

FARKLI HACİM DİNAMIĞI UYGULAMALARININ GAZ TÜRBİNLİ MOTOR DİNAMİK PERFORMANS SİMÜLASYONLARI İÇİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Emrah Güllü*
TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.,
Ankara

Gökhan Aran†
TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.,
Ankara

ÖZET

Hacim dinamiği etkisini gaz türbinli motor performans kodlarına dahil etmek için literatürde birkaç farklı teknik kullanılmıştır. Bu çalışmada bunların bazıları örnek bir tek shaftlı turbojet motor üzerinden karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar hem standart bir hızlanma/yavaşlama manevrası için hem de emniyet-kritik bir olay olan shaft kırılması için yapılmıştır. Beklenildiği gibi hacim dinamiği yüksek frekanslı shaft kırılması olayı için etkisini gösterirken düşük frekanslı standart bir hızlanma/yavaşlama manevrası için önemli bir etki göstermemiştir. Metod seçiminin elde edilen sonuçlara etkisi olmasa da, hesap zamanını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. En düşük hesap zamanına sahip metodun ise kullanılan denklem setine bağlı değiştiği tespit edilmiştir. Hacim dinamiği etkisi shaft kırılması simülasyonlarının temel çıktısı olan türbin terminal hızında, kullanılan hacmin büyüklüğüne göre, %1-4 bandında olmuştur. Ayrıca, hacim dinamiğinin kırılma sonrası kompresör çalışma çizgisini önemli ölçüde değiştirdiği ve motorun surge'e girme süresinin bundan etkilendiği görülmüştür.

GİRİŞ

Gaz türbinli motorlar geçici durumda çalışırken kompresör surge, yanma odası alev sönmesi, aşırı hızlanma ve aşırı sıcaklık artışı gibi tehlikeli durumlar ile karşılaşabilir. Bu motorların güvenli olarak çalıştığından emin olmak ve farklı koşullarda çalışırken nasıl davranacaklarını tahmin etmek için günümüzde dinamik performans modelleri sıklıkla kullanılmaktadır.

Gaz türbinli motor dinamikleri farklı frekans aralıklarında etkili olan 3 temel bileşene ayrılabilir. Bunlar shaft dinamiği (1-5 Hz), ısı dinamik (0-1 Hz) ve hacim dinamiğidir (5-50 Hz) [Alves ve Barbosa, 2003]. Hacim dinamiği etkisi yüksek frekanslı doğası sebebiyle standart hızlanma/yavaşlama manevraları için genellikle çok küçüktür. Bu yüzden, yakıt, hava tahliyesi, kılavuz kanat ve lüle alanı çizelgelerini çalışmak üzere hazırlanmış dinamik modeller bu fiziksel fenomeni ihmal etme eğilimindedirler. Ancak, surge, shaft kırılması ve ani giriş bozunumu gibi

*Asistan Şef Mühendis, E-posta: emrah.gullu@tei.com.tr

†Kıdemli Şef Mühendis, E-posta: gokhan.aran@tei.com.tr

yüksek frekanslı olayları doğru bir şekilde incelemek ve bu olaylara karşı koruyucu kontrol sistemleri tasarlamak için bu fenomeni doğru bir şekilde modellemek önemlidir.

Literatürde hacim dinamiği için kullanılan yöntemler karmaşıklık ve uygulama detayları açısından farklılık gösterse de, temelde hepsi aynı korunum denklemlerini motor gaz yolu içerisinde belirlenmiş bazı kontrol hacimlerine uygulamaktadır. Sıfır boyutlu (0-B) olarak nitelendirilen modeller momentum korunum denklemini kontrol hacmi içerisinde sabit basınç kabulü yaparak ihmal eder. Bu yaklaşımda motor içerisindeki basınç düşümleri ayrı kanal elemanları ile modellenir. Yepifanov ve Zelenskiy [2019] tarafından da belirtildiği gibi bazı 0-B modeller sadece kütle korunum denklemini kullanırken bazıları hem kütle hem de enerji korunum denklemlerini kullanmıştır. Literatürde enerji korunum denklemini ihmal eden çalışmalar neden bu kabulü yaptıklarını detaylandırmamışlardır. Bu yüzden, enerji korunum denkleminin etkisinin ihmal edilip edilemeyeceği bu çalışmada incelenen noktalardan biridir. Karmaşıklığı artırdığımızda, bir boyutlu (1-B) veya yarı 1-B çalışmalar momentum korunum denkleminin ve motor boyunca gaz yolu alan değişiminin etkilerini dahil eder. Yarı 1-B dinamik modellemeye güzel bir örnek Garrard [1996] tarafından verilmiştir. ATEC adı verilen ve tüm motor gaz yolunu küçük hacimlere bölüp, bu hacimler için turbomakine kaynak terimleri içeren Euler denklemlerini çözen bir kod geliştirmiştir. 1-B modeller daha doğru sonuçlar verebilse de, 0-B modeller standart gaz türbin performans kodlarına dahil etmek için daha pratiktir. Bu yüzden performans mühendisleri tarafından daha çok 0-B modeller tercih edilmektedir.

Gaz türbinli motorların performansını tarif eden doğrusal olmayan denklemler genellikle Newton-Raphson gibi iteratif yöntemler ile çözülür. Burada amaç farklı gaz türbin bileşenleri arasındaki kütle ve güç dengelerini sağlamaktır. Literatürde bu *termodinamik eşleşme* olarak adlandırılmıştır. Bu iterasyonların nasıl kurulacağını detayları Kurzke ve Halliwell [2018] tarafından anlatılmıştır. Şaft ve hacim dinamikleri için dinamik denklemler kullanılırsa ve bu denklemler açık bir nümerik çözüm yöntemi ile çözülürse bu iterasyonlara ihtiyaç olmayabilir [Fawke ve Saravanamuttoo, 1971]. Ancak, çözüm kararlılığını artırmak için bu iterasyonların bazılarını tutmak yararlı olabilir. İterasyonların kullanılmadığı bu yöntem ise literatürde *bileşenler arası hacim metodu* veya *hızlı geçici durum modellemesi* denmektedir.

Bu çalışmada, farklı 0-B hacim dinamiği uygulamaları kararlılık ve elde edilen değerler açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar hem standart bir hızlanma/yavaşlama manevrası için hem de bir yüksek frekanslı olay olan şaft kırılması için yapılmıştır. Şaft kırılması sonrası türbinlerin yüksek terminal hızlara çıkıp hava aracı güvenliğini tehdit etmemesi için bu olayın kontrol sistemi tarafından hızlıca anlaşılması ve yakıtın kesilmesi gereklidir. Kırılmadan sonra tespit ve yakıt kesme işlemleri 50-100 ms gibi sürelerde gerçekleştiği için hacim dinamiğinin etkisinin önemli olacağı düşünülmüştür.

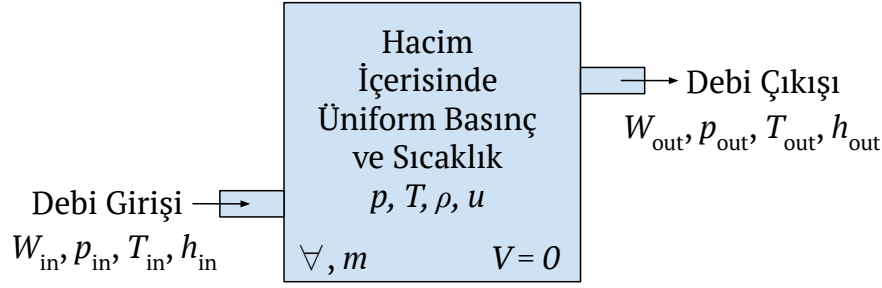
YÖNTEM

0-B Hacim Elemanı

Bu bölümde, Şekil 1 ile gösterilen bir hacim elemanı için izentropik bir genişleme/sıkıştırma işlemi düşünülerek kütle ve enerji korunum denklemleri yazılacaktır. Hacim içerisindeki hava için ideal gaz kabulü yapılmıştır. Momentum denklemleri kullanılmamış ve giriş, çıkış ve hacim basınçları eşit kabul edilmiştir ($p = p_{in} = p_{out}$). Hacim içerisindeki hava durağan olarak modellenmiştir.

Bu hacim elemanı için kütle korunum denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{V} \frac{d\rho}{dt} = W_{in} - W_{out} \quad (1)$$



Şekil 1: Hacim dinamiği hesapları için kullanılan 0-B hacim elemanı.

Burada m kütle, W debi, t zaman, \forall hacim ve ρ yoğunluktur. Altsimgeler “in” ve “out” giriş ve çıkış parametreleri için kullanılmıştır. Ses hızı tanımı kullanılarak, aşağıdaki ilişki yazılabilir:

$$c^2 = \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_s \rightarrow \frac{dp}{dt} = \frac{1}{c^2} \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

Burada c ses hızı, p basınç ve s entropidir. Ses hızı ideal gaz kabulü yapılarak $c^2 = \gamma RT$ ile hesaplanabilir. Denklem 1 ve 2 beraber kullanıldığında ise hacim dinamiği hesaplarının ana denklemi olan şu ilişki yazılabilir:

$$\frac{\forall dp}{c^2 dt} = W_{in} - W_{out} \quad (3)$$

Buna ek olarak, hacim elemanı için enerji korunum denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{dU}{dt} = W_{in}h_{in} - W_{out}h_{out} \quad (4)$$

Burada U iç enerji ve h özgül entalpidir. İç enerji, özgül iç enerji u kullanılarak $U = \rho \forall u$ şeklinde yazılabilir. Bu ilişki Denklem 4 ile beraber kullanılarak, şu ilişki yazılabilir:

$$\forall \frac{d(\rho u)}{dt} = \forall u \frac{d\rho}{dt} + \forall \rho \frac{du}{dt} = W_{in}h_{in} - W_{out}h_{out} \quad (5)$$

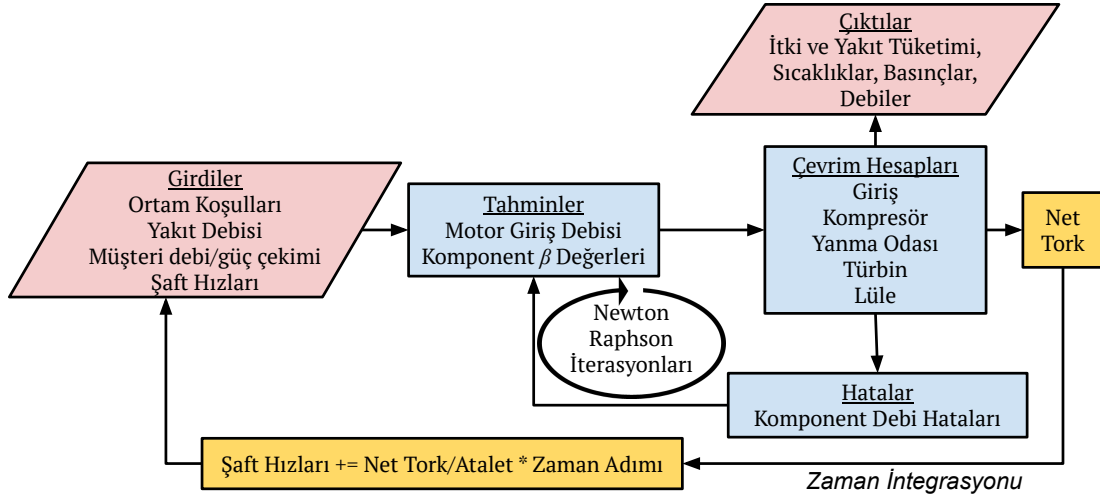
Denklem 1 kullanılarak, Denklem 5 şu şekilde tekrar yazılabilir:

$$u(\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) + \forall \rho \frac{du}{dt} = W_{in}h_{in} - W_{out}h_{out} \quad (6)$$

Son olarak, özgül iç enerjinin zaman türevi şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{du}{dt} = \frac{W_{in}h_{in} - W_{out}h_{out} - u(W_{in} - W_{out})}{\forall \rho} \quad (7)$$

Bazı çalışmalar (örneğin [Walsh and Fletcher, 2004]) giriş ve çıkış sıcaklıklarını eşit kabul ederek ($T = T_{in} = T_{out}$) Denklem 7'yi kullanmamışlar ve sadece Denklem 3 ile hacim dinamiği etkisini modellemişlerdir. Ancak, bazı çalışmalar da (örneğin [Yao, Wang ve Kong, 2013]) hacim içerisindeki sıcaklığı çıkış sıcaklığına eşit kabul etmiş ($T = T_{out} \neq T_{in}$) ve giriş sıcaklığını bir önceki



Şekil 2: Termodinamik eşleşme tabanlı geçici durum modellemesi.

bileşenin çıkışından almıştır. Bu durumda giriş sıcaklığı girdi olarak kullanılarak Denklem 7 çıkış sıcaklığını bulmak için kullanılabilir. Bu çalışmada bu iki opsiyon da değerlendirilmiştir.

Hacim Dinamiğinin Farklı Uygulama Metodları

0-B hacim dinamiği denklemleri gaz türbin performans kodlarına farklı şekillerde entegre edilebilir. Bu bölümde bu opsiyonlar üzerinde durulacaktır. Bir adi diferansiyel denklem seti olan hacim dinamiği ve şaft dinamiği denklemleri açık veya örtük bir şekilde çözülebilir. Örtük yöntemler daha kararlı sonuçlar verir, fakat çözülmesi gereken fazladan eşleşme iterasyonları getirebilir. Aşağıda hacim dinamiği denklemlerini 0-B gaz türbinli motor performans kodlarına dahil etmenin 3 farklı yöntemi sunulmuştur.

Metod 1 - Ek İterasyon İçermeyen Termodinamik Eşleşme:

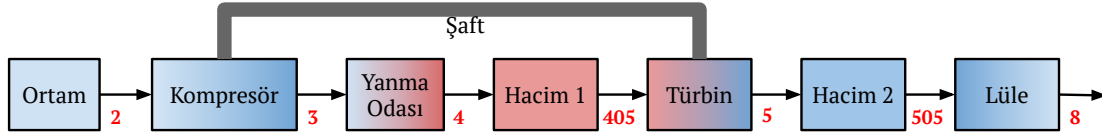
Endüstride kullanılan geçici durum modellerinin birçoğu termodinamik eşleşme tabanlıdır. Sadece şaft dinamiği içeren termodinamik eşleşme tabanlı bir geçici durum modellemesi Şekil 2 ile gösterildiği gibi yapılabilir. Hacim dinamiği bu algoritmaya güncel eşleşmeleri tutarak fakat yeni bir eşleşme iterasyonu eklemeyerek dahil edilebilir. Bu metod NPSS yazılımı tarafından kullanılmaktadır. NPSS NASA tarafından geliştirilmiş iyi bilinen bir nümerik itki sistemi simülasyon platformudur.

Bu metod hacim basıncının zamana göre türevini hacim içerisinde biriken kütleyi hesaplamak için kullanır. Bu sebeple Denklem 1 şu şekilde yazılabilir:

$$W_{out} = W_{in} - \frac{\forall p - p^{old}}{c^2} \Delta t \quad (8)$$

Burada üstsimge "old" bir önceki zaman adımındaki değer için kullanılmıştır ve Δt simülasyon zaman adımıdır. Gaz türbin bileşenleri arasına hacimler koymak ve eski hacim basıncını hafızada tutmak bu uygulama için yeterlidir. Enerji denkleminin etkisini hesaplara dahil etmek için eski hacim sıcaklığı hafızada tutularak Denklem 7 Euler integrali ile şu şekilde kullanılabilir:

$$u = u^{old} + \frac{W_{in}h_{in} - W_{out}h^{old} - u^{old}(W_{in} - W_{out})}{\forall \rho^{old}} \Delta t \quad (9)$$



Şekil 3: Bu çalışmada kullanılan tek şaftlı turbojet konfigürasyonu ve istasyonlar.

Metod 2 - Ek İterasyon İçeren Termodinamik Eşleşme:

Bu uygulama Janikovic [2010] tarafından yukarıda verilen metoda kıyasla daha kararlı olduğu ve daha büyük zaman adımlarının kullanılmasına olanak verdiği için tavsiye edilmiştir. Bu uygulamada, hacmin çıkış debisi için bir tahmin yapılır. Eski hacim basıncı hafıza tutulup bilindiği için, yeni basınç Denklem 3 aracılığı ile hesaplanabilir. Daha sonra bu basınç bir önceki bileşenin çıkış basıncı ile karşılaştırılıp Newton-Raphson iterasyonlarına yeni bir hata tanımlanabilir. Yeni basıncın hesabı için şu denklem kullanılmıştır:

$$p = p^{\text{old}} + \frac{c^2}{V} (W_{\text{in}} - W_{\text{out}}^{\text{guess}}) \Delta t \quad (10)$$

Burada üstsimge “guess” tahmin edilen değer için kullanılmıştır. Denklem 7’yi hesaplara dahil etmek için, hacim sıcaklığı tahmini yapılabilir. Daha sonra bu tahmin ve Denklem 7 hacim sıcaklığını hesaplamak ve yeni bir hata oluşturmak için şu şekilde kullanılabilir:

$$\frac{du}{dt} = \frac{W_{\text{in}}h_{\text{in}} - W_{\text{out}}h^{\text{guess}} - u^{\text{guess}}(W_{\text{in}} - W_{\text{out}})}{V\rho^{\text{guess}}} \rightarrow u = u^{\text{old}} + \frac{du}{dt} \Delta t \quad (11)$$

Metod 3 - Hızlı Geçici Durum Modellemesi:

Bu uygulama Walsh and Fletcher [2004] ve Fawke ve Saravanamuttoo [1971] tarafından detaylandırılmıştır. Tüm eşleşme iterasyonları kütle-kısıtlayan bileşenlerin (kompresör, türbin ve lüle) arasına hacimler konularak kaldırılmıştır. Örnek bir uygulama Şekil 3 ile gösterilen tek şaftlı turbojet motor konfigürasyonu için Şekil 4 ile verilmiştir. Yukarıda verilen diğer metodlara benzer bir şekilde, Denklem 3 tek başına veya Denklem 7 ile beraber kullanılabilir.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada gösterilen sonuçlar Şekil 3 ile verilen turbojet konfigürasyonu için deniz seviyesi standart gün koşullarında elde edilmiştir. Temel çevrim parametreleri, bileşen haritaları ve şaft eylemsizliği için GasTurb yazılımına ait standart turbojet modeli kullanılmıştır. GasTurb kullanıcı-dostu ticari bir gaz türbin performans yazılımıdır ve literatür verisinden elde edilen örnek bileşen haritalarını kullanan birçok örnek çevrim modeli içerir. Kullanılan modele ait çevrim parametreleri Tablo 1 ile gösterilmiştir. Bu parametrelere ek olarak şaft eylemsizliği 5 kgm² olarak alınmıştır. Şaft kırılması sırasında şaftın bu eylemsizliği ikiye bölecek şekilde kırıldığı kabul edilmiştir. Şekil 5 ile gösterilen yakıt çizelgeleri standart bir manevra ve şaft kırılması sırasındaki hacim dinamiği etkilerini göstermek için kullanılmıştır.

Hacim dinamiği uygulaması için gerekli yanma odası hacmi Walsh and Fletcher [2004] tarafından verilen yanma odası yükleme tanımı ve tasarım kriterleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu tanım şu şekildedir:

$$\text{Yükleme [kgs}^{-1}\text{m}^{-3}\text{bar}^{-1.8}] = \frac{W_3}{\text{Hacim } P_3^{1.8} 10^{0.00145(T_3[\text{K}]-400)}} \quad (12)$$

Tablo 1: Çevrim Tasarım Değerleri.

Düzeltilmiş Giriş Debisi	31.6 kg/s	İzantropik Kompresör Verimi	0.85
Basınç Oranı	12	İzantropik Türbin Verimi	0.89
Yanma Odası Çıkış Sıcaklığı	1450 K	Türbin Nozul Kılavuz Kanat Soğutması	0.05 W_2
Giriş Basınç Kaybı	0.99	Türbin Döner Kanat Soğutması	0.05 W_2
Yanma Odası Verimi	0.99	Müşteri Güç Çekimi	0 kW
Yanma Odası Basınç Kaybı	0.97	Yakıt Isıl Değeri	43.1 MJ/kg
Mekanik Şaft Verimi	1.0	Lüle Boğaz Alanı	0.0755 m ²
Türbin Çıkış Kanal Kaybı	1.0	Lüle Tahliye Katsayısı	0.96

Tablo 2: Standard manevra için farklı metodların kararlılık ve toplam hesaplama süresi açısından karşılaştırılması. $\Delta t \geq 1e-2$ zaman adımları çözüm doğruluğunu etkilediği için kullanılmamıştır.

	Sadece Denklem 3		Denklem 3 ve 7	
	Δt [s]	Toplam Zaman [s]	Δt [s]	Toplam Zaman [s]
Metod 1	1e-2	5.5	2.5e-4	260
Metod 2	1e-2	10.2	7.5e-4	164
Metod 3	5e-4	25	2.5e-4	55

Walsh and Fletcher [2004] bu yükleme değerinin tasarım noktasında $5 \text{ kgs}^{-1}\text{m}^{-3}\text{bar}^{-1.8}$ değerinden küçük olması gerektiğini ve $1 \text{ kgs}^{-1}\text{m}^{-3}\text{bar}^{-1.8}$ değerine kadar düşebileceğini belirtmiştir. Bu yanma odası hacim değerinin 0.05 ile 0.15 metre küp aralığında olacağını göstermektedir. Bu yüzden, Şekil 3 ile gösterilen konfigürasyon için Hacim 1 bileşeninin hacim değeri 0.05, 0.1 ve 0.15 metre küp olarak alınmış ve sonuçların bu değere bağlı nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Hacim 2 için hacim değeri 0.01 metre küp olarak sabit tutulmuştur.

Öncelikle, hacim dinamiğinin standard bir hızlanma/yavaşlama manevrası için sonuçları nasıl değiştirdiği gözlemlenmiştir. Farklı yanma odası hacim değerlerinin sonuçlara etkisi Şekil 6 ile gösterilmiştir. Beklenildiği gibi hacim değeri arttıkça ani yakıt değişimlerine olan tepki daha yumuşak hale gelmektedir. Ancak, standard manevra için hacim dinamiği önemli bir etki göstermemiş ve ihmal edilebilir gözükmemektedir. Enerji denkleminin dahil edilmesi de Şekil 7'de görüldüğü gibi sonuçlarda önemli bir değişiklik yapmamıştır.

Daha sonra, standard manevra üzerinde bir önceki bölümde anlatılan farklı metodlar kararlılık (kullanılabilen en büyük zaman adımı) ve gereken toplam hesap süresi açısından Tablo 2 ile karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere, Sadece Denklem 3 kullanıldığı takdirde en avantajlı metod Metod 1 iken Denklem 3 ve 7 beraber kullanıldığında en avantajlı metod Metod 3 olmuştur. Ancak Metod 3 klasik eşleşme tabanlı metodlardan farklı bir yöntem kullandığı için Metod 2'nin kullanımı pratik açıdan daha uygun olabilir. Bunun sebebi, halihazırda endüstride kullanılan kodların çoğunun eşleşme tabanlı oluşudur. Ayrıca, Metod 3 yapısı gereği kompresör haritasının surge'e yakın kısmında görülen sabit basınç oranı bölgesinde kararlı ve doğru çalışmamaktadır.

Bir sonraki aşamada, hacim dinamiğinin şaft kırılması sonrası karşılaşılabilecek terminal hızları ve kompresör çalışma çizgilerini nasıl değiştirdiği gözlemlenmiştir. Yüksek frekanslı doğası sebebiyle bu olay için hacim dinamiğinin önemli olacağı öngörülmüştür. Şaft kırılması bir kompresör ve bir türbin veya bir türbin ve yükü arasındaki mekanik bağlantının ani bir şekilde kopması ile meydana gelir. Şekil 8'de görüldüğü gibi, mekanik bağlantı kopsa da, kompresör türbini aerodinamik olarak kısa bir süre daha beslemeye devam eder. Bu kısa süre türbinlerin çok yüksek terminal hızlara erişmesi ve hava aracı güvenliğini tehdit etmesi için yeterlidir. Bu yüzden şaft kırılması olayının tespit edilmesi ve yakıtın kesilmesi gereklidir. Bu çalışmada şaft kırılmasının 50 ms'de tespit edildiği ve yakıtın kesildiği kabul edilmiştir. Şekil 9 farklı yanma odası hacim değerleri için hacim dinamiğinin terminal hızlara ve kompresör çalışma çizgisine etkisini göstermektedir. Görüldüğü gibi terminal hızlar %1-4 bandında kullanılan hacim değerine ve kullanılan denklemlere göre değişmiştir.

Tablo 3: Farklı hacim değerleri ve kullanılan denklemlere göre şaft kırılması sonrası surge'e girme süreleri.

	Hacim Değeri [m ³]		
	0.05	0.1	0.15
Hacim Dinamiği Yok	72 ms		
Sadece Denklem 3	60 ms	55 ms	51 ms
Denklem 3 ve Denklem 7	65 ms	60 ms	55 ms

Son olarak, hacim dinamiğinin şaft kırılması sonrası surge'e girme süresini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Surge türbine giden havanın kesilmesini sağladığı için şaft kırılması sonrası istenen bir olaydır. Eğer şaft kırılması sonrası tehlikeli terminal hızlara ulaşmadan kompresörün surge'e gireceği gösterilebilirse, ek bir koruma olmadan motorun kendi kendini bu olaydan koruyacağı düşünülebilir. Yakıt kesilmemesi durumunda çalışma çizgilerinin surge'e doğru gittiği ve kompresör çalışma çizgilerinin hacim dinamiğinden önemli bir ölçüde etkilendiği Şekil 9'dan görülebilir. Güncel konfigürasyon için hacim dinamiğinin surge'e girme sürelerini nasıl etkilediği Tablo 3 ile gösterilmiştir. Verilen değerlerden görüleceği üzere, surge'e girme süreleri önemli ölçüde hacim değerine ve kullanılan denklemlere göre değişmiştir. Gallar [2010] şaft kırılması sonrası 5 ms'lik bir gecikmenin türbin terminal hızlarını %2.5 civarında değiştirebileceğini belirtmiştir. Bu yüzden Tablo 3 ile gösterilen değerler arasındaki 10-20 ms seviyesindeki farklar çok önemlidir.

SONUÇ

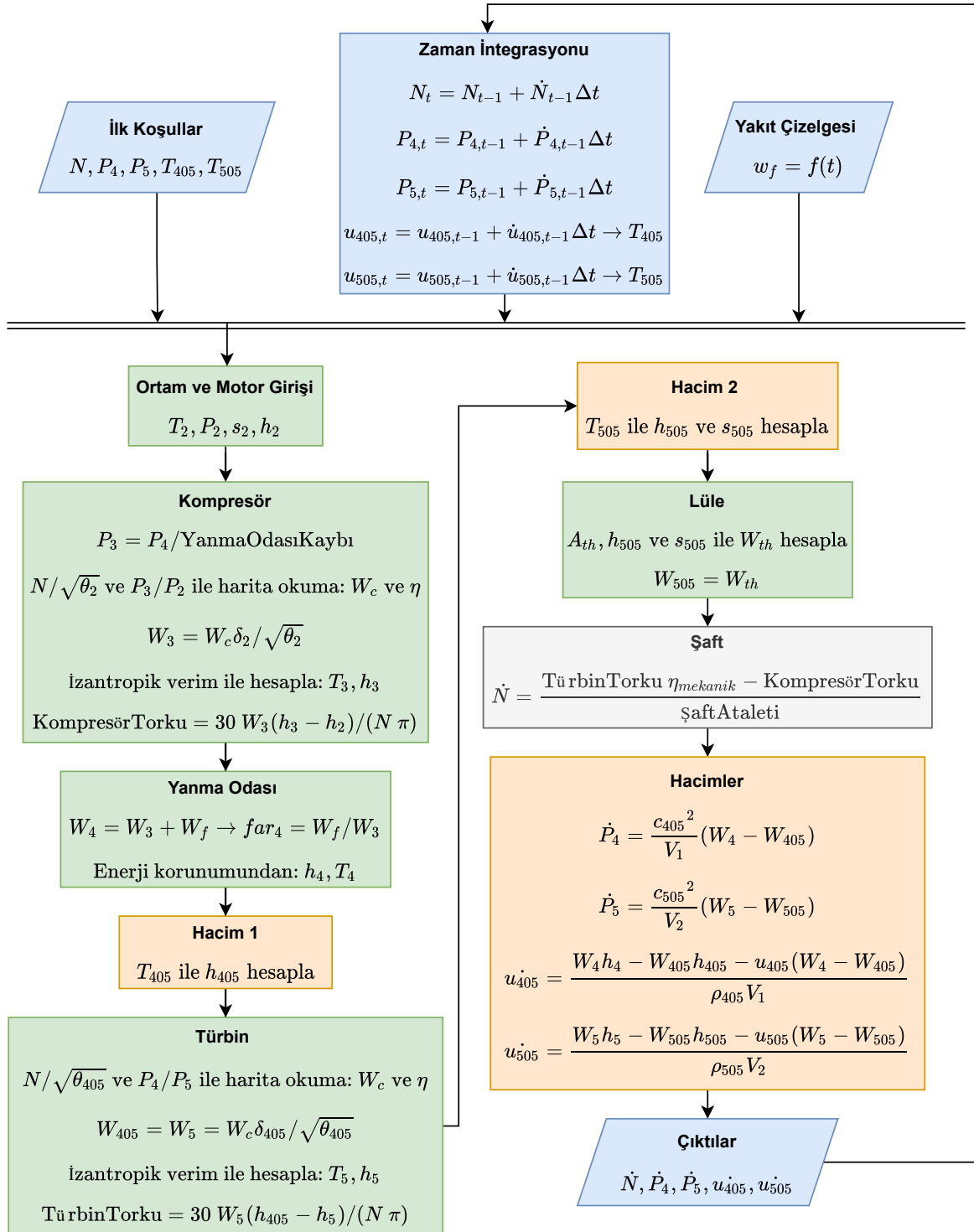
Bu çalışmada farklı hacim dinamiği uygulamaları örnek bir turbojet motoru üzerinde denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Hacim dinamiğinin ve kullanılan denklemlerin seçiminin özellikle şaft kırılması gibi yüksek frekanslı olaylarda önemli olabileceği görülmüştür. Kullanılan denklemlere göre metod seçimi değişmektedir ve hesaplama zamanında 1.5-2 kat kazanım getirebilmektedir. Hacim dinamiği etkisi bu çalışmada kullanılan motor konfigürasyonu için şaft kırılması sonrası terminal hızlarda %1-4 bandında olmuş ve ayrıca hacim dinamiğinin kompresör çalışma çizgisini ve surge'e girme sürelerini önemli ölçüde değiştirdiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şaft kırılması ile ilgili deneysel veri ulaşılabilir olduğunda dinamik motor modellerini kalibre etmek için kullanılabilir. Fakat şaft kırılması olayının çok disiplinli karmaşık bir problem olduğu ve bu çalışmada bu olayın sadece bir yönünün incelendiği unutulmamalıdır. Gerçekçi ve deneysel veri ile uyuyabilecek bir şaft kırılması modelinin ayrıca ikincil akışları, mekanik sürtünmeleri, turbomakinelerin bu olay sırasında karşılaştığı tasarımdan fazlaca sapan çalışma bölgelerini, yanma odası kararlılığını, kompresör surge davranışını, kontrol stratejilerini ve sensör gecikmelerini doğru bir şekilde modellemesi gerekmektedir.

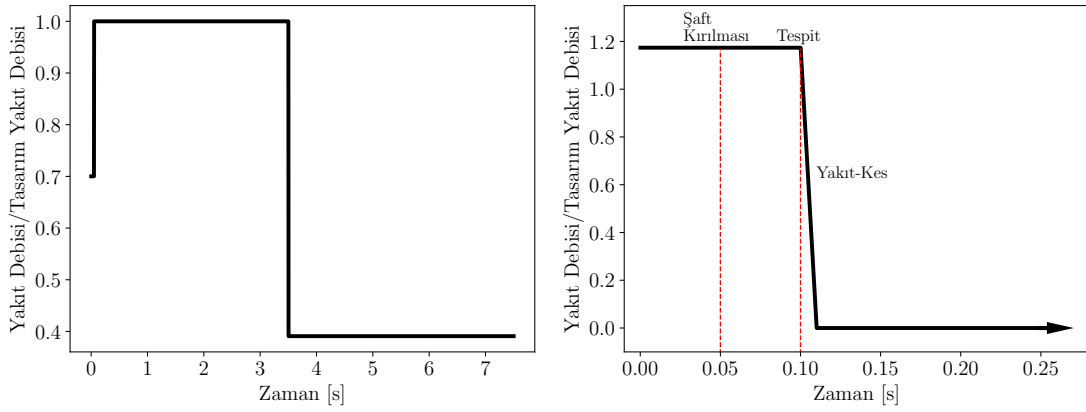
Bir sonraki çalışmada güncel çalışma bir surge modellemesi ile birleştirilip, şaft kırılması sonrası surge'ün şaft terminal hızlarına olan etkisi incelenecektir. Bu şekilde şaft kırılması ve tespiti sonrası alınabilecek farklı önlemler daha detaylı çalışabilecektir. Tespit sonrası, bu çalışmada olduğu gibi yakıt kesmek yerine yakıt miktarı sabit tutularak veya artırılarak motor surge'e sokulabilir ve böylece türbine beslenen enerji azaltılabilir.

Kaynaklar

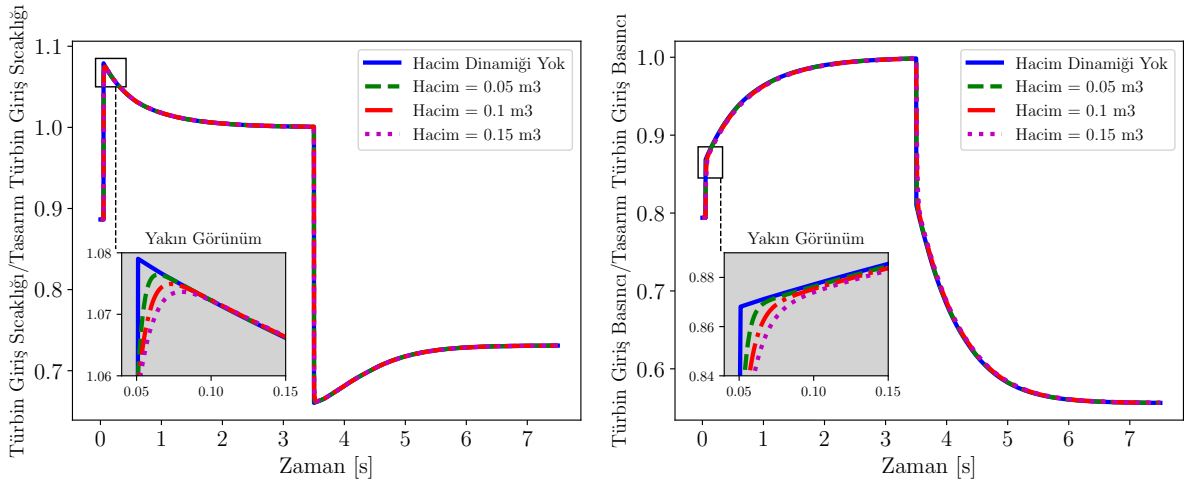
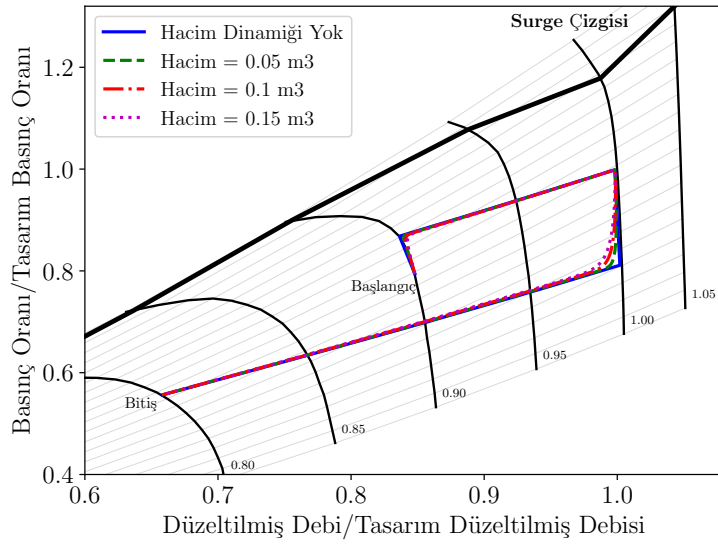
- Alves, M.A.d.C. ve Barbosa, J.R., 2003. *A step further in gas turbine dynamic simulation*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Cilt.217(6) s.583-592. DOI: 10.1177/095765090321700606.
- Fawke, A.J. ve Saravanamuttoo, H.I.H., 1971. *Digital Computer Methods for Prediction of Gas Turbine Dynamic Response*, SAE Technical Paper 710550, Cilt.80, s.1805-1813. DOI: <https://doi.org/10.4271/710550>.
- Gallar, L., 2010. *Gas turbine shaft over-speed/failure performance modeling*, PhD Thesis, Cranfield University, UK.
- Garrard, D., 1996. *ATEC: The Aerodynamic Turbine Engine Code for the Analysis of Transient and Dynamic Gas Turbine Engine System Operations: Part 1 - Model Development*, ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Birmingham, UK, 96-GT-193. DOI: 10.1115/96-GT-193.
- Janikovic, J., 2010. *Gas turbine transient performance modeling for engine flight path cycle analysis*, PhD Thesis, Cranfield University, UK.
- Kurzke, J. ve Halliwell, I., 2018. *Propulsion and Power*, Springer; ISBN 3-319-759779. DOI: 10.1007/978-3-319-75979-1.
- Lytle, J.K., 2000. *The Numerical Propulsion System Simulation: An Overview*, NASA/TM-2000-209915, Glen Research Center.
- Walsh, P.P ve Fletcher, P., 2004. *Gas Turbine Performance*, 2. Baskı, Blackwell Science Ltd, Oxford, UK, ISBN: 9780470774533. DOI: 10.1002/9780470774533.
- Yao, H., Wang, X. ve Kong, X., 2013. *A real time transient model of CF6 turbofan engine*, Applied mechanics and materials, Cilt.241-244, p.1673-1585. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.241-244.1573.
- Yepifanov, S. ve Zelenskyi, R., 2019. *Modeling of Turbomachines for Control and Diagnostic Applications, Gas Turbine Simulation Taking into Account Dynamics of Gas Capacities*, IntechOpen, ISBN:978-1-78984-651-5. DOI: 10.5772/intechopen.81984.



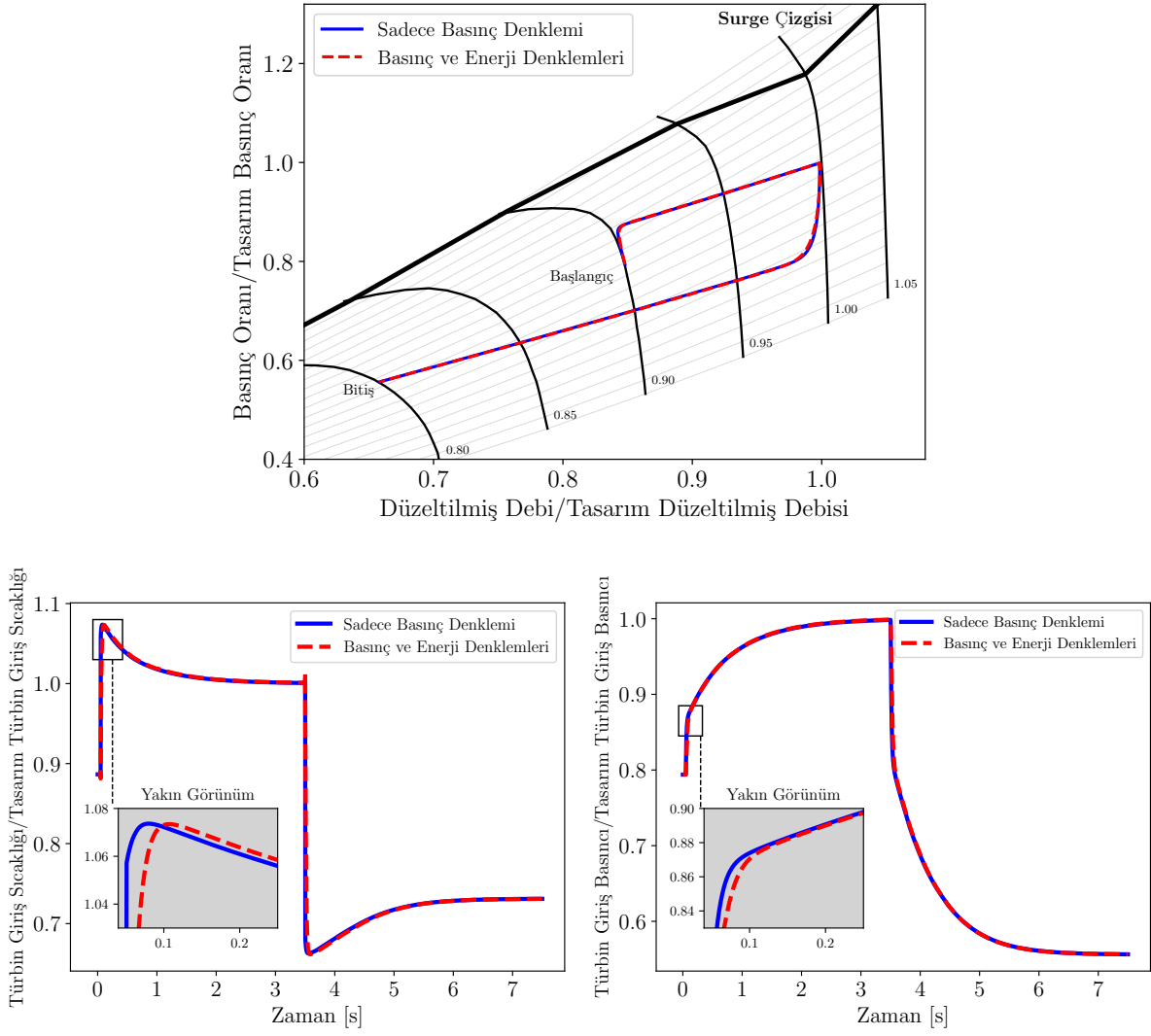
Şekil 4: Örnek turbojet konfigürasyonu için hızlı geçici durum modellemesi.



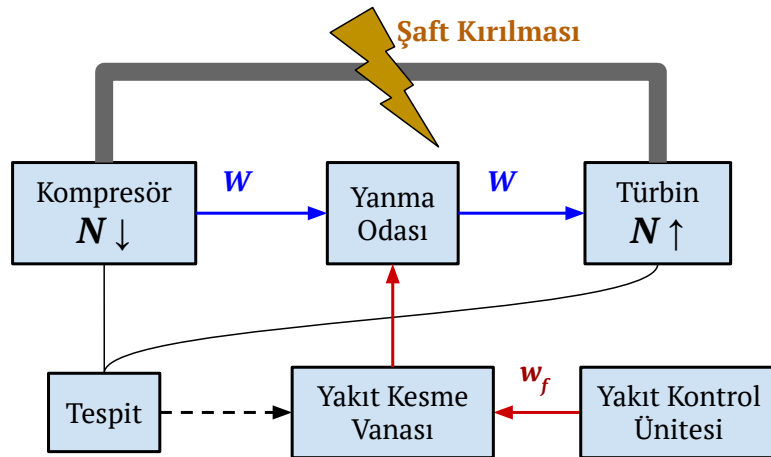
Şekil 5: Standart manevra (sol) ve şaft kırılması (sağ) için kullanılan yakıt çizelgeleri.



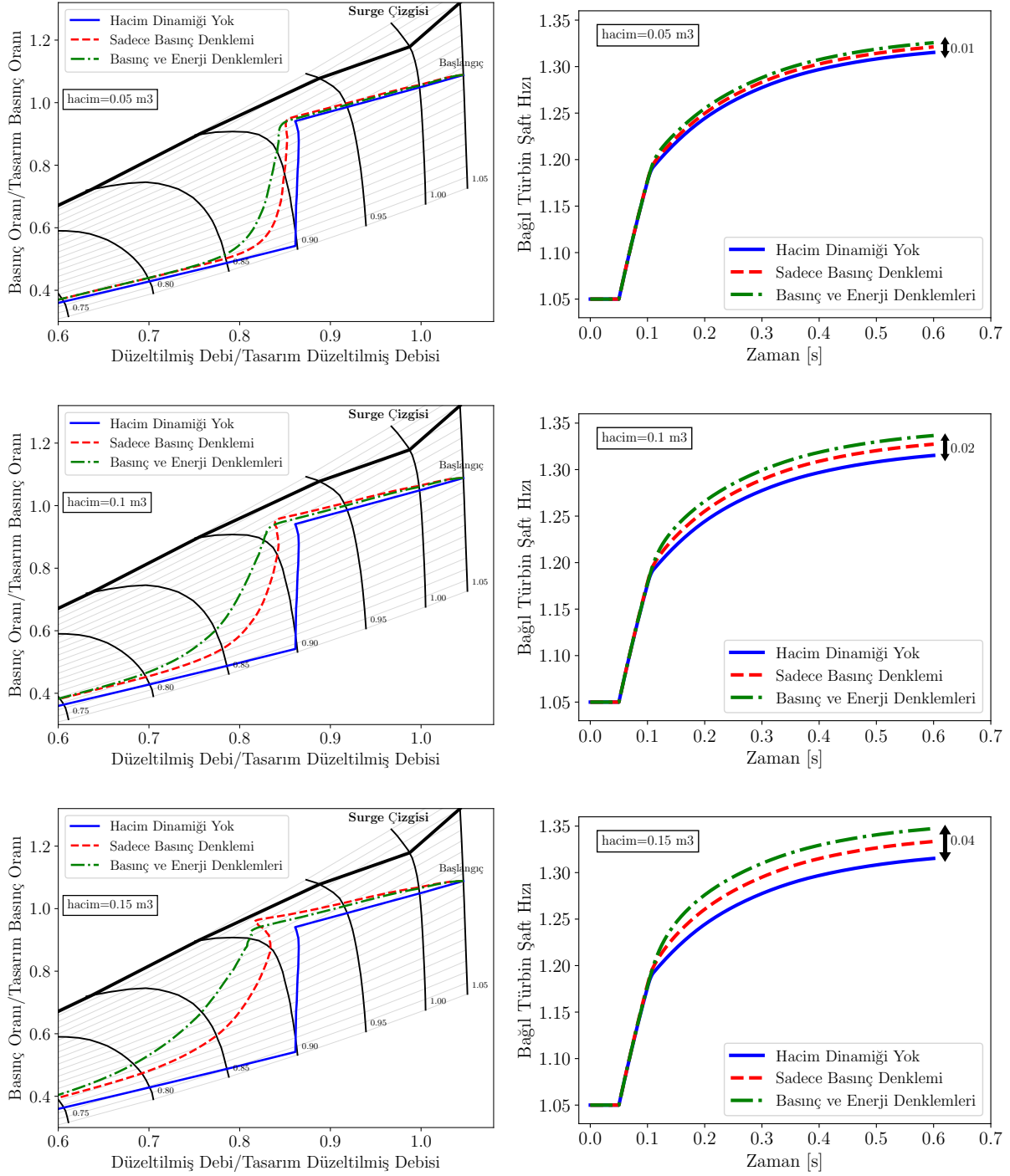
Şekil 6: Standart manevra için farklı yanma odası hacim değerleri ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması. Bu sonuçlar sadece Denklem 3 kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 7: Standart manevra için sadece basınç denklemi (Denklem 3) kullanımının basınç ve enerji denklemlerinin (Denklem 3 ve 7) beraber kullanılması ile karşılaştırılması. Hacim-1 hacim değeri 0.15 metreküp olarak alınmıştır.



Şekil 8: Şaft kırılması olayının tasviri.



Şekil 9: Hacim dinamiğinin şaft kırılması sonrası terminal hızlara ve kompresör çalışma çizgisine etkisi.