



Computational fluid dynamics study of lift enhancement on a NACA0012 airfoil using a synthetic jet actuator

İbrahim Efdal Çanlıoğlu¹, Emre Kara^{2*}

¹Gaziantep Metropolitan Municipality, Science Gaziantep Building, Gaziantep, 27090, Türkiye

²Department of Aerospace Engineering, Faculty of Aeronautics and Aerospace, Gaziantep University, Gaziantep, 27310, Türkiye

Highlights:

- Grid convergence index test
- Loudspeaker type synthetic jet actuator computational fluid dynamics analysis
- Lift enhancement on an airfoil with loudspeaker type synthetic jet actuator

Keywords:

- Computational fluid dynamics
- Dynamic mesh
- Flow separation
- Lift enhancement
- Synthetic jet actuator

Article Info:

Research Article

Received: 19.06.2022

Accepted: 27.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1132881

Correspondence:

Author: Emre Kara

e-mail:

emrekara@gantep.edu.tr

phone: +90 342 317 3517

Graphical/Tabular Abstract

Velocity contours around a NACA0012 airfoil is shown with loudspeaker type synthetic jet actuator (SJA) is activated in Figure A. Under Reynolds number (Re) = 7.4×10^5 and angle of attack (α) = 10° condition, the flow is strongly attached to the surface that can be seen closely in Figure A. As a selected study from the paper, in Figure A, at $Re = 116800$ relative the airfoil chord, lift coefficient (C_L) increases linearly till the flow separation at α (12°) for both cases of SJA-on and SJA-off. In SJA-on scenario, C_L increases around 2.3 compared to 0.9 that is in SJA-off scenario. As shown in Figure A, lift-to-drag ratio (C_L/C_D) stays low till 8° , then rises up for both cases but SJA-on case catches more steep increase till the stall angle of attack 12° . After maximum C_L/C_D is reached, stall becomes effective for both and drops the ratio down by 75%. SJA is effective for all α tested compared to cases without actuation in this application.

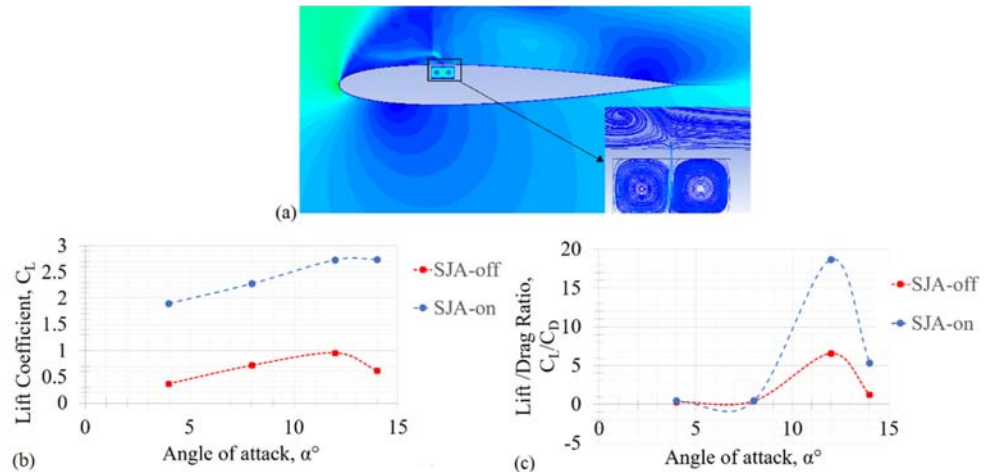


Figure A. Velocity contours of current study with loudspeaker type SJA at 2200 Hz - 1 mm orifice diameter configuration, a) around NACA0012 airfoil with a close-up view of SJA-on and comparisons of b) C_L - α , c) C_L/C_D - α curves for NACA0012 airfoil at $Re = 116,800$ with SJA-on and SJA-off configurations

Purpose: In this study, a loudspeaker type SJA is scrutinized in 2D CFD analyses using dynamic mesh method. It is aimed to find which frequency-orifice diameter duo of SJA can be used to enhance aerodynamics characteristics of NACA012 airfoil.

Theory and Methods: CFD methods are employed in ANSYS Fluent flow solver module according to RANS and Unsteady RANS (URANS) equations with SST $k-\omega$ turbulence model closure. As the result of grid convergence index test, 34700 element size is selected according to C_L and C_D calculations.

Results: CFD analysis are employed at various α and Re values with 1500-to-2200 Hz and 1mm-to-3mm orifice diameter configurations compared to selected reference studies for C_L . C_L changes with respect to reference studies are noted utmost for "1 mm orifice diameter, 2200 Hz frequency". Then, C_L and C_L/C_D vs. α characteristics are investigated for both SJA-off and SJA-on cases of the airfoil.

Conclusion: At the optimum configuration under different Re cases, C_L and C_L/C_D enhancements by SJA are shown. According to the results, the lift coefficient is effectively increased at low to moderate Re .



Sentetik jet eyleyici kullanarak NACA0012 kanat profilinde kaldırma kuvveti iyileştirmesinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışması

İbrahim Efdal Çanlıoğlu¹, Emre Kara^{2*}

¹Gaziantep Büyükşehir Belediyesi, Bilim Gaziantep Binası, Gaziantep, 27090, Türkiye

²Gaziantep Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, 27310, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Ağ Yakınsama İndeksi testi
- Hoparlör tipi sentetik jet eyleyici hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi
- Kanat profilinde kaldırma katsayısının hoparlör tipi sentetik jet eyleyiciyle iyileştirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.06.2022

Kabul: 27.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1132881

Anahtar Kelimeler:

Dinamik ağ,
hesaplamalı akışkanlar
dinamiği,
kaldırma katsayısı,
sentetik jet eyleyici

ÖZ

Bu çalışmada, hoparlör tipi sentetik jet eyleyici (SJE) kullanarak iki boyutlu sayısal analizler yapılmıştır. Kanat profilinin aerodinamik özelliklerini geliştirmek için SJE'nin hangi frekans ve jet orifis çapında olması gerektiğinin bulunması amaçlanmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metodu, ANSYS Fluent akış çözücü modülünde, SST k- ω türbülans modeliyle Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) ve daimi olmayan RANS (URANS) denklemlerinde göre kullanılmıştır. Ağ yakınsama indeksi testi HAD analizlerinde ve SJE-kapalı konfigürasyon çalışmasının HAD analizlerinde RANS, diğer tüm analizlerde URANS çözümleri yapılmıştır. Ağ yakınsama indeksi testi sonucunda, düğüm sayısının 34700 olduğu Mesh4 isimli ağ yapısı hem kaldırma hem de direnç katsayısı hesabına göre en uygun ağ yapısı olarak seçilmiştir. Seçilen referans çalışmalara göre farklı açı ve Reynolds sayılarında, 1500'den 2200 Hz'e frekans ve 1 mm'den 3 mm'ye orifis çapı değerlerinde HAD analizleri yapılmış, kaldırma katsayısı SJE-kapalı ve SJE-açık durumlarında kanat profili üzerinde incelenmiştir. Son olarak, SJE tarafından C_L ve kaldırma-direnç oranı (C_L/C_D) iyileştirmesi farklı konfigürasyonlar altında karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre bu katsayılar, düşük ve orta değerlerdeki Reynolds sayılarında etkili bir şekilde artmıştır.

Computational fluid dynamics study of lift enhancement on a NACA0012 airfoil using a synthetic jet actuator

HIGHLIGHTS

- Grid Convergence Index test
- Loudspeaker type synthetic jet actuator computational fluid dynamics analysis
- Lift enhancement on an airfoil with loudspeaker type synthetic jet actuator

Article Info

Research Article

Received: 19.06.2022

Accepted: 27.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1132881

Keywords:

Computational fluid
dynamics,
dynamic mesh,
lift coefficient,
synthetic jet actuator

ABSTRACT

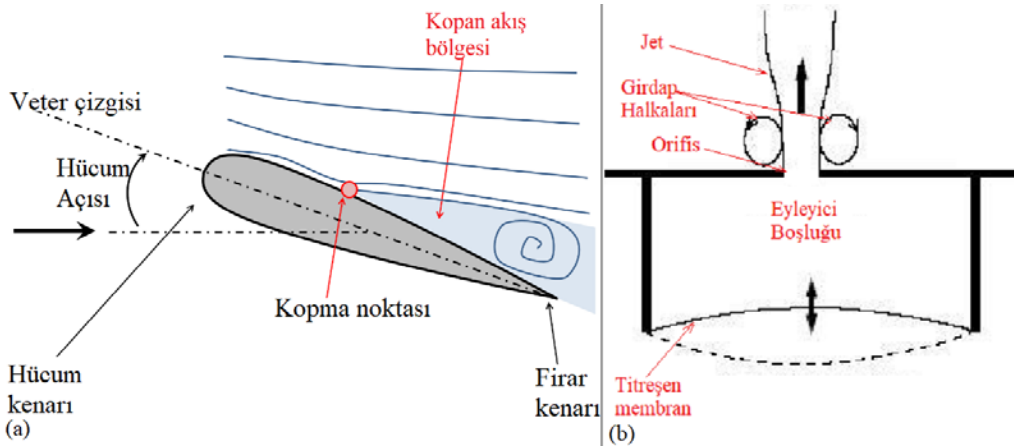
In this study, a loudspeaker type synthetic jet actuator (SJA) is scrutinized in two dimensional numerical analysis. It is aimed to find which frequency and jet orifice diameter of SJA should be to enhance aerodynamics characteristics of the airfoil. Computational fluid dynamics (CFD) methods are employed in ANSYS Fluent flow solver module according to Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) and Unsteady RANS (URANS) equations with SST k- ω turbulence model closure. RANS solutions are employed in grid convergence index CFD analysis and SJE-off configuration CFD analysis whereas URANS solutions are employed in the rest of the analysis. As the result of grid convergence index test, Mesh4 with 34700 element number is selected as the most suitable one according to lift and drag coefficient calculations. CFD analysis are employed at various angles of attacks and Reynolds numbers at 1500-to-2200 Hz and 1mm-to-3mm orifice diameter configurations compared to selected reference studies and lift coefficient is investigated for both SJA-off and SJA-on cases of the airfoil. Lastly, C_L and lift-to-drag ratio (C_L/C_D) enhancement by SJA at this configuration. According to the results, these coefficients effectively increased at low and moderate Reynolds numbers.

1. Giriş (Introduction)

Akış iyileştirme yöntemleri (yüzeyden ayrılmanın geciktirilmesi ve kaldırma kuvvetinin iyileştirilmesi) aerodinamik bir yapı üzerinde gelişebilecek akış kopmasını ötelemek veya engellemek için geliştirilen yöntemlerdir. Bu yöntemler kullanılarak daha iyi aerodinamik performans katsayıları (yüksek kaldırma katsayısı ve düşük direnç katsayısı gibi) elde edilebilmektedir. Akış iyileştirme yöntemlerinden biri olan sentetik jet eyleyiciler (SJE), yakıt tasarrufu, direnç katsayısının azaltılması ve emisyon kontrol sistemleri için seçilmektedir. Direnç katsayısının tüm uçuşlar için ortalama sadece %1 azaltılması bile bir ticari uçağın yıllık yakıt kaybında milyonlarca dolar geri kazanım sağlayabilmektedir [1]. SJE'ler akış kütlesi katmadan ana akışı uyaran aygıtlardır [2]. Farklı yapılarda (plazma jet, hibrit sentetik) üretilebilen akışkan/akustik eyleyiciler farklı uygulama alanlarına da hitap etmektedir (aktif soğutma, ısı işlem gerektiren gıdalarda hızlı ısıtma, itki yönlendirme, aerodinamik şekillendirme, otonom sualtı araçların manevra etkinliği, biyomedikal uygulamalarda mikro alg katkısı gibi). Havacılık alanı özelinde düşünüldüğünde, kanat üzerindeki sınır tabaka kopması (Şekil 1a) kaldırma / direnç oranının istenmeyen şekilde düşmesine neden olmaktadır [3].

SJE, kanat yüzeyinden kopan sınır tabakanın tekrar bağlanmasını ve kaldırma / direnç oranının tekrar yükselmesini sağlamaktadır. Sentetik jet eyleyicilerin temel çalışma prensibi Şekil 1b'de gösterilmiştir. Titreşen membran, üfleme adımıyla jetin eyleyici boşluğundan geçip pozitif momentum yaratarak orifisten çıkmasını ve emilme adımıyla jetin düşük momentum bölgesi olan eyleyici boşluğuna doğru içeri çekilmesini sağlamaktadır. Bu süreçte, harici bir hava kaynağı kullanılmamaktadır, bu nedenle jet, zaman-ortalamasına göre "sıfır-kütle" sahibidir. Titreşim, elektrik sinyali ile bir piezo-elektrik malzemenin uyarılmasıyla veya yine elektrik sinyali ile akustik sistemin (mesela bir hoparlör) diyaframının uyarılmasıyla elde edilebilir [4]. Kanat üzerinde kopma kontrolü için kullanılan sentetik jetlerin üç tip eyleyici vasıtasıyla eyleme geçmeleri sağlanabilir: Elektrodinamik, mekanik ve akışkan/akustik eyleyiciler. Elektrodinamik ve mekanik olan eyleyiciler hem çabuk yıprandıkları için hem de hantal ve pahalı oldukları için son 10 yıldır daha az kullanılmaktadır (örneğin; kanat arkasında kullanılan hareketli kanatçıklar) [5]. Yakın zamanda kanat profilleri için geliştirilen şekil en iyileme (optimizasyon) çalışmaları ile akış kontrolü sağlanmasında en iyilenmiş (optimum) limitlere ulaşıldığı için artık çalışılması ve geliştirilmesi gereken teknikler SJE'lerle ilgili olmaktadır [6-8]. SJE kullanımı ile ilgili kayda değer araştırma makaleleri aşağıdaki paragrafta özetlenmiştir:

Amitay vd. [9] "Sıfır Net Kütle Akışı" (ZNM) sentetik jet eyleyicilerin akış ayrılmasını kontrol etmedeki verimliliklerinin özellikle endüstriyel uygulamalarda pratik çözümler yaratabileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmadan 3 yıl sonra, Mallinson vd. [10] dairesel orifis içeren bir SJE üretmiş ve akış ayrılmasını deneysel ve sayısal açıdan incelemişlerdir. Sayısal çalışmalarında, mikron boyutlarında orifis içeren SJE'lerin, dış akışa daha fazla nüfuz ettiğini gözlemlemişlerdir. Ugrina [11], doktora tezi çalışmasında 2200 Hz frekansında çalışan piezo-elektrik tipi SJE ile farklı Reynolds sayılarında (Re) deneysel çalışmalar ortaya koymuştur. Kullanılan SJE, bu çalışmadaki gibi çeyrek veter konumunda kanat içine gömülü gösterilmiştir. Çalışmada, NACA0012 kanat profili üzerinde tek bir SJE ile deneysel olarak %4 kaldırma katsayısı iyileşmesi gözlemlenmiştir. You ve Moin [12] sentetik jetlerin, girdaplı yapıların oluşumu ile sınır tabakaya momentum ekleyerek ve çıkararak sınır tabaka akışını dengelemek için akış ayrılması kontrolü sağlayabileceğini ifade etmişlerdir ve NACA0015 kanadı üzerindeki girdap yapılarını Büyük Girdap Benzetimi (LES) yöntemiyle başarılı bir şekilde analiz etmişlerdir. Bu çalışma, bunu izleyen araştırma makalelerinin "girdap oluşumu ile sentetik jet verimliliği" ilişkisinin analizine yönelmelerini sağlamıştır. Bu çalışmada, SJE frekansı, genliği, eyleme lokasyonu gibi değişkenlerin sentetik jet performansına etkisi olduğu gösterilmiştir. Örneğin, 16,6 °'lik bir hücum açısında NACA0015'in veter çizgisi orta bölgesinde gözlenen ayrık akışın LES ile deneysel verilerle uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir. SJE aktive edildiğinde, akış ayrılması orta bölgeden aşağıya ertelenebilmiş, sonuçta kaldırma katsayısı da belirgin şekilde artırılmıştır. Bu çalışmadan bir sene sonra, Raju vd. [13] zorlama frekansının doğrusal olmayan akış dinamiğine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, Re=40000 değerindeki akışta, NACA4418 kanat profilinde tutunma kaybı sonrası akış durumu incelenmiştir ve SJE'nin kaldırma/direnç oranında belirgin bir artış sağlamışlardır. Çalışmalarının sonucunda, zorlama frekansının, ayrılma kabarcığı oluşumunda elde edilen frekansa yakın ve kanadın doğal frekansı ile aynı olduğu durumda seçildiğinde en iyilemenin sağlandığını belirtmişlerdir. Jain vd. [14] aksel simetrik sentetik jetin sayısal benzetimini çalışmışlardır. Titreşen diyaframın benzetimi ilk başta hareketli sınır koşulu sinüzoidal yaklaşım ile yapılmıştır. Fakat sinüzoidal yaklaşımın titreşen diyaframının gerçeğe yakın çözümünü vermediğini belirtmiş, alternatif olarak 600 ile 700 Hz arasında değişen Helmholtz frekansının kullanılmasını önermişlerdir. Ayrıca, diyaframın doğal frekansının diyaframın ağırlığı, boyutları ve hoparlör konisinin titreşim hareket genliğine bağlı olarak değişebileceğini belirtmişlerdir. Lv vd. [15], bu konu üzerine eğilmiş ve SJE'lerin geometrik verileri ile uyarım frekansının etkisini iki boyutlu, daimi olmayan Reynolds ortalamalı Navier-Stokes



Şekil 1. a) Ayrık Akış [2], b) Sentetik jet eyleyici [4] (a) Separated Flow [2], b) Synthetic jet actuator [4])

(URANS) denklemlerini Menter'in kayma gerilmesi taşınımı (SST) $k-\omega$ türbülans modeliyle birlikte ANSYS Fluent akış çözücüsünde uygulamışlardır. Sonuçta, SJE'nin geometrik değişkenlerinin özellikle zaman-ortalama orifis çıkış hızına olumlu etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir. Benzeri bir çalışmada, Macovei ve Frunzulica [16] 0,4 ile 1,2 mm aralığında değişen beş genlik değerinde ve 50 ile 400 Hz aralığında değişen sekiz frekansta çalışan SJE'nin düz plaka üzerine yerleştirilmiş durumdayken sayısal benzetimini ANSYS Fluent akış çözücüsünde yapmışlardır. Yapılan çalışmada düz SJE yerine akış yönüne eğimli verilen orifisi olan SJE'nin daha etkili bir biçimde kopmayı engellediğini gözlemlemişlerdir. Gil ve Strzelczyk [17] hoparlör tipi SJE'nin performans ve verimini tartışmışlardır. Deneysel çalışmalarında, sabit sıcaklık hızölçeri kullanarak akış alanına yakın hız ölçümleri yapmışlardır. Farklı orifis geometrileri ve farklı giriş frekansları kullanarak verimi, Re, momentum hızını giriş frekansına bağlı birer fonksiyonla tanımlamaya çalışmışlardır. Sonuçta, hoparlör tipi SJE'de maksimum $Re=22600$ olduğu ve bu durumdaki veriminin %4,82 olduğunu deneysel olarak saptamışlardır. Boualem vd. [18] SJE akış karakteristiğini NACA0015 kanat profili üzerinde sayısal olarak çalışmış, sonuçta SJE yardımıyla kaldırma ve direnç katsayılarında gelişim gözlemlemişlerdir. Kontrol olmayan akışa göre, akış kontrolü için SJE kullanımının, kaldırma katsayısını yaklaşık %13,3 artırırken direnç katsayısını yaklaşık %52,7 düşürdüğünü belirtmişlerdir. ASPIC projesinde bir hava aracında akış ayrılması kontrolü ve aerodinamik performans kontrolü için yüksek performanslı, yenilikçi bir SJE tasarlanmıştır [19]. SJE'yi ONERA HAD yazılımı ile ticari bir uçağın dikey kuyruk hattına yerleştirilmiş şekilde sayısal benzetimini uygulamışlardır. İkinci bölümde, deneysel çalışmalarında sekiz adet ASPIC SJE'yi kuyruk modeli içine monte etmiş ve rijit-hermetik piston yardımıyla hava emme-üfleme kontrolünü hassas şekilde uygulamışlardır. $164 \times 94 \times 57 \text{ mm}^3$ hacmindeki bir SJE'nin en uygun uyarı frekansı aralığının 200 ile 300 Hz arasında değiştiğini belirtmişlerdir. HAD çalışmalarında, görsel çıktı olarak sadece hız kontürlerini; deneysel çalışmalarında ise çıkış jet hızına karşılık kavite basıncı ölçümü sonuçlarını vermişlerdir. Bu veriler ışığında, eyleyici kavitesi ve çıkış yarığı geometrisini en iyilemeye çalışmışlardır. Obeid vd. [20], HAD ile birlikte sistem tanımlama çalışmasını NACA0015 kanat profili üzerinden akış ayrılması için gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, SJE'yi hücum kenarı bölgesine yerleştirmiş ve kullandıkları kontrolcü ile akışı tanımlamaya çalışmışlardır. HAD çalışmalarında, "realizable $k-\epsilon$ " türbülans modelini URANS denklemlerine ekleyerek $Re=106$ durumunda benzetim yapmışlardır. Sonuçta, SJE'de kontrolcünün kullanımının kaldırma katsayısını 0,787'den 1,315'e (%67,1 artış) yükselttiğini sayısal olarak göstermişlerdir. Son yıllarda, SJE ile ilgili yapılan çalışmalar yapının geometrisi ve en iyilenmiş diyafram frekansını belirleme üzerine gelişmiştir. Palumbo ve de Luca [21] akış kontrolünde çift-orifisli SJE'lerin kullanımının nasıl olması gerektiğini deneysel ve sayısal açıdan nitelendirmişlerdir. Bunun için, deney aşamasında eyleyicinin frekans tepkisini belirlemek amacıyla farklı uyarı frekansları denenmiştir. Doğrudan Sayısal Benzeşim (DNS) yöntemiyle, jet hızının maksimum olduğu durumdaki uyarı frekansı bulunmuştur. Çift sentetik jet çıkışı etkisiyle hem zaman-ortalama akış hızı ile jetlerin hızının jet yönünde değişim kontürleri gösterilmiş hem de akış ayrılmasında orifislerin aralarındaki boşluğun orifis çapına oranının etkisini göstermişlerdir. DNS yöntemiyle tüm akış alanı doğrudan, herhangi bir modele ihtiyaç duymadan çözüldüğü için deneysel sonuçlarla tutarlı görsel çıktılar elde etmişlerdir. Sonuçta, orifislerin aralarındaki boşluğun orifis çapına oranının 5 olduğu durumun maksimum jet hızı ve dolayısıyla minimum akış ayrılması sağladığını göstermişlerdir. Yukarıda bahsedilen çalışmalara bakıldığında, genelde SJE'lerin akış ayrılmasını ötelemek veya engellemek için ve dolaylı olarak sayısal açıdan kaldırma katsayısını arttırmak için kullanıldığı görülmektedir. Abdelrauf vd. [22] NACA0012 kanat profili üzerinde dielektrik bariyer deşarj (DBD) tipi plazma jet eyleyicinin aktif akış kontrolünü sayısal

benzetimle çalışmışlardır. DBD tipi plazma jet eyleyicinin açık durumunda kapalı duruma göre maksimum kaldırma katsayısının %6,1 arttığını, tutunma kaybı açısının da 2° ötelendiğini göstermişlerdir.

Vaddi vd. [23] doğru akım miktarı artırılmış DBD (DCA-DBD) tipi eyleyicinin NACA0012 kanat profili üzerinde verimini deneysel olarak araştırmışlardır. Direnç ve kaldırma katsayısı değerlerini plazma jet eyleyici açık ve kapalı durumdayken ölçmüşlerdir. Açık durumda, $Re=2,01 \times 10^5$ ile $Re=3,35 \times 10^5$ aralığındayken direnç katsayısının neredeyse %50 düştüğünü göstermişlerdir. Açıklamalarında, bu aralıktan daha yüksek Reynolds sayısı değerlerinde eyleyicinin veriminin azaldığını, maksimum kontrolün bu aralıktan da düşük rüzgâr hızlarında ulaşıldığını belirtmişlerdir.

Castaneda vd. [24] NACA0012 kanat profili üzerinde dinamik tutunma kaybı kontrolü için nanosaniyelik darbe ile sürülen DBD tipi (NS-DBD) eyleyici kullanımını $Re=3 \times 10^5$ ile $Re=5 \times 10^5$ aralığında deneysel olarak göstermişlerdir. Bu çalışmada nanosaniyelik yerel ısı çarpılma kullanımıyla, Vaddi vd.'nin [23] çalışmalarından daha yüksek Reynolds sayısı değerinde kontrol verimini sağladıklarını göstermişlerdir. Başka bir NS-DBD eyleyici, Durasiewicz vd. [25] tarafından geliştirilmiştir ve daha yüksek Reynolds sayısı ($7,4 \times 10^5$) mertebesinde NACA0012 kanat profili üzerinde akışı ayrılmamaya zorlayarak tutunma kaybı kontrolünü sağlamışlardır.

Duvigneau vd. [26] emme-üfleme tipi SJE'nin maksimum akış kontrolü sağlanması için NACA0012 kanat profili üzerine hangi bölgeye yerleştirilmesi gerektiğini ve SJE'nin akışa etkisini sayısal olarak göstermişlerdir. Şu anki çalışmada olduğu gibi, zamana bağlı akış çözücüsü olan URANS denklemi çözümlerini kullanmışlardır. Sonuçta, girdapların hangi noktada oluştuğunun ve girdapların şiddetinin, eyleyicinin emme sınırına, girdap kopmasıyla emme-üfleme etkisinin zamana bağlı durumlarına göre değiştiğini belirtmişlerdir.

Nae [27] yüksek hücum açılarında SJE'nin etkinliğini tutunma kaybı durumunu kontrol edip geliştirmek amacıyla NACA0012 kanat profili üzerinde sayısal benzetimle çalışmıştır. Türbülans modeli $k-\epsilon$ seçilmiş ve $Re=3 \times 10^5$ mertebesinde iken analizler gerçekleştirilmiştir. 1500 Hz'de titreşen diyaframla SJE'nin akış ayrılmasını kontrol etmede etkili olduğunu, tutunma kaybı durumunun da SJE'nin üfleme rejimi ile idare edilebileceğini belirtmiştir.

Yousefi vd. [28] farklı jet genişliklerinin emme-üfleme kontrolü üzerindeki etkisini NACA0012 kanat profili için $Re=5 \times 10^5$ mertebesinde iken RANS denklemleri kullanımıyla karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, jet genişliğinin yatay üfleme durumdaki konfigürasyonda, kaldırma-direnç oranını arttırdığını, fakat yüzeye dik üfleme durumunda bu değerler doğrusal şekilde düştüğünü göstermişlerdir. Veter uzunluğunun hücum kenarından %2,5 uzaklığına konulmasının da bu yatay üfleme rejiminde maksimum kaldırma katsayısını sağladığını göstermişlerdir.

Luo vd. [29] SJE'nin NACA0012 kanat profili çevresindeki akış üzerinde etkisini sayısal benzetimle çalışmış, kaldırma ve direnç katsayılarında SJE kullanımıyla geliştirmeler olduğunu göstermişlerdir. $Re=5 \times 10^5$ mertebesinde iken, kaldırma katsayısının %40 arttığını, direnç katsayısının da %20 düştüğünü sayısal çözümlerinin sonucunda göstermişlerdir.

Bu çalışmada, hoparlör tipi sentetik jet eyleyici (SJE) kullanarak iki boyutlu sayısal analizler yapılmıştır. Kanat profilinin aerodinamik özelliklerini geliştirmek için SJE'nin hangi frekans ve jet orifis çapında olması gerektiğinin bulunması amaçlanmıştır. Yukarıda kısaca özetlenen, NACA0012 kanat profili için çalışılmış son sekiz

Tablo 1. HAD analizi ile karşılaştırılacak referans çalışmalar (Reference studies to compare with current CFD analysis)

Referans çalışma	Eyleyici tipi	Analiz tipi	Re
Abdelraouf vd. [22]	DBD Plazma	Sayısal	$10,27 \times 10^5$
Vaddi vd. [23]	DBD Plazma	Deneyisel	$3,35 \times 10^5$
Castaneda vd. [24]	NS-DBD Plazma	Deneyisel	$5,00 \times 10^5$
Durasiewicz vd. [25]	NS-DBD Plazma	Sayısal	$7,40 \times 10^5$
Duvigneau vd. [26]	Emme-üfleme	Sayısal	$20,00 \times 10^5$
Nae [27]	Piezo-elektrik	Sayısal	$18,00 \times 10^5$
Yousefi vd. [28]	Emme tipi	Sayısal	$5,00 \times 10^5$
Luo vd. [29]	Sentetik jet (tipi belirtilmemiştir)	Sayısal	$5,00 \times 10^5$

çalışmanın şu anki hoparlör tipi SJE sayısal benzetim çalışmasının sonuçlarıyla karşılaştırılması Bölüm 3'te yapılmıştır. Seçilen çalışmalar, eyleyici tipi, analizin deneyisel veya sayısal olması, SJE tipi ve karşılaştırılan Reynolds sayısı değerlerine göre Tablo-1'de gösterilmiştir. Yapılan bu çalışmada, frekans değerleri 1500 ve 2200 Hz (seçilen hoparlöre ve referanslara [11, 27] göre) olarak tanımlanmış, Reynolds sayısı değeri ise yukarıdaki referans çalışmalarda verilen değerler olarak ayrı ayrı çalışılmıştır. Literatürde, hoparlör tipi SJE'lerin orifis çapı ile titreşim frekansının kaldırma katsayısına etkisinin farklı Reynolds sayısı değerlerinde sayısal benzetimlerine ve hangi Reynolds sayısı aralıklarında bu tip SJE'lerin etkili olacağına dair yorumlara rastlanmamıştır. Bu yönüyle, bu makalenin literatürde önemli bir açığı kapatacağı düşünülmektedir. Ayrıca, aşağıda verilen farklı eyleyici tipleriyle hoparlör tipi SJE'nin sonuçlarının karşılaştırılması da literatürde bulunmamaktadır. Genelde yapılan çalışmalar, aynı tipteki SJE'lerin karşılaştırılmasını veya sadece SJE-açık ile SJE-kapalı durumdaki analizlerin karşılaştırmalarını içermektedir.

2. Sayısal Yöntemler (Numerical Methods)

Şekil 2'de gösterildiği gibi, SJE'yi içine alan NACA0012 kanat profili çevresindeki çözüm alanı ayrıklaştırılmıştır. Şekil üzerinde, kanadın içerisine konulduğu çalışma bölgesinin ölçüleri ve kanadın çalışma bölgesinin, çözüm alanının giriş, çıkış, alt ve üst çeperlerine olan uzaklıkları, kanat profilinin hücum ve firar kenarları arasındaki karakteristik uzunluk olan veter uzunluğu (c) cinsinden verilmiştir. Buna göre, kanat profilinin hücum kenarının giriş çeperine dik uzaklığı 10c, firar kenarının çıkış çeperine dik uzaklığı 19c, veter hattının alt ve üst çeperlere dik uzaklığı 10c'dir. Ayrıca SJE diyaframının genişliği 0,07c, firar kenarından dik uzaklığı 0,66c'dir. SJE'nin detaylı boyutları Şekil 4'te verilmiştir. Sayısal benzetimler, kanat profili çevresinde CH tipi dörtgen ağ yapısı (Şekil 3a) içinde tamamlanmıştır. Şekil 3b ve Şekil 3c'ye yakından bakıldığında SJE'nin iç yapısının ve orifisten çıkan jet akışıyla serbest akışın buluştuğu bölgenin daha sıkı ağ yapısı içerdiği gösterilmiştir ve bununla ilgili ağ yakınsama indeksi testi de bölüm 2.4'te verilmiştir.

2.1. Geometrik Parametreler (Geometrical Parameters)

Orifis çapları ve uzunluğu, referans çalışmadaki gibi, sırasıyla $d_o = 1$ mm (0,001c), 3 mm (0,003c) ve $h_o = 6$ mm (0,006c) seçilmiştir. NACA0012 kanat profili uzunluğu 1 m alınmıştır [11]. Titreşen hoparlör diyaframının genişliği, $d_c = 70$ mm (0,07c), kavite yüksekliği (elastik yan duvarlar) $h_c = 35$ mm (0,035c) alınmıştır. Bu değerler, AuraSound NS3-193-8A teknik verilerine göre alınmıştır [30]. Tüm geometrik parametreler, Şekil 4'te gösterilmiştir. Hoparlör diyaframının, hareket genliğinin referans çalışmalarda önerildiği gibi [11, 27] 0,006 mm olduğu ve titreşim frekansının 1500 ve 2200 Hz olduğu çözümler bölüm 3'te verilmiş, referans çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. SJE diyafram hareketini sağlamak için tekrar ağ oluşturma yöntemi ile dinamik ağ oluşturulmuştur. Bu hareketin

benzetimi C dilinde yazılan ve aşağıda verilen UDF koduyla gerçekleştirilmiştir.

```
#include "udf.h"
DEFINE_CG_MOTION(membran_mov, dt, vel, omega, time,
dttime)
{
real a, w, pi, v;
pi = 3.1415;
/* hareket değişkenlerinin tanımları */
a = 0.00006; /* 0.00006 m hareket genliği */
w = 2 * pi * 2200; /* 2200Hz frekans */
V = -a * w * sin(w*time);
vel[1] = V;
/* membran hareket kuralının tanımı */
vel[0] = 0;
vel[1] = -a * w * sin(w*time);
vel[2] = 0;
}
```

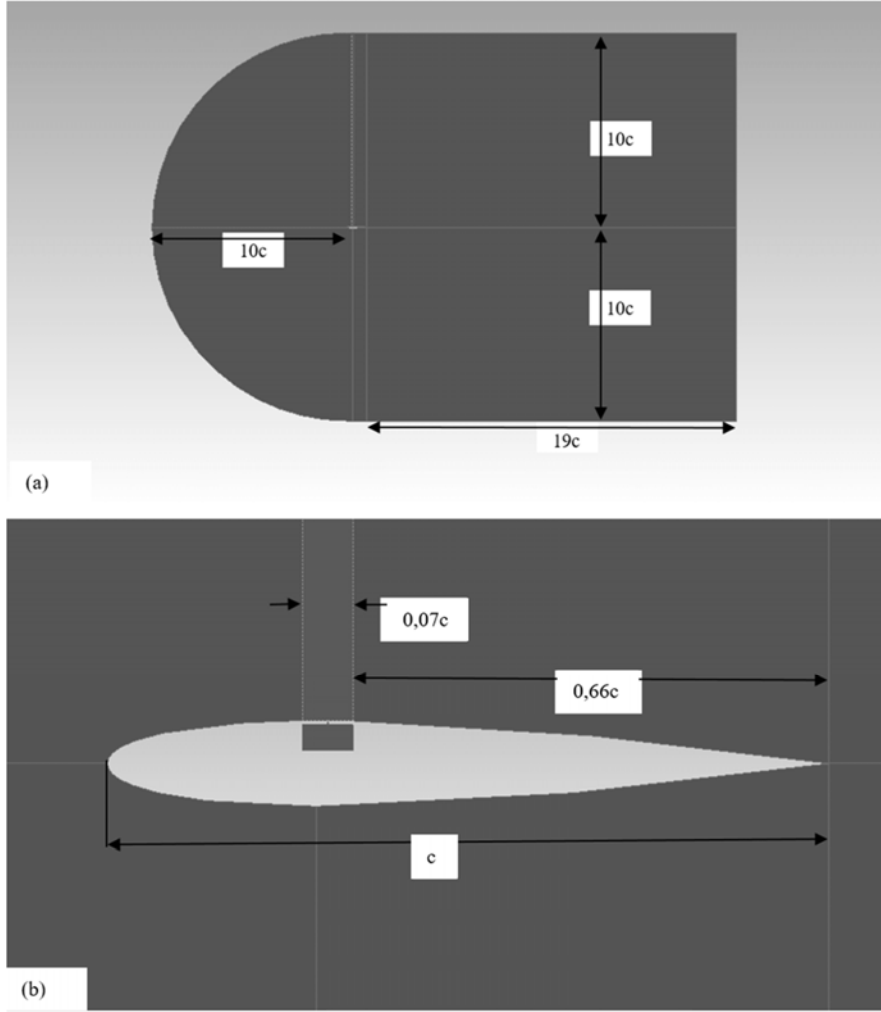
2.2. Temel Denklemler (Governing Equations)

Bölüm 2.1'de gösterilen çözüm alanında, basınç temelli, SST k- ω türbülans modeliyle çalışılmıştır. ANSYS Fluent akış çözücüsünde SIMPLE çözüm metodu kullanılmış, kütlelen korunumu, momentumun korunumu ve türbülans denklemleri için 0,0001 kalıntı (residual) değeri alt sınıra kadar çözüm yapılmıştır. Daimi olmayan analizlerin drag (direnc) ve lift (kaldırma) katsayılarının her bir zaman adımında yakınsamaları gözlemlenmiştir. 1500 Hz ile 2200 Hz aralığında titreşen membran her bir ileri geri hareketini 2/1500 s ile 2/2200 s aralığında yaptığı için maksimum 2/2200 \approx 0,001 s zaman adımı değeri kullanılmıştır. Çözüm sırasında "negatif hacim uyarısı" alındığında ise bu zaman adımı anlık olarak 0,0001 s mertebesine düşürülmüştür ve böylece bu uyarı aşılmıştır. Bu bölümde, URANS denklemlerinin SST k- ω türbülans modeliyle kapatıldığı (tamamlandığı), iki boyutlu ve ağdalı akışkanlarda yerçekimi ivmesiz çözümü için akış alanının diferansiyel denklem formu gösterilecektir. Bu denklemler sırasıyla, kütlelen korunumu (Eş. 1), momentumun korunumu (Eş. 2) ve türbülans denklemleri (Eş. 3 ve Eş. 4) olarak aşağıda gösterilmiştir [31]:

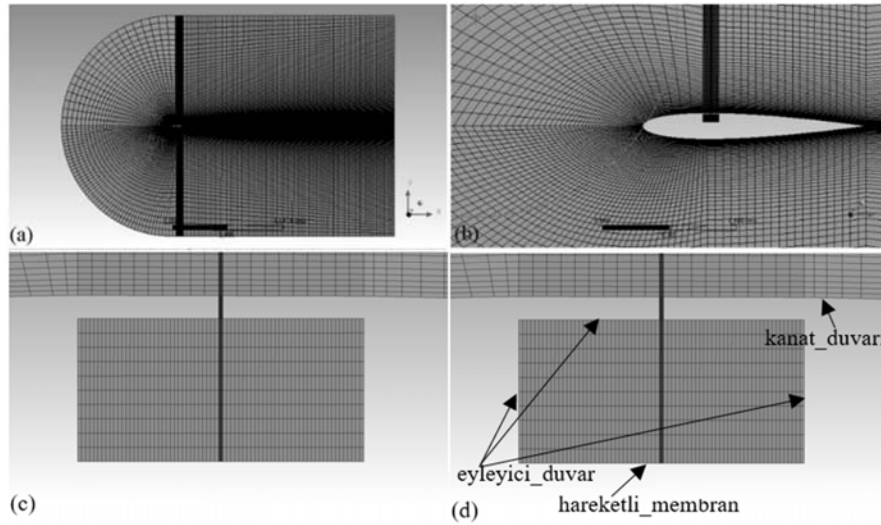
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial(-\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} \quad (2)$$

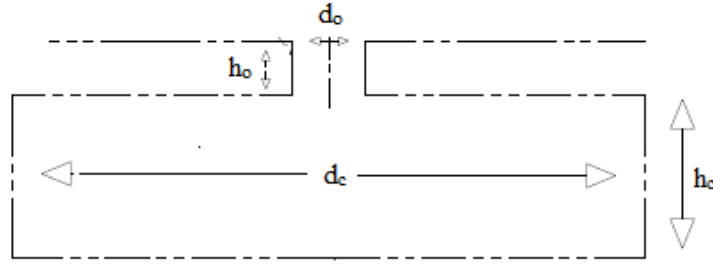
Yukarıdaki denklemlerde, ρ akışkanın (hava) yoğunluğunu, p akışkanın statik basıncını, u_i x- yönündeki hız bileşenini, u_j y-yönündeki hız bileşenini, μ is dinamik ağdalığı temsil etmektedir. Eş. 2'deki $\rho \overline{u_i' u_j'}$ Reynolds kaymazlık terimini modellemek için SST k- ω türbülans modelinde kullanılan denklemler de aşağıda verilmiştir [31]:



Şekil 2. a) CH tipi yapının genel gösterimi, b) SJE'nin NACA0012 kanat profiline gömülü gösterimi
(a) Overview of the C-H type structure and b) view of embedded SJA in NACA0012 airfoil)



Şekil 3. Çözüm alanının NACA0012 kanat profili çevresinde Mesh4 ile boyutsal ayrıklaştırılması: a) Mesh4 genel görünümü; b) kanat profiline yakın görünümü; c) SJE'ye yakın görünümü; d) duvar sınır koşulları (Spatial discretization of the computational domain with Mesh4 generated around NACA0012 airfoil: a) General view of Mesh4; b) Close-up view of airfoil; c) Close-up view of SJA; d) Wall boundary conditions)



Şekil 4. SJE'nin ilgili geometrik parametreleri ile tasarımı (Design of SJA with the relevant geometric parameters)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \beta^* f_{\beta}^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \frac{\omega}{k} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \beta f_{\beta} \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\beta = \beta_1 \left[1 - \frac{\beta_1^*}{\beta_1} \zeta^* F(M_t) \right] \quad (17)$$

Yukarıdaki iki denklemin sağdaki üç terim, hem k (türbülans kinetik enerjisi) hem de ω (türbülans kinetik enerji özgül yayılma hızı) için, sırasıyla üretim, yıkım ve difüzyon terimleridir. Eş. 3 ve Eş. 4'ün çözümü sonucu elde edilen türbülans ağırlığı (μ_t) terimi aşağıdaki Eş. 5 ile çözülmekte ve Eş. 2'yi kapatmak için kullanılmaktadır:

$$F(M_t) = \begin{cases} 0, & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2, & M_t > M_{t0} \end{cases} \quad (18)$$

$$M_t^2 = \frac{2k}{a^2} \quad (19)$$

$$a = \sqrt{\gamma R T} \quad (20)$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\text{maksimum} \left[\frac{1}{a^* a_1 \omega} \right]} \quad (5)$$

Eş. 20'de a , ses hızını, γ özgül ısıların oranını, R gaz sabitini, T ortam sıcaklığını tanımlamaktadır. Eş. 3'ten 20'ye kullanılan model sabitleri Tablo 2'de verilmiştir [31].

Eş. 5'te S , kayma oranı büyüklüğünü göstermektedir. F_2 ise şu şekilde ifade edilmektedir:

Tablo 2. SST k- ω türbülans modeli sabitleri (SST k- ω model constants)

$$F_2 = \tanh \left[\left[\text{maksimum} \left(2 \frac{\nu k}{0,09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (6)$$

Model sabiti	Değeri	Model sabiti	Değeri
a_1	0,31	$\beta_{i,1}$	0,075
M_{t0}	0,25	$\beta_{i,2}$	0,0828
R_k	6	β_{∞}^*	0,09
R_{β}	8	$\sigma_{k,1}$	1,176
R_{ω}	2,95	$\sigma_{k,2}$	1,0
α_0	1/9	$\sigma_{\omega,1}$	2,0
α_{∞}	0,52	$\sigma_{\omega,2}$	1,168
α_{∞}^*	1	ζ^*	1,5

Eş. 6'da y değeri, bir sonraki yüzeye uzaklığı tanımlamaktadır. Eş. 3 ve Eş. 4 içindeki tanımlar ise k- ω türbülans modelinde aşağıdaki denklemlerle modellenmiştir:

$$f_{\beta}^* = \begin{cases} 1, & X_k \leq 0 \\ \frac{1+680X_k^2}{1+400X_k^2}, & X_k > 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$X_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_{\infty}}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + Re_t / R_{\omega}}{1 + Re_t / R_{\omega}} \right) \quad (9)$$

$$\alpha^* = \alpha_{\infty}^* \left(\frac{\alpha_{\infty}^* + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) \quad (10)$$

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (11)$$

$$\beta^* = \beta_1^* \left[1 + \zeta^* F(M_t) \right] \quad (12)$$

$$\beta_1^* = \beta_{\infty}^* \left(\frac{4}{15} \left(\frac{Re_t}{R_{\beta}} \right)^4 \right) \left(1 + \left(\frac{Re_t}{R_{\beta}} \right)^4 \right) \quad (13)$$

$$f_{\beta} = \frac{1+70X_{\omega}}{1+80X_{\omega}} \quad (14)$$

$$X_{\omega} = \left| \frac{\Omega_{ij} \Omega_{kl} S_{ki}}{(\beta_{\infty}^* \omega)^3} \right| \quad (15)$$

2.3. Sınır Koşulları (Boundary Conditions)

HAD analizlerinde deneysel verilerle uyumlu ve mantıklı sonuçlar elde etmek için, sınır koşullarının doğru tanımlanması çok önemlidir. Bunun için, sınır koşullarını, çözüm alanının sınırlarında konumlanmış bölgeler (giriş, çıkış, duvar gibi), belirgin karakteristiği tanımlayan bölgeler (eksenel simetrik, periyodik, fan gibi) için tayin etmek; bu bölgeleri tanımlamak (kaymazlık koşulu gibi) ve bu bölgelerdeki akış değişkenlerinin başlangıç durumlarını, deneysel veriler veya teorik çıkarımlar ışığında sayısal olarak girmek gerekmektedir. Bu çalışmada, kaymazlık sınır koşulu, kanat duvarı, hareketli membran ve eyleyici duvar adı verilen ve Şekil 3d'de yakından gösterilen üç duvar bölgesinde tanımlanmıştır. Giriş sınır koşulu, hız değeri (m/s) olarak, referans çalışmalardaki Reynolds sayısı değerine göre hesaplanıp giriş-hizi ismiyle tanımlanmıştır. Çıkış sınır koşulu, basınç değeri olarak 0 bağıl basınçta (atmosferik basınç) çıkış-basıncı ismiyle girilmiştir. Hareketli membran isimli duvarda tanımlanan titreşen diyafram etkisi, UDF koduyla ve DEFINE_CG_MOTION (Ek A) fonksiyonu ile tanımlanmış, C programlama dilinde yazılan bu fonksiyon ANSYS Fluent içine eklenmiştir [32]. Titreşen diyaframın hareketi şu şekilde tanımlanmıştır:

$$u(x, y = \text{sabit}, t) = 0 \quad (21)$$

$$v(x, y=sabit, t)=v_j \sin(\theta t) \quad (22)$$

v_j , Ugrina'nın [11] önerdiği hareket eden diyaframın hız genliği olan 0,006 mm değerinde alınmıştır. θ açısal hızı temsil etmekte ve şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\theta=2\pi w \quad (23)$$

Eş. 23'te w , titreşen diyaframın frekansını göstermektedir, referans çalışmalarda önerildiği gibi 1500 ve 2200 Hz değerlerinde alınmıştır [11, 27].

2.4. Ağ Yakınsama İndeksi Testi (Grid Convergence Index Test)

Roache [33] tarafından sayısal çözümdeki ayrıklaştırma hatalarının çözümü için önerilen ve Wu vd. [34] tarafından da SJE çalışmasında kullanıldığı gösterilen ağ yakınsama indeksi (GCI) yöntemi ile bu çalışmada en uygun ağ düğüm sayısının bulunması için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

$$q = \frac{\ln\left(\frac{f_1-f_2}{f_2-f_3}\right)}{\ln(r)} \quad (24)$$

$$GCI_{1,2} = \frac{F_s \left| \frac{f_2-f_1}{f_2} \right|}{r^{q-1}} \times 100\% \quad (25)$$

$$GCI_{2,3} = \frac{F_s \left| \frac{f_3-f_2}{f_3} \right|}{r^{q-1}} \times 100\% \quad (26)$$

$$\frac{GCI_{1,2}}{r^q - GCI_{2,3}} \sim 1 \quad (27)$$

Yukarıdaki denklemlerde, q hassasiyet mertebesi, f_1 , f_2 , f_3 değişkenleri (bu çalışmada kaldırma ve direnç katsayıları alınmıştır), r sıklaştırma oranını, F_s güvenlik faktörünü temsil etmektedir. F_s , Roache [35] tarafından 1,25 önerilmiştir. Eş. 27'deki koşulu sağlayan ilk GCI üçlüsünden ortadaki ağ yapısı, en uygun ağ yapısı olarak seçilecektir. Çalışmadaki maksimum hücum açısı olan 16° seçilerek, GCI analizi için sıklaştırma oranı $r = 1,75$ ile 5 (Mesh1, Mesh2, Mesh3, Mesh4 ve Mesh5) farklı çözünürlüklerdeki ağ yapıları için

kullanılmıştır. Tablo 1'de $Re=116800$ ve $\alpha=16^\circ$ için kaldırma (C_L) ve direnç (C_D) katsayıları bu ağ yapıları için gösterilmiştir. Tablo 3'teki değerlere göre hesaplandığında, Mesh3, Mesh4 ve Mesh5 üçlüsü için, C_L hesabında, Eş. 27'nin sonucu 1,03; C_D hesabında, 1,14 bulunmuştur. Bu nedenle, Mesh4 'ün çalışmada kullanılması uygun görülmüştür. Kaliteli bir ağ yapısı için, minimum ortogonal kalitenin 0,01'den yüksek olması ve maksimum çarpıklık oranının 0,95'ten düşük olması beklenmektedir [36]. Mesh4 için bu kriterler de başarılmıştır; minimum ortogonal kalite 0,06720 ve maksimum çarpıklık değeri 0,46773 bulunmuştur.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

3.1. SJE Konfigürasyonu Seçimi (Selection of the SJA Configuration)

NACA0012 kanat profili çevresindeki akış, aşağıda verilen Tablo 4, Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7'de 2. sütunda belirtilen farklı Reynolds sayısı değerlerinde, başlıklarda belirtilen farklı iki orifis çapı ve farklı iki frekans değerinde, 3. sütunda belirtilen farklı hücum açılarında (α) ANSYS Fluent akış çözücüsü içinde SJE açık iken, tablolarındaki hücum açıları ve Reynolds sayısı değerleri için ayrı ayrı koşturulmuştur. Sayısal benzetim sonuçlarına göre elde edilen C_L değerleri (5. sütun) ile referans çalışmalar (4. sütun) karşılaştırılmış, değişim oranları 6. sütunda verilmiştir.

Yukarıdaki tablolar incelendiğinde, C_L artışının genelde en fazla görüldüğü durum (6. sütunlarda kalın punto ile gösterilmiştir), **yüksek frekans (2200 Hz) ve küçük orifis çapı (1 mm)** konfigürasyonunda olmuştur. 5. sütunda verilen HAD sonuçlarına bu konfigürasyon için incelendiğinde, diğer konfigürasyonlardan farklı olarak laminardan türbülanslı rejime geçişi ifade eden $Re=5 \times 10^5$ ve türbülanslı rejim olan $Re=7,4 \times 10^5$ durumlarında referans çalışmalara nazaran daha yüksek C_L elde edilmektedir. Aşağıdaki bölümde, SJE konfigürasyonları görsel açıdan da karşılaştırılmıştır. Bu konfigürasyon kullanılarak C_L ve C_D 'nin zamana göre değişimlerinin nasıl olduğu aşağıdaki örnek çözümde ($Re = 1760000$, $\alpha = 4^\circ$) gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, ilk 800 zaman adımı sonrası (büyütülmüş bölgelerde de açıkça görüleceği gibi) C_L 0,32 ile 0,45 değerleri arasında, C_D 0,008 ile 0,0013 değerleri arasında atım etkisiyle dalgalanmakta ve gidip gelmektedir.

Tablo 3. NACA0012 kanat profili çevresinde $Re=116800$ ve $\alpha=16^\circ$ için ağ yakınsama indeksi testi (GCI test for $Re = 116,800$ and $\alpha = 16^\circ$ around NACA0012 airfoil)

Toplam düğüm sayısı	C_L	C_D
5430 (Mesh1)	0,892107	0,02841
12244 (Mesh2)	0,699677	0,02589
21740 (Mesh3)	0,612430	0,03632
34700 (Mesh4)	0,534153	0,03417
58400 (Mesh5)	0,550326	0,03914

Tablo 4. 2200 Hz'te ve 1 mm orifis çapındaki hoparlör tipi SJE HAD benzetimlerinin referans çalışmalarla karşılaştırılmaları (Comparisons of CFD simulations of loudspeaker type SJA with reference studies at 2200 Hz and 1 mm orifice diameter)

Referans çalışmalar	Re	$\alpha, ^\circ$	$C_{L,r}$ (referans çalışma sonucu)	$C_{L,h}$ (HAD benzetimi sonucu)	Değişim oranı [[$(C_{L,h}-C_{L,r})/C_{L,r}$] $\times 100, \%$
Abdelraouf vd. [22]	$10,27 \times 10^5$	10	1,000	1,039	3,9
Vaddi vd. [23]	$3,35 \times 10^5$	8	0,940	0,867	-7,7
Castaneda vd. [24]	$5,00 \times 10^5$	13	1,020	1,033	1,3
Durasiewicz vd. [25]	$7,40 \times 10^5$	10	1,000	1,094	9,4
Duvigneau vd. [26]	$20,00 \times 10^5$	10	0,655	0,853	30,2
Nae [27]	$18,00 \times 10^5$	10	1,124	0,858	-23,6
Yousefi vd. [28]	$5,00 \times 10^5$	16	1,000	0,880	-12,0
Luo vd. [29]	$5,00 \times 10^5$	14	1,100	0,857	-22,1

Tablo 5. 1500 Hz’te ve 1 mm orifis çapındaki hoparlör tipi SJE HAD benzetimlerinin referans çalışmalarla karşılaştırılmaları
(Comparisons of CFD simulations of loudspeaker type SJA with reference studies at 1500 Hz and 1 mm orifice diameter)

Referans çalışmalar	Re	α , °	$C_{L,r}$ (referans çalışma sonucu)	$C_{L,h}$ (HAD benzetimi sonucu)	Değişim oranı [[$(C_{L,h}-C_{L,r})/C_{L,r}$] × 100, %
Abdelraouf vd. [22]	$10,27 \times 10^5$	10	1,000	0,896	-10,4
Vaddi vd. [23]	$3,35 \times 10^5$	8	0,940	0,867	-7,7
Castaneda vd. [24]	$5,00 \times 10^5$	13	1,020	0,870	-14,7
Durasiewicz vd. [25]	$7,40 \times 10^5$	10	1,000	0,920	-8,0
Duvigneau vd. [26]	$20,00 \times 10^5$	10	0,655	0,610	-6,9
Nae [27]	$18,00 \times 10^5$	10	1,124	0,858	-23,6
Yousefi vd. [28]	$5,00 \times 10^5$	16	1,000	0,847	-15,3
Luo vd. [29]	$5,00 \times 10^5$	14	1,100	0,622	-43,5

Tablo 6. 2200 Hz’te ve 3 mm orifis çapındaki hoparlör tipi SJE HAD benzetimlerinin referans çalışmalarla karşılaştırılmaları
(Comparisons of CFD simulations of loudspeaker type SJA with reference studies at 2200 Hz and 3 mm orifice diameter)

Referans çalışmalar	Re	α , °	$C_{L,r}$ (referans çalışma sonucu)	$C_{L,h}$ (HAD benzetimi sonucu)	Değişim oranı [[$(C_{L,h}-C_{L,r})/C_{L,r}$] × 100, %
Abdelraouf vd. [22]	$10,27 \times 10^5$	10	1,000	0,833	-16,7
Vaddi vd. [23]	$3,35 \times 10^5$	8	0,940	0,867	-7,7
Castaneda vd. [24]	$5,00 \times 10^5$	13	1,020	0,889	-12,8
Durasiewicz vd. [25]	$7,40 \times 10^5$	10	1,000	0,915	-8,5
Duvigneau vd. [26]	$20,00 \times 10^5$	10	0,655	0,742	13,3
Nae [27]	$18,00 \times 10^5$	10	1,124	0,836	-25,6
Yousefi vd. [28]	$5,00 \times 10^5$	16	1,000	0,880	-12,0
Luo vd. [29]	$5,00 \times 10^5$	14	1,100	0,625	-43,2

Tablo 7. 1500 Hz’te ve 3 mm orifis çapındaki hoparlör tipi SJE HAD benzetimlerinin referans çalışmalarla karşılaştırılmaları
(Comparisons of CFD simulations of loudspeaker type SJA with reference studies at 1500 Hz - 3 mm orifice diameter)

Referans çalışmalar	Re	α , °	$C_{L,r}$ (referans çalışma sonucu)	$C_{L,h}$ (HAD benzetimi sonucu)	Değişim oranı [[$(C_{L,h}-C_{L,r})/C_{L,r}$] × 100, %
Abdelraouf vd. [22]	$10,27 \times 10^5$	10	1,000	0,830	-17,0
Vaddi vd. [23]	$3,35 \times 10^5$	8	0,940	0,866	-7,9
Castaneda vd. [24]	$5,00 \times 10^5$	13	1,020	0,872	-14,5
Durasiewicz vd. [25]	$7,40 \times 10^5$	10	1,000	0,834	-16,6
Duvigneau vd. [26]	$20,00 \times 10^5$	10	0,655	0,811	23,8
Nae [27]	$18,00 \times 10^5$	10	1,124	0,859	-23,6
Yousefi vd. [28]	$5,00 \times 10^5$	16	1,000	0,932	-6,8
Luo vd. [29]	$5,00 \times 10^5$	14	1,100	0,687	-37,6

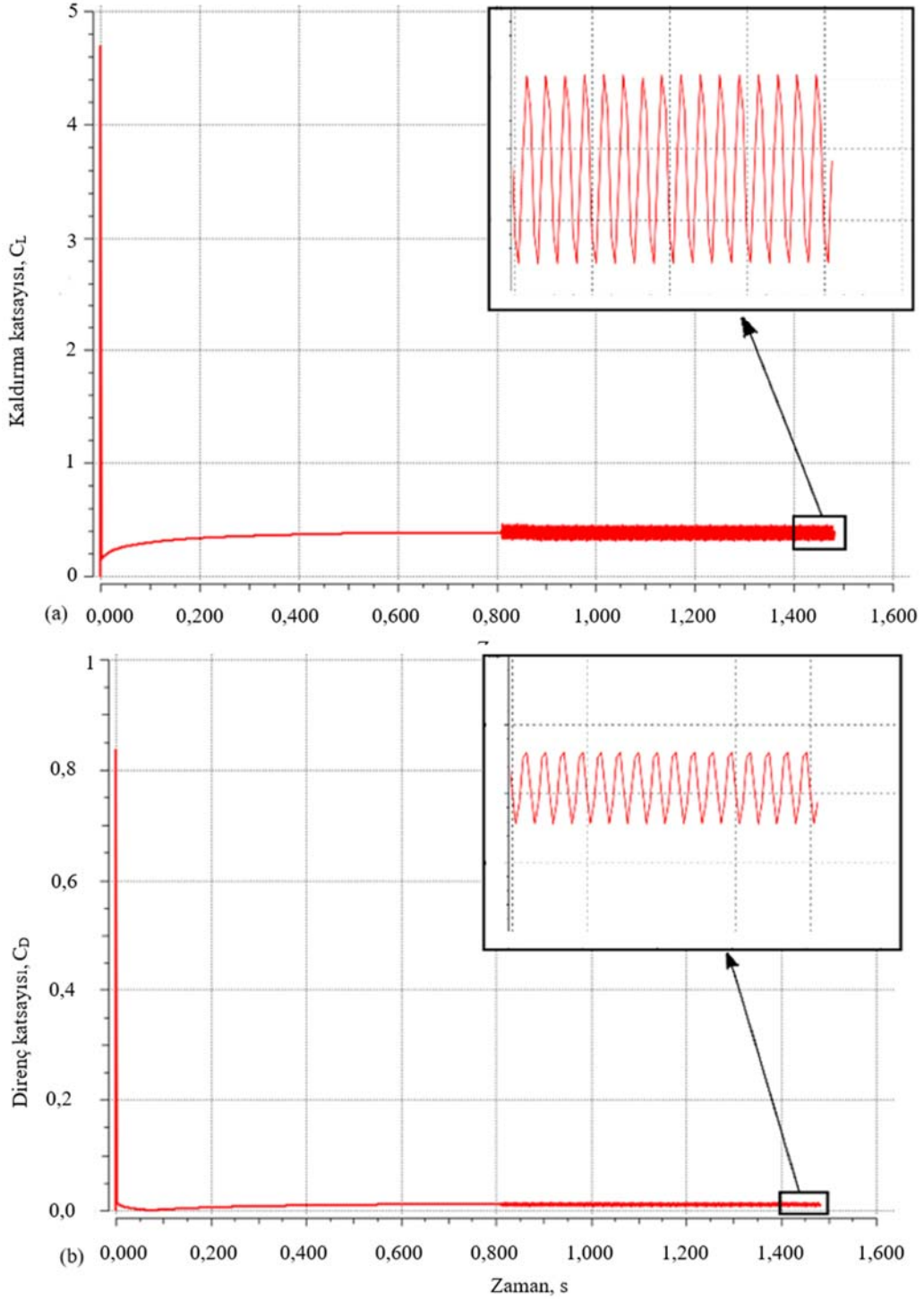
3.2. SJE’nin Görsel Açından İncelenmesi (Visual Investigation of the SJA)

Şekil 6’da SJE’ni kapalı ve açık durumları yakın çekimde hız kontürleri ile gösterilmiştir. SJE yapısının çalışma etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 6b’de SJE-açık pozisyondayken dış akış ile sentetik jetin buluşması sonucu, Şekil 6a’da görünen akış çizgilerinin sınır tabakaya yapıştığı (Şekil 6c) görülmektedir. SJE’nin alt diyaframının titreşmesi sonucu orifisten çıkan ve tekrar emilen hava, sınır tabakanın orifisten önce çok incelenmesine ve akışın yüzeye yapışmasına yol açmaktadır.

Hız kontürlerine genel bakış için, bölüm 3.1’de test edilen referans çalışmalarından Durasiewicz vd. [25] tarafından yapılan çalışmanın değerleri ($Re=7,4 \times 10^5$ ve $\alpha=10^\circ$) çalışılmıştır. Bölüm 3.1’de denenen dört konfigürasyon Şekil 7’de gösterilmiştir. Şekil 7a’da 2200 Hz – 1 mm konfigürasyonunda, SJE içinde oluşan girdapların simetrik olması, akışın tam dik şekilde olmasını sağlayacaktır. Bu avantaj, Şekil 7b’de daha düşük frekansta (1500 Hz) ve aynı orifis çapında (1 mm) bozulmaya başlamaktadır. Şekil 7c’de frekans ile birlikte orifis

çapı (3 mm) değiştirilmiş, simetri bir miktar bozulmuştur. Şekil 7d’de görüldüğü gibi, 2200 Hz’de ve 3 mm orifis çapında gene simetrik yapı oluşmuştur, fakat bu sefer de orifisin sağına doğru bir ayrılma kabarcığı oluşmaktadır. Bu durum, daha yüksek Reynolds sayılarında ayrılma kabarcığının patlayıp ani tutunma kaybına neden olmasına neden olabilir. Gene de, orifis çapından bağımsız şekilde 2200 Hz titreşimin simetrik çıkış sağladığı görülmektedir.

Şekil 8’deki hız kontürlerine bakıldığında, orifis çapının 3 mm’ye göre (1500 Hz için Şekil 8c ve 2200 Hz için Şekil 8d) 1mm (1500 Hz için Şekil 8a ve 2200 Hz için Şekil 8b) olduğu zaman, SJE’nin yüzeye akışı yapıştırma etkisinin arttığı görülmektedir. Şekil 8a ile Şekil 8b karşılaştırıldığında, frekansın 1500 Hz’den 2200’e artırılması genel akışta çok farklı gözükmesine de, gene SJE kavite boşluğunda simetrik yapı oluşturduğu görülmektedir. Şekil 7 ve 8 birlikte değerlendirildiğinde ise, bölüm 3.1’de sayısal açıdan seçilen yüksek frekans (2200 Hz) ve küçük orifis çapı (1 mm) konfigürasyonu görsel açıdan da doğrulanmıştır. Kanat profilinin üzerinde akış ayrılmasının engellendiği bölge, örnek olarak Şekil 8b’de gösterilmiştir.

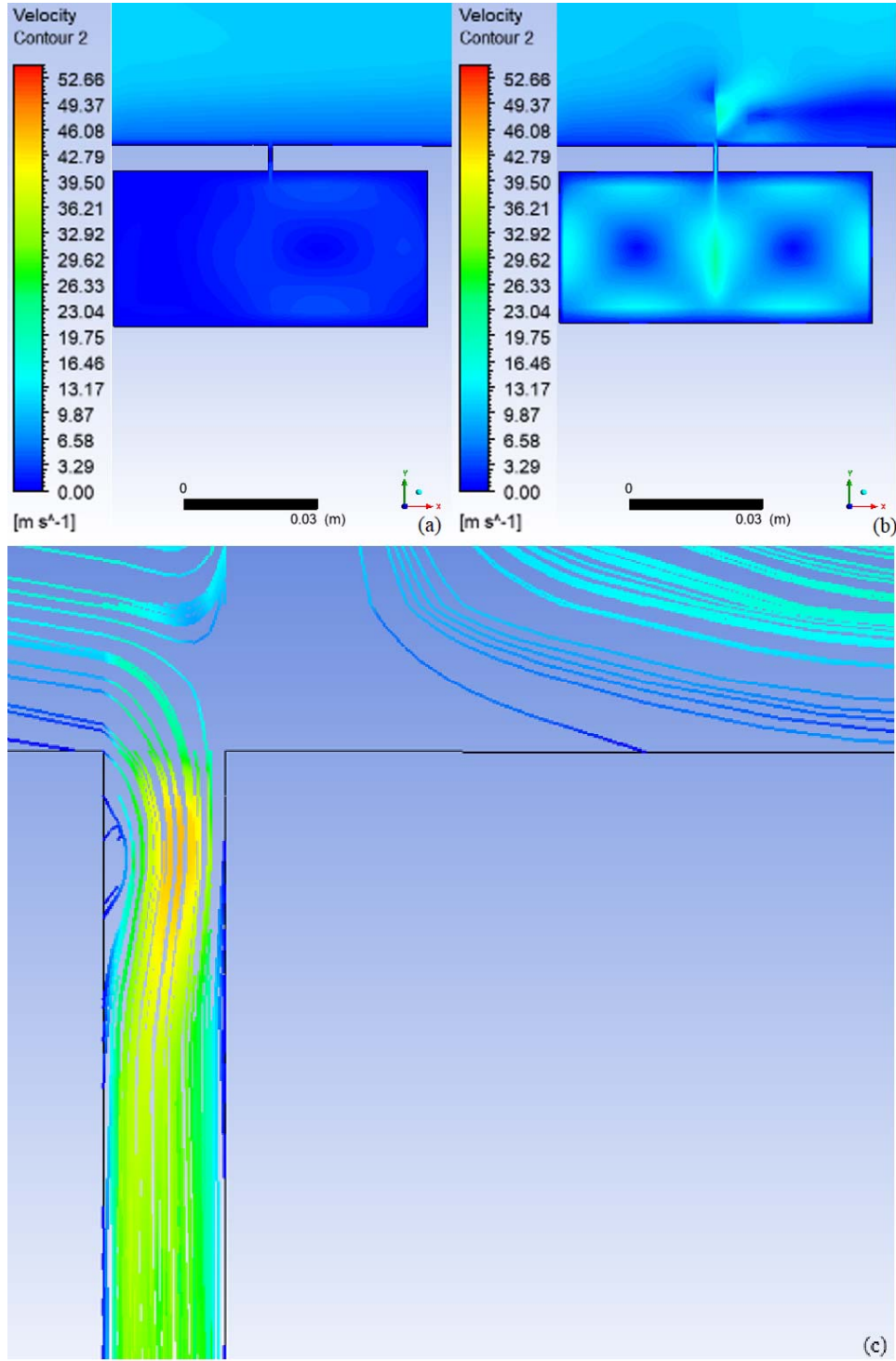


Şekil 5. Daimi olmayan akışta ($Re = 1760000$, $\alpha = 4^\circ$), yüksek frekans (2200 Hz) ve küçük orifis çapı (1 mm) konfigürasyonunda (a) C_L , ve (b) C_D yakınsama grafikleri (Convergence plots of (a) C_L and C_D in unsteady flow ($Re = 1760000$, $\alpha = 4^\circ$) for high frequency (2200 Hz) and small orifice diameter (1 mm) configuration)

3.3. Seçilen SJE'nin Farklı Reynolds Sayısı Değerlerinde Aerodinamik Karakteristiğinin İncelenmesi
(Investigation of Aerodynamics Characteristics of the Selected SJA under Different Reynolds Number Values)

Bölüm 3.1 ve 3.2'deki sonuçlara dayanarak seçilen konfigürasyona göre, üç farklı Reynolds sayısı (Düşük – 116800, Orta – 584000,

Yüksek – 1760000) değerinde SJE karakteristiği HAD çalışmaları, aşağıda C_L - α ve C_L/C_D - α grafiklerinde gösterilmiştir. Grafikler, SJE açık ile SJE kapalı durumdayken nasıl davrandıklarına bakılarak yorumlanmıştır. İlk grafikte (Şekil 9a), kanat profili veter uzunluğuna göre hesaplanan $Re=116800$ olduğu durumda, C_L değeri, SJE kapalı olan durumun tutunma kaybı hücum açısı (12°) seviyesine kadar hem SJE-açık hem SJE-kapalı durumda doğrusal yükseliş göstermektedir.

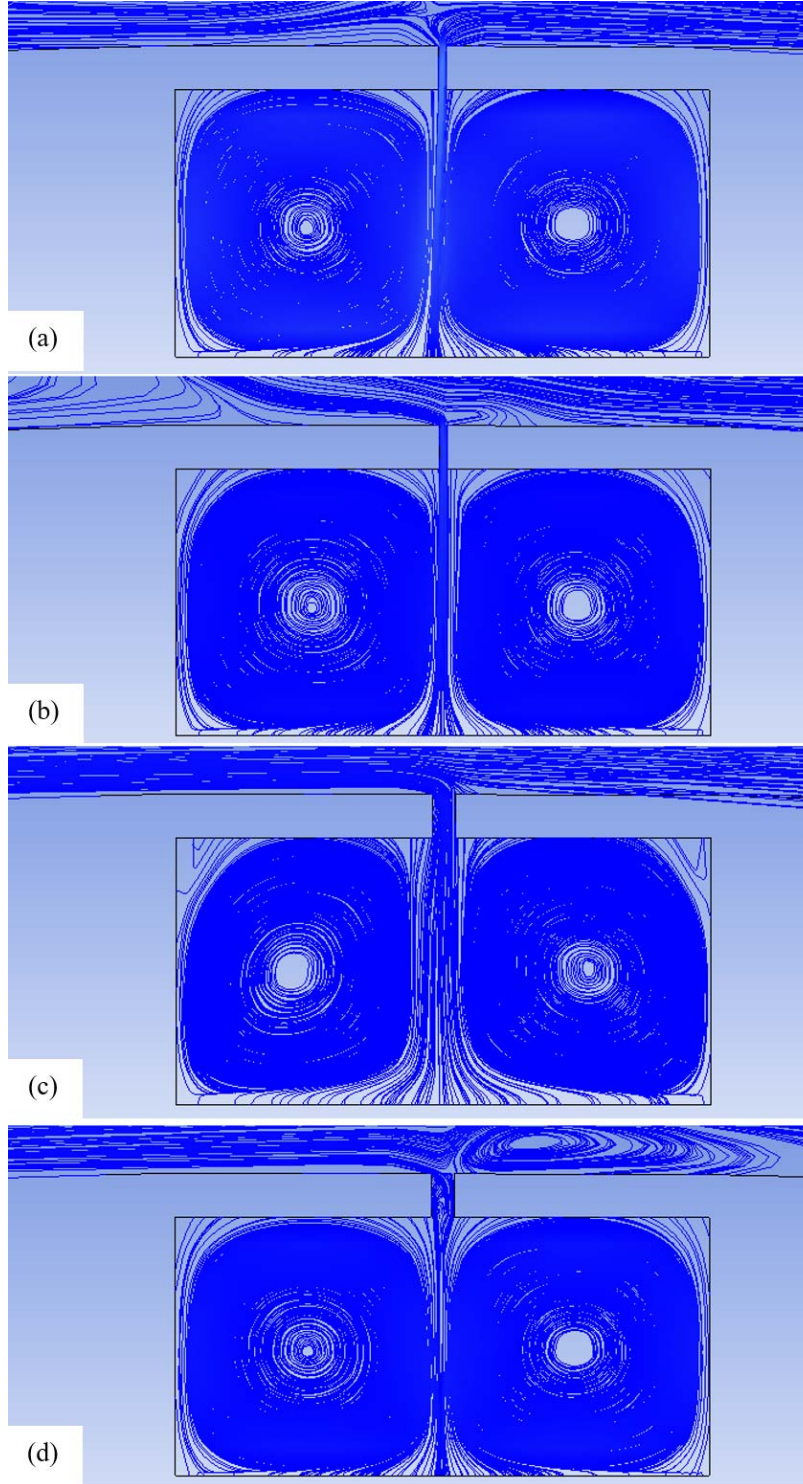


Şekil 6. NACA0012 kanat profilinin çeyrek vetere yerleştirilmiş SJE'nin a) SJE-kapalı, b) SJE-açık durumlarının yakından görünümü, c) SJE-açık durumdayken akış çizgilerinin orifis çıkışında yakından görünümü (Closer view on SJA located at the quarter chord of NACA0012 airfoil with (a) SJA-off, (b) SJA-on cases, (c) closer view of the streamlines at the orifice exit with SJA-on)

Ancak, SJE verimi bu noktadan sonra sadece SJE açıkken korunmakta ve tutunma kaybı etkisi de bu eyleyici sebebiyle görünmemektedir. Sonuçta, C_L değeri SJE-kapalıyken 0,9'dan 0,6'ya düşerken, SJE-açıkken 2,7 seviyesinde tutunmayı başarmaktadır.

Şekil 9b'de, düşük Reynolds sayısı değerinde çalışmanın hücum açısına göre kaldırma-direnç oranı (C_L/C_D) değişimi gösterilmiştir.

C_L/C_D 8°'ye kadar SJE-açık ve SJE-kapalı durumlarında aynı seviyelerde görünmekte, daha yüksek açılarda iki durumda da yükseliş gözlemlenmektedir. Ancak, SJE-açık durumda iken daha dik açıyla yükseliş trendi oluşmaktadır. Her iki durumda da maksimum C_L/C_D değeri 12°'de oluşmakta, sonrasında tutunma kaybı etkisiyle %75'lik bir düşüş gözlemlenmektedir. Şekil 10a'da görüldüğü gibi, düşük Reynolds sayısı (116800) çalışmasına benzer bir şekilde, orta

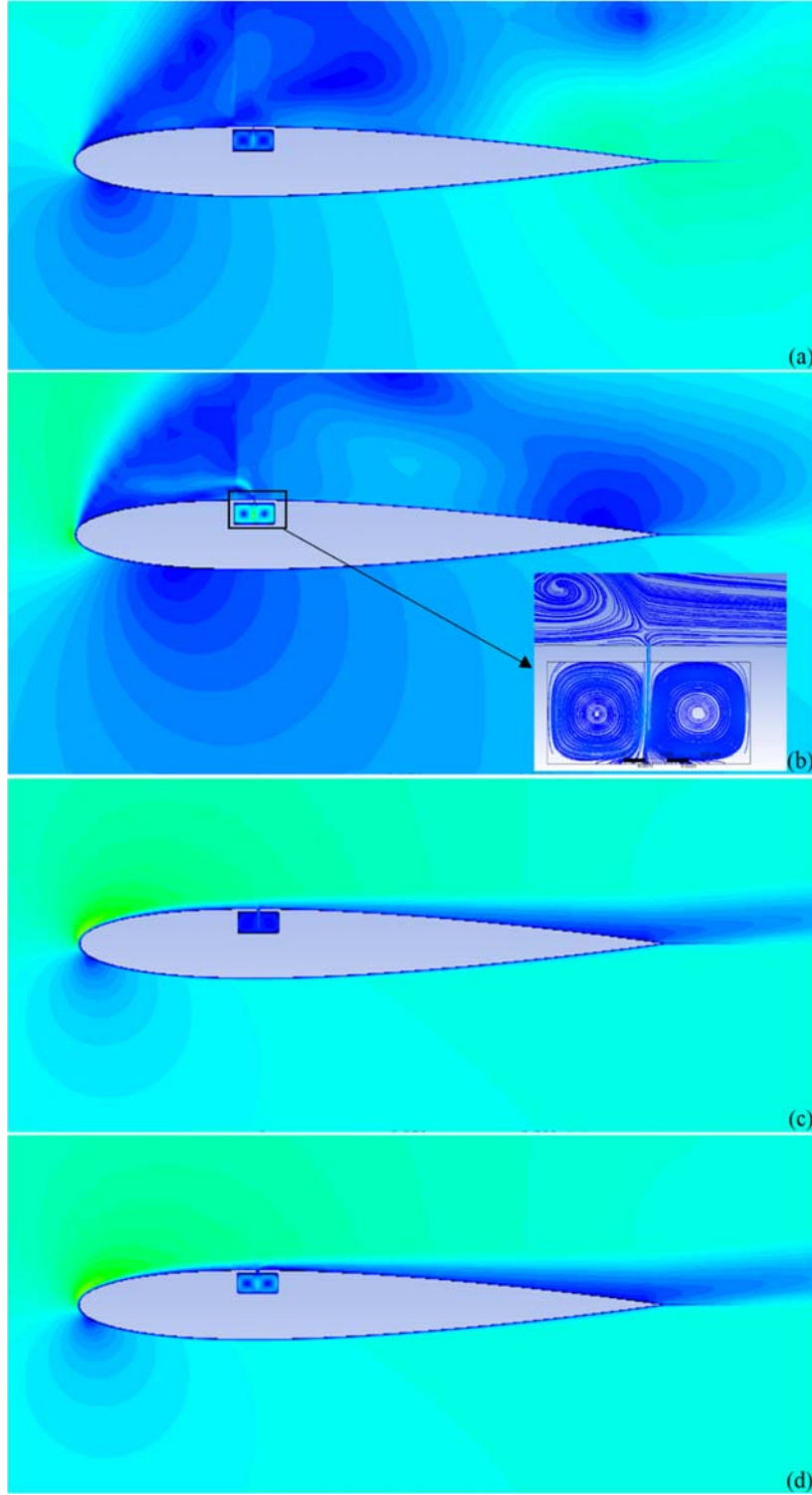


Şekil 7. Durasiewicz vd. [25] parametrelerine göre, diyafram titreşimi a) 2200 Hz’te 1 mm orifisten; b) 1500 Hz’te 1 mm orifisten; c) 1500 Hz’te 3 mm orifisten; d) 2200 Hz’te 3 mm orifisten çıkan hava akışının akış çizgileri (Streamlines with the membrane oscillating with: a) 2200 Hz through 1 mm orifice diameter; b) 1500 Hz through 1 mm orifice diameter; c) 1500 Hz through 3 mm orifice diameter; d) 2200 Hz through 3 mm orifice diameter according to Durasiewicz et al. [25] parameters)

seviye Reynolds sayısı (584000) durumunda da C_L değeri SJE açık iken kapalı duruma göre daha yüksektir. Diğer bir deyişle, kanat profilinin aerodinamik karakteristiği SJE açık konumdayken daha tercih edilir bir seviyeye ulaşmaktadır. Ancak bu sefer, C_L değeri daha düşük olan 1,25 seviyesine limitlenmiştir ve 12°’den sonra

değişmemektedir. Bu da, SJE’nin düşük ve laminer akışlarda daha etkili olduğunu göstermektedir.

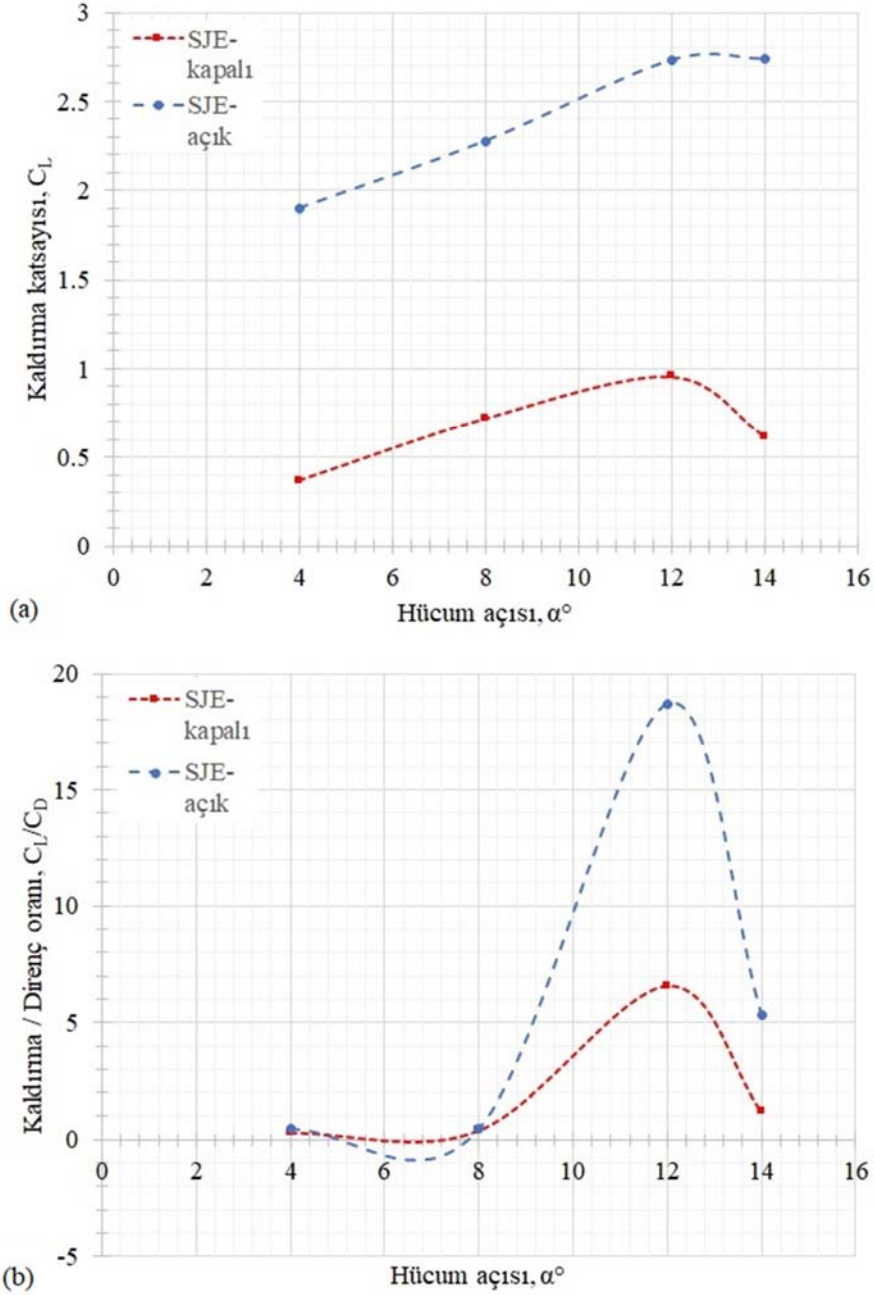
Orta düzey Reynolds sayısı (584000) seviyesinde, Şekil 10b’de görüldüğü gibi C_L/C_D seviyesi, 4°’de SJE-açık konumdayken kapalı



Şekil 8. Durasiewicz vd. [25] parametreleri kullanılarak diyafram titreşimi a) 1500 Hz’te 1 mm orifiste; b) 2200 Hz’te 1 mm orifiste; c) 1500 Hz’te 3 mm orifiste; d) 2200 Hz’te 3 mm orifiste hız kontürleri (Velocity contours of current study using Durasiewicz et al. [25] parameters at the membrane oscillating with a) 1500 Hz, 1 mm orifice diameter b) 2200 Hz, 1 mm orifice diameter c) 1500 Hz, 3 mm orifice diameter; d) 2200 Hz, 1 mm orifice diameter)

duruma göre yaklaşık beş katlık bir fark ile başlamaktadır. Hücum açısı arttıkça bu fark azalsa da 12° ’den sonra aradaki fark sabitlenip aynı kalmaktadır. Bu sonuç, SJE’nin orta düzey Reynolds sayısı değerinde düşük hücum açılarında veriminin yüksekliğini ortaya

koymaktadır. Yüksek Reynolds sayısı (1760000) durumunda, önceki durumlara göre SJE’nin etkinliği ön plana çıkamamaktadır. Bu noktada, Şekil 11a incelenirse, SJE-kapalı ile SJE-açık durumlar arası fark kapanmıştır ve hemen hemen aynı karakteristiği göstermektedir.



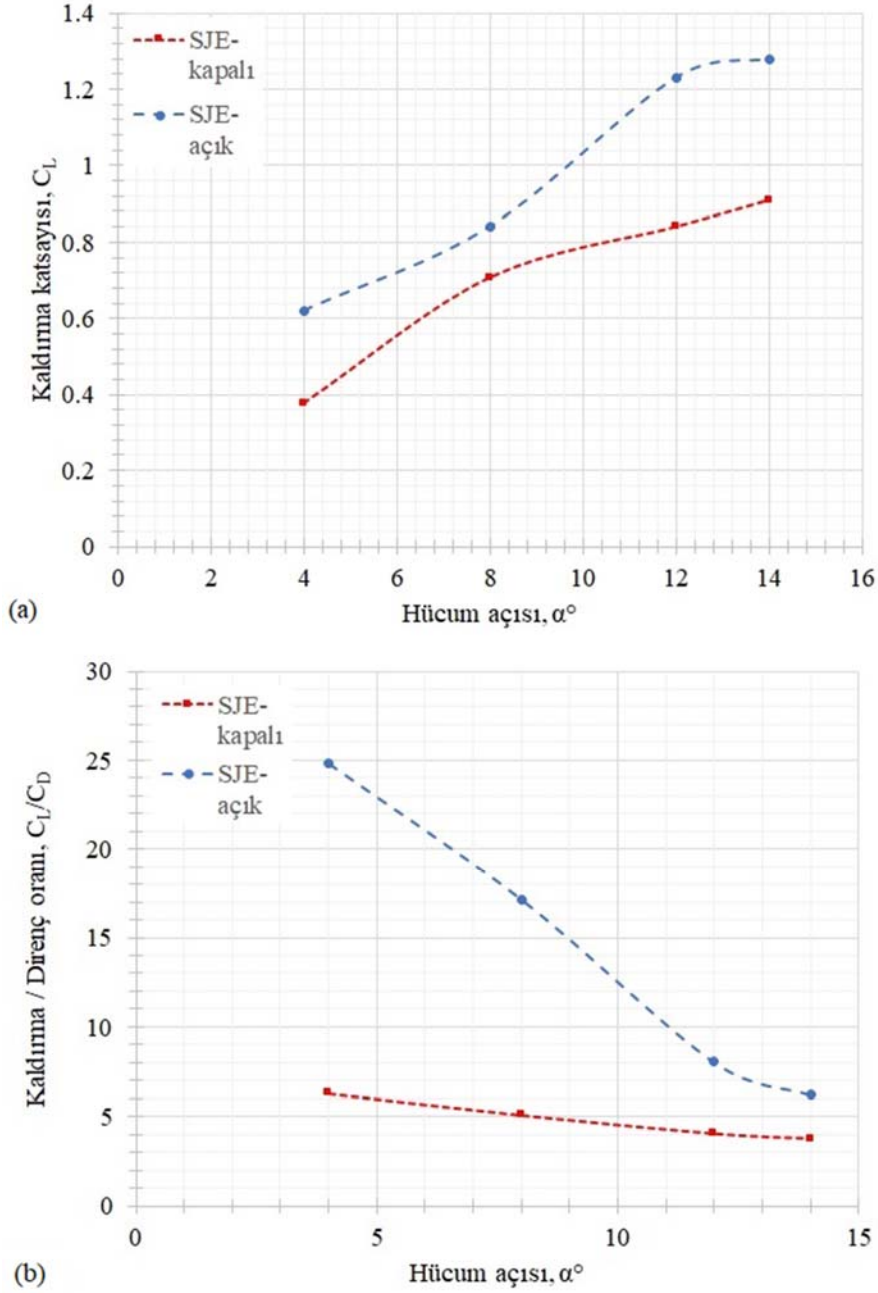
Şekil 9. NACA0012 kanat profili için SJE-açık ve SJE-kapalı konfigürasyonlarında $Re=116800$ 'de a) $C_L-\alpha$ eğrilerinin, b) $C_L/C_D-\alpha$ eğrilerinin karşılaştırılması

(Comparison of a) $C_L-\alpha$ curves, b) $C_L/C_D-\alpha$ curves for NACA0012 airfoil at $Re = 116,800$ with SJA-on and SJA-off configurations)

Gene de sadece C_L değişimi incelendiğinde, bu Reynolds sayısı değerinde de SJE-açık durumu daha iyi bir seçenektir. Şekil 11b'de görüldüğü gibi, yüksek Reynolds sayısı (1760000) durumunda, düşük (4°) ve yüksek (14°) hücum açılarında SJE açıkken SJE kapalı pozisyona göre C_L/C_D daha yüksek seviyelerdedir. Ancak, orta düzeydeki 8° ve 12° hücum açılarında bu orana SJE'nin bir katkısı olmamakta aksine daha düşük C_L/C_D seviyeleri oluşabilmektedir. Şekil 11a ve Şekil 11b birlikte değerlendirildiğinde, önceki Reynolds sayısı değerlerine göre SJE'nin yüksek Reynolds sayısı değerinde avantajının azaldığı gözlenmiştir. Sonuçta, düşük-orta düzey Reynolds sayısı durumunda SJE uygulamasının daha etkili olduğu görülmüştür [37, 38].

4. Simgeler (Symbols)

a	: Hareket genliği [m], ses hızı [m/s]
c	: Viter uzunluğu [m]
C	: Aerodinamik değişken katsayısı
CFD / HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
DBD	: Dielektrik Bariyer Deşarj
DCA-DBD	: Doğru akım miktarı artırılmış DBD
f	: Değişken, $k-\omega$ türbülans modeli değişkeni
F	: Güvenlik faktörü, $k-\omega$ türbülans modeli değişkeni
k	: Türbülans kinetik enerjisi [m^2/s^2]
GCI	: Ağ yakınsama indeksi



Şekil 10. NACA0012 kanat profili için SJE-açık ve SJE-kapalı konfigürasyonlarında $Re=584000$ 'de a) $C_L-\alpha$ eğrilerinin, b) $C_L/C_D-\alpha$ eğrilerinin karşılaştırılması

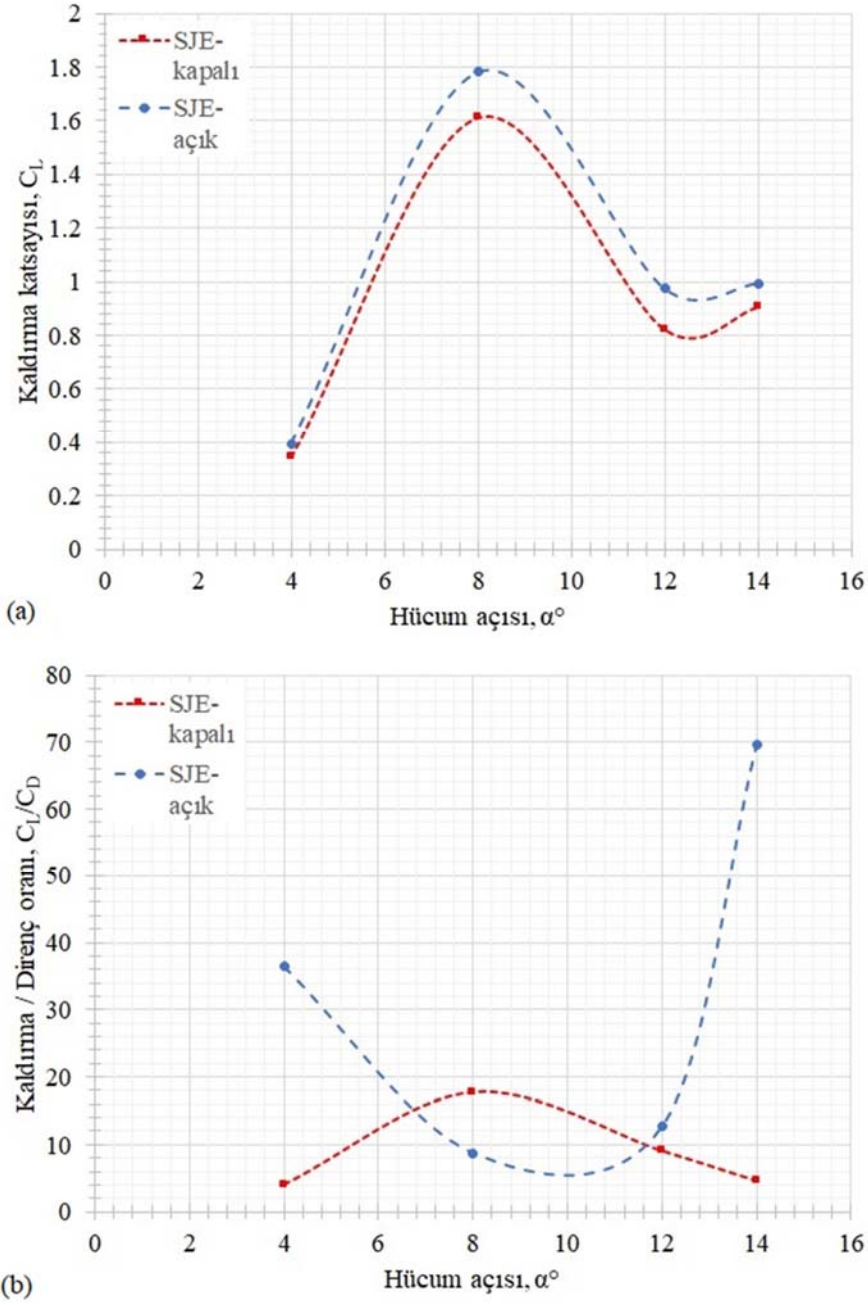
(Comparison of a) $C_L-\alpha$ curves, b) $C_L/C_D-\alpha$ curves for NACA0012 airfoil at $Re = 584,000$ with SJA-on and SJA-off configurations)

LES : Büyük Girdap Benzetimi
 M : $k-\omega$ türbülans modeli değişkeni
 NS-DBD : Nanosaniyelik darbe ile sürülen DBD
 q : Hassasiyet mertebesi
 r : Sıkıştırma oranı
 R : Gaz sabiti [J/kg-K], $k-\omega$ türbülans modeli değişkeni
 RANS : Reynolds ortalamalı Navier-Stokes
 Re : Reynolds Sayısı (veter uzunluğuna göre), $k-\omega$ türbülans modeli değişkeni
 S : Kayma oranı büyüklüğü
 SJA / SJE : Sentetik Jet Eyleyici
 SST : Kayma Gerilmesi Taşınımı

UDF : Kullanıcı tanımlı fonksiyon
 URANS : Daimi olmayan RANS
 u : hız bileşeni [m/s]
 v : hız bileşeni [m/s]
 w : frekans [Hz]
 X : $k-\omega$ türbülans modeli değişkeni
 ZNMF : Sıfır Net Kütle Akışı

4.1. Yunan harfleri (Greek letters)

α : Hücum açısı [°], SST $k-\omega$ sabiti
 ε : Türbülans kinetik enerji yayılma hızı [m^2/s^3]



Şekil 11. NACA0012 kanat profili için SJE-açık ve SJE-kapalı konfigürasyonlarında $Re=1760000$ 'de a) C_L - α eğrilerinin, b) C_L/C_D - α eğrilerinin karşılaştırılması

(Comparison of a) C_L - α curves, b) C_L/C_D - α curves for NACA0012 airfoil at $Re = 1,760,000$ with SJA-on and SJA-off configurations)

ζ : k- ω türbülans modeli değişkeni
 θ : Açısal hız [radyan]
 ρ : Yoğunluk [kg/m^3]
 μ : Kinematik ağırlık [m^2/s]
 τ : Kayma gerilmesi [$kg/m \cdot s^2$]
 ω : Türbülans kinetik enerji yayılma hızı [m^2/s^3]
 Ω : k- ω türbülans modeli değişkeni

4.2. Üst indisler (Superscripts)

' : Çalkantı hızı [m/s]
 * : k- ω türbülans modeli değişkeni

β : k- ω türbülans modeli değişkeni

4.3. Alt indisler (Subscripts)

* : SST k- ω sabiti göstergesi
 c : Kavite
 D : Direnç katsayısı
 h : HAD analizi çalışması
 i : akış (x) yönü
 ij : ij (xy) yüzeyi
 j : Jet (y) yönü
 k : k- ω türbülans modeli değişkeni, z yönü

L	: Kaldırma katsayısı
o	: Orifis
r	: Referans çalışma
s	: Güvenlik faktörü
t	: Türbülans ağdalığı
∞	: k- ω türbülans modeli değişkeni

5. Sonuçlar (Conclusions)

Akış iyileştirme yöntemlerinden biri olan sentetik jet eyleyiciler, yakıt tasarrufu, direnç katsayısının azaltılması ve emisyon kontrol sistemleri için seçilmektedir. Kanat üzerindeki sınır tabaka kopması, kaldırma / direnç oranının istenmeyen şekilde düşmesine neden olmaktadır. SJE'ler akış kütleli katmadan ana akışı uyaran aygıtlardır. SJE, kanat yüzeyinden kopan sınır tabakanın tekrar bağlanmasını ve kaldırma / direnç oranının tekrar yükselmesini sağlamaktadır. Yakın zamanda kanat profilleri için geliştirilen şekil en iyileme çalışmaları ile akış kontrolü sağlanmasında en iyilenmiş limitlere ulaşıldığı için artık çalışması ve geliştirilmesi gereken teknikler SJE'lerle ilgili olmaktadır. Son yıllarda, SJE ile ilgili yapılan çalışmalar yapının geometrisi ve en iyilenmiş diyafram frekansını belirleme üzerine gelişmiştir. Bu yönde, hoparlör tipi SJE kullanarak iki boyutlu sayısal analizler yapılmıştır.

HAD metodu, ANSYS Fluent akış çözücü modülü kullanılarak ağ yakınsama indeksi testinde RANS ve diğer tüm analizlerde daimi olmayan RANS (URANS) denklemlerinde SST k- ω türbülans modeli ile hesaplanmıştır. URANS denklemlerinin SST k- ω türbülans modeliyle kapatıldığı (tamamlandığı) denklemlerinin iki boyutlu, sıkıştırılmaz, ağdalı akışkanlarda çözümünü için akış alanının diferansiyel denklem formu gösterilmiştir, gerek duyulan sınır koşulları tanımlanmıştır. Hoparlör tipi SJE, kanadın maksimum kalınlığı olan çeyrek veter konumuna yerleştirilmiştir. Sayısal benzetimler, kanat profili çevresinde CH tipi dörtgen ağ yapısı içinde tamamlanmıştır. Uygun ağ yapısı (düğüm sayısı) seçimi için, RANS denklemlerine dayalı örnek bir çözüm, ağ yakınsama indeksi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Sonuçta, düğüm sayısının 34700 olduğu Mesh4 isimli ağ yapısı hem C_L hem de C_D hesabına göre en uygun ağ yapısı olarak seçilmiştir. HAD analizi seçilen referans çalışmalarındaki farklı Reynolds sayılarında UDF kodu kullanarak daimi olmayan koşullarında uygulanmıştır.

Hoparlör tipi SJE, NACA0012 kanat profili için çalışılmış SJE içeren sekiz referans çalışma ile karşılaştırılmıştır. SJE diyafram hareketini sağlamak için tekrar ağ oluşturma yöntemi ile dinamik ağ oluşturulmuştur. NACA0012 kanat profili çevresindeki akış, farklı Reynolds sayıları değerlerinde, farklı iki orifis çapı (1 mm ve 3 mm) ve farklı iki frekans (1500 Hz ve 2200 Hz) değerinde, farklı hücum açılarında, ANSYS Fluent akış çözücüsü içinde SJE açık iken, her bir hücum açısı ve Reynolds sayısı değeri için ayrı ayrı koşturulmuştur. Seçilen referans çalışmaların farklı açılarda, 1500 ve 2200 Hz değerlerindeki frekanslarda HAD analizleri yapılmış, kaldırma katsayısı SJE-kapalı ve SJE-açık durumlarında kanat profili üzerinde incelenmiştir. C_L artışının genelde en fazla görüldüğü durum, yüksek frekans (2200 Hz) ve küçük orifis çapı (1 mm) konfigürasyonunda olmuştur. HAD sonuçları bu konfigürasyon için incelendiğinde, laminardan türbülanslı rejime geçişi ifade eden $Re=5 \times 10^5$ ve türbülanslı rejim olan $Re=7,4 \times 10^5$ durumlarında, diğer konfigürasyonlardan farklı olarak, referans çalışmalara nazaran daha yüksek C_L elde edilmektedir. Hız kontürlerine göre de yüksek frekans (2200 Hz) ve küçük orifis çapı (1 mm) konfigürasyonu doğrulanmıştır.

Son olarak, SJE tarafından sınır tabaka ayrılması önlenmesi/ertelenmesi ve kaldırma kuvveti iyileştirmesi farklı konfigürasyonlar altında karşılaştırılmıştır. , Üç farklı Reynolds sayısı

(Düşük – 116800, Orta – 584000, Yüksek – 1760000) değerinde SJE karakteristiği HAD çalışması, C_L - α ve C_L/C_D - α grafiklerinde gösterilmiştir. Grafikler, SJE açık ile SJE kapalı durumdayken nasıl davrandıklarına bakılarak yorumlanmıştır:

- $Re=116800$ olduğu durumda, C_L değeri, SJE kapalı olan durumun tutunma kaybı hücum açısı (12°) seviyesine kadar hem SJE-açık hem SJE-kapalı durumda doğrusal yükseliş göstermiştir. C_L değeri SJE-kapalıyken $0,9^\circ$ 'dan $0,6^\circ$ 'ya düşerken, SJE-açıkken $2,7$ seviyesinde tutunmayı başarmıştır. C_L/C_D 8° 'ye kadar SJE-açık ve SJE-kapalı durumlarında aynı seviyelerde görünmüş, daha yüksek açılarda iki durumda da yükseliş gözlemlenmiştir. Her iki durumda da maksimum C_L/C_D değeri 12° 'de oluşmuş, sonrasında tutunma kaybı etkisiyle $\%75$ 'lik bir düşüş gözlenmiştir.
- Orta seviye Reynolds sayısı (584000) durumunda da C_L değeri SJE açık iken kapalı duruma göre daha yüksektir. Ancak bu sefer, C_L değeri daha düşük olan $1,25$ seviyesine sabitlenmiş ve 12° 'den sonra değişmemiştir. Bu da, SJE'nin düşük ve laminar akışlarda daha etkili olduğunu göstermiştir. C_L/C_D seviyesi, 4° 'de SJE-açık durumdayken kapalı duruma göre yaklaşık beş katlık bir fark ile başlamıştır. Hücum açısı arttıkça bu fark azalsa da 12° 'den sonra aradaki fark sabitlenip aynı kalmıştır. Bu sonuç, SJE'nin orta düzey Reynolds sayısı değerinde düşük hücum açılarında veriminin yüksekliğini ortaya koymuştur.
- Yüksek Reynolds sayısı (1760000) durumunda, önceki durumlara göre SJE'nin etkinliği ön plana çıkamamaktadır. SJE-kapalı ile SJE-açık durumlar arası fark kapanmış ve hemen hemen aynı karakteristiği göstermiştir. Gene de sadece C_L değişimi incelendiğinde, bu Reynolds sayısı değerinde de SJE-açık durumu daha iyi bir seçenektir. düşük (4°) ve yüksek (14°) hücum açılarında SJE açıkken SJE kapalı pozisyona göre C_L/C_D daha yüksek seviyelerdedir. Ancak, orta düzeydeki 8° ve 12° hücum açılarında bu orana SJE'nin bir katkısı olmamış, aksine daha düşük C_L/C_D seviyeleri oluşmuştur. Önceki Reynolds sayısı değerlerine göre SJE'nin yüksek Reynolds sayısı değerinde avantajının azaldığı gözlenmiştir.

Sonuçta, düşük-orta düzey Reynolds sayısı durumunda SJE uygulamasının daha etkili olduğu görülmüştür. Çalışmalarımız referans çalışmaları ile tutarlı sonuçlar göstermiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, hoparlör tipi SJE, akışın kontrolünde dikkat çekici ve etkili bir cihaz olarak görülmüştür. Hoparlör tipi SJE HAD çalışması, farklı türbülans modelleri kullanılarak, parametreleri gradyan bazlı en iyilenerek ve farklı kanat profilleri kullanılarak ileriki aşamalarda daha da geliştirilebilir. Daha sonraki aşamalarda, bu çalışmalar gözönüne alınarak deneysel çalışmalar da yapılabilir.

Kaynaklar (References)

1. Huebsch W.W., Gall P.D., Hamburg S.D., Rothmayer A.P., Dynamic roughness as a means of leading-edge separation flow control. J. of Aircraft, 49 (1), 108-115, 2012.
2. Çelik B., Edis F.O., Mısırlıoğlu A., Şekil değiştiren bir ağ üzerinde CBS sonlu elemanlar metodu kullanılarak sentetik mikro jet akışı analizi, XIII. Ulusal Mekanik Kongresi, Gaziantep-Türkiye, 311-319, 8-12 Eylül, 2003.
3. Niel F., Modeling and control of a wing at low Reynolds number with high amplitude aeroelastic oscillations, Doktora Tezi, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, Fransa, 2018.
4. Deb D., Tao G., Burkholder J.O., Smith D.R., An adaptive inverse control scheme for a synthetic jet actuator model, 2005 American Control Conference, Portland-ABD, 2646-2651, 8-10 Haziran, 2005.
5. Tesař V., Hung C.H., Zimmerman W.B., No-moving-part hybrid-synthetic jet actuator. Sens. Actuators, A, 125 (2), 159-169, 2006.
6. Tesař V., Mechanism of pressure recovery in jet-type actuators. Sens. Actuators, A, 152 (2), 182-191, 2009.
7. Zhong, S., Jabbar, M., Tang, H., Garcillan, L., Guo, F., Wood, N., & Warsaw, C. Towards the design of synthetic-jet actuators for full-scale

- flight conditions. *Flow, turbulence and combustion*, 78 (3), 283-307, 2007.
8. Deb, D., Tao, G., Burkholder, J. O., & Smith, D. R., Adaptive synthetic jet actuator compensation for a nonlinear aircraft model at low angles of attack. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16 (5), 983-995, 2008.
 9. Amitay M., Smith B., Glezer A., Aerodynamic flow control using synthetic jet technology, 36. AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno-ABD, 208, 12-15 Ocak, 1998.
 10. Mallinson S.G., Reizes J.A. Hong, G., An experimental and numerical study of synthetic jet flow. *Aeronaut. J.*, 105 (1043), 41-49, 2001.
 11. Ugrina S., Experimental analysis and analytical modeling of synthetic jet-cross flow interactions, *Doktora Tezi*, University of Maryland, College Park, ABD, 2007.
 12. Raju R., Mittal R., Cattafesta L., Dynamics of airfoil separation control using zero-net mass-flux forcing. *AIAA J.*, 46, No. 12, 2008.
 13. You D., Moin P., Study of flow separation over an airfoil with synthetic jet control using Large-Eddy simulation. *Center for Turbulent Research - Annual Research Briefs*, 311-321, 2007.
 14. Jain M., Puranik B., Agrawal A., A numerical investigation of effects of cavity and orifice parameters on the characteristics of a synthetic jet flow. *Sens. Actuators, A*, 165 (2), 351-366, 2011.
 15. Lv Y.W., Zhang J.Z., Shan Y., Tan X.M., Numerical investigation for effects of actuator parameters and excitation frequencies on synthetic jet fluidic characteristics., *Sens. Actuators, A*, 219, 100-111, 2014.
 16. Macovei A.C. ve Frunzulica F., Numerical simulations of synthetic jets in aerodynamic applications. *Incas Bulletin*, 6, 81, 2014.
 17. Gil P. ve Strzelczyk P., Performance and efficiency of loudspeaker driven synthetic jet actuator. *Exp. Therm Fluid Sci.*, 76, 163-174, 2016.
 18. Boualem K., Yahiaoui T., Azzi A., Numerical investigation of improved aerodynamic performance of a NACA 0015 airfoil using synthetic jet. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 11 (3), 498-502, 2017.
 19. Eglinger E., Ternoy F., Dandois J., Aigouy G., Betsch E., Jaussaud G., Claeysen F., 2018, High-performance synthetic jet actuator for aerodynamic flow improvement over airplane wings, *Actuator 2018: 16. International Conference on New Actuators, Bremen-Almanya*, 1-4, 25-27 Haziran 2018.
 20. Obeid S., Ahmadi G. Jha R., 2020, NARMAX identification based closed-loop control of flow separation over NACA 0015 airfoil. *Fluids*, 5 (3), 100, 2020.
 21. Palumbo A., de Luca L., Experimental and CFD characterization of a double-orifice synthetic jet actuator for flow control, *Actuators*, 10 (12), 326, 2021.
 22. Abdelraouf H., Elmekawy A.M.N., Kassab S.Z., Simulations of flow separation control numerically using different plasma actuator models. *Alexandria Eng. J.*, 59 (5), 3881-3896, 2020.
 23. Vaddi R.S., Sota C., Mamishev A., Novosselov I., Active flow control of NACA0012 airfoil using sawtooth direct current augmented dielectric barrier discharge plasma actuator. *arXiv preprint arXiv:2106.11453*, 2021.
 24. Castaneda D., Whiting N., Webb N.J., Samimy M., Design and characterization of an experimental setup for active control of dynamic stall over a NACA0012 airfoil, *AIAA Aviation 2019 Forum, Dallas-ABD*, 3212, 17-21 Haziran, 2019.
 25. Durasiewicz C., Singh A., Little J.C., A comparative flow physics study of NS-DBD vs AC-DBD plasma actuators for transient separation control on a NACA0012 airfoil, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida-ABD, 1061, 8-12 Ocak, 2018.
 26. Duvigneau R., Hay A., Visonneau M., Study on the optimal location of a synthetic jet for stall control, 3. AIAA Flow Control Conference, Atlanta-ABD, 3679, 25-29 Haziran, 2006.
 27. Nae, C., Synthetic jets influence on NACA0012 airfoil at high angles of attack, 23. Atmospheric Flight Mechanics Conference, Boston-ABD, 4523, 10-13 Ağustos, 2009.
 28. Yousefi K., Saleh R., Zahedi P., Numerical study of blowing and suction slot geometry optimization on NACA0012 airfoil, *J. Mech. Sci. Technol.*, 28 (4), 1297-1310, 2014.
 29. Luo D.H., Sun X.J., Huang D.G., Wu G.Q., Flow control effectiveness of synthetic jet on a stalled airfoil, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, 225 (9), 2106-2114, 2011.
 30. AURA Sound. Engineering test specification. <http://www.madisound.com/pdf/aurasound/NS3-193-8-S43.pdf>. Yayın tarihi Eylül 19, 2002. Erişim tarihi Haziran 11, 2022.
 31. ANSYS Fluent. Theory Guide. https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v222/en/pdf/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf. Yayın tarihi Temmuz 2022. Erişim tarihi Temmuz 28, 2022.
 32. ANSYS Fluent. Customization Manual. https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v222/en/pdf/Ansys_Fluent_UDF_Manual.pdf. Yayın tarihi Temmuz 2022. Erişim tarihi Temmuz 28, 2022.
 33. Roache P.J., Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies, *ASME J. Fluids Eng.*, 116 (3), 405-13, 1994.
 34. Wu K., Zhang G., Kim T.H., Kim H.D., Numerical parametric study on three-dimensional rectangular counter-flow thrust vectoring control, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part G: J. Aerosp. Eng.*, 234 (16), 2221-2247, 2020.
 35. Roache P.J., Verification of codes and calculations, *AIAA J.*, 36 (5), 696-702, 1998.
 36. ANSYS Fluent. User's Guide. https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v222/en/pdf/Ansys_Fluent_Users_Guide.pdf. Yayın tarihi Temmuz 2022. Erişim tarihi Temmuz 28, 2022.
 37. Çanlıoğlu İ.E., Kara E., 2021, Computational Fluid Dynamics study of lift enhancement on a NACA 0012 airfoil using a synthetic jet actuator, *Uluslararası Katılımlı 23. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Gaziantep-Türkiye*, 396-405, 8-10 Eylül 2021.
 38. Çanlıoğlu İ.E., Computational Fluid Dynamics analysis of recent synthetic jet actuator designs, *Yüksek Lisans Tezi*, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 2021.