



Teorik Makale

Serrasyonlu kanat kenarları ve gürültü azaltma: Aerodinamik çalışmalara genel bir bakış

Şükran Yeşil¹ ve Melih Yıldız²

Öz. Bu çalışma, havacılık sektöründe önemli bir sorun olan aerodinamik gürültü kaynaklarını ve bu gürültülerin azaltılmasına yönelik çözüm önerilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Uçaklar ve diğer hava araçları, yüksek hızlarda hareket ederken, özellikle kanat firar kenarlarında oluşan türbülanslı akışlar nedeniyle çevresel ve operasyonel sorunlara yol açan çeşitli gürültü mekanizmaları üretmektedir. Bu çalışmanın amacı, aerodinamik gürültünün kaynaklarının anlaşılması ve azaltılması için yenilikçi çözüm stratejilerini ortaya koymaktır. Araştırmada, firar kenarlarının geometrik modifikasyonu ve serrasyonların kullanımı üzerine yoğunlaşmış ve bu yaklaşımların türbülansı bozma ve gürültü seviyelerini düşürmede etkili olduğu gözlemlenmiştir. Serrasyonların, düşük frekanslı gürültü bileşenlerini azaltırken aerodinamik performansı koruduğu deneysel ve sayısal analizlerle desteklenmiştir. Çalışma, literatürde daha önce ele alınan teorik yaklaşımları ve analitik modelleri kapsamına alarak serrasyonlu firar kenarlarının gürültü azaltma potansiyelini değerlendirmektedir. Bu çalışma, havacılık endüstrisinde çevresel gürültü yönetimi ve aerodinamik verimlilik hedeflerine yönelik stratejik yaklaşımlar sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalara temel oluşturan bu çalışma, sessiz ve çevre dostu hava araçlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik gürültü, firar kenarı serrasyonları, gürültü kontrolü.

Theoretical Paper

Serrated wing edges and noise reduction: An overview of aerodynamic studies

Abstract. This study provides a detailed examination of aerodynamic noise sources, a significant issue in the aviation industry, and presents solution proposals for noise reduction. Aircraft and other aerial vehicles generate various noise mechanisms, particularly due to turbulent flows occurring at the trailing edges of wings during high-speed operations, leading to environmental and operational challenges. The aim of this study is to understand the sources of aerodynamic noise and to propose innovative strategies for its mitigation. The research focuses on the geometric modification of trailing edges and the use of serrations, observing that these approaches effectively disrupt turbulence and reduce noise levels. Experimental and numerical analyses have demonstrated that serrations reduce low-frequency noise components while maintaining aerodynamic performance. The study evaluates the noise reduction potential of serrated trailing edges by incorporating theoretical approaches and analytical models previously discussed in the literature. This study offers strategic approaches aimed at achieving environmental noise management and aerodynamic efficiency in the aviation industry. Serving as a foundation for future research, this work contributes to the development of quieter and more environmentally friendly aerial vehicles.

Keywords: Aerodynamic noise, trailing edge serrations, noise control.

1 Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, 38039, Kayseri, Türkiye; sukranyesil0@gmail.com (Sorumlu Yazar)

2 Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, 38039, Kayseri, Türkiye; melihy@erciyes.edu.tr

<https://doi.org/10.52995/jass.1571905>

Geliş Tarihi: 22 Ekim 2024; Kabul Tarihi: 5 Şubat 2025; Yayınlanma Tarihi: 28 Şubat 2025

© 2025 Türk Hava Kurumu Üniversitesi. Tüm hakları saklıdır.

Bu makale Creative Commons Atıf-GayriTicari-AynıLisanslaPaylaş 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.



1. GİRİŞ

Havacılık endüstrisi, son yıllarda çevresel etkileri en aza indirmek ve verimliliği artırmak amacıyla gürültü azaltma stratejilerine büyük önem vermektedir. Gürültü, özellikle uçakların ve diğer havacılık araçlarının aerodinamik performansını etkileyen ve çevresel kirliliğe yol açan önemli bir sorundur. Aerodinamik sesin kontrolü ve azaltılması, bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmalarının odak noktasıdır. Çeşitli gürültü mekanizmalarının anlaşılması ve etkin bir şekilde yönetilmesi, uçakların daha sessiz, çevre dostu ve verimli hale getirilmesine yönelik çabaların merkezinde yer almaktadır.

Gürültü kaynakları, özellikle uçak kanatları ve rüzgâr türbinleri gibi aerodinamik yüzeylerde ortaya çıkan çeşitli fiziksel süreçlerle ilişkilidir. Türbülanslı sınır tabaka firar kenarı gürültüsü (TBL-FK), akım ayrılması-stall gürültüsü, laminar sınır tabaka girdap dökülme gürültüsü (LBL VS), kanat ucu girdabı oluşumu gürültüsü ve firar kenarı küntlüğü girdap dökülme gürültüsü gibi ana gürültü kaynakları, bu süreçlerin karmaşıklığını ve gürültü üretiminin ardındaki mekanizmaları gözler önüne sermektedir (Brooks, Stuart, & Marcolini, 1989).

Tablo 1. Gürültü Kaynakları

Gürültü Kaynağı	Detaylar
Türbülanslı sınır tabaka firar kenarı (TBL-FK) gürültüsü	Türbülansın firar kenarında oluşturduğu gürültü
Akım ayrılması/stall gürültüsü	Akışın ayrılması sonucu oluşan gürültü
Laminar sınır tabaka girdap dökülme (LBL VS) gürültüsü	Laminar akışta girdap dökülmesinden kaynaklanan gürültü
Kanat ucu girdabı oluşumu gürültüsü	Kanat ucunda girdap oluşumundan kaynaklanan gürültü
Firar kenarı küntlüğü girdap dökülme gürültüsü	Künt firar kenarında oluşan girdap kaynaklı gürültü

Gürültü azaltma stratejileri ise aktif ve pasif yöntemler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Gruber, Joseph, & Chong, 2012). Aktif yöntemler, plazma aktüatörleri veya sentetik jetler gibi teknolojik bileşenlerin kullanımıyla akış özelliklerini kontrol etmeyi ve gürültüyü azaltmayı amaçlarken, pasif yöntemler ise aerodinamik yüzeylerin tasarımında yapılan değişiklikler, malzeme seçimi ve titreşim kontrolü gibi tekniklerle gürültüyü azaltmayı hedefler (Gruber, Joseph, & Chong, 2012). Bu bağlamda, sınır tabakasının yapısını değiştirme ve kenar işleme yöntemleri, aerodinamik yüzeylerdeki türbülansı azaltarak gürültü seviyelerini düşürmeye yönelik önemli yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 2. Gürültü Azaltma Yöntemleri

Yöntem Kategorisi	Yöntem Türü	Özellikler ve Amaç	Örnek Teknolojiler/Metotlar
Aktif Yöntemler	Akış Kontrol Teknolojileri	Akış özelliklerini değiştirmek ve gürültüyü azaltmak için dışarıdan enerji uygulanır.	Plazma aktüatörleri, sentetik jetler, piezoelektrik cihazlar
	Gürültü Yönetimi	Gürültü kaynağını tespit ederek aktif karşı sinyal üretimi yapılır.	Aktif gürültü iptal sistemleri
Pasif Yöntemler	Aerodinamik Yüzey Modifikasyonları	Gürültü kaynağını pasif olarak kontrol etmek için yüzey tasarımı optimize edilir.	Firar/hücum kenarı serrasyonları, kanat ucu tasarımları
	Malzeme Seçimi	Akustik olarak uygun malzemelerle ses emilimi sağlanır.	Gürültü emici paneller, kompozit malzemeler

Titreşim Kontrolü	Gürültüye neden olan titreşimleri azaltarak aeroelastik etkiler kontrol edilir.	Titreşim sönümleyiciler, elastomer kaplamalar
-------------------	---	---

Özellikle firar kenarı serrasyonlarının kullanımı, gürültü azaltma çalışmalarında dikkat çeken bir yenilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu serrasyonlar, sınır tabakasındaki türbülansın etkisini azaltarak ve ses dalgalarının saçılmasını artırarak, gürültü seviyelerini önemli ölçüde düşürebilmektedir. Gürültü azaltma tekniklerinin geliştirilmesi, havacılık endüstrisinin daha sürdürülebilir bir geleceğe adım atmasına yardımcı olurken, çevresel etkilerin en aza indirilmesine ve toplumsal kabul edilebilirliğin artırılmasına katkıda bulunacaktır. Bu bağlamda Tablo 2'de ele alınan Pasif Yöntemler kategorisi – Aerodinamik Yüzey Modifikasyonları – Firar/hücum kenarı serrasyonları (kanat ucu tasarımları) konu başlığı bu makalede detaylıca incelenmektedir.

2. KENAR İŞLEME YÖNTEMLERİ

Aerodinamik kenar tasarımları, hava akışının kontrol edilmesi, performansın artırılması ve gürültü seviyelerinin düşürülmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Uçak kanatları, rüzgâr türbinleri, otomobil gövdeleri ve diğer aerodinamik yüzeylerde bulunan bu kenarlar, akışın yönlendirilmesi, sürtünmenin azaltılması ve türbülansın kontrol altına alınması için kritik rol oynamaktadır. Bu tasarımlar, akışın yüzeyden ayrılmasını geciktirerek, enerji verimliliğini artırabilir ve aynı zamanda aeroakustik performansı iyileştirebilmektedir (Wang, Zhao, Lu, Song, & Bennett, 2019).

Aerodinamik uygulamalarda, özellikle gürültü azaltımı ve akış performansını optimize etme hedefi, kenar tasarımının önemini her zamankinden daha belirgin hale getirmiştir. Kenar işleme yöntemleri, akışın stabilitesini artırırken türbülansı ve ses emisyonlarını azaltmayı amaçlayan stratejik yaklaşımlar sunmaktadır. Bu yöntemlerin doğru bir şekilde uygulanması, sadece performansı artırmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel etkileri de minimize etmeyi amaçlamıştır (Lee, ve diğerleri, 2021). Aerodinamik yapıların etkinliğini maksimize etmek ve sürdürülebilir tasarımlar geliştirmek için kenar işleme tekniklerinin derinlemesine incelenmesi ve optimize edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, bu makalede kenar işleme yöntemlerinin teorik ve analitik açıdan değerlendirilmesi yapılacaktır.

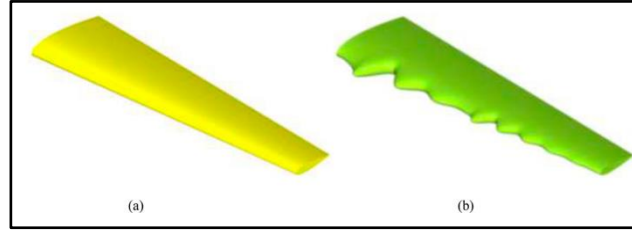
2.1. Hücum Kenarı Serrasyonları

Kenar işleme yöntemleri, aerodinamik yüzeylerdeki gürültüyü azaltmak ve performansı artırmak için kullanılan yenilikçi stratejilerden biri olarak görülmektedir. Hücum kenarı serrasyonları (HKS), bu yöntemlerden biri olarak özellikle havacılık endüstrisinde büyük ilgi görmektedir. HKS, kanat profillerinin hücum kenarındaki şekil değişikliklerini ifade eder ve bu değişiklikler, akış kontrolünü sağlayarak taşıma kuvvetini artırırken aerodinamik gürültüyü azaltabilmektedir. Optimize edilmiş HKS tasarımları, sessiz ve verimli hava araçlarının geliştirilmesinde önemli bir adım olarak kabul edilmektedir.

Hücum kenarı serrasyonları (HKS), özellikle aerodinamik ve aeroakustik performansı optimize etmek için araştırılan yenilikçi yöntemlerden biri olduğu görülmektedir. (Kim, ve diğerleri, 2022) çalışmasında, NACA 65(12)-10 kanat profiline uygulanan HKS tasarımları, gürültü azaltımı ve aerodinamik performans üzerindeki etkilerini anlamak için kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, serrasyonların optimize edilmesiyle hem taşıma kuvvetinin artırıldığı hem de akışın kontrol edilerek gürültü seviyesinin düşürüldüğü görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün minimize edilmesi ve akışın daha etkin bir şekilde yönlendirilmesi, deneysel çalışmalarda elde edilen başarıyı desteklemiştir. Benzer şekilde, hücum kenarındaki şekil değişikliklerinin akış ayrılmalarını kontrol etmesi, laminar-türbülans geçişi geciktirmesi ve gürültü seviyesini düşürmesi HKS'nin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışmada kanat profiline performansını artırmak amacıyla kullanılan hücum kenarı serrasyonlarının kanat profilleri, 3D yazıcı ile üretilmiş ve yüzey pürüzlülüğü $Ra=0,23 \mu m$ olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, etkili Reynolds sayısının 10^6 'ya çıkarılması için, kanat profiline 0,56 m yukarısında bir ızgara (grid) yerleştirilmiştir. Bu ızgara, akışkanlık yoğunluğunu artırarak laminar ayrılma baloncuklarının boyutunu azaltmayı hedeflemiştir. Çalışmada, kanat profiline taşıma katsayısının (C_L) hücum açısına (α) bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Özellikle, ızgara ile yapılan testlerde, C_L 'nin α açısı 5° 'ye kadar lineer bir artış gösterdiği ve maksimum taşıma katsayısının yaklaşık $14,5^\circ$ 'de elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kanat profiline alt yüzeyinde büyük bir laminar ayrılma baloncuğunun (large separation bubble) oluştuğunu ve bu baloncuğun negatif basınç bölgeleri yarattığını göstermektedir. Laminar ayrılma baloncukları, akışın ayrılmasına ve dolayısıyla taşıma kuvvetinin azalmasına neden olabilmektedir.

Serrasyonların etkisi, kanat profilinin aerodinamik performansını iyileştirmede kritik bir rol oynamaktadır. Serrasyonlar, akışın daha düzgün bir şekilde dağılmasını sağlayarak, laminar ayrılma baloncuklarının boyutunu küçültmekte ve bu sayede daha yüksek taşıma katsayıları elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, serrasyonlar, hava akışının ses seviyesini azaltarak aeroakustik performansı da iyileştirmektedir. Bu çalışma, serrasyonların aerodinamik ve aeroakustik özellikler üzerindeki olumlu etkilerini vurgulamaktadır (Kim, ve diğerleri, 2022).

Biyonik tasarım yaklaşımlarının aerodinamik optimizasyon üzerindeki etkilerini inceleyen Lu ve ekibi, tuberkül tasarımlarını optimize ederek kanat profillerinin performansını artırmaya yönelik kapsamlı bir metodoloji geliştirmiştir. Araştırmanın temel bileşenleri arasında geometrik dönüşüm, sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) analizi ve optimizasyon teknikleri yer almaktadır. Geometrik dönüşüm aşamasında, önde bulunan tuberküllerin tasarımını optimize etmek için F-spline eğrileri kullanılarak parametrik bir dönüşüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, farklı tuberkül konfigürasyonlarının oluşturulmasına olanak tanımakta ve akışın daha iyi yönetilmesi ile aerodinamik performansın artırılması amacıyla optimize edilmiştir. Aerodinamik performansın değerlendirilmesi için, Reynolds sayısı 10^5 olan koşullarda NACA0020 kesit profili kullanılarak üç boyutlu akış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar, akışın laminar ve türbülanslı özelliklerini incelemek için Reynolds-ortalama Navier-Stokes denklemleri kullanılarak yapılmış ve akışın ayrışma noktaları, vortex yapıları ve basınç dağılımları gibi önemli aerodinamik parametreler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Optimizasyon süreci, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) ve Kriging Modeli tabanlı Response Surface Method (RSM) kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, geniş bir tasarım alanında yeterli bir global arama yapma imkânı sunarak, optimal tasarımın elde edilmesine kadar devam etmiştir. Serrasyonlar, kanat profilinin üst ve alt yüzeylerinde vortex yapılarının oluşumunu etkileyerek, akışın ayrışmasını ve taşıma kuvvetini artırmaktadır. Çalışmada, tuberküllerin varlığının akışın daha iyi kontrol edilmesine ve stall açısının artırılmasına yardımcı olduğu gösterilmiştir. Elde edilen dört optimal biyonik kanat profili, stall açısını artırmış ve taşıma kuvvetini önemli ölçüde iyileştirmiştir (Lu, Li, Chang, Chuang, & Xing, 2021). Çalışmada kullanılan kanat profili geometrileri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İki Kanat Geometrilerinin Karşılaştırılması: (a) Düzgün Kanat Profili (b) Serrasyonlu Kanat Profili (Lu, Li, Chang, Chuang, & Xing, 2021)

Agrawal ve Sharma çalışmalarında dairesel bir silindire ve kanat profili arasındaki aerodinamik etkileşimden kaynaklanan gürültüyü sayısal olarak analiz etmişlerdir. Sıkıştırılmaz Large Eddy Simulation (LES) ve Curle'nin akustik benzetimini kullanarak yapılan bu çalışmada, serrasyonlu bir kanat profili kullanımının aerodinamik gürültüyü azaltabileceği ve uzak alan ses seviyesinde yaklaşık 1,5 dB'lik bir azalma sağladığı bulunmuştur (Agrawal & Sharma, 2016).

Bu çalışmaların her biri, HKS ve diğer kenar işleme yöntemlerinin hem aerodinamik performansı iyileştirme hem de gürültü azaltma potansiyeli sunduğunu ve bu alanlardaki araştırmaların havacılık teknolojilerinin daha sürdürülebilir hale getirilmesine katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

2.2. Firar Kenarı Serrasyonlarının Rolü

Firar kenarı, kanat ya da pervane gibi aerodinamik yüzeylerin arka bölümüdür ve bu bölge, akışın ayrılma ve yeniden birleşme noktasıdır (Aşkan & Tangöz, 2018). Bu durum, aerodinamik performans üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Aerodinamik gürültü, yaklaşık altmış yıldır hem teknolojik bir zorluk hem de analitik, sayısal ve deneysel araştırmaların merkezinde yer almıştır. Firar kenarlarının tasarımı, gürültü azaltma, taşıma kuvvetinin artırılması ve genel aerodinamik verimliliğin iyileştirilmesi amacıyla önemli bir araştırma alanıdır. Özellikle son yirmi yılda, türbülanslı akışta firar kenarı gürültüsünü azaltmaya yönelik çalışmalarda artış gözlenmektedir. Literatürdeki çalışmalar, kanat profillerinin hücum ya da firar kenarlarında serrasyonlar oluşturularak gürültüyü azaltma

potansiyeli hakkında bilgi vermektedir. Ye vd., serrasyonlu firar kenarlarının akışın kontrolünü sağlayarak hem gürültüyü azaltma hem de aerodinamik performansı artırma potansiyeline sahip olduğunu çalışmalarında belirtmiştir (Ye, Zheng, Zhang, & Li, 2022). Bu yaklaşım, havacılık endüstrisi ve rüzgâr enerjisi sektöründe daha sessiz ve verimli kanatların tasarlanmasına olanak tanıyabileceği görülmüştür. Ancak, çeşitli firar kenarı tasarımlarının karşılaştırmalı bir analizi ve bu tasarımların optimizasyonu için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Firar kenarlarının aerodinamik ve akustik özelliklerinin derinlemesine anlaşılması ve optimize edilmesi hem havacılık hem de rüzgâr enerjisi sektörlerinde daha sessiz ve verimli sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Qaissi, Elsayed, Faqir, & Essadiqi, 2023). Bu bilgiler doğrultusunda, firar kenarı serrasyonları bu makalede teorik tahminler, sayısal simülasyon çalışmaları ve deneysel çalışmalar olmak üzere üç aşamada incelenmiştir. Teorik tahminler, serrasyonların aerodinamik ve akustik performans üzerindeki etkilerini öngörmek için temel bir çerçeve sunarken, sayısal simülasyon çalışmaları akış yapısını detaylı bir şekilde modelleyerek bu etkileri görselleştirme ve analiz etme imkânı sağlamaktadır. Son olarak, deneysel çalışmalar, bu teorik ve sayısal sonuçların gerçek dünya koşullarında doğrulanmasına olanak tanımaktadır.

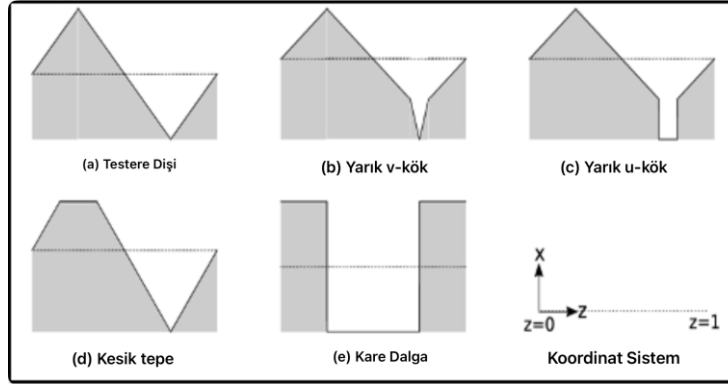
2.2.1. Teorik tahminler

Serrasyonlu kenar tasarımlarının, düşük Mach sayılı türbülanslı akışlarda ve çeşitli geometrik parametrelerde gürültü azaltmadaki potansiyeli uzun zamandır ilgi çeken bir araştırma konusu olmaktadır. Bu konudaki teorik çalışmalar, serrasyonların ses üretimine etkisini inceleyerek daha verimli tasarımlar geliştirmeye ışık tutmaktadır. Bu bağlamda, Howe (Howe, 1991) ve Ayton (Ayton, 2018) tarafından yapılan teorik çalışmalar, serrasyon geometrisinin akustik etkilerini farklı yaklaşımlarla değerlendirmektedir. Her iki çalışma da teorik tahminlere dayalı olarak, serrasyonlu kenarların gürültü azaltma performansını belirleyen kritik faktörleri ortaya koymaktadır.

Serrasyonlu bir kenara sahip bir plakadan kaynaklanan gürültüyle ilgili ilk teorik tahminler, 1991 yılında M. S. Howe tarafından yapılmıştır (Lee, ve diğerleri, 2021). Howe, düşük Mach sayılı türbülanslı akışın düz bir plaka kanadının serrasyonlu kenarı üzerinde ürettiği gürültüyü teorik olarak incelemiştir. (Howe, 1991) çalışmasına göre, serrasyonlu kenarın ses yoğunluğunu azaltma potansiyeline sahip olduğu uzun zamandır düşünülmektedir. Howe, sesin azalmasını, ses üretimine katkıda bulunan kanat kenarının açıklık uzunluğunda etkili bir azalmadan kaynaklandığını öne sürmüştür. Bu teoriye göre, düzgün değişen serrasyonların ses azaltma etkisi, kanat kenarının açıklık uzunluğunda etkili bir azalma ile ilişkilidir. Ayrıca, jet motoru test hücrelerinin çevresel gürültüsünü azaltmak için egzoz rampasının serrasyonlu olması gerektiğini öneren çalışmalar, bu yöntemle 5 dB veya daha fazla bir azalma sağlanabileceğini göstermiştir. Howe'un bu yöntemle birlikte, serrasyonlu kenar tasarımının gürültü azaltma potansiyelini belirlemek amacıyla eğim açısı, boyutlar ve serrasyon tipi gibi faktörler incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, eğim açısının gürültü seviyelerinde belirgin azalmalar sağlayabileceği gözlemlenmiştir. Howe, kenarlarının akış yönüne göre 45 dereceden daha küçük bir açıyla eğimli olan veya $\lambda/h < 4$ olan serrasyonların, firar kenarı gürültü azaltmasını yaklaşık olarak $10 \log[1 + (4h/\lambda)^2]$ dB olarak bildirmiştir. Burada, λ spanwise dalga boyunu ve h kökten uca mesafeyi temsil etmektedir. Ayrıca, serrasyon tipinin (düzgün serrasyonlu veya sinüzoidal serrasyonlu) gürültü azaltma potansiyelini etkilediği ve uygun bir serrasyon tipinin seçilmesinin gürültü azaltma performansını artırabileceği sonucuna varılmıştır.

Howe'un teorik analizleri, serrasyonların kanat kenarındaki açıklık uzunluğunda yarattığı azalmaların gürültü seviyelerinde belirgin bir düşüşe yol açabileceğini göstermektedir. Bu teorik temele dayanan daha sonraki çalışmalarda, Ayton gibi araştırmacılar serrasyonlu geometrilerin aerodinamik gürültü üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı olarak incelemiş ve farklı geometrik düzenlemelerin, özellikle yüksek frekanslarda gürültü azaltımında belirgin farklar yarattığını gözlemlenmişlerdir (Ayton, 2018).

Çalışma sırasında analiz edilen beş farklı firar kenarı geometrisi kullanılmıştır (Şekil 2): Serrasyonlu, yarı V-kök, yarı U-kök, kesik tepe ve kare dalga olarak gösterilmektedir. Analizler, bu geometrilerin düşük ve yüksek frekanslarda gürültü azaltma potansiyelini ortaya koymaktadır. Düşük frekanslarda (yaklaşık 200 Hz civarında), kare dalga geometrisi, gürültü seviyelerinde yaklaşık 10 dB'lik bir azalma sağlamaktadır. Bu, düşük frekanslarda yıkıcı girişimin etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Fırar Kenarı Geometrileri (Ayton, 2018)

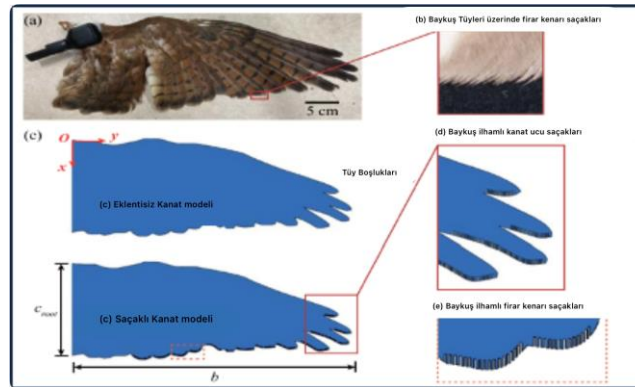
Yüksek frekanslarda (yaklaşık 2000 Hz ve üzeri) serrasyonların etkisi daha belirgin halde incelenen çalışmada görülmektedir. Ayrıca çalışmada, serrasyonların, akustik enerjinin düşük kesim modlarından yüksek kesim modlarına yeniden dağıtılmasına yardımcı olduğu belirtilmektedir. Bu mekanizma, özellikle düz kesim olmayan geometriler için daha etkili olmaktadır. Düz kenar geometrisi ile karşılaştırıldığında, serrasyonlu kenar geometrisi, 4000 Hz'de gürültü seviyelerinde yaklaşık 4 dB'lik bir azalma sağlamaktadır.

Genel olarak, serrasyonların aerodinamik gürültü üzerindeki etkileri, hem deneysel hem de analitik sonuçlarla desteklenerek, gelecekteki aerodinamik tasarımlar için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır (Ayton, 2018).

Çalışmalardan elde edilen bulgular, fırar kenarı serrasyonlarının aerodinamik gürültü üzerinde önemli bir azaltma etkisi sağladığını ortaya koymaktadır. Howe'un teorik analizleri, serrasyonların kanat kenarındaki açıklık uzunluğunu küçülterek ses yoğunluğunu azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayton'un sayısal simülasyonlar ve teorik tahminlere dayanan çalışması ise, farklı geometrik düzenlemelerin düşük ve yüksek frekanslarda gürültü seviyelerinde önemli azalmalar sağladığını ortaya koymuştur.

2.2.2. Sayısal simülasyon çalışmaları

Optimizasyon odaklı yaklaşımlar, mühendislik tasarımlarına yeni bir boyut kazandırırken, doğadan ilham alan biyomimetik çözümler, yenilikçi uygulamaların kapısını aralamaktadır (Timothy, 2024). Bu tür çalışmalar, doğal sistemlerin benzersiz gürültü azaltma mekanizmalarını teknolojiyle birleştirmeyi amaçlaması bir simülasyon örneği olarak görülebilmektedir. Başlıca doğal simülasyon örneği olarak dikkat edilen husus baykuş kanatları olarak literatürde yer almaktadır. Baykuş kanatları, doğanın mühendislik harikalarından biri olarak kabul edilmekte ve özellikle sessiz uçuş yetenekleri ile dikkat çekmektedir. Bu doğal tasarım, modern havacılıkta gürültü azaltma ve aerodinamik performansın artırılması konusunda ilham kaynağı olmuştur. Jiaxin Rong ve arkadaşlarının çalışması, baykuş kanatlarının özel geometrik özelliklerinin aerodinamik performansa ve gürültü seviyelerine etkilerini araştırmaktadır. Şekil 3'te gösterilen kıvrımlı hücum kenarı, dalgalı fırar kenarı ve tüy yuvaları gibi detayların aerodinamik avantajları ve gürültü azaltma potansiyeli, aeroakustik simülasyonlar kullanılarak değerlendirilmiştir (Rong, ve diğerleri, 2024).



Şekil 3. (a) Japon Baykuşunun (Ninox Japonica) Sağ Kanadının Bir Fotoğrafı (b) Baykuş Tüyünün Fırar Kenarının Yakın Çekimi (c) Baykuş Kanat Geometrisine Dayalı İki 3D Kanat Modeli (d) Kanat Ucundaki Saçak Benzeri Yapılar (e) Fırar Kenarı üzerindeki Saçak Benzeri Yapılar (Rong, ve diğerleri, 2024)

Simülasyon sonuçları, baykuş kanatlarının firar kenarındaki saçakların hem aerodinamik performansı artırdığını hem de gürültü seviyelerini düşürdüğünü göstermektedir. Firar kenar saçakları, akışı düzenleyerek taşıma kuvvetini artırmakta ve sürüklenme kuvvetini azaltmaktadır. Ayrıca, saçaklar akışın düzensizliklerini azaltarak ve girdap oluşumunu kontrol ederek gürültü seviyelerini düşürmektedir. Saçakların esnekliği ve şekli, akış üzerindeki etkileri belirleyerek, esnek saçakların akışı daha etkili bir şekilde kontrol edebildiği ve gürültüyü azaltabildiği bulunmuştur (Rong, ve diğerleri, 2024). Bu amaçla aşağıda kanat modelleri ve akustik simülasyonlara ayrıca yer verilmiştir.

- ⇒ **Kanat Modelleri:** Baykuş kanatlarının geometrik özelliklerine dayalı olarak iki farklı kanat modeli oluşturulmuştur. Bu modeller, kıvrımlı hücum kenarı, dalgalı firar kenarı ve firar kenarı saçakları gibi özel özellikler içermektedir.
- ⇒ **Aeroakustik Simülasyonlar:** Kanat modellerinin aerodinamik ve akustik performanslarını değerlendirmek için simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlar, saçakların akış üzerindeki etkilerini ve gürültü seviyelerini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır.

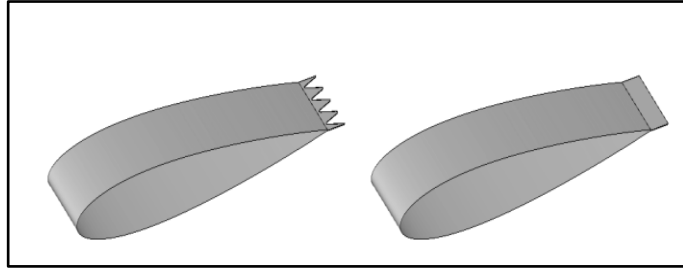
Firar kenarı serrasyonları, yalnızca gürültü azaltma amacıyla değil, aynı zamanda aerodinamik verimliliği artırmak için de kullanılabileceğini göstermek için Jones ve Sandberg, NACA-0012 kanat profilinin firar kenarına eklenen serrasyonların (Şekil 4) aerodinamik gürültü üzerindeki etkilerini incelemektedir. Kanat profili gürültüsü, özellikle rüzgâr türbinleri ve diğer aerodinamik yapılar için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Çalışmanın temel amacı, serrasyonların kanat profilinin kendine ait gürültü seviyelerini nasıl etkilediğini anlamak ve bu bilgiyi daha iyi tasarımlar geliştirmek için kullanmaktır.

Araştırmada, doğrudan sayısal simülasyon (DNS) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, akışın karmaşık dinamiklerini modellemek için tercih edilmiştir ve özellikle yüksek Reynolds sayıları ile karakterize edilen akışlarda etkili sonuçlar vermektedir. Çalışmada, NACA-0012 kanat profilinin 5° ve 7° açılarıyla incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu açıların seçilmesi, akışın laminar ve türbülanslı bölgeleri arasındaki geçişin incelenmesine olanak tanımaktadır. Reynolds sayısı, akışın karakterini belirleyen önemli bir parametre olup, bu çalışmada $Re=5 \times 10^4$ olarak belirlenmiştir. Bu değer, akışın laminar ve türbülanslı özelliklerini etkileyen bir aralıkta yer almaktadır.

Serrasyonlar, düz bir plaka uzantısı olarak tasarlanmış ve bu sayede sınır tabakasının etkisi minimize edilmiştir. Serrasyonların geometrisi, akışın dinamiklerini değiştirecek şekilde optimize edilmiştir. Serrasyonların, akışın altındaki gürültü seviyelerini azaltma potansiyeli, özellikle düşük frekanslı gürültüde belirgin hale gelmiştir. Çalışma, serrasyonların akışın altındaki gürültü seviyelerini 2-3 dB oranında azaltabileceğini göstermektedir. Bu azalma, özellikle düşük frekanslarda daha belirgin hale gelmiş ve rüzgâr hızı arttıkça etkisi artmıştır.

Serrasyonların etkisi, akışın üst yüzeyindeki ek gürültü kaynaklarının etkisiyle de ilişkilidir. Düşük frekanslarda, firar kenarı gürültüsü baskınken, yüksek frekanslarda üst yüzeydeki ek gürültü kaynakları daha önemli hale gelmektedir. Serrasyonlar, akışın altındaki gürültü seviyelerini azaltarak, akışın üst yüzeyindeki gürültü kaynaklarının etkisini dengelemektedir. Bu durum, akışın dinamiklerini ve gürültü üretim mekanizmalarını anlamak için önemlidir (Jones & Sandberg, 2010).

Sonuç olarak bu çalışma, serrasyonların kanat profili gürültüsünü azaltma potansiyelini ortaya koymuş ve bu mekanizmaların anlaşılmasının, gelecekteki tasarım iyileştirmeleri için önemli bir temel oluşturduğunu göstermiştir. Serrasyonların aerodinamik performansı olumsuz etkilemeden gürültü seviyelerini azaltma yeteneği, rüzgâr türbini ve diğer aerodinamik yapıların tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Bu bulgular, kanat profili tasarımında gürültü azaltma stratejilerinin geliştirilmesine yönelik yeni yaklaşımlar sunmaktadır (Jones & Sandberg, 2010).



Şekil 4. Serrasyonlu (solda) ve Düz (sağda) Firar Kenarı Uzantısı ile Kanat Profili Geometrisi (Jones & Sandberg, 2010)

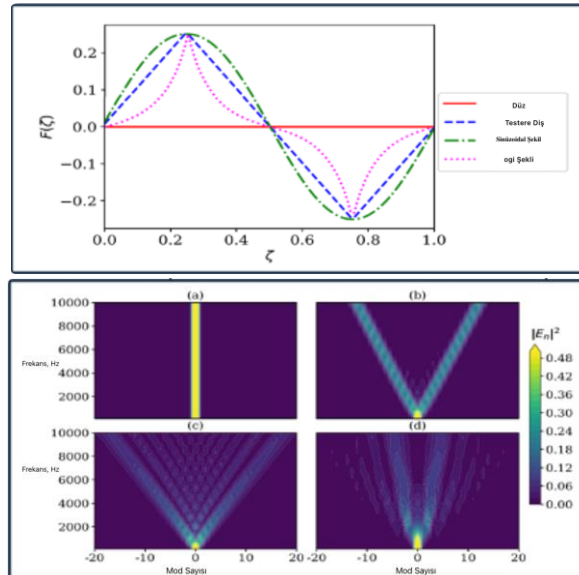
Serrasyonların şekli, boyutlandırılması ve geometrik parametrelerinin akış dinamikleri üzerindeki etkisi, özellikle düşük gürültü hedefleyen uygulamalarda büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu kapsamda, Pavel Kholodov ve Stéphane Moreau 2021 yılında firar kenarı serrasyonlu şekillerinin gürültü azaltma üzerindeki etkilerini optimize etmek amacıyla bir çalışma yürütmüştür (Kholodov & Moreau, 2021). Bu çalışma, hava akışının gürültü azaltma potansiyelini artırmak amacıyla firar kenarı serrasyonlarının optimizasyonunu ele almaktadır. Serrasyonların aerodinamik etkileri, özellikle Reynolds sayısı ile ilişkilidir. Bu çalışma bağlamında, düşük Reynolds sayılarında (10^4 civarı) serrasyonların etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Düşük Reynolds sayılarında, serrasyonlar, akışın daha düzenli hale gelmesine ve dolayısıyla gürültü seviyelerinin düşmesine yardımcı olmaktadır. Ancak, yüksek Reynolds sayılarında, akışın daha karmaşık hale gelmesi ve türbülansın artması, serrasyonların etkisini azaltabilmektedir.

Çalışmada, serrasyonların şekli, genişliği ve dalga boyu gibi geometrik parametreler üzerinde durulmuştur.

Serrasyon Genliği: Serrasyon genişliğinin artırılması, gürültü düzeyinin azalmasında olumlu bir etki yaratmıştır. Serrasyonların genişliğinin artırılması, akışın bölgesel dinamiklerini değiştirerek, aerodinamik gürültüyü etkili bir şekilde azaltmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, daha yüksek genlikli serrasyonların gürültü azaltmada daha fazla verim sağladığını göstermektedir.

Serrasyon Dalga Boyu: Farklı dalga boylarına sahip serrasyon yapılarının incelendiği analizler, dalga boyunun uzaması ile optimal şeklin ogi'den testere dişli ve daha sonra sinusoidal veya v şekline geçiş yaptığını ortaya koymuştur (Şekil 5). Bu geçiş, gürültü azaltmanın daha homojen ve etkili bir şekilde sağlanması açısından önemlidir. Özellikle daha uzun dalga boylarında gürültü azaltma etkisinin belirgin ölçüde arttığı görülmüştür.

Serrasyon Şekli: Çalışmada, serrasyonların şeklinin gürültü üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Serrasyonlar Ayton'un çalışmaları baz alınarak (Ayton, 2018), genellikle üç ana şekil altında sınıflandırılmaktadır: kesik tepe (chopped-peak), v-köklü (v-rooted) ve dişli (sawtooth) serrasyonlar. Yapılan optimizasyon çalışmaları, en iyi gürültü azaltma performansını sağlayan şeklin kesik tepe ve v-köklü serrasyonların bir kombinasyonu olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, Ayton'un teorik bulgularını da desteklemektedir; zira yarık v-köklü serrasyonların, düz ve dikdörtgen kesitli şekillere göre daha faydalı olduğu ortaya konmuştur.



Şekil 5. Farklı Fırar Kesit Şekilleri için Oluşturulan Radyasyon İntegralinin Kontur Grafları: (a) Düz Kenar (b) Serrasyon Şekil (c) Sinüzoidal Şekil (d) Ogi Şekil (Kholodov & Moreau, 2021)

Analitik model, serrasyonların etkisini daha iyi anlamak için çeşitli geometrik parametreleri incelemektedir. Serrasyonların genliği ve dalga boyu gürültü azaltma performansını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Serrasyonların genliği arttıkça, gürültü azaltma potansiyeli de artmakta, ancak belirli bir noktadan sonra (genlik/ dalga boyu 0,15) bu etki azalmaktadır. Çalışmada, en iyi gürültü azaltma performansının, yüksek frekanslarda (1000 Hz üzeri) 10 dB'ye kadar bir azalma sağladığı belirtilmiştir. Özellikle, serrasyonların dalga boyunun artmasıyla birlikte, optimal şeklin değiştiği ve gürültü azaltma marjının en iyi ve en kötü şekil arasında azaldığı gözlemlenmiştir.

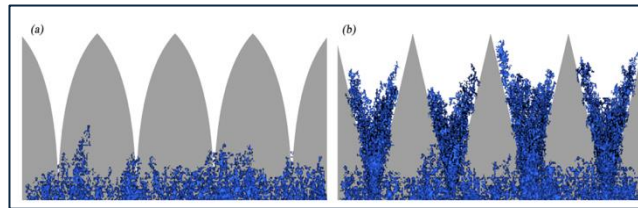
Bu çalışma, fırar kenarı serrasyonlarının şeklinin ve geometrik parametrelerinin, hava akışının gürültü seviyeleri üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemekte ve optimizasyon süreçleri ile en iyi performansı sağlayan tasarımları ortaya koymaktadır. Serrasyonların aerodinamik özellikleri, özellikle Reynolds sayısı gibi faktörlerle birleştiğinde, gürültü azaltma stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma, serrasyonların gürültü azaltma potansiyelinin, akış koşullarına bağlı olarak değiştiğini ve bu nedenle tasarım süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli bir faktör olduğunu vurgulamaktadır.

2017 yılında fırar kenarı geometrilerinin akustik performans üzerindeki etkilerini inceleyen diğer bir çalışmada Avallone ve ekibi özellikle geleneksel dişli (sawtooth) ve demir şekilli (iron-shaped) (Şekil 6) fırar kenarı serrasyonlarının akış dinamikleri ve gürültü spektrumları üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmiştir.

Deneyel tasarımda, düz bir plaka üzerinde sıfır hücum açısıyla birlikte dişli fırar kenar geometrileri incelenmiştir. Deneyel model, üçgen dişliler ve demir şekilli dişliler ile donatılmıştır. Akustik gürültü, Ffowcs-Williams ve Hawkins (FWH) analojisi kullanılarak tahmin edilmiştir. Deneylerde, serbest akış hızı $U_1=20\text{m/s}$ olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında, farklı Reynolds sayıları hesaplanmıştır.

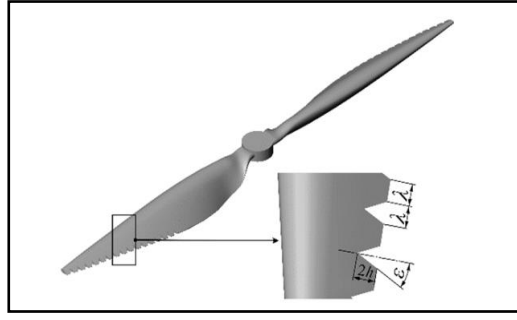
Çalışmada, demir şekilli dişlinin, geleneksel üçgen dişlilere göre daha iyi bir gürültü azaltma performansı sergilediği bulunmuştur. Özellikle, yüksek frekanslarda gürültü azaltma yoğunluğu $10 \log[1 + (4h/\lambda)^2]$ dB formülü ile tahmin edilmiştir. Burada λ dişli dalga boyunu, h ise dişli yüksekliğini temsil etmektedir. Deneyel sonuçlar, demir şekilli dişlilerin, geleneksel tasarımlara göre daha düşük gürültü seviyeleri sağladığını göstermektedir. Belirli frekans aralıklarında gürültü seviyelerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir; bu azalma, özellikle düşük frekanslarda daha belirgin olup, gürültü seviyelerinde yaklaşık 3 dB ile 5 dB arasında bir düşüş sağlanmıştır.

Akustik güç spektrumları, mikrofon ile kaydedilen basınç dalgalanmalarının zaman serilerinden elde edilmiştir. Bu veriler, dişli tasarımlarının akustik performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, aeroakustik tasarımlar için önemli bir temel oluşturmaktadır. Gelecek çalışmalarda, farklı dişli geometrileri ve akış koşulları altında daha fazla deney yapılması önerilmektedir (Avallone, Van Der Velden, & Ragni, 2017).



Şekil 6. Demir Şekilli (a) ve Üçgen Serrasyon (b) Fırar Kenarı (Avallone, Van Der Velden, & Ragni, 2017)

Fırar kenarı serrasyonlarının aerodinamik gürültü azaltma üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar, farklı tasarımların performansını değerlendirmeye yönelik önemli bulgular sunmaktadır. 2018 yılında Jieyan Chen ve ekibinin gerçekleştirdiği çalışma, yarı düz uçlu serrasyonlu kenarların (Şekil 7) aerodinamik gürültü performansını incelemek amacıyla dar serrasyonlu ve geniş serrasyonlu kanatların serrasyon tasarımını karşılaştırmaktadır. Araştırma, bu kanatların 3000 RPM dönerken gürültü seviyelerini nasıl etkilediğini değerlendirmek için çeşitli konumlarda gürültü ölçümleri gerçekleştirmiştir (Chen, Xie, & Lee, 2023).



Şekil 7. Yarım Düz Uçlu Serrasyonlu Pervane (Chen, Xie, & Lee, 2023)

Elde edilen sonuçlar, geniş serrasyonlu kanadın genel olarak daha etkili bir gürültü azaltma performansı sergilediğini göstermektedir. Geniş serrasyonlu kanat, belirli bir konumda 3,3 dBA'ya kadar gürültü azaltma sağlarken, dar serrasyonlu kanat ise daha düşük bir gürültü azaltma performansı göstermiştir. Bu durum, geniş serrasyonların akışın daha düzgün bir şekilde dağılmasına olanak tanıdığı ve dolayısıyla aerodinamik gürültüyü daha etkili bir şekilde azalttığı sonucunu desteklemektedir.

Gürültü spektrum analizi, döner kanatların aerodinamik gürültüsünün iki ana bileşenden oluştuğunu ortaya koymaktadır: döner gürültü ve geniş bant gürültüsü. Geniş serrasyonlu kanat, 600 Hz ile 2000 Hz arasındaki frekanslarda geniş bant gürültüsünü etkili bir şekilde azaltmış, bu frekans aralığında ses basıncı seviyeleri (SPL) sürekli olarak azalmıştır. Bu durum, gürültü seviyesinin düşmesine katkıda bulunmuş ve geniş serrasyonların aerodinamik performansı olumsuz etkilemeden gürültüyü azaltma potansiyelini vurgulamaktadır. Geniş serrasyonlu kanat, aerodinamik gürültü azaltma açısından daha avantajlı bir tasarım olarak öne çıkmakta ve bu çalışma, gelecekteki araştırmalar için önemli bir temel oluşturmaktadır. Bu bulgular bir araya geldiğinde, firar kenarı serrasyonlarının sadece gürültü azaltmada değil, aynı zamanda aerodinamik verimliliği artırmada da önemli bir araç olduğu görülmektedir. Her bir çalışmanın sunduğu farklı perspektifler, serrasyon tasarımı ve optimizasyonuna yönelik daha bütüncül yaklaşımlar geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, bu araştırmaların sonuçları, gelecekteki mühendislik uygulamalarında ve gürültü azaltmaya yönelik yenilikçi tasarımların geliştirilmesinde yol gösterici bir rol üstlenmektedir.

Kanat profili gürültüsünün azaltılması için yenilikçi yaklaşımlar geliştirmek, havacılık ve mühendislik alanında önemli bir araştırma konusudur. Bu bağlamda, Chenghao Yang ve ekibi (Yang, Liu, Zhang, & Bi, 2024), hava üfleme ve firar kenarı kesitliliğini birleştiren hibrit üfleme-kesitlilik yöntemini inceleyerek, pasif ve aktif kontrol stratejilerinin birleşiminden elde edilen üstün gürültü azaltma performansını detaylı bir şekilde değerlendirmiştir. Çalışmada, NACA0012 tipi bir kanat profili üzerinde Reynolds sayısı $Re=4 \times 10^5$ koşullarında hava üfleme, firar kenarı kesitliliği ve hibrit üfleme-kesitlilik yöntemlerinin etkileri incelenmiştir (Şekil 8).

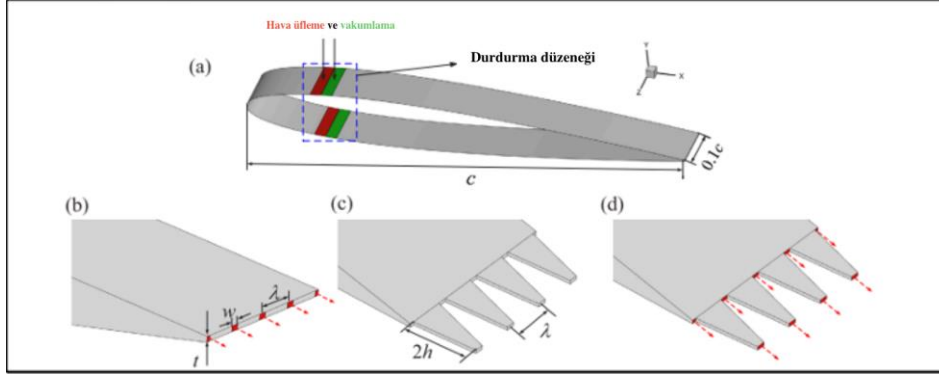
Hibrit yöntemin üç gürültü azaltım mekanizması üzerinden çalıştığı belirtilmektedir: üfleme, firar kenarı kökü ve ucu üzerindeki serrasyona doğru akış hareketini ortadan kaldırarak zorunlu akış hizalaması sağlamaktadır; yakın akıntıda türbülans enerjisini zayıflatmakta ve firar kenarında gürültü kaynaklarının yıkıcı müdahalesine neden olarak gürültü kaynaklarının arasındaki koheransı azaltmaktadır.

NACA 0012 kanat profilinin türbülanslı sınır tabakası firar kenarı gürültüsü üzerindeki etkilerini analiz etmek için incompressible Large Eddy Simulation (LES) yöntemi kullanılmıştır. Bu sayısal yöntem, ANSYS Fluent 19.2 ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Ffowcs Williams-Hawkins akustik benzetimi kullanılarak yakın alan akış verileri ve akustik alan tahmin edilmiştir. Bu yöntemler, hava üfleme, firar kenarı serrasyonu ve hibrit üfleme-serrasyonu kontrol yöntemlerinin kanat profilinin kendi gürültüsü üzerindeki etkilerini karşılaştırmak için kullanılmıştır.

Çalışmanın sonuçları şu şekilde özetlenebilmektedir:

- Hibrit üfleme-kesitlilik yöntemi geniş bant gürültüsünde %20,5 ve genel ses basınç seviyesinde 5,7 dB'ye kadar maksimum azalma sağlamıştır.

- Hibrit yöntem, üfleme, firar kenarı kökü ve ucu üzerindeki serrasyona doğru akış hareketini ortadan kaldırarak zorunlu akış hizalaması sağlamıştır.
- Yakın akıntıda türbülans enerjisini zayıflatarak gürültü azaltımı sağlamıştır.
- Firar kenarında gürültü kaynaklarının yıkıcı müdahalesine neden olarak gürültü kaynaklarının arasındaki koheransı azaltmıştır.
- Hibrit yöntem, aktif ve pasif kontrol yöntemlerine kıyasla üstün performans sergilemiştir.



Şekil 8. NACA0012 Kanat Profili Konfigürasyon Taslağı (Yang, Liu, Zhang, & Bi, 2024)

Şekil 8'de, (a)'daki kırmızı ve yeşil alan, tetikleme için tekdüze bir üfleme ve emmeyi temsil eder; (b)'deki kırmızı oklar, firar kenardaki üfleme jetlerini gösterir; (c)'de firar kenarı serrasyonlu durumu ve (d)'de serrasyon kökünde ve ucunda lokal üfleme ile hibrit üfleme-serrasyon durumu gösterilmektedir.

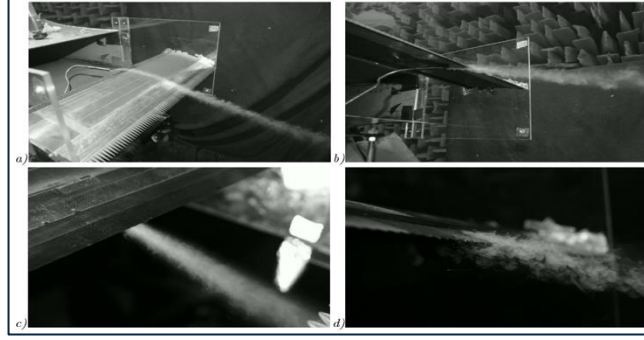
Firar kenarı serrasyonlarının aerodinamik gürültü azaltma üzerindeki etkilerini inceleyen sayısal simülasyon çalışmalarından elde edilen bulgular, bu tasarım unsurlarının hem aerodinamik verimliliği artırma hem de gürültü seviyelerini düşürme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Baykuş kanatları gibi doğal tasarımlardan ilham alınarak yapılan simülasyonlar, serrasyonların aerodinamik performansı artırırken gürültüyü azalttığını ortaya koymuştur. Çalışmalarda, firar kenarı serrasyonlarının şekli, boyutu ve geometrik parametreleri, düşük Reynolds sayılarında özellikle etkili gürültü azaltma sağlarken, yüksek Reynolds sayılarında etkilerinin daha az belirgin olduğu bulunmuştur. Ayrıca, hibrit üfleme-kesitlilik yöntemlerinin birleştirilmesiyle sağlanan gürültü azaltma performansı, pasif ve aktif kontrol stratejilerinin kombinasyonunun gürültü seviyelerini daha etkili bir şekilde düşürebileceğini göstermektedir.

2.2.3. Deneysel çalışmalar

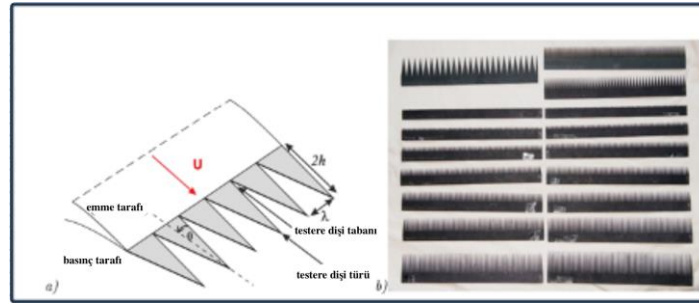
Gruber ve arkadaşları, NACA65(12)-10 profiline sahip bir kanat profili üzerinde serrasyonlu kenarların etkilerini deneysel olarak incelemiş (Şekil 9) ve Howe'un teorik modeli ile karşılaştırmıştır (Gruber, Joseph, & Chong, 2012). Deneyler, açık jetli bir rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. NACA65(12)-10 kanat profili üzerinde farklı serrasyonlu kenar geometrileri kullanılarak akustik ve aerodinamik ölçümler yapılmıştır. Test edilen geometriler, serrasyon yüksekliği (h), serrasyon periyodu (λ), sınır tabakası kalınlığı (δ) gibi parametreler üzerinden incelenmiştir (Şekil 10). Ayrıca, Strouhal sayısı ($St = f\delta/U0$) ve frekans bağımlılığı değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, keskin serrasyonlu kenarların belirli frekans aralıklarında gürültüyü azaltmada etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle, gürültü azaltımının en etkili olduğu frekans aralığı, $St\delta = f\delta/U0 \sim 1$ olarak belirlenmiştir. Serrasyon yüksekliği ($h/\delta > 0,5$) arttıkça gürültü azaltımının daha belirgin hale geldiği ve $h/\delta > 2$ olduğunda maksimum verimliliğe ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Ancak, h/λ oranının, Howe'nin teorik modeline göre, ses güç seviyesi farkında belirgin bir etki yaratmadığı tespit edilmiştir.

Howe'un teorik modelinin, bazı durumlarda deneysel verilerle uyumlu olmadığı ve gürültü azaltma seviyelerini aşırı tahmin ettiği görülmüştür. Bu, modelin sınır tabakası kalınlığı ve serrasyon geometrisi gibi parametreler üzerindeki etkisinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, gürültü azalmalarının yalnızca $\omega\delta/Uc < 9$ için gerçekleştiği ve $\omega\delta/Uc > 9$ için gürültü artışları olduğu belirlenmiştir.

Gruber ve arkadaşlarının çalışması, serrasyonlu kenarların gürültü azaltım potansiyelini başarılı bir şekilde ortaya koymuş, ancak Howe'un analitik çözümünün bazı durumlarda deneysel verilerle uyumlu olmadığını ve modelin iyileştirilmesi gerektiğini göstermiştir.



Şekil 9. Kanat Profili Etrafındaki Akışın Deneysel İncelenmesi (Gruber, Joseph, & Chong, 2012)



Şekil 10. (a) Bir Test Parametreleri h ve λ ile Test Edilen Serrasyonlu Kenarın bir Taslağı (b) Bir Lazer Kesici ile Üretilmiş Serrasyonlu Firar Kenarı Takımlarından bir Örneği Gösteren bir Fotoğraf (Gruber, Joseph, & Chong, 2012)

Havacılık endüstrisinde gürültü kontrolü, çevresel ve regülasyon gereksinimleri açısından büyük bir öneme sahiptir. Özellikle, tonal gürültü kontrolü, uçak performansını olumsuz etkileyebilecek unsurlardan biridir (Xie, Zhu, & Lee, 2023). Tze Pei Chong ve arkadaşları, NACA-0012 profiline sahip bir kanat profili üzerinde firar kenarı serrasyonlarının tonal gürültü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemektedir (Chong & Joseph, 2013).

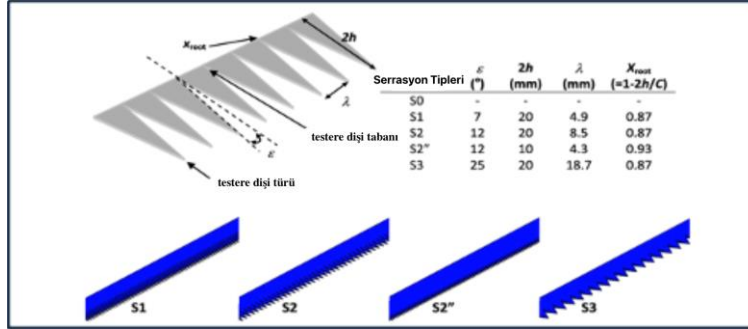
Deneysel çalışmalar, 0,15 m veter uzunluğuna ve 0,45 m kanat açıklığına sahip NACA-0012 kanat profili üzerinde gerçekleştirilmiştir. Firar kenarı serrasyonları üzerinde serrasyon açısı (ϵ), kökten uca mesafe ($2h$) ve serrasyon dalga boyu (λ) gibi parametreler test edilmiştir (Şekil 11).

Çalışmada, hava akış hızları 10 ile 60 m/s arasında değişirken, bu hızlar 1×10^5 ile 6×10^5 arasında Reynolds sayıları ile ilişkilendirilmiştir. Bu geniş Reynolds sayısı aralığı, düşük ve orta hızlarda kanat profilinin performansını anlamak için kritik öneme sahiptir.

Firar kenarındaki serrasyonların etkisi, özellikle tonal gürültü seviyelerinin azaltılması açısından belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Çalışmada, serrasyon açısı (ϵ) ve serrasyon uzunluğu ($2h$) gibi iki ana parametrenin, tonal gürültü seviyelerini önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Serrasyonların, akışın kararsızlıklarını ve gürültü kaynaklarını nasıl etkilediği üzerine yapılan analizler, Tollmien-Schlichting (T-S) dalgaları ve ayrılma baloncuklarının (separation bubble) rolünü vurgulamaktadır. Bu iki unsur, kanat profilinin firar kenarından yayılan tonal gürültünün etkili bir şekilde radyasyonunu sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Serrasyonlar, akışın yapısını değiştirerek, firar kenarı üzerindeki akış kararsızlıklarını azaltmakta ve bu sayede gürültü seviyelerini düşürmektedir. Özellikle, serrasyonlu firar kenarının varlığı, akışın daha karmaşık hale gelmesine ve bu sayede gürültü kaynaklarının etkisinin azalmasına yol açmaktadır. Çalışmada, düz firar kenarı ile serrasyonlu firar kenarı arasındaki farklar incelenmiş ve serrasyonlu firar kenarının, akışın kararsızlıklarını bastırarak, gürültü seviyelerini önemli ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir. Tonal gürültü seviyelerinde belirgin bir azalma sağlanmış ve bu azalma, 3 dB ile 10 dB arasında değişen değerlerle ifade edilmiştir.

Ayrıca, deneysel ölçümler sırasında, akışın ayrılma noktalarının belirlenmesi için geliştirilen bir teknik, ayrılma bölgesinin varlığını tespit etmekte kullanılmıştır. Bu teknik, T–S dalgalarının konvektif faz kaymasını kullanarak, ayrılma noktasının kanat profilinin basınç yüzeyine yakın bir konumda olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, serrasyonlu firar kenarlarının aerodinamik performansını ve gürültü kontrolünü etkileyen önemli bir faktördür.



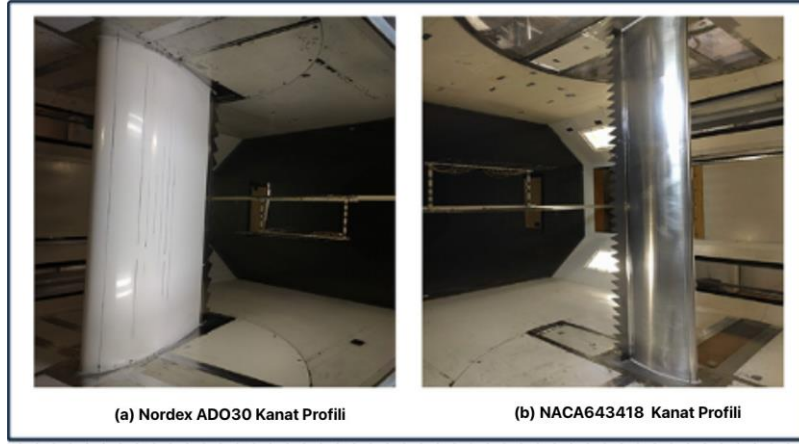
Şekil 11. Kanat Profilinin Firar Kenarındaki Serrasyonla İlişkili Parametreler (Chong & Joseph, 2013)

Rüzgâr türbinleri, enerji üretiminde önemli bir rol oynamaktadır, ancak bu türbinlerin çalışma sırasında ürettiği gürültü, çevresel etki ve toplumsal kabul açısından sorun teşkil edebilir. Bu nedenle, rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik özelliklerini iyileştirmek ve gürültüyü azaltmak için yeni yöntemler geliştirmek önemlidir (Liu, 2017). Llorente & Ragni (Llorente & Ragni, 2020) çalışmalarında, rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik performansını artırmak amacıyla firar kenarı serrasyonlarının etkilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Araştırmada, Nordex ADO30 ve NACA64 3 418 (Şekil 12) gibi iki farklı kanat profili kullanılarak, serrasyonların aerodinamik özellikler üzerindeki etkileri deneysel rüzgâr tüneli testleri ile değerlendirilmiştir. Rüzgâr tüneli testleri, 75 m/s hızda çalıştırılarak, ADO30 için $Re_c = 3,10^6$ ve NACA64 3 418 için $Re_c = 1,10^6$ gibi chord tabanlı Reynolds sayıları elde edilmiştir.

Firar kenarı serrasyonlarının özellikle taşıma katsayısında önemli artışlar sağladığı gözlemlenmiştir. Çalışmada, serrasyonların firar kenar uzunluğunun azaltılması gibi bir etki yaratarak, belirli hücum açılarında taşıma kuvvetini artırdığı belirtilmiştir. NACA64 3 418 kanat profili için yapılan testlerde, serrasyonların varlığı ile birlikte maksimum taşıma katsayısında %15'e kadar bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, serrasyonların flap gibi davrandığını ve böylece rüzgâr türbini performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Serrasyonların flap açısı ile birlikte artırılması, genellikle taşıma kuvvetinde bir artışla ilişkilendirilmiştir, ancak bu durumun sürüklenme kuvvetinde aynı oranda bir artışa neden olmadığı vurgulanmıştır. Bu, türbinin operasyonel verimliliği açısından faydalı bir durumdur.

Ayrıca, firar kenarı serrasyonlarının gürültü azaltma potansiyeli de önemli bir bulgu olarak değerlendirilmektedir. Çalışmada, serrasyonların uygulanması ile birlikte gürültü seviyelerinde belirgin bir azalma sağlandığı belirtilmiştir. Yapılan deneylerde, firar kenarı serrasyonları ile donatılmış bir rüzgâr türbini, 3 dB'e kadar gürültü seviyesinde azalma göstermiştir. Bu azalma, özellikle düşük ve orta frekanslarda daha belirgin olup, yüksek frekanslarda ise bazı dezavantajlar ortaya çıkabilmektedir. Çalışmada, serrasyonların etkisinin tam bir rüzgâr türbini analizi için genişletilmesi amacıyla Bladed yazılımı kullanılmıştır. Serrasyonlar, kanat uzunluğunun son %40'lık kısmına yerleştirilmiş ve bu sayede aerodinamik verimlilikteki artışlar hesaplanmıştır.

Özetle, firar kenarı serrasyonlarının rüzgâr türbini performansına olan etkileri, toplam yükler ve enerji üretimi açısından nicel olarak değerlendirilmiştir. Serrasyonların varlığı ile yokluğu arasındaki güç eğrileri karşılaştırılmış ve teorik tahminlerle deneysel veriler arasında tutarlılık sağlanmıştır. Bu çalışma, rüzgâr enerjisi endüstrisinde gürültü azaltma ve aerodinamik verimliliği artırma potansiyeli taşıyan bir yaklaşım sunmaktadır. Serrasyonların aerodinamik performans üzerindeki etkileri hem deneysel hem de teorik olarak desteklenmiş ve bu alandaki bilgi birikimine önemli katkılarda bulunmuştur.



Şekil 12. Fırar Kenarı Serrasyonlu ve Serrasyonsuz olarak Test Edilen iki Farklı Kanat Profili Modeli (Llorente & Ragni, 2020)

3. TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, fırar kenarı serrasyonlarının aerodinamik gürültü azaltmada önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Serrasyonların türbülanslı akış yapısını bozarak gürültü seviyelerini düşürdüğü ve bu sırada aerodinamik performansı koruduğu bulgusu, literatürdeki birçok çalışma ile paralellik göstermektedir. Ancak, bazı teorik modellerin deneysel sonuçlarla tam anlamıyla örtüşmediği ve özellikle sınır tabakası kalınlığı gibi faktörlerin gürültü azaltma performansı üzerindeki etkilerinin daha fazla araştırılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, fırar kenarı serrasyonlarının, özellikle düşük frekanslı gürültü bileşenlerini etkili bir şekilde azaltabildiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, serrasyonların aerodinamik yapıların gürültü yönetiminde ne kadar önemli bir araç olduğunu vurgulamaktadır. Bununla birlikte, bu modifikasyonların bazı uçuş koşullarında, özellikle yüksek hızlarda, beklenenden daha az etkili olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Serrasyon geometrisinin optimize edilmesi, bu teknolojinin potansiyelini tam olarak kullanmak için kritik bir faktördür. Bu bağlamda, fırar kenarı tasarımında yapılan bu tür modifikasyonların sadece gürültü azaltımı için değil, aynı zamanda uçakların genel performansını iyileştirmek için de kullanılabileceği görülmüştür. Gelecekteki çalışmaların, farklı geometrik yapıların ve uçuş koşullarının etkilerini daha derinlemesine incelemesi, havacılık ve diğer aerodinamik uygulamalarda sürdürülebilir gürültü azaltma stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, havacılık sektöründe gürültü azaltmaya yönelik aerodinamik stratejilerin teorik temelleri ve pratik uygulamaları incelenmiştir. Çalışmanın ana odağı, özellikle fırar kenarı tasarımlarının aerodinamik performansa ve gürültü azaltımına olan etkilerini anlamaya yöneliktir. Literatürde ele alınan türbülanslı sınır tabaka fırar kenarı gürültüsü, akışın ayrılmasına bağlı olarak ortaya çıkan gürültü türleri gibi gürültü mekanizmaları, fırar kenarlarının optimize edilmesiyle kontrol edilebilmektedir. Elde edilen bulgular, fırar kenarı serrasyonlarının ve diğer geometrik modifikasyonların, özellikle düşük frekanslı gürültü bileşenlerini etkili bir şekilde azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, fırar kenarlarında yapılan aerodinamik tasarım değişikliklerinin, sadece gürültü seviyelerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda uçak performansını da iyileştirebileceğini ortaya koymaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, serrasyonlar gibi kenar geometrisi modifikasyonlarının, özellikle yüksek Reynolds sayılarında aerodinamik gürültünün baskın olduğu durumlarda etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, serrasyonların akışın laminar-türbülans geçiş sürecini etkileyerek, türbülans yoğunluğunu ve dolayısıyla gürültü seviyelerini azalttığı da literatürle desteklenmektedir. Sonuç yorumları Tablo 3'te özetlenerek karşılaştırma sağlanması amaçlanmıştır.

Tablo 3. Fırar Kenarı Serrasyonları ile ilgili Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

Yöntem	Çalışma	Elde Edilen Veriler	Sağladığı Faydalar
Teorik Modelleme ve Matematiksel Analiz	(Howe, 1991)	Serrasyonların ses yoğunluğunu azaltma etkisi	Serrasyonların ses azaltma potansiyelini açıklamış ve aerodinamik tasarımlar için rehberlik sağlamıştır.
	(Ayton, 2018)	Farklı fırar kenarı geometrilerinin gürültü seviyeleri üzerindeki etkileri	Serrasyonlu geometrilerin düşük ve yüksek frekanslarda gürültü azaltma potansiyelini göstermiştir.
Simülasyon ve Optimizasyon	(Kholodov & Moreau, 2021)	Serrasyon şekilleri ve dalga boylarının gürültü performansı	Dalga boyu ve genişliği optimize edilerek maksimum gürültü azaltımı elde edilmiştir.
	(Chen, Xie, & Lee, 2023)	Geniş ve dar serrasyonların aerodinamik gürültü üzerindeki etkileri	Geniş serrasyonlu kanat, belirli bir konumda 3,3 dBA'ya kadar gürültü azaltma sağlarken, dar serrasyonlu kanat ise daha düşük bir gürültü azaltma performansı göstermiştir.
	(Yang, Liu, Zhang, & Bi, 2024)	Hibrit üfleme-kesitlilik yönteminin gürültü azaltma etkileri	Geniş bant gürültüsünde %20,5, ses basınç seviyesinde 5,7 dB azalma sağlamıştır.
	(Agrawal & Sharma, 2016)	Kanat profili etrafındaki akışın akustik etkileri	Uzak alan ses seviyesinde 1,5 dB azalma sağlamıştır.
	(Avallone, Van Der Velden, & Ragni, 2017)	Serrasyon geometrisinin gürültü azaltma potansiyeli	Demir şekilli serrasyonlar geleneksel dişli serrasyonlara kıyasla daha fazla gürültü azaltmıştır.
	(Jones & Sandberg, 2010)	Serrasyonların türbülans üzerindeki etkileri	Türbülanslı akışın karışımını artırarak ses enerjisinin dağılmasını sağlamıştır.
	(Kim, ve diğerleri, 2022)	Kanat profillerinin yüzey pürüzlülüğü ve akış kontrolü etkileri	Laminar ayrılma baloncuklarını azaltarak taşıma katsayısını artırmış ve aeroakustik performansı iyileştirmiştir.
Deneysel Testler	(Gruber, Joseph, & Chong, 2012)	Serrasyonların gürültü azaltma performansı	Serrasyon yükseklik ve periyodu artırıldığında gürültü seviyelerinde azalma sağlamıştır.
	(Llorente & Ragni, 2020)	Serrasyonlu rüzgar türbini kanatlarının aerodinamik ve akustik etkileri	Taşıma kuvvetini artırmış ve gürültü seviyelerinde 3 dB azalma sağlamıştır.
	(Chong & Joseph, 2013)	Serrasyonların tonal gürültüyü 3-10 dB azalttığı	Gürültü kaynağı kontrolüne katkı sağlamıştır.

	(Rong, ve diğerleri, 2024)	Baykuş kanadı geometrisinin aerodinamik avantajları ve gürültü azaltma potansiyeli	Girdap oluşumunu kontrol ederek taşıma kuvvetini artırmış ve gürültü seviyelerini düşürmüştür.
Biyonik Tasarımlar	(Lu, Li, Chang, Chuang, & Xing, 2021)	Serrasyonlu kanat geometrisinin taşıma kuvveti ve stall açısı üzerindeki etkileri	Doğal yapılardan ilham alınarak akış kontrolü ve aerodinamik verimlilik sağlandı. Akış ayrışmasını kontrol ederek taşıma kuvvetini artırmış ve stall açısını iyileştirmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, firar kenarı tasarım modifikasyonlarının hem aerodinamik performans hem de gürültü azaltımı açısından önemli faydalar sunduğunu ortaya koymaktadır. Literatürdeki bulgularla uyumlu olarak, firar kenarı geometrisinin optimize edilmesi, havacılık araçlarında gürültü kontrolü için etkin bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bu modifikasyonların farklı uçuş koşullarındaki performansını daha ayrıntılı olarak incelemeli ve endüstriyel uygulamalara yönelik rehber niteliğinde öneriler geliştirmelidir. Bu bağlamda, firar kenarı tasarımına yönelik araştırmaların, havacılık endüstrisinin çevresel ve operasyonel hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynamaya devam edeceği değerlendirilmektedir.

ETİK BEYAN & GENEL AÇIKLAMALAR

Bu makale araştırma ve yayın etiği standartlarını karşılamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

Fikir/Kavram: Ş. Yeşil ve M. Yıldız; Tasarım: Ş. Yeşil; Veri Toplama/İşleme: Ş. Yeşil; Analiz/Yorum: Ş. Yeşil. Tüm yazarlar makalenin son halini okumuştur ve onaylamıştır.

FON

Söz konusu değildir.

VERİ VE MALZEME MÜSAİTLİĞİ

Söz konusu değildir.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmalarının bulunmadığını belirtmektedir.

KAYNAKÇA

- Agrawal, B. R., & Sharma, A. (2016). Numerical analysis of aerodynamic noise mitigation via leading edge serrations for a rod-airfoil configuration. *International Journal of Aeroacoustics*, 15(8), s. 734-756. doi:10.1177/1475472X16672322
- Aşkan, A., & Tangöz, S. (2018). The impact of aspect ratio on aerodynamic performance and flow separation behavior of a model wing composed from different profiles. *Journal of Energy Systems*, 2(4), s. 224-237. doi:10.30521/jes.454215
- Avallone, F., Van Der Velden, W. C., & Ragni, D. (2017). Benefits of curved serrations on broadband trailing-edge noise reduction. *Journal of Sound and Vibration*, 400, s. 167-177. doi:10.1016/j.jsv.2017.04.007
- Ayton, L. J. (2018). Analytic solution for aerodynamic noise generated by plates with spanwise-varying trailing edges. *Journal of Fluid Mechanics*, 849, s. 448-466. doi:10.1017/jfm.2018.431
- Brooks, F., Stuart, D., & Marcolini, A. (1989). *Airfoil Self-Noise and Prediction*. Şubat 15, 2025 tarihinde <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19890016302/downloads/19890016302.pdf> adresinden alındı
- Chen, J., Xie, J., & Lee, H.-M. (2023). Noise attenuation by half flat tip serrated trailing edge in rotating blades. *Journal of Physics: Conference Series*, 2489(1). doi:10.1088/1742-6596/2489/1/012022

- Chong, T. P., & Joseph, P. F. (2013). An experimental study of airfoil instability tonal noise with trailing edge serrations. *Journal of Sound and Vibration*, 332(24), s. 6335-6358. doi:10.1016/j.jsv.2013.06.033
- Gruber, M., Joseph, P., & Chong, T. (2012). On the mechanisms of serrated airfoil trailing edge noise reduction. *17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (32nd AIAA Aeroacoustics Conference)*. doi:10.2514/6.2011-2781
- Howe, M. S. (1991). Noise produced by a sawtooth trailing edge. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90(1), s. 482-487. doi:10.1121/1.401273
- Jones, L., & Sandberg, R. (2010). Numerical investigation of airfoil self-noise reduction by addition of trailing-edge serrations. *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. doi:10.2514/6.2010-3703
- Kholodov, P., & Moreau, S. (2021). Optimization of trailing-edge serrations with and without slits for broadband noise reduction. *Journal of Sound and Vibration*, 490. doi:10.1016/j.jsv.2020.115736
- Kim, J.-H., Choi, K.-S., Lacagnina, G., Paruchuri, C., Joseph, P., Hasheminejad, S. M., . . . Pinelli, A. (2022). Aerodynamic and aeroacoustic optimization of leading-edge undulation of a NACA 65(12)-10 airfoil. *AIAA Journal*, 60(4), s. 2342-2353.
- Lee, S., Ayton, L., Bertagnolio, F., Moreau, S., Chong, T. P., & Joseph, P. (2021). Turbulent boundary layer trailing-edge noise: Theory, computation, experiment, and application. *Progress in Aerospace Sciences*, 126. doi:10.1016/j.paerosci.2021.100737
- Liu, W. Y. (2017). A review on wind turbine noise mechanism and de-noising techniques. *Renewable Energy*, 108, s. 311-320. doi:10.1016/j.renene.2017.02.034
- Llorente, E., & Ragni, D. (2020). Trailing-edge serrations effect on the performance of a wind turbine. *Renewable Energy*, 147, s. 437-446. doi:10.1016/j.renene.2019.08.128
- Lu, Y., Li, Z., Chang, X., Chuang, Z., & Xing, J. (2021). An aerodynamic optimization design study on the bio-inspired airfoil with leading-edge tubercles. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), s. 292-312. doi:10.1080/19942060.2020.1856723
- Qaissi, K., Elsayed, O., Faqir, M., & Essadiqi, E. (2023). Aerodynamic optimization of trailing-edge-serrations for a wind turbine blade using Taguchi modified additive model. *Energies*, 16(3). doi:10.3390/en16031099
- Rong, J., Jiang, Y., Murayama, Y., Ishibashi, R., M. M., & Liu, H. (2024). Trailing-edge fringes enable robust aerodynamic force production and noise suppression in an owl wing model. *Bioinspiration & Biomimetics*, 19(1). doi:10.1088/1748-3190/ad0aa9
- Timothy, M. P. (2024). Biomimetic engineering: Designing solutions inspired by nature. *Journal of Biological and Applied Science*, 3(2), s. 45-48.
- Wang, Y., Zhao, K., Lu, X.-Y., Song, Y.-B., & Bennett, G. J. (2019). Bio-inspired aerodynamic noise control: A bibliographic review. *Applied Sciences*, 9(11). doi:10.3390/app9112224
- Xie, J., Zhu, L., & Lee, H. M. (2023). Aircraft noise reduction strategies and analysis of the effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2). doi:10.3390/ijerph20021352
- Yang, C., Liu, Y., Zhang, X., & Bi, C. (2024). Hybrid control of aerofoil self-noise by coupling air blowing and trailing-edge serration. *Journal of Sound and Vibration*, 575. doi:10.1016/j.jsv.2024.118265
- Ye, X., Zheng, N., Zhang, R., & Li, C. (2022). Effect of serrated trailing-edge blades on aerodynamic noise of an axial fan. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(6), s. 2937-2948. doi:10.1007/s12206-022-0526-7