilen yaklaşırma fonksiyonları. Mavi düz çizgi doğru fonksiyonu; kırmızı kesikli çizgi yaklaşırma fonksiyonunu; daireler gürültülü noktaları ve üçgenler de düğümlerin konumlarını temsil etmektedir.

ASD algoritması kullanılarak ilgili eğrinin tahmini gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada diğer çalışmadaki gibi elde edilen çözümlerin MSAE değeri saklanmıştır. Yuan ve ark. (2013b) seyrek ve sık düğüm vektörleri kullanarak elde ettikleri sonuçları sadece görsel olarak ve matematiksel sonuçlar vermeden sunmuşlardır.

8iç düğüm kullanılarak elde edilen eğride en iyi çözümlün MSAE değeri 0.007922' dir. Şekil 4.3 önerilen metot kullanılarak elde edilen eğriyi göstermektedir. Şekilde ayrıca nokta bulutu arasından eğriyi en iyi şekilde temsil edecek olan veri noktaları ve tahmini B-spline düğümleri verilmiştir.



Şekil 4.3. Akıllı su damlacıkları yöntemi kullanılarak elde edilen yaklaşırma eğrisi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi sık ve ayırık vektörler kullanılarak elde edilen eğri ile önerilen yöntemin elde ettiği eğriler karşılaştırıldığında önerilen metodun daha iyi olduğu ve daha düşük hataya sahip olduğu görsel olarak açıktır. Ayrıca önerilen yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlara bakıldığında eğrilik yapıları ve dönüm noktalarını bulmada daha iyi olduğu görülmektedir.

Yapılan simülasyonlarda elde edilen en iyi çözüm için su damlacığı sayısı 5, eğrilik yarıçapı 13, komşuluk sayısı 10 ve çeşitlilik oranı %40 olarak alınmıştır.

Algoritma parametrelerinin B-spline eğri uydurma hatasının minimize edilmesinde önemli bir payı vardır. Lokal arama adımında komşuluk sayısı ve çeşitlilik oranı parametrelerinin aldığı değerlere göre elde edilen sonuçlar raporlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre komşuluk sayısı ve çeşitlilik oranı parametrelerinin artırılması işlem sayısını arttıracığından algoritmanın çalışma süresini artırsa da daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Yapılan karşılaştırma sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.3. ASD ile seyrek ve sık düğüm vektörleri kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması

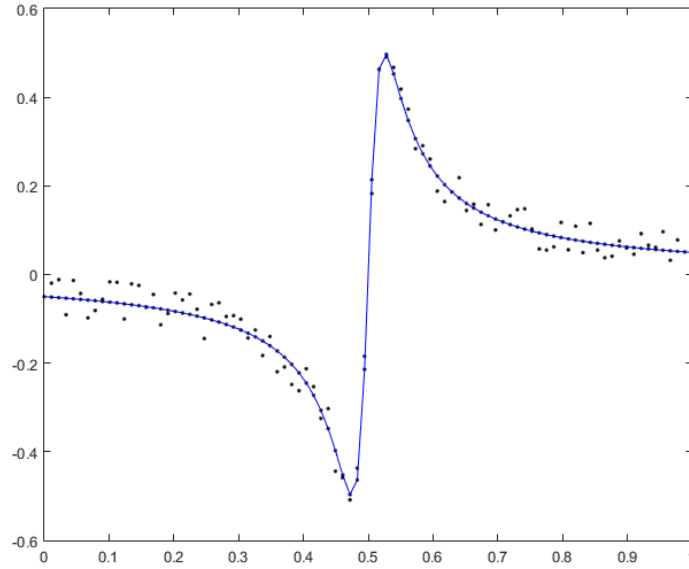
Yöntem	İç düğüm sayısı	MSAE
Seyrek düğüm vektörü	1	-
Sık düğüm vektörü	14	-
Önerilen yöntem (ASD)	8	0.007922

4.3.2. Örnek Durum #2: Schwetlick'in Metodu ile Karşılaştırılması

Schwetlick ve Schutze (1995) tarafından yapılan çalışmada optimal sonucun elde edilebilmesi için düğüm yerleştirme problemi genelleştirilmiş Gauss Newton metodu kullanılarak çözülmüştür. Yapılan çalışmada (4.8) numaralı denklemde verilmiş olan fonksiyon $[-2,2]$ aralığında 90 eşit noktaya örneklenmiştir. Bununla birlikte her bir noktaya $-0.05 \leq \gamma \leq 0.05$ aralığında gürültü eklenmiş olup hesaplamaların daha kolay yapılabilmesi için fonksiyonun değerleri $[-2,2]$ aralığından $[0,1]$ aralığına normalize edilmiştir.

$$g(t) = \frac{10t}{(1 + 100t^2)}, t \in [-2,2] \quad (4.8)$$

Önerilen yöntem ile bu yöntemin karşılaştırılabilmesi için aynı değerler ve parametreler sağlanmıştır. Kullanılan test fonksiyonunun grafiksel gösterimi Şekil 4.4'te verilmiştir.



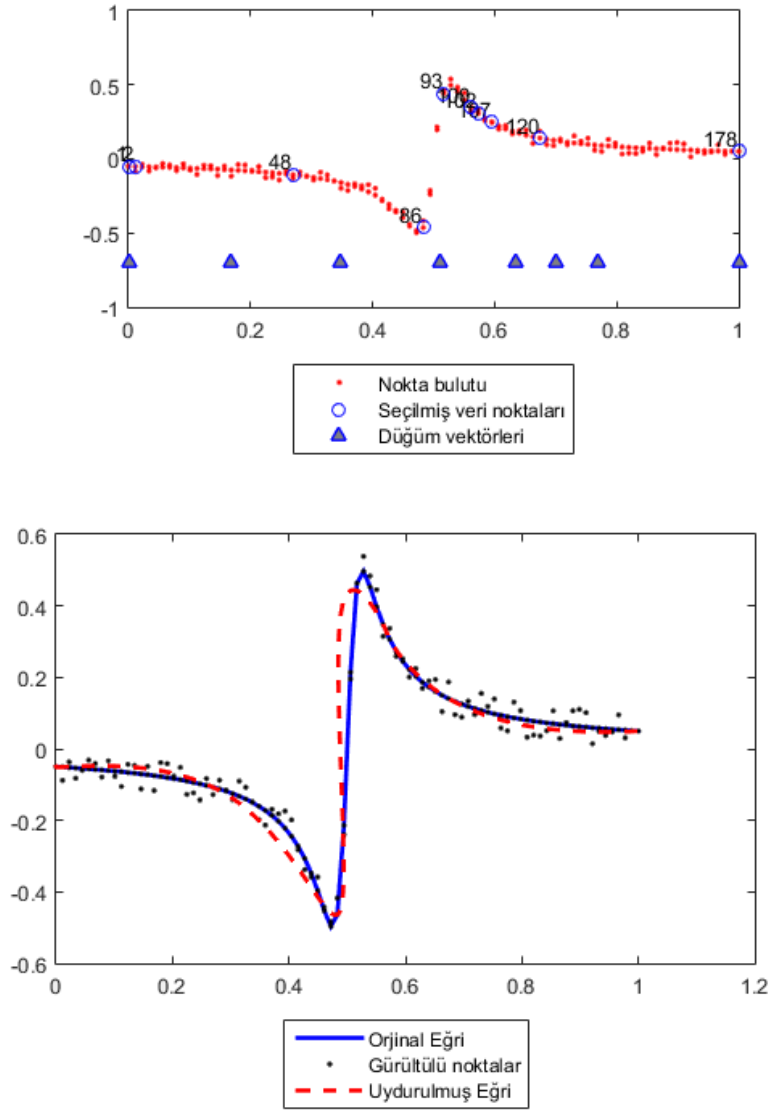
Şekil 4.4.Eğrinin grafiksel sunumu

6tane iç düğüm kullanılarak elde edilen eğri aşağıdaki şekilde verilmiştir. Çözümün MSAE değeri diğer çalışmada elde edilen 0.0739568 değerine karşılık 0.008513 olarak bulunmuştur. Ayrıca lokal arama adımı için komşuluk sayısı 5 ve çeşitlilik oranı%50 alınmıştır. Ayrıca bazı gereksiz noktaların seçilmesini engellemek için kullanılan eğrilik yarıçapı değeri 3.2 'dir.

Yapılan karşılaştırma sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.4.ASD ile Schwetlick'inmetodukullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması

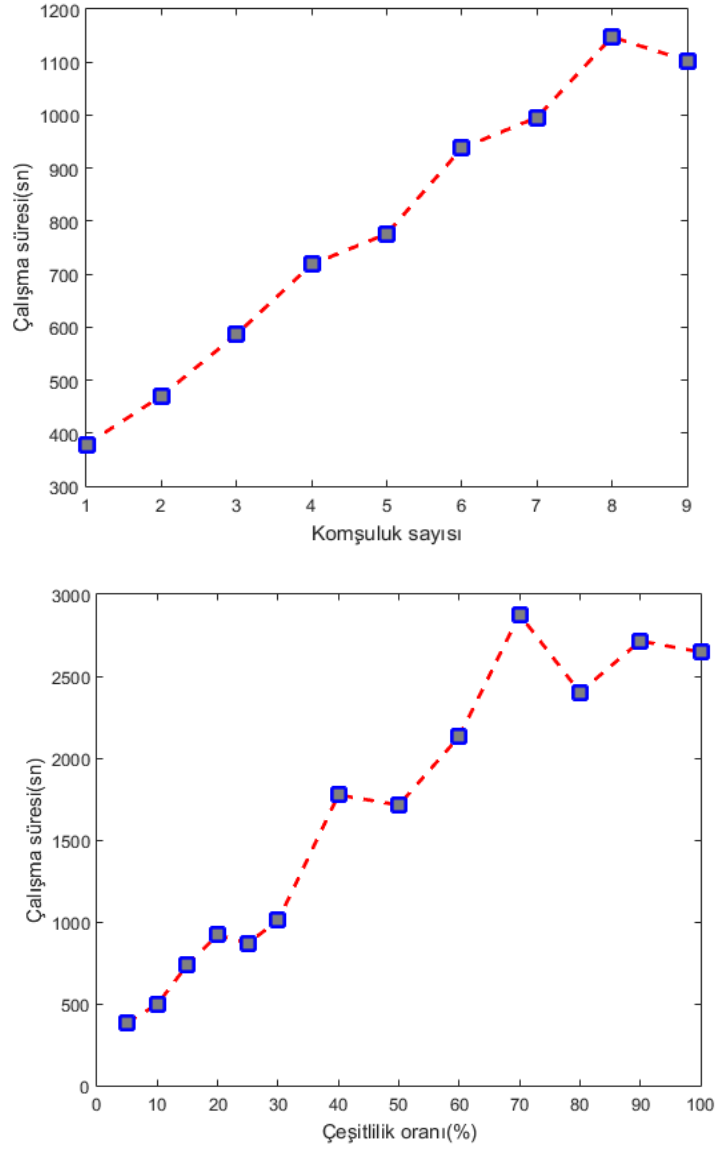
Yöntem	İç düğüm sayısı	MSAE
Schwetlick'in metodu	6	0.0739568
Önerilen yöntem (ASD)	6	0.008513



Şekil 4.5. B-spline eğri uydurma sonuçları

Önerilen algoritmanın uydurma sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. Görüldüğü gibi ASD algoritmasının yaklaştırma hata değeri çok daha düşüktür.

Fonksiyonun 0.5 civarında ani bir şekilde değiştiği yerde seçilen veri noktaları daha yoğun iken küçük eğimlerin olduğu yerlerde seçilen noktaların daha seyrek olduğu görülmektedir. Ayrıca komşuluk sayısı ve çeşitlilik oranı parametrelerinin algoritmanın çalışma zamanı üzerindeki etkisini göstermek amacıyla diğer bütün parametreler sabit tutulmak şartıyla komşuluk sayısı ve çeşitlilik oranı değişimlerinin çalışma zamanı üzerine etkisi Şekil 4.6'da görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 4.6. Komşuluk sayısı ve çeşitlilik oranının çalışma süresine etkisi

Yukarıdaki şekilde de görüleceği gibi çeşitlilik oranı ve komşuluk değeri parametrelerinin değerleri artırıldıkça çalışma süresi de artış eğilimindedir. Komşuluk değerinin artırılması ile birlikte bir nokta için daha fazla komşuluk değerine bakılmakta ve bu noktalardan en iyisi belirlenmektedir. Aynı şekilde çeşitlilik oranı da artırıldığında farklı noktalar belirlenmekte ve belirlenen noktalar çevresindeki daha iyi noktalar elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu da daha fazla hesaplama ve kıyaslama anlamına geleceğinden algoritmanın çalışma süresi doğal olarak artmaktadır.

4.3.3. Örnek Durum #3: Adaptif Serbest Düğümlü Spline'ler (AFKS-Adaptive Free-Knots Splines) ve Lasso ile Karşılaştırılması

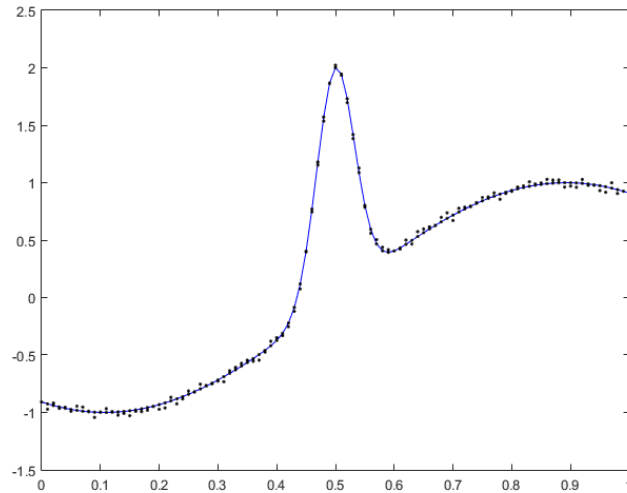
Önerilen metot ayrıca serbest düğümlü spline adı verilen ve AFKS olarak bilinen yöntem ve Lasso metodu ile karşılaştırılmıştır. Algoritmaların karşılaştırılması için Miyata ve Shen(2003)'in çalışmalarında yer alan test fonksiyonu kullanılmış olupbu fonksiyonun matematiksel temsili aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$f(t) = \sin(4t - 2) + 2\exp(-30(4t - 2)^2), t \in [0,1] \quad (4.9)$$

Lasso metodu Yuan ve ark.(2013b) tarafından geliştirilmiş olup ilgili çalışmada B-spline eğri uydurma için adaptif düğümlerin yerleştirilmesini sağlamak için kullanılmış bir yöntemdir. Farklı seviyelerde eğriliklere sahip B-spline bazlarını içeren bir küme oluşturmak Lasso metodunun temelini oluşturmaktadır. Gözlemlenen veriye bağlı olarak Lasso metodu aracılığıyla baz kümesinin belli bir alt kümesi seçilir. Bu alt kümeye bağlı olarak düğüm vektörleri tanımlanır ve eğri uydurma işlemi gerçekleştirilir.

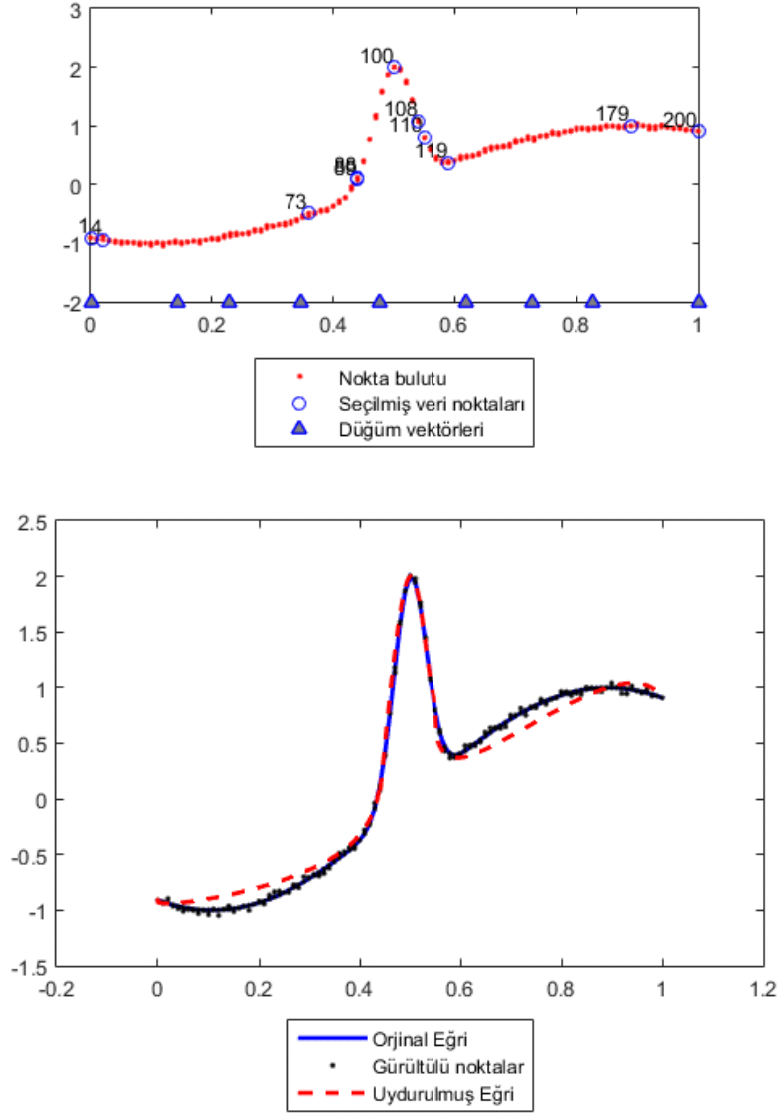
Matematiksel denklemi f olaneğri için 101 nokta kullanılmış ve bu noktalar $[0,1]$ aralığında homojen bir şekilde yerleştirilmiştir. Bununla birlikte her bir noktaya $-0.05 \leq \gamma \leq 0.05$ aralığında gürültü eklenmiş olup hata değeri olarak elde edilen çözümlerin MSAE değeri hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır.

Kullanılan test fonksiyonunungrafiksel gösterimi Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7.g fonksiyonunun grafiksel gösterimi

ASD algoritması kullanılarak elde edilen uydurma fonksiyonları Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. f fonksiyonu için B-spline eğri uydurma sonuçları

Şekil 4.8’da önerilen yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. Kullanılan iç düğüm sayısı ve yerleri ile seçilen veri noktaları şekil üzerinde gösterilmiştir. AFKS’den daha iyi sonuçlar veren Lasso metodu ile 9 iç düğüm kullanılarak elde edilen 0.01610MSAE değerine karşılık önerilen yöntem ile en iyi çözüm için 7 tane iç düğüm kullanılarak **0.029639** değeri elde edilmiştir. Görüldüğü

gibiASD algoritmasının yaklaştırması daha az sayıda iç düğüm kullanarak çok yakın bir hata değeri ile sağlanmıştır.

Önerilen algoritmanın simülasyonu sonucunda en iyi çözümün lokal aramada kullanılan parametre değerleri için eğrilik yarıçapı 15, komşuluk değeri 10 ve çeşitlilik oranı %40 alınmıştır.

Yapılan karşılaştırma sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.5.ASD ile Lassometodu kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Yöntem	İç düğüm sayısı	MSAE
Lasso metodu	9	0.01610
Önerilen yöntem (ASD)	7	0.029639

4.3.4. Örnek Durum #4:Alternatif Bazı Evrimsel Yaklaşımlar ile Karşılaştırılması

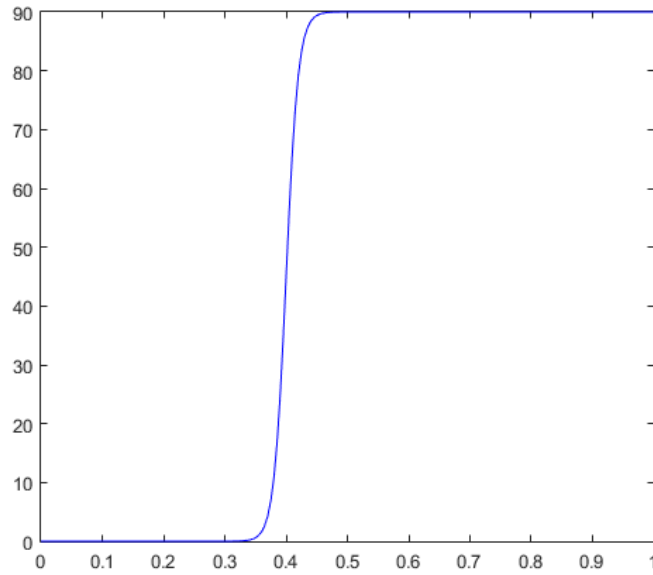
Önerilen yöntemin performansı literatürde kullanılan ve evrimsel yaklaşımlar olan yapay bağışıklık sistemi ve Pareto Zarflama-Temelli Seçim Algoritması (PESA) ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar kısaca şu şekilde özetlenebilir:

Ülker ve Arslan(2009) yapmış oldukları çalışmada B-spline eğri uydurma problemi için biyolojik tabanlı sezgisel bir yaklaşım olan yapay bağışıklık sistemi kullanarak düğümleri otomatik olarak ayarlamış ve eğri elde edilmeye çalışmışlardır. Burada orjinal problem kombinatoryal optimizasyon problemine dönüştürülmüştür.

B-spline eğrilerinin tahmininde Pareto Zarflama-Temelli Seçim Algoritması (PESA) kullanımı öne sürülerek yapılan çalışmada (Ulker, 2013), ters mühendislik yöntemleri ve ilgili algoritma yaklaşımının bir araya getirilerek probleme çözüm sunulmuştur.PESA, Corne ve ark.(2000) tarafından öne sürülmüş bir genetik algoritma türüdür. Bu yöntem özellikle çok amaçlı optimizasyon aşamasında kullanılmaktadır. Genetik temelli bir algoritma olduğundan PESA kapsamında çaprazlama ve mutasyon katsayıları kullanılmaktadır.

Bu yöntem genetik temelli bir yaklaşım olduğundan tahmin noktasında kullanılacak rastgele noktaları temsil etmek için problemin temel ögesi olarak kromozomlar oluşturulmuştur. Her bir kromozom bir çözümü temsil etmiş olup algoritma sonucunda en iyi kromozom yani eğriyi en iyi şekilde temsil edecek olan noktalar kümesi belirlenmiştir.

Algoritmaların performanslarının karşılaştırılması aşamasında elde edilen en iyi çözümlerin AIC, BIC ve RMSE değerleri hesaplanmıştır. Önerilen algoritmanın performansını değerlendirmek için Çizelge 4.6’da matematiksel olarak ifade edilmiş ve Şekil 4.9’da grafiksel olarak belirtilmiştir test fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon $[0,1]$ aralığında homojen bir şekilde dağılmış t değerlerinin kullanılmasıyla 201 veri noktası oluşturulmuştur.



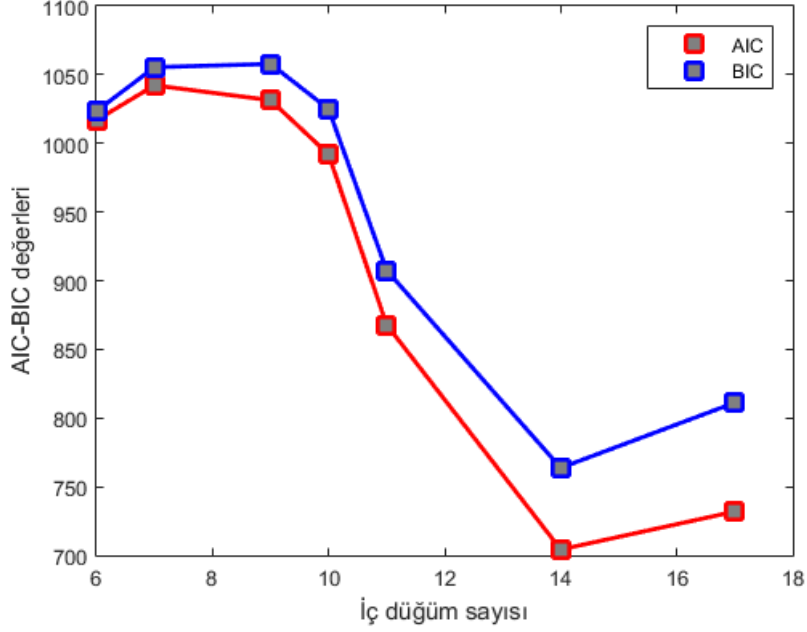
Şekil 4.9. Test fonksiyonunun grafiksel gösterimi

Çizelge 4.6 Test fonksiyonu matematiksel tanımı (Gálvez ve Iglesias, 2011)

Denklemler ve tanım kümesi	$N(\mathbf{0}, \sigma^2)$	k değeri
$f_1(t) = \frac{90}{1 + e^{-100(t-0.4)}}$ $t \in [0,1]$	$\sigma = 1$	$1 - 7$

İç düğüm sayılarına bağlı olarak AIC ve BIC değerlerinin değişim grafiği Şekil 4.10’de gösterilmiştir. Burada iç düğüm sayısı eğriyi temsil edebilecek minimum noktadan daha az alındığında istenilen eğri elde edilememekte ve hata değeri yüksektir. Belli bir sayıdaki iç düğümden sonrada AIC ve BIC aynı değerler etrafında değişmektedir.

Diğer alternatif metotlar ile yapılan karşılaştırma sonucu Çizelge 4.7'de özetlenmiştir. Çizelgenin sonunda da önerdiğimiz algoritma kullanılarak elde edilen sonuçlar raporlanmıştır.



Şekil 4.10. İç düğüm sayısına bağlı olarak AIC ve BIC değerleri

Yukarıdaki şekilde de görüleceği gibi iç düğüm sayısı 14 olarak alındığında minimum hata ile eğri temsil edilebilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda iç düğüm sayısına bağlı olarak elde edilen RMSE, AIC ve BIC değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.8.'de önerilen yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar ile bazı evrimsel yaklaşımlar kullanılarak elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Buna göre her bir yaklaşım için kullanılan yöntem, metodun davranışı, iterasyon sayısı, hata değerleri ve iç düğüm sayıları tartışılmış ve en iyi çözümler koyu olarak vurgulanmıştır.

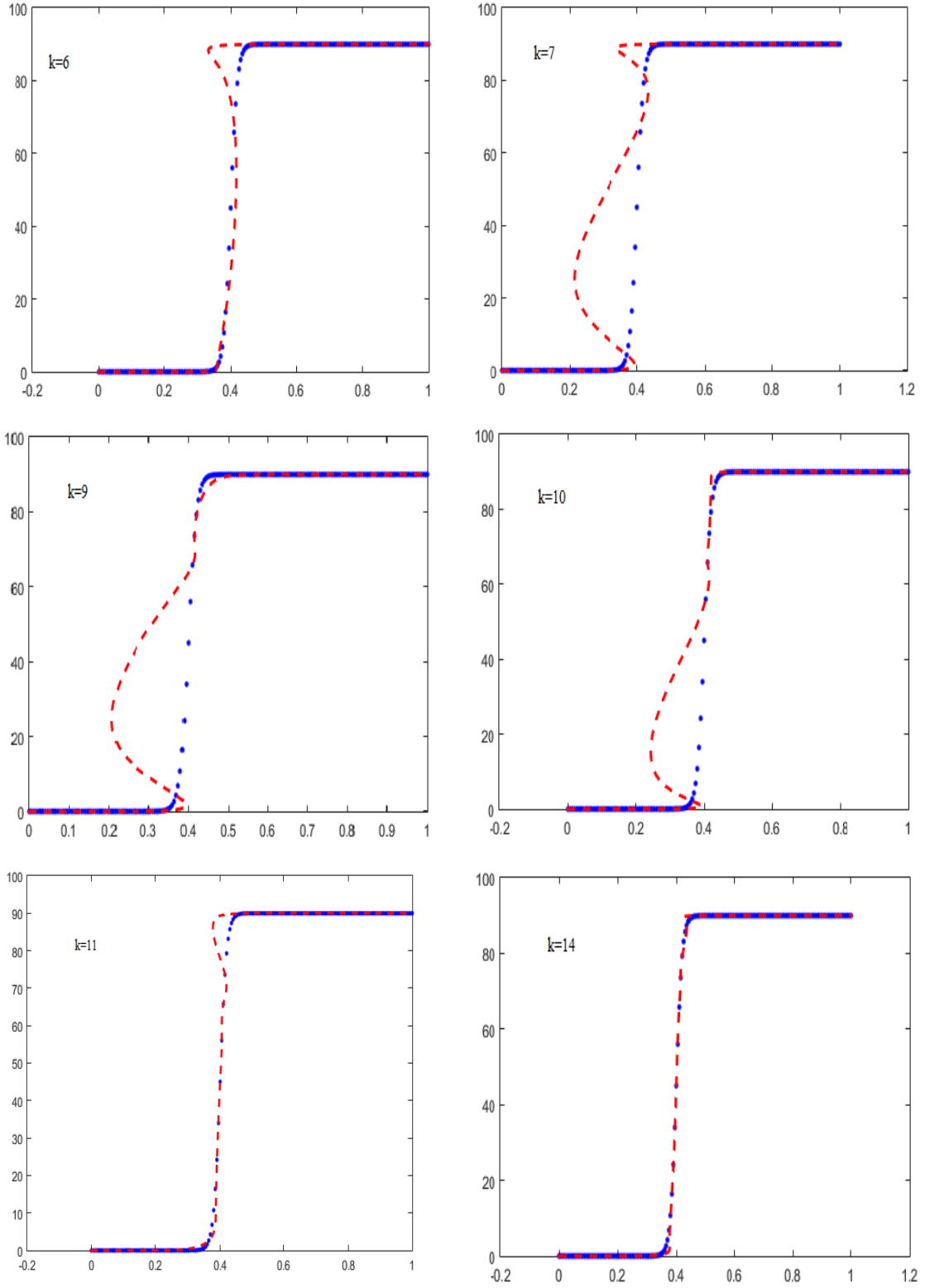
Çizelge 4.7. f fonksiyonu için iç düğüm sayılarına bağlı olarak uydurma hata değerleri

İç düğüm sayısı	RMSE	AIC	BIC
$k = 6$	0.87628	1016.874	1023.481
$k = 7$	0.9241	1042.236	1055.449
$k = 9$	0.8818	1031.405	1057.831
$k = 10$	0.791428	991.9302	1024.963
$k = 11$	0.57559	867.9182	907.5579
$k = 14$	0.37179	704.2195	763.679
$k = 17$	0.38656	731.878	811.1573

Çizelge 4.8. Önerilen algoritmanın diğer evrimsel yöntemler ile karşılaştırılması(Galvez ve ark., 2015)

Metot	Metodun davranışı	İterasyon sayısı	AIC	BIC	İç düğüm sayısı
Yapay bağıklık sistemi	Ayrık	500	1873	1924	15
PESA	Ayrık	500	>3000	>3000	>50
Önerilen yöntem (ASD)	Ayrık	5	704.2195	763.679	14

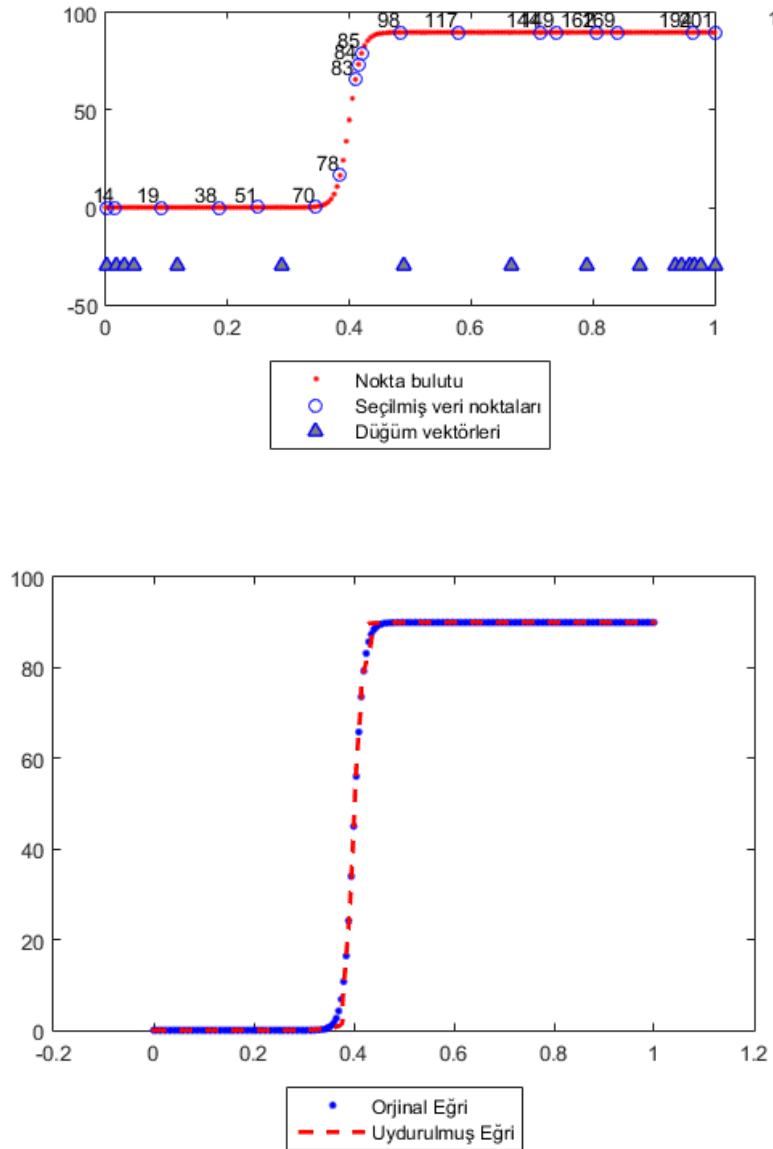
Belirtilen eğri kullanılarak elde edilen B-spline eğri uydurma simülasyon sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir. İç düğüm sayısına bağlı olarak elde edilen uydurma sonuçlarından hareketle eğriyi temsil edecek optimum düğüm sayısı belirlenebilir.



Şekil 4.11. İç düğüm sayısına bağlı olarak elde edilen bazı simülasyon sonuçları (mavi noktalar asıl eğriyi, kırmızı kesik çizgiler ise uydurulmuş eğriyi temsil etmektedir.)

B-spline eğri uydurma problemi bazı evrimsel ve evrimsel olmayan yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. En iyi çözümler için BIC değerleri hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlara göre ASD yöntemi problemin çözümünde tatmin edici sonuçlar vermektedir. Bazı alternatif yöntemlerle karşılaştırıldığında; çalışma süresi daha uzun olsa da BIC uygunluk değerlerine bakıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

14 iç düğüm kullanılarak elde edilen simulasyon sonucu Şekil 4.12’de görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 4.12. 14 iç düğüm kullanılarak elde edilen eğri

Çizelge 4.8'de görüleceği gibi önerilen yöntem yapay bağıklık sistemi ve PESA'ya göre eğri uydurmada daha başarılıdır. Ayrıca problemin çözümü için gerekli olan iterasyon sayısı değerine göre neredeyse 100 kat daha azdır. Son olarak önerilmiş olan yöntem düğüm seçme problemi için uygunluk değerleri olan AIC ve BIC açısından değerlendirildiğinde diğer yaklaşımlara göre daha uygundur.

4.3.5. Tartışma

Elde edilen sonuçlara göre, problemin çözümü için gerekli olan su damlacığı sayısının artırılması algoritma üzerinde etkili bir performans sağlamamakta ve başarı yüzdesini kabul edilebilir ölçüde artırmamaktadır. Dolayısıyla 3 ile 6 arasında seçilen su damlacığı sayısı tatmin edici sonuçlar vermiştir.

Komşuluk tabanlı lokal arama sırasında kullanılan komşuluk sayısı ve çeşitlilik oranı algoritmanın performansı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Komşuluk sayısının artırılması ile birlikte iki nokta arasındaki kontrol edilebilecek nokta sayısı artacağından eğrinin temsili için gerekli kritik ve önemli olan noktaların bulunabilme olasılığı artacaktır. Çeşitlilik oranı daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi lokal minimumlara takılmayı engelleyen önemli bir parametredir. Çeşitlilik oranının artması ile birlikte tek bir bölgeye takılmaktan kurtulup farklı bölgelerdeki iyi noktaların bulunması sağlanmaktadır.

Diğer yandan iterasyon sayısının artırılması performans üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Başlangıçta su damlacığı sayısının artırılmasıyla çözüm uzayı artmakta ve komşuluk değeri ile çeşitlilik oranı parametrelerinin artırılması çözümlere daha az iterasyonda ulaşılmasına imkan sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında B-spline eğri uydurma probleminin çözümü için metasezgisel bir yöntem önerilmiştir. Bilindiği gibi metasezgisel yöntemler kesin çözümler vermeyip en yakın optimal çözümleri sunmaktadır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre önerilen yöntem eğri uydurmada etkili ve tatmin edici sonuçlar vermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bilindiği üzere sezgisel algoritmalar, büyük boyutlu optimizasyon problemleri için, kabul edilebilir süre içerisinde optimuma yakın çözümler verebilen algoritmalar. Bu çalışmada metasezgisel optimizasyon algoritmalarından sürü zekâsı tabanlı bir yaklaşım olan akıllı su damlacıkları yöntemi ile B-spline eğri uydurma problemi çözülmüştür.

Akıllı su damlacıkları algoritması optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan sürü temelli bir yöntemdir. Doğada bulunan doğal su damlacıklarının hareketlerinden ilham alınarak gerçekleştirilen bu yöntemde çevre şartlarının da etkisiyle su damlacığının takip ettiği yol değişmektedir. Bu çalışmada doğal su damlacıklarının hareketleri simüle edilmiştir. Var olan noktalar su damlacığının ziyaret edebileceği yerler olarak kabul edilmiş ve belli sayıdaki su damlacığı bu yerlere rastgele olarak yerleştirilmiştir. Algoritmanın çalışmasından sonra seçmiş olduğu noktalar elde tutularak akarsu üzerinde takip edilen yol bulunmuştur. Bu noktaların aslında eğriyi en iyi şekilde temsil edecek noktalar olduğu tespit edilmiştir.

Doğadaki farklı problemler için etkili çözüm bulmak amacıyla evrende var olan bazı süreç, olay yada model incelenerek değişik sürü zekâsı tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Sezgisel algoritmaların her biri tüm problemler için en iyi sonucu veremeyebilir. Bir problem için iyi sonuçlar veren bir yöntem, başka bir problem için çalıştırıldığında iyi olmayabilir. Örneğin; genetik algoritmalar çözüm uzayının geniş, süreksiz ve karmaşık olduğu problem tiplerinde başarılı sonuçlar vermektedir.

Optimizasyon problemlerinde sıkça kullanılan metasezgisel metotlar çok güçlüdür fakat jenerasyonlar optimal sonuçlara ulaştığında yakınsama yavaşlamakta ve problemin maliyeti artmaktadır. Örneğin genetik algoritmalar sağlamdır ama optimal çözüme daha yakın nesillerde yakınsama yavaşlamaktadır, dolayısıyla maliyet yükselmektedir. Bunun için önerilen algoritmada lokal arama aşamasında değerlendirilen çeşitlilik oranı; yerel minimumlara takılmayı engelleyerek yakınsamayı hızlandırmakta ve maliyet artmamaktadır. Evrimsel algoritmaların sağlamlığı, etkinliği ve verimliliği açısından bu yaklaşım umut verici görünmektedir.

Bu çalışmada verilen noktalar kümesindeki her bir noktaya bir parametre değerinin atanması ve uygun bir düğüm vektörünün seçimi için vektördeki düğümlerin belirlenmesinde Centripetal metot kullanılmıştır.

Önerilen yöntem var olan yaklaşımlara değer katmış olup problem çözümünün iyileştirilmesine katkı sağlamıştır. İlk olarak yöntem eğri uydurmada seçilmiş olan düğüm sayısını minimize etmiştir. Ayrıca bu tür metasezgisel yaklaşımlarda karşılaşılan lokal minimuma takılma olasılığı lokal arama ve bazı modifikasyonlarla engellenmiştir.

Tez kapsamında, algoritmanın performansını ölçmek için literatürdeki bazı test fonksiyonları kullanılmıştır. Bununla birlikte algoritma parametrelerinin B-spline eğri uydurma üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Ayrıca önerilen algoritmanın performansı bazı diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır.

5.2. Öneriler ve Gelecekteki Çalışmalar

Bu çalışmada literatürde bulunan benchmark fonksiyonlarının belli bir alt kümesi veri seti olarak kullanılmıştır. Bu yüzden diğer fonksiyonlar kullanılarak bu çalışma zenginleştirilebilir.

Ayrık optimizasyon için yapılan bu çalışma sürekli optimizasyon ile de test edilebilir.

B-spline eğri uydurma için kullanılan bu algoritma farklı problemlerin çözümünde kullanılabilir. Gelecek çalışmalarda bu algoritmanın yüzey modellenmesinde kullanılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- 2015, Patents, *Fuel Cells Bulletin*, 2015 (5), 15-19.
- Alexa, M., Behr, J., Cohen-Or, D., Fleishman, S., Levin, D. ve Silva, C. T., 2003, Computing and rendering point set surfaces, *Ieee Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 9 (1), 3-15.
- Corne, D. W., Knowles, J. D. ve Oates, M. J., 2000, The Pareto Envelope-based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization, *Parallel Problem Solving from Nature Conference*.
- Dadaneh, B. Z., Markid, H. Y. ve Zakerolhosseini, A., 2015, Graph coloring using intelligent water drops algorithm, *The 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, 595-600.
- De Boor, C., 2006, "A practical guide to splines, Springer-Verlag," *New York, 1978*.
- Duan, H. B., Liu, S. Q. ve Lei, X. J., 2008, Air Robot Path Planning Based on Intelligent Water Drops Optimization, *2008 Ieee International Joint Conference on Neural Networks, Vols 1-8*, 1397-1401.
- Duan, H. B., Liu, S. Q. ve Wu, J., 2009, Novel intelligent water drops optimization approach to singleUCAV smooth trajectory planning, *Aerospace Science and Technology*, 13 (8), 442-449.
- Galvez, A. ve Iglesias, A., 2013a, Firefly Algorithm for Explicit B-Spline Curve Fitting to Data Points, *Mathematical Problems in Engineering*.
- Galvez, A. ve Iglesias, A., 2013b, A new iterative mutually coupled hybrid GA-PSO approach for curve fitting in manufacturing, *Applied Soft Computing Journal*, 13 (3), 1491-1504.
- Galvez, A., Iglesias, A., Avila, A., Otero, C., Arias, R. ve Manchado, 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. ve Iglesias, A., 2011, Efficient particle swarm optimization approach for data fitting with free knot -splines, *Computer-Aided Design*, 43 (12), 1683-1692.
- Gálvez, A. ve Iglesias, A., 2012, Particle 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. ve Puig-Pey, J., 2012, Iterative two-step genetic-algorithm-based method for efficient polynomial B-spline surface reconstruction, *Information Sciences*, 182 (1), 56-76.
- Gregorski, B. F., Hamann, B. ve Joy, K. I., 2000, Reconstruction of B-spline surfaces from scattered data points, *Computer Graphics International 2000, Proceedings*, 163-170.
- Harmening, C. ve Neuner, H., 2016a, Choosing the optimal number of b-spline control points (part 2: Approximation of surfaces and applications), *Journal of Applied Geodesy (JAG)*, 10.
- Harmening, C. ve Neuner, H., 2016b, Choosing the optimal number of b-spline control points (part 1 methodology and approximation of curves), *Journal of Applied Geodesy (JAG)*, 10 (3), 139-157.
- Hendrawan, Y. ve Murase, H., 2011, Neural-Intelligent Water Drops algorithm to select relevant textural features for developing precision irrigation system using machine vision, *Computers and Electronics in Agriculture*, 77 (2), 214-228.
- Huang, Y. B., Qian, X. P. ve Chen, S. L., 2009, Multi-sensor calibration through iterative registration and fusion, *Computer-Aided Design*, 41 (4), 240-255.

- Kamkar, I., Akbarzadeh-T, M. R. ve MahdiYaghoobi, 2010, Intelligent Water Drops a new optimization algorithm for solving the Vehicle Routing Problem, *Ieee International Conference on Systems, Man and Cybernetics (Smc 2010)*.
- Karaboga, D. ve Gorkemli, B., 2011, A combinatorial artificial bee colony algorithm for traveling salesman problem, *Innovations In Intelligent Systems and Applications (INISTA), 2011 International Symposium On, Pages 50-53. IEEE*.
- Kayvanfar, V. ve Teymourian, E., 2014, Hybrid intelligent water drops algorithm to unrelated parallel machines scheduling problem: a just-in-time approach, *International Journal of Production Research*, 52 (19), 5857-5879.
- Kesavamoorthy, R., Arunshunmugam, D. ve Thangamariappan, L., 2011, Solving traveling salesman problem by modified intelligent water drop algorithm. International Conference on Emerging Technology Trends (ICETT), *Proceedings Published by International Journal of Computer Applications (IJCA)*, 2, 18-23.
- Lancaster, P. ve Salk, P., 2009, Surface generated by moving least squares methods, *Math Computation*, 1981, 6 (18), 21-23.
- Levin, D., 1998, The approximation power of moving least-squares, *Mathematics of Computation*, 67 (224), 1517-1531.
- Li, W. S., Xu, S. H., Zhao, G. ve Goh, L. P., 2005, Adaptive knot placement in B-spline curve approximation, *Computer-Aided Design*, 37 (8), 791-797.
- Miyata, S. ve Shen, X., 2003, Adaptive free-knot splines, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 12 (1), 197-213.
- Mokhtari, H., 2015, A nature inspired intelligent water drops evolutionary algorithm for parallel processor scheduling with rejection, *Applied Soft Computing*, 26, 166-179.
- Moncayo-Martínez, L. A. ve Mastrocinque, E., 2016, A multi-objective intelligent water drop algorithm to minimise cost Of goods sold and time to market in logistics networks, *Expert Systems with Applications*, 64, 455-466.
- Msallam, M. M. ve Hamdan, M., 2011, Improved intelligent water drops algorithm using adaptive schema, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 3 (2), 103-111.
- Nenov, S., 2016, *B-Spline Curves and Surfaces as a Minimization of Quadratic Operators*.
- Niu, S. H., Ong, S. K. ve Nee, A. Y. C., 2013, An improved intelligent water drops algorithm for solving multi-objective job shop scheduling, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26 (10), 2431-2442.
- Norouzzadeh Ravari, A. ve D. Taghirad, H., 2016, Reconstruction of B-spline curves and surfaces by adaptive group testing, *Computer-Aided Design*, 74, 32-44.
- Ong, S. K., Niu, S. H. ve Nee, A. Y. C., 2013, Improved Intelligent Water Drops Optimization for Single and Multiple Objective Job Shop Scheduling, *IFAC Proceedings Volumes*, 46 (9), 128-133.
- Peng, W., Xu, C. ve Feng, Z., 2016, 3D face modeling based on structure optimization and surface reconstruction with B-Spline, *Neurocomputing*, 179, 228-237.
- Pinel, L. A. a. T., W. , 1997, The Nurbs Book.
- Schmitt, C. ve Neuner, H., 2015, Knot estimation on b-spline curves, *Osterreichische Zeitschrift fur Vermessung & Geoinformation*, 103 (2-3), 188-197.
- Schwetlick, H. ve Schutze, T., 1995, Least-Squares Approximation by Splines with Free Knots, *Bit*, 35 (3), 361-384.
- Shah-Hosseini, H., 2007, Problem solving by intelligent water drops, *2007 Ieee Congress on Evolutionary Computation, Vols 1-10, Proceedings*, 3226-3231.

- Shah-Hosseini, H., 2008, Intelligent water drops algorithm: A new optimization method for solving the multiple knapsack problem, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 1 (2), 193-212.
- Shah-Hosseini, H., 2009, Optimization with the nature-inspired intelligent water drops algorithm, *Evolutionary Computation*, 297-320.
- Shah-Hosseini, H., 2012a, An approach to continuous optimization by the intelligent water drops algorithm, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 224-229.
- Shah-Hosseini, H., 2012b, An approach to continuous optimization by the Intelligent Water Drops algorithm, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 32, 224-229.
- Shah-Hosseini, H., 2013, Improving k-means clustering algorithm with the intelligent water drops (iwd) algorithm, *International Journal of Data Mining, Modelling and Management*, 5 (4), 301-317.
- Singh, M. ve Saini, S., 2014, Optimization of complex mathematical functions using a novel implementation of intelligent water drops algorithm. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 236: 145-149.
- Talebitooti, R., Shojaeefard, M. H. ve Yarmohammadisatri, S., 2015, Shape design optimization of cylindrical tank using b-spline curves, *Computers & Fluids*, 109, 100-112.
- Teymourian, E., Kayvanfar, V., Komaki, G. M. ve Zandieh, M., 2016, Enhanced intelligent water drops and cuckoo search algorithms for solving the capacitated vehicle routing problem, *Information Sciences*, 334–335, 354-378.
- Thilagavathi, D. ve Thanamani, A. S., 2014, Scheduling in high performance computing environment using firefly algorithm and intelligent water drop algorithm, *Int. J. Eng. Trends Technol. (IJETT)*, 14 (1).
- Tirandaz, H., Nasrabadi, A. ve Haddadnia, J., 2011, Curve Matching and Character Recognition by Using B-Spline Curves, *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 3 (2).
- Ulker, E., 2013, B-Spline curve approximation using Pareto envelope-based selection algorithm-PESA, *Int. J. Comput. Commun. Eng.*, 2 (1), 60-63.
- Ülker, E., 2007, Yapay Zeka Teknikleri kullanarak Yüzey Modelleme, *Selçuk Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Doktora Tezi*, 142.
- Ülker, E. ve Arslan, A., 2009, Automatic knot adjustment using an artificial immune system for B-spline curve approximation, *Information Sciences*, 179 (10), 1483-1494.
- Valenzuela, O. ve Pasadas, M., 2010, Using Simulated Annealing for knot placement for cubic spline approximation, *International Conference on Mathematical Models for Engineering Science - Proceedings*, 148-154.
- Valenzuela, O., Pasadas, M., Rojas, I., Guillen, A. ve Pomares, H., 2013, Automatic knot adjustment for B-spline smoothing approximation using improved clustering algorithm, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*.
- Xiao, R. R., Zhang, J. ve Liu, H. Q., 2012, NURBS Fitting Optimization based on Ant Colony Algorithm, *Chemical Engineering and Material Properties II*, 549, 988-992.
- Yamaura, Y., Nanya, T., Imoto, H. ve Maekawa, T., 2015, Shape reconstruction from a normal map in terms of uniform bi-quadratic B-spline surfaces, *Computer-Aided Design*, 63, 129-140.
- Yan, R.-J., Wu, J., Lee, J. Y., Khan, A. M., Han, C.-S., Kayacan, E. ve Chen, I. M., 2016, A novel method for 3D reconstruction: Division and merging of overlapping B-spline surfaces, *Computer-Aided Design*, 81, 14-23.

- Yang, H. ve Wang, G., 2015, Construction of B-spline surface with B-spline curves as boundary geodesic quadrilateral, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 290, 104-113.
- Yoshimoto, F., Moriyama, M. ve Harada, T., 1999, Automatic knot placement by a genetic algorithm for data fitting with a spline, *Shape Modeling International '99 - International Conference on Shape Modeling and Applications, Proceedings*, 162-169.
- Yuan, Y., Chen, N. ve Zhou, S., 2013a, Adaptive B-spline knot selection using multi-resolution basis set, *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 45 (12), 1263-1277.
- Yuan, Y., Chen, N. ve Zhou, S. Y., 2013b, Adaptive B-spline knot selection using multi-resolution basis set, *Iie Transactions*, 45 (12), 1263-1277.

EKLER

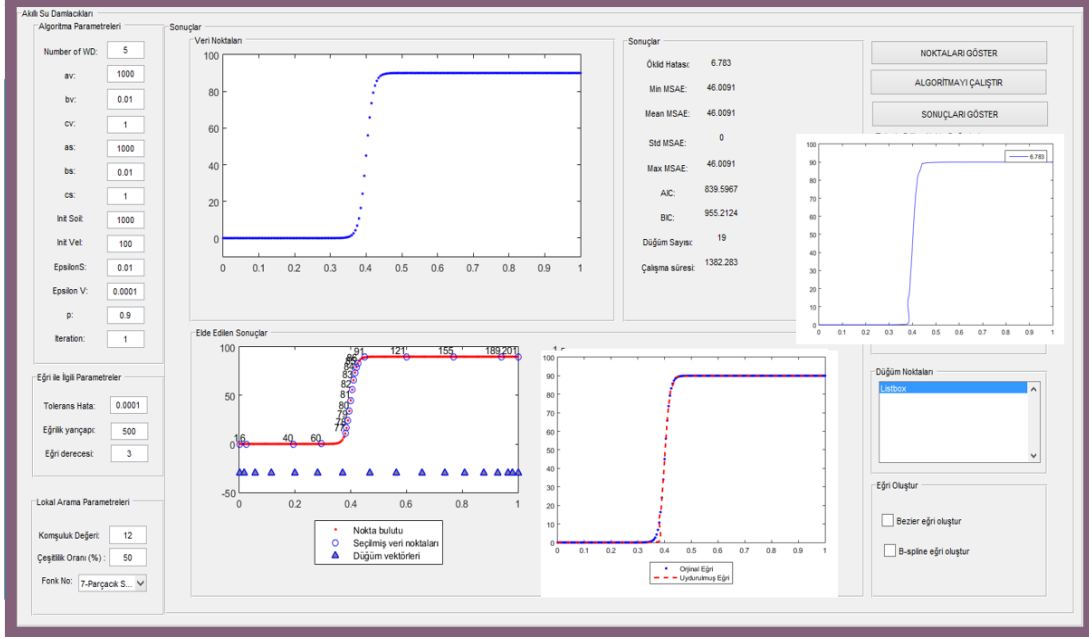
EK-1: ASD ile B-spline Eğri Tahmininin Uygulama Ortamında Gerçekleştirilmesi

ASD algoritması ile B-spline eğrisi düğüm tahminini gerçekleştirmek amacıyla MATLAB arayüzü kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım, verilen parametreler ve değerler ışığında, ASD yaklaşımını kullanarak B-spline eğri tahminini gerçekleştirmektedir. Bu yazılım ile amaç; yöntemin simülasyonunun yapılabilmesi ve sonuçların görsel olarak değerlendirilebilmesidir. Yazılım; problem simülasyonu, algoritma parametrelerinin sonuç üzerindeki etkisini değerlendirebilme ve kolay kullanılabilirlik gibi özelliklere sahiptir.

Program kullanıcıya, matris işleme, fonksiyon ve veri çizme, algoritma uygulama, kullanıcı arayüzü oluşturma gibi birçok imkan sağlayan bilimsel bir program olan MATLAB kullanılarak geliştirilmiştir. Özellikle matris işlemlerinde hızlı ve güvenilir sonuçlar vermesi bu programlama ortamının tercih sebeplerindedir.

Yazılımın açıklaması; *Giriş Arayüzü*” ve *“Sonuç Arayüzü”* olmak üzere iki kısımda ele alınabilir.

Geliştirilen yazılım, kolay ve hızlı bir kullanım sağlamak amacıyla uygun yapıdaki bir arayüz üzerine inşa edilmiştir. Yazılım ilk çalıştırıldığında gerekli bütün ayarlama ve işlemlerin sağlanabildiği *“Giriş Arayüzü”* ekrana gelmektedir. Giriş Arayüzü’nden bir ekran görüntüsü aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Yazılım-Giriş Arayüzü

Yazılım genel olarak sol, orta ve sağ kısımlarda yer alan alanlar üzerine dayanmaktadır. Sol tarafta ASD algoritması ve eğri ile ilgili parametrelerin ayarlanabildiği bazı kontroller bulunmaktadır.

This figure shows a detailed view of the parameter settings for the ASD algorithm and the curve fitting process.

Algoritma Parametreleri

- Number of WD: 5
- av: 1000
- bv: 0.01
- cv: 1
- as: 1000
- bs: 0.01
- cs: 1
- Init Soil: 1000
- Init Vel: 100
- Epsilon S: 0.01
- Epsilon V: 0.0001
- p: 0.9
- Iteration: 3

Eğri ile İlgili Parametreler

- Tolerans Hata: 0.0001
- Eğrilik yarıçapı: 3
- Eğri derecesi: 3

Lokal Arama Parametreleri

- Komşuluk Değeri: 20
- Çeşitlilik Oranı (%): 80
- Fonk No: 2

Algoritma ve eğri parametreleri

Diğer yandan orta alanda tahmin edilen en iyi B-spline eğrisinin ve ulaşılması gereken eğrinin görüntülediği alan bulunmaktadır. Orta kısım aslında algoritmanın çalıştırılması sonucunda elde edilen en iyi çözüm ile ilgili sonuçları sunmaktadır. Sonuçlar bölümünde elde edilen en iyi çözüm için minimum, maksimum ve ortalama uygunluk değerleri görüntülenmektedir. Ayrıca kullanılan veri noktası sayısı ve algoritmanın çalışma süresi raporlanabilmektedir. Son olarak sağ tarafta ise tahmin sürecinin başlatılması ve tahmin sonucu elde edilen sonuçların görüntülenebilmesi için belli işlemleri yerine getiren düğmeler bulunmaktadır. Ayrıca tahmin edilen eğrilerin düğüm noktalarının ve veri noktalarının koordinatları ile ulaşılan hata değerlerinin listelenmesini sağlayan kontroller bulunmaktadır. Son olarak kullanıcı tarafından belirlenen kontrol noktalarına bağlı olarak Bezier ve B-spline eğrileri çizilebilmekte ve eğri görsel olarak sunulabilmektedir.

İkinci arayüz olan “*Sonuç Arayüzü*” daha çok su damlacığı ile ilgili bilgileri tutmaktadır. Algoritmada da belirtildiği gibi belli sayıdaki su damlacığı her iterasyonda belli bir yol izlemekte olup ilgili iterasyon sonucunda en iyi yolu izleyen su damlacığının yol bilgisi tutulmaktadır. Dolayısıyla bu arayüzde her bir iterasyondaki en iyi veri noktalarının bilgisi tutulmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Kübra UYAR
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Alanya /ANTALYA- 01.06.1991
Telefon : 0534 954 13 45 - 0332 223 33 93
Faks : -
e-mail : kubrauyar@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Alanya Anadolu Lisesi, Alanya, Antalya	2009
Üniversite	: Melikşah Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği, Talas, Kayseri	2014
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	-
Doktora	: -	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014	Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü	Arş.Gör.
2012-2013	Melikşah Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü	Öğrenci Asistan

UZMANLIK ALANI

Optimizasyon, metasezgisel algoritmalar, modelleme

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Uyar K., Ülker E., Arslan A. “The Use of Intelligent Water Drops (IWD) for B-Spline Curve Fitting”, International Conference on Advanced Technology and Sciences ICAT'16, 170-176, 01-03 September 2016, Konya, Turkey. (Yüksek lisans tezinden yapılmıştır.)