

**UÇAK İTKİSİNİN FADEC SİSTEMİ İÇİN PERFORMANS MODELLERİNİN
OLUŞTURULMASI VE OPTİMİZASYONU**

Ece YURDUSEVİMLİ METİN

Doktora Tezi

Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Önder TURAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2021

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 20DRP069 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

ÖZET

UÇAK İTKİSİNİN FADEC SİSTEMİ İÇİN PERFORMANS MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI VE OPTİMİZASYONU

Ece YURDUSEVİMLİ METİN

Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2021

Danışman: Prof. Dr. Önder TURAN

Bu tez kapsamında; havacılık ve savunma sanayiinde kullanılan bir turboprop motorun farklı RPM değerleri için motor performans modelleri geliştirilmiştir. Söz konusu modeller tek girdi tek çıktılı (SISO) ve çok girdili tek çıktılı (MISO) olacak şekilde 2 farklı popülasyon temelli metasezgisel algoritma ile modellenmiştir. Modelde literatürde sürekli sistemlerde birçok alanda iyi bir modelleme algoritması olarak kabul gören Genetik Algoritma ile bu alanda nispeten daha az uygulanmış olan ve havacılık modellerinde daha geniş araştırma alanına sahip olan Yapay Arı Kolonisi Algoritması kullanılmıştır. Sistemde çıktı Tork (N.m) olarak belirlenip girdi değerleri RPM ve hava akışı olarak alınmıştır. Bununla birlikte, çoklu hata tanımları yapılarak ve elde edilen sonuçlar yer deneylerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak modelin geçerliliği ve güvenilirliği literatürde sıklıkla kullanılan hata metrikleri türlerinden tanımlanmış olup kullanılan algoritmaların birbirlerine oranla yeterliliği maksimum iterasyon sayısı ve CPU işlem süresi türlerinden indeksler ile karşılaştırılmıştır. Son olarak elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Tam Donanımlı Bağımsız Dijital Motor Kontrol Ünitesi (FADEC) sistemine uyarlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Gaz türbinleri, İtki, Optimizasyon, Modelleme, Metasezgisel algoritmalar, Turboprop, FADEC

ABSTRACT

THRUST PERFORMANCE MODELLING AND OPTIMIZATION FOR AIRCRAFT FADEC SYSTEM

Ece YURDUSEVİMLİ METİN

Department of Avionics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2021

Supervisor: Prof. Dr. Önder TURAN

Within the scope of this thesis; engine performance models have been developed for different RPM values of a turboprop engine used in the aviation and defense industry. The models in question were modeled with 2 different population-based metaheuristic algorithms as single input single output (SISO) and multiple input single output (MISO) systems. In the model, the Genetic Algorithm, which is accepted as a good modeling algorithm in many areas in continuous systems in the literature, and the Artificial Bee Colony Algorithm, which is relatively less applied in this field and has a wider research area in aviation models, are used. The output of the system is determined as Torque (N.m) and the input values are RPM and air flow. The validity and reliability of the model is defined by multiple error indexes that are commonly used in literature by comparing the outcomes with test-cell experiment results. The efficiencies of the algorithms are compared to each other by using computational indexes such as max. number of iterations, and CPU processing time. Finally, the results obtained were applied to the Full Authority Digital Engine Control (FADEC) system.

Keywords: Gas turbines, Thrust, Optimization, Modelling, Metaheuristic algorithms, Turboprop, FADEC.

TEŐEKKÖR

Tez alıőmam sűresince beni akademik olarak yűnlendiren ve çalıőmanın olgunlaőıp deęerlendirilmesinde ve tez konusu ile ilgili her konuda yardımcı olan deęerli danıőmanım Sayın Prof. Dr. Őnder TURAN'a, çalıőmama olan deęerli gűrűő ve katkılarından dolayı tez izleme ve savunma komitesi űyelerine ve bu sűrete bana destek olan aileme ve arkadaőlarıma teőekkűr ederim.

Ece YURDUSEVİMLİ METİN



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ece YURDUSEVİMLİ METİN

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| BAŞLIK SAYFASI | i |
| JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI..... | ii |
| ÖZET | iii |
| ABSTRACT..... | iv |
| TEŞEKKÜR | v |
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ..... | vi |
| İÇİNDEKİLER..... | vii |
| TABLolar DİZİNİ | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | x |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | xi |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Turboprop Motorlar ve Gelişmeler..... | 4 |
| 1.2. Tezin Amacı | 4 |
| 1.3. Tezin Özgünlüğü | 5 |
| 1.4. Tezin Güncelliği..... | 5 |
| 1.5. Tezin Ekonomik ve Sosyal Katkıları..... | 6 |
| 1.6. Tez Çalışma Planı..... | 7 |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI..... | 8 |
| 2.1. Temel Performans Göstergeleri..... | 8 |
| 2.2. Modelleme Yaklaşımları..... | 10 |
| 2.2.1. Deterministik Yaklaşımlar | 10 |
| 2.2.2. Nondeterministik Yaklaşımlar | 11 |
| 2.3. Havacılık Alanında Kullanılan Modelleme Yöntemleri | 11 |
| 2.3.1. Uçak veri tabanı modeli | 12 |
| 2.3.2. Uçuş fazına özel fonksiyonlar | 12 |
| 2.3.3. Üreticilerin verileri..... | 13 |
| 2.3.4. Arama tabloları | 13 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.5. Optimizasyon yöntemleri..... | 14 |
| 2.3.6. Tek çözüm tabanlı metasezgiseller | 16 |
| 2.3.7. Popülasyon tabanlı metasezgiseller | 17 |
| 2.4. Havacılık Alanında Literatür Taraması | 17 |
| 2.4.1. Tezler | 17 |
| 2.4.2. Makaleler | 19 |
| 3. YÖNTEMLER VE MODEL..... | 22 |
| 3.1. CT-7 Motoru..... | 23 |
| 3.2. Genetik Algoritma..... | 24 |
| 3.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması | 27 |
| 3.4. Hata Metrikleri..... | 31 |
| 4. SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 32 |
| 4.1. Genetik Algoritma Sonuçları | 32 |
| 4.2. Tek Girdili ve Tek Çıktılı Yapay Arı Kolonisi Modeli Sonuçları..... | 33 |
| 4.3. Çok Girdili ve Tek Çıktılı Yapay Arı Kolonisi Modeli Sonuçları | 40 |
| 5. DEĞERLENDİRME | 48 |
| KAYNAKÇA..... | 50 |
| ÖZGEÇMİŞ | |

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Tablo 1.1. Ocak – Kasım 2020 Uluslararası yolcu pazarı istatistikleri..... | 2 |
| Tablo 1.2. Nisan 2021 maliyet tahmin tablosu | 3 |
| Tablo 3.1. CT-7 motor parametreleri | 32 |
| Tablo 4.1. Motor girdi ve çıktı parametreleri..... | 33 |
| Tablo 4.2. Genetik algoritma girdi parametreleri..... | 34 |
| Tablo 4.3. Yapay arı kolonisi girdi parametreleri | 35 |
| Tablo 4.4. ABC SISO hata ve uygunluk değerleri..... | 35 |
| Tablo 4.5. ABC SISO Tork değerleri..... | 36 |
| Tablo 4.6. ABC MISO hata ve uygunluk değerleri | 42 |
| Tablo 4.7. ABC MISO Tork değerleri | 42 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. FADEC'in kontrol ettiği sistemler | 8 |
| Şekil 2.2. FADEC ve ilgili sistemler | 10 |
| Şekil 2.3. Optimizasyon yöntemleri sınıflandırması | 14 |
| Şekil 3.1. CT-7 motor bloğu | 23 |
| Şekil 3.2. CT-7-9C motor bloğu | 24 |
| Şekil 3.3. GA akış şeması | 26 |
| Şekil 3.4. ABC akış şeması | 30 |
| Şekil 4.1. ABC SISO 1000 iterasyon RPM - Tork değerleri | 34 |
| Şekil 4.2. ABC SISO 10000 iterasyon hata (e) değişimi | 36 |
| Şekil 4.3. ABC SISO 1000 iterasyon MSE değişimi | 37 |
| Şekil 4.4. ABC SISO 1000 iterasyon RMSE değişimi | 38 |
| Şekil 4.5. ABC SISO 1000 iterasyon MAE değişimi | 39 |
| Şekil 4.6. ABC SISO 1000 iterasyon MAPE değişimi | 40 |
| Şekil 4.7. ABC MISO 50000 iterasyon RPM - Tork değişimi | 41 |
| Şekil 4.8. ABC MISO 50000 iterasyon hata (e) değişimi | 43 |
| Şekil 4.9. ABC MISO 50000 iterasyon MSE değişimi | 44 |
| Şekil 4.10. ABC MISO 50000 iterasyon RMSE değişimi | 45 |
| Şekil 4.11. ABC MISO 50000 iterasyon MAE değişimi | 46 |
| Şekil 4.12. ABC MISO 50000 iterasyon MAPE değişimi | 47 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|----------|--|
| ABC | : Artificial Bee Colony (Yapay Arı Kolonisi) |
| ADIRU | : Air Data Inertial Reference System |
| ASK | : Available Seat Kilometers (Arz edilen Koltuk Kilometre) |
| BADA | : Base of Aircraft Data |
| CDU | : Common Display Unit |
| Covid-19 | : Novel Coronavirus SARS-CoV2 |
| EEC | : Electronic Engine Control |
| EGT | : Engine Gas Temperature |
| FADEC | : Full Authority Digital Engine Control |
| FMC | : Flight Management Computer |
| GA | : Genetic Algorithm (Genetik Algoritma) |
| HMU | : Hydromechanical Unit |
| ICAO | : International Civil Aviation Organization (Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu) |
| IATA | : International Air Transport Association (Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği) |
| KPMG | : Klynveld Peat Marwick Goerdeler |
| LP | : Linear Programming |
| MAE | : Mean Absolute Error |
| MAPE | : Mean Absolute Percentage Error |
| MILP | : Mixed Integer Linear Programming |
| MINLP | : Mixed Integer Nonlinear Programming |
| MISO | : Multiple Input Single Output (Çok Girdi Tek Çıktı) |
| MSE | : Mean Squared Error |
| NASA | : National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi) |
| NLP | : Nonlinear Programming |
| RMSE | : Root Mean Square Error |
| SISO | : Single Input Single Output (Tek Girdi Tek Çıktı) |
| ÜYK | : Ücretli Yolcu Kilometre |

1. GİRİŞ

20. yüzyıl, teknolojik gelişmelerin hızla gerçekleştiği, 21. yüzyıl ise bu gelişmelerin küresel boyutta yaygınlaşıp normalleştiği ve insan yaşamını ve sektörleri önemli ölçüde etkilediği bir çağ olmuştur. Sanayileşme ve akabinde küreselleşme ile birlikte dünya üzerinde sahip olunan kısıtlı kaynaklar gün geçtikçe önem kazanmıştır. Özellikle malzeme, elektronik, enerji ve ulaşım sektörlerindeki büyük değişiklikler, olumlu ve insan hayatını kolaylaştıran özellikleriyle birlikte birçok olumsuz yan etkiyi de beraberinde getirmiştir. Bu durumda özellikle söz konusu alanlarda verimli ve etkili sistemlerin kurulması, enerji sarfiyatının önüne geçilmesi, çevre dostu, yeşil teknolojilerin yaygınlaştırılması ve kaynak kullanımının optimizasyonu önem kazanmıştır.

Özellikle II. Dünya Savaşı sonrası havacılık ve savunma sanayiinde yaşanan gelişmelerle birlikte enerji ve yakıt yönünden verimli sistemlerin arayışı ulaşım sektöründe farklı alternatifleri ön plana çıkarmıştır.

Günümüzde ise dünyada nüfus artışına bağlı olarak havacılık sektörü gün geçtikçe büyümektedir. Bunun sonucunda havacılığa bağlı çevresel zararlar ve maliyetler artmaktadır. Söz konusu etkileri en aza indirmek için özellikle üretim ve işletme alanlarında optimizasyon şarttır.

Havacılık sektöründe uçağa ve uçuşa dair tüm parametrelerin limitlerinin ve maliyetlerin belirlenmesi konularında uluslararası ve ulusal sivil havacılık otoriteleri, üretim ve işletme firmaları söz sahibidir. Uluslararası sivil havacılık otoritesine (ICAO) göre, havacılık sektöründe maliyetler genel olarak 6 başlıkta incelenmektedir. Bunlar;

- İşletme maliyetleri
- Hizmet maliyetleri
- Hava trafik hizmeti maliyetleri
- Yolcu hizmet maliyetleri
- Rezervasyon ve satış maliyetleri
- Diğer maliyetler

şeklindedir (ICAO, 2017). Burada işletme maliyetleri, doğrudan işletme maliyetleri olarak da adlandırılmakta ve uçağın uçuşundan doğan maliyetleri kapsamaktadır. Doğrudan işletme maliyetlerinde ise yakıt maliyeti önemli bir yere sahiptir. 2018 yılında yakıt maliyetinin, dünya genelindeki toplam havacılık maliyetlerinin %20,5'ini oluşturacağı ön görülmüştür (IATA, 2017).

Havacılık sanayiinde normal şartlar altında oluşan maliyetlere ek olarak ulusal veya küresel kriz durumlarında da ek maliyetler söz konusu olmaktadır. Covid-19 pandemisinin etkileri 2020 ve 2021 yıllarında uluslararası hava trafiğinde ve maliyetlerde büyük bir negatif etkiye sahiptir.

KPMG Havacılık Sektörü Liderleri 2021 Raporu'na ve IATA aylık istatistiklerine göre, 2020 yılında pandemiye bağlı olarak Ocak – Kasım 2020 arasında uluslararası toplam Ücretli Yolcu Kilometre (ÜYK) değeri %-74,7 oranında değişim göstermiştir (KPMG, 2021). Pandeminin etkisini en güçlü gösterdiği bu döneme ait uluslararası yolcu pazarı istatistikleri Tablo 1.1.'de görülmektedir.

Tablo 1.1. Ocak – Kasım 2020 Uluslararası yolcu pazarı istatistikleri (KPMG, 2021)

| Uluslararası yolcu pazarı | | |
|---------------------------|---------------------|--------|
| | Ocak – Kasım 2020 % | |
| Havayolu | ÜYK | ASK |
| Uluslararası toplam | %-74.7 | %-67.6 |
| Afrika | %-70.6 | %-62.8 |
| Asya Pasifik | %-79.0 | %-73.0 |
| Avrupa | %-73.0 | %-65.8 |
| Latin Amerika | %-71.4 | %-67.6 |
| Orta Doğu | %-71.9 | %-63.5 |
| Kuzey Amerika | %-75.0 | %-65.8 |

Söz konusu istatistiklere göre düşüşler 2021 yılında da devam etmiş, bu durum hem yakıt, hem de yakıt dışı maliyetlere yansımıştır. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA)'nın, 2021 yılı Nisan ayında yayınladığı rapora göre havacılık sektöründe 2021'de vergi sonrası net zarar 47,7 milyar Amerikan Doları olarak tahmin edilmektedir. Yakıt fiyatlarının ise jet yakıtında varil başına 68,9 Amerikan Doları ile petrol için varil başına 64,2 Amerikan Doları olması ön görülmektedir (IATA, 2021). Pandeminin havacılık sektöründeki maliyetlere yönelik etkisi Tablo 1.2. ile verilmiştir.

Tablo 1.2. Nisan 2021 maliyet tahmin tablosu (IATA, 2021)

| | 2019 | 2020 | 2021F |
|--|-------|--------|-------|
| Net vergi sonrası kar, milyar USD | 26.4 | -126.4 | -47.7 |
| Faaliyet marjı, % gelir | %5.2 | -%28.2 | -%9.4 |
| ÜYK büyümesi, yıllık ch % | %4.1 | -%65.9 | %26 |
| ÜYK, 2019 seviyesinin yüzdesi olarak | %100 | %34.1 | %43 |
| Yolcu sayısı, milyar | 4.5 | 1.8 | 2.4 |
| Yolcu yük faktörü, ASK % | %82.6 | %65.1 | %67.3 |
| Yolcu verimi, yıllık ch % | -%3.7 | -%8.7 | -%3 |
| Kargo verimi, yıllık ch % | -%8.2 | %40 | %5 |
| Yakıt fiyatı, USD/varil | 77 | 46.4 | 68.9 |
| Yakıt dışı birim maliyetler, yıllık ch % | %0.3 | %17.5 | -%15 |

Bu bağlamda, üretici ve işletmeci firmaların en önemli hedeflerinden biri satışları artırırken yakıt tüketiminin ve dolayısıyla yakıt maliyetinin en küçüklenmesidir. Bu amaç aynı zamanda Clean Sky ve NASA Çevreye Duyarlı Havacılık (ERA) gibi çeşitli havacılık organizasyonlarına ve yeşil programlara da emisyonun azaltılması konusunda katkıda bulunacaktır. Bunun gerçekleştirilebilmesi içinse söz konusu uçak modelinin itki ve performans modellerinin doğru bir şekilde oluşturulması ve optimize edilmesi gerekmektedir.

1.1. Turboprop Motorlar ve Gelişmeler

Turboprop motorlar kısa mesafe uçuşlarda tercih edilen motorlardır. Özellikle ABD’de eyaletler arası ticari iç hat uçuşlarını gerçekleştirmede kullanılmaktadır. ABD turboprop filosunda artan koltuk kapasitesi ve ortalama uçuş fazı sürelerindeki artış gibi özellikleri dolayısıyla geçmişten günümüze ATR-42, Saab 340/B, Embraer EMB-120 Brasilia, ve Bombardier Q400, gibi turboprop motorlar kullanılmıştır (Wulz, 2012).

Turboprop motorlar, yüksek yakıt verimi sayesinde özellikle kısa mesafe uçuşlarda gün geçtikçe daha çok kullanılmaktadır. Gerek turboprop, gerekse turbojet motorların performansını artırmaya yönelik çalışmalar literatürde geniş bir yer kaplamaktadır. Bu çalışmalar, genel yaklaşım açısından 4 başlık altında incelenebilir. Bunlar;

- Enerji analizi yaklaşımları
- Ekserji analizi yaklaşımları
- Sayısal modelleme yaklaşımları
- Sezgisel/Metasezgisel yaklaşımlar

şeklinde ifade edilebilir. Literatürde özellikle enerji ve ekserji odaklı yaklaşımlar kullanılmıştır (Turgut, Karakoç, Hepbaşlı, & Rosen, 2009). Bu çalışma kapsamında ise sezgisel/metasezgisel yaklaşımlar uygulanmıştır.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezde CT-7 turboprop motoru için 2 farklı metasezgisel model ile modellerin karmaşıklık dereceleri değiştirilerek birden çok tork modeli oluşturulmuş ve söz konusu modellerin sistem modelleme başarısı veri noktalarındaki gerçek değerlerle karşılaştırılarak performans analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca motorun performans indikatörleri ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında; turboprop motorun motor devrine bağlı değerleri ve tork çıktılarını söz konusu algoritmalarla modellenmiş ve analiz edilmiştir. Tezin ikinci bölümünde havacılık alanında geçmişten günümüze kadar kullanılan motor ve itki modelleme alanındaki yöntemler, bunlarla ilgili önemli çalışmalar ve literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde turboprop motorun modellenmesi aşamasında tezde kullanılan yöntemler ile gerekçeleri açıklanmıştır. Bunun yanı sıra aynı bölümde, ele alınan motor modeli ile ilgili bilgilere de yer verilmiştir. Sistem davranışını anlamak için

gerçekleştirilen yer deneyleri sonucunda motorun deneysel verileri grafikler ve tablolar aracılığıyla gösterilmiş ve modelin limit ve sınır değerleri belirtilmiştir. Tezin son bölümü bölümünde ise modellerin sonuçları ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Söz konusu modeller ve karşılaştırmalar 6 farklı tork değeri için yapılmıştır. Böylelikle uçağın 6 farklı uçuş fazı için performans modelleri değerlendirilmiştir.

Proje numarası “20DRP069” olan ve “Uçak İtkisinin FADEC Sistemi için Performans Modellerinin Oluşturulması ve Optimizasyonu” başlıklı bu tez çalışması Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

1.3. Tezin Özgünlüğü

Bu tez çalışmasında turboprop motorun tork modellerini oluşturmak için seçilen yöntemler genel olarak “metasezgisel yöntemler” olarak adlandırılmaktadır. Geleneksel yöntemlere göre metasezgisel yöntemler daha yeni yöntemler olup bunlar havacılık alanındaki motor performans itki ve yakıt modelleme gibi alanlarda sınırlı sayıda çalışmada uygulanmıştır. Bu çalışmada ise söz konusu metasezgisel yöntemlerden olan Yapay Arı Kolonisi algoritması ilk defa bir turboprop motora ve 6 farklı tork değeri için uygulanmıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen ve bu alandaki önemli tarihi çalışmaların yanı sıra güncel çalışmaları da içeren kapsamlı literatür analizinde de görüleceği üzere, söz konusu algoritmanın daha önce uygulanmayan özel bir alanda uygulanmış olması ile literatüre özgün bir katkıda bulunulmuştur.

1.4. Tezin Güncelliği

Tez çalışması kapsamında özellikle son 10 yılda literatürde gerçekleştirilen çalışmalar düşünüldüğünde, motor modelleme, tasarım ve optimizasyon alanında yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Hava trafiğinin ve kısa mesafe uçuşların gün geçtikçe arttığı günümüzde özellikle kısa mesafe uçuşlarda kullanılan turboprop motorlar üzerine yapılan çalışmalar güncelliğini korumaktadır.

Tez kapsamında ele alınan motor modeli, havacılık sanayiinde sıklıkla kullanılan bir model olup üzerinde yapılan çalışmalar devam etmektedir.

1.5. Tezin Ekonomik ve Sosyal Katkıları

2020 yılında dünya genelinde milyarlarca yolcu bir ulaşım yöntemi olarak hava taşımacılığını kullanmıştır. Geçmişten günümüze hızla artan yolcu sayısı, havayolu taşımacılığının gelecekte de ulaşım aracı olarak en çok tercih edilen yollardan biri olacağını göstermektedir. Benzer şekilde savunma sanayiinde de alan etkili savunma sistemlerindeki gelişmeler, hava savunma sanayiinin askeri operasyonlardaki uygulama alanlarının ve öneminin artmaya devam edeceğini göstermektedir.

Günümüzde havayolu firmalarının operasyonel maliyetlerinde en büyük payın yakıt giderlerine ait olduğu görülmektedir. Ekonomik maliyetlerin yanında çevresel maliyetler de önem arz etmektedir. Uçuşlara bağlı olarak sadece 2019’da 915 milyon ton karbondioksit gazının atmosfere salındığı bilinmektedir. Dolayısıyla insan kaynaklı karbondioksit salınımının %2’sininin havacılık faaliyetleri neticesinde meydana geldiği görülmektedir. Bu kapsamda uluslararası dernek ve örgütler tarafından başlatılan kampanyalar ve imzalanan antlaşmalara rağmen hava taşımacılık hacminin artması ve hava taşımacılığının günden güne daha tercih edilir bir seçenek haline gelmesi ile emisyon oranları artmaya devam etmektedir. Söz konusu uçuşların yüksek irtifalarda gerçekleştirilmesi de emisyonların çevreye daha çok zarar vermesine yol açmaktadır. Dolayısıyla itki, yakıt, performans, verimlilik modelleme ve optimizasyonu alanındaki çalışmalar hem ileriye dönük akademik çalışmalar hem de havacılıkta maliyet ve emisyon açısından yenilikçi sektör çözümleri ve uygulamaları sunan “yeşil” havayolları gibi yaklaşımlar açısından oldukça önemlidir.

Performans parametrelerinin kestirim ve iyileştirilmesi açısından tek bir komponente odaklanmak yerine optimizasyon çalışması, motor sistemi bir bütün olarak ele alınarak yapılmış, böylece kullanıcı dostu olmayan karmaşık çözümlerden kaçınılmıştır. Tork modelleme özelinde geliştirilen algoritmalar kullanıcı deneyimini göz önüne alan bir ara yüz tasarımı ile birleştirildiğinde hem ticarileşme potansiyeli olan hem de kullanıcı dostu bir uygulama geliştirilebilir.

Söz edilen çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, performans ve modelleme çalışmaları havacılık sektörü için oldukça önemlidir. Mevcut durumda yakıt maliyetleri, operasyonel maliyetlerin dörtte birini oluşturmaktadır. Dolayısıyla yakıt maliyetlerini ve olumsuz çevresel etkiyi azaltmak için üretim aşamasında yapılabilecek en önemli çalışmalardan biri, komponent ve sistem modelleme doğruluğunu artırmaktır. Bu tez

kapsamında öncelikle deneysel veriler üzerinden kapalı kutu olarak motorun davranışı çeşitli motor devirlerinde denenmiş ve sistem analiz edilmiştir. Böylelikle CT-7 turboprop motoru için tork üretimi ile motor devri ve hava akışı arasında düşük motor devirleri için doğrusala yakın, yüksek devirler için ise daha çok doğrusal olmayan bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu durum metasezgisel algoritmalar ile modelleme yapılırken kullanılan amaç fonksiyonunu ve ilişkiyi modelleyen fonksiyonun yapısını değiştirmiş, farklı karmaşıklık derecelerinde hem doğrusal hem de doğrusal olmayan modellerin algoritma içerisinde denenmesine aracı olmuştur. Bu durum tezdeki işlem yükünü artırsa da, kullanıcıya değişken ve derece sayısı girerek farklı fonksiyonların söz konusu tork modeli denemelerindeki yetkinliğini ölçme imkanı sunmuştur.

Bu tez kapsamında elde edilen model, aynı zamanda benzer motorlar için de kullanılabilir olup, yalnızca ilgili motorun parametreleri girilerek hem doğrusal hem de doğrusal olmayan modeller elde edilebilmektedir. Bu durum havacılık sektöründe bu konudaki iş gücü ve çalışan nitelikli personelin adam saat konusunda da ekonomik anlamda dolaylı bir kazanç sağlanmasını sağlayacaktır.

1.6. Tez Çalışma Planı

Bu çalışmada öncelikle havacılık sektöründeki ve özellikle turboprop motorlardaki gelişmeler özetlenmiştir. Bu kısımda oluşturulan tezin amacı, özgünlüğü, güncelliği ile ekonomik ve sosyal katkıları açıklanmıştır. İkinci bölümde literatür taraması ile uçak performans parametrelerinin modellenmesi ve optimizasyonu alanında yapılan çalışmalar incelenmiş, özellikle uluslararası otoritelerce kabul gören yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Söz konusu bölümün alt başlıklarında modelleme algoritmalarının sınıflandırılması, deterministik ve nondeterministik algoritmalar arası farklar ve tez kapsamında turboprop motor modeline uygulanan algoritmaları da içeren metasezgisel algoritmalar yer verilmiştir. Metasezgisel algoritmalar evrimsel tabanlı, fizik tabanlı, sürü zekasına dayalı canlılardan ve doğadan esinlenilerek oluşturulan algoritmalar olarak alt kısımlara ayrılmış olup tez kapsamında kullanılan evrimsel algoritmalar Genetik Algoritma ile sürü zekasına dayalı algoritmalar Yapay Arı Kolonisi algoritması için bölümde ilgili turboprop modeli olan CT-7 turboprop motoru ile birlikte detaylıca açıklanmıştır. Dördüncü ve son kısımda ise elde edilen modellerin sonuçları ortaya koyulmuş ve söz konusu sonuçların etkileri ile gelecekte yapılması planlanan çalışmalar sunulmuştur.

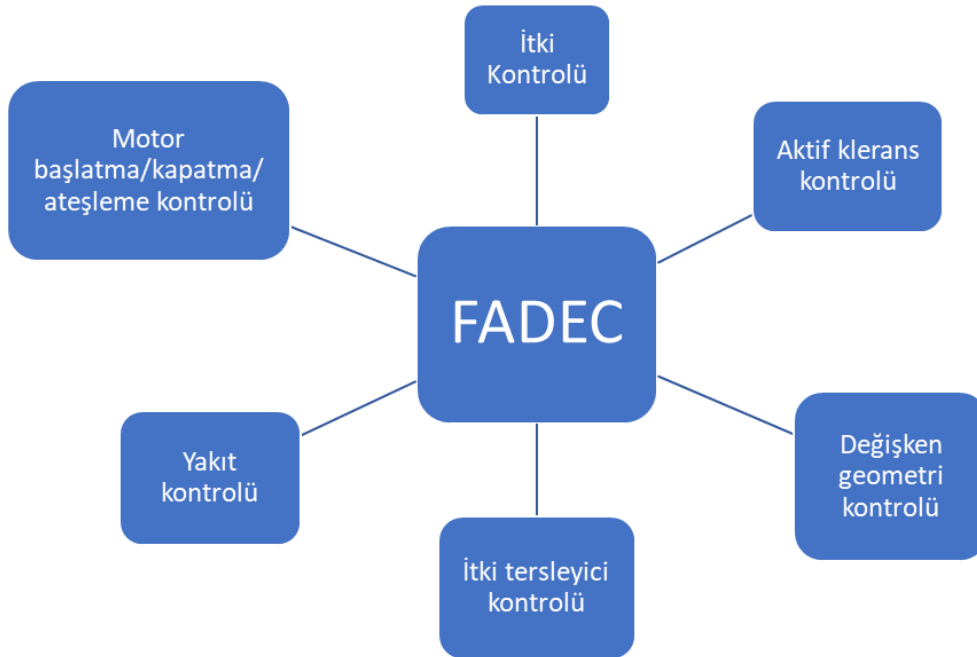
2. LİTERATÜR TARAMASI

Havacılık alanında sistem modelleme ve optimizasyon çalışmaları geniş bir yer kaplamaktadır. Bu alanda yapılan akademik çalışmalarda performans modellerinin oluşturulması ve optimizasyonu ile çeşitli yöntemlerle özellikle son yıllarda emisyonları azaltmaya yönelik çalışmalara ve alternatif modelleme yöntemlerine odaklanılmıştır.

Bu tez kapsamında incelenen akademik çalışmalardan bahsetmeden önce, çalışmalarda ismi sıklıkla geçen modern motor kontrol sisteminden (FADEC), temel performans göstergelerinden ve geçmişten günümüze bu alanda kullanılan modelleme yaklaşımları hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında literatürde özellikle turbojet ve turboprop motorlarda itki, yakıt ve tork modelleme alanında yapılan çalışmalar ele alınmıştır.

2.1. Temel Performans Göstergeleri

Günümüzde, uçak performans parametreleri FADEC (Full Authority Digital Engine Control) sistemi ile kontrol edilmektedir. Uçaklarda yakıt akışı, uçak motor sistemleriyle kontrol edilmektedir. FADEC, sadece yakıt akışından sorumlu olmayıp, diğer sistemlerden gelen girdilere göre motor performans parametrelerinin tümünden sorumludur. FADEC'in kontrol ettiği sistemler Şekil 2.1'de verilmiştir (CFMI, 2000).



Şekil 2.1. FADEC'in kontrol ettiği sistemler (CFMI, 2000)

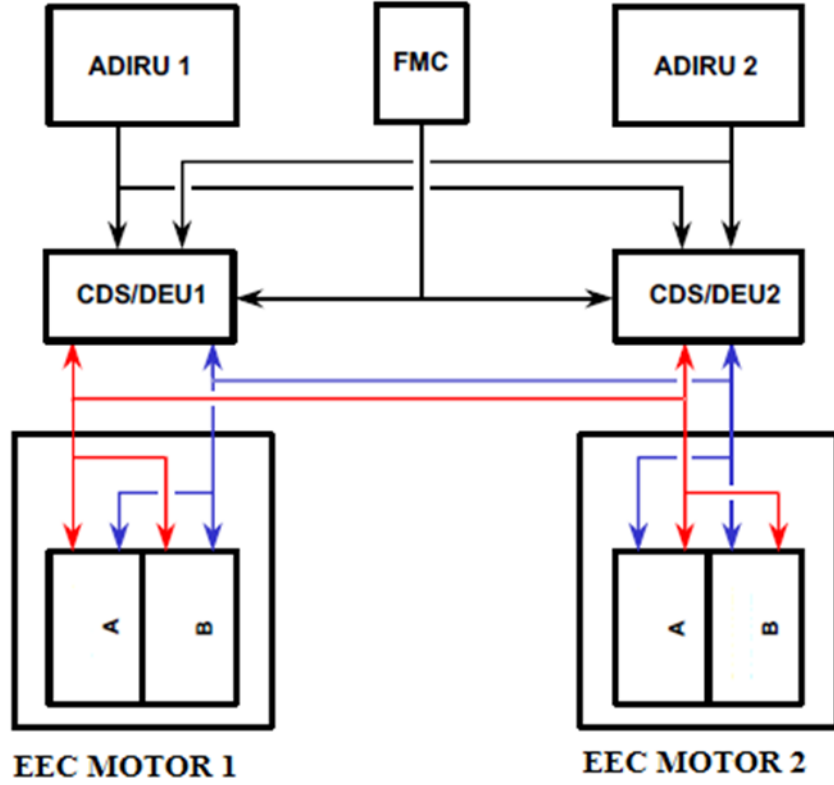
FADEC sistemi temelde EEC (Electronic Engine Control) ve HMU (Hydro-Mechanical Unit) olmak üzere 2 bölümden oluşmaktadır. EEC kısmı 2 ana bilgisayar ve A ve B olmak üzere 2 kanaldan oluşmaktadır. EEC, motor kontrol hesaplamalarını ve motor durumunu denetlemektedir. HMU ise motor valfleri ve aktüatörleri sürmek için EEC'den gelen elektriksel sinyalleri hidrolik basınca dönüştürmektedir. Bu 2 temel ünite dışında, kontrol sisteminde valf, aktüatör ve sensörler de bulunmaktadır. EEC ile uçak sistemlerinin bağlantısı CDU (Common Display Unit) ile sağlanmaktadır. EEC, CDU vasıtasıyla ADIRU (Air Data Inertial Reference Unit) ve FMC (Flight Management Computer)'dan hava verisi parametrelerini almaktadır. Bunlar;

- Çevre hava veya atmosfer irtifası
- Çevre havanın sıcaklığı
- Çevre hava basıncı
- Uçuş Mach sayısı

şeklinde sıralanabilir. FADEC, bu bilgilerle başta uçuş fazlarına göre ihtiyaç duyulan itki olmak üzere motor kontrolü üzerine tüm hesaplamaları ECC ile gerçekleştirmektedir. FADEC'in kontrol işlevlerinden bazıları;

- Yakıt kontrolü
- Şaft dönüş hızı kontrolü ve limit değerleri
- Motor başlatma sırasında parametre kontrolü
- EGT (motor gaz sıcaklığı) kontrolü
- Manuel ve otomatik olarak 2 şekilde itki kontrolü
- Kompresör hava akışı ve türbin klerans kontrolü
- İki itki kolu bağlantı bobini kontrolü

şeklinde sıralanabilir. FADEC ve ilgili sistemlerle ilişkisi, Şekil 2.2'de gösterilmiştir (CFMI, 2000).



Şekil 2.2. FADEC ve ilgili sistemler (CFMI, 2000)

FADEC sisteminin motor performans parametrelerini hesaplayabilmesi için çeşitli uçak itki ve performans modelleri oluşturulmuştur. Bu tez kapsamında ele alınan modelleme yöntemlerine geçmeden önce genel olarak modelleme algoritmaları ile havacılık alanında literatürde şu ana kullanılan modelleme yöntemleri ele alınmıştır.

2.2. Modelleme Yaklaşımları

2.2.1. Deterministik Yaklaşımlar

Deterministik yaklaşımlar, model bağımlı, optimum çözümü yani global minimum veya maksimumu garantileyen ancak hesaplama yükü fazla olan yöntemlerdir. Ancak bu yöntemler uygulandıkları sistem özelliklerine fazlasıyla bağlı olduklarından sistem hakkında ön araştırma ve detaylı matematiksel bilgi gerektirirler. Dolayısıyla, sistem sınırlarının geniş olduğu kapalı kutu modellerinde doğruluk oranları düşüktür.

Deterministik algoritmalarda verilen girdi değişmediği sürece iterasyonlardan bağımsız olarak her zaman aynı çıktı üretilmektedir. Özellikle üretim, dağıtım, atama,

kapsama gibi problemlerin ele alındığı endüstri problemlerinde kullanılan deterministik yöntemlerden bazıları şunlardır:

- Lineer programlama (LP)
- Karma tam sayılı lineer programlama (MILP)
- Doğrusal olmayan programlama (NLP)
- Karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP)

2.2.2. Nondeterministik Yaklaşımlar

Nondeterministik algoritmalar, deterministik algoritmaların aksine, her çalıştırmada farklı süreçler ve sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir.

En sık kullanılan nondeterministik yöntemlerden biri stokastik yaklaşımlardır. Stokastik yaklaşımlar, nondeterministik yöntemlerden “random” yani rastsal süreçlerin hâkim olduğu, kısıtların, amaç fonksiyonunun veya değişkenlerin rastsal olabildiği problemleri kapsamaktadır.

Stokastik yaklaşımlar özellikle sistem özelliklerinin sayısal ve net olarak bilinmediği durumlarda iyi bir modelleme yaklaşımı olmasına rağmen tersi durumlarda dezavantajlı olabilmektedir. Örneğin sistem değerleri ve veri seti net olarak bilindiğinde daha doğru bir model elde edilebilecekken stokastik yöntemlerde modelleme sürecine rastsallık eklenerek doğru çözümden uzaklaştırılabilmekte veya modelleme hatalarına daha az duyarlı çözümlere sebep olabilmektedir.

Optimizasyon yaklaşımları, kesin çözüm veren ve yaklaşık çözüm veren yaklaşımlar olarak da gruplanabilir.

2.3. Havacılık Alanında Kullanılan Modelleme Yöntemleri

Uçak performans modelleri, temelde itki modeli ve aerodinamik modelden oluşmaktadır (CFMI, 2000). Uçak itki modelleri oluşturulurken göz önünde bulundurulacak faktörler,

- İrtifaya bağlı faktörler
 - Hava sıcaklığı
 - Hava yoğunluğu
 - Hava basıncı

- Hava hızı / Mach sayısı
- Gaz kolu ayarı

şeklinde sıralanabilir. Uçak itki sistemlerinin (turbojet, turbofan ve turboprop olmak üzere) tasarım ve tasarım noktası dışı parametrik denklemleri de gerçek motor verileri olmayan durumlarda da kullanılabilir. Aerodinamik model oluşturulurken ise;

Aerodinamik model oluşturulurken ise;

- Sürüklenme poleri
- Profil eğriliği
- Sıkıştırılabilirlik
- Kritik Mach sayısı üzerindeki sıkıştırılabilir sürüklenme artışı

parametreleri göz önünde bulundurulmaktadır.

FADEC için yapılan mevcut uçak performans modelleri alt başlıklarda incelenmiştir.

2.3.1. Uçak veri tabanı modeli

BADA (Base of Aircraft Data), Eurocontrol'ün kullandığı kinetik bir performans modeli ve hava trafik verilerini içeren geniş bir veri tabanıdır. Söz konusu modelde itki ve sürüklenme birbirinden bağımsız olduğu ve ticari uçuşların düşük uçuş yol açısında gerçekleştiği varsayımı kullanılmaktadır. Böylelikle performans hesabında kullanılan çoğu denklem doğrudan sadeleştirilmekte ve problem karmaşıklığı azaltılmaktadır. BADA modeli, mevcut uçak filosunun uçuş el kitaplarından türetilmiştir (CFMI, 2000).

BADA modelinde itki ve sürüklemeye dair katsayıların hesaplanabilmesi için çeşitli ISA koşullarında tırmanma, seyahat ve alçalma olmak üzere uçuş profili verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Uçak Veri Tabanı (Base of Aircraft Data-BADA) itki modeli, irtifa etkilerini ve standart atmosfer değerinden sıcaklığın sapmalarını göz önünde bulundururken Mach sayısı etkisini dikkate almamaktadır (Nuic, 2003).

2.3.2. Uçuş fazına özel fonksiyonlar

Bu tür modeller, uçuş performansını modellemeye yarayan uçuş fazına özel fonksiyonlardan meydana gelmektedir. Bu modelde, motor itki kolu, uçak ağırlığı,

atmosfer hava sıcaklığı ve basınç irtifası verileri kullanılarak düşey hız, yakıt akışı vb. gibi temel değerler tahmin edilir (CFMI, 2000).

2.3.3. Üreticilerin verileri

Uçak performans modellerinin oluşturulmasında kullanılan veriler, üretici firma tarafından uçak performans el kitabı içerisinde yayınlanmaktadır.

INFLT/REPORT, operasyonel uçuş sırasında veri üretimi için Boeing tarafından geliştirilen yazılımdır. INFLT ve REPORT, tırmanma, seyahat, bekleme (holding), drift down, alçalma, optimum irtifa ve basit uçuş planlama verilerini içermektedir. INFLT/REPORT programından sağlanan veriler uçuş ve operasyonlar için oldukça önemli olan Uçuş Planlama Performans El Kitaplarının ve performansla yönelik daha birçok dokümanın üretimi için kullanılır. INFLT modülü hesaplamalar için, REPORT modülü ise çıktılar için kullanılmaktadır. Ancak bu verileri veri boyutunun büyüklüğü ve yasal sebepler nedeniyle kullanmak uygun değildir. Bunun yerine uçak performans modeli üretmek için en iyi kullanılabilir veri kaynağı, uçağın “Uçuş El Kitabı”dır (CFMI, 2000).

2.3.4. Arama tabloları

Arama tabloları, üreticilerin uçak performans programları tarafından tahmin edilen uçuş verilerini içeren tablolardır. Söz konusu tahminler uçuş planında belirlenen noktalara göre yapılmaktadır.

Arama tablolarında, belirli irtifa aralıkları için her bir uçuş fazında uçakların ihtiyaç duyduğu yatay ve düşey hız değerleri yer almaktadır (CFMI, 2000). Ancak bu yaklaşımda hesaplamalar standart aletli kalkış hesaplarına ve rotada belirtilen standart varış noktaları temel alınarak yapıldığından özellikle düşük irtifalarda arama tablolarındaki tahminlerin doğruluk oranı oldukça düşüktür. Özellikle yatay ve düşey hızlar, gerçek değerlerden daha düşük tahmin edilmektedir. Arama tabloları çok genel ve ortalama bir performans tahmini yapmak için basit ve kullanışlı olsa da doğruluk oranının oldukça düşük olması çeşitli senaryolara veya fazlara göre hassas analiz yapmaya olanak tanımamaktadır. Bu durum gerçek uçuş verilerine daha yakın performans modelleri ortaya koyulmasını gerektirmektedir.

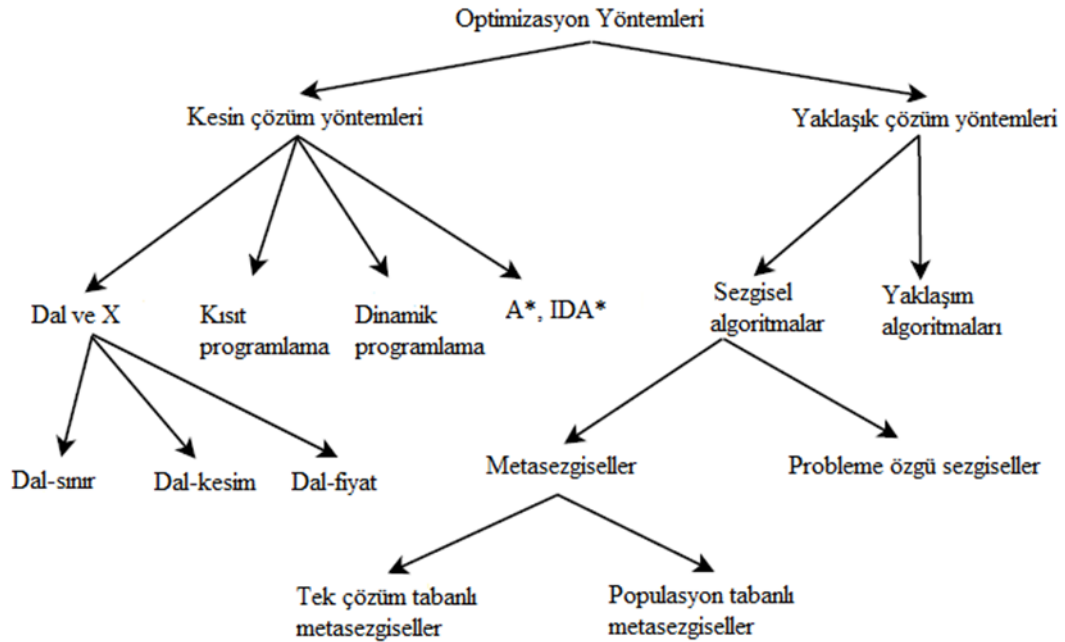
Global optimizasyon algoritmaları geleneksel yöntemlerin eksik yanlarını gidermek ve performans modellerini gerçek değerlere yaklaştırmak amacıyla havacılık sektöründe de kullanılmaya başlanmıştır.

2.3.5. Optimizasyon yöntemleri

Optimizasyon yöntemleri, özellikle problemin karmaşıklığına bağlı olarak gerçek hayat problemlerini çözmek için geliştirilmiş olan yöntemlerdir. Optimizasyon yöntemleri genel olarak;

- Kesin çözüm yöntemleri
- Yaklaşık çözüm yöntemleri

olarak iki başlık altında incelenmektedir. Kesin çözüm yöntemleri en iyi çözümü bulup söz konusu çözümün optimalliğini garanti etmektedir. Yaklaşık çözüm yöntemleri ise, genellikle polinom zamanda doğrulanabilen NP-tam problemlerin dışında kalan problemlerin çözümünde tercih edilmektedir. Yaklaşık çözümler bu tür problemler için makul sürede kabul edilebilir çözümler üretmekte ancak çözümün optimalliğini garanti etmemektedir. Optimizasyon yöntemlerine yönelik genel bir sınıflandırma Şekil 2.3 ile verilmiştir (Talbi, 2009).



Şekil 2.3. Optimizasyon yöntemleri sınıflandırması (Talbi, 2009)

Global optimizasyon algoritmaları modelden bağımsız çalışan yapıları ve esnek bir modelleme yaklaşımı olmaları sebebi ile günümüzde daha tercih edilir hale gelmiştir.

Global optimizasyon algoritmaları çoğu açıdan diğer yöntemlere göre avantajlı olup birden fazla operatör kullanması ile hem lokal hem global arama imkânı sunmakta, böylelikle lokal minimuma takılma gibi problemlerin önüne geçerek global minimum ya da maksimumu bulmayı hedeflemektedir. Söz konusu algoritmalar aynı zamanda yükü açısından daha avantajlı olup daha kısa süre içerisinde kabul edilebilir sonuçlar vermekte ve optimum çözümü garantilemese de çözüm uzayını daraltarak sonraki aramalar için iyi bir alt sınır oluşturmaktadır.

Yaklaşık çözüm yöntemlerinden metasezgisel yöntemler nondeterministik yöntemler olup, sistem özellikleri tam bilinmediği durumlarda sistemi kapalı kutu olarak ele almaya olanak sağlamak ve makul bir sürede daha az hesaplama yükü ile iyi çözümler üretebilmektedir. Bu yönden metasezgisel yöntemlerin diğer yöntemlere göre daha “pratik” olduğu ve gerçek hayat problemlerine daha başarılı uygulanabildiği söylenebilir (Jafari & Nikolaidis, 2019).

Metasezgisel algoritmalar en genel anlamda tek noktadan arama yapan ve çok noktadan arama yapan olarak 2 kategoriye ayrılabilir. Daha detaylı bir sınıflandırma ile evrimsel tabanlı algoritmalar, fizik tabanlı algoritmalar, sürü zekasına dayalı algoritmalar, biyolojiden esinlenen algoritmalar ve doğadan ilham alınarak oluşturulan algoritmalar olarak 5 alt başlıkta incelenebilir.

Evrimsel algoritmalar, doğal seçim gibi hayatta kalmaya dayalı evrimsel süreçlerden esinlenilerek oluşturulan algoritmalarlardır. Evrimsel tabanlı algoritmalarından bazıları Genetik Algoritma (GA), Genetik Programlama (GP), Evrimsel Strateji (ES) ve Diferansiyel Gelişim Algoritmasıdır (DE).

Fizik tabanlı algoritmalar is fiziksel/termodinamik vb. süreçlerden esinlenilerek oluşturulan algoritmalarlardır. En bilinen fiziksel fizik tabanlı algoritmalar tavlama benzetimi, yerçekimsel arama algoritması, harmoni arama algoritması ve taklitçi (memetik algoritmalar) olarak sıralanabilir.

Sürü zekasına dayalı algoritmalar, bir sürünün tehlikeden kaçınma, hayatta kalma, yuvaya veya besine olan en kısa yolu bulma gibi davranışlarından esinlenilerek oluşturulmuş algoritmalarlardır. Bu tür algoritmalar doğası gereği popülasyon tabanlı

algoritmalarıdır ve genellikle random bir çözüm kümesi ile aramaya başlar. Literatürde sıklıkla kullanılan sürü zekasına dayalı algoritmalarından bazıları Karınca Kolonisi Algoritması (ACO), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yapay Arı Kolonisi Algoritması (ABC) ve Balık Sürüsü Algoritması (FSA)'dır.

Biyolojiden esinlenen algoritmalarından bazıları, Yapay Bağışıklık Sistemi Algoritması (AIS), Bakteri Arama Optimizasyonu (BFO), Dendritik Hücre Algoritması (DCA) ve Kril Sürüsü Algoritması (KHA)'dır.

Söz edilen metasezgisel algoritmalar bu alanlardaki algoritmalarından sadece bir kaçıdır. Her geçen gün doğadan ve canlı davranışlarından esinlenilerek yeni algoritmalar ortaya konmaktadır. Metasezgisel algoritmalar konusunda yapılan çalışmaların çokluğunun birçok sebebi vardır. Bunlardan öncelikli olanı ise bu algoritmaların keşif veya başka bir deyişle çözüm uzayının farklı noktalarını arama özelliği (exploration) ve bir bölgeye odaklanarak o bölgedeki optimum çözümü bulmaya çalışma (exploitation) özellikleridir. Bir optimizasyon probleminde metasezgisel algoritmalar kullanılarak makul sürede iyi sonuçlar elde etmek için bu iki özelliğin arasındaki ödünleşim bir dengede olmalıdır (Dhiman & Kumar, 2017).

Metasezgiseller için bu sınıflandırmanın dışında en yaygın sınıflandırmalardan biri, çözüm uzayında arama yapılan nokta sayısına göre sınıflandırmadır. Bu durumda metasezgiseller;

- Tek çözüm tabanlı (tek noktadan arayan)
- Popülasyon tabanlı (çok noktadan arayan)

olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.3.6. Tek çözüm tabanlı metasezgiseller

Tek çözüm tabanlı metasezgisel algoritmalar, başlangıçtaki tek bir çözümden belirli bir prosedüre dayanarak sonraki çözümü üretirler. Genellikle ilk çözümden bir dizi komşu aday çözüm üreterek, bu aday çözümler içerisinde başta belirlenen kriterlere göre mevcut en iyi çözümü seçerler. Yeni seçilen çözüm de aynı prosedürlerden geçirilerek yine bir dizi aday çözümden tek bir çözümün seçilmesi ile devam eder. İterasyonlar çözüm için önceden belirlenen bir durdurma kriterine ulaştığında sonlanır. Tüm işlem sonucunda eğer hafızada tutuluyorsa en iyi çözüm tüm elde edilen iyi-tekli çözümler

içerisinden seçilir. Hafızada tutulmuyorsa en son elde edilen çözüm optimum çözüm olarak belirlenir.

Tek noktadan arayan algoritmalar literatürde sıklıkla faydalanılmıştır. Örneğin, yerel arama, tavlama benzetimi ve tabu arama, en bilinen tek noktadan arayan metasezgisellerdendir.

Tek noktadan arayan metasezgiseller genellikle hızlı ve aç gözlü bir çözüm sunarken, çoğu gerçek hayat probleminde kullanılmamasının sebebi lokal minimum değerlerine takılma riskinin fazla olmasıdır. Bu nedenle daha geniş bir çözüm uzayında arama yapmak lokal minimum takılma riskini azaltır. Ancak diğer yandan arama uzayının çok geniş tutulması da hesaplama yükünü artıracaktır. Bu iki parametre arasındaki ödünleşimi bulmak optimum çözümü bulmak açısından önemlidir.

2.3.7. Popülasyon tabanlı metasezgiseller

Popülasyon tabanlı algoritmalar, çözüm kümesi popülasyonunda yapılan sürekli iyileştirmeler süreci olarak düşünülebilir (Talbi, 2009). Bu konuda yapılan çalışmalar özellikle son yıllarda hız kazanmıştır. Problem boyutu ve karmaşıklığı arttıkça matematiksel modeller yetersiz kalmaya başlamış, optimum sonuç bulma amacı yerine “kabul edilebilir sürelerde optimuma yakın sonuçlar bulma” amacı önem kazanmıştır.

Motor performans modellerinde genetik algoritma gibi popülasyon tabanlı algoritmalar ve bunların türevleri sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bölüm 4’te bu çalışmalar incelenecektir.

2.4. Havacılık Alanında Literatür Taraması

Motor itki ve performans modelleri alanında yapılan çalışmalar, tezler ve makaleler olmak üzere 2 başlık altında incelenmiş ve tarihsel olarak sıralanmıştır.

2.4.1. Tezler

Parkinson (Parkinson, 1982) yaptığı çalışmada bir piston motorlu uçak için yakıt verimli düz uçuş performans modeli oluşturmuştur. Yakıt en çok düz uçuşta tüketildiği için çalışmada bu aşamadaki menzil (R) ele alınmıştır. Parkinson çalışmasında, gövde-pervane-atmosfer ve motor-atmosfer olmak üzere 2 alt sistem modellemiştir. Bu modeller standart ve standart olmayan atmosfer koşullarında statik olarak modellenmiştir. Modelde, gerçek hava hızı (TAS), yakıt akış oranı (mf) ve rüzgâr hızı (Vw) kullanılarak düz uçuş menzili hesaplanmıştır. Matematiksel model geliştirilirken literatürde var olan

modellerden ve pilot işletme el kitabındaki verilerden (Pilot Operating Handbook) kullanılmış ve yer yer modifiye edilmiştir. Pilot işletme el kitabından yakıt akış diyagramları (yakıt akış oranı/ V_{tas}) ve güç diyagramları (MAP basınç/ V_{tas}) alınarak eğri denklemleri çıkarılmıştır.

Schilling (Schilling, 1997), yaptığı çalışmada, Collins'in türettiği yakıt tüketim modelini hesaplama bazında kolaylaştırmak için temel enerji denklemlerini kullanmıştır. MATLAB programında sinir ağları araç çubuğunu kullanarak uçak performans verileri için eğri uydurmuştur. Elde edilen sonuçlarda, 2 katmandan oluşan ve farklı ağ yapılarının denendiği modelin, Collins'in modeline göre %38 daha doğru tahminde bulunduğu görülmüştür.

Stolzer (Stolzer, 2002), yaptığı çalışmada, bir yolcu taşıma uçağı için (B757) yakıt tüketimini modellemiştir. Bunun için Uçuş Operasyon Kalite Güvencesi (FOQA) programı kapsamında rutin olarak kaydedilen ve analiz edilen 3500 uçuşa ait düz uçuştaki uçuş performans verilerini kullanmıştır. Analiz edilen veriler arasından özellikle yakıt tüketiminin yüksek olduğu uçuşlar belirlenmiş ve regresyon analizi yapılmıştır. Yakıt akışı kalibre edilmiş hava hızı (CAS), uçak ağırlığı (gross weight) ve N2 devri kullanılarak modellenmiştir. Bu 3 değişken ile yakıt akışındaki değişim %85 oranında açıklanmıştır. Üretici firma verileriyle karşılaştırıldığında, bu modele göre gerçekleşen yakıt akışının üretici firmanın programındakinden çok daha yüksek oranda olduğu görülmüştür.

Navaratne (Navaratne, 2016), çalışmasında, motor aşınmasını ve gerçek uçuş yolu verilerini kullanarak uçak rota optimizasyonu yapmıştır. Bunun için yakıt akışı ile emisyon, uçuş süresi ve jet duman izi arasındaki ilişkileri incelemiştir. Çalışmanın sonucunda, örneğin, sağlıklı motorlarda %5 EGT artışı ile yakıt tüketimi %0,4 azaltılabiliyorken, aşınmış motorlarda yakıt tüketimini %0,6 oranında azaltmak için %10'luk bir EGT artışı gerektiği görülmüştür. Bu durum motor aşınmasının da yakıt modellemesinde önemli faktörlerden biri olduğunu göstermiştir.

Tsotskas (Tsotskas, 2016), yaptığı çalışmada, uçuş süresi, yakıt tüketimi ve emisyonları göz önünde bulundurarak optimal uçuş yörüngelerini oluşturmuştur. Bunun için çok amaçlı yasaklı arama algoritması (Multi-objective Tabu Search, MOTS2) ve bir tür genetik algoritma (Non Dominated Sorting Genetic Algorithm Multi- Objective,

NSGAMO) geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yakıt verimliliği açısından NSGMO, MOTS2 algoritmasına göre %6,38 oranında yakıt tasarrufu sağlamıştır.

2.4.2. Makaleler

Collins (Collins, 1982), yaptığı çalışmada, hava trafik kontrol operasyonlarında kullanılmak üzere enerji denklemlerini kullanarak yeni bir yakıt tüketimi algoritması üretmiştir. Arama tabloları, geçmiş verilere göre yapılan tahminler vb. yöntemler, hava trafik operasyonları için detaylı bilgi sağlamadığından Collins'in modeli bu tarihten sonra yapılan çalışmalara temel oluşturmuştur.

Trani ve arkadaşları (Trani, F., Baik, & Seshadri, 2004), yaptıkları çalışmada, yapay sinir ağları ile bir yakıt tüketim modeli geliştirmiştir. Modelde gerçek uçuş verileri kullanılmamış ancak Fokker 100 uçağının uçuş el kitabından faydalanılmıştır. Modelde girdi olarak sadece kalkış ve iniş yükseklikleri düşünülmüş, yakıt tüketiminin uçuş süresince irtifaya bağlı değişimi modele dahil edilmemiştir. Çalışmanın sonuçları, uçağın kılavuzdaki gerçek performans verileriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu doğruluk oranının kabul edilebilir olması, uçuşun farklı fazlarında yakıt akışının modellenmesinde yapay sinir ağlarının etkili bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Elde edilen model, pistonlu ve turboprop motorlar için genellenebilir olması bakımından literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Abdelghany ve arkadaşları (Abdelghany, Abdelghany, & Raina, 2005), yaptıkları çalışmada yakıt ihtiyacını ve tüketimini minimize etmek için matematiksel bir model oluşturmuştur. Söz konusu modelde, uçakların iç sisteminden ziyade, rotalarına bağlı olarak ziyaret edecekleri ve yakıt ikmali sağlayacakları havalimanları ve bunlara bağlı doğrudan giderler ve yakıt miktarına bağlı bakım giderleri modelde değişken olarak ele alınmıştır. Model farklı senaryolar altında çalıştırılarak hava taşıt trafiği için yakıt maliyetini de hesaba katarak çeşitli rotalar ve alternatif maliyetler sunulmuştur.

Bartel ve Young (Bartel & Young, 2008), yaptıkları çalışmada itki-özümlü yakıt tüketimi (TSFC) modeli geliştirmiştir. Model sadece düz uçuş fazını kapsamaktadır. Söz konusu modelde Mach sayısı değişiminin yakıt tüketimine olan etkisi göz önünde bulundurulmuş ancak, irtifanın etkisi göz ardı edilmiştir.

Senzig ve arkadaşları (Senzig, Iovinelli, & Fleming, 2009), yaptıkları çalışmada, herkese açık uçak performans verilerini kullanarak terminal bölgesi için bir yakıt tüketim

modeli oluşturmuştur. İtki tahmin edilirken hız için lineer bir ilişki ve irtifa için kuadratik bir ilişki kurulmuştur. Modelde ayrıca Mach sayısı, itki, irtifa ve sıcaklık oranı da göz önüne alınmıştır.

Turgut (Turgut, 2011), uçuşun alçalma fazında spesifik bir iniş açısı için bir yakıt akış oranı modeli türetmiştir. Modelde irtifanın etkisi göz önüne alınmış olup, Mach sayısının yakıt tüketimine etkisi ise ele alınmamıştır. Elde edilen model gerçek uçuş veri kayıtları ile karşılaştırılmıştır.

Lathasree ve Sheethal (Lathasree & Sheethal, 2008), yaptıkları çalışmada yapay sinir ağları ile bir yakıt tüketim modeli geliştirmiştir. Modelde, görev profili için uçuş yörüngesindeki 44 nokta ele alınmıştır. Alınan nokta sayısının yetersizliği nedeniyle bu çalışma gerçek bir uçuş profilinin tüm fazlarındaki yakıtı doğru bir şekilde modelleme konusunda yetersizdir.

Turgut ve Rosen (Turgut & Rosen, 2012), uçuşun alçalma fazı için genetik algoritma yöntemiyle bir yakıt modeli önermiştir. Ancak modelde, yakıt akış oranının Mach sayısı ile değişimi göz ardı edilmiştir.

Baklacioglu ve Cavcar (Baklacioglu & Cavcar, 2014), yaptıkları çalışmada, bir kargo uçağının uçuş el kitabı verilerinden genetik algoritma yöntemi ile yörünge tahmini gerçekleştirmişlerdir. Genetik algoritma ile oluşturulan aerodinamik modelinin ve itki modelinin literatürdeki sonuçlara üstünlük sağladığı görülmüştür. İtki modeli Mach sayısı ve irtifaya bağlı olarak oluşturulmuştur. Çalışmada, literatürdeki çalışmalarda ele alınmayan kritik Mach sayısı üzerindeki sıkıştırılabilir sürüklenme artışının etkisi de incelenmiştir. Modelde aynı zamanda diğer çalışmalarda doğruluğu yüksek sonuçların elde edilemediği alçalma fazı incelenmiştir.

Baklacioglu (Baklacioglu, 2015) yaptığı çalışmada, bir nakliye uçağının tırmanma fazındaki yakıt akışını genetik algoritma yöntemi ile modellemiştir. Gerçek uçuş veri kayıtları (Flight Data Recorder, FDR) kullanılarak 2 ayrı model oluşturulmuştur. İlk modelde yakıt tüketimi sadece irtifaya bağlı olarak ele alınmıştır. İkinci modelde ise hem irtifa hem de gerçek hava hızı (V_{tas}) etkileri göz önüne alınmıştır. Gerçek değerlere göre hata analizi yapıldığında 2 modelin de iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. İki model birbiriyle karşılaştırıldığında ise gerçek hava hızı etkisini de içeren ikinci modelin

doğruluk payının daha yüksek olduğu ve gerçek verilere daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Baklacioglu (Baklacioglu, 2016), yaptığı çalışmada, bir nakliye uçağının yakıt akış oranını modellemiştir. Bunun için geri yayımlı öğrenme algoritması (Backpropagation) ve Levenberg –Marquardt algoritmalarını kullanmış ve sinir ağını optimize etmek için de genetik algoritma kullanmıştır. Çalışmada gerçek hava hızının (V_{tas}) yüksekliğe bağlı değişimi göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre 2 sinir ağı algoritması da gerçek değerlere yakın sonuçlar vermiştir. Ancak, tırmanma ve düz uçuşta geri yayımlı öğrenme algoritması en iyi sonuçları verirken, alçalma fazından Levenberg-Marquardt algoritması en iyi sonuçları vermiştir.

Baklacioglu (Baklacioglu, 2017), yaptığı çalışmada, Mach sayısı ve irtifa etkilerini göz önünde bulundurarak bir uçak itki modeli geliştirmiştir. Bunun için motor üreticilerinin gerçek verilerini kullanarak bir genetik algoritma ve Levenberg - Marquardt (LM), delta-bar-delta (DBD), ve conjugate gradient (CG) algoritmaları ile eğittiği sinir ağlarını (NN) kullanmıştır. Ayrıca GA'nın popülasyon boyutunun ve model katsayılarındaki veri miktarının sonuçlara etkisi de incelenmiştir. Kullanılan yöntemler arasında LM ile eğitilen sinir ağlarının, gerçek itki verilerine en yakın itki modelini sağladığı görülmüştür.

Şahin ve Aghayeva (Şahin & Aghayeva, 2017), yaptıkları çalışmada, orta menzilli bir uçak için 3 uçuş fazında yakıt modeli geliştirmiştir. Modelde BADA verileri kullanılmıştır. İki farklı tarifeli uçuş rotasına ait uçuş bilgileri analiz edilmiştir. Önerilen modelin sonuçları ile BADA verileri karşılaştırılmış ve tutarlılık gözlenmiştir.

3. YÖNTEMLER VE MODEL

Bu çalışma kapsamında modelleme yöntemine karar verilmeden önce öncelikle motor sistemi ve yer deneylerinden elde edilen çeşitli motor verileri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucu, düşük motor devirlerinde motorun tork ve güç üretiminde doğrusal bir eğilim gösterdiği, ancak 41000 rpm ve üzeri değerlerde sistemin doğrusal olmayan tork değerleri ürettiği görülmüştür. Bu nedenle, parçalı ve deterministik bir fonksiyondan ziyade, tam doğrusal olmayan bu yapıyı modelleyebilecek yaklaşık çözüm yöntemleri araştırılmıştır.

Yaklaşık çözüm yöntemleri çözüm için kısa sürede iyi bir alt sınır vermesi nedeniyle özellikle gerçek hayat problemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında da hem problemin doğrusal olmayan yapısı hem de zaman kazanımından dolayı yaklaşık çözüm yöntemlerinden sezgisel algoritmaların kullanılmasına karar verilmiştir.

Sezgisel algoritmalar, probleme özgü sezgiseller ve metasezgiseller olmak üzere 2 başlıkta incelenmiştir. Probleme özgü sezgiseller, doğrudan problem dinamiklerine göre tasarlanarak o probleme özgü bir çözüm sunmaktadır ancak probleme özgü sezgiseller, isimlendirildikleri gibi sadece belirli bir probleme yönelik oldukları için genellenememektedir. Bu tez çalışması, aynı alanda gelecekte araştırma yapacak olan kişilere de katkı sağlaması açısından daha genellenebilir bir çözüm bulmayı hedeflemektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında probleme özgü bir sezgisel kullanılmamıştır. Bunun yerine, metasezgisel algoritmalar araştırılmıştır.

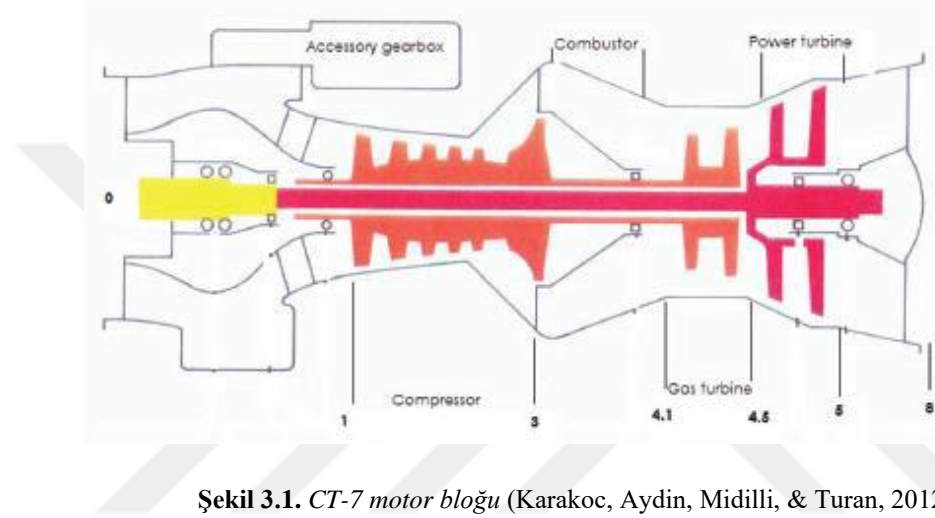
Metasezgisel algoritmalar, genellenebilir yapıları sayesinde sıklıkla tercih edilen optimizasyon yöntemlerindedir. Kısaca “metasezgiseller” olarak da adlandırılmaktadır.

Metasezgiseller, tek çözüm tabanlı ve popülasyon tabanlı olarak 2 başlık altında incelenmektedir. Yapılan araştırma sonucu elde edilen bilgilerden tek çözüm tabanlı metasezgisellerin yerel minimum değerine takılma ve arama uzayının büyük kısmını makul sürede arayamama gibi sorunlarla karşılaşma ihtimalinin popülasyon tabanlı yani çok noktadan arayan metasezgisellere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışma kapsamında CT-7 motoru tork modeli için popülasyon tabanlı metasezgisellerden olan Genetik Algoritma ile Yapay Arı Kolonisi algoritması

seçilmiştir. Söz konusu modelleme yöntemlerinden önce CT-7 motoru hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

3.1. CT-7 Motoru

Çalışmada ele alınan motor CT-7 modelidir. CT-7 motoru kompresör, daire kesitli yanma odası, gaz türbini ve güç türbini bloklarından oluşmaktadır. Söz konusu turboprop motorun blok görünümü Şekil 3.1 ile verilmiştir (Karakoc, Aydın, Midilli, & Turan, 2012).



Şekil 3.1. CT-7 motor bloğu (Karakoc, Aydın, Midilli, & Turan, 2012)

Ct-7 motoruna ait bazı parametreler farklı türbin hızları için Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. CT-7 parametreleri

| Test no | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tork (N.m) | 240 | 350 | 485 | 552 | 580 | 630 |
| Güç (SHP) | 745 | 1,081 | 1,500 | 1,709 | 1,835 | 1,946 |
| Ortam basıncı (kPa) | 92,4 | 92,4 | 92,4 | 92,4 | 92,4 | 92,4 |
| Ortam sıcaklığı (K) | 281 | 281 | 281 | 281 | 281 | 281 |
| Kompresör çıkış sıcaklığı (K) | 644 | 673 | 705 | 721 | 730 | 740 |
| Kompresör çıkış basıncı (kPa) | 1,067 | 1,254 | 1,465 | 1,563 | 1,619 | 1,668 |
| Nem (%) | 38.98 | 38.43 | 38.32 | 38.03 | 38.41 | 38.38 |
| Güç türbini giriş sıcaklığı (K) | 958 | 1,018 | 1,093 | 1,130 | 1,152 | 1,175 |

Tablo 3.1. (Devam) *CT-7 parametreleri*

| | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Güç türbini hızı (rpm) | 22,001 | 22,002 | 22,001 | 22,002 | 22,001 | 22,001 |
| Gaz türbini hızı (rpm) | 39,335 | 40,448 | 41,538 | 42,196 | 42,541 | 42,772 |
| Motor hava akışı (kg s ⁻¹) | 3,381 | 3,860 | 4,335 | 4,541 | 4,616 | 4,713 |
| Yakıt ısı değeri (kcal/kg) | 43,360 | 43,360 | 43,360 | 43,360 | 43,360 | 43,360 |
| Yakıt debisi (kg/h) | 0.059 | 0.0721 | 0.0893 | 0.0984 | 0.1038 | 0.1091 |
| Hava/Yakıt oranı | 54.4 | 50.9 | 46.2 | 43.9 | 42.3 | 41.4 |

CT-7 serisi motorlar özellikle Bell ve Skorsky helikopterlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Günümüze kadar 1500'den fazla üretilen ve 30 milyon uçuş saatini geçen kullanımıyla CT-7-9C serisine ait bir motor Şekil 3.2 ile sunulmuştur (Kumar, Husain, Upreti, & Gupta, 2010).



Şekil 3.2. *CT-7-9C motor bloğu*

Tez çalışması kapsamında tablodan elde edilen veriler kurulan modelin doğruluğunu test etmek için 6 ölçüm noktasında deney değerleri ile karşılaştırılacaktır. Kurulan modellerde gaz türbini RPM değeri ve hava akışı girdi, motor tork değerleri ise çıktı temel değişkenleri olarak ele alınmıştır.

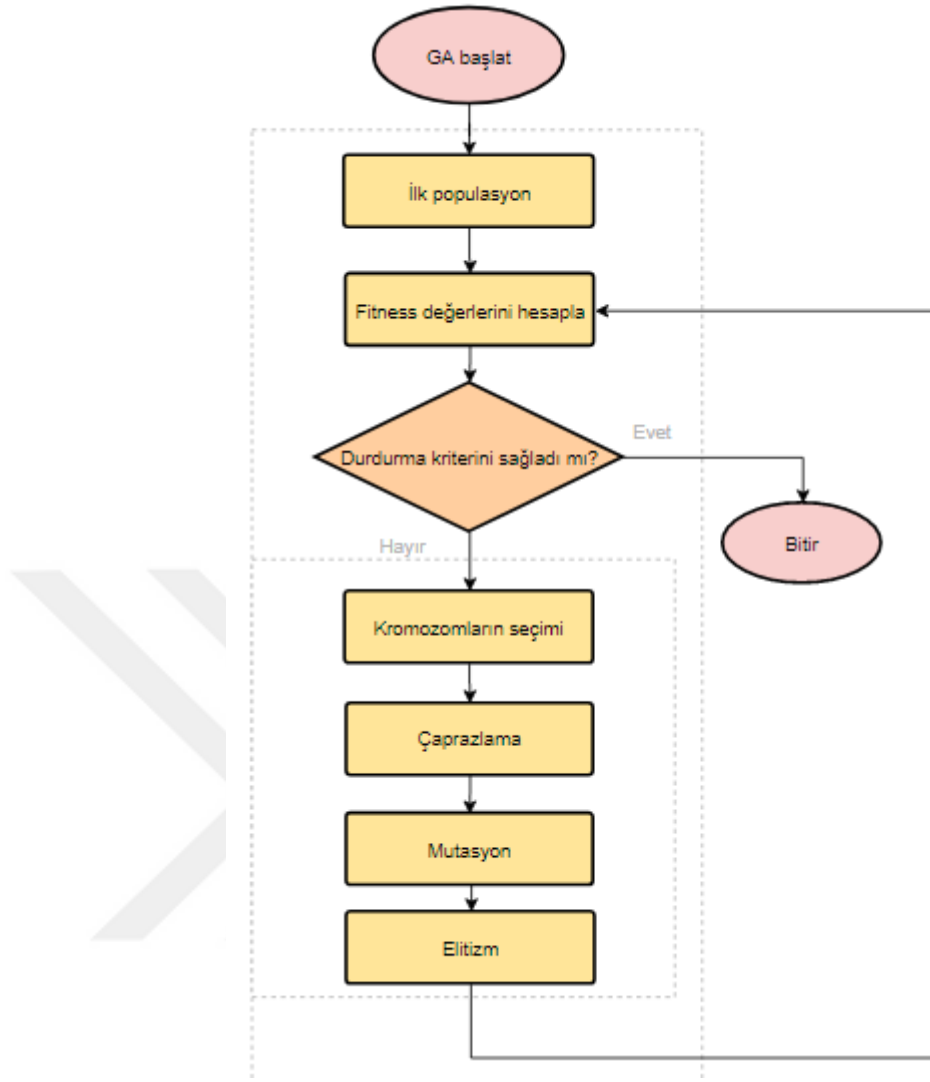
3.2. Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA), popülasyon tabanlı bir modelleme ve optimizasyon algoritmasıdır. İlk olarak John Holland tarafından önerilmiştir (Holland, 1992). GA, temelde doğal seleksiyon davranışını taklit eder. Bir çözüm kümesi içerisinde hayatta

kalma ihtimali en yüksek olan bireyin kromozomlarının bir sonraki nesile aktarılmasını sağlar. Bir optimizasyon problemi içinse bu durum, amaç fonksiyonunu minimum ya da maksimum yapacak olan değişken değerlerinin yer aldığı kromozomun bir sonraki popülasyona aktarılması şeklindedir (Turan, 2007). GA'yı oluşturan temel kavram ve operatörler;

- Popülasyon (Population)
- Kromozom (Chromosome)
- Gen (Gene)
- Uygunluk değeri/fonksiyonu (Fitness function)
- Kopyalama (Reproduction)
- Çaprazlama (Crossover)
- Mutasyon (Mutation)
- Elitizm (Elitism)

olarak sıralanabilir. GA'da her bir kromozom bir çözüme denk gelir. Her bir gen ise bu çözümü sağlayan değişken değerlerine karşılık gelmektedir. Her bir popülasyon, o iterasyonda oluşturulan toplam çözümler kümesidir. Uygunluk değeri, belirli bir kromozomdaki değişken değerlerinin, amaç fonksiyonunda yerine konduğunda, fonksiyonu optimum değere ne kadar yaklaştırdığının bir göstergesidir (Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999). GA akış şeması Şekil 3.3 ile verilmiştir.



Şekil 3.3. GA akış şeması.

GA uygulanırken, öncelikle rastlantısal bir popülasyon oluşturulur. Daha sonra oluşturulan popülasyondaki kromozomların uygunluk değerlerine bakılır. Uygunluk değerlerine göre bir sonraki nesile aktarılacak olan kromozomlar olasılıklarına bağlı olarak seçilir. Seçilen kromozomlar kendi aralarında çaprazlanarak yeni çözümler oluşturulur. Bu aşamada çaprazlamaya ek olarak mutasyon da görülür. Yeni oluşturulan kromozomlardan iyi uygunluk değerine sahip olanlar elitizm oranına göre yeni popülasyona aktarılır. Algoritma, belirli bir durdurma kriterine kadar kendini tekrar eder. Literatürde kullanılan durdurma kriterleri genellikle; iterasyon sayısı limiti, yakınsama oranı limiti veya bir alt değer limit şeklinde görülmektedir.

GA, popülasyon tabanlı bir algoritma olması sebebiyle tek noktadan değil, eş zamanlı olarak çok noktadan arama yapmaktadır. Bu özelliği ile global arama yapabilmektedir. Diğer taraftan, elitizm ile iyi çözümlerin olduğu bölgeden kromozomlar çaprazlayarak iyi genlerin bir sonraki nesile aktarılmasını sağladığı içinse yerel arama özelliği de taşımaktadır. Söz konusu iki durum GA'nın birçok mühendislik uygulamasında kullanılmasına olanak tanımıştır.

GA, hem ayrık, hem de sürekli optimizasyon problemlerinde kullanılabilir. Problemin yapısına bağlı olarak GA'da elde edilen kromozomların gösterimi ikilik sistemde veya onluk sistemde yapılabilir. GA, optimum çözümü garanti etmemekle birlikte, optimizasyon problemleri için kısa sürede iyi bir alt sınır belirlemede en çok kullanılan popülasyon tabanlı algoritmalarından biridir.

3.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Bu çalışmada, FADEC sisteminin girdilerinden biri olan tork miktarını modellemek için popülasyon tabanlı optimizasyon algoritmalarından olan sürü temelli Yapay Arı Kolonisi Algoritması (ABC) kullanılmıştır.

Sürü temelli algoritmalarla öne çıkan özelliklerden biri sürülerin kendi kendine organize olma yeteneğidir. Bu özelliğin oranı sürüden sürüye değişse de temelde 4 nokta tüm sürülerde ortaktır. Bunlar; olumlu geri besleme, olumsuz geri besleme, dalgalanmalar, çoklu etkileşimler ve iş paylaşımı olarak sıralanabilir. Karıncalardaki takip hareketi olumlu geri beslemeye, bir yöndeki yığılmayı engellemeye yönelik davranışlar ise olumsuz geri beslemeye örnek verilebilir. Çözüm uzayında daha iyi çözümlerin bulunmasına olanak sağlayacak olan rastgele aramalar dalgalanmalara, sürüdeki birden fazla üye arasındaki bilgi alışverişi ise çoklu etkileşimlere örnek olarak verilebilir (Karaboga & Akay, 2009).

Sürü temelli algoritmaların izlediği, sürüyü bir arada, canlı ve güvenli tutmaya yarayan birden çok prensip vardır. Örneğin sürü bulunduğu bölgede zaman ve alan hesapları yapabilmeli ve çevredeki kalite faktörlerine cevap verebilmelidir. Sürü aynı zamanda stabil olmalı ve çevredeki küçük dalgalanmalarda hareket trendini değiştirmemeli ancak gerekli zamanlarda da değiştirebilmelidir.

Yapay Arı kolonisi algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm- ABC), 2005 yılında Derviş Karaboğa tarafından geliştirilen sürü temelli metasezgisel bir algoritmadır.

Algoritmada diğ er popülasyon temelli algoritmalarda oldu ğ u gibi popülasyon büyüklü ğ ü, maksimum iterasyon sayısı gibi ölçütler kullanılmaktadır.

Yapay arı kolonisi algoritmasında temel iş lev mekanizması, bal arılarının besin arama davranış ından esinlenilerek oluşturulmuştur. Burada amaç, en çok nektar iç eren besinin yerini (en iyi ç özümü) tespit etmektir (Karaboga, 2021).

Besin arama davranış ı, besin kaynağ ının yeri, iş ç i arılar ve serbest arılar gibi 3 temel parametre ile yönlendirilir. Serbest arılar da kendi iç erisinde kâş if (izci) ve gözcü arılar olarak 2 gruba ayrılmaktadır. ABC algoritmasında arama uzayı çok boyutludur. Besin kaynakları, kaynağ ın kovana olan uzaklı ğ ı ve bulundurdu ğ u nektar miktarı gibi parametrelerle de ğ erlendirilir ve her besin kaynağ ına yönelik bir “profitability” yani karlılık oranı hesaplanır. İş ç i arılar, belirli bir besin kaynağ ından faydalanan ve söz konusu kaynağ ın kovana göre uzaklık ve yön aç ısından konum bilgisini ve besin de ğ eri bilgilerini kovana taşıyarak bu bilgiyi serbest arılarla paylaşan arılardır. Bilgi paylaşımı kovanda “waggle dance” adı verilen bir dans ile gerçekleştirilir. Serbest arılar ise izci (kâş if) ve gözcü arılar olarak 2 gruba ayrılmaktadır. Gözcü arılar, iş ç i arıların paylaşt ığı bilgiyi kullanarak iş ç i arıların saptadı ğ ı besin kaynağ ının yerine göre yeni besin kaynakları ararlar. Kâş if (izci) arılar ise kovan çevresindeki alanı (çözüm uzayını) tarayarak yeni besin kaynakları ararlar.

Sürü temelli algoritmalarındaki temel prensipler hatırlanacak olursa, yapay arı kolonisi algoritmasında besin kaynağ ındaki nektar miktarının artması ile söz konusu besin kaynağ ını ziyaret eden gözcü arı oranının artması, olumlu geri beslemeye örnek gösterilebilir. Benzer şekilde azalan veya az nektarlı besin kaynaklarının ziyaret edilme ihtimalinin düşük olması veya azalması da olumsuz geri beslemeye bir örnektir. Kaş if arıların rastgele arama ile yeni besin kaynakları keş fetmesi dalgalanmalara, besin kaynağ ının konum ve nektar bilgisinin kovanda birden çok arı ile paylaşılması ise çoklu etkileş imlere örnek verilebilir.

Besin kaynaklarındaki nektar bilgisi, spesifik bit besin kaynağ ının seç ilmesi ve ziyaret edilmesi için bir kriterdir. E ğ er yeni besin kaynağ ındaki besin miktarı bir öncekinden daha iyiyse, arılar tarafından bir önceki kaynağ ın yeri hafızadan çıkarılıp yeni kaynağ ın yeri hafızada tutulmaktadır (Karaboga, Gorkemli, Karaboga, & Ozturk, 2012).

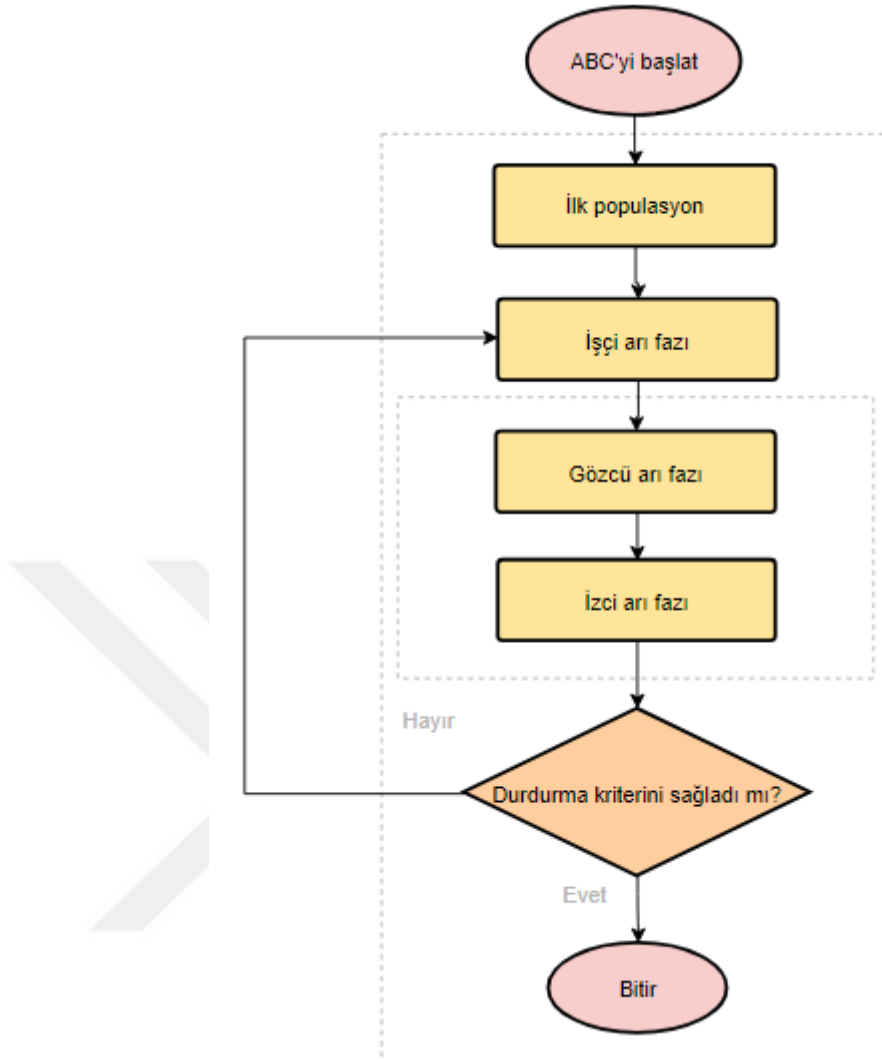
ABC algoritmasında hem tecrübeli hem tecrübesiz arıların olması hem yerel hem de global arama yapılmasına imkân vermekte ve algoritmanın bir yerel minimumda takılıp kalmasına engel olmaktadır.

Yapay arı kolonisi algoritması, algoritma yapısı ve iş akışı yönünden düşünüldüğünde, öncelikle kâşif arılar rastgele arama ile besin kaynaklarını tespit edip nektar ve uzaklık bilgisini almakta ve kovandaki gözcü arılara aktarmaktadır. Bu aşada kâşif arılar işçi statüsü kazanmaktadır. Gözcü arılar işçi arılarla birlikte çeşitli besin kaynaklarından faydalanmakta ve besin kaynakları bittiğinde rastgele arama yapmak için tekrar kâşif arı statüsüne dönmektedir. Algoritmada sıklıkla bahsedilen besin konumu, çözüm uzayındaki olası bir çözüme, besin kaynağındaki nektar miktarı ise söz konusu çözümün amaç fonksiyonuna uygunluk değerine karşılık gelmektedir. Algoritmada genellikle başlangıç parametreleri, işçi arı sayısı besin kaynağı sayısına eşit olacak şekilde ayarlanmaktadır.

ABC algoritması uygulanırken, öncelikle bir popülasyon oluşturulur. Daha sonra algoritmanın başlangıç değişkenlerine ve kontrol parametrelerine karar verilir. Örneğin, söz konusu model tek girdi tek çıktılı bir sistem olarak ele alındığında, ABC kontrol parametreleri;

- Koloni büyüklüğü (işçi ve gözcü arıların toplam sayısı)
- Besin kaynağı sayısı (koloni büyüklüğünün yarısına eşittir)
- Limit (Limit burada durdurma kriteri olarak kullanılmakta olup, limit sayısı kadar kullanımdan sonra o besin kaynağı terk edilmektedir.)
- maxCycle (Algoritmanın genel durdurma kriteri olarak kullanılmaktadır.)
- D (Problemde değeri bulunmak istenen değişken sayısıdır)
- Ub (problemdeki parametre değerlerinin üst limitidir)
- Lb (Problemdeki parametre değerlerinin alt limitidir)

ABC akış şeması Şekil 3.4 ile verilmiştir



Şekil 3.4. ABC akış şeması

Algoritma, belirli bir durdurma kriterine kadar kendini tekrar eder. Literatürde kullanılan durdurma kriterleri genellikle; iterasyon sayısı limiti, yakınsama oranı limiti veya bir alt değer limitidir.

ABC, diğer popülasyon tabanlı metasezgisel algoritmalar gibi optimum çözümü garanti etmemekle birlikte, optimizasyon problemleri için kısa sürede iyi bir alt sınır belirlemede kullanılabilecek algoritmalarından biridir. Literatürde son yıllarda sıklıkla kullanılmaya başlanmış olup farklı alanlarda iyi sonuçlar vermesi nedeniyle söz konusu motor sistemine uygulanması düşünülmüştür.

Bu çalışmada, ABC algoritması, FADEC sisteminin daha doğru çıktılar üretebilmesi için girdilerin değerinin bulunmasında bir optimizasyon aracı olarak kullanılmıştır.

3.4. Hata Metrikleri

Algoritmaların güvenilirliğini ve sonuçların doğruluğunu ölçmek için çeşitli hata metrikleri oluşturulmuştur.

$$e = \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (3.1)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (3.2)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (3.3)$$

Söz konusu metrikler literatürde sıklıkla kullanılan metriklerdir. Ayrıca algoritmaların birbirlerine göre karşılaştırılması da bu metrikler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada iki farklı algoritma ile dört farklı ana model ve bu modellerin polinom derecelerine bağlı çok sayıda alt model oluşturulmuş olup çalışma sonuçlarında ele alınan turboprop motoru en iyi modelleyen ve hata oranları en düşük olan çözümlere yer verilmiştir.

Bu bölümde CT-7 motoru için ABC ile bir itki modeli oluşturulmuştur. Bunun için öncelikle literatürden elde edilen verilerden motor devri ile tork arasındaki ilişki incelenmiştir. Elde edilen grafikte, motor RPM değeri ile tork değerlerinin arasındaki ilişkinin 4. dereceden bir fonksiyon ile modellenebileceğine karar verilmiştir. Bu nedenle motor devri bağımsız değişken, tork ise bağımlı değişken olacak şekilde 4. dereceden bir fonksiyon oluşturulmuştur. Benzer bir model de girdi parametresi olarak motor devri ve hava akışı, çıktı ise tork olacak şekilde çok girdi tek çıktılı olacak şekilde oluşturulmuştur. Modelde kullanılacak girdi ve çıktı parametreleri Tablo 4.1. ile gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Motor girdi ve çıktı parametreleri

| Girdiler | Çıktılar |
|----------------|-----------------------|
| İrtifa | İtki |
| Hava sıcaklığı | Tork |
| Hava basıncı | Özgül yakıt sarfiyatı |
| Hava yoğunluğu | Yakıt akışı |
| Mach sayısı | Toplam verim |

Bu çalışma kapsamında SISO modellerde RPM girdi, tork çıktı, MIMO modellerde RPM ve hava akışı girdi, tork çıktı olarak ele alınmıştır.

4.1. Genetik Algoritma Sonuçları

Elde edilen GA modelinde hata değeri, deneysel verilerden elde edilen tork değerleri ile GA tarafından bulunan tork değerleri arasındaki fark olarak belirlenmiştir. Popülasyon sayısı 100 – 200 aralığında değiştirilmiş ve algoritma üzerinde bu parametrenin etkileri incelenmiştir. Söz konusu modele ait parametreler;

- Kromozom sayısı (M) = 30;
- Gen, değişken sayısı (N) = Problem.nVar = 5;

- İterasyon limiti (MaxGen) = 100;
- Çaprazlama oranı (Pc) = 0.95;
- Mutasyon oranı (Pm) = 0.4;
- Elitizm oranı (Er) = 0.2;

şeklinde. Burada M, kromozom sayısı, N, değişken sayısı, MaxGen, iterasyon sayısı, Pc, çaprazlama oranı, Pm mutasyon oranı ve Er, elitizm oranını belirtmektedir.

Elde edilen modelde en iyi uygunluk değerini veren değişken değerleri; BestChrom = [1,45812881816263e-20 7,50849421546749e-20 6,31204678775872e-19 0,111599214977334 -4148,7] olarak elde edilmiştir. GA modelinde popülasyon sayısı değiştirilerek çeşitli sonuçlar analiz edilmiştir ancak bu sonuçların ABC algoritmasına göre doğruluk oranlarının düşük olduğu görülmüştür.

Tablo 4.2. Genetik algoritma girdi parametreleri

| GA parametreleri | |
|----------------------|----------------|
| Kodlama tipi | Continuous |
| Popülasyon büyüklüğü | 30 |
| Seçilim operatörü | Roulette-wheel |
| Çaprazlama operatörü | Two-point |
| Mutasyon operatörü | Uniform |
| Çaprazlama oranı | 0.95 |
| Mutasyon oranı | 0.4 |
| Elitizm oranı | 0.2 |

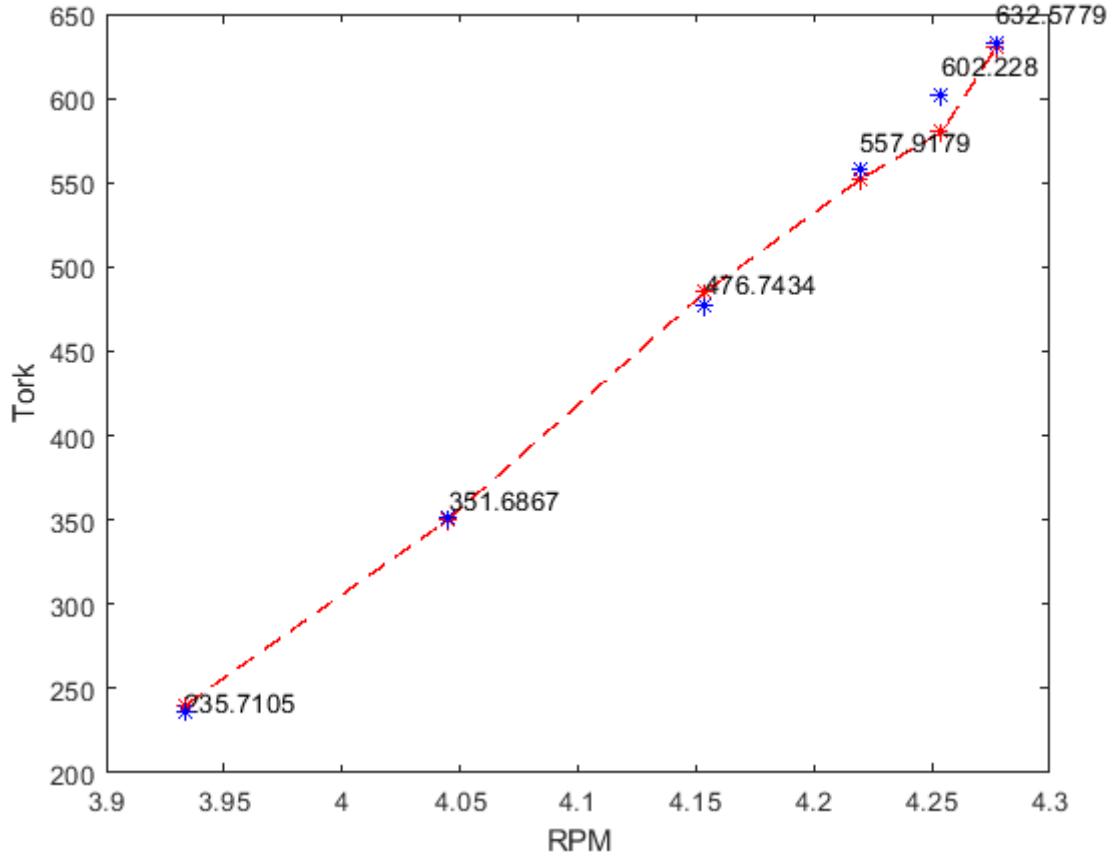
4.2. Tek Girdili ve Tek Çıktılı Yapay Arı Kolonisi Modeli Sonuçları

Elde edilen Çok Girdili ve Tek Çıktılı Yapay Arı Kolonisi modelinde (ABC SISO) hata değeri (e), deneysel verilerden elde edilen tork değerleri ile ABC tarafından bulunan tork değerleri arasındaki fark olarak belirlenmiştir. Analiz ile ilgili sonuçlar hata grafikleri olarak Şekil 4.1. ile verilmiştir. Söz konusu modele ait parametreler;

- Koloni büyüklüğü (NP)=20;
- Besin kaynağı sayısı (FoodNumber)=NP/2;
- Besin kaynağı tükenme limiti = limit=100;

- İterasyon limiti = maxCycle=10000; D=5;
- Parametre üst limiti = ub=ones(1,D)*100000
- Parametre alt limiti = lb=ones(1,D)*(-100000)

şeklindedir. Elde edilen en iyi ABC SISO sonucu, 10000 iterasyonda 39.87 N.m hata ile elde edilmiştir.



Şekil 4.1. ABC SISO 1000 iterasyon RPM-Tork değerleri

Yapay arı kolonisi parametreleri, literatürde yapılan çalışmalar baz alınarak modele eklenmiştir. Burada, çeşitli koloni büyüklüklerinde ve besin sayılarında farklı iterasyonlarda algoritmanın yeterliliği ve verimliliği incelenmiştir. Yapay arı kolonisi girdi parametreleri Tablo 4.3 ile sunulmuştur.

Tablo 4.3. *Yapay arı kolonisi girdi parametreleri*

| ABC parametreleri | |
|--------------------------|-------|
| Koloni büyüklüğü (NP) | 20 |
| Besin kaynağı sayısı | NP/2 |
| limit | 100 |
| Maximum cycle | 10000 |

Farklı iterasyon sayılarında elde edilen sonuçlar, hata (e), MSE, RMSE, MAE ve MAPE türünden olmak üzere Tablo 4.4 ile belirtilmiştir.

Tablo 4.4. *ABC SISO hata ve uygunluk değerleri*

| İterasyon | Hata (e) | MSE | RMSE | MAE | MAPE | CPUtime | Run # |
|------------------|-----------------|------------|-------------|------------|-------------|----------------|--------------|
| 1000 | 63.17 | 1917.99 | 101.53 | 41.45 | 1.46 | 6.70 | 1 |
| 5000 | 93.20 | 3974 | 142.96 | 58.36 | 2.06 | 16.11 | 2 |
| 8000 | 67.49 | 1583.42 | 86.87 | 35.46 | 1.25 | 19.13 | 3 |
| 10000 | 39.87 | 654.40 | 52.35 | 21.37 | 0.75 | 20.56 | 4 |
| 15000 | 46.18 | 973.05 | 67.78 | 27.67 | 0.98 | 32.17 | 5 |
| 20000 | 47.20 | 868.88 | 64.50 | 26.33 | 0.93 | 35.61 | 6 |
| 30000 | 41.00 | 642.40 | 48.66 | 19.86 | 0.70 | 51.97 | 7 |
| 40000 | 45.18 | 779.93 | 56.03 | 22.87 | 0.81 | 67.19 | 8 |

Tablo 4.4'e göre, 10000 iterasyonda hata değeri dramatik bir değişim göstererek tüm rpm değerleri için toplam yaklaşık 39 N.m gibi bir değere düşerek ABC algoritmasının söz konusu motor modelinde modelleme ve optimizasyon yöntemi olarak kullanıldığında 20 saniyeden az bir sürede yüksek doğrulukta bir model oluşturulabileceğini göstermiştir. Deneysel tork değerleri ve tablodaki iterasyon değerlerine denk gelen tork değerleri ise Tablo 4.5 ile verilmiştir.

Tablo 4.5. *ABC SISO Tork değerleri*

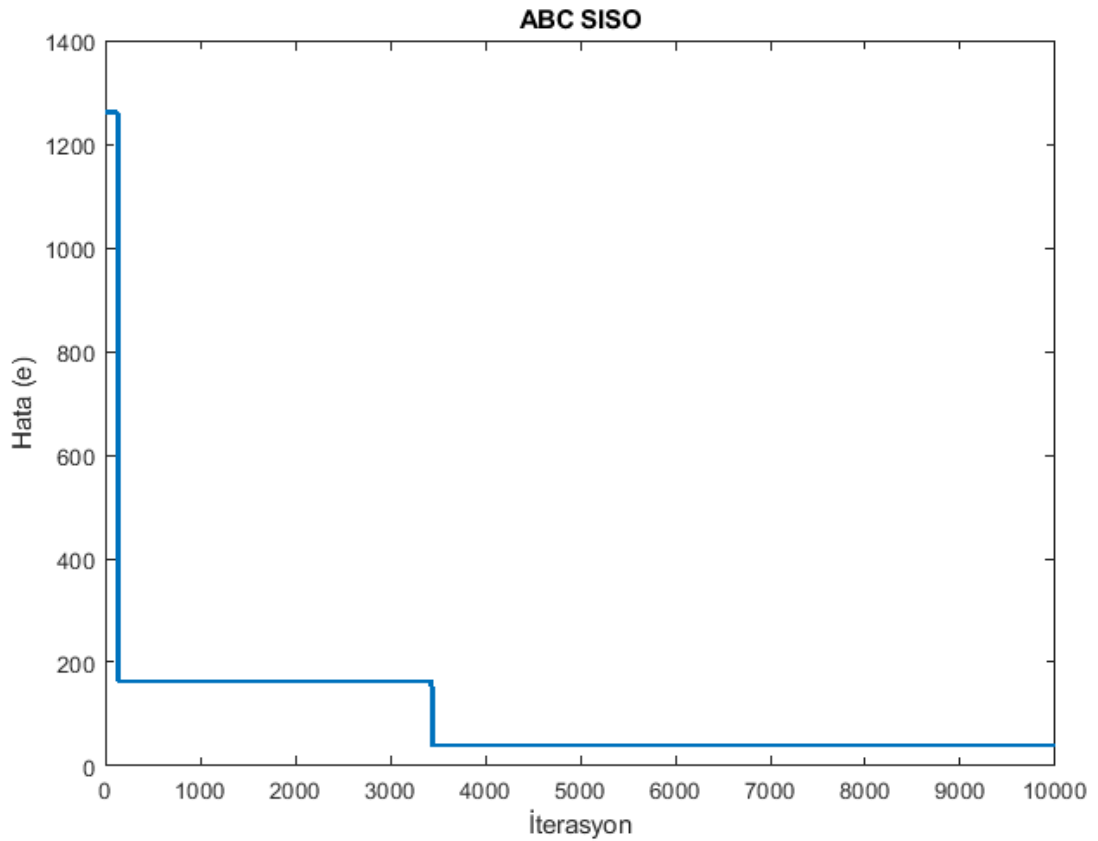
| Deneysel Tork Değerleri (N.m) | 240 | 350 | 485 | 552 | 580 | 630 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T (run-1) | 258.91 | 363.29 | 476.91 | 551.18 | 591.88 | 619.82 |

Tablo 4.5. (Devam) *ABC SISO Tork değerleri*

| | | | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T (run-2) | 213.97 | 338.09 | 472.04 | 558.98 | 606.42 | 638.91 |
| T (run-3) | 249.45 | 362.53 | 474.94 | 543.42 | 579.47 | 603.66 |
| T (run-4) | 243.82 | 353.37 | 474.51 | 554.67 | 598.91 | 629.41 |
| T (run-5) | 248.85 | 354.92 | 474.60 | 554.75 | 599.23 | 629.96 |
| T (run-6) | 247.06 | 359.60 | 477.75 | 552.92 | 593.51 | 621.13 |
| T (run-7) | 239.94 | 357.02 | 480.2 | 558.91 | 601.56 | 630.65 |
| T (run-8) | 235.36 | 348.65 | 473.63 | 556.00 | 601.32 | 632.49 |

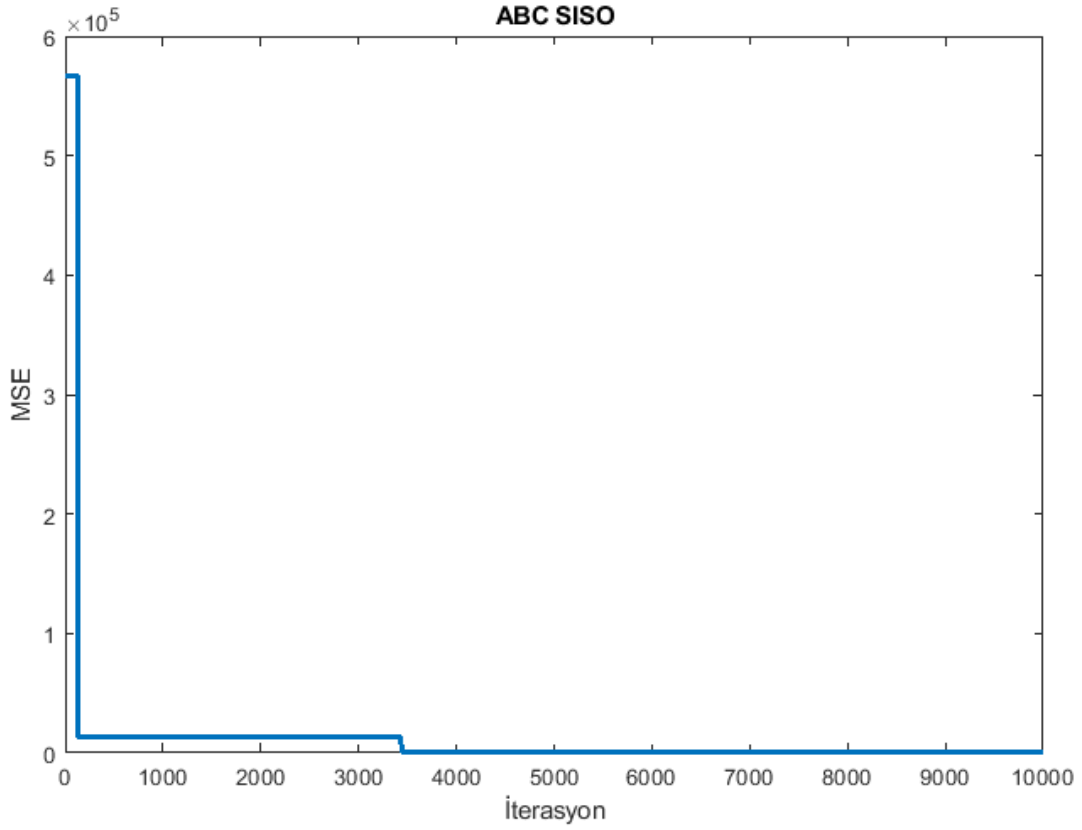
Söz konusu tork değerleri incelendiğinde, en düşük motor devrinde 0.1 N.m ile 18 N.m aralığında değişen sapmalar görölmektedir. Motor devri giderek artırıldığında 12 N.m, 18 N.m, 21 N.m ve yüksek motor devirlerinde en yüksek 27 N.m değerinde sapmalar görölmüştür.

Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak ABC SISO modelinin düşük motor devirlerinde daha yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği ve düşük RPM değerlerinde kullanıma daha uygun olduğu söylenebilir.



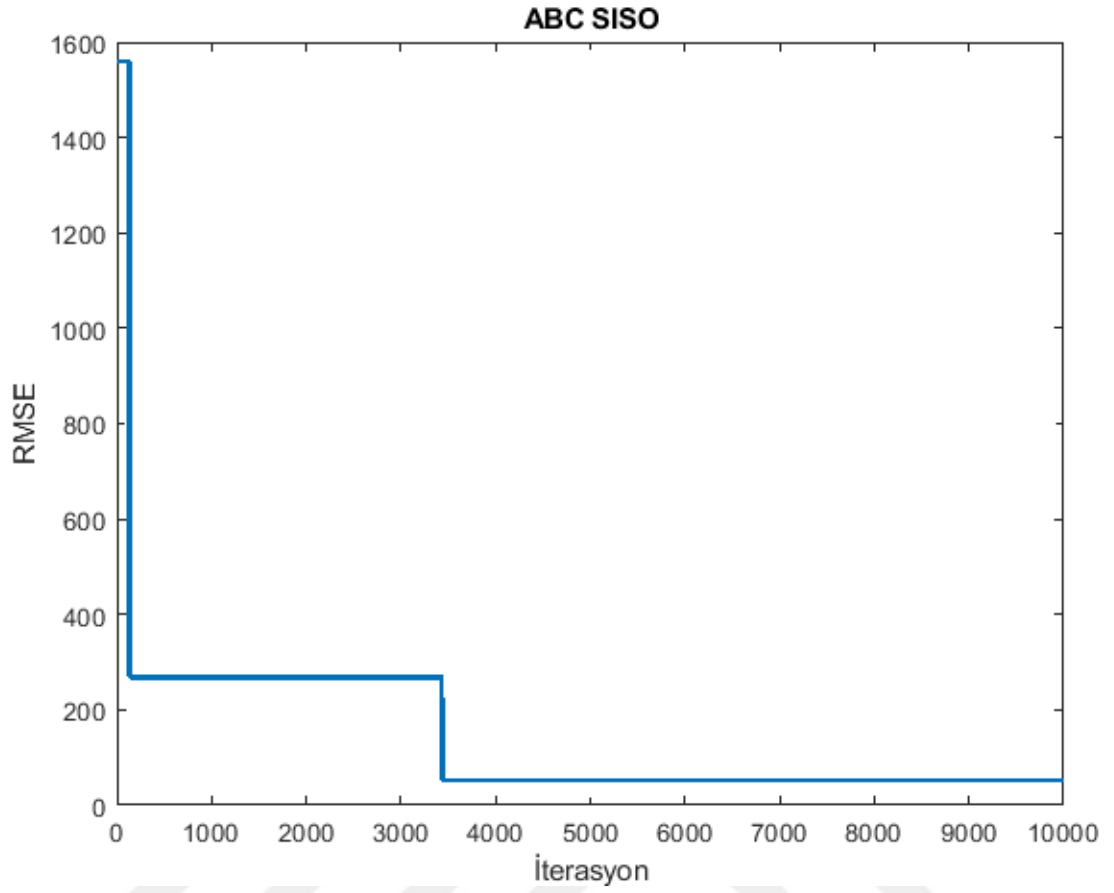
Şekil 4.2. *ABC SISO 10000 iterasyon hata (e) değişimi*

ABC SISO modeli için hata değışimi incelendiğinde algoritmanın ilk çalıştırıldığı andan itibaren hata değeri yaklaşık 1250 N.m değerinden 39.87 N.m değerine hızlı ve dramatik bir düşüş görülmüştür.



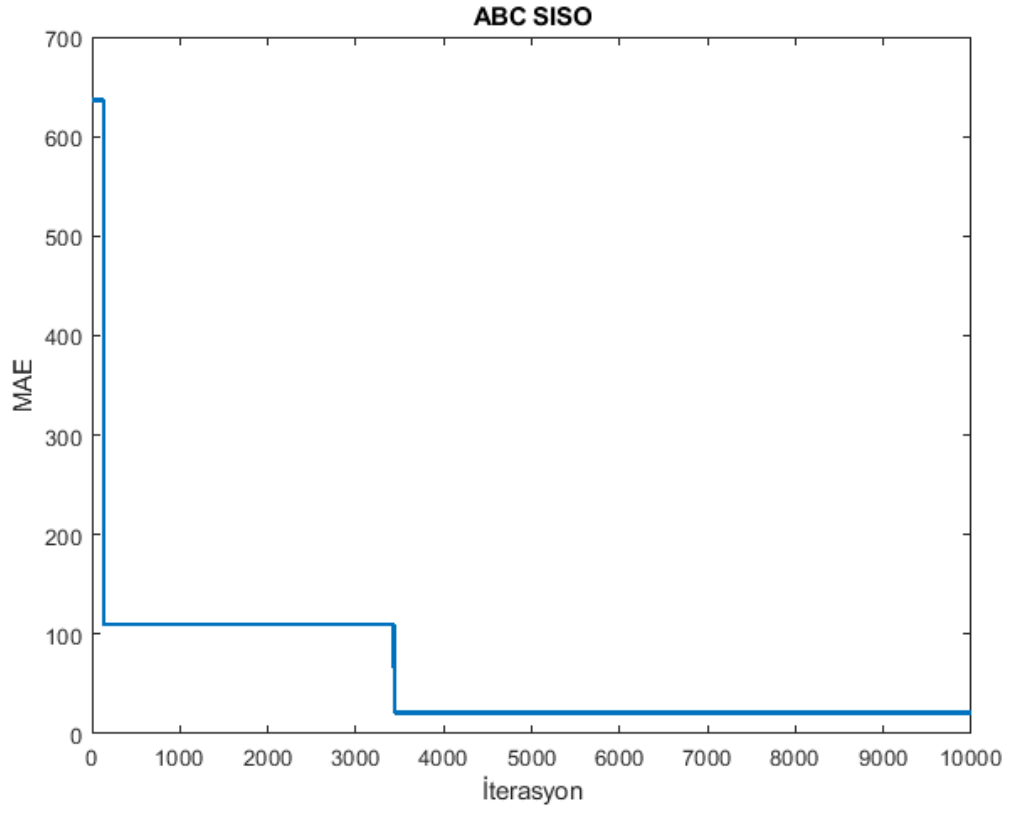
Şekil 4.3. ABC SISO 10000 iterasyon MSE değışimi

Benzer bir değışim MSE değeri de görülmektedir. Aynı CPUtime süresinde 6×10^5 N.m derecesinde bir MSE değerinden yaklaşık olarak 654.40 N.m değeri kısa süre içerisinde hızlı bir düşüş görülmüştür.



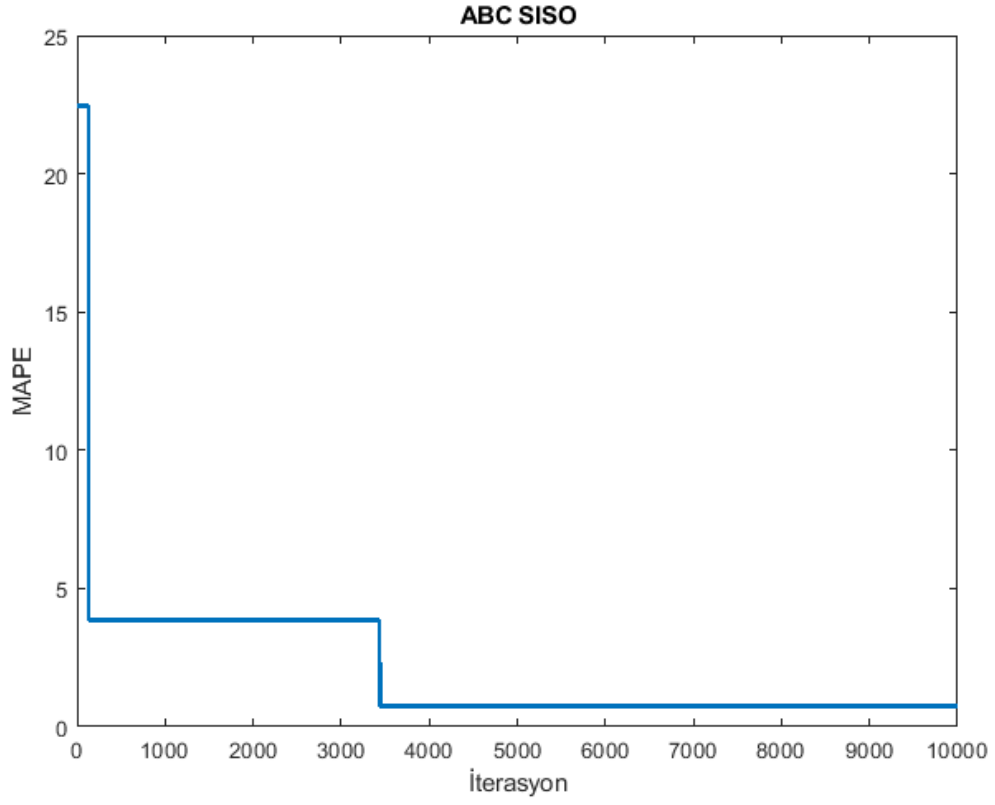
Şekil 4.4. ABC SISO 10000 iterasyon RMSE değişimi

RMSE değeri hızlı bir değişim göstererek yaklaşık 16000 N.m'den 52.35 N.m değerine düşmüştür.



Şekil 4.5. ABC SISO 10000 iterasyon MAE değışimi

ABC SISO modelinde MAE ve MAPE değeri de sırasıyla 4500 N.m'den yaklaşık 21 N.m ve yaklaşık 150 N.m'den 0.75 N.m değerine düşmüştür. Bu hızlı düşüşlerde ABC algoritmasının hem lokal hem de global arama yapabilmesi ve daha iyi olan komşu çözümlere daha kısa sürede ulaşabilmesi de katkı sağlamaktadır.



Şekil 4.6. ABC SISO 10000 iterasyon MAPE değişimi

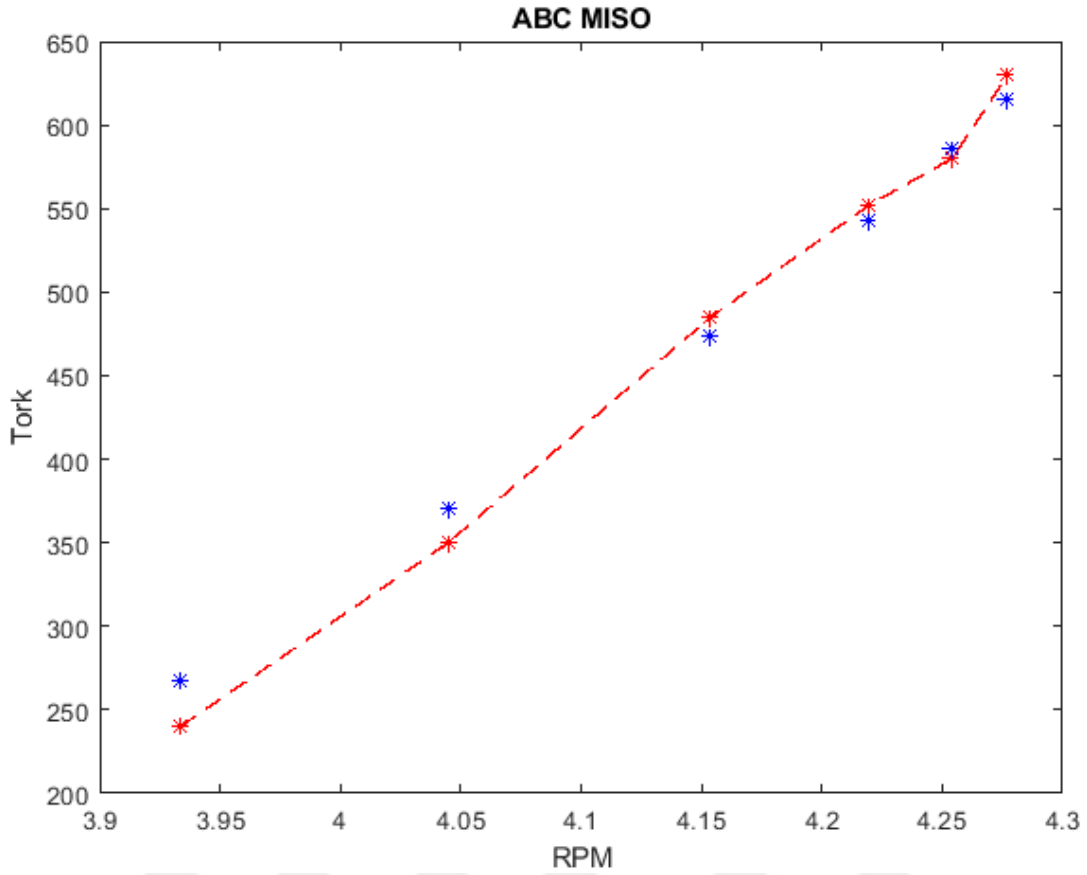
1000 iterasyon sonucu elde edilen en iyi sonuçlarda hata değerleri; $e=43.55$ $MSE=812.09$ $RMSE=60.94$ $MAE=24.88$ $MAPE=0.88$ şeklindedir.

4.3. Çok Girdili ve Tek Çıktılı Yapay Arı Kolonisi Modeli Sonuçları

CT-7 motoru için söz konusu tork modeli, yapay arı kolonisi algoritması ile iki girdi tek çıktılı şekilde de oluşturulmuştur. Çok Girdili ve Tek Çıktılı Yapay Arı Kolonisi modeline (ABC MISO) ait parametreler;

- Koloni büyüklüğü (NP) =20;
- Besin kaynağı sayısı (FoodNumber)=NP/2;
- Besin kaynağı tükenme limiti = limit=100;
- İterasyon limiti = maxCycle=50000;
- Parametre üst sınırı = ub=ones(1,D^Degisken)*1000000;
- Parametre alt sınırı = lb=ones(1,D^Degisken)*(-1000000);

şeklindedir.



Şekil 4.7. ABC MISO 50000 iterasyon RPM -Tork değişimi

ABC MISO modelinde elde edilen en iyi çözüm için gerçek tork ve elde edilen tork değerleri;

- $real_T = [240 \quad 350 \quad 485 \quad 552 \quad 580 \quad 630]$
- $T_run8 = [267.86 \quad 370.38 \quad 473.38 \quad 542.43 \quad 586.25 \quad 615.96]$

olarak 50000 RPM’de belirlenmiştir. Söz konusu değerler Şekil 4.7 ile verilmiştir.

ABC MISO modelinin hata metrikleri ve uygunluk değerleri ise Tablo 4.6 ile gösterilmiştir.

Tablo 4.6. ABC MISO hata ve uygunluk değerleri

| iterasyon | Hata(e) | MSE | RMSE | MAE | MAPE | CPUtime | Run # |
|-----------|---------|--------|---------|--------|-------|---------|-------|
| 10000 | 1146.63 | 800399 | 2085.25 | 851.30 | 30.01 | 26.44 | 1 |

Tablo 4.6. (Devam) *ABC MISO hata ve uygunluk değerleri*

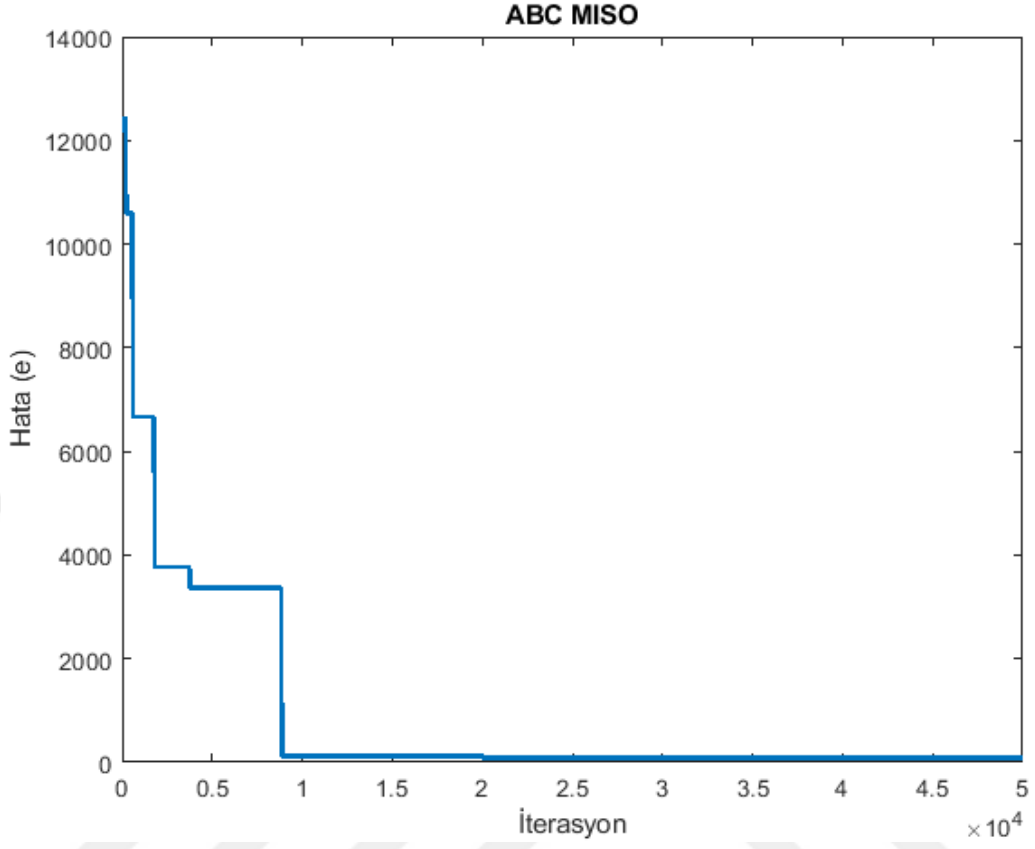
| | | | | | | | |
|--------------|--------|---------|--------|--------|------|-------|---|
| 20000 | 227.91 | 14611.6 | 244.02 | 99.62 | 3.51 | 34.63 | 2 |
| 25000 | 216.02 | 16849.2 | 288.48 | 117.77 | 4.15 | 43.25 | 3 |
| 30000 | 175.71 | 18926.6 | 324.54 | 132.49 | 4.67 | 45.62 | 4 |
| 35000 | 319.15 | 52173 | 510.60 | 208.45 | 7.35 | 54.15 | 5 |
| 40000 | 319.15 | 52173 | 510.60 | 208.45 | 7.35 | 54.16 | 6 |
| 45000 | 167.39 | 12634.7 | 249.30 | 101.78 | 3.59 | 69.81 | 7 |
| 50000 | 89.71 | 4213.29 | 151.36 | 61.79 | 2.18 | 75.75 | 8 |

ABC MISO modelinden elde edilen tork değerleri Tablo 4.7 ile verilmiştir. Söz konusu tork değerleri incelendiğinde, gerek en düşük motor devrinde gerekse yüksek motor devirlerinde 18 N.m ile 86 N.m aralığında değişen sapmalar görölmektedir. ABC MISO modeli, ABC SISO modeline göre daha çok hata değeriine ve sapmalara sahiptir.

Tablo 4.7. *ABC MISO Tork değerleri*

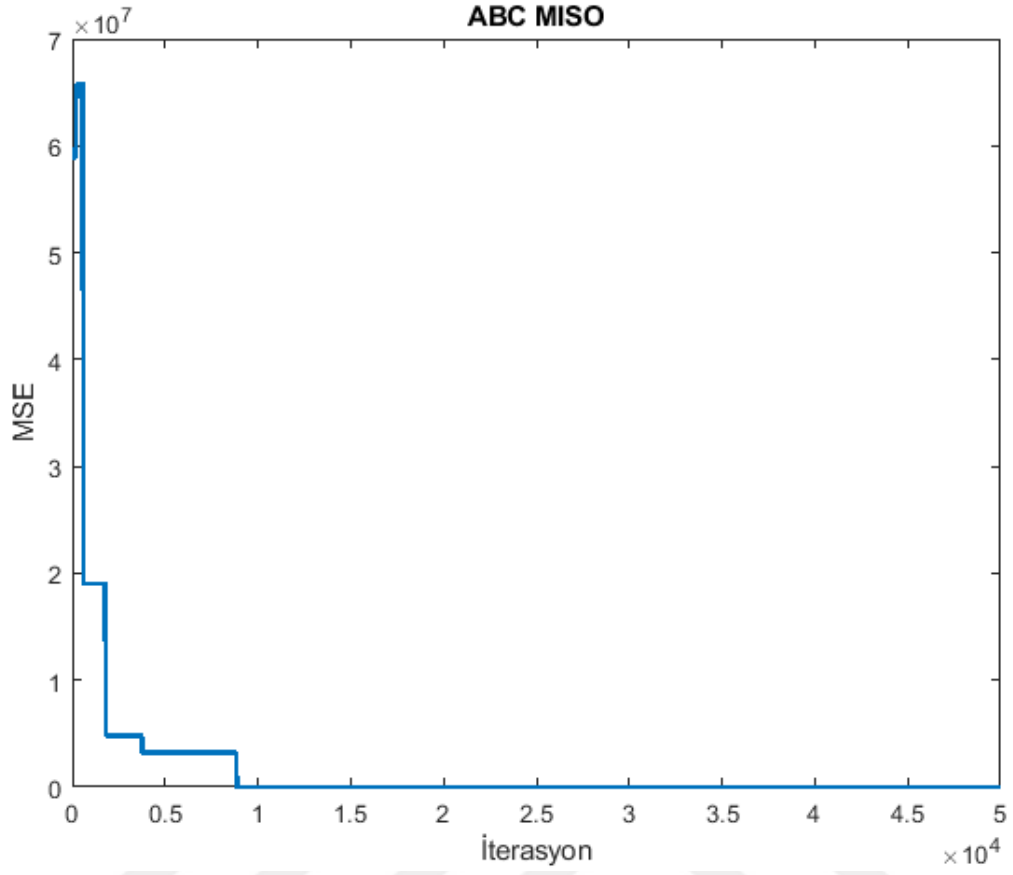
| Deneysel Tork Değerleri (N.m) | 240 | 350 | 485 | 552 | 580 | 630 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T (run-1) | 258.91 | 363.29 | 476.91 | 551.18 | 591.88 | 619.82 |
| T (run-2) | 271.3 | 355.81 | 447.80 | 545.22 | 644.59 | 712.16 |
| T (run-3) | 290.1 | 375.39 | 468.56 | 523.51 | 548.09 | 566.38 |
| T (run-4) | 174.6 | 308.35 | 453.22 | 547.69 | 601.91 | 640.70 |
| T (run-5) | 326.51 | 358.91 | 398.12 | 465.16 | 550.95 | 609.05 |
| T (run-6) | 326.51 | 358.91 | 398.12 | 465.16 | 550.95 | 609.04 |
| T (run-7) | 278.51 | 357.94 | 439.71 | 520.65 | 600.36 | 653.93 |
| T (run-8) | 267.86 | 370.38 | 473.38 | 542.43 | 586.25 | 615.96 |

Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak ABC MISO modelinin daha düşük doğrulukta sonuçlar verdiği söylenebilir.



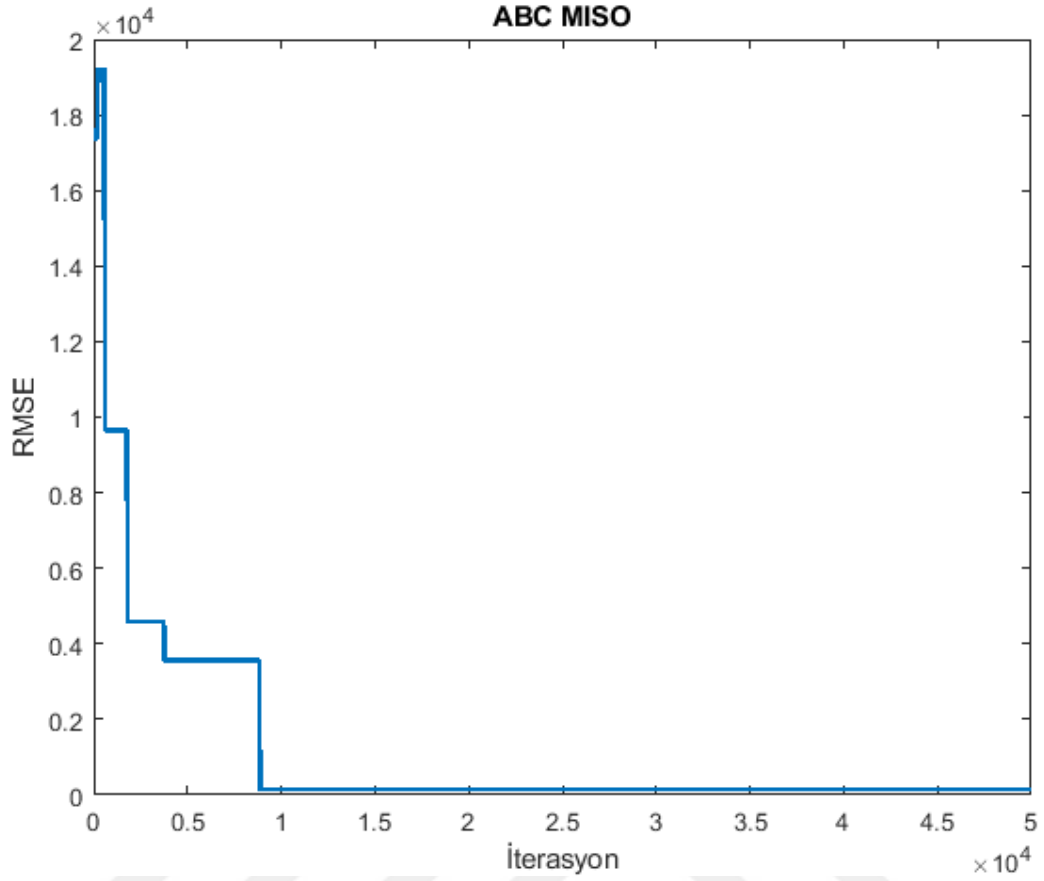
Şekil 4.8. ABC MISO 50000 iterasyon hata (e) değışimi

ABC MISO modeli için hata değışimi incelendiğinde, 50000 RPM’de algoritmanın ilk çalıştırıldığı andan itibaren hata değeri yaklaşık 13000 N.m değeriinden 89.71 N.m değeriine hızlı ve dramatik bir düşüş görülmüştür.



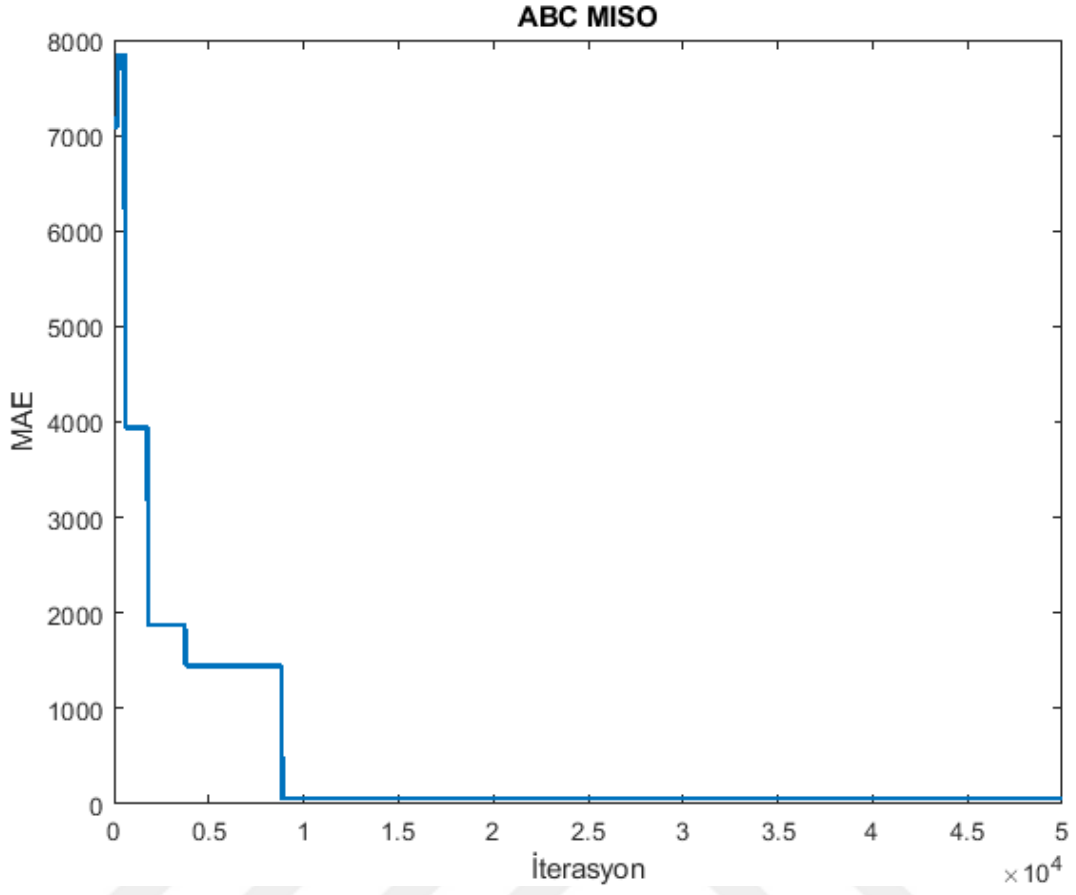
Şekil 4.9. ABC MISO 50000 iterasyon MSE değişimi

Benzer bir değişim MSE değerinde de görülmektedir. MSE, aynı CPUtime süresinde 70000000 N.m değerinden yaklaşık olarak 4213.29 N.m değerine kısa süre içerisinde hızlı bir düşüş görülmüştür.



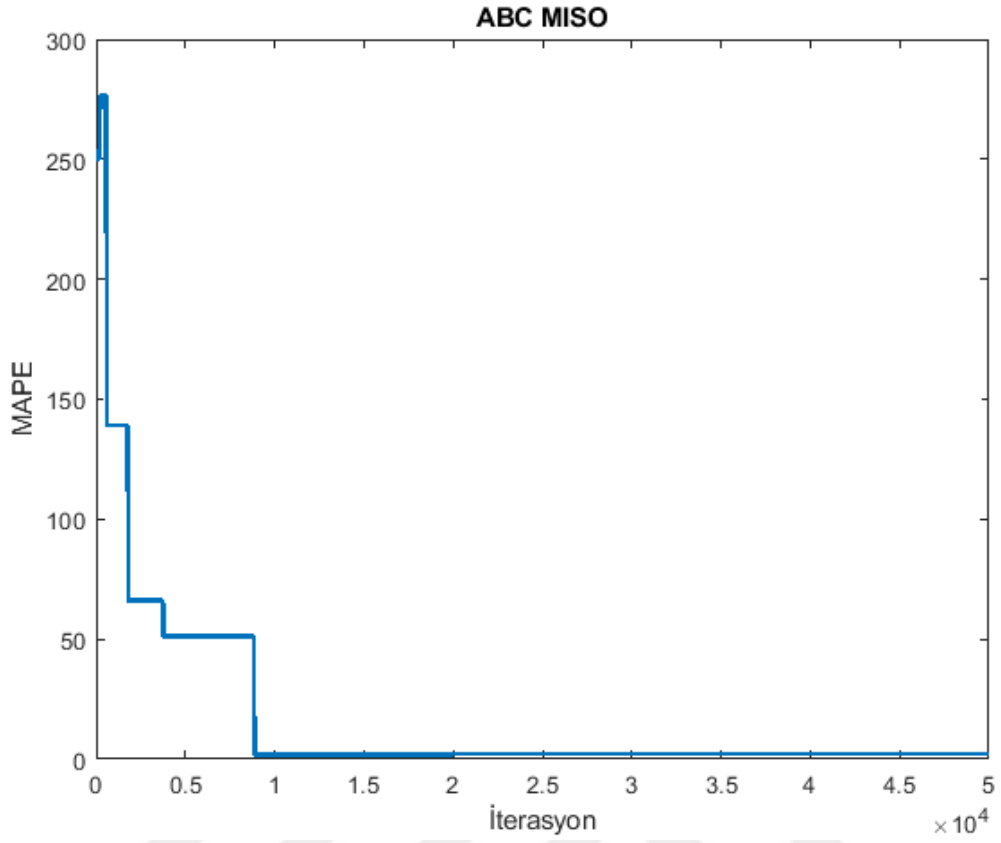
Şekil 4.10. ABC MISO 50000 iterasyon RMSE değişimi

RMSE değeri hızlı bir değişim göstererek 20000 N.m'den 151.36 N.m değerine düşmüştür.



Şekil 4.11. ABC MISO 50000 iterasyon MAE değışimi

ABC SISO modelinde MAE değeri 8000 N.m'den yaklaşık 61.79 N.m değerine düşmüştür.



Şekil 4.12. ABC MISO 50000 iterasyon MAPE değişimi

MAPE değeri yaklaşık 280 N.m'den 2.18 N.m değerine düşmüştür. Bu hızlı düşüşlerde ABC algoritmasının hem lokal hem de global arama yapabilmesi ve daha iyi olan komşu çözümlere daha kısa sürede ulaşabilmesi de katkı sağlamaktadır.

5. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle CT-7 motorunun sistem davranışını analiz etmek için elde edilen tork değerleri ile hava akışı, sıcaklık, basınç, egzoz gaz sıcaklığı gibi motor performansını etkileyen değerler arasındaki ikili ilişkiler incelenmiştir. CT-7 turboprop motoru için;

- Düşük motor devirlerinde elde edilen tork miktarı doğrusala yakın bir eğilim gösterirken, yüksek motor devirlerinde değişim oranı doğrusal olmayan bir eğilim izlemeye başlamıştır.

- Bu durum geleneksel ve matematiksel modelleme yöntemleri yerine, bu ve benzeri turboprop sistemler için sezgisel yaklaşımların daha uygun ve hızlı sonuç alınabilecek yöntemler olduğunu göstermiş ve bu tez çalışması kapsamında tercih edilmesini sağlamıştır.

- Sezgisel yöntemlerden probleme özgü bir sezgisel uygulaması yerine, sonraki çalışmalar ve benzer turboprop sistemlerde kullanımı açısından çalışma sonuçlarının genellenebileceği popülasyon tabanlı metasezgiseller seçilmiştir.

- Farklı parametrelerin torka etkilerini incelemek için farklı girdiler kullanılmış ve hava akışının diğer parametrelere göre tork üzerinde daha dramatik etkileri olduğu gözlenmiştir.

- En yüksek doğruluklu sonuçlar tek girdi ve çıktılı yapay arı kolonisi algoritması (ABC - SISO) ile elde edilmiş olup söz konusu motorun modellenmesinde denenenler arasında en uygun yöntemin ABC SISO olduğu görülmüştür.

- ABC SISO ve ABC MISO modellerinin sonuçları incelendiğinde, CT-7 motorunda tek girdi ve çıktılı bir sistemin modelleme açısından daha hızlı, az hatalı ve daha yeterli sonuç verdiği görülmüştür.

Çalışmanın sonuçları incelendiğinde;

- GA ile oluşturulan modellerin ABC algoritması ise oluşturulanlara göre hata oranlarının ve arama sürelerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

- CT-7 turboprop motoru için yapay arı kolonisi algoritması ile tek girdili bir model oluşturulduğunda 10000 iterasyon sonucunda 39.87 N.m hata değeri ile en iyi model elde

edilmiş ve bu değerde MSE, RMSE, MAE ve MAPE değerlerinin sırasıyla 654.40 N.m, 52.35 N.m, 21.37 N.m ve 0.75 N.m olarak bulunmuştur. CPU süresi ise 20.56 sn olarak bulunmuştur.

- CT-7 turboprop motoru için yapay arı kolonisi algoritması ile çok girdili bir model oluşturulduğunda 50000 iterasyon sonucunda 89.71 N.m hata değeri ile en iyi ikinci model elde edilmiş ve bu değerde MSE, RMSE, MAE ve MAPE değerlerinin sırasıyla 4213.29 N.m, 151.36 N.m, 61.79 N.m ve 2.18 N.m olarak bulunmuştur. CPU süresi ise 75.75 sn olarak bulunmuştur.

Elde edilen sonuçların tasarım mühendislerine ve performans izleme süreçleri açısından kullanıcı dostu bir ara yüzle birleştiğinde sektör uzmanlarına kısa sürede etkili performans tahminleri açısından kolaylık sağlayacağı ön görülmektedir.

Havacılık işletmecileri açısından performans ve optimizasyon yönündeki iyileştirmelerin maliyet ve emisyon oranlarını düşüreceği ve dolayısıyla bu tez çalışmasındaki modern yöntemlerin akademi – sektör iş birliğini geliştireceği ve sektörün ihtiyaçlarına cevap vereceği ön görülmektedir

Literatür çalışmaları açısından söz konusu motor tipinde metasezgisel algoritmaların verimlilik ve yeterliliklerinin karşılaştırılması için çalışmanın bir temel oluşturacağı ön görülmektedir.

Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda pervane etkisi de modele dahil edilerek yeni metasezgisel algoritmaların havacılık motorlarındaki modelleme başarısı incelenecektir.

KAYNAKÇA

- Abdelghany, K., Abdelghany, A., & Raina, S. (2005). A model for the airlines' fuel management strategies. *Journal of Air Transport Management*, 199-206.
- Baklacioglu, T. (2015). Fuel flow-rate modelling of transport aircraft for the climb flight using genetic algorithms. *The Aeronautical Journal*, 119(1212), 173-183.
- Baklacioglu, T. (2016). Modeling the fuel flow-rate of transport aircraft during flight phases using genetic algorithm-optimized neural networks. *Aerospace Science and Technology*(49), 52-62.
- Baklacioglu, T. (2017). Metaheuristic and machine learning models for TFE-731-2, PW4056, and JT8D-9 cruise thrust. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 34(3), 221-232.
- Baklacioglu, T., & Cavcar, M. (2014). Aero-propulsive modelling for climb and descent trajectory prediction of transport aircraft using genetic algorithms. *The Aeronautical Journal*, 118(1199), 65-79.
- Bartel, M., & Young, T. M. (2008). Simplified thrust and fuel consumption models for modern two-shaft turbofan engines. *Journal of Aircraft*, 45(4), 1450-1456.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. New York, USA: Oxford University Press Inc.
- CFMI. (2000). *CFM 56 7B Engine Systems Training Manual*. CFMI.
- Collins, B. P. (1982). Estimation of aircraft fuel consumption. *Journal of Aircraft*, 19(11), 969-975.
- Dhiman, G., & Kumar, V. (2017). Spotted hyena optimizer: A novel bio-inspired based metaheuristic technique for engineering applications. *Advances in Engineering Software*, 114, 48-70.
- Holland, J. H. (1992). Genetic Algorithms. *Scientific American*, 267(1), 66-73.
- IATA. (2017). *iata.org*. iata.org: <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2017-12-05-01/>
adresinden alındı
- IATA. (2021). *Outlook for the global airline industry*. IATA.

- ICAO. (2017). *Airline Operating Costs and Productivity*. Tehran: ICAO.
- Jafari, S., & Nikolaidis, T. (2019). Meta-heuristic global optimization algorithms for aircraft engines modelling and controller design; A review, research challenges, and exploring the future. *Progress in Aerospace Sciences*(104), 40-53.
- Karaboga, D. (2021, 04 03). *Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm*. <https://abc.erciyes.edu.tr/> adresinden alındı
- Karaboga, D., & Akay, B. (2009). A comparative study Artificial Bee Colony Algorithm. *Applied Mathematics and Computation*. *Applied Mathematics and Computation*, 214(1), 108-132.
- Karaboga, D., Gorkemli, B., Karaboga, N., & Ozturk, C. (2012). A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications. *Artificial Intelligence Review* , 21-57.
- Karakoc, T. H., Aydin, H., Midilli, A., & Turan, Ö. (2012). Component-based exergetic measures of an experimental turboprop/turboshaft engine for propeller aircrafts and helicopters. *International Journal of Exergy*, 11(3), 322-348.
- KPMG. (2021). *The Aviation Industry Leaders Report 2021: Route to recovery*. KPMG.
- Kumar, M., Husain, M., Upreti, N., & Gupta, D. (2010). Genetic Algorithm:Review and Application. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, 2(2), 451-454.
- Lathasree, P., & Sheethal, R. (2008). *Estimation of aircraft fuel consumption for a mission profile neural networks*. Bangalore, India.: In: Proceedings of the International Conference on Aerospace Science and Technology (INCAST 2008-115).
- Navaratne, R. (2016). Investigating the Impact of Engine Degradation on Optimum Aircraft Trajectories. *Doktora Tezi*. Bedford, İngiltere: Cranfield Üniversitesi.
- Nuic, A. (2003). *Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.5*, . Fransa: Eurocontrol Experimental Center Brétigny-sur-Orge CEDEX.

- Parkinson, R. C. (1982). A Fuel-Efficient Cruise Performance Model for General Aviation Piston Engine Airplanes. *Doktora Tezi*. New Jersey, ABD: Princeton Üniversitesi.
- Schilling, G. (1997). Modelling Aircraft Fuel Consumption with a Neural Network. *Yüksek Lisans Tezi*. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Senzig, D. A., Iovinelli, R., & Fleming, G. G. (2009). Modeling of Terminal-Area Airplane Fuel Consumption. *Journal of Aircraft*, 46(4), 1089-1093.
- Stolzer, A. J. (2002). Fuel Consumption Modelling of a Transport Category Aircraft: A Flight Operations Quality Assurance (FOQA) Analysis. *Doktora Tezi*. Terre Haute, Indiana: Indiana State Üniversitesi.
- Şahin, Ö., & Aghayeva, C. (2017). Orta menzilli bir uçak için yakıt modelinin oluşturulması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 700-709.
- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics*. New Jersey: Wiley.
- Trani, A., F. W.-H., Baik, G., & Seshadri, A. (2004). *A neural network model to estimate aircraft fuel consumption*. Chicago, USA: 4th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum, AIAA.
- Tsotskas, C. (2016). Multi-Objective Optimisation Methods Applied to Aircraft Techno-economic and Environmental Issues. *Doktora Tezi*. Bedford, İngiltere: Cranfield Üniversitesi.
- Turan, Ö. (2007). Turbofan Motorlarının Elitizimli Genetik Algoritma Yöntemiyle Optimizasyonu. *Doktora Tezi*. Eskişehir: Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi.
- Turgut. (2011). Estimating aircraft fuel flow for a three-degree flight-path-angle descent. *Journal of Aircraft*, 48(3), 1099-1106.
- Turgut, E. T., Karakoç, T. H., Hepbaşı, A., & Rosen, M. A. (2009). Exergy analysis of a turbofan aircraft engine. *International Journal of Exergy*, 6(2), 181-199.

Turgut, E., & Rosen, M. (2012). Relationship between fuel consumption and altitude for commercial aircraft during descent: Preliminary assessment with a genetic algorithm. *Aerospace Science and Technology*, 17(1), 65-73.

Wulz, A. A. (2012). The Evolution of U.S. Commercial Domestic Aircraft Operations From 1991 to 2010. *The Evolution of U.S. Commercial Domestic Aircraft Operations From 1991 to 2010*. Massachusetts Institute of Technology.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ece YURDUSEVİMLİ METİN

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi

Doktora: Eskişehir Teknik Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı / 2021

Yüksek Lisans: Anadolu Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı / 2015

Lisans: Erciyes Üniversitesi / Sivil Havacılık Yüksekokulu / Uçak Elektrik Elektronik Bölümü / 2013

Mesleki Geçmişi

2014-2018, Araştırma Görevlisi, Anadolu Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü.

2018-Halen, Araştırma Görevlisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü.

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Metin E.Y. & Aygun H. (2019). Energy and power aspects of an experimental target drone engine at non-linear controller loads. *Energy*, 185, 981-993.

Metin E.Y. & Ozger A. (2017) Choosing The Best Training Aircraft For A Flight Training Organization By Multi Criteria Decision Making Methods. *The Online Journal of Science and Technology*, 7(4), 58-62.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Bildiriler

Metin E. Y. & Turan Ö. (2018). *Testing and Modelling of a Small Turbojet Engine*. International Symposium on Aircraft Technology, MRO Operations (ISATECH 2018), Istanbul.

Metin E. Y. & Kaba A. (2017). *Control and Estimation of a Wind Turbine System*. 8th. International Advanced Technologies Symposium (IATS 2017), Elazığ.

