



Optimization of an afterburning turbofan engine with multi objective particle swarm method

Rıdvan Oruç^{1*}, Tolga Baklacioğlu², Önder Turan²

¹School of Civil Aviation, Kastamonu University, Kastamonu, 37150, Turkey

²Faculty of Aeronautics and Astronautics, Eskisehir Technical University, Eskisehir, 26555, Turkey

Highlights:

- Parametric analysis of mixed flow turbofan engine using matlab program
- Optimization of the performance parameters using PSO
- Using the MOPSO method to find the best design variables

Keywords:

- Turbofan engine
- Particle swarm optimization
- Specific thrust
- Thrust specific fuel consumption
- Multi objective particle swarm optimization

Article Info:

Research Article
Received: 16.12.2018
Accepted: 25.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.498061

Correspondence:

Author: Önder Turan
e-mail:
onder.turan@gmail.com
phone: +90 536 343 9503

Graphical/Tabular Abstract

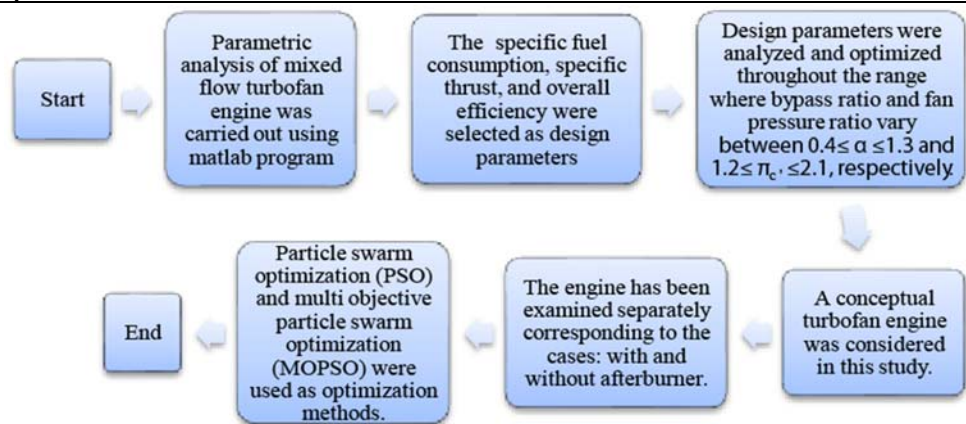


Figure A. The method used in the study

Purpose: The aim of this study is to make a parametric analysis of mixed flow turbofan engine and from the engine performance parameters, it is possible to find the lowest possible value of specific fuel consumption and highest possible value of specific thrust and overall efficiency with the help of PSO and MOPSO.

Theory and Methods:

Parametric analysis of mixed flow conceptual turbofan engine was accomplished by the use of matlab program. A conceptual turbofan engine was utilized for the analysis phase. Thrust specific fuel consumption (SFC), specific thrust (ST), and overall efficiency (η_o) objective functions, which are the parameters indicating engine performance, were optimized both “with” and “without” afterburner cases throughout the range where bypass ratio and fan pressure ratio vary between $0.4 \leq \alpha \leq 1.3$ and $1.2 \leq \pi_c \leq 2.1$, respectively. Particle swarm optimization (PSO) and multi objective particle swarm optimization (MOPSO) modeling approaches were used so as to achieve the optimum solution.

Results:

Optimal results have been obtained for the lowest values of the bypass ratio and fan pressure ratio for the “with afterburner” condition. For the “without afterburner” condition, it is observed that the specific fuel consumption is reduced and the overall efficiency is increased in cases where the bypass ratio is high and the fan pressure ratio is low. It is observed that the specific thrust increases with low bypass ratio and fan pressure ratio.

Conclusion:

In the “without afterburner” case, it was observed that the overall efficiency increased and the specific thrust and specific fuel consumption decreased compared “with afterburner” condition. Due to the PSO's fast convergence feature, it is seen that it provides an effective modeling approach in finding the optimum result considering the few number of iterations it needs. It is concluded that PSO and MOPSO are high and effective methods in parametric optimization of gas turbine engines.



Ardyanmalı bir turbofan motorunun çok amaçlı parçacık sürü yöntemiyle optimizasyonu

Rıdvan Oruç^{1*}, Tolga Baklacioğlu², Önder Turan²

¹Kastamonu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü, 37150, Kastamonu, Türkiye

²Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü, 26555, Eskişehir, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Matlab programı kullanılarak karışık akımlı turbofan motorunun parametrik analizi
- PSO kullanılarak performans parametrelerinin optimizasyonu
- En iyi tasarım değişkenlerini bulmak için MOPSO yöntemi kullanımı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.12.2018

Kabul: 25.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.498061

Anahtar Kelimeler:

Turbofan motor,
parçacık sürü optimizasyonu,
özgül itki,
itki özgül yakıt tüketimi,
çok amaçlı parçacık sürü
optimizasyonu

ÖZET

Bu çalışmada, MATLAB programı kullanılarak karışık akımlı ve ardyanmalı kavramsal turbofan motorunun parametrik analizi gerçekleştirilmiştir. Bypass oranı (α) ve fan sıkıştırma oranının (π_c) sırasıyla $0,4 \leq \alpha \leq 1,3$ ve $1,2 \leq \pi_c \leq 2,1$ olduğu değer aralığında motor performans parametreleri olan itki özgül yakıt tüketimi (SFC), özgül itki (ST) ve toplam verim (n_o) amaç fonksiyonları, hem ardyanmalı hem de ardyanmasız durum için optimize edilmiştir. Analiz için kavramsal bir turbofan motor kullanılmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu (MOPSO) kullanılmıştır. Literatürde bu konuda MOPSO ile herhangi bir çalışma olmadığından bu çalışma, turbofan motorunun parametrik analizinde MOPSO yönteminin kullanıldığı ilk çalışmadır. Ardyanmalı durumda SFC, ST ve n_o için optimum değerler α ve π_c ' nün sırasıyla 0,4 ve 1,2 olduğu değerlerde sırasıyla 52,4025, 1013,3 ve %21,13 olarak bulunmuştur. Ardyanmasız durumda SFC, ST ve n_o için optimum değerler sırasıyla 20,8887, 658,3483 ve %30,1234 olarak bulunmuştur. Ardyanmasız durumda SFC, ST ve n_o için optimum değerleri sağlayan α ve π_c ikilileri sırasıyla (1,3 ile 1,2), (0,4 ile 1,2) ve (1,3 ile 1,2) olarak bulunmuştur.

Optimization of an afterburning turbopfan engine with multi objective particle swarm method

H I G H L I G H T S

- Parametric analysis of mixed flow turbopfan engine using matlab program
- Optimization of the performance parameters using PSO
- Using the MOPSO method to find the best design variables

Article Info

Research Article

Received: 16.12.2018

Accepted: 25.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.498061

Keywords:

Turbopfan engine,
particle swarm optimization,
specific thrust,
thrust specific fuel
consumption,
multi objective particle swarm
optimization

ABSTRACT

In this study, design analysis of mixed flow conceptual turbopfan engine was accomplished by the use of MATLAB program. Thrust specific fuel consumption (SFC), specific thrust (ST), and overall efficiency (n_o) objective functions, which are the parameters indicating engine performance, were optimized both "with" and "without" afterburner cases throughout the range where bypass ratio and fan pressure ratio vary between $0,4 \leq \alpha \leq 1,3$ and $1,2 \leq \pi_c \leq 2,1$, respectively. A conceptual turbopfan engine was utilized for the analysis phase. Particle swarm optimization (PSO) and multi objective particle swarm optimization (MOPSO) modeling approaches were used so as to achieve the optimum solution. Since there is no study with MOPSO in the literature on this subject, this study is the first study using MOPSO method in parametric analysis of turbopfan engine. The optimal values of SFC, ST ve n_o for the "with afterburner" condition were found 52. 4025, 1013.3 and %21.13 respectively, with α and π_c being 0.4 and 1.2 respectively. The optimal values of SFC, ST ve n_o for the "without afterburner" condition were found 20.8887, 658.3483 and %30.1234 respectively. α ve π_c pairs, which providing the optimum values for SFC, ST and n_o for the "without afterburner" condition, were found to be (1.3 and 1.2), (0.4 and 1.2) and (1.3 and 1.2) respectively.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ridvanoruc@kastamonu.edu.tr, tbaklacioğlu@eskisehir.edu.tr, *onderturan@eskisehir.edu.tr /

Tel: +90 536 343 9503

1998

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karışık akımlı ve ardyanmalı turbofan motorlar genellikle askeri uçaklarda kullanılmaktadır. Yüksek hız ve manevra kabiliyeti istenen durumlarda bu motorlar ardyanmalı olarak kullanılmaktadır ve motor yüksek itki üretmektedir. Ancak bu durumda yakıt tüketimi kayda değer bir şekilde artmaktadır [1]. Bunun gibi özel durumlar dışında motor ardyanmasız olarak kullanılmaktadır. Bu durumda ise yakıt tüketimi ve özgül itki azalmaktadır. Bu nedenle bu motorlarda yakıt tüketimini minimumda ve özgül itkiyi maksimumda tutmak yüksek öneme sahiptir. Yakıt tüketimi ve özgül itki parametreleri fan basınç oranı ve bypass oranı gibi birçok girdiye bağlı olarak değişmektedir. Bu girdi parametrelerini optimum da tutmak motor performansı için çok önemlidir. Bu bağlamda literatürde gaz türbinli motorların performansı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, Borguet vd. [2] turbofan motora çok amaçlı optimizasyon uygulayarak düz uçuş safhasında özgül yakıt tüketimini minimize etmek ve kalkış durumundaki özgül itki değerini maksimize etmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada tasarım değişkenleri olarak bypass oranı, fan basınç oranı ve yüksek basınç kompresörü basınç oranını kullanmışlardır. Optimizasyon yaklaşımının omurgaları, genetik algoritma ve modüler gaz türbini simülasyon aracıdır. Najjar vd. [3] kompresör basınç oranı ve türbin giriş sıcaklığının özgül itki ve özgül yakıt tüketimine etkisi üzerine çalışmışlardır. Analiz ve optimizasyon için general algebraic modeling system (GAMS) bilgisayar programını kullanmışlardır. Silva vd. [4] StudGA optimizasyon metodunu kullanarak gaz türbinli motorun performans analizini yapmıştır. Optimizasyonda amaçları yakıt tüketimi ve türbin pal sıcaklığını minimuma indirip itki değerini maksimize etmektir. Turan vd. [5] yüksek bypasslı turbofan motorlarının performans analizlerini Visual Basic 6.0 programlama dilinde bir yazılım geliştirerek gerçekleştirmişlerdir. Yine Turan vd. [6] ayırık akışlı ve ardyanmalı turbofan motorlarda bypass oranı ve fan basınç oranının motorun toplam verimi üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır.

PSO, canlı sürülerinin hareket ve ortak zekasına dayalı bir optimizasyon tekniğidir [7]. Sürü içerisindeki bireyler parçacık olarak tanımlanır. Bu parçacıkların her biri bir çözümü temsil eder. Parçacıklar kendi ve komşuluğundaki en iyi pozisyonu taklit ederek optimuma ulaşmak için çok boyutlu araştırma uzayı boyunca sürekli akış içerisindedirler [8]. PSO çok basit yapıda olması, hızlı yakınsaması ve sürü zekâsı algoritmalarına göre daha az parametre gerektirmesi nedeniyle diğer popülasyon temelli yöntemlere göre öne çıkmaktadır [9-10]. Ayrıca doğrusal olmayan denklemler gibi çözülmesi zor problemler için uygun bir yaklaşımdır [11]. Bu nedenle bir çok çalışmada optimizasyon amacıyla PSO algoritması kullanılmıştır. Örneğin, Montazeri-Gh vd. [12] gaz türbinli motor yakıt kontrol sisteminin PSO ile optimizasyonu üzerine çalışma yapmışlardır. Yine Seyed vd. [13] gaz türbinli santralin termo-ekonomik analizini ve PSO ve GA ile optimizasyonunu yapıp sonuçları karşılaştırmıştır.

Choi vd. [14], FJ44-2C turbofan motorunun performans analizi ve PSO ile optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmadaki amaçları düşük özgül yakıt tüketimi ve yüksek özgül itki elde etmektir. Tasarım parametreleri olarak bypass oranını, HP kompresör oranını, fan giriş kütle debisini, nozul soğutma havası oranını, yakıcı çıkış sıcaklığını seçmişlerdir.

Bu çalışmada, MATLAB programı kullanılarak karışık akımlı ve ardyanmalı kavramsal turbofan motorunun parametrik analizi gerçekleştirilmiştir. Amaç α ve π_c ' tasarım değişkenlerinin SFC, ST ve n_o performans parametreleri üzerindeki etkisini incelemek ve motorun tasarım sürecinde en iyi performansı verebilmesi adına en iyi α ve π_c ' değerlerini PSO optimizasyon yöntemi ile bulmaktır. Ayrıca MOPSO yöntemi ile SFC, ST parametrelerinin birlikte optimizasyonu yapılarak en iyi itkiyi minimum yakıt ile verebilecek tasarım değişkenleri belirlemek bir diğer amaç olmuştur. Yakıt tüketiminin azaltılması uçağın daha çok havada kalmasını, yakıt tüketimine bağlı çevresel etkilerin aynı şekilde optimize edilmesini ve yine yakıt tüketiminin işletmelere olan maliyetinin azaltılmasını, özgül itkinin artırılması uçağın daha fazla hız ve manevra kabiliyeti kazanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle bu parametrelerin optimizasyonu büyük önem taşımaktadır. Analizde kullanılan tasarım parametreleri bypass oranı ve fan sıkıştırma oranıdır. α ve π_c ' itki özgül yakıt tüketimi, özgül itki, toplam verim ve diğer birçok performans parametresi üzerinde oldukça etkilidir. Bu nedenle çalışmada α ve π_c ' ana değişkenler olarak seçilmiştir. Analizler MATLAB programı yardımıyla yapılmıştır. Bu çalışma, turbofan motorunun parametrik analizinde MOPSO yönteminin kullanıldığı ilk çalışmadır.

2. bölümde çalışmanın yöntemi açıklanmıştır. Parametrik analizde kullanılan tasarım ve performans parametreleri, motor tipi ve optimizasyon yöntemi olarak kullanılan PSO hakkında kısa bilgiler verilmiştir. 3. bölümde turbofan motorunun analiz ve optimizasyon sonuçları gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları hakkında bilgi verilmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Parametrik Analiz (Parametric Analysis)

MATLAB programı kullanılarak karışık akımlı ve ardyanmalı turbofan motorunun parametrik analizi yapıldı. Analiz için kavramsal bir turbofan motor kullanıldı. Turbofan motor analizinde optimize edilecek parametreler itki özgül yakıt tüketimi, özgül itki ve toplam verimdir. Çalışmada kavramsal analizi yapılan turbofan motor tipinin α değeri 0,2-1 aralığında ve yine π_c değeri 2-4 aralığında değişmektedir [15-16]. Analizlerin tutarlı çıkabilmesi için α ve π_c belirtilen değerlere yakın seçilmesi önemlidir. Bu nedenle bypass oranı ve fan sıkıştırma oranının sırasıyla $0,4 \leq \alpha \leq 1,3$ ve $1,2 \leq \pi_c \leq 2,1$ olduğu değer aralığı için performans parametreleri incelenmiştir. Şekil 2'de karışık akımlı ve ardyanmalı turbofan motorunun istasyon numaraları

gösterilmiştir. Tablo 1’de bu istasyon numaralarının açıklamaları gösterilmiştir. Bu çalışmada, motor istenen hız değerine göre arduyanmalı ve arduyanmasız olarak kullanılabilir. Bu nedenle motor arduyanmalı ve arduyanmasız durum için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analiz için kullanılan denklemler için Mattingly’den yararlanılmıştır [15-16]. Çalışmanın akış şeması Şekil 1’de gösterilmiştir.

Toplam verim, özgül itki ve itki özgül yakıt tüketiminin açıklanmasında kullanılan parametrelerden η_p motorun tepki verimini, η_{TH} motorun ısı verimini, β besleme havası oranını, α bypass oranını, f_0 toplam yakıt hava oranını, V hızı, P basıncı, T sıcaklığı, M mach sayısını, γ_c yanma odası girişi özgül ısılar oranını, C_{TO} aksesuar şaft güç katsayısını, h statik entalpiyi ve h_{PR} yakıtın ısı değerini ifade etmektedir. AB alt indisi arduyanmayı, 0 ve 9 alt indisleri ise Şekil 1’de gösterilen istasyon numaralarını ifade etmektedir.

Arduyanmalı ve arduyanmasız durum için özgül itki, toplam verim ve itki özgül yakıt tüketimi aşağıda açıklanmıştır. Arduyanmasız durum için aşağıdaki formüllerde 9 alt indisinin ifade ettiği 9 istasyonundaki parametrelerin değeri yerine 6A istasyonundaki değerler kullanılmıştır. Yine M_0 değeri arduyanmalı durum için 1,6 alınmışken arduyanmasız durum için 0,9 alınmıştır. Uçağa takılı olmayan yani motor beşiğinden bağımsız motor için özgül itki değeri hesaplanmıştır. Özgül itkinin formülü aşağıda gösterilmiştir [15, 16](Eş. 1).

$$\frac{F}{m_0} = \frac{V_0}{g_c} \left[\left(\left(I + f_0 - \left(\frac{\beta}{I + \alpha} \right) \right) \left(\frac{V_9}{V_0} \right) - I \right) + \left(I + f_0 - \left(\frac{\beta}{I + \alpha} \right) \right) \frac{R_{AB}}{R_c} \frac{V_0}{V_9} \frac{T_9}{T_0} \left(I - \frac{P_0}{P_9} \right) \right] \quad (1)$$

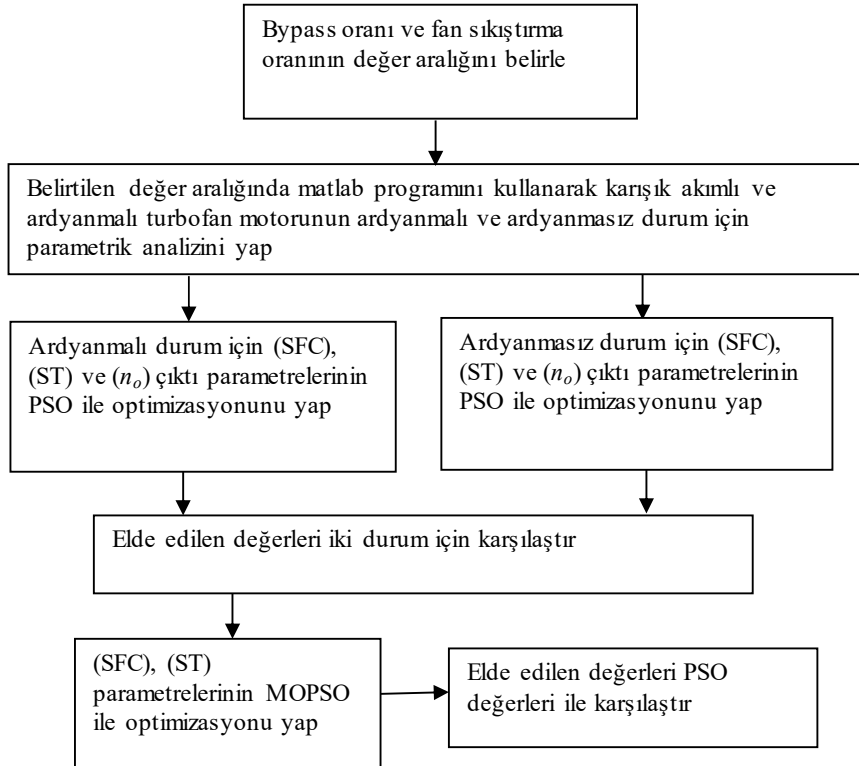
Toplam verimin formülü aşağıda gösterilmiştir [15, 16] (Eş. 2).

$$\eta_0 = \eta_p \eta_{TH} \quad (2)$$

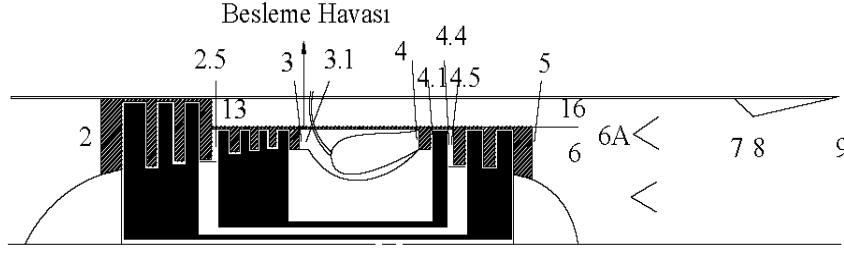
Motorun tepki verimi η_p , motorun ısı verimi η_{TH} aşağıda gösterilmiştir [15, 16](Eş. 3, Eş. 4).

$$\eta_p = \frac{2 \frac{F}{m_0} \frac{g_c}{V_0}}{\left(\left(I + f_0 - \left(\frac{\beta}{I + \alpha} \right) \right) \left(\frac{V_9}{V_0} \right)^2 - I \right)} \quad (3)$$

$$\eta_{TH} = \frac{\frac{V_0^2}{2g_c} \left[\left(I + f_0 - \left(\frac{\beta}{I + \alpha} \right) \right) \left(\frac{V_9}{V_0} \right)^2 - I \right] + C_{TO} h_0}{f_0 h_{PR}} \quad (4)$$



Şekil 1. Çalışmanın akış şeması (Flowchart of the study)



Şekil 2. Karışık akımlı ve ardyanmalı turbofan motorun istasyon numaraları [16] (Reference stations- mixed-flow turbofan engine)

İtki özgül yakıt tüketimi aşağıda gösterilmiştir [15, 16] (Eş. 5).

$$S = 10^6 \frac{f_0}{\left(\frac{F}{m_0}\right)} \quad (5)$$

Tablo 1. Karışık akımlı ve ardyanmalı turbofan motorun istasyon numaralarının açıklaması [16]
(Explain of mixed-flow turbofan engine stations)

İstasyon	Konum
0	Uzak akış veya serbest akış
1	Giriş veya difüzör girişi
2	Giriş veya difüzör çıkışı, fan girişi
13	Fan çıkışı
2.5	Düşük basınçlı kompresör çıkışı Yüksek basınçlı kompresör girişi
3	Yüksek basınçlı kompresör çıkışı
3.1	Yakıcı girişi Yakıcı çıkışı
4	Püskürtme kanatçıkları girişi Modellenmiş soğutucu karıştırıcı 1 girişi π_{TH} tanımı için yüksek basınçlı türbin girişi
4.1	Püskürtme kanatçıkları çıkışı Soğutucu karıştırıcı 1 çıkışı τ_{TH} tanımı için yüksek basınçlı türbin girişi
4.4	Yüksek basınçlı türbin çıkışı Modellenmiş soğutucu karıştırıcı girişi
4.5	Soğutucu karıştırıcı 2 çıkışı Düşük basınçlı türbin girişi
5	Düşük basınçlı türbin çıkışı
6	Sıcak bölge akışı karıştırıcı girişi
16	Fan bypass akışı karıştırıcı girişi
6A	Karıştırıcı çıkışı Ardyanma girişi
7	Ardyanma çıkışı Egzoz lülesi girişi
8	Egzoz lülesi boğazı
9	Egzoz lülesi çıkışı

2.2. Optimizasyon (Optimization)

Performans hesaplaması yapıldıktan sonra optimum değerleri elde etmek için performans parametrelerine PSO uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan PSO çok basit yapıda olması ve hızlı yakınsaması nedeniyle diğer

populasyon temelli yöntemlere göre öne çıkmaktadır. PSO sürü içindeki parçacıklarının hızının ve buna bağlı olarak parçacıklarının konumlarının sürekli güncellenmesiyle optimum sonuca ulaşır. Optimize edilecek fonksiyon için, sürü içindeki her bir parçacığa gelişigüzel bir başlangıç pozisyon ve sürati verilir. Hız ve konum formülleri aşağıda gösterilmiştir [8] (Eş. 6, Eş. 7).

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (6)$$

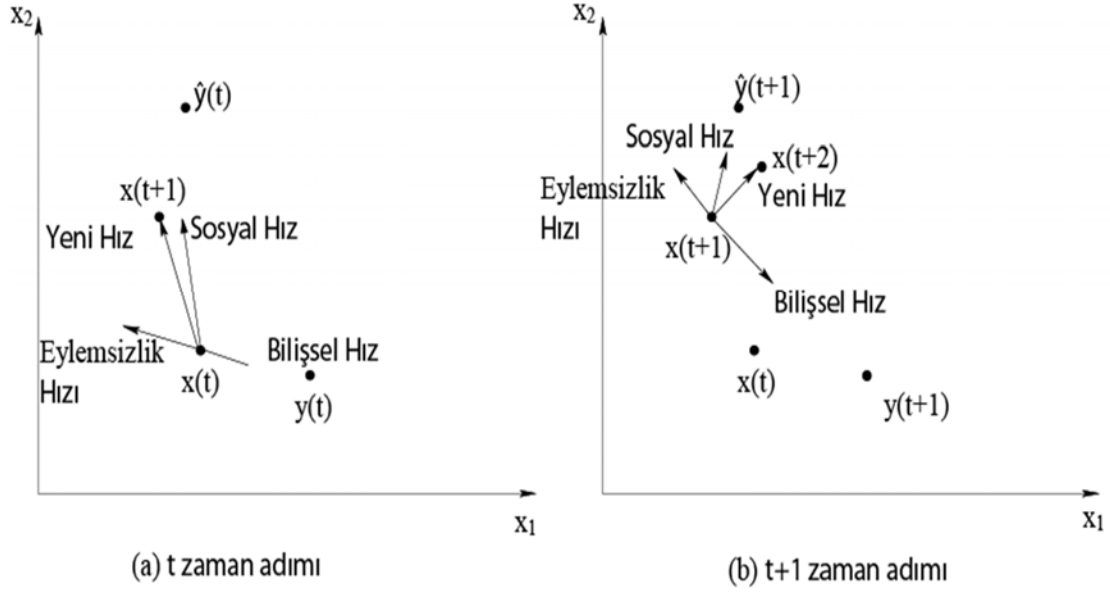
$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_{1j}(t)(y_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2r_{2j}(t)(\hat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)) \quad (7)$$

Burada $x_i(t)$ i. parçacığın t zaman adımındaki konumunu, $v_i(t+1)$ i. parçacığın t+1 zaman adımındaki hızını göstermektedir. Eş. 6'da gösterildiği gibi parçacığın sonraki konumu bir önceki konumuna hızın eklenmesiyle bulunmaktadır. 1'den n'e kadar olan boyut j alt indisi ile gösterilmiştir. Eş. 7'de $v_{ij}(t+1)$ j boyutunda i. parçacığın t+1 zaman adımındaki hızını göstermektedir. Burada w eylemsizlik ağırlığı olarak tanımlanır ve önceki hızın katkısını ayarlamak suretiyle çözüm kalitesini artırır. c_1 ve c_2 bilişsel ve sosyal bileşenlerin katkısını ölçmek amacıyla kullanılan ivmelenme sabitleridir. r_1, r_2 0 ile 1 aralığında bulunan rastgele sayılardır. $c_1r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)]$ terimi hız ifadesinin bilişsel bileşeni olarak tanımlanır ve parçacığı kendi en iyi pozisyonuna yönlendirir. $c_2r_{2j}(t)[\hat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)]$ terimi ise sosyal bileşen olarak tanımlanır ve parçacığı komşuluğunda bulunan en iyi pozisyona yönlendirir. Parçacığın yeni konumu önceki konumuna hızın eklenmesiyle elde edilir [17-18]. Bilişsel, sosyal bileşen ve yeni hızın parçacığın hareketine etkisi Şekil 3'de gösterilmiştir. PSO'nun akış şeması Şekil 4'de gösterilmiştir.

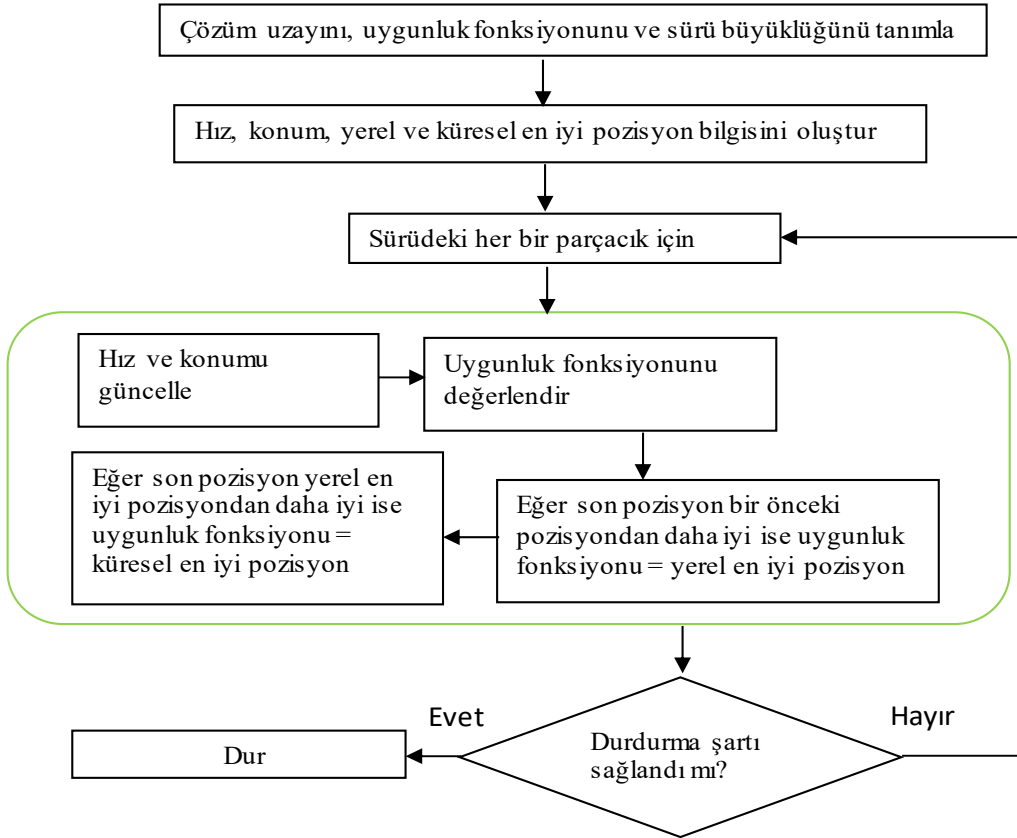
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Parametrik Analiz (Parametric Analysis)

Yapılan parametrik analizde ardyanmalı ve ardyanmasız durum için bypass oranı ve fan sıkıştırma oranının sırasıyla $0.4 \leq \alpha \leq 1.3$ ve $1.2 \leq \pi_c \leq 2.1$ olduğu değer aralığında itki özgül yakıt tüketimi, özgül itki ve toplam verime etkileri Şekil 5'den Şekil 10'a kadar olan şekillerde gösterilmiştir. 5-7 arası şekiller ardyanmalı durumu, 8-10 arası şekiller ise



Şekil 3. İki boyut, tek parçacık için hız ve pozisyon güncellemelerinin geometrik gösterimi [8]
(Geometrical illustration of velocity and position updates for a single two-dimensional particle)



Şekil 4. PSO akış şeması (Flowchart of PSO)

ardyanmasız durumu göstermektedir. X eksenini bypass oranını ve y eksenini fan sıkıştırma oranını göstermektedir. Parametrik analiz için gerekli olan girdi değerleri Tablo 2' de gösterilmiştir. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de bypass oranı

0,4 ile 1,3 arasında ve fan sıkıştırma oranı 1,2 ile 2,1 arasında 0,1 aralıklarla gösterilmiştir. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranının azalmasıyla itki özgül yakıt tüketiminin azaldığı, toplam verim ve özgül itkinin arttığı görülmektedir.

Tablo 2. Karışık akımlı ve ardyanmalı turbofan motorunun parametrik analizi girdi değerleri
(Parametric analysis input values of mixed-flow turbofan engine)

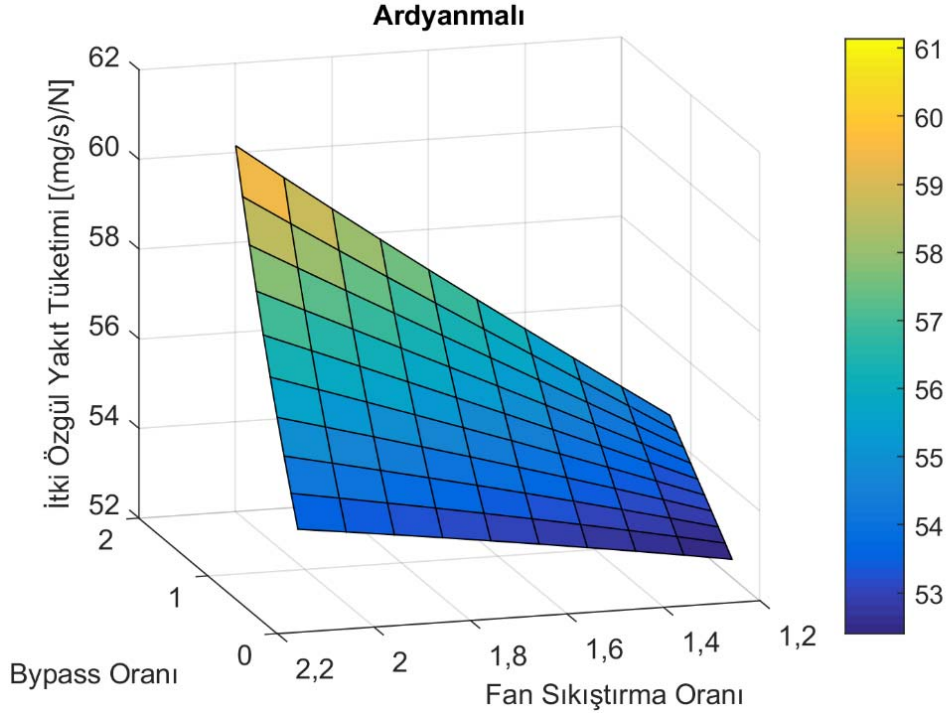
Parametreler	Semboller	Birimler	Değerler
Mach sayısı	M_0		Ardyanma açık 1,6 Ardyanma kapalı 0,9
İrtifa		m	12003
12003 metrede ortam sıcaklığı	T_0	K	216,65
12003 metrede ortam basıncı	P_0	Pa	19321,87
Besleme havası oranı	B		0,01
Aksesuar shaft güç katsayısı	C_{TO}		0,016
Kompresör sıkıştırma oranı	π_c		15
Yanma odası girişi özgül ısılar oranı	γ_c		1,4
Yanma odası girişi sabit basınçta özgül ısı	c_{pc}	kJ/(kg.K)	1,0048
Yanma odası çıkışı özgül ısılar oranı	γ_t		1,33
Yanma odası çıkışı sabit basınçta özgül ısı	c_{pt}	kJ/(kg.K)	1,16
Yakıtın ısı değeri	h_{PR}	kJ/kg	42800
Ardyanma çıkışı özgül ısılar oranı	γ_{AB}		1,3
Ardyanma çıkışı sabit basınçta özgül ısı	c_{pAB}	kJ/(kg.K)	1,2
Sürtünme kayıplı hava giriş lülesi toplam basınç oranı	π_{dmax}		0,98
Yanma odası toplam basınç oranı	π_b		0,98
Ardyanma toplam basınç oranı	π_{AB}		0,98
Soğutma havası 1	ϵ_1		0,06
Soğutma havası 2	ϵ_2		0,06
Sürtünmeli karışım odası toplam basınç oranı	π_{Mmax}		0,96
5 numaralı istasyondaki mach sayısı	M_5		0,45
Egzos lülesi toplam basınç oranı	π_n		0,98
Yüksek basınç kompresörü polytropik verimi	e_{cH}		0,89
Yüksek basınç türbini polytropik verimi	e_{tH}		0,91
Alçak basınç türbini polytropik verimi	e_{tL}		0,91
Fan polytropik verimi	e_c		0,89
Yanma odası verimi	η_b		0,99
Ardyanma verimi	η_{AB}		0,96
Alçak basınç shaftının mekanik verimi	η_{mL}		0,99
Yüksek basınç shaftının mekanik verimi	η_{mH}		0,98
Aksesuar shaftının mekanik verimi	η_{mP}		0,98
9 numaralı istasyondaki basınç	P_9	Pa	21468,74
4 numaralı istasyondaki toplam sıcaklık	T_{t4}	K	1500
7 numaralı istasyondaki toplam sıcaklık	T_{t7}	K	2000
Bypass oranı	A		$0,4 \leq \alpha \leq 1,3$
Fan sıkıştırma oranı	$\pi_{c'}$		$1,2 \leq \pi_{c'} \leq 2,1$
16 istasyonundaki mach sayısı	M_{16}		0,5553

Şekil 8 ve Şekil 9'da bypass oranı 0,4 ile 1,3 arasında ve fan sıkıştırma oranı 1,2 ile 2,1 arasında 0,1 aralıklarla gösterilmiştir. Bypass oranının fazla ve fan sıkıştırma oranının düşük olduğu değerlerde itki özgül yakıt tüketiminin azaldığı toplam verimin arttığı görülmektedir. Şekil 10'da bypass oranı 0,4 ile 1,3 arasında ve fan basınç oranı 1,2 ile 2,1 arasında 0,1 aralıklarla gösterilmiştir. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranının düşük olduğu değerlerde özgül itkinin arttığı görülmektedir.

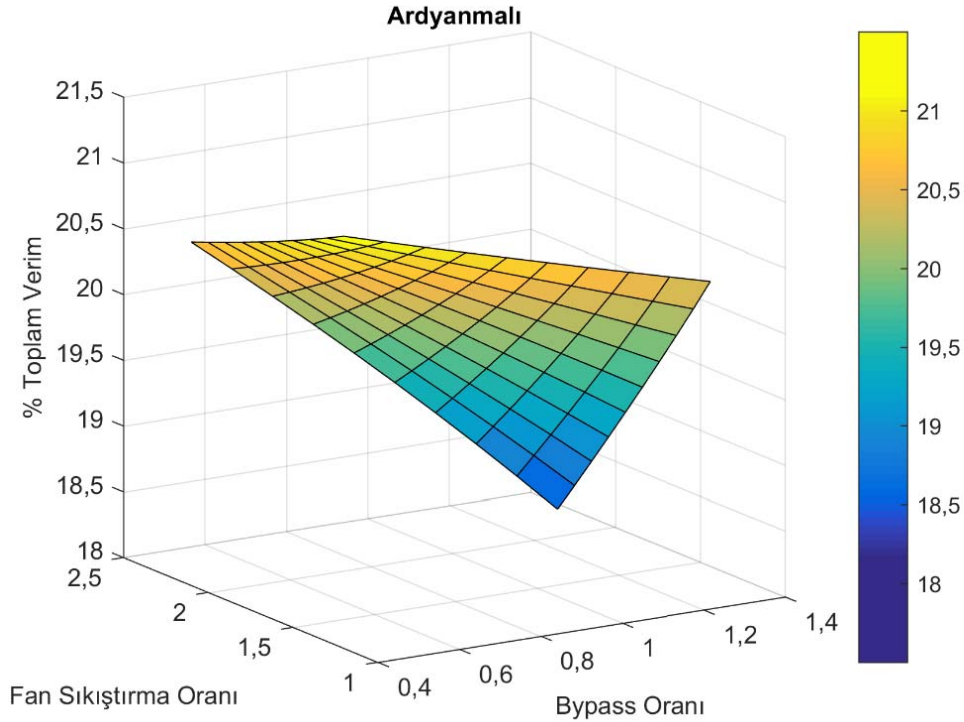
3.2. Optimizasyon (Optimization)

Uygulanan optimizasyonda her bir iterasyon sonunda değişen hız vektörünün parçacığın mevcut konumuna eklenmesiyle yeni konum bulunmaktadır. Hız ifadesinde kullanılan eylemsizlik ağırlığının doğrusal bir şekilde

azaltılması birçok uygulamada çok iyi sonuçlar vermektedir ve birçok yazar, en iyi performansları elde etmek için $w_{max} = 0,9$ ve $w_{min} = 0,4$ kombinasyonunu benimsemeyi önerir. Bu nedenle bu çalışmada eylemsizlik ağırlığı 0,9'dan 0,4'e doğrusal bir şekilde azaltılmıştır. c_1 ve c_2 bilişsel ve sosyal bileşenlerin katkısını ölçmek amacıyla kullanılan imvemenme sabitleridir. Uygulamaların çoğunda çok iyi bir sonuç verdiği için $c_1 = c_2 = 2$ olarak alınmıştır. r_1, r_2 0 ile 1 aralığında bulunan rastgele sayılardır. Bu rastgele sayılar algoritmaya stokastik bir özellik sağlamaktadır [19]. Tasarım değişkenlerimiz iki tane olup bunlar bypass oranı ve fan sıkıştırma oranıdır. Optimizasyonda sürü büyüklüğü küçüldükçe yakınsama yavaşlamakta ve optimal çözümlere daha güvenilir bir yakınsama olmaktadır. Yapılan optimizasyonda optimum sonuç düşük iterasyonlarda bulunduğundan dolayı sürü büyüklüğü 10 gibi düşük bir



Şekil 5. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranına göre itki özgül yakıt tüketimi (Thrust specific fuel consumption to bypass ratio vs. fan pressure ratio)

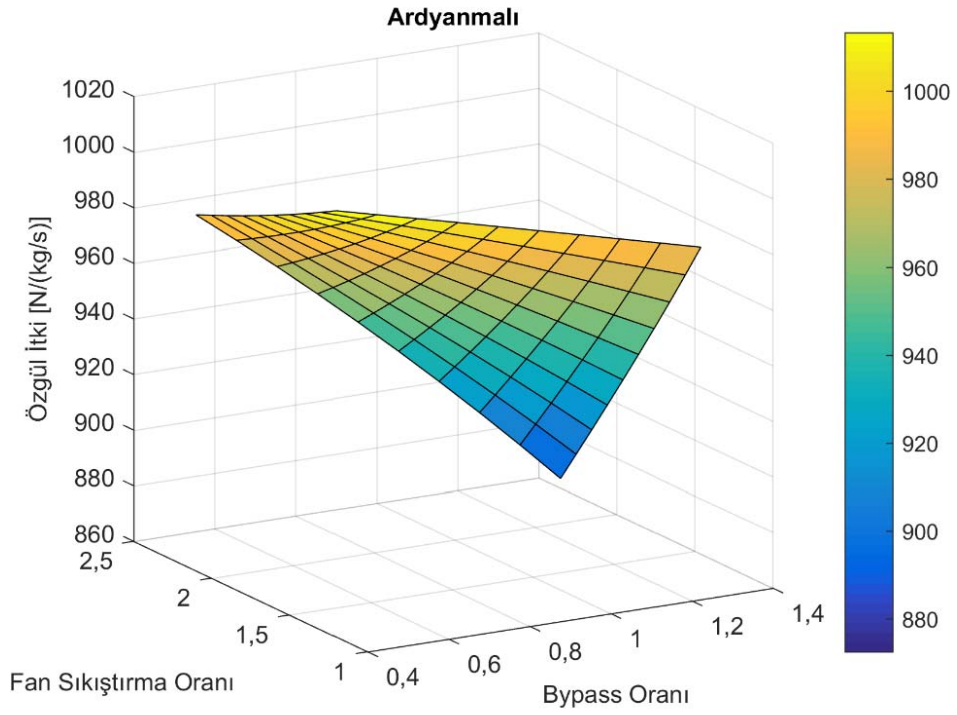


Şekil 6. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranına göre % toplam verim (Overall efficiency to bypass ratio vs. fan pressure ratio)

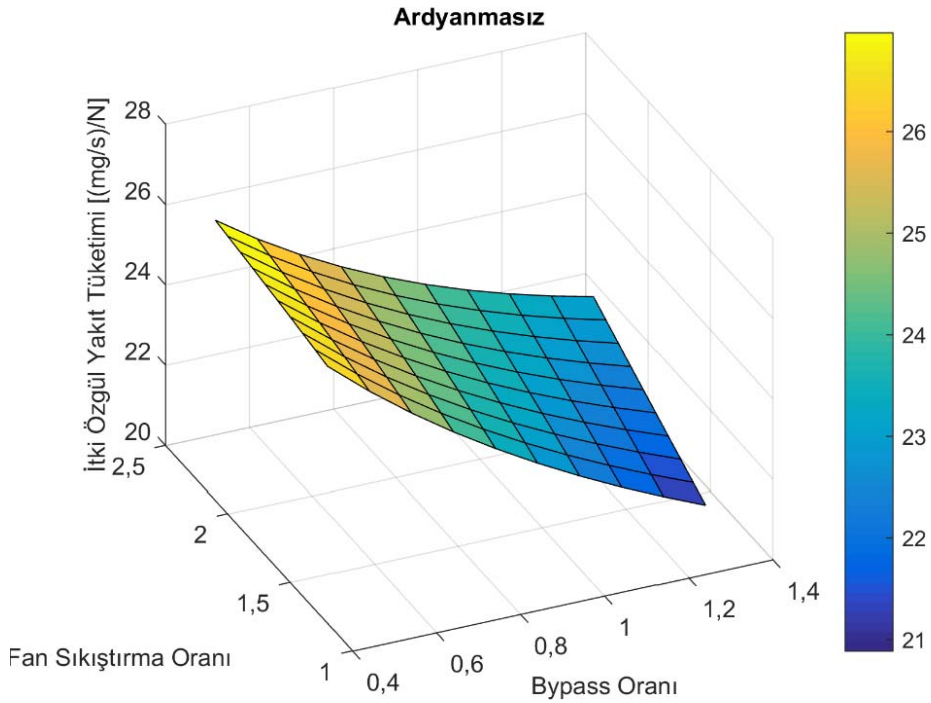
değer alınmıştır. Ve yine optimizasyonda optimum sonuç düşük iterasyonlarda bulunduğundan dolayı durma kriteri olarak önceden belirlenen 20 iterasyon sayısı göz önüne

2004

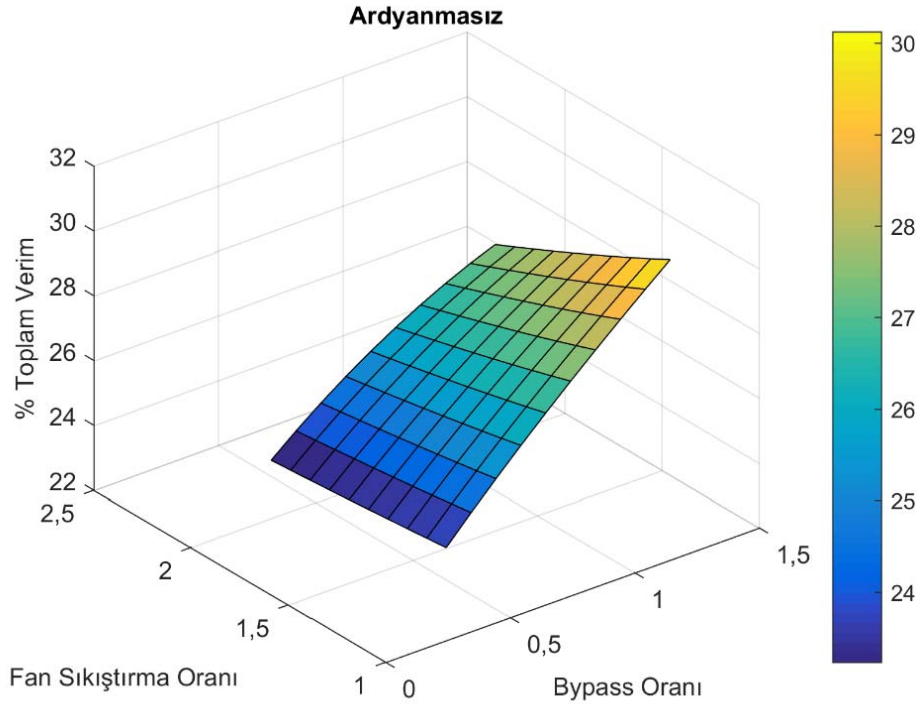
alınmıştır. MOPSO'da normal PSO'dan farklı olarak sürü büyüklüğü 50, tekralama 100 olarak uygulanmıştır ve eylemsizlik ağırlığı 0,4 olarak alınmıştır.



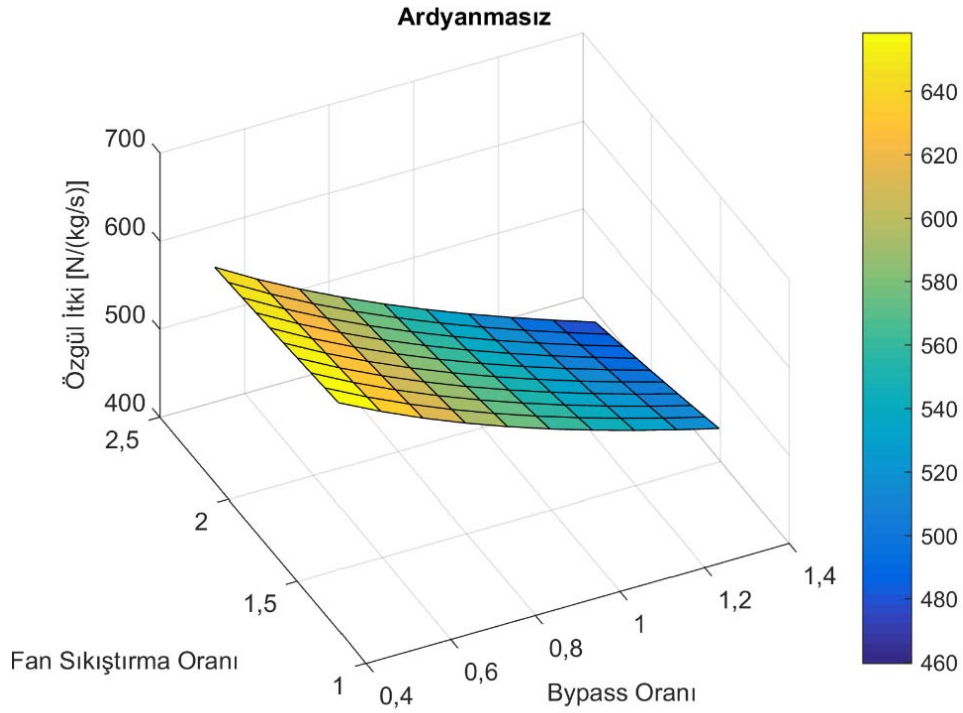
Şekil 7. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranına göre özgül itki (Specific thrust to bypass ratio vs. fan pressure ratio)



Şekil 8. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranına göre itki özgül yakıt tüketimi (Thrust specific fuel consumption to bypass ratio vs. fan pressure ratio)



Şekil 9. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranına göre % toplam verim (Overall efficiency to bypass ratio vs. fan pressure ratio)

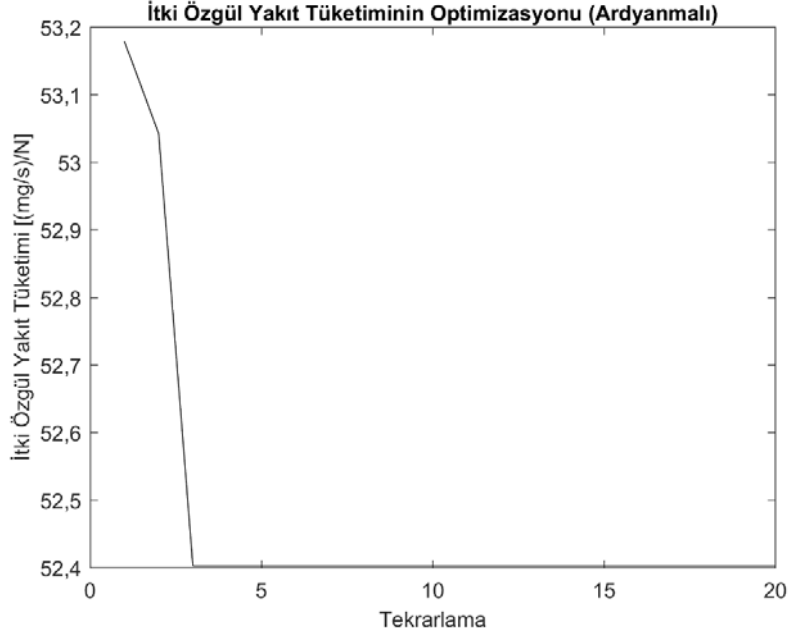


Şekil 10. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranına göre özgül itki (Specific thrust to bypass ratio vs. fan pressure ratio)

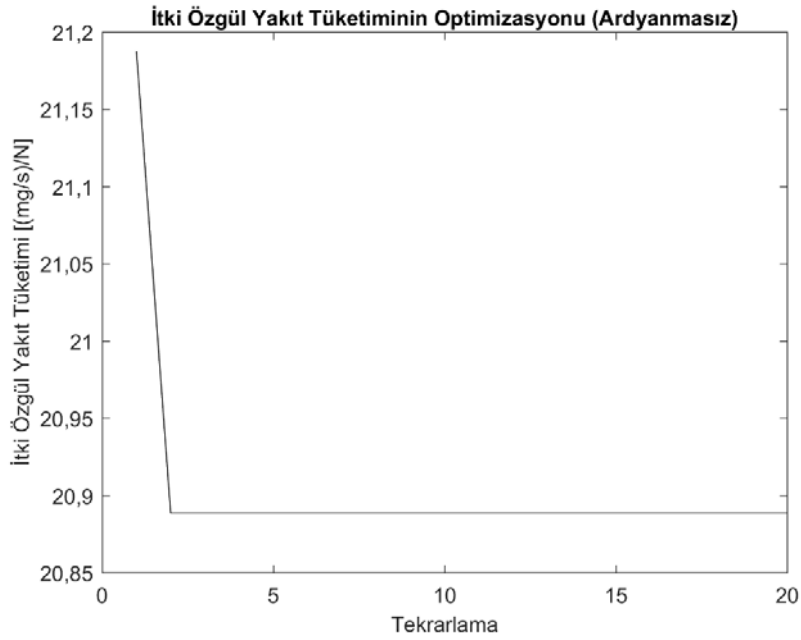
Optimizasyonda kullandığımız tasarım parametrelerinin amacı itki özgül yakıt tüketimini minimize etmektir. Şekil 11 ve Şekil 12 sırasıyla ardyanmalı ve ardyanmasız durum için itki özgül yakıt tüketiminin PSO optimizasyon sonuçlarını göstermektedir. X eksenini iterasyon sayısını ve y eksenini itki özgül yakıt tüketimini göstermektedir. Her bir durum için sürü büyüklüğü 10 olarak alınmıştır ve 20 kez iterasyon yapılmıştır. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranının sırasıyla $0,4 \leq \alpha \leq 1,3$ ve $1,2 \leq \pi_c \leq 2,1$ olduğu değer aralığında optimizasyon yapılmıştır. Ardyanmalı durum için itki özgül

yakıt tüketiminin minimum değeri 52,4025 olarak bulunmuştur. Minimum değeri sağlayan π_c ve α değerleri sırasıyla 1,2 ile 0,4'dür. Üçüncü iterasyonda optimum sonuç elde edilmiştir.

Ardyanmasız durum için itki özgül yakıt tüketiminin minimum değeri 20,8887 olarak bulunmuştur. Minimum değeri sağlayan π_c ve α değerleri sırasıyla 1,2 ile 1,3'dür. İkinci iterasyonda optimum sonuç elde edilmiştir. Optimizasyonda kullandığımız tasarım parametrelerinin



Şekil 11. İtki özgül yakıt tüketiminin optimizasyonu (Optimization of thrust sp. fuel consumption)



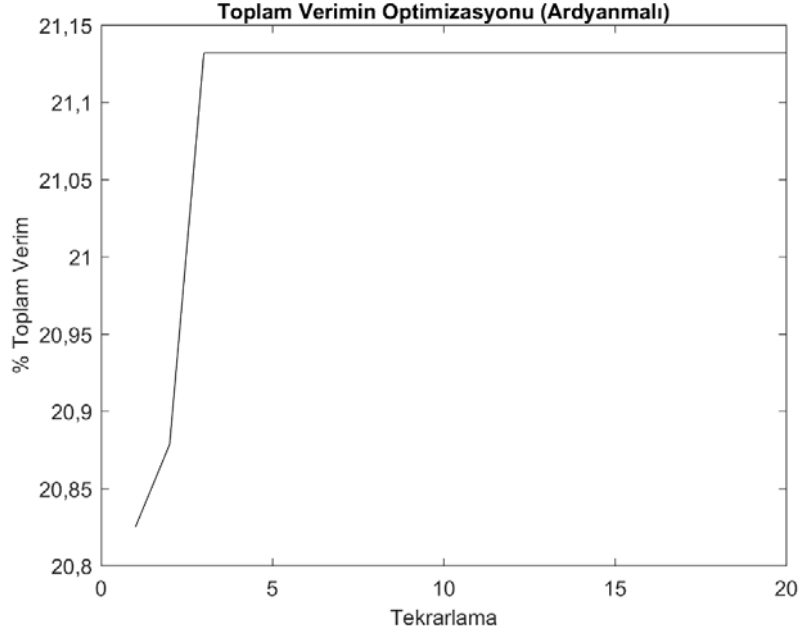
Şekil 12. İtki özgül yakıt tüketiminin optimizasyonu (Optimization of thrust sp. fuel consumption)

amacı toplam verimi maksimize etmektir. Şekil 13 ve Şekil 14 sırasıyla ardyanmalı ve ardyanmasız durum için toplam verimin PSO optimizasyon sonuçlarını göstermektedir. X eksenini iterasyon sayısını ve y eksenini toplam verimi göstermektedir. Her bir durum için sürü büyüklüğü 10 olarak alınmıştır ve 20 kez iterasyon yapılmıştır. Bypass oranı ve fan sıkıştırma oranının sırasıyla $0,4 \leq \alpha \leq 1,3$ ve $1,2 \leq \pi_c \leq 2,1$ olduğu değer aralığında optimizasyon yapılmıştır. Ardyanmalı durumda toplam verimin maksimum değeri %21,13 olarak bulunmuştur. Maksimum değeri sağlayan π_c

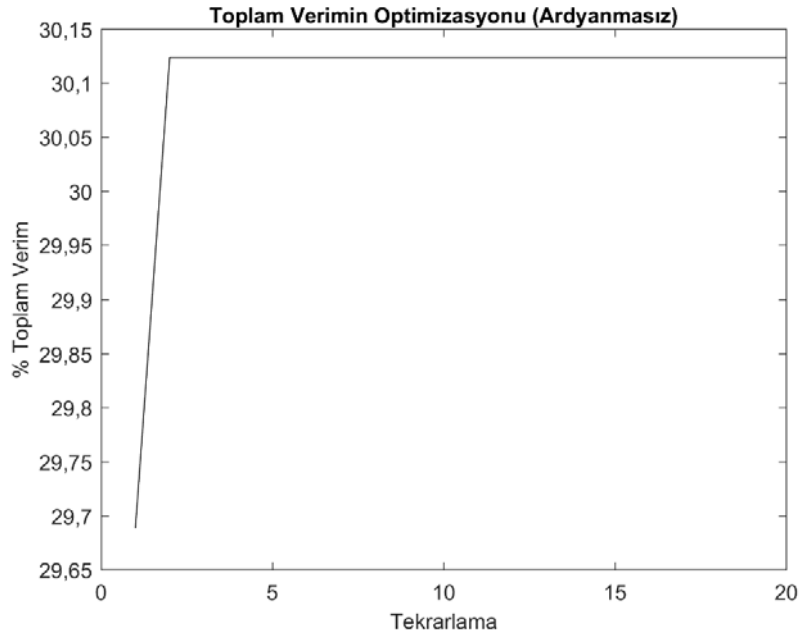
ve α değerleri sırasıyla 1,2 ile 0,4'dür. Üçüncü iterasyonda optimum sonuç elde edilmiştir.

Ardyanmasız durum için toplam verimin maksimum değeri %30,1234 olarak bulunmuştur. Maksimum değeri sağlayan π_c ve α değerleri sırasıyla 1,2 ile 1,3'dir. İkinci iterasyonda optimum sonuç elde edilmiştir.

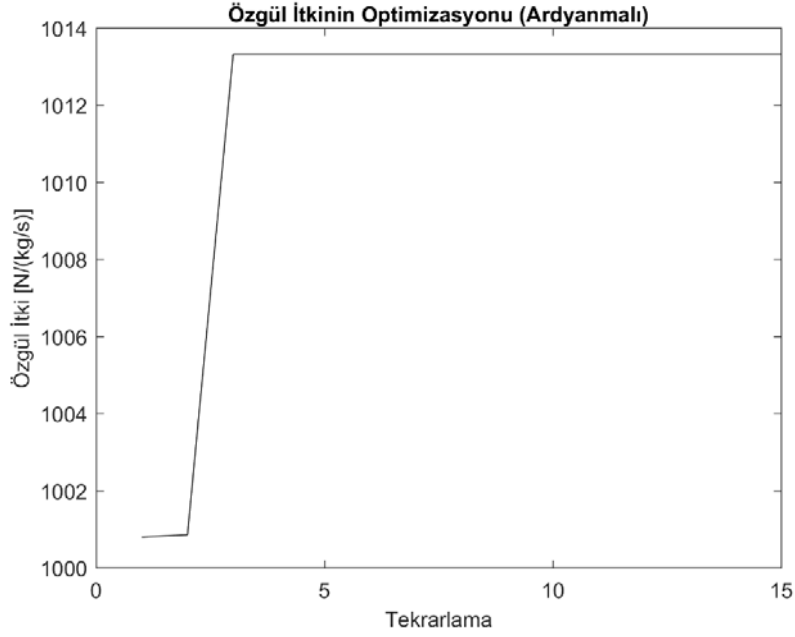
Optimizasyonda kullandığımız tasarım parametrelerinin amacı özgül itkiyi maksimize etmektir. Şekil 15 ve Şekil 16



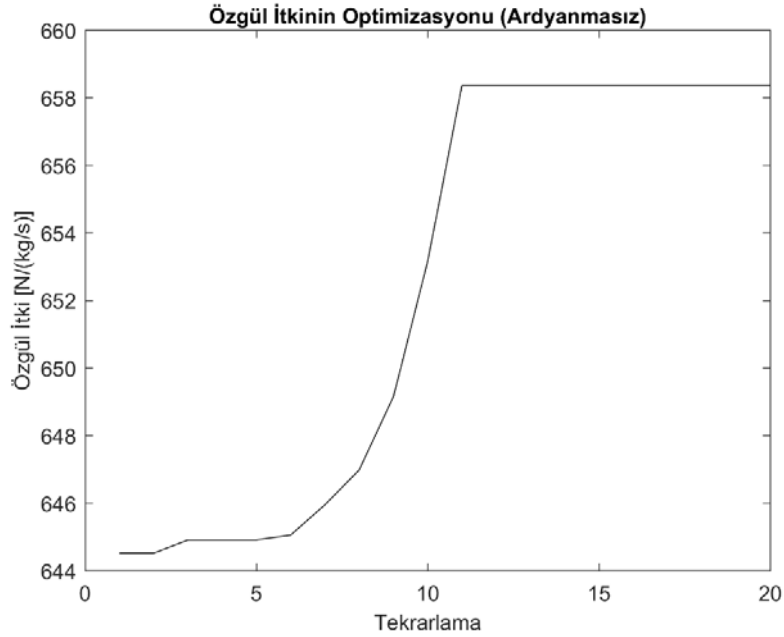
Şekil 13. Toplam verimin optimizasyonu (Optimization of overall efficiency)



Şekil 14. Toplam verimin optimizasyonu (Optimization of overall efficiency)



Şekil 15. Özgül itkinin optimizasyonu (Optimization of specific thrust)

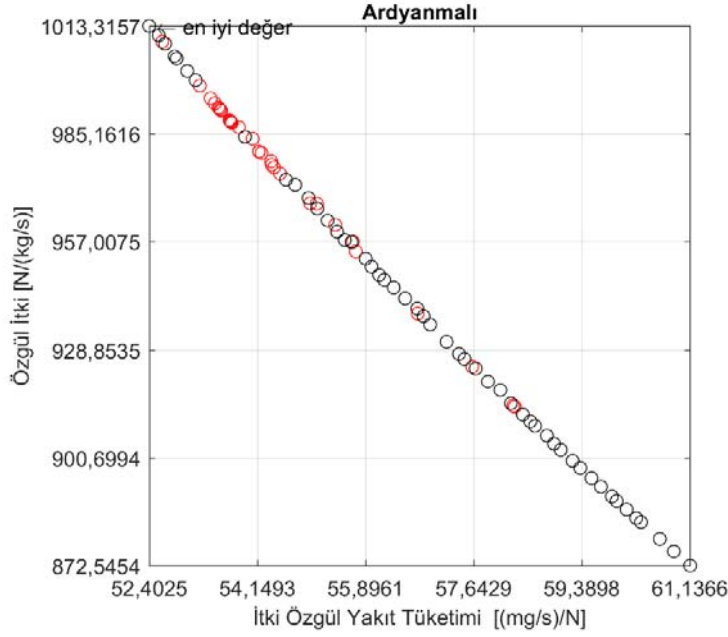


Şekil 16. Özgül itkinin optimizasyonu (Optimization of specific thrust)

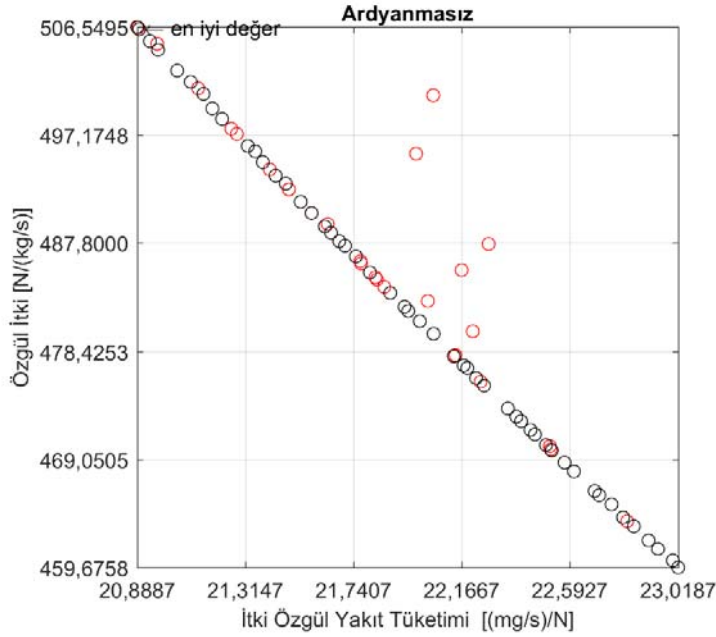
sırasıyla ardyanlı ve ardyanlımsız durum için özgül itkinin PSO optimizasyon sonuçlarını göstermektedir. X eksenini iterasyon sayısını ve y eksenini özgül itkiyi göstermektedir. Her bir durum için sürü büyüklüğü 10 olarak alınmıştır ve 20 kez iterasyon yapılmıştır. Bypass oranını ve fan sıkıştırma oranının sırasıyla $0,4 \leq \alpha \leq 1,3$ ve $1,2 \leq \pi_c \leq 2,1$ olduğu değer aralığında optimizasyon yapılmıştır. Ardyanmalı durum için özgül itkinin maksimum değeri 1013,3 olarak bulunmuştur. Maksimum değeri sağlayan π_c ve α değerleri sırasıyla 1,2 ile 0,4'dür. Üçüncü iterasyonda optimum sonuç elde edilmiştir.

Ardyanlımsız durum için özgül itkinin maksimum değeri 658,3483 olarak bulunmuştur. Maksimum değeri sağlayan π_c ve α değerleri sırasıyla 1,2 ile 0,4'dür. On ikinci iterasyonda optimum sonuç elde edilmiştir.

Şekil 17 ve Şekil 18 sırasıyla ardyanlı ve ardyanlımsız durum için özgül itki ve itki özgül yakıt tüketiminin aynı andaki optimizasyonunu göstermektedir. Optimizasyon yöntemi olarak çok amaçlı PSO (MOPSO) kullanılmıştır. X eksenini itki özgül yakıt tüketimini ve y eksenini özgül itkiyi



Şekil 17. Özgül itki ve itki özgül yakıt tüketiminin optimizasyonu
(Optimization of specific thrust and thrust specific fuel consumption)



Şekil 18. Özgül itki ve itki özgül yakıt tüketiminin optimizasyonu
(Optimization of specific thrust and thrust specific fuel consumption)

göstermektedir. Ardyanmalı durum için özgül itkinin maksimum ve özgül yakıt tüketiminin minimum değerleri sırasıyla 1013,3 ve 52,4025 olarak bulunmuştur. Optimum değeri sağlayan π_c ve α değerleri sırasıyla 1,2 ile 0,4'dür. Ardyanmasız durum için özgül itkinin maksimum ve itki özgül yakıt tüketiminin minimum değerleri sırasıyla 506,5495 ve 20,8887 olarak bulunmuştur. Optimum değeri sağlayan π_c ve α değerleri sırasıyla 1,2 ile 1,3'dür.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

c	: İvmelenme sabiti
C_{TO}	: Aksesuar şaft güç katsayısı
f_0	: Toplam yakıt hava oranı
H	: Statik entalpi
h_{PR}	: Yakıtın ısı değeri
kg	: Kilogram

mg	: Miligram
M	: Mach sayısı
N	: Newton
P	: Basınç
s	: Saniye
T	: Sıcaklık
V	: Hız
w	: Eylemsizlik ağırlığı
x	: Konum
η_p	: Motorun tepki verimi
η_{TH}	: Motorun ısı verimi
β	: Besleme havası oranı
α	: Bypass oranı
γ_c	: Yanma odası girişi özgül ısılar oranı
π_c	: Fan sıkıştırma oranı
\hat{y}	: Sürüdeki en iyi konum

4.1. Alt İndisler (Subscripts)

AB	: Ardyanma
i	: Sürüdeki parçacığın numarası
j	: boyut

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Karışık akımlı ve ardyanmalı turbofan motorunun ardyanmalı ve ardyanmasız durum için fan basınç oranı ve bypass oranının özgül itki, itki özgül yakıt tüketimi ve toplam verim gibi motor performans parametrelerine olan etkisi ve bu parametrelerin optimizasyonu incelenmiştir.

Analizler sonucunda ardyanmalı durum için fan basınç oranı ve bypass oranının en küçük değerlerinde optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Ardyanmasız durum bypass oranının fazla ve fan sıkıştırma oranının düşük olduğu değerlerde itki özgül yakıt tüketiminin azaldığı toplam verimin arttığı görülmektedir. Bypass oranının ve fan sıkıştırma oranının düşük olduğu değerlerde özgül itkinin arttığı görülmektedir. Ardyanmasız durumda ardyanmalıya kıyasla toplam verimin artmış, özgül itki ve itki özgül yakıt tüketiminin azaldığı görülmüştür.

PSO hızlı yakınsama özelliği nedeniyle optimum sonucu çok az tekrarlama sonucunda bulmuştur. PSO ve MOPSO'nun gaz türbinli motorların optimizasyonunda etkili yöntemler olduğu görülmüştür. PSO ve MOPSO' da bulunan en iyi değerlerin ardyanmalı durum için aynı olduğu görülmüştür. Ardyanmasız durumda MOPSO'da PSO'ya kıyasla özgül itki daha küçük bir değer almıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. El-Sayed A.F., Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines, CRC Press, A.B.D, February, 2008.
2. Borguet S., Kelner V., L'eonard O., Cycle Optimization of a Turbine Engine: An Approach Based on Genetic Algorithms, Researchgate, 2007.
3. Najjar Y.S.H., Balawneh I.A.I., Optimization of gas turbines for sustainable turbojet propulsion, Propulsion and Power Research, 4 (2), 114-121, 2015.
4. Silva V.V.R., Khatib W., Fleming P.J., Performance optimization of gas turbine engine, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 18 (5), 575-583, 2005.
5. Turan Ö., Orhan İ., Karakoç T.H., Yüksek bypasslı turbofan motorlarının performans analizleri ile ilgili bilgisayar yazılımı geliştirme, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1 (1), 21-40, 2012.
6. Turan, Ö., & Karakoç, T. H. Ardyanmalı ve ayrık akışlı turbofanlarda fan basınç oranı ve bypass oranıyla toplam verimin değişiminin incelenmesi. Journal of Aeronautics and Space Technologies, 4 (2), 67-76, 2009.
7. Aydemir M.E., Performance of Some Optimization Methods for Patch Antenna Problems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (3), 579-588, 2014.
8. Engelbrecht A.P., Computational Intelligence: An Introduction Second Edition, John Wiley & Sons, England, 2007.
9. Çımaroğlu S., Bulut H., New initialization approaches for the k-means and particle swarm optimization based clustering algorithms, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 413-424, 2018.
10. Haltas A., Alkan A., Karabulut M., Performance analysis of heuristic search algorithms in text classification, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (3), 417-427, 2015.
11. Çimen M.E., Boz A.F., Parameter identification of a non-minimum phase second order system with time delay using relay test and PSO, CS, FA algorithms, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (1), 461-477, 2019.
12. Montazeri-Gh M., Jafari S. & Ilkhani M. R., Application of particle swarm optimization in gas turbine engine fuel controller gain tuning, Engineering Optimization, 44 (2), 225-240, 2012.
13. Shakib S.E., Amidpour M., and Aghanajafi C., Simulation and optimization of multi effect desalination coupled to a gas turbine plant with HRSG consideration, Desalination, 285, 366-376, 2012.
14. Choi J.W., City G., Performance Analysis of an Aircraft Gas Turbine Engine using Particle Swarm Optimization, Int'l J. of Aeronautical & Space Sci., 15 (4), 434-443, 2014.
15. Mattingly J.D., Elements of Gas Turbine Propulsion, Corrigan J.J. and Bradley J.W., Tata McGraw-Hill, New York. A.B.D, 2005.
16. Mattingly J.D., Heiser W.H., Pratt D.T., Aircraft Engine Design Second Edition, Przemieniecki J.S., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Virginia, A.B.D, 2000.
17. Balta M., Ozcelik I., A proposal of SDN based VANET architecture for urban intersection management, Journal

of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1452-1468, 2019.

- 18.** Hasanoğlu M.S., Dölen M., Comparison of multi-objective and single-objective approaches in feasibility enhanced particle swarm optimization, Journal of the

Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 887-900, 2020.

- 19.** Marini F., Walczak B., Particle swarm optimization (PSO). A tutorial, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 149, 153–165, 2015.