



Bir Güç Türbini Kanatçığında Akışkan Yapı Etkileşimi Analizi Kullanımı Metodolojisi

Methodology of Usage of Fluid Structure Interaction Analysis for a Power Turbine Blade

Özge Altun^{1*}, Görkem Madenoğlu²

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, okutlu@ogu.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0958-333X>

²TEI-TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş., gorkem.madenoglu@tei.com.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-1330>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 23 Haziran 2023
Revizyon 24 Ağustos 2023
Kabul 9 Ekim 2023
Online 31 Aralık 2023

Anahtar Kelimeler:

Akışkan yapı etkileşimi, Jet Motorları, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği.

ÖZ

Akışkan Yapı Etkileşimini (AYE) içeren problemlerle pek çok mühendislik alanında karşılaşılmasına rağmen bu alanda yapılan çalışmalar uzun bir geçmişe sahip değildir ve sınırlıdır. AYE analizleri yüksek basınç ve sıcaklık ile mekanik ve termal yüklerin fazla olduğu jet motorlarına ait parçalar için etkin bir şekilde avantajlar sağlamaktadır. Bu çalışmada literatürde yer alan AYE çalışmalarına yer verilmiş ve günümüz jet motor parçalarının tasarımı esnasında uygulanabilecek AYE analizleri metodolojisi hakkında bilgi verilmiştir. AYE analizlerinde kullanılan temel denklemler anlatılmış, tek yönlü, çift yönlü, sıkı ve gevşek bağlı AYE analiz yapıları, kullanım yerleri ve algoritmaları detaylı olarak ele alınmıştır. Akışkan kısmın, yapısal kısmın şekil değiştirmesinden az etkilendiği bir problem sayısal olarak incelenmiştir. Tek yönlü ve çift yönlü AYE analizler sonucunda maksimum hava hızları arasında %0.09 fark olduğu tespit edilmiştir. Jet motorlarında veya farklı mühendislik alanlarında AYE analizlerini kullanacak bilimsel çalışmalara yönelik hangi yöntemlerin daha avantajlı olduğu hakkında bilgi verilmiştir. Sonuç olarak, yüksek maliyetli deneysel çalışmalar ve testlerden önce; zaman, iş gücü ve ekonomik tasarruf sağlayan AYE analizlerinin kullanımının önemi vurgulanmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 June 2023
Received in revised form 24 August 2023
Accepted 9 October 2023
Available online 31 December 2023

Keywords:

Fluid Structure Interaction, Jet Engines, Computational Fluid Dynamics

ABSTRACT

Although problems involving Fluid Structure Interaction (FSI) are encountered in many engineering fields, studies in this field do not have a long history and are limited. FSI analysis also effectively provide advantages for jet engine parts where pressure and temperature, mechanical and thermal loads are high. In this study, the FSI studies in the literature are included and information about the FSI analysis methodology that can be applied during the design of today's jet engine parts is given. The basic equations used in FSI studies are explained; one-way, two-way, strongly and loosely coupled FSI analysis structures, usage areas and algorithms are explained in detail. A problem in which the fluid part is less affected by the deformation of the structural part has been numerically investigated. As a result of one-way and two-way AYE analysis, it was determined that there was a 0.09% difference between maximum air speeds. Information is given about which methods are more advantageous for scientific studies that will use FSI analyzes in jet engines or in different engineering fields. As a result, before expensive experimental studies and tests; the importance of using FSI analysis, which provides time, labor and economic savings, has been emphasized.

Doi: 10.24012/dumf.1318801

* Sorumlu Yazar

1. Giriş

Birçok alanda mühendislere tasarımlar konusunda yardımcı olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) gibi çözüm yöntemleri haricinde günümüzde bu iki disiplinin beraber uygulanması ile ortaya çıkan Akışkan Yapı Etkileşimi (AYE) analizleri de yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

AYE problemlerinde, bir veya daha fazla katı yapısal bölge, iç veya kendisini çevreleyen akışkan akışı ile etkileşime girmektedir. Bu nedenle AYE problemleri birçok bilim ve mühendislik alanında önemli roller oynamaktadır. Ancak bu tür problemlerin kapsamlı bir şekilde incelenmesi, doğrusal olmamaları ve multidisipliner yapıları nedeniyle çözümleri oldukça zordur [1]-[3]. Çoğu AYE problemi için analitik çözümler elde etmek imkansız olup, deneysel çalışmaların da kapsamı sınırlıdır. Bu nedenle katı ve sıvı arasındaki karmaşık etkileşimde yer alan temel fiziği anlamak ve araştırmak, yeni tasarımların yapılabilmesi ve mevcut tasarımların geliştirilmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca katı ve sıvı arasındaki etkileşim, sayısal simülasyonlar kullanılarak hızlı bir şekilde değerlendirilebilmektedir [4].

AYE analizleri, rüzgâr türbin kanatçıklarının incelenmesinde sıkça kullanılan analizlerdir. Doğan [5], çalışmasında rüzgâr türbini kanatları için 2-D ve 3-D analizler yapmıştır. Çalışmada farklı hücum açılara sahip NACA0012 kanat profili kullanılmış ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ve AYE analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde akışkan kısmı için ANSYS CFX ve yapısal kısım içinse ANSYS Mechanical yazılımları kullanılmıştır. HAD analizleri, 2-D ve sıkıştırılamaz akış kabulüyle yapılmıştır. Sıkıştırılamaz akış kabulü nedeniyle artan hücum açısına bağlı olarak Mach sayısında da artışlar gözlemlenmiş, ancak belirli bir hücum açısı değerinden sonra analiz sonuçları ile test sonuçları arasında farklılıklar görülmüştür.

MacPhee ve Beyene [6], rüzgâr türbin kanadı için deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, kanat üzerine gelen rüzgâr yükü nedeniyle kanat hücum açılarının değişimini ve bu değişimin türbin performansına etkisini incelemişlerdir. Tek yönlü ve çift yönlü AYE analizleri yapan MacPhee ve Beyene [6], rüzgâr etkisi altında türbin kanatlarının şekil değiştirmesinin hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlar için analizler yapmışlar, ayrıca elde ettikleri analiz sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırarak sonuçların uyumluluğunu kıyaslamışlardır.

Literatürde rüzgâr türbinlerinin performansına yönelik yapılan çalışmalar dışında rüzgâr türbin gövdelerinin dayanımını hesaplamak ve tasarımları iyileştirmek için de AYE analizleri kullanılmıştır.

Jo ve ark. [7], rüzgâr türbini üzerine gelen rüzgâr yükünü tek yönlü AYE analiz yöntemi kullanarak hesaplamışlardır. Türbülanslı akış analizleri için Kayma Gerilmesi Taşınımı (Shear Stress Transport) modelini kullanarak basınç yüklerini hesaplayan yazarlar elde ettikleri bu değerleri yapısal modele aktararak taşıyıcı kulede meydana gelen şekil değişimini elde etmişlerdir.

Farklı bir disiplinde yapılan bir diğer çalışma ise insan vücudunda kalbin görevini yapabilecek özelliklere sahip bir pompanın AYE analizleridir [8]. Yazarlar, akışkan analizlerini OpenFOAM yazılımıyla yaparken, kendilerinin oluşturdukları yazılım ile yapısal analizler ile akışkan-yapı analizleri arasındaki bağlantıyı gerçekleştirmişlerdir.

Literatürde deneysel verilerin bulunduğu AGARD 445.6 roket kanadı için de sürekli rejim AYE analizleri gerçekleştirilmiştir [9]. Yazar çalışmasında akışkan analizleri için CFX v.13, yapısal analizler için ANSYS Mechanical'ı kullanmıştır. Akgül [9] çalışmasında, roket kanadı için çift yönlü AYE analizleri yapmış, elde ettiği sonuçları ise literatürde yer alan deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Daha sonra doğruladığı yöntemi kullanarak farklı bir roket geometrisi üzerinde analizler yapmıştır. Yazar, AYE analiz sonuçlarını karşılaştırdığında, yapısal modelde şekil değişiminin dikkate alınmasının yapılan analizlerin doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini tespit etmiştir.

Kamakoti ve Shyy [10], ise yine AGARD 445.6 kanadını kullanarak kanatlardaki titreşim ve titreşime bağlı olarak kanatlarda meydana gelen kırılma konusunu incelemişler ve aeroelastik analizler yapmışlardır. Çalışmada, farklı bağlantı türlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını ele almışlardır. Yapının doğal frekanslarını çift yönlü AYE analizleri kullanarak hesaplayıp, kanadın etrafından geçen akışkan nedeniyle oluşan titreşim frekansıyla kanadın doğal frekansını karşılaştırmışlardır.

Havacılık sektöründe uçuş emniyetine uygun üretim yapma zorunluluğu, kullanılan malzemelerin ve üretim yöntemlerinin pahalı olması, sıkı toleranslar, üretilen ürünlerin yüksek kalitede olma gerekliliği, uzun ve zahmetli tasarım süreçlerinin nedenleri olarak gösterilebilir. Uçuş emniyetinin son derece önemli olması, üretim yöntemleri ve malzemelerinin oldukça pahalı olması nedeniyle bu sektörde çalışan mühendislerin tasarım esnasında en ufak ayrıntılara dikkat etmesi, bakım ve üretim yöntemleri, kullanılacak malzemeler gibi kritik konuları detaylı bir şekilde ele almaları gerekmektedir. Bu nedenle, havacılık sektöründe gaz türbin bileşenleri için hem yapısal hem de akış analizlerini içeren AYE analizleri önem kazanmaktadır.

Gaz türbinlerine yönelik AYE analizlerini kullanarak çalışma yapan Dhopade ve ark. [11], türbinlerinin hava girişinde bulunan fanın düşük ve yüksek çevrimlerinde, fan kanatlarında meydana gelebilecek yorulma olasılığı ve ömür hesabı üzerine çalışmışlardır. Hesaplamalarda çift yönlü AYE analiz yöntemini kullanmışlardır. Mekhonoshina ve ark. [12], zamana bağlı çift yönlü AYE analizlerini kompresör kanatçıklarına uygulayarak, değişen gerilmeleri araştırmışlardır. Modeli basitleştirmek için 12 sabit ve 12 dönen kanatçıktan oluşan modelin on ikide birlik kısmını analizlerinde kullanmışlardır. Sabit kanatçığın hava akışı sırasında şekil değiştirmediği kabulü ile akışkan yapı etkileşim bölgesi olarak, dönen kanatçığı seçmişlerdir. Ubulom [13] çalışmasında yüksek basınç türbin kanadının yorulma miktarını tahmin etmek için AYE bağlantı yöntemlerinin etkisini araştırmıştır. Analizler sonucunda birleştirilmiş çözümlerin türbin kanatlarının yorulma

özelliklerinde ve ömür değerlerinde farklı sonuçlar verebileceği görülmüştür.

Bu çalışmada, aynı anda hem yapı hem de akış analizlerine sahip AYE problemleri için sayısal yöntemlerin gözden geçirilmesi ve bu alanda yapılan çalışmalarda disiplinler arası iş birliğinin önemine değinmek amaçlanmıştır. Bu kapsamda, günümüzde kullanılan gaz türbinli motorlarda yer alabilecek bir güç türbini kanatçığının ilk tasarım aşaması ile ilgili yapılabilecek AYE analizlerinde karşılaşılan zorluklarını giderilmesi için verimli ve doğru bir metodoloji ve algoritma oluşturmak, kullanılan yöntemlerin temel özelliklerini belirlemek hedeflenmiş ve bu çalışmanın hem gaz türbinleri hem de farklı disiplinlerde AYE analizi yapacak araştırmacılara yol göstereceği düşünülmektedir.

Çalışmada AYE problem formülasyonu ele alınmış, çözüm yöntemleri tanımlanmış, daha sonra sistemleri bağlama ve yönetici denklemler konularına değinilmiştir. Bir güç türbini döner kanatçığı için tek yönlü ve çift yönlü AYE analizleri sonucunda elde edilen maksimum hava hızları karşılaştırılmıştır.

2. Akışkan Yapı Etkileşimi (AYE)

AYE, yapısal mekaniği ve akışkanlar dinamiğini tanımlayan kanunlar arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Bu olgu, akışkanla etkileşim halinde olan yapıların şekil değişimlerinin ve hareketlerinin incelenmesinde önemli yer tutmaktadır.

Bir yapı etrafındaki akış, çevrelediği yapı üzerinde gerilme ve gerilmelere sebep olur. Oluşan bu gerilmeler ve gerilmeler akışın ve yapının karakteristiğine göre hesaba katılacak kadar çok büyük veya göz ardı edilebilecek derecede çok küçük olabilmektedir.

Hesaba katılacak kadar büyük gerilme ve gerilmelerin söz konusu olduğu gaz türbinli motorlardaki güç türbini kanatçıkları, rüzgar türbin kanatçıkları ve uçak kanatları gibi pek çok mühendislik sistemlerinde, akışkan yapı etkileşimleri, tasarım aşamasında dikkate alınması gereken oldukça önemli bir olgudur.

2.1 Akışkan Yapı Etkileşim Problem Formülasyonu

Bu çalışmada gaz türbininde yer alan 1 adet döner ve 1 adet sabit kanatçık ele alınmıştır (Şekil 1). Türbin kanatçıkları için Girişte sabit toplam basınç ($P_{in} = 259657$ Pa), giriş yüzeyi boyunca ise $827 \div 927$ °C arasında değişmekte olan sıcaklık dağılımı sınır şartı kullanılmıştır. Çıkış sınır şartı olarak $\dot{m} = 0.059280$ kg/s kütleli debi değeri uygulanmıştır. Hesaplama alanı dış sınırı Γ olan Y ile gösterilmektedir. Bu çözüm bölgesi Y_s yapısal bölge ve Y_f akışkan bölgeyi içermektedir. Akışkan-yapı ara yüzü ise Γ_s ile tanımlanmaktadır.

Akışkan ve yapı için hareket denklemleri, D'Alembert ilkesinin bir sonucu olarak [14]:

$$\rho \dot{v}_i - \sigma_{ij,i} + f_i = 0 \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada f_i yer çekimi ivmesi gibi gövde kuvvetidir.

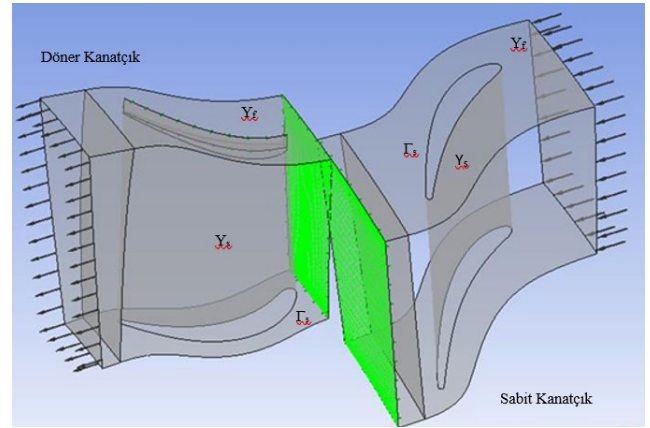
Yapısal bölge (Y_s) için denklemler [14];

$$\rho^s \dot{v}_i^s - \sigma_{ij,j}^s + f_i^s = 0 \quad (2)$$

Burada s üst indisi yapı ile ilişkili miktarı belirtmektedir. Ayrıca v_i^s malzemenin hızıdır ve yer değiştirme alanının zaman göre türevidir ($v_i^s = \dot{u}_i^s$).

Denklem (2)' de yer alan ilk iki terim atalet ve iç gerilmelerle ilişkilidir. Hooke yasasından, doğrusal elastik malzemeler için yapısal gerilim Denklem (3) ile ifade edilir [14].

$$\sigma_{ij}^s = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{ll} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (3)$$



Şekil 1. Bir gaz türbini için AYE probleminde akışkan ve yapı bölgelerinin gösterimi [14]

Yapısal gerilme tensörü σ_{ij}^s , şekil değiştirme hızı tensörü (ε_{ij}), Lamé sabitleri λ ve G 'nin fonksiyonudur.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4a)$$

$$\lambda = \frac{Ev}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (4b)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4c)$$

Denklem (4b) ve (4c)'de E , Young modülü ve ν Poisson oranıdır.

Akışkan bölgesi (Y_f) için denklemler [14];

$$\rho^f \dot{v}_i^f - \sigma_{ij,j}^f + f_i^f = 0 \quad (5)$$

Denklem (5) genellikle Euler tanımıyla ifade edilir. Böylece eylemsizlik teriminden,

$$\dot{v}_i^f = \frac{dv_i^f}{dt} = \frac{\partial v_i^f}{\partial t} + v_i^f v_{i,j}^f \quad (6)$$

Denklem (6) elde edilir. Sıkıştırılmaz Newton tipi akışkan için, akışkan gerilme tensörü [14];

$$\sigma_{ij}^f = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (7)$$

Denklem (7)'den elde edilebilir. Bu denklemde viskoz gerilme tensörü;

$$\tau_{ij} = 2\mu\left(e_{ij} - \frac{\delta_{ij}e_{kk}}{3}\right) \quad (8a)$$

$$e_{ij} = (v_{i,j}^f + v_{j,i}^f) \quad (8b)$$

Denklem (7)'de p sıkıştırılmazlık koşulunu uygulamak için gerekli kuvvet olarak görülebilen statik basınçtır ve $v_{i,i}^f = 0$ 'dır.

Akışkan-yapı ara yüzü Γ_s ele alınırsa, Γ_s boyunca kaymama durumunu korumak için, Dirichlet ve Neumann koşulları uygulanabilir [14];

$$v_i^s = v_i^f \quad (9)$$

$$\sigma_{ii}^s n_i = \sigma_{ij}^f n_j \quad (10)$$

Denklem (10) hem akışkan hem de yapı ortak ara yüzünün yer değiştirme koşulunun bir diğer ifadesidir,

$$x_i^s = x_i^f \quad (11)$$

Bazı FSI yöntemlerinde düzgün bir ara yüz profili için, Denklem (9) yerine Dirichlet kısıtlaması olarak Denklem (11) dikkate alınmaktadır.

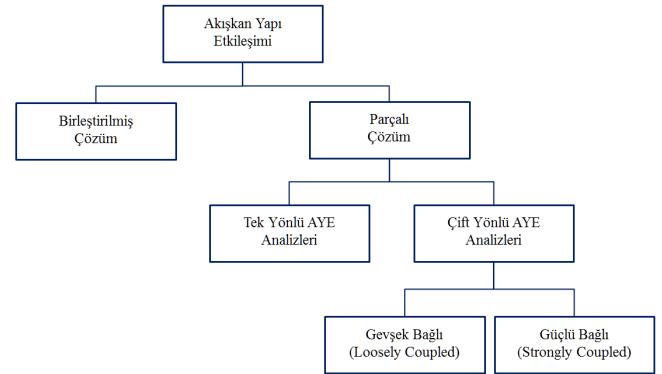
2.2 Akışkan Yapı Etkileşim Çözüm Yöntemleri

AYE problemlerinin çözümünde iki temel yöntem söz konusudur. Şekil 2'de gösterildiği gibi AYE analizleri birleştirilmiş ve parçalı çözümler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmanın kapsamını da oluşturan parçalı çözüm yöntemi tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çift yönlü AYE analizleri ise gevşek bağlı ve güçlü bağlı çözüm yöntemlerini içermektedir.

Bu yöntemlerden ilki birleştirilmiş çözüm yöntemidir. Birleştirilmiş yöntemde yapısal çözücünün kullandığı denklem ve matrisler ile akışkan çözücünün kullandığı denklemler ve matrisler birleştirilerek tek bir matris oluşturulur. Bu tek bir matrisin çözülmesiyle hem akışkan hem de yapısal çözüm sonuçları elde edilir. Birleştirilmiş çözüm sonucunda fiziksel olarak gerçeğe en yakın sonuçlara ulaşılmaktadır. Ancak birleştirilmiş çözüm yönteminde sonuçların elde edilmesi uzun zaman almaktadır.

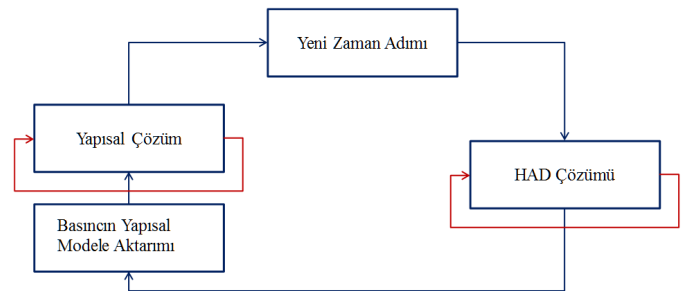
Birleştirilmiş çözüm yönteminin zahmetli ve uzun zaman alması nedeniyle, parçalı AYE analiz yöntemi daha fazla tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Parçalı AYE çözümünde, akışkan ve yapı çözümleri ayrı ayrı çözüm yaparak belirlenen zaman adımlarında problemi çözerler. Çözüm sonucunda elde edilen, problemin çözümünde gerekli olan sonuçlar akışkan çözücünden yapısal çözücüye ve yapısal çözücünden akışkan çözücüye aktarılır.

Parçalı çözüm yönteminin altında yer alan tek yönlü AYE analizinde, sadece akışkan çözücüsünde elde edilen basınç değerleri yapısal çözücüye aktarılmaktadır. Tek yönlü analizlerde akışım etkisi altında kalan yapısal kısmın şekil değişimi ihmal edilmektedir. Tek yönlü AYE analizlerinde akış geometrisinin değişmediği kabulü yapılmaktadır ve bu çözüm yöntemi yapısal kısımda önemli şekil değişimlerinin olmadığı durumlarda kullanılmalıdır.



Şekil 2. AYE analizlerinin sınıflandırılması [15].

Şekil 3'te tek yönlü AYE analizleri için oluşturulan blok diyagramı verilmiştir. Tek yönlü AYE analizlerinde, her bir analiz zaman adımı için akışkan ve yapısal çözümler sadece bir defa çözüm yapılmakta, HAD çözümünde elde edilen basınç değerleri yapısal çözücüye aktarılmakta ve yapısal çözüm sonucunda yeni bir analiz adımı başlamaktadır.



Şekil 3. Tek Yönlü AYE Analiz Şeması [16].

Çift yönlü AYE analizlerinde ise tek yönlü AYE analizlerinden farklı olarak, yapısal kısmın şekil değişimi ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Analiz sırasında, yapısal kısmın geometrisinde meydana gelen değişim nedeniyle akış geometrisi de değişmektedir. Bu nedenle çift yönlü AYE analizlerinde her bir analiz adımı sonrasında, HAD analizleri sonucu elde edilen basınçlar yapısal çözüme aktarılırken, yapısal çözüm sonrası elde edilen, modelde meydana gelen şekil değişimleri de HAD analizine aktarılır. Akış geometrisindeki güncellemeleri analizlere aktarmak için, her yeni çözüm adımında akışkan modeldeki ağ yapısı, yapısal modeldeki şekil değişimlerine bağlı kalınarak güncellenir. Çift yönlü AYE analizlerinde her analiz zaman adımı için akışkan ve yapısal çözümlerin iteratif olarak çalışması, ağ yapılarının güncellenmesi çözümlere ulaşmak için uzun zaman harcanmasına neden olmaktadır.

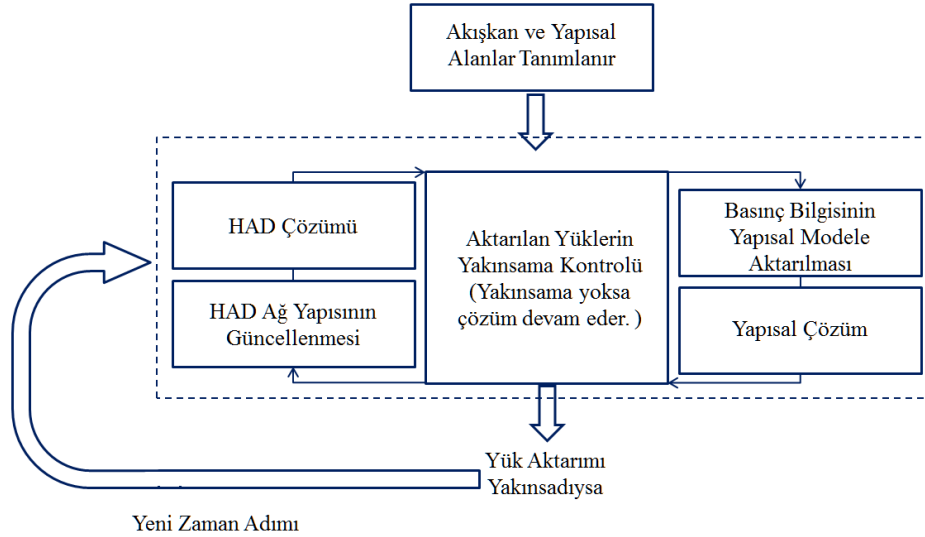
Çift yönlü analizlerde çözüm, başlangıç sınır şartlarında akış analizleriyle başlar. Akış analizinden elde edilen basınç değerleri yapısal modele aktarılır. Yapısal çözücü, akış analizinden elde edilen basınç verilerini sınır şartı olarak kullanır ve yapısal kısımda oluşan şekil değişimini hesaplar. Hesaplanan şekil değişimi, akışkan çözücüdeki ağ yapısına

aktararak ağ yapısı güncellenir. Böylece ikinci adımdan itibaren yapısal modeldeki şekil değişimine uygun akışkan analizleri yapılır.

Bu çözüm yönteminde akışkan ve yapısal çözümler arasında sürekli bilgi aktarımı söz konusu olduğundan her adımda bu bilgi aktarımı kontrol edilmelidir. Ayrıca yapısal çözücüde ve akışkan çözücüde kullanılan ağ yapıları birbirlerinden farklı olması sebebiyle bilgi aktarımı kontrolünün yapılması çözüm doğruluğu açısından önem arz etmektedir.

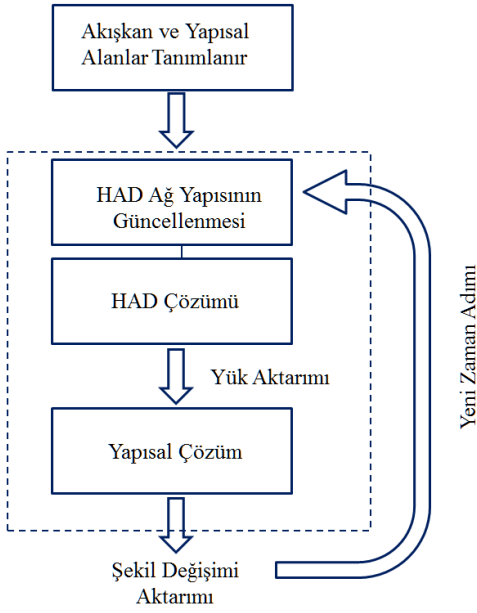
Her adımda çözümler arasında veri aktarımı ve yakınsamanın kontrol edildiği analize güçlü bağlı çift yönlü AYE analizleri adı verilir. Güçlü bağlı çift yönlü AYE analizlerinin blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir.

Gevşek bağlı çift yönlü AYE analizlerinde, güçlü bağlı çift yönlü AYE analizlerinin aksine veri aktarımı kontrolü ve yakınsama önemsenmez. Eğer akışkan ve yapısal kısımlarında birbirleriyle uyumlu ağ yapıları kullanılıyorsa gevşek bağlı çift yönlü AYE analizleri kullanılabilir. Aksi takdirde akışkan ve yapısal çözücü arasındaki bilgi aktarımı sırasında farklılıklar ve hatalar kaçınılmaz olur.



Şekil 4. Güçlü Bağlı Çift Yönlü AYE Analizi [16].

Gevşek bağlı çift yönlü AYE analizlerinin çalışma şeması Şekil 5'te gösterilmiştir.



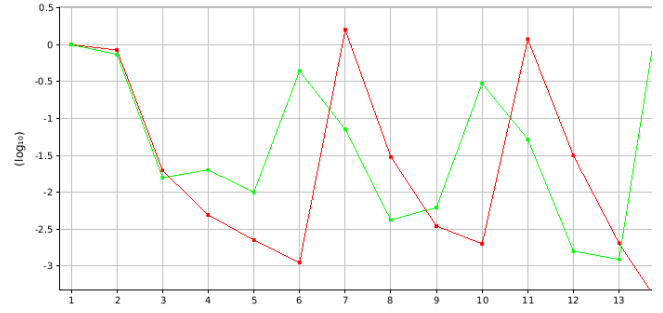
Şekil 5. Gevşek Bağlı Çift Yönlü AYE Analizi [15].

2.3 Sistemleri Bağlama

AYE analizleri hangi birleştirme yöntemi seçilirse seçilsin farklı fiziksel alanlar için ayrı çözümlerin oluşturulduğu bölümlü bir çözüm yöntemidir. Akışkan kısımda akışkanlar dinamiği, katı kısımda ise yapı dinamiği çözümleri yapılmaktadır. Çözümlerde akışkan ve katı arasındaki sınırda akışkan-yapı ara yüzü tanımlanır ve bu ara yüzde akışkan ve yapı çözümleri arasında bilgi paylaşımı yapılır. Bu bilgi paylaşımı birleştirme yöntemine göre değişmektedir. Tek yönlü bağlamada yapıya etki eden akışkan basıncı yapısal çözücüye aktarılırken çift yönlü analizlerde yapının basıncın etkisiyle yer değiştirmesi de akışkan çözücüye aktarılmaktadır [16].

Sistemleri bağlama, AYE analizleri gibi farklı disiplinlerin kullanıldığı analizlerde kolaylık sağlayan bir yazılımdır ve Ansys Workbench paket yazılımında yer almaktadır. Akışkan kısım için HAD ve yapısal kısım için SEM analiz modelleri tamamlandıktan sonra, sistemleri bağlama kullanılarak, analiz adım zamanları, analiz süreleri, bilgi aktarımının yapılacağı bölgeler ve bu yazılımlar arasında hangi verilerin paylaşılacağı belirlenebilir.

Sistemleri bağlama yazılımı içinden gerekli düzenlemeler ve ayarlamalar sonrası, çözüm süreci başlar ve sonuçlar takip edilebilir. Sistemleri bağlama kullanılarak yapılmış bir AYE analizinin çözümü sırasında oluşan grafik Şekil 6'da verilmiştir. HAD analizi sonucunda oluşan basınç dağılımının yapısal tarafa aktarımındaki yakınsama değerleri yeşil çizgiler ile gösterilmektedir. Kırmızı çizgiler ise yapısal analiz sonucunda hesaplanan şekil değiştirme değerlerinin HAD analizine aktarıldığı sıradaki yakınsama durumunu göstermektedir. Yatay eksen ise iterasyon sayısı yer almaktadır.



Şekil 6. Sistemleri Bağlama Ekranındaki Yakınsama Görseli [15].

2.4 Sistemleri Bağlama Yönetici Denklemleri

Çift yönlü ve güçlü bağlı AYE analizlerinde akışkan ve yapısal modeller arasında her analiz adımında veri aktarımı olmaktadır. Fakat her iki modelde kullanılan ağ yapıları farklı olduğundan aktarılan verilerin ne kadarının doğru olduğu kontrol edilmelidir.

Bu nedenle sistemleri bağlama yazılımı çift yönlü ve güçlü bağlı AYE analizleri sırasında veri aktarımındaki değişiklikleri kontrol eder. Eğer veri aktarımındaki değişiklikler belirlenen değerlerin altına inmezse analiz durdurulur. Yazılım yakınsama kontrolünü Denklem (12), (13) ve (14) numaralı formüller ile yapar [17].

$$\Delta_l = \frac{1}{\omega} (\varphi_l^i - \varphi_l^{i-1}) \quad (12)$$

Denklem (12)'de, ω rahatlatma parametresidir. Denklemde yer alan φ veri aktarımı yapılan değişkenin değerini, l alt indisi veri aktarımının yapılacağı konumu, i üst indisi ise çözümler arasında veri aktarımının yapıldığı iterasyon numarasını temsil etmektedir. Δ_l ise iki iterasyon arasında aktarılan verinin değişimini göstermektedir.

$$\hat{\Delta}_l = \frac{\Delta_l}{((\max|\varphi| - \min|\varphi|) + |\bar{\varphi}|) * 0.5} \quad (13)$$

Burada, $\hat{\Delta}_l$, Denklem (12)'de hesaplanan Δ_l değerinin normalize edilmiş halidir. Normalize edilmiş değişim değeri, Denklem (12)'de bulunan iterasyonlar arası değişim değerinin, aktarımı yapılan verilerin maksimum ve minimum mutlak değerlerin arasındaki fark ile aktarılan verilerin ortalamasının toplanıp yarıya bölünmesi sonucu elde edilen değere oranlanması ile bulunur.

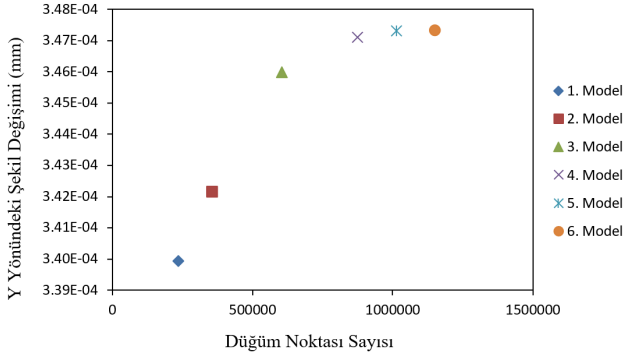
$$RMS = \sqrt{(\hat{\Delta}_l)^2} \quad (14)$$

Yakınsama kontrolü Denklem (13)'te verilen ifade ile yapılır.

2.5 Ağdan Bağımsızlık ve Analiz Sonuçları

Bu çalışmada TurboGrid yazılımı kullanılarak oluşturulan ağ yapısı için, ağ yapısının etkisi incelenmiştir. Ayrıca ağ yapısında bulunan hücre ve düğüm sayısı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, en doğru sonucun elde

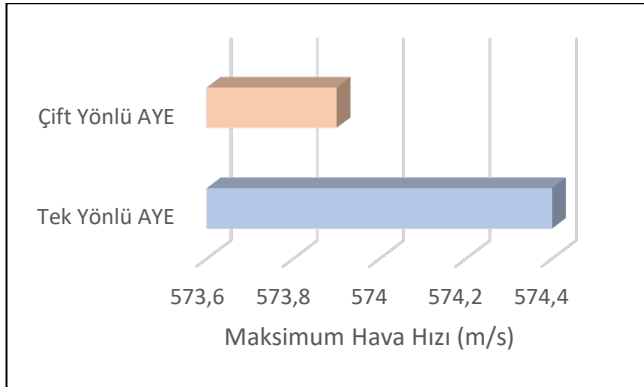
edilebileceği en az sayıda hücre içeren model araştırılmıştır. Şekil 7’de oluşturulan farklı ağ yapılarının düğüm noktası sayıları ve şekil değiştirme sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7. Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları.

Şekil 7’de gösterilen grafik farklı ağ yapısındaki modellerin sonuçlarını göstermektedir. Modellerdeki düğüm noktası sayısı arttıkça, y yönündeki şekil değişimi değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle ilk üç model için sonuçlar oldukça farklı çıkmaktadır. Ancak 4, 5 ve 6. Modellerin sonuçları birbirine oldukça yakındır. Bu sebeple, bu üç modelden en az hücre ve düğüm noktasına sahip olan model 4 uygun ağ yapısı olarak seçilmiştir. Model 4’te yaklaşık 880000 düğüm noktası ve 830000 hücre vardır. Sabit kanatçık akış hacmine de model 4’te kullanılan ağ yapısı özellikleri ile sayısal ağ oluşturulmuş ve takip eden analizler bu ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinde türbülans modeli olarak ‘Shear Stress Transport (SST)’ modeli kullanılmıştır.

Şekil 1’de verilen döner ve sabit kanatçık yapısı için tek yönlü ve güçlü bağlı çift yönlü AYE analizlerinde havanın akış hacminde ulaşabileceği maksimum hızlar incelenmiş olup, elde edilen hız değerleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Tek Yönlü ve Güçlü Bağlı Çift Yönlü AYE Analizlerinde Maksimum Hava Hız Değerleri

Her iki çözümden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında % 0.09 oranında fark olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonucun ışığında, yapısal bir değişimin incelenmeyeceği analizlerde tek yönlü AYE sonuçlarının da hata oranının düşük olduğu gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ

CFD yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde tam yakınsama elde edilmesi, çözümlerin doğruluğu açısından büyük öneme sahiptir. Bu nedenle, yapılan analizlerde ağ bağımsızlığı gibi duyarlılık analizi yapılması gerekir. Sistemlerin birleştirilmesinde yöntemlerin doğru bir şekilde kavranması, doğru çözümlerin elde edilmesine yardımcı olabilir.

Bu çalışmada AYE analizlerinde kullanılan farklı yaklaşımlar ele alınmış ve hangi yaklaşımın hangi tür ihtiyaçlara cevap verebileceği değerlendirilmiştir. Ele alınan her bir yöntemde de hesaplama süreçlerinde bazı temel farklılıklar vardır ve bu nedenle sayısal çözümler de farklılık gösterir.

Tek yönlü AYE analizlerinde akışın, yapısal kısmın şekil değişiminden etkilenmediği kabulü yapılmaktadır. Bu yöntemde akışkan ve yapısal çözümler ayrı ayrı çözüm yaparlar. İlk olarak HAD analizi çözüm sonuçları elde edilir. HAD analizinden elde edilen basınç dağılımı yapısal çözücü SEM’e aktarılır. Akışın oluşturduğu etki SEM’de bir sınır şartı olarak işleme alınarak tek yönlü AYE analizi gerçekleştirilebilir.

Yapısal kısmın şekil değişiminden akışkan kısmının az etkilendiği durumlarda kullanılan tek yönlü AYE analizleri, çift yönlü analizlerle karşılaştırıldığında oldukça hızlı sonuç vermektedir. Ancak unutulmamalıdır ki, yapısal kısımda meydana gelen değişikliklerin akış hacmine etkisinin ihmal edilmemesi gereken durumlarda, çift yönlü AYE analizleri uzun zaman gerektirmesine rağmen tercih edilmelidir.

Çift yönlü yaklaşımda, şekil değiştiren yapısal kısmın akışkan bölgesine etkisi ihmal edilmez. İteratif çözümler uygulanarak, yapısal kısımda meydana gelen şekil değişimi akışkan hacminin geometrisine uygulanarak HAD analizi tekrarlanır. HAD ve SEM çözümleri sırayla çözüme dahil olurlar ve şekil değişimini, basınç değerlerini ve ağ yapılarını birbirlerine aktarırlar.

Tek yönlü ve çift yönlü analiz sonuçlarında maksimum hava hızı sırasıyla 573.9 m/s ve 574.4 m/s’dir. Ortaya konulan probleme göre yapısal değişimin önemli olmadığı durumlarda tek yönlü AYE sonuçları ile çift yönlü AYE analiz sonuçlarının çok yakın olduğu yapılan analizle doğrulanmıştır. Bu nedenle şekil değişim değeri çok yüksek olmayan yapılarda ve akışkan hacminin yapısal şekil değişiminden çok etkilenmediği durumlarda tek yönlü AYE analizlerini tercih etmek daha mantıklıdır. Çift yönlü analizlerde karşılaşılan uzun zaman gereksinimi ve yakınsama zorluğu gibi etkenler tek yönlü analizleri daha öne çıkarmaktadır.

Gaz türbinli motorlarda, türbin kanatçıklarının yorulma ve ömür davranışlarını incelemek gerekirse basınç ve şekil değişim değerlerine bağlı olarak kanatçıklar üzerinde oluşan gerilmelerin değişimleri incelenmelidir. Analizi yapılacak probleme uygun yöntemin seçimi uygun doğrulukta ve düşük maliyetli bir analiz elde edilmesine yardımcı olabilir.

AYE analizleri kullanılarak, jet motor parçalarının tasarımında, yüksek maliyetli deneysel çalışmalar ve testlerden önce; zaman, iş gücü ve ekonomik tasarruf için tasarımların mükemmelle ulaşmasında bu analizlerin kullanılması büyük kolaylıklar sağlayacaktır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

ALTUN: Çalışma konsepti ve tasarım, taslağın oluşturulması, revizyon, yüksek lisans tezinde danışmanlık.

MADENOĞLU: Yüksek lisans tez çalışması, çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması

Kaynaklar

[1] S. K. Chakrabarti, "Numerical Models in Fluid- Structure Interaction: (Advances in Fluid Mechanics)," 1st ed. WIT Press, 2005, 42.

[2] E. H. Dowell and K. C Hall, "Modeling of fluid-structure interaction," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 33, pp. 445-490, 2001.

[3] H. J.-P. Morand and R. Ohayon, "Fluid-Structure Interaction: Applied Numerical Methods," 1st ed., Wiley, 1995.

[4] G. Hou, J. Wang and A. Layton, "Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction - A Review," *Commun. Comput. Phys.*, vol. 12, no. 2, pp. 337-377, 2012.

[5] K. Doğan, "Yatay eksenli rüzgar türbin kanatlarının akışkan-yapı etkileşimi yönünden incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, 2014.

[6] D. W. MacPhee and A. Beyene, "Experimental and fluid structure interaction analysis of a morphing wind turbine rotor," *Energy*, vol. 90, pp. 1055-1065, 2015.

[7] C. H. Jo, D. Y. Kim, Y. H. Rho, K. H. Lee and C. Johnstone, "FSI analysis of deformation along offshore pile structure for tidal current power," *Renewable Energy*, vol. 54, pp. 248-252, 2013.

[8] R. L. Campbell and E. G. Paterson, "Fluid-structure interaction analysis of flexible turbomachinery," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 27, pp. 1376-1391, 2011.

[9] M. Akgül, "Static aeroelastic analysis of a generic slender missile using a loosely coupled fluid structure interaction method," Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, 2012.

[10] R. Kamakoti and W. Shyy, "Fluid-structure interaction for aeroelastic applications," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 40, pp. 535-558, 2004.

[11] P. Dhopade, A. J. Neely and J. Young, "Fluid-structure interaction of gas turbine blades", *17th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Auckland, New Zeland, 4s, 2010.

[12] E.V. Mekhonoshina, V. Y. Modorskii and V. Y. Petrov, "Numeric simulation of the interaction between subsonic flow and a deformable profile blade on the compressor experiment phase," *International Conference Information Technology and Nanotechnology*, Samara, Russia, 8s, 2015.

[13] I. Ubulom "Influence of fluid-structure interaction modelling on the stress and fatigue life evaluation of a gas turbine blade," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 235, no. 5, pp. 1019-1038, 2021.

[14] G. Hou, J. Wang, A. Layton, "Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction-A Review," *Communications in Computational Physics*, Vol.12, No.2, 337-377, 2012.

[15] G. Madenoğlu, "Jet Motoru Güç Türbini Kanatçıklarının Akışkan Yapı Etkileşimi Analizleri ile İncelenmesi," Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri, Nisan 2017.

[16] F.-K. Benra, H. J. Dohmen, J. Pei, S. Schuster and B. Wan, "A Comparison of One-Way and Two-Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid-Structure Interactions," *Journal of Applied Mathematics*, 1-16, 2011.

[17] ANSYS V. 17, 2017 System Coupling User's Guide.

Simgeler Dizini

E	Young modülü	$\sigma_{ij,i}$	Yapısal gerilme tensörü
e_{ij}	Deformasyon hızı	τ_{ij}	Viskoz gerilme tensörü
f_i	Gövde kuvveti	ϑ	Poisson oranı
p	Statik basınç	ε_{ij}	Şekil değiştirme hızı tensörü
v	Hız	μ	Viskozite
Y_s	Yapısal bölge		
Y_f	Akışkan bölge	Üst İndis	
Γ_s	Akışkan-yapı ara yüzü	f	Akışkan ile ilişkili miktar
ρ	Yoğunluk	s	Yapı ile ilişkili miktar