

## JET MOTORLARININ YARI-DİNAMİK BENZETİŞİMİ ve UÇUŞ ŞARTLARINA UYGULANMASI

Bekir NARİN \*, Yalçın A. GÖĞÜŞ \*\*

\* Y.Müh., TÜBİTAK-SAGE

\*\* Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü

*Bu makalede, jet motorlarının benzetişimi için geliştirilen ve motor parça performans haritalarının belirlenmesine ihtiyaç duymayan, yarı-dinamik bir yöntem açıklanmakta ve F110-GE-100 turbofan motoru için yapılan bir örnek uygulamanın sonucu tartışılmaktadır. Benzetişim için gerekli olan motor parametrelerinden yapımcının açıklamadıklarını belirlemek amacıyla ters mühendislik (reverse engineering) uygulanmıştır.*

**Anahtar sözcükler :** Jet motoru, yarı dinamik, benzetişim, özgül ısı, hava debisi.

*In this paper, a semi-dynamic method for the simulation of jet engines, which does not necessitate determination of performance maps of engine parts, is explained and the results of a case study for F110-GE-100 turbofan engine are discussed. Reverse engineering methods has been utilized in order to determine the motor parameters necessary for simulation but not revealed by the examiner.*

**Keywords:** Jet engine, semi-dynamic, simulation, specific heat, air flux.

### GİRİŞ

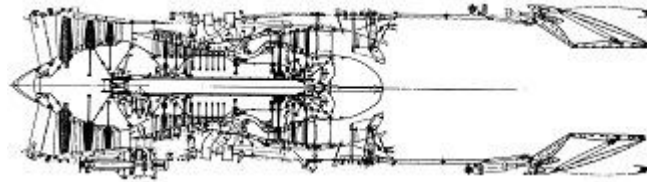
Güvenilir ve geçerli bir jet motoru benzetişimi, dinamik benzetişim, motor parçalarının dinamik davranışına bağlı performans haritalarını kullanır. Fakat, bu haritaların üreticilerden ya da literatürden temin edilmesi genellikle olanaksızdır. Ölçmelerle elde edilecek parça performans haritalarının güvenilir ve geçerli olabilmesi için çok sayıda deney sonucu ve motorla ilgili incelikli teknik bilgiye ihtiyaç vardır. Bu nedenle de pek çok teknik uygulama için parça verimlerinin yaklaşık değerlerine dayanan statik (zero-level) benzetişim uygulanır.

Bu makalede, jet motorlarının benzetişimi için geliştirilen ve motor parça performans haritalarının belirlenmesine ihtiyaç duymayan, yarı-dinamik bir yöntem açıklanmakta ve F110-GE-100 turbofan motoru için yapılan bir örnek uygulamanın sonucu tartışılmaktadır. Benzetişim için gerekli olan motor parametrelerinden yapımcının açıklamadıklarını belirlemek amacıyla ters mühendislik (reverse engineering) uygulandı: Motorun statik (zero-level) benzetişim modelinin sonuçları, bremze ölçüm sonuçları ile karşılaştırıldı ve uyum sağlanıncaya kadar benzetişim parametreleri ayarlandı. Statik benzetişim modelinden farklı olarak, özgül ısının sıcaklık ve bileşime bağımlılığı, soğutma havasının çekildiği kompresör kademesinin kompresör güç ihtiyacına ve türbin gücüne etkisi ve yanma odasındaki basınç düşüşünün hava debisine göre değişimi dikkate

alındı. Bu çalışmada sunulan yarı-dinamik benzetişim modeli şöyle tanımlanabilir: Çalışma şartlarının tasarım şartlarından göreceli uzaklığıyla orantılı olarak, motor parçalarının verimleri azalır. Bu benzetişim modeli, bremze ölçüm sonuçları yardımıyla sınılandı. Benzetişim sonuçlarının bremze sonuçlarıyla karşılaştırılmasına dayanarak ilişkiler oluştururken, çevre havasının sıcaklığı ve basıncı ve Motor Güç Kolu Açısı (MGKA) bağımsız değişkenler ve motora giren hava debisi, fan ve kompresör verimleri bağımlı değişkenler olarak kabul edildi. Bu ifadeler kullanılarak, motorun uçuş koşullarındaki benzetişimi gerçekleştirildi.

Çalışmanın uygulandığı F110-GE-100 motoru General Electric Inc. tarafından geliştirilmiştir ve TUSAŞ Motor A.Ş. Eskişehir tarafından üretilmektedir. Şekil 1.'de, bu motorun kesiti görülmektedir.

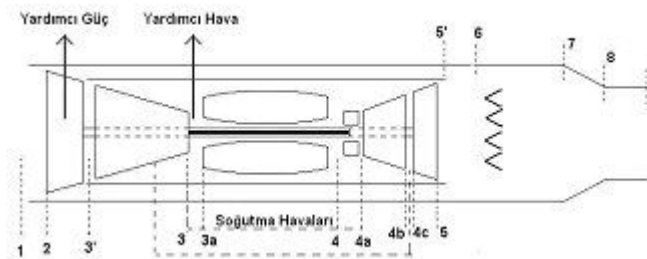
Yarı-dinamik benzetişim modeli, birinci yazarın yüksek lisans çalışması çerçevesinde [1] geliştirilmiştir.



Şekil 1. F110-GE-100 Turbofan Motoru

## YARI-DİNAMİK BENZETİŞİM MODELİ

Bir gaz türbini ya da jet motorunun parçalarının verimlerini sabit değerlerle ifade ederek uygulanan benzetişim yöntemine, statik (zero-level) benzetişim adı verilir. Bu çalışmada sunulan yarı-dinamik model, tasarım şartlarından uzaklaştıkça motor parça verimlerinin değişimini göz önüne alır. Yarı-dinamik benzetişim için, motorun tam bir termodinamik modeline ihtiyaç vardır [2],[6]. F110-GE-100 turbofan motorunun benzetişimi için oluşturulan termodinamik model aslında genel bir model olup, motora özel değerlerin değiştirilmesi halinde, başka turbofan motoru tipleri için de kullanılabilir. Tipik bir turbofan motorunun şematik gösterimi Şekil 2'deki gibidir.



Şekil 2. Turbofan Motoru Şematik Gösterimi ve Yer Numaraları [2]

Oluşturulan yarı-dinamik benzetişim modelinin dayandığı varsayımlar ve genellikle kullanılan motor parametreleri [3] şunlardır (Özellikle başka olduğu belirtilmediği sürece sıcaklığın ve basıncın dingin (stagnation) değerleri kullanılacaktır.):

- Fandaki, kompresördeki ve alçak ve yüksek basınç türbinlerindeki akış adyabatik ve sürtünmelidir (politropik).
- Adyabatik fakat sürtünmeli akış gereği difüzördeki basınç düşüşü, Mach sayısına ( $M_0$ ) bağlı olarak değişir [2], [3]:

$$\pi_{t_d} = \pi_{t_{dmax}} \cdot \eta_{t_k}$$

Bu denklemde, maksimum basınç oranı [3]:

$$\pi_{t_{dmax}} = 0.97$$

Sesaltı uçuşta,  $\eta_{t_k} = 1.0$  sesüstü uçuşta ise:

$$\eta_{t_k} = 1 - 0.075 \cdot (M_0 - 1)^{1.35}$$

Lüle basınç oranı [1]:  $\pi_{t_1} = 0.98$

Yanma verimi [1]:  $\eta_{t_f} = 0.99$

Yüksek ve alçak basınç millerinin mekanik verimleri:

$$\eta_{mH} = 0.98, \eta_{mA} = 0.99$$

Bu çalışmadaki benzetişim modeli, temel olarak [3], [4] ve [5]'deki modellerle aynı yaklaşımı içerir, fakat şu geliştirmelerle onlardan ayrılır [1], [2]:

Nemin havanın bileşimine etkisi, eğer belirtilmemişse  $\phi = 0.5$  ile, göz önüne alınmıştır. Mutlak nem oranı:

$$\omega = \frac{0.622 \cdot \phi \cdot P_d}{P - P_d} \quad (1)$$

Bu eşitlikteki doyma basıncı değeri ( $P_d$ ) Clasius-Clapeyron Eşitliği'nden çevrenin statik sıcaklığı  $T$  için hesaplanır.

$$\ln\left(\frac{P_d}{P_{ref}}\right) = C \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \quad (2)$$

Hava ve yanma ürünleri bileşenlerinin ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) mol oranı giren havanın nem oranı göz önünde tutularak hesaplanır [2]. "C" katsayısı, buhar tablosuyla hesaplanır.

- Baypas havasının ikincil akım kanalındaki basınç kaybı:  $\pi_{t_b} = 0.99$
- Yanma odasındaki basınç düşüşünün debiye bağlı olarak değişimi:

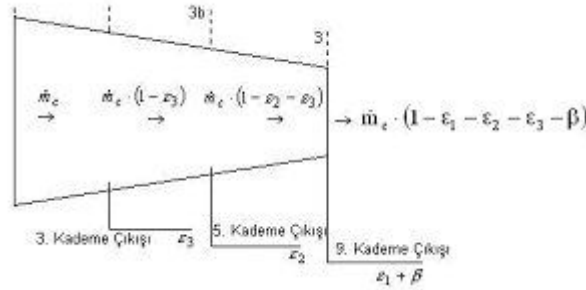
$$\frac{\Delta P}{P_i} = 1 - \pi_{t_b} = \alpha_{PLF} \cdot \frac{R}{2} \cdot \left(\frac{\dot{m} \sqrt{T}}{A \cdot P}\right)_{33}^2 \quad (3)$$

Burada  $\alpha_{PLF}$  basınç kaybı faktörüdür:

$$\alpha_{PLF} = K_1 + K_2 \cdot \left( \frac{T_4}{T_{3a}} - 1 \right) \quad (4)$$

Eşitlik (5)'deki  $K_1$  ve  $K_2$  değerleri 16 ve 1.5 olarak alınmıştır. Bu değerler benzer yanma odalarının test ünitesinde sıcak ve soğuk çalıştırmaları sonucu elde edilmiştir [2].

- Genel olarak jet motoru benzetişimleri, soğutma havasının çekildiği kompresör kademesinin kompresör güç ihtiyacına etkisini göz önüne almaz. Bu çalışmada bu etki dahil edilmiştir ve kütle oranları F110-GE-100 turbofan motoru kompresöründeki soğutma havası çekilme kademeleri, Şekil 3.'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Soğutma Havası Akımları ve Kademeleri [2]

Buradan hareketle, kompresör güç ihtiyacı:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{m}_c (h_{3a} - h_{3c}) + \dot{m}_c (1 - e_3)(h_{3b} - h_{3a}) \\ &\quad + \dot{m}_c (1 - e_3 - e_2)(h_3 - h_{3b}) = \eta_{\text{komp}} \dot{W} \end{aligned} \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir [2].  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$  kütle oranları benzer motorlarla aynı kabul edilmiş ve Tablo 1'de verilen değerler kullanılmıştır [3]. Literatürde, iki soğutma havası kütle oranı ( $e_1$ ,  $e_2$ ) tanımlanmış olmasına rağmen, bu çalışmada F110-GE-100 motoru kompresörünün üçüncü kademesinden alınan ve türbin palelerinin kök (hub) bölgesini soğutan üçüncü bir soğutma havası kütle oranı da hesaplara dahil edilmiştir [1]. Kök kısmındaki soğutma ihtiyacınının az olması nedeniyle,  $e_3 = 0.1$  olması gerektiği düşünülmüştür.

- Entalpi ve entropi hesapları, özgül ısının sıcaklık ve bileşimle değişimini göz önüne alır. Özgül ısı, sıcaklığın üçüncü dereceden fonksiyonu olarak ifade edilir [7].

$$c_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad (6)$$

Entalpi ve entropinin tanımından:

$$h = \int_{T_{ref}}^T c_p \, dT \quad (7)$$

$$s_0 = \int_{T_c}^T \frac{c_p}{T} \cdot dT \quad (8)$$

*Tablo 1. Soğutma Havaşı Kütle Oranları*

$\varepsilon_1$	0.05
$\varepsilon_2$	0.05
$\varepsilon_3$	0.01

Motor kesitlerinde önce entalpi ve entropi değerleri bulunur, sonra bunlar yardımıyla ve deneme yanılma yoluyla sıcaklıklar hesaplanır.

## BİLİNMEYEN PARAMETRELERİN TAHMİNİ ve AYARLANMASI

Bir turbojet motorunun benzetişiminde, türbin giriş sıcaklığı ( $T_4$ ) olarak tanımladığımız büyüklük, çok önemli bir parametredir. Bununla birlikte, kompresör ve türbinin politropik verim büyüklükleri de ( $e_k$ ,  $e_t$ ), çözüm algoritmasındaki önemli değişkenlerdir ve motorun yarı-dinamik benzetişim yöntemiyle performansının belirlenebilmesi için, algoritmaya "girdi" olarak verilmelidir. Turbofan motorlarında alçak ve yüksek basınç mili olarak tanımlanan iki mekanik iletim şaftı bulunmaktadır. Bu nedenle kompresör ve türbin kısımları, alçak ve yüksek basınç kompresör ve türbinleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu makalede alçak basınç kompresörü fan olarak, yüksek basınç kompresörü ise sadece kompresör olarak adlandırıldı. Buradan hareketle, yukarıda turbojet motorlarında tanımlanan politropik verim değerleri, bu kompresör ve türbin kısımları için ayrı ayrı ifade edilir: Fan için  $e_f$ , kompresör için  $e_k$ , alçak ve yüksek basınç türbinleri için  $e_{ta}$  ve  $e_{ty}$ .

Bir turbofan motorunun benzetişimi için, yukarıda verilen parametrelere ek olarak, bay-pas akımı (5') ve ana akımın (5) karıştığı motor bölümü olan "karıştırıcı" bölgesindeki alan oranı ( $A_r = A_{5'} / A_5$ ) diğer önemli değişkendir. Alan oranı baypas oranını belirler.

*Tablo 2. Referans Politropik Verim Değerleri, [3]*

$e_R$	
$e_f$	0.89
$e_k$	0.90
$e_{ty}$	0.89
$e_{ta}$	0.91

*Tablo 3. MGKA = 87° deki Bir Ölçümün Şartları ve Sonuçları*

$T_0$ (°C)	19
$P_0$ (psi)	13.425
$F$ (lb)	15016.6
$T_{56}$ (K)	690.6

*Tablo 4. Tablo 3'deki Ölçüme İlişkin Benzetişim Denemelerinin Sonuçları*

$A_r$	0.29	0.28	<b>0.27</b>
$e$	$e_R$	$e_R$	<b><math>e_R</math></b>
$T_4$ (K)	1522.3	1517.1	<b>1508.9</b>
$F$ (lb)	15017.21	15015.64	<b>15016.17</b>
$T_{56}$ (K)	688.46	689.59	<b>690.87</b>

Termodinamik benzetişim için gerekli olan birtakım performans değerleri, örneğin fan ve kompresörün sıkıştırma (basınç) oranı ( ) ve motora giren hava debisi ( ), bu çalışmada model olarak kullanılan F110-GE-100 turbofan motorunun bremze ölçüm sonuçlarında yer almaktadır. Fakat yukarıda belirtilen performans parametreleri ( $T_4$ ,  $e_f$ ,  $e_k$ ,  $e_{ta}$ ,  $e_{ty}$ ,  $A_r$ ), bahsedilen ölçüm sonuçları içinde yer almamaktadır. Bu bremze ölçümlerinde bağımsız değişkenler: Motor giriş sıcaklığı ve basıncı ( $T_0$ ,  $P_0$ ) ve Motor Güç Kolu Açısı'dır (MGKA). Bağımlı değişkenler ise: Egzoz gaz sıcaklığı ( $T_{56}$ ) ve Yerde Motor İtkisi'dir (Uninstalled Thrust,  $F$ ). Egzoz gaz sıcaklığı alçak basınç türbininden çıkan gazların sıcaklığı, yerde motor itkisi, motorun uçak üzerine monte edilmemiş konumdaki itki değerini ifade eder.

Bilinmeyen parametrelerin ayarlanması (tuning) işlemi, bilinmeyen performans parametrelerinin bilinen parametreleri sağlayacak şekilde deneme-yanılma tekniğiyle belirlenmesidir. Bu çalışmada sunulan modelde, F110-GE-100 motoru için, bremze ölçüm sonuçlarında yer alan egzoz gaz sıcaklığı ve yerde motor itkisi değerlerini sağlayacak şekilde, karıştırıcı alan oranı ( $A_r$ ), türbin giriş sıcaklığı ( $T_4$ ), fanın, kompresörün ve türbinlerin politropik verim değerleri ( $e_f$ ,  $e_k$ ,  $e_{ta}$ ,  $e_{ty}$ ) ayarlanır.

Ayarlama işleminin ilk aşamasında, benzer motorlar için literatürde verilen politropik verim değerleri seçilir ve benzetişim modelinin verdiği itki ve egzoz gaz sıcaklığı değerleri, bremze ölçüm sonuçları bu değerlere yaklaşacak şekilde, karıştırıcı alan oranı ( $A_r$ ) ve türbin giriş sıcaklığı ( $T_4$ ) ayarlanır. Literatürden alınan politropik verim değerlerinin büyüklükleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu verim değerleri, motorun tasarım şartlarında (on-design) geçerli olan değerlerdir. Alan oranı ve türbin giriş sıcaklığı değerlerinin ayarlanmasında, tasarım şartlarında motor güç kolu açısının  $87^\circ$  olduğu durumlardaki bremze ölçüm sonuçlarından faydalanılmıştır. F110-GE-100 motorunun teknik çizimlerinden faydalanarak, karıştırıcı bölgesindeki alan oranı tahmin edilmiş [1] ve bu alan oranına yakın değerlerde, ardışık ayarlama denemeleri yapılmıştır. Bu ardışık denemelerde kullanılan bremze ölçümünün koşulları Tablo 3'de ve  $A_r = 0.29$ ,  $0.28$  ve  $0.27$  ile yapılan ardışık denemelerin sonuçları ise Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4'de görüldüğü gibi,  $A_r = 0.27$  için yarı-dinamik benzetişim modelini kullan