



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**DOĞADAN ESİNLENEN KÖPEKBALIĞI DERİSİ DIŞÇIK YAPILARININ
AERODİNAMİK VE ENERJİ HASADI PERFORMANSININ DENEYSEL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET ÖZDEMİR

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. SİNAN BAŞARAN

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. MUSA ÖZKAN

BİLECİK, 2026

10817671

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**DOĞADAN ESİNLENEN KÖPEKBALIKI DERİSİ DIŞÇIK YAPILARININ
AERODİNAMİK VE ENERJİ HASADI PERFORMANSININ DENEYSEL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET ÖZDEMİR

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. SİNAN BAŞARAN

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. MUSA ÖZKAN

BİLECİK, 2026

10817671

BEYAN

Doğadan Esinlenen Köpekbalığı Derisi Dişçik Yapılarının Aerodinamik Ve Enerji Hasadı Performansının Deneysel Anlizi başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 225M099 nolu proje ile desteklenmiştir

Muhammet Özdemir

.././20..

İmza:

ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve bu tez çalışmam boyunca edindiğim bilgi ve tecrübeler, yalnızca akademik bir sürecin tamamlanması değil, aynı zamanda mühendislik vizyonumun şekillendiği zorlu ve bir o kadar da değerli bir serüven olmuştur. Bu süreçte üzerimde emeği olan, desteklerini esirgemeyen birçok değerli insana teşekkürü bir borç bilirim.

Öncelikle, tez çalışmamın başından sonuna kadar engin bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, akademik vizyonu ile ufku açan ve deneysel süreçlerdeki sabrı ile değerli yönlendirmelerini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Sinan Başaran'a en derin şükranlarımı sunarım.

Araştırmamın her aşamasında değerli fikirleri ve yapıcı eleştirileriyle çalışmama yön veren, analitik perspektifiyle tezin bilimsel altyapısının olgunlaşmasına büyük katkı sağlayan ikinci danışmanım Doç. Dr. Musa Özkan'a içtenlikle teşekkür ederim.

Resmi danışmanlarım olmamalarına rağmen; araştırmamın donanım, tasarım ve aerodinamik analiz süreçlerinde kapılarını bana her daim açık tutan, teknik bilgi birikimleriyle karşılaştığım mühendislik zorluklarını aşmamı sağlayan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Selman Tezcan ve Dr. Öğr. Üyesi Onur Erkan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi çatısı altında geçirdiğim yoğun araştırma süreçlerinde laboratuvar ortamının yorgunluğunu ve heyecanını paylaştığımız; deneyimlerimi aktararak mentörlük yapmaktan büyük keyif aldığım genç mühendis aday öğrenci arkadaşlarım Doğan Durmuş, Elif Akkuş, Harun Cansız, Hidayet Yeşilmen, İdil Eylül Olucak, Ömer Yağız Elbir, Pelin Kulu ve Polatkan Demir'e süreç boyunca verdikleri samimi dostluk ve manevi destekten ötürü teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her döneminde olduğu gibi bu yoğun akademik süreçte de maddi ve manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, sonsuz sevgi ve anlayışlarıyla bana güç veren kıymetli aileme ve bu zorlu serüvende varlıklarıyla bana her daim omuz veren, aramızdaki güçlü bağ ve iletişimle yolumu aydınlatan çok değerli kardeşlerime en derin minnet ve sevgilerimi sunuyorum.

Ayrıca, bu tez çalışmasını 225M099 numaralı proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a sağladıkları değerli katkılardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Muhammet Özdemir

2026

ÖZET

Akış kaynaklı titreşim (Flow Induced Vibration – (FIV)), küçük ölçekli elektromekanik enerji hasadı alanında umut verici bir yaklaşım sunmaktadır; ancak geleneksel küt cisim enerji hasadı mekanizmalarının performansı, genellikle yüksek aerodinamik sürüklenme ve kendi kendini sınırlayan aeroelastik sönümlenme nedeniyle kısıtlanmaktadır. Bu araştırma, biyomimetik köpek balığı derisi dermal dentiküllerinin ikili işlevsellik potansiyelini incelemekte ve söz konusu yapıları pasif sürüklenme azaltıcı yüzeylerden aktif FIV enerji hasadı mekanizmalarına dönüştüren özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Mevcut biyomimetik uygulamalardaki temel bir sınırlılık, mikro-geometrilerin bir tabakaya rijit biçimde sabitlenmesi ve bu durumun dinamik akışkan-yapı etkileşimini sönümlemesidir. Bu sorunu aşmak amacıyla, dentikül dizilerini fiziksel olarak bağımsızlaştıran; böylece pasif yunuslama takibine ve bölgesel sınır tabaka manipülasyonuna olanak tanıyan özel tasarım, çok serbestlik dereceli bir döner mafsallık mekanizması geliştirilmiştir. Dentiküllere ait makroskobik ve mikro-geometrik parametreleri farklı Reynolds rejimleri boyunca sistematik biçimde optimize etmek üzere, bir rüzgâr tüneline kapsamlı bir Taguchi L18 ortogonal dizisi uygulanmıştır. Aerodinamik yük hücresi verileri ve Varyans Analizi (Analysis of Variance – (ANOVA)) sonuçları, döner mafsallığın geleneksel küt cisim sürüklenmesini başarıyla bertaraf ettiğini ortaya koymuştur. Rijit konfigürasyonlarda akış dinamikleri bütünüyle makroskobik uzunluk tarafından domine edilirken; hareketli mafsallık mikro-geometriyi dinamik olarak aktif hâle getirmiş ve yan çıkıntı yüksekliği oranının (TH/H) biçim sürüklenmesi azaltımına %26.2 oranında katkı sağlamasına yol açmıştır. Kinematik açıdan lazer deplasman analizi, söz konusu pasif aerodinamik adaptasyonun yüksek genlikli galoplamayı tetiklediğini ve ankastre kirişin yapısal sapmasını sabit referans modellere kıyasla %400'ün üzerinde (8.63 mm'den 34.94 mm RMS değerine) artırdığını kanıtlamıştır. Bu durumun bir sonucu olarak elektromekanik dönüşüm üstel düzeyde artış göstermiştir. İstatistiksel analizler, döner mafsallığın piezoelektrik üretim mekanizmasını salt akışkan hızının oluşturduğu doğrudan etkiden özgül biyomimetik geometriye (W/H ve L) kaydardığını doğrulamıştır. 11.5 m/s hızda test edilen nihai optimum konfigürasyon ($L = 12$ cm, $W/L = 0.87$, $W/H = 2.5$), sürüklenmeyi minimize ederken aynı zamanda 10.248 V RMS değerinde tepe elektrik çıktısı üreterek ikili bir optimum duruma ulaşmıştır. Bu çalışma, mekanik olarak eklenmiş biyomimetik yapıların, yeni nesil enerji hasadı sistemleri için yüksek verimli ve aktif aero-elektromekanik doğrultucular olarak işlev görebileceğini kesin bir biçimde ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Biyotaklitçi Köpekbalığı Derisi Dişçik, Akış Kaynaklı Titreşim (AKT), Piezoelektrik Enerji Hasadı, Aeroelastik Galoplama, Sürüklenme Azaltma

ABSTRACT

Flow induced vibration (FIV) presents a promising avenue for small scale electromechanical energy harvesting, yet conventional bluff body harvesters are frequently hindered by high aerodynamic drag and self-limiting aeroelastic damping. This research investigates the dual-functional potential of biomimetic shark skin dermal denticles, proposing a novel approach that transitions these structures from passive drag-reduction surfaces to active FIV energy harvesters. A fundamental limitation of current biomimetic applications is the rigid attachment of micro-geometries to a substrate, which suppresses dynamic flow-structure interaction. To overcome this, a custom multi degree of freedom revolute joint was designed to physically decouple the denticle arrays, enabling passive pitch-tracking and localized boundary layer manipulation. A comprehensive Taguchi L18 orthogonal array was executed in a wind tunnel to systematically optimize the macroscopic and micro-geometric parameters of the denticles across varying Reynolds regimes. Aerodynamic load cell data, coupled with Analysis of Variance (ANOVA), revealed that the revolute joint successfully bypasses traditional bluff body drag. While rigid configurations were dominated entirely by macroscopic length, the movable joint dynamically activated the micro-geometry, with the side-ridge height ratio (TH/H) driving a 26.2% contribution to form drag reduction. Kinematically, laser displacement analysis demonstrated that this passive aerodynamic adaptation triggered high-amplitude galloping, amplifying the cantilever beam's structural deflection by over 400% (from 8.63 mm to 34.94 mm RMS) compared to fixed baselines. Consequently, the electromechanical transduction was exponentially enhanced. Statistical analysis proved that the revolute joint shifted the driver of piezoelectric generation from brute-force fluid velocity to the specific biomimetic geometry (W/H and L). The ultimate optimum configuration ($L = 12$ cm, $W/L = 0.87$, $W/H = 2.5$) operating at 11.5 m/s achieved a dual-optimum state, minimizing drag while generating a peak electrical output of 10.248 V RMS. This study definitively demonstrates that mechanically articulated biomimetic structures can serve as highly efficient, active aero-electromechanical rectifiers for next-generation energy harvesting.

Keywords: Biomimetic Shark Skin Denticles, Flow-Induced Vibration (FIV), Piezoelectric Energy Harvesting, Aeroelastic Galloping, Drag Reduction.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	8
2.1 Akış Kaynaklı Titreşimler	8
2.2 Biyomimetik Aerodinamik ve Küt Cisim Art İzleri	11
2.3 Köpek Balığı Derisi Dişçikleri ve Sürüklenme Azaltımı	12
2.4 Kinematik, Geometrik Anomaliler ve Serbestlik Dereceleri.....	17
2.5 Deney Tasarımı ve Parametre Optimizasyonu	18
3. DENEYSEL KURULUM VE METODOLOJİ	20
3.1 Biyomimetik Modellerin Tasarımı ve Üretimi.....	20
3.1.1 Köpek Balığı Derisi Dişçiklerinin Geometrik Tasarımı.....	20
3.1.2 3B Baskı ve İmalat Süreci	22
3.1.3 Döner Mafsal Mekanizması	23
3.2 Rüzgâr Tüneli Tesisi ve Akış Karakteristikleri	24
3.2.1 Tesis Spesifikasyonları ve Akış Kalitesi.....	24
3.2.2 Katı Cisim Blokaj Oranı Doğrulaması	24
3.3 Deneysel Konfigürasyonlar.....	25
3.3.1 Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Konfigürasyonu	25
3.3.2 Enerji Hasadı ve Kinematik Konfigürasyonu.....	27
3.4 Özel Veri Toplama (DAQ) Mimarisi	30
3.4.1 Güç Regülasyonu ve Sinyal Koşullandırma	30
3.4.2 Özel Baskılı Devre Kartı (PCB)	31
3.4.3 Yüksek Çözünürlüklü Analog-Dijital Dönüşüm	32

3.4.4 Gürültü Azaltma Stratejileri	33
3.5.5 Piezoelektrik Gerilim ve Kinematik İzleme	33
3.5 DeneySEL Prosedür ve Taguchi Matrisi Uygulaması.....	34
3.5.1 Test Öncesi Sensör Kalibrasyonu ve Çevresel Standardizasyon	35
3.5.2 Kuvvet ölçüm sistemi.....	35
3.5.3 Enerji hasadı sistemi	36
3.5.4 Taguchi L18 Matrisinin Uygulanması ve İstatistiksel Analiz	37
4. AERODİNAMİK KUVVET BULGULARI (BULGULAR VE TARTIŞMA).....	39
4.1 Aerodinamik Yük Analizi.....	39
4.1.1 Sürüklenme Kuvvetlerinin Karakterizasyonu	39
4.1.2 Kaldırma Kuvvetlerinin Karakterizasyonu	41
4.1.3 Reynolds Sayısı Bağımlılığı ve Ölçeklendirme.....	42
4.2 Frekans UzaYı ve Art İzi Dinamikleri	46
4.2.1 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)	46
4.2.2 Strouhal Sayısı (St) Karakterizasyonu	48
4.3 Aerodinamik Sürüklemeye Yönelik Taguchi Optimizasyonu ve ANOVA Analizi	50
4.3.1 Sabit Konfigürasyon.....	51
4.3.2 Hareketli Döner Mafsal Konfigürasyonu.....	51
5. ENERJİ HASADI BULGULARI (BULGULAR VE TARTIŞMA)	52
5.1 Kinematik Tepki ve Yapısal Sapma	52
5.2 Piezoelektrik Gerilim Üretimi	54
5.3 Elektromekanik Korelasyon ve Sistem Verimliliği	55
5.4 Elektromekanik Üretim İçin Taguchi Optimizasyonu ve ANOVA	57
5.4.1 Sabit Mafsal Yönteminin Sınırlılıkları.....	58
5.4.2 Döner Mafsalın Geometrik Aktivasyonu	59
5.5 Yük Direnci Eşleştirmesi ve Güç Analizi	59
6. SONUÇ	62
KAYNAKÇA	64

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Rüzgâr tüneli testlerinde kullanılan idealize edilmiş kambur balina yüzgeci modelleri: düz (solda) ve taraklı (sağda) (Miklosovic vd., 2004).	3
Şekil 1.2 Yusufçuk kanadından esinlenilerek geliştirilen piezoelektrik enerji hasadı mekanizmasının (BDPEH) tasarım konsepti ve çalışma mekanizması: (a) yusufçuk kanadının biyomimetik prototipi; (b) keskin hücum kenarları, daralan firar kenarları ve yüksek açıklık oranı dahil olmak üzere elde edilen aerodinamik karakteristikler; (c) parametrik geometri ve açılma açısının (α) tanımı; (d) farklı açılma açılarına ($\alpha = 0-60^\circ$) sahip kesit konfigürasyonları; (e) BDPEH prototipinin fotoğrafı; (f) titreşim kaynaklı enerji hasat mekanizmasının şematik gösterimi (Zhou vd., 2026).	3
Şekil 1.3. (a) Geleneksel balık kuyruklarının (kuyruk-1), (b) rijit nötr tabakaya sahip origami robot balık kuyruğunun (kuyruk-2) ve (c) düğümlü nötr tabakaya sahip origami robot balık kuyruğunun (kuyruk-3) tam şekil değiştirme süreçleri; (d) bükülme açısı ile enjekte edilen akışkan hacmi, (e) bükülme açısı ile basınç değişimi ve (f) açı değişimi ile gereken enerji arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler; (g) 13.656° bükülme açısına ulaşmak için üç farklı balık kuyruğu tipi için ihtiyaç duyulan enerji miktarları (Xia vd., 2023).	4
Şekil 2.1. Farklı akışkan tiplerinde akış alanı görselleştirme örnekleri: Newton tipi akışkanda (a) VIV ve (d) salınım durumları; viskoelastik akışkanda (b, c) VIV ve (e, f) salınım durumları (Gong vd., 2026)...	10
Şekil 2.2. Piezoelektrik eleman kullanımının şematik gösterimi (Yuan vd., 2023).	11
Şekil 2.3. Farklı köpek balığı türlerine ve vücut bölgelerine ait dişçiklerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri (Wen vd., 2014; Boomsma ve Sotiropoulos, 2016; Lang vd., 2012; Feld vd., 2019)..	15
Şekil 2.4. İki katmanlı köpek balığı dişçik yapısında akış yönündeki hız vektörleri ve bölgesel itki yaratan ters gözenek akışı mekanizması (Savino ve Wu, 2024).	16
Şekil 2.5. Sabit ve Döner Mafsallar Tarafından Üretilen Gerilimlerin Karşılaştırması (Özkan vd., 2023b).	18
Şekil 3.1. Biyomimetik köpek balığı derisi dişçik makroskobik boyutlarını (uzunluk L, genişlik W, yükseklik H) ve enine çıkıntı mesafesi (TW), yan çıkıntı yüksekliği (TH) ile küyrük kenarı boşluk mesafesini (DH) içeren ikincil mikro-geometrik değişkenlerini gösteren parametrik CAD şeması.	21
Şekil 3.2. (a) Rijit bağlantılı sabit konfigürasyon, (b) Hareketli döner mafsallı konfigürasyonu	22
Şekil 3.3. Üç boyutlu (3B) baskı yöntemiyle imal edilen biyomimetik test geometrileri	23
Şekil 3.4 Aerodinamik kuvvet ölçümleri için deneysel kurulum	26
Şekil 3.5 Elektromekanik enerji hasadı deneysel kurulumu	27

Şekil 3.6. Kirişin boyutları	29
Şekil 3.7. Özel veri toplama sistemi (DAQ) için tasarlanan ve imal edilen baskılı devre kartı (PCB).....	31
Şekil 3.8. Deneysel çalışma prosedürünü ve ölçüm aşamalarını gösteren akış şeması	38
Şekil 4.1. Sabit ve hareketli konfigürasyonların ortalama sürüklenme katsayılarının karşılaştırması	40
Şekil 4.2. Sabit ve hareketli konfigürasyonların kare ortalama karekök (RMS) taşıma katsayılarının karşılaştırması.....	41
Şekil 4.3. Sabit ve hareketli konfigürasyonlarda ortalama sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi	44
Şekil 4.4 Sabit ve hareketli konfigürasyonlarda RMS kaldırma katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi	45
Şekil 5.1. Sabit ve hareketli konfigürasyonlara ait ankastre giriş RMS salınım genliklerinin karşılaştırması.....	53
Şekil 5.2. Sabit ve hareketli konfigürasyonlar tarafından üretilen RMS voltaj değerlerinin karşılaştırması	54
Şekil 5.3. Ortalama sürüklenme katsayısı ile üretilen RMS gerilimi arasındaki elektromekanik korelasyon	56
Şekil 5.4. Test 17'nin güç eğrisi.....	60

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Biyomimetik dentikül geometrisini tanımlayan tasarım parametreleri ve kontrol faktörleri ...	22
Tablo 3.2. Ankestre girişin geometrik özellikler	29
Tablo 3.3. Deneysel parametrelerin optimizasyonunda kullanılan Taguchi L18 ortogonal dizisi	34
Tablo 4.1. Test konfigürasyonları ve bunlara karşılık gelen Reynolds sayıları.....	43
Tablo 4.2. Sabit ve hareketli konfigürasyonlar için elde edilen Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) spektrum analizleri	47
Tablo 4.3. Test konfigürasyonları için hesaplanan Strouhal sayıları.....	49
Tablo 4.4. Sürüklenme katsayısının ANOVA sonuçları.....	50
Tablo 5.1. Üretilen voltaj cevapları için ANOVA tablosu	58

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- **AC:** Alternatif Akım (Alternative Current)
- **ANOVA:** Varyans Analizi (Analysis of Variance)
- **APG:** Ters Basınç Gradyanı (Adverse Pressure Gradient)
- **CFD:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
- **DC:** Doğru Akım (Direct Current)
- **DF:** Serbestlik Derecesi (Degrees of Freedom)
- **DNS:** Doğrudan Sayısal Simülasyon (Direct Numerical Simulation)
- **FIV:** Akış Kaynaklı Titreşim (Flow-Induced Vibration)
- **RMS:** Kök Ortalama Kare (Root-Mean-Square)
- **SEM:** Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
- **S/N:** Sinyal-Gürültü Oranı (Taguchi Yöntemi)
- **SS:** Kareler Toplamı (Sum Of Squares) (ANOVA)
- **VIV:** Girdap Kaynaklı Titreşim (Vortex-Induced Vibration)
- **μ :** Akışkanın dinamik viskozitesi ($kg/(m \cdot s)$)
- **ρ :** Akışkanın/havanın yoğunluğu (kg/m^3)
- **C_D :** Sürüklenme Katsayısı
- **C_L :** Kaldırma Katsayısı
- **$C_{L_{rms}}$:** Kök Ortalama Kare Kaldırma Katsayısı
- **Re :** Reynolds Sayısı
- **U_∞ (veya v):** Serbest akış akışkan hızı (m/s)
- **V_{RMS} :** Kök Ortalama Kare Voltaj Çıktısı (V)
- **D_H :** Dişçinin arka (fırar) kenarından uzanan boşluk mesafesi
- **H :** Dişçik yapısının toplam yüksekliği
- **L :** Dişçik dizisinin akış yönündeki toplam makroskobik uzunluğu
- **TH :** İkincil yan çıkıntıların yüksekliği

- TH/H : Yan çıkıntı yüksekliğinin toplam yüksekliğe oranı
- TW : Merkez çıkıntı ile bitişik yan çıkıntılar arasındaki mutlak enine boşluk
- W : Dişçik yapısının toplam makroskobik enine genişliği
- W/H : Genişlik-yükseklik oranı
- W/L : Genişlik-uzunluk oranı
- W/TW : Toplam genişliğin enine çıkıntı boşluğuna oranı
- b : Kiriş genişliği
- t : Kiriş kalınlığı
- L_k : Kiriş toplam uzunluğu
- L_{ke} : Kiriş serbest uzunluğu
- x_p : Piezoelektrik yamanın kiriş köküne olan mesafesi
- c : Mekanik sönümlleme katsayısı
- C_{pz} : Piezoelektrik katmanın iç kapasitansı
- d : Piezoelektrik yük sabiti
- D : Elektriksel yer değiştirme vektörü
- E : Elektrik alan vektörü
- F_x : Dış aerodinamik kuvvet
- θ : Elektromekanik eşleşme katsayısı
- k : Yapısal direngenlik
- m_a : Aerodinamik ek kütle
- m_b : Yapısal kütle
- R : Dış yük direnci
- S : Mekanik gerinim vektörü
- s^E : Sabit elektrik alanındaki elastik uygunluk
- T : Mekanik gerilme vektörü
- V : Üretilen gerilim

- x : Sistemin yer değıştirmesi
- $\dot{x}$: Sistemin hızı
- $\ddot{x}$: Sistemin ivmesi
- ϵ : Dielektrik geçirgenlik
- ϵ^T : Sabit mekanik gerilme altındaki dielektrik geçirgenlik

1. GİRİŞ

Enerji, modern endüstriyel gelişimin temel unsurlarından biridir. Dünya nüfustaki sürekli artış ve teknolojik altyapının hızla genişlemesi, kesintisiz enerji üretimine yönelik talebi önemli ölçüde artırmıştır. Tarihsel süreçte bu talep, yüksek yoğunluklu enerji üretebilmesine rağmen belirgin çevresel sorunlara yol açan fosil yakıt kullanımıyla karşılanmıştır. Geleneksel enerji rezervlerinin sınırlı yapısı ve sera gazı emisyonlarının kümülatif etkileri; enerjinin tedarik, işlenme ve kullanım süreçlerinde küresel ölçekte bir yaklaşım değişikliğini gerektirmiştir. Bu bağlamda, alternatif ve temiz enerji sistemlerinin geliştirilmesi, 21. yüzyıl mühendisliğinin öncelikli çalışma alanları arasında yer almaktadır.

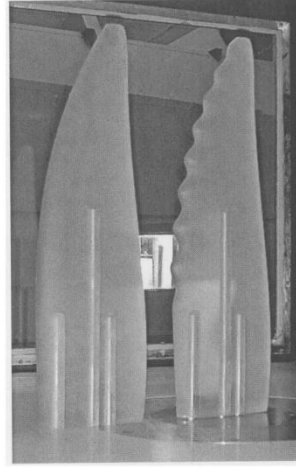
Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak, yenilenebilir enerji potansiyelinin geniş çapta değerlendirilmesini gerektirmektedir. Güneş ışığı, jeotermal enerji, su akıntıları ve rüzgâr gibi doğal süreçlerle yenilenen kaynaklardan elde edilen enerji, ekonomik büyümenin çevresel tahribattan bağımsızlaştırılması için uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır (Song vd., 2025). Açık deniz rüzgâr santralleri ve hidroelektrik barajlar gibi şebeke ölçekli tesislerin yanı sıra, dağıtık enerji hasadına yönelik yerel potansiyel de artış göstermektedir. Küçük ve orta ölçekli hasat sistemleri; çevresel enerjiyi toplayarak otonom sensörlerin, uzaktan veri toplama sistemlerinin ve düşük güç tüketimli elektronik cihazların çalıştırılmasını sağlayabilmektedir (Ali vd., 2025; Moslemi vd., 2025). Bu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla sürdürülebilir mühendislik uygulamaları, doğal kaynakların tükenmesini yavaşlatırken ekolojik sistemlerle uyumlu ve dirençli enerji altyapılarının oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

Enerji hasadında akışkan-katı etkileşimlerinden yararlanmanın temel amacı, geleneksel batarya değişiminin zor veya maliyetli olduğu ortamlarda bulunan otonom ve düşük güç tüketimli elektronik sistemlere enerji sağlamaktır. Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin yaygınlaşması, saha uygulamalarında kullanılan kendi enerjisini üretebilen uzaktan sensör ağlarına ve yüksek hassasiyetli veri toplama sistemlerine yönelik ihtiyacı artırmaktadır. Doğadan esinlenilen aerodinamik enerji hasat sistemi; uçak gövdeleri, yüksek irtifada görev yapan insansız hava araçları (İHA) veya büyük ölçekli rüzgâr türbini kanatları gibi aerodinamik yüzeylerde gerçekleştirilen Yapısal Durum Takibi (Structural Health Monitoring) uygulamaları için elverişli sistemlerdir. Bu tür bölgesel olarak yüksek akış hızlı ortamlarda, pasif mikro-enerji hasadı mekanizmaları ortamdaki rüzgâr enerjisini sürekli olarak elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir. Köpek balığı derisindeki mikro-yapılara benzer geometriler kullanılarak art izi dinamiklerinin yönlendirilmesi ve piezoelektrik yamaların tahrik edilmesiyle, harici bir güç kaynağının lojistik kısıtlamaları olmaksızın kritik izleme sensörlerinin kesintisiz çalışmasını

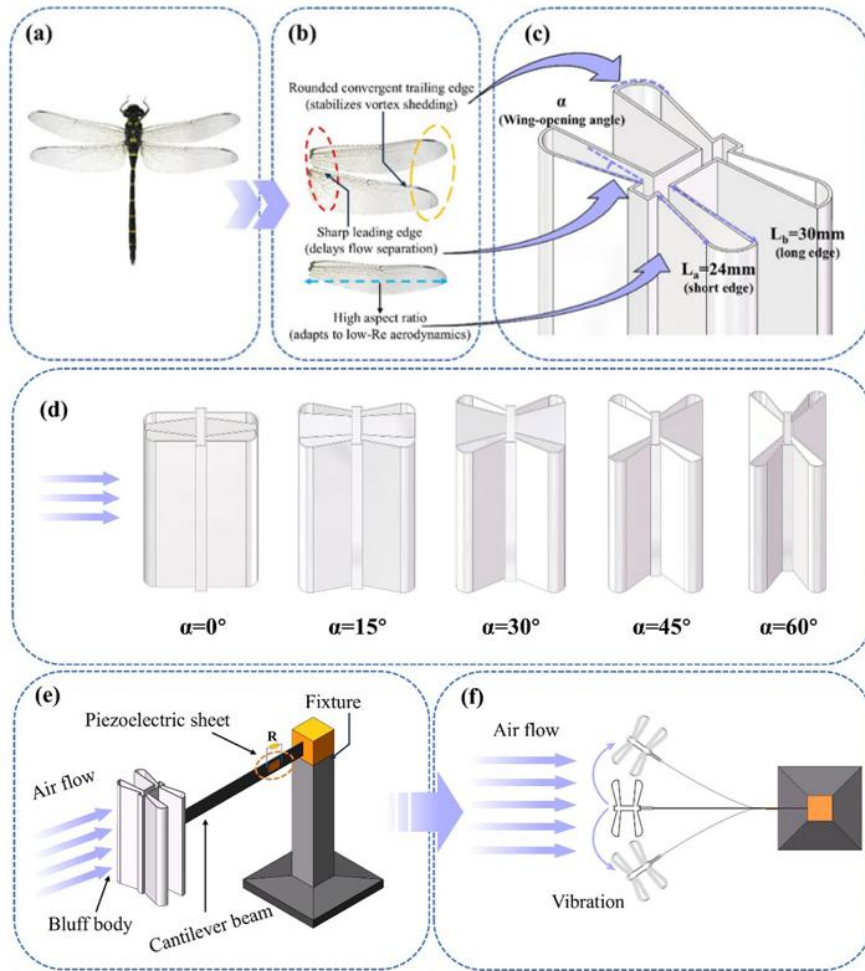
sağlayan, dayanıklı ve bakım gerektirmeyen enerji kaynakları geliştirilebilmektedir.

Aerodinamik alanında, rüzgâr ile yapısal geometriler -özellikle küt cisimler (bluff bodies)- arasındaki etkileşim önemli bir çalışma konusudur. Küt cisimler, akışkanın yüzeyden ayrılarak basınç sürüklemesi, girdap kopması ve (FIV) ile karakterize edilen belirgin bir art izi bölgesi oluşturduğu yapılar olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel olarak yapısal yorulmaya neden olan yıkıcı bir etki şeklinde değerlendirilen akış kaynaklı titreşimler, uygun biçimde kontrol edildiğinde enerji hasadı için oldukça verimli bir mekanizma sunmaktadır (Xia vd., 2026). Bu rüzgâr etkilerini incelemenin temel amacı; galoplama, flutter ve girdap kaynaklı titreşim gibi aerodinamik olguların kontrollü bir şekilde kullanılarak rüzgârın kinetik enerjisinin mekanik gerinime ve nihayetinde elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlamaktır. Araştırmacılar, söz konusu aerodinamik etkileşimi optimize etmek ve yapay enerji hasadı mekanizmalarının akışkan-yapı etkileşimini iyileştirmek amacıyla doğadaki gelişmiş geometrileri inceleyen biyomimetik alanına yönelmektedir.

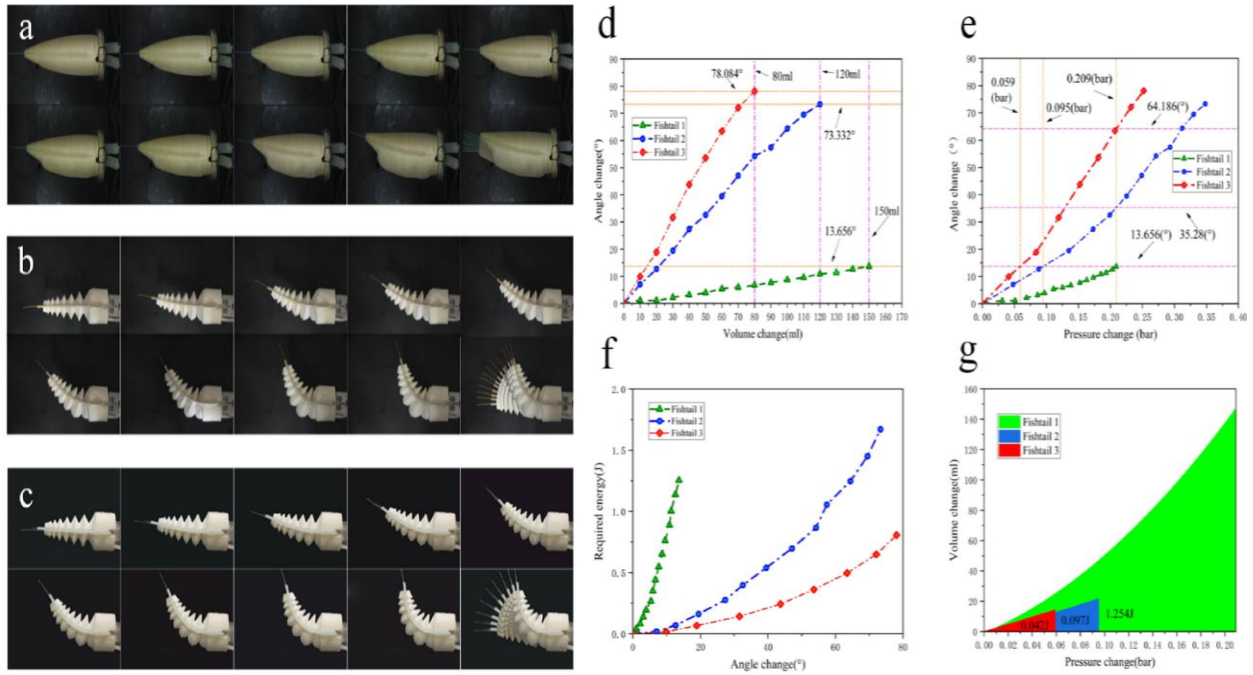
Doğa, aerodinamik kuvvetlerin yönlendirilmesi konusunda kapsamlı modeller sunarak biyolojik ilhamlı çeşitli rüzgâr enerjisi uygulamalarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, kambur balinaların yüzgeçlerinde bulunan dalgalı hücum kenarı tüberkülleri, girdap ayrılma frekanslarını değiştirmek ve tutunma kaybını geciktirmek amacıyla sabit küt cisimlere uyarlanmıştır (Miklosovic vd., 2004). Optimize edilen bu geometri bir rüzgâr tüneli tesisinde test edilmiş olup Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Benzer şekilde araştırmacılar, yusuflukların kanat açma morfolojisinden esinlenerek tasarlanan küt cisimleri kullanarak, düşük rüzgâr hızlarında dahi kararlı ve yüksek genlikli galoplama salınımları elde edebilen piezoelektrik enerji hasat sistemi geliştirmişlerdir (Zhou vd., 2026). İlgili tasarımlar ve test metodolojisi Şekil 1.2'de sunulmaktadır. Su canlılarının rijit kuyruk yapılarından modellenen diğer konfigürasyonlar ise, hasat sistemi yüzeyindeki basınç dalgalanmalarını artıran büyük ve kontrollü girdaplar üretmektedir (Xia vd., 2023). İncelenen rijit balık kuyruğu yapıları Şekil 1.3'de yer almaktadır. Mühendisler, bu biyolojik adaptasyonları modelleyerek enerji hasadı mekanizmalarının devreye girme rüzgâr hızlarını düşürebilmekte ve farklı çevresel koşullardaki enerji kazanımını artırabilmektedir.



Şekil 1.1 Rüzgâr tüneli testlerinde kullanılan idealize edilmiş kambur balina yüzgeci modelleri: düz (solda) ve taraklı (sağda) (Miklosovic vd., 2004).



Şekil 1.2 Yusufçuk kanadından esinlenilerek geliştirilen piezoelektrik enerji hasadı mekanizmasının (BDPEH) tasarım konsepti ve çalışma mekanizması: (a) yusufçuk kanadının biyomimetik prototipi; (b) keskin hücum kenarları, daralan firar kenarları ve yüksek açıklık oranı dahil olmak üzere elde edilen aerodinamik karakteristikler; (c) parametrik geometri ve açılma açısının (α) tanımı; (d) farklı açılma açılarına ($\alpha = 0-60^\circ$) sahip kesit konfigürasyonları; (e) BDPEH prototipinin fotoğrafı; (f) titreşim kaynaklı enerji hasat mekanizmasının şematik gösterimi (Zhou vd., 2026).



Şekil 1.3. (a) Geleneksel balık kuyruklarının (kuyruk-1), (b) rijit nötr tabakaya sahip origami robot balık kuyruğunun (kuyruk-2) ve (c) düğümlü nötr tabakaya sahip origami robot balık kuyruğunun (kuyruk-3) tam şekil değiştirme süreçleri; (d) bükülme açısı ile enjekte edilen akışkan hacmi, (e) bükülme açısı ile basınç değişimi ve (f) açı değişimi ile gereken enerji arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler; (g) 13.656° bükülme açısına ulaşmak için üç farklı balık kuyruğu tipi için ihtiyaç duyulan enerji miktarları (Xia vd., 2023).

Doğadan esinlenilen geometriler arasında, köpek balığı derisindeki mikroskobik dermal dentiküller pasif aerodinamik kontrol ve enerji hasadı için oldukça umut verici bir yaklaşım sunmaktadır. Yüzey sürtünme direncini belirgin şekilde azaltma ve türbülanslı patlama oluşumlarını engelleme özellikleriyle bilinen bu yivli yapılar, sınır tabaka mekanizmasını temelden değiştirmektedir. Dentikül ilhamlı topografyaların esnek kirişlere veya hareketli enerji hasat yapılarına entegre edilmesiyle, sürükleme ve kaldırma kuvvetlerinin manipülasyonu akış kaynaklı titreşimleri kontrollü bir şekilde tetiklemek amacıyla kullanılabilir. Akışkan bu karmaşık mikroyapılar üzerinden geçerken yapının alt tabakasında oluşan mekanik gerinim, enerji hasadı amacıyla piezoelektrik yamaya titreşim sağlamaktadır. Bu mekanizmanın verimliliği, aerodinamik yüklerin hassas geometrik değişimine; başka bir ifadeyle titreşim genliğini maksimize etmek üzere akışkan-katı etkileşiminin optimize edilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca akış içindeki doğal kuvvetlerden yararlanarak verimli bir şekilde çalışabilen, sağlam ve pasif enerji hasat sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Biyomimetik aerodinamik alanında, özellikle yüzey sürtünme direncini azaltmak ve sınır tabaka akışlarını yönlendirmek amacıyla köpek balığı derisinden esinlenen dermal dentiküllerin kullanımı konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Ghimire vd., 2024; Qin vd., 2026). Geçmişte bu mikro-geometrilerin uygulamaları, uçak kanat profilleri veya hidrokinamik gövdeler gibi rijit aerodinamik cisimler üzerindeki statik entegrasyonlarla sınırlı kalmıştır. Bu

geleneksel konfigürasyonlarda temel mühendislik hedefi tamamen pasif sürüklenme azaltımıdır; burada akışkan-katı etkileşimi faydalı iş üretmek yerine doğrudan direnci minimize etmek amacıyla değerlendirilmektedir.

Statik dentikül dizilerinin aerodinamik faydaları literatürde kapsamlı bir şekilde ortaya konmuş olsa da, mevcut modeller bu karmaşık üç boyutlu (3B) geometrilerin rijit bir tabakadan bağımsız hâle getirildiğinde barındırdığı enerji hasat potansiyelini tanımlamada ve değerlendirmede yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, mevcut biyolojik ilhamlı (FIV) enerji hasadı mekanizmaları genellikle sınırlı kinematiğe sahip basit küt cisimlere dayanmakta olup, yeterli titreşim genliği üretebilmek için yüksek devreye girme rüzgâr hızlarına ihtiyaç duymaktadır. Literatürde, artırılmış serbestlik dereceleriyle çalışan köpek balığı derisi dentiküllerinin akışkan-yapı etkileşimlerini inceleyen çalışmalar eksiktir. Özellikle, momentum transferini ve yapısal yer değiştirmeyi artırmak üzere tasarlanmış hareketli bir döner mafsallı üzerine bu mikro-geometrilerin monte edilmesinin aerodinamik ve enerjetik etkileri henüz araştırılmamıştır.

Bu araştırma, özgün bir enerji hasat sistemi geliştirerek literatürdeki bu eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır. Sisteme bir döner mafsallı entegre edilmesiyle yapısal serbestlik dereceleri artırılmakta ve akışkan-katı etkileşimlerinden doğan momentum kontrollü bir şekilde yükseltilmektedir. Bu dinamik hareketin, sistemin titreşim genliğini sabit bir modele kıyasla belirgin ölçüde artıracığı; böylece operasyonel aralığı genişleterek değişken veya düşük hava hızlarında dahi verimli enerji hasadına olanak tanıyacağı öngörülmektedir. Bu çalışmada, söz konusu kinematik serbestliğin sürüklenme ve taşıma kuvvetlerini nasıl değiştirerek piezoelektrik üretimi tetiklediğine odaklanılmakta; böylelikle yeni bir aktif biyomimetik enerji hasadı mekanizması sınıfı için temel bir çerçeve oluşturulmaktadır.

Bu tezin temel amacı, dinamik köpek balığı derisi dentikül geometrilerini kullanan biyomimetik bir enerji hasat sisteminin tasarlanması, üretilmesi ve deneysel olarak değerlendirilmesidir. Özel olarak bu araştırma; sistemin serbestlik derecesini artırmak üzere bir döner mafsallı eklenmesinin, akışkan-yapı etkileşimini, aerodinamik kuvvetleri ve bunlara bağlı akış kaynaklı titreşimleri nasıl değiştirdiğini inceleyerek, farklı hava hızlarında piezoelektrik enerji kazanımını maksimize etmeyi hedeflemektedir.

- Tasarım ve Üretim: Boyutsal olarak türetilmiş köpek balığı derisi dentikül modellerinin tasarlanması ile sabit ve hareketli (döner mafsallı) konfigürasyonların 3B baskı teknolojileri kullanılarak üretilmesi.
- Veri Toplama Sistemi (DAQ) Geliştirme: Eşzamanlı aerodinamik ölçümleri hassas bir şekilde kaydedebilmek amacıyla yük hücreleri, lazer deplasman sensörü ve gürültü

azaltıcı devreler içeren, özel tasarlanmış ve kalibre edilmiş yüksek hassasiyetli bir veri toplama sisteminin geliştirilmesi.

- Aerodinamik Kuvvet Analizi: Belirlenen bir hava hızı aralığında sabit ve hareketli dentikül dizileri üzerine etki eden sürüklenme ve taşıma kuvvetlerini ölçerek karşılaştırmalı rüzgâr tüneli deneylerinin gerçekleştirilmesi.
- Kinematik ve Frekans Analizi: Art izi dinamiklerinin karakterize edilmesi amacıyla, lazer deplasman verileri kullanılarak akış kaynaklı titreşimlerin genliğinin sayısallaştırılması; bu doğrultuda Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform – (FFT)) ve Strouhal sayısı hesaplamalarının uygulanması.
- Enerji Hasadı Değerlendirmesi: Entegre piezoelektrik yama sensörlerinden elde edilen voltaj çıktısının ölçülmesi ve hareketli mafsallın artırdığı momentum ile titreşim genliğinin enerji hasadı verimliliğiyle doğrudan ilişkilendirilmesi.

Parametre Optimizasyonu: Aerodinamik performans karakterize edilirken enerji çıktısını maksimize edecek optimum konfigürasyonun belirlenmesi amacıyla, deneysel değişkenlerin Taguchi L18 ortogonal dizisi kullanılarak sistematik olarak değerlendirilmesi.

Bu araştırmanın kapsamı, döner bir mafsalla donatılmış biyomimetik köpek balığı derisi dentikül dizisinin aerodinamik karakterizasyonu ve pasif enerji hasadı değerlendirilmesi ile sınırlandırılmıştır. Deneysel incelemeler kontrollü bir rüzgâr tüneli ortamında yürütülmekte olup; sürüklenme kuvvetleri, kaldırma kuvvetleri ve akış kaynaklı titreşim genliklerinin sayısallaştırılması için özel tasarlanmış, yüksek hassasiyetli bir veri toplama sistemi kullanılmaktadır.

Tezin yapısı; araştırma sürecini, metodolojiyi ve deneysel bulguları altı ardışık bölüm üzerinden sistematik bir biçimde aktarmaktadır. İkinci bölümde, biyomimetik sürüklenme azaltımı, akışkan-katı etkileşimleri ve akış kaynaklı titreşim konularında kapsamlı bir literatür taraması sunularak sabit küt cisimlerin mevcut teknolojik sınırları değerlendirilmektedir. Üçüncü bölüm; dentikül modellerinin fiziksel tasarımını, rüzgâr tüneli özelliklerini, özel geliştirilen veri toplama donanımlarını ve Taguchi L18 ortogonal dizisinin kurgusunu içeren deneysel kurulum ve metodolojiyi detaylandırmaktadır. Dördüncü bölümde aerodinamik kuvvet sonuçları verilmekte; frekans alanı analizi (FFT) kullanılarak sabit ve hareketli konfigürasyonların sürüklenme, kaldırma ve art izi dinamikleri karşılaştırılmaktadır. Beşinci bölümde enerji hasadı performansı incelenmekte, döner mafsallın mekanik olarak artırılmış kinematiği ile elde edilen piezoelektrik voltaj çıktısı ilişkilendirilmektedir. Altıncı bölüm parametre optimizasyonuna ayrılmış olup, optimum rüzgâr hızı ve geometrik parametre kombinasyonunu belirlemek

amacıyla Taguchi yöntemi sonuçlarını sunmaktadır. Yedinci ve son bölümde ise çalışmanın temel çıktıları özetlenmekte ve gelecekteki araştırmalar için potansiyel çalışma alanları önerilmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Büyük ölçekteki enerji üretimine olan ihtiyaç yıllar boyu giderek artmaktadır. Diğer taraftan, düşük güç gerektiren uygulamalar literatürdeki aerodinamik araştırmalarını akış kaynaklı titreşim (Fluid Induced Vibrations - (FIV)) ve biyomimetik alanlarının kesişimine yöneltmiştir. Geleneksel mühendislik yaklaşımlarında girdap ayrılması ve art izi türbülansı gibi akışkan-yapı etkileşimleri genellikle olumsuz görülmüş, ortaya çıkan negatif etkilerin bastırılması temel odak noktası olmuştur. Buna karşın, güncel enerji hasadı teknikleri bu dinamik kuvvetleri bilinçli ve kontrollü bir şekilde kullanmayı hedeflemektedir. Bu bölümde, tez çalışmasında geliştirilen özgün döner mafsallı enerji hasadı mekanizmasına bir altyapı oluşturmak amacıyla güncel literatür incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle FIV ve piezoelektrik enerji üretiminin temel mekanizmaları ele alınmış, ardından biyomimetik küt cisimlerin sağladığı aerodinamik akış kontrolü değerlendirilmiştir. Daha sonra, köpek balığı derisi dişçiklerinin sürüklenme azaltıcı özelliklerine odaklanılarak bu yapıların sabit yüzeylerdeki geçmiş uygulamaları analiz edilmiştir. Son olarak, aerodinamik optimizasyonda yapısal kinematiğin ve Taguchi yönteminin rolü araştırılmış, dinamik ve hareketli geometrilerin enerji üretim potansiyeline ilişkin mevcut literatürdeki eksiklikler ortaya konulmuştur.

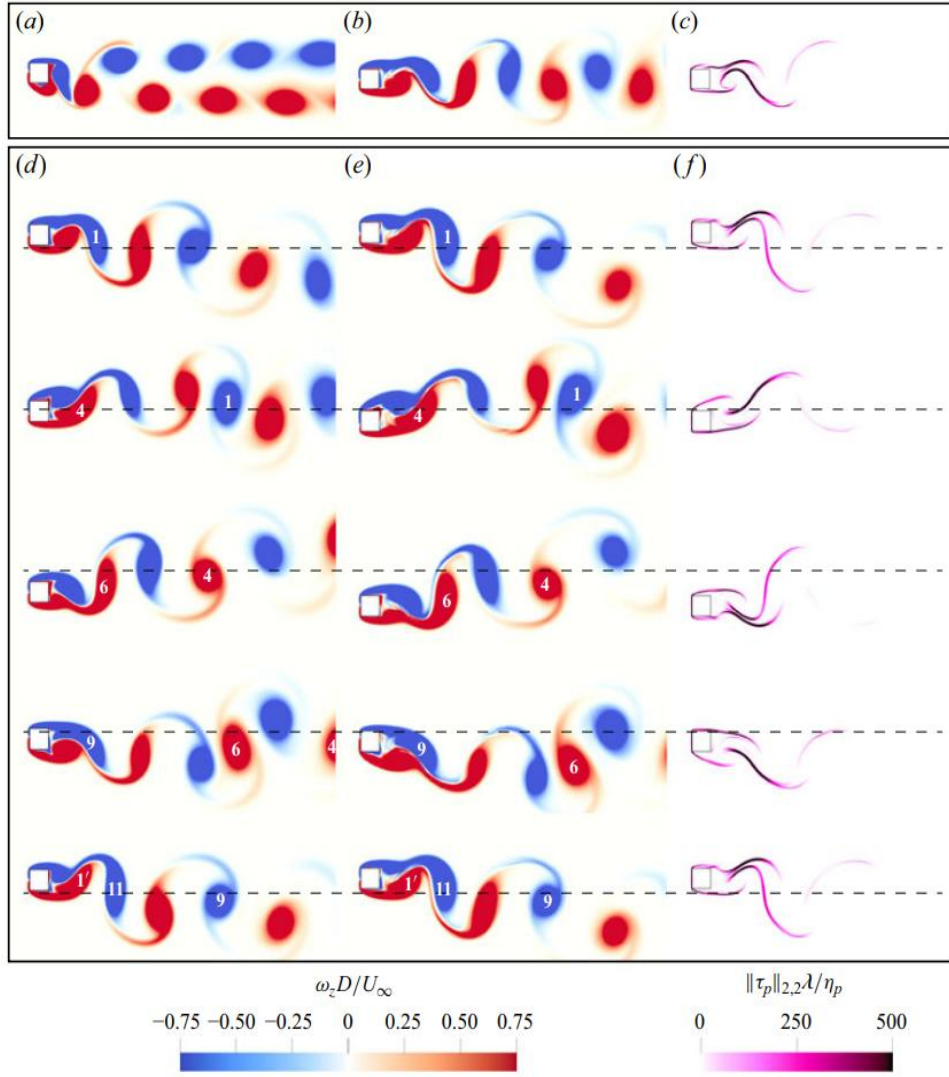
2.1 Akış Kaynaklı Titreşimler

Akış alanındaki küt cisimlerde gözlemlenen (FIV), okyanus akıntılarında rüzgâr yüküne maruz kalan yüksek yapılara kadar çeşitli mühendislik uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Bu mekanik hareket temel olarak, serbest akış ile elastik mesnetli küt cisim arasındaki kinetik enerji transferiyle tetiklenen akışkan-yapı etkileşiminden (Fluid-Structure Interaction (FSI)) kaynaklanmaktadır (Liu ve Zhu, 2021; Manickam Sureshkumar vd., 2018).

Geleneksel mühendislik yaklaşımları, yapısal yorulmayı sınırlandırmak ve olası hasarları önlemek amacıyla FSI kaynaklı bu titreşimlerin sönümlenmesine odaklanmıştır (Chen vd., 2023; Ye vd., 2025). Bununla birlikte, son yıllarda söz konusu kinetik enerji transferlerinin dağıtık enerji üretimi amacıyla kontrollü bir şekilde kullanılmasına yönelik yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Günümüzde araştırmacılar mekanik hareketi sönümlemek yerine; girdap kaynaklı titreşimler (Vortex Induced Vibrations (VIV)), salınım ve çırpınma gibi hareketlerin genliğini artırarak elektromekanik dönüşüm sistemlerini tahrik etmeyi amaçlamaktadır (Delcour vd., 2022; Kinacı vd., 2022; Cheng vd., 2023). Küt cisim aerodinamiğinde, FIV ve VIV mekanizmaları iki temel enerji hasadı kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Girdap kaynaklı titreşimler, art izi bölgesindeki periyodik girdap kopmalarının sistemin doğal yapısal frekansıya büyük ölçüde eşleşmesi durumunda ortaya çıkan bir rezonans durumunu ifade etmektedir. Bu titreşimler, nispeten düşük rüzgâr hızlarında meydana gelirler. Ek olarak girdap kaynaklı

titreşimler doğası gereği belirli bir genlik değerine ulaşabilmektedir. Dolayısıyla titreşim genliği belli bir noktaya ulaşarak sınırsız bir artış göstermez. Buna karşın salınım (galloping) mekanizmasında, dairesel olmayan küt cisimlerde tipik olarak aeroelastik bir kararsızlık durumu gözlenmektedir. Salınım mekanizmasında, VIV'den farklı olarak daha yüksek indirgenmiş hızlarda titreşim başlar ve ıraksak bir tepki sergiler. Diğer bir deyişle, rüzgâr hızı arttıkça titreşim genliği üstel olarak artmaya devam eder. Bu durum, salınım mekanizmasını mekanik titreşimleri maksimize etmek için oldukça elverişli bir hâle getirmektedir.

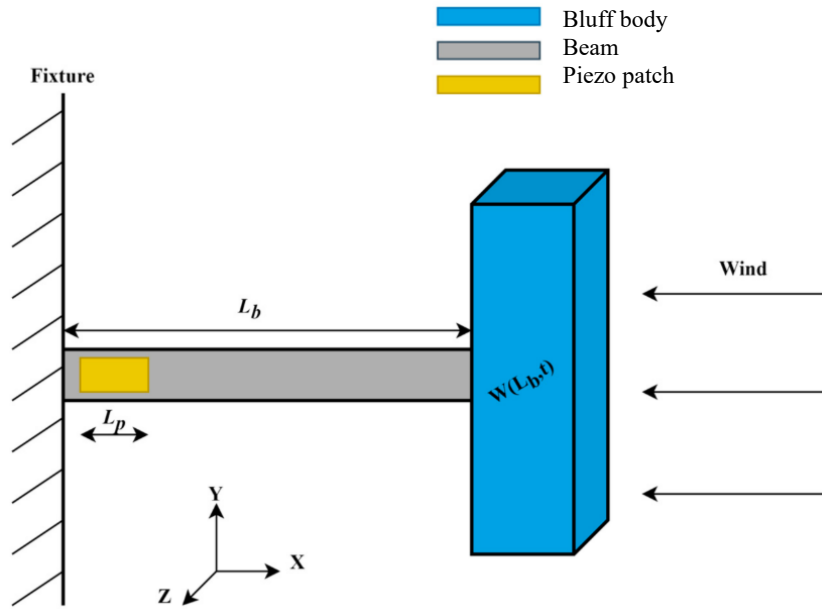
Bu iki aerodinamik durum arasındaki geçiş, akışkan özelliklerine, küt cisim geometrisine ve bölgesel hücum açısına karşı oldukça bağımlıdır. Esnek mesnetli kare prizmalar üzerinde yakın zamanda gerçekleştirilen sayısal incelemeler, bu mekanizmalar arasındaki karmaşık etkileşimi ortaya koymuştur. Örneğin araştırmacılar, belirli bir Reynolds sayısında tek serbestlik dereceli çapraz akış tepkilerini simüle etmişlerdir. Yapılan çalışmada, akışkan özelliklerinin değiştirilmesinin salınım tepkisini belirgin ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu değişimin, standart Newton tipi akışkanlara kıyasla girdap kaynaklı titreşimleri aktif olarak baskıladığı tespit edilmiştir (Gong vd., 2026). Düşük kütle oranlarındaki salınım artışı, akış kaynaklı enine kuvvetin hücum açısına göre değişim oranındaki büyümeye dayandırılmıştır. Bu bulgu, biyomimetik enerji hasadı mekanizmalarının tasarımı açısından önemli veriler sunmaktadır. Örneğin köpek balığı derisi dişçik dizisi gibi bir geometrik yapı, akış alanı içerisindeki hücum açısını aktif olarak uyarlayacak şekilde tasarlanabilir. Bu mekanik uyarlama sayesinde, teorik olarak kendi kendini sınırlandıran VIV etkisi aşılarak ve yüksek genlikli salınım hareketi kontrollü bir biçimde tetiklenebilir. Söz konusu aeroelastik prensip, enine kuvvetlerin yönlendirilmesiyle yüksek akış hızlarında üstel enerji üretimi elde edilmesini öngörmektedir. Salınım ve VIV arasındaki fark Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Burada (a, b) VIV etkisini, (d, e) ise salınım etkisini temsil etmektedir. Bu çalışmada sisteme bir döner mafsallı entegre edilmesi de bu teorik dayanağa göre şekillendirilmiştir.



Şekil 2.1. Farklı akışkan tiplerinde akış alanı görselleştirme örnekleri: Newton tipi akışkanda (a) VIV ve (d) salınım durumları; viskoelastik akışkanda (b, c) VIV ve (e, f) salınım durumları (Gong vd., 2026).

Bu kinetik enerjiyi kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla piezoelektrik enerji hasadı, etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, ankastre kirişin bükülmesinden kaynaklanan değişken yapısal gerinim, kök kısmına monte edilmiş piezoelektrik yama üzerinde pozitif ve negatif elektrik yüklerinin birikmesine neden olmaktadır. Örneğin, Zhang vd. (2017), girdap kaynaklı titreşime maruz kalan esnek bir ankastre kirişe küt cisim entegre edilmesinin belirgin bir alternatif elektrik gerilimi ürettiğini göstermiştir. İlgili çalışma, küt cismin serbest akışla etkileşime girmesiyle kiriş boyunca mekanik gerinim oluştuğunu kanıtlamıştır. Bu bulguları temel alan Bolat (2020), bir kiriş elemanının ucuna sabitlenmiş kanat profilini incelemiş ve profilde titreşimler oluşturmak amacıyla bir hava lülesi kullanmıştır. Meydana gelen titreşim, kiriş yüzeyine yapıştırılan bir piezoelektrik yama aracılığıyla elektriğe dönüştürülmüştür. Söz konusu araştırmada, hava hızının üretilen gerinim

üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür. Hava hızının 4, 8, 12 ve 16 m/s olduğu durumlarda elde edilen gerilim çıktıları sırasıyla 14, 36, 40 ve 47 V olarak kaydedilmiştir. Bir kanat profiline etki eden kaldırma kuvvetinin akışkan hızıyla artması nedeniyle bu davranış beklenen bir durumdur. Sonuç olarak, tüm hasat sisteminin verimliliği temel düzeyde, aerodinamik kuvvetlerin ve küt cisim geometrisi tarafından tetiklenen titreşim genliğinin maksimize edilmesine bağlıdır. Yang vd. (2025), doğrudan bu bağımlılığı incelemiş ve geleneksel rijit geometriler yerine rijit-esnek bileşik küt cisimlerin kullanımını değerlendirmiştir. Geliştirilen bu yeni geometri, sistemin hava akışlarına dinamik olarak uyum sağlamasına imkan tanımıştır. Bu uyum sayesinde efektif rüzgâr hızı aralığı genişlemiş ve toplam güç üretimi artmıştır.



Şekil 2.2. Piezoelektrik eleman kullanımının şematik gösterimi (Yuan vd., 2023).

2.2 Biyomimetik Aerodinamik ve Küt Cisim Art İzleri

Serbest bir akışkan bir küt cisimle karşılaştığında, ters basınç gradyanı akışı ayrılmaya zorlayarak oldukça kararsız kayma tabakaları oluşturur. Bu tabakalar, akış yönünde periyodik olarak kopan ayrık girdaplar şeklinde kıvrılarak Von Kármán girdap dizisi meydana getirir (Williamson, 1996). Söz konusu asimetrik kopma, yapı üzerinde değişken kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri yaratarak belirgin bir basınç sürüklemesi oluşturur ve cismi tekrarlı mekanik yüklere maruz bırakır (Demchenko vd., 2025). Yıkıcı etkiye sahip bu art izi dinamiklerini kullanılabilir enerjiye dönüştürmek amacıyla güncel akışkanlar mekaniği çalışmaları, akışı kontrollü bir biçimde düzenlemek ve kullanmak üzere geometrik modifikasyonlardan yararlanan pasif akış kontrolüne yönelmiştir. Araştırmacılar, basit silindir

veya prizma geometrileri kullanmak yerine, aerodinamik yükleri ve akışkan-katı etkileşimlerini hassas bir şekilde optimize edebilmek için doğadaki işlevsel çözümleri inceleyen biyomimetik yaklaşımlara giderek daha fazla başvurmaktadır.

Biyomimetik akış kontrolünün başlıca örneklerinden biri, sınır tabakayı yeniden enerjilendirerek tutunma kaybını geciktiren ve pasif girdap üreteçleri olarak işlev gören kambur balina yüzgecindeki hücum kenarı tüberkülleridir (Fish vd., 2008). Pürüzsüz olmayan biyomimetik yüzeylerin aerodinamik kuvvetleri yönlendirebildiğini gösteren modeller, özel mikro-geometrilerin analizi için temel oluşturmaktadır. Akış kontrolünü doğrudan sınır tabakada gerçekleştiren köpek balığı derisindeki dişçikler, bu mekanizmanın en belirgin örneklerinden biri olarak görülmektedir.

2.3 Köpek Balığı Derisi Dişçikleri ve Sürüklenme Azaltımı

Biyomimetik akış kontrol stratejileri arasında, köpek balıklarının derisinde bulunan dermal dişçikler sınır tabaka manipülasyonu için en etkili doğal modellerden birini sunmaktadır. Bu mikroskobik diş benzeri pullar, anatomik konumlarına ve yapısal bileşimlerine bağlı olarak organizmaya aşınma direnci, biyolojik savunma, kirlenme önleme ve sürüklenme azaltımı özelliklerini sağlamaktadır (Lauder vd., 2016; Dillon vd., 2017).

Mühendislik uygulamalarında pasif akış kontrol yöntemleri, sisteme fazladan enerji girdisi gerektirmemeleri nedeniyle oldukça makul görülmektedir (Özkan ve Erkan, 2022). Akışı kontrol etmek ve sürüklemeyi azaltmak amacıyla yüzey pürüzlülüğünün genel kullanımı literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiş olmakla birlikte (Lauder vd., 2006; Seify Davari vd., 2026; Almuradi, 2025), hangi pürüzlülük tiplerinin belirli akış koşulları altında en yüksek performansı sergilediği hâlen güncel bir araştırma konusudur. Ayrıca, doğadan ilham alan yüzey uygulamaları yalnızca sürüklemeyi azaltmakla kalmayıp gürültü ve titreşim etkilerini de sönmüleyebilmektedir. Böylece yüksek hızlı akışlara maruz kalan sistemler için daha güvenli ve kararlı çalışma koşulları sağlanmaktadır (Çengel ve Cimbala, 2018).

Söz konusu sürüklenme azaltımının temel mekanizması, dişçiklerin duvara yakın türbülans ile pasif olarak etkileşime girebilme kabiliyetinde yatmaktadır. Deneysel ve sayısal incelemeler, bu karmaşık yüzey pürüzlülüğü modellerinin duvara yakın türbülanslı girdapların yanal hareketini fiziksel olarak kısıtladığını ve dolayısıyla genel türbülans yoğunluğunu azalttığını göstermiştir (Choi, 1989; Sharma ve Dutta, 2022). Araştırmacılar, kedi balığı (Scyliorhinidae) gibi türlerin dermal yapılarını taklit ederek bu akışkan-yapı etkileşimini üç boyutlu olarak görselleştirmişlerdir. Dişçiklerin geometrisi, uç kısımlarında akış yönüyle hizalanan zıt yönlü girdap çiftleri oluşturmaktadır. Bu girdaplar, komşu dişçiklerden

kaynaklanan girdaplarla birleşerek art izi bölgesinde yüksek düzeyde düzenli, ardışık girdap desenleri (Von Kármán girdapları) meydana getirmekte ve sınır tabaka dinamiklerini temelden değiştirmektedir (Feld vd., 2019).

Söz konusu aerodinamik verimliliğin sayısallaştırılması ve optimize edilmesi amacıyla yürütülen hidrodinamik ve aerodinamik araştırmalar, dişçiklerin geometrik parametrelerine; özellikle çıkıntı yüksekliği (h) ve bitişik çıkıntılar arasındaki yanal mesafeye (s) odaklanmaktadır (Hough, 1980; Xu vd., 2018). Temel çalışmalar, $h/s = 2$ şeklindeki bir yükseklik-mesafe oranının yaklaşık %8 düzeyinde sürüklemeye azaltımı sağlayabildiğini ortaya koymuştur (Bechert vd., 1997). Bu bulguları farklı akış koşulları için normalize etmek amacıyla, matematiksel tanımları aşağıda belirtilen boyutsuz yükseklik (h^+) ve boyutsuz mesafe (s^+) parametreleri literatüre sunulmuştur (Bushnell ve Moore, 1991):

$$h^+ = \frac{h \cdot u_\tau}{\nu} \quad (D.1)$$

$$s^+ = \frac{s \cdot u_\tau}{\nu} \quad (D.2)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (D.3)$$

Bu boyutsuz ölçütlerin kullanıldığı rüzgâr tüneli deneyleri, $h^+ = 15$ değerindeki optimum dişçik yüksekliğinin sürüklemeyi %7'ye kadar azalttığını (Walsh, 1980) ve bu değer in mesafe parametresiyle ($s^+ \approx 15$) eşleştirilmesinin elde edilebilir maksimum sürüklemeye azaltımını sağladığını ortaya koymuştur (Walsh, 1990).

Temel parametrelerin ötesinde, dişçiklerin özgül kesit profilleri de sistemin verimliliğini belirlemektedir. Literatürde V tipi, U tipi, L tipi, trapezoidal, yarı dairesel ve testere dişi modeller dâhil olmak üzere çeşitli yapısal konfigürasyonlar kapsamlı bir biçimde test edilmiştir (Bechert ve Bartenwerfer, 1989; Anderson vd., 1997; Bai vd., 2016; Qiu vd., 2020). Kesintisiz bıçak benzeri dizilimlerin, kademeli konfigürasyonlara kıyasla daha yüksek performans gösterdiği belirlenmiştir (Bechert vd., 2000). Diğer taraftan h/s oranının hassas bir şekilde kontrol edildiği durumlarda bıçak modelleri ($h/s = 0.5$), testere dişi modelleri ($h/s = 0.75$) ve taraklı yüzeylerin ($h/s = 0.98$) sırasıyla yaklaşık %9, %7 ve %6 oranlarında sürüklemeye azaltımı sağladığı gösterilmiştir (Bechert vd., 1997; Dean ve Bhushan, 2010). Ayrıca, bıçak benzeri yapılarda kalınlık-mesafe oranının (t/s) 0.02'ye düşürülmesi sürüklemeye %10'a varan bir azalma sağlarken (Bechert vd., 1997; Dean ve Bhushan, 2010), trapezoidal modellerde bu azalma yaklaşık %6 seviyesindedir (Bechert vd., 2000).

Söz konusu geometrik modifikasyonların yanı sıra, literatürdeki deneysel çalışmalar da bu yapıların operasyonel sınırlarını ve performanslarını desteklemektedir. Belirli geometriler üzerinde gerçekleştirilen düşük hızlı rüzgâr tüneli testlerinde, V tipi yapılar için boyutsuz yüksekliğin (h^+) kritik bir parametre olduğu görülmüştür. Bu değerin; $h^+ = 12$ (Walsh, 1982), $h^+ = 13 - 18$ (Reidy ve Anderson, 1988) ve $h^+ = 10 - 15$ (Neumann ve Dinkelacker, 1991) aralıklarında sabit tutulması, düzenli olarak yaklaşık %8 düzeyinde sürüklenme azaltımı sağlamıştır. Benzer şekilde, yarı dairesel köpek balığı derisi modellerinde de %7 (Jiao vd., 2016) ile %8 (Walsh, 1983) arasında maksimum sürüklenme azaltımı değerlerine ulaşılmıştır.

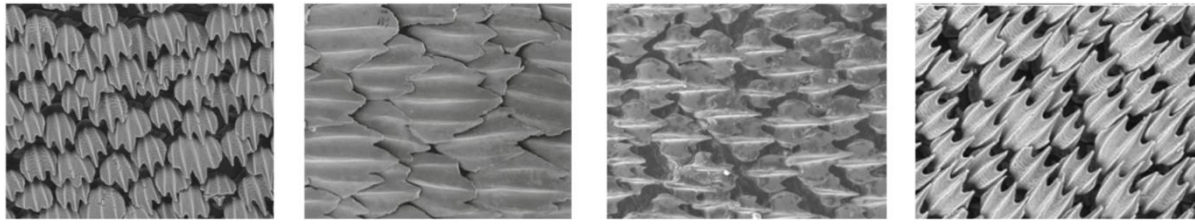
Geçmişten günümüze kadar köpek balığı derisinin fiziksel modelleri karmaşık döküm yöntemleriyle üretilmiştir (Pan vd., 2013; Chen vd., 2014a; Chen vd., 2014b; Liu vd., 2019). Mikro-tomografi (Mikro-BT) ve yüksek çözünürlüklü 3B baskı teknolojilerindeki ilerlemeler, sivriburun mako köpek balığı (*Isurus oxyrinchus*) gibi gerçek biyolojik yapıların hassas şekilde kopyalanmasına olanak tanımıştır (Wen vd., 2014). Söz konusu mako geometrilerine yönelik Doğrudan Sayısal Simülasyon (Direct Numerical Simulation – (DNS)) analizleri önemli bir bulgu ortaya koymuştur. Bu analizlere göre, kesintisiz ve kademeli konfigürasyonlar, basit 3B pürüzlülük modellerine kıyasla sürüklemeyi daha fazla artırmaktadır (Boomsma ve Sotiropoulos, 2016). Buna rağmen, yüksek hassasiyetli 3B baskı teknolojisi, biyomimetik dişçiklerin kritik aerodinamik yüzeylere başarılı bir şekilde entegre edilmesini sağlamıştır.

Biyomimetik yapıların aerodinamik yüzeylerdeki bu potansiyeli, literatürde farklı mikro-geometrilerin kanat profilleri üzerindeki performans testleriyle de kapsamlı şekilde incelenmiştir. Bu doğrultuda, testere dışı geometrilerinin ince kanat profillerine uygulanması, seçilen boyutlara bağlı olarak farklı sürüklenme azaltım değerleri sunmuştur. Örneğin, $h = s = 51$ seviyesindeki testlerde %3.3 (Coustols ve Schmitt, 1990), $h = s = 76$ seviyesinde %10 (Subaschandar vd., 1999) ve $h = s = 114$ seviyesinde ise %6 (Sundaram vd., 1999) oranında sürüklenme azalması elde edilmiştir. Testere dışı dizilimleri simetrik kanat profillerinde daha yüksek bir etkinlik sergilemiştir. Yapılan çalışmalarda, $h = s = 23$ boyutlarında %13.3 (Caram ve Ahmed, 1991), $h = s = 76$ boyutlarında %13 (Sundaram vd., 1996) ve $h = s = 44$ boyutlarında %7 (Bixler ve Bhushan, 2013) sürüklenme azaltımı kaydedilmiştir.

Ayrıca, NACA 0012 ve NACA 4415 profillerine uygulanan modern 3B baskılı dişçik dizilerinin, standart rijit girdap üreteçlerine kıyasla belirgin düzeyde üstün olduğu kanıtlanmıştır. NACA 0012 kanat profiline entegre edildiğinde bu geometriler, 8° ile 12° arasındaki hücum açılarında kaldırma-sürüklenme (C_L/C_D) oranında önemli iyileştirmeler sağlamıştır (Domel vd., 2018). Bhatia vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada ise, modelin 12° hücum açısında akışa ters

yönde konumlandırılmasının, C_L/C_D verimlilik oranında %3.6'lık bir artış sağladığı görülmüştür. Ek olarak yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla, 3B baskılı modeller NACA 0012 kanat profilinin %16 ve %60 veter konumlarına yerleştirilmiştir. Bu yerleşim sonucunda sürüklenme kuvvetinde %11.2 oranında azalma ve kaldırma kuvvetinde %11.3 oranında artış elde edilmiştir (Bhatia vd., 2022). NACA 4415 kanat profilinde ise, veter ortasına yapılan yerleşimler, hem kaldırma hem de sürüklenme kuvveti açısından, geleneksel girdap üreteçlerinden daha yüksek performans sergilemiştir (Zulkefli vd., 2020).

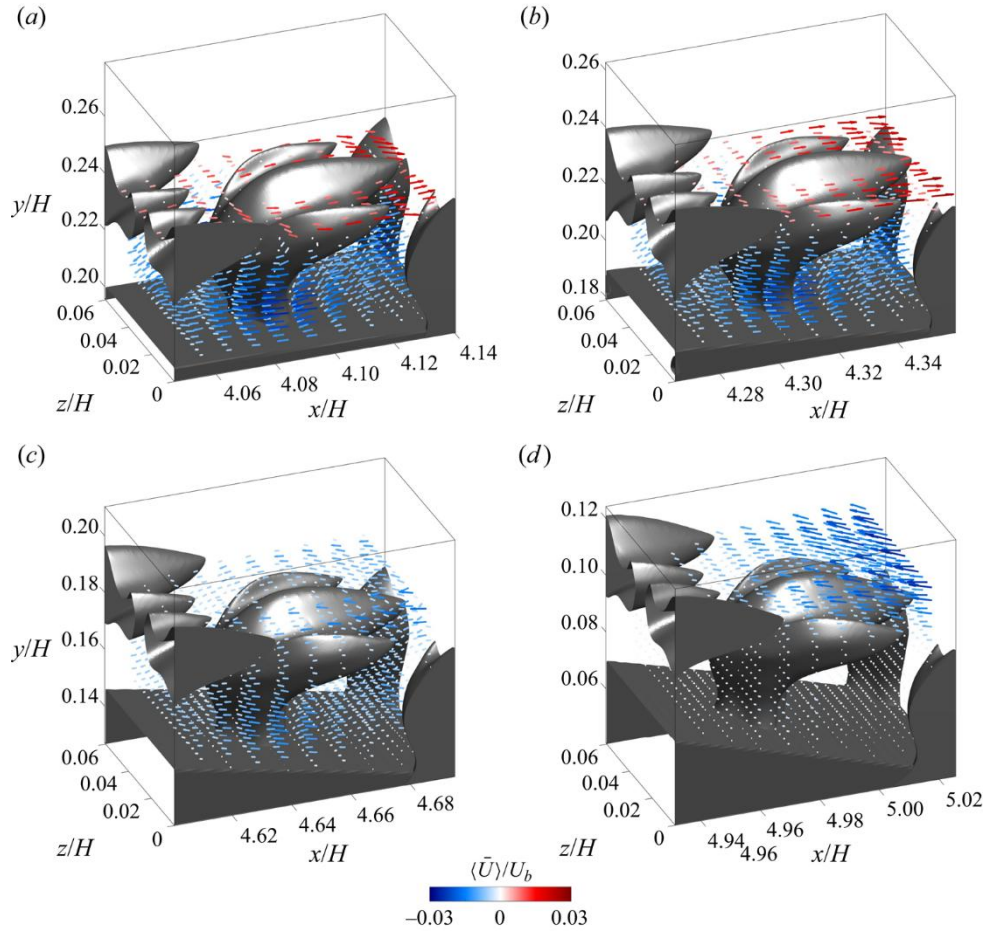
Şekil 2.3'teki doğal köpek balığı derisi örneğinde görüldüğü üzere, biyolojik dermal dişçikler belirgin geometrik farklılıklar sergilemektedir. Bu doğrultuda bu çalışma, minimum aerodinamik sürüklenme değerini sağlayan optimum dişçik morfolojisini sistematik olarak izole etmeyi ve tanımlamayı amaçlamaktadır. Kinematik serbestlik dereceleri ve enerji hasat mekanizmaları sisteme dâhil edilmeden önce temel aerodinamik profili oluşturduğundan, söz konusu düşük sürüklemeli referans geometrisinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.



Şekil 2.3. Farklı köpek balığı türlerine ve vücut bölgelerine ait dişçiklerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri (Wen vd., 2014; Boomsma ve Sotiropoulos, 2016; Lang vd., 2012; Feld vd., 2019).

Dermal dişçiklerin aerodinamik avantajlarını kavramak için, bu yapıların türbülanslı sınır tabaka ile mikroskobik düzeydeki etkileşimini incelemek gerekmektedir. Şekil 2.4'te yer alan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) şemasında gösterildiği gibi, dişçiklerin karmaşık geometrisi basit bir yüzey pürüzlülüğünün ötesinde işlevlere sahiptir. Akış ayrılmasını inceleyen güncel (DNS), bu geometrilerin duruma uyum sağlayan proaktif bir akış kontrol mekanizması olarak çalıştığını ortaya koymuştur. Biyolojik pullar; geniş bir üst kısım (taç) ve ince bir taban (boyun) olmak üzere belirgin iki katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır. Yüzey, tipik olarak geniş çaplı akış kopmasına ve yüksek basınç sürüklemesine yol açan ters basınç gradyanına (APG) maruz kaldığında bu özgün morfoloji, taç kısımlarının altındaki boşlukta ters yönde bir akışı tetiklemektedir. Dişçik boyunları, sınır tabakanın ayrılmasına izin vermek yerine akışı tersi yönünde aktif olarak hızlandırmaktadır. Bu akış manipülasyonu, geniş çaplı akış ayrılmasından önce bölgesel bir itki üreterek ters basınç gradyanını etkin bir şekilde kullanmakta ve sistemi aerodinamik açıdan elverişli bir sonuca ulaştırmaktadır (Savino ve Wu, 2024). Çok katmanlı ve karmaşık yapıdaki bu akışkan etkileşimi, dişçik dizilerini standart geometrik pürüzlülük modellerinden üstün kılmakta ve herhangi bir kinematik hareketin sisteme dâhil edilmesinden

önce yüksek verimli bir aerodinamik referans sağlamaktadır.



Şekil 2.4. İki katmanlı köpek balığı dışık yapısında akış yönündeki hız vektörleri ve bölgesel itki yaratan ters gözenek akışı mekanizması (Savino ve Wu, 2024).

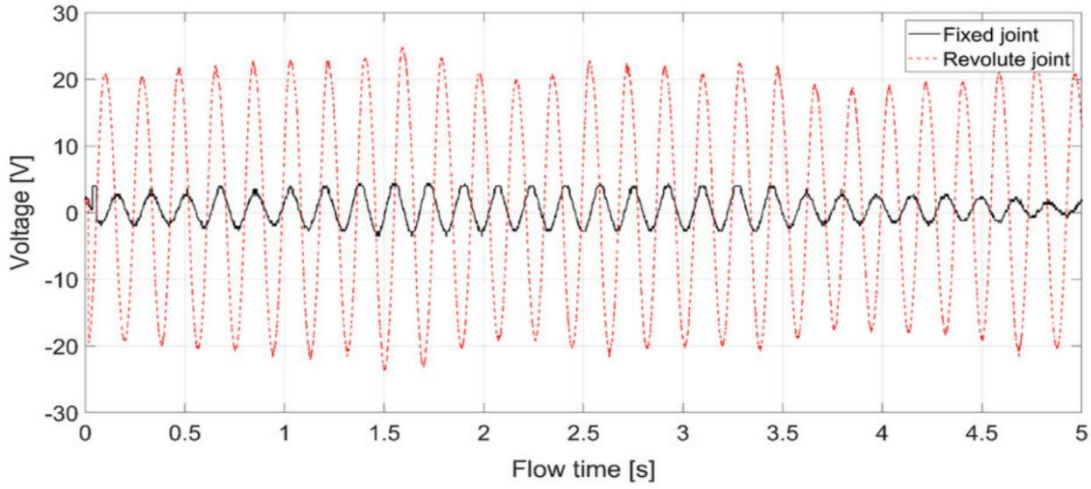
Literatür, biyomimetik köpek balığı derisi dışıklerinin aerodinamik ve hidrodinamik faydalarını büyük ölçüde doğrulasa da, bu çalışmalarda ortak olan kritik bir sınırlılık ortaya çıkmaktadır. Modellenen geometriler doğrudan statik yüzeylere sabitlenmiş, rijit ve hareketsiz yapılar olarak değerlendirilmektedir. Bu sabit yaklaşım, biyolojik derinin doğal esnekliğini bütünüyle göz ardı etmekte ve akış kaynaklı yapısal hareketlerin art izi desenleri ile girdap kopmasını aktif biçimde değiştirdiği geri bildirim mekanizmasını inceleme dışında bırakmaktadır. Sonuç olarak, bu yüksek düzeyde optimize edilmiş mikro-geometrilerin hareketli bir döner mafsallı aracılığıyla kinematik serbestlik dereceleri kazandırılarak, momentum transferini nasıl artırabileceğini, akış kaynaklı titreşimleri nasıl maksimize edebileceğini ve yeni enerji hasadı uygulamalarına nasıl olanak tanıyabileceğini araştıran çalışmalar literatürde belirgin şekilde sınırlı kalmaktadır.

2.4 Kinematik, Geometrik Anomaliler ve Serbestlik Dereceleri

Biyomimetik yüzey elemanları sınır tabakasını etkili bir şekilde yönlendirse de, çoğu akış kaynaklı titreşim (FIV) enerji hasadı mekanizmaları rijit biçimde monte edilmiş standart küt cisimlere dayanmaktadır. Bu konfigürasyonlarda sistemin kinematik serbestlik dereceleri ankastre kirişin elastik deformasyonu ile kesin biçimde sınırlanmakta ve bu durum dar bir operasyonel bant genişliği ile sonuçlanmaktadır. Bu kısıtlamayı aşmak amacıyla son dönemdeki hesaplamalı ve deneysel akışkanlar dinamiği araştırmaları, standart dışı geometrilerin incelenmesine yönelmiştir. Bu çalışmalardan birinde, Özkan vd. (2023a), çatal ve diğer çok uçlu profiller test etmiştir. Sonuçlar standart kesitlerden uzaklaşılmasının, kaldırma katsayıları ve akış ayrılma davranışlarını büyük ölçüde değiştirdiğini göstermiştir (Özkan vd., 2023a). Bu bulgu, enerji hasadı mekanizmalarının temel geometrisinin aerodinamik verimliliği optimize etmede en kritik değişken olduğunu doğrulamaktadır.

Statik geometrilerin modifiye edilmesine ek olarak, sisteme yapısal esneklik kazandırılması, düşük rüzgâr hızlarında momentum transferini artırmak için uygun bir yöntemdir. Piezoelektrik ankastre kirişlere tutturulmuş dalgalanan kumaşlar gibi yüksek esnekliğe sahip malzemelerin kullanıldığı çalışmalar, yapısal uyarlabilirliğin hasat mekanizmasının ortamdaki hava akışına fiziksel olarak uyum sağlamasına olanak tanıdığını göstermiştir. Bu yüksek düzeyde esnek sistemlerde, 3.8 m/s gibi düşük rüzgâr hızlarında dahi sürekli enerji kazanımı elde edilebilmektedir (Özkan vd., 2024). Söz konusu sistemler, akış kaynaklı dalgalanma frekansının, yapının doğal rezonans frekansıyla eşleşmesi durumunda maksimum güç üretmektedir. Bu prensip, yapının basitçe rijit bir engel olarak işlev görmek yerine art izi dinamiklerine aktif olarak tepki verdiğinde enerji hasadının maksimize edildiğini vurgulamaktadır.

Dinamik yapısal hareket gereksinimini temel alan güncel araştırmalar, akışkan-katı etkileşimlerini artırmak amacıyla mekanik eklem entegrasyonunu ortaya çıkarmıştır. Bu alandaki önemli gelişmelerden biri, V tipi küt cismin ankastre kirişe döner mafsallı aracılığıyla bağlanarak iki serbestlik dereceli bir konfigürasyonun oluşturulmasıdır (Özkan vd., 2023b). Söz konusu mekanik bağlantı, geometrinin girdaplar tarafından tetiklenen salınım ve çarpınma hareketleri arasında dinamik bir geçiş yapmasına imkân tanımıştır. Mafsallı V profilinin tepe açısı üzerinde yürütülen parametrik çalışmalar, sistemin kinematik olarak artırmanın güç üretimini doğrudan yükselttiğini göstermiş ve 10 m/s rüzgâr hızında 0.295 mW seviyesinde maksimum güç çıktısı elde edilmiştir (Özkan vd., 2023b). Şekil 2.5'te, döner mafsallı kullanımının sağladığı avantajı sunmaktadır.



Şekil 2.5. Sabit ve Döner Mafsallar Tarafından Üretilen Gerilimlerin Karşılaştırması (Özkan vd., 2023b).

İlgili aerodinamik prensiplerin bir arada değerlendirilmesi, mevcut literatürdeki belirgin bir eksikliği ortaya koymaktadır. Çalışmalar; biyomimetik köpek balığı derisi dişçiklerinin pasif sınır tabaka manipülasyonunda etkili olduğunu, standart dışı geometrilerin kaldırma katsayılarını değiştirebildiğini ve sisteme bir döner mafsala kazandırmanın enerji kazanımını belirgin ölçüde artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu yaklaşımlar bugüne dek bir arada entegre edilmemiştir. V tipi profiller döner mafsallar üzerinde test edilmiş olsa da, optimize edilmiş biyomimetik yapıların hareketli bir döner mafsala bağlanmasının aerodinamik ve enerji üretim performansları üzerine etkileri henüz araştırılmamıştır. Bu tez kapsamında, dermal dişçiklerin optimum geometrisi ile döner mafsala mekanik olarak artırdığı momentumu birleştirerek çok serbestlik dereceli, özgün bir enerji hasat modeli önerilmektedir.

2.5 Deney Tasarımı ve Parametre Optimizasyonu

Aerodinamik verimliliği belirleyen değişkenlerin izole edilmesi, sistematik istatistiksel yaklaşımların kullanımını gerektirmektedir. Akış kaynaklı titreşimler üzerine gerçekleştirilen güncel deneysel çalışmalar, kapsamlı bir Deney Tasarımı (Design of Experiments (DOE)) metodolojisine duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Tezcan vd. (2026), tandem (ardışık) dizilimlerde küt cisim geometrisinin ve boylamasına mesafenin etkilerini incelemek amacıyla tam faktöriyel deney tasarımı yaklaşımını kullanmıştır. İlgili çalışmada, geometrik konfigürasyon ve uzamsal yerleşimin özellikle 1.25D tandem mesafesine yerleştirilmiş küresel bir küt cismin art izi dinamiklerini ve elde edilen elektriksel çıktıyı belirgin şekilde etkilediği görülmüştür.

Tam faktöriyel tasarım, sınırlı sayıdaki değişkenin etkilerini izole etmede verimli bir yöntemdir. Ancak enerji hasadı mekanizmasının yapısal karmaşıklığı arttığında bu yöntemin uygulanabilirliği ortadan kalkmaktadır. Önceki bölümlerde ifade edildiği üzere, biyomimetik köpek balığı derisi dişçiklerinin karakterizasyonu rüzgâr hızı gibi çevresel faktörlerin yanı sıra yüksek derecede etkileşimli çok sayıda geometrik parametrenin eşzamanlı olarak optimize edilmesini gerektirmektedir. Tam faktöriyel tasarım yaklaşımıyla yedi farklı parametrenin üç ayrı seviyede değerlendirilmesi, 4000 adetten fazla bağımsız rüzgâr tüneli testinin gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kısıtlamayı aşmak amacıyla akışkanlar dinamiği araştırmacıları ve mühendisler Taguchi yöntemine başvurmaktadır. Taguchi yöntemi ile, ortogonal diziler kullanarak temel etki kombinasyonlarının ve Sinyal-Gürültü (S/N) oranlarının çok daha az sayıda deneyle elde edilmesi sağlanır. Dolayısıyla, bu çalışmada önerilen özgün ve çok parametrelili döner mafsallı dişçik mekanizmasının kapsamlı biçimde değerlendirilmesinde Taguchi L18 ortogonal dizisinin kullanılması, optimum enerji hasadı konfigürasyonunu belirlemek için istatistiksel açıdan güçlü bir altyapı sunmaktadır.

Sonuç olarak, köpek balığı derisi geometrilerinin aerodinamik avantajlarına ve yapısal kinematiğin enerji üretimine yönelik faydalarına rağmen, bu iki alanın kesişimi güncel literatürde henüz incelenmemiş bir konu olarak varlığını sürdürmektedir. Bugüne dek biyomimetik dişçiklerin rijit bir tabakadan bağımsızlaştırılarak hareketli bir döner mafsala entegre edildiği ve bu iki konseptin bir arada değerlendirildiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tez, çok serbestlik dereceli bu mekanizmanın enerji kazanımı amacıyla momentumu nasıl dinamik olarak artırdığını sistematik biçimde incelemeyi ve karmaşık geometrik parametreleri Taguchi deney tasarımı yardımıyla optimize etmeyi hedeflemektedir. Bu doğrultuda çalışma, aktif biyomimetik enerji hasadı alanında yeni bir yaklaşım sunmayı amaçlamaktadır.

3. DENEYSEL KURULUM VE METODOLOJİ

Önceki bölümde tanımlanan literatür eksikliğini ampirik olarak gidermek amacıyla; özgün ve hareketli biyomimetik enerji hasadı mekanizmalarının aerodinamik performansını değerlendirmeye yönelik kapsamlı bir deneysel çerçeve oluşturulmuştur. Bu deneysel kurulumun temel amacı; sisteme bir döner mafsal aracılığıyla kinematik serbestlik dereceleri kazandırılmasının, 3B baskı ile üretilmiş köpek balığı derisi dentiküllerinin sürüklenme, kaldırma kuvvetlerini ve akış kaynaklı titreşim genliğini geleneksel sabit konfigürasyona kıyasla nasıl değiştirdiğini hassas bir şekilde sayısallaştırmaktır.

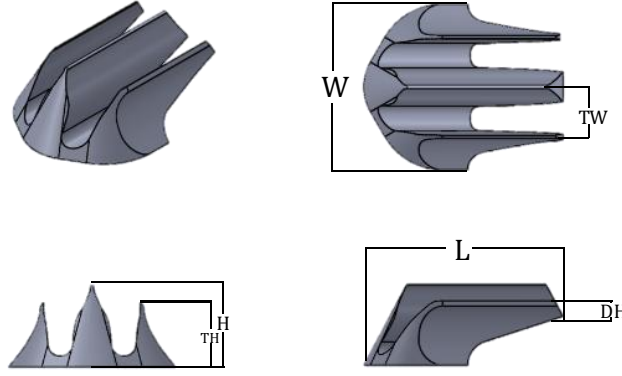
Farklı aerodinamik koşullar altında yüksek hassasiyetli veri toplama sürecini sağlamak üzere, çoklu sensör içeren özel bir veri toplama (DAQ) mimarisi tasarlanmış ve kontrollü bir rüzgâr tüneline entegre edilmiştir. Bu bölümde, çalışmanın metodolojisi sistematik bir biçimde detaylandırılmaktadır.

Bölüm 3.2'de biyomimetik dentikül modellerinin ve döner mafsal mekanizmasının matematiksel tasarımı ile 3B baskı üretim süreçleri açıklanmaktadır. Bölüm 3.3, rüzgâr tüneline akış karakteristiklerini, türbülans yoğunluğunu ve blokaj oranını tanımlamaktadır. Bölüm 3.4'te yük hücresi kuvvet ölçümleri ve piezoelektrik giriş testlerine yönelik fiziksel deney konfigürasyonları sunulmaktadır. Bölüm 3.5, özel tasarlanmış DAQ mimarisi ve gürültü azaltıcı devrelerin kapsamlı bir dökümünü içermektedir. Son olarak Bölüm 3.6'da, Taguchi L18 ortogonal dizi testlerinin yürütülmesinde kullanılan; kaydedilen verilerin tekrarlanabilirliğini ve istatistiksel geçerliliğini sağlayan standartlaştırılmış deney prosedürü ortaya konmaktadır.

3.1 Biyomimetik Modellerin Tasarımı ve Üretimi

3.1.1 Köpek Balığı Derisi Dişçiklerinin Geometrik Tasarımı

Biyomimetik modellerin temel geometrisi, doğal köpek balığı derisi dermal dentiküllerinin morfolojik özelliklerinden belirlenen boyutlarda üretilmiştir. Bu mikroyapıların rüzgâr tüneline makroskobik ortamındaki aerodinamik etkisini değerlendirmek amacıyla karakteristik boyutlar orantısal olarak ölçeklendirilmiştir. Referans geometri, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımı (SolidWorks) kullanılarak oluşturulmuş ve Taguchi L18 ortogonal dizi testlerinin uygulanmasını kolaylaştırmak üzere profil altı farklı geometrik değişkenle parametrize edilmiştir.



Şekil 3.1. Biyomimetik köpek balığı derisi dişçik makroskobik boyutlarını (uzunluk L , genişlik W , yükseklik H) ve enine çıkıntı mesafesi (TW), yan çıkıntı yüksekliği (TH) ile kuyruk kenarı boşluk mesafesini (D_H) içeren ikincil mikro-geometrik değişkenlerini gösteren parametrik CAD şeması.

Biyomimetik mikro-geometrinin aerodinamik etkisini sistematik olarak değerlendirmek için, özel tasarlanmış köpek balığı derisi dentikülleri, belirli bir geometrik değişken seti kullanılarak CAD yazılımında parametrik olarak modellenmiştir. Yapının makroskobik izdüşüm alanını ve temel profilini belirleyen birincil kontrol parametreleri; genel akış yönündeki uzunluk (L), enine genişlik-uzunluk oranı (W/L) ve genişlik-yükseklik oranını (W/H) içermektedir.

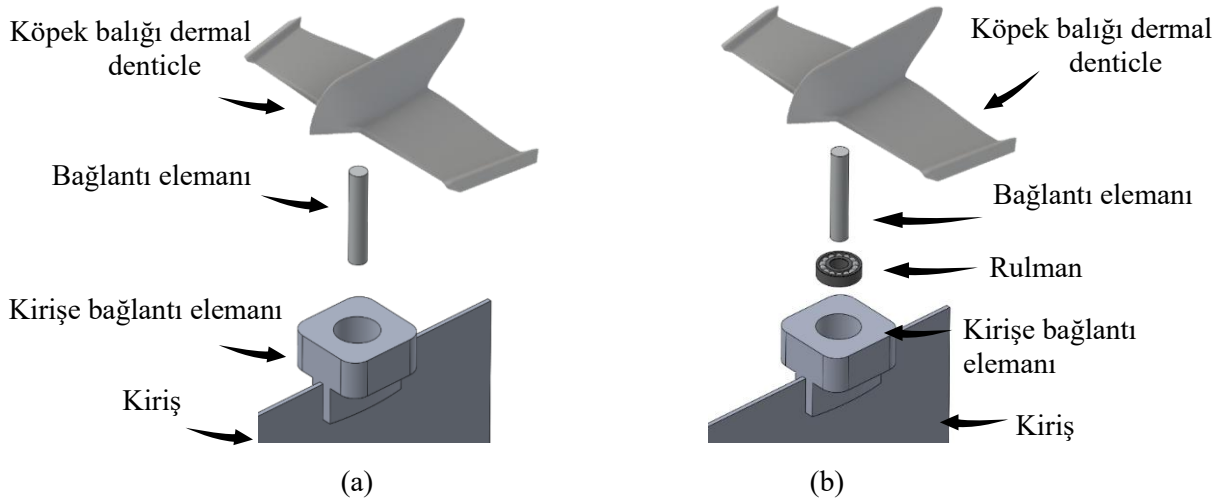
İç akışkan kanallanmasını ve sınır tabaka etkileşimlerini hassas bir şekilde yönlendirmek amacıyla, deneysel test matrisine çeşitli ikincil mikro-geometrik faktörler dâhil edilmiştir. Bu iç parametreler, merkez çıkıntı ile bitişik yan çıkıntılar arasındaki mesafeyi içermekte olup bu durum matematiksel olarak (W/TW) oranıyla tanımlanmaktadır (burada (TW), mutlak enine çıkıntı mesafesini temsil etmektedir). Ayrıca, yan çıkıntılarının bağıl yüksekliği, yan çıkıntı yükseklik-yükseklik oranı (TH/H) aracılığıyla kontrol edilmiştir. Son olarak, dentikül yapısının kuyruk kenarından (arka kısım) uzanan boşluk mesafesini tanımlamak üzere (D_H) parametresi kullanılmıştır. Bahsedilen tüm parametreler Şekil 3.1'de görülmektedir. Taguchi dizisi kapsamında her bir parametre için seçilen spesifik seviyeler Tablo 3.1'de detaylandırılmıştır. Modeller, literatürde pasif sürüklenme azaltımı için en verimli konfigürasyon olarak tanımlanan kesintisiz, bıçak benzeri (blade-like) dizilimler şeklinde tasarlanmıştır.

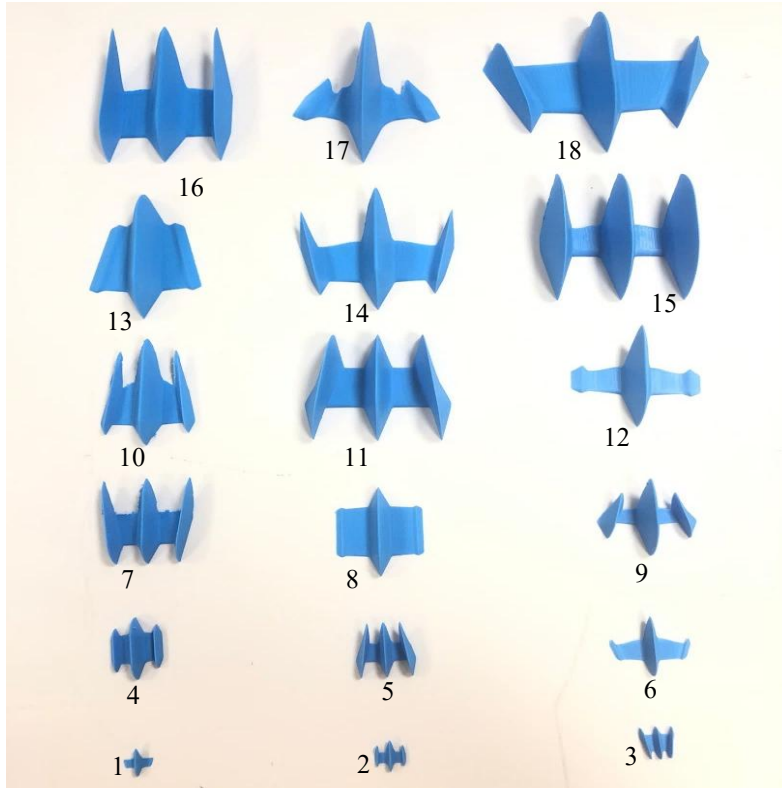
Tablo 3.1. Biyomimetik dentikül geometrisini tanımlayan tasarım parametreleri ve kontrol faktörleri

Parametreler	Faktör (1)	Faktör (2)	Faktör (3)	Faktör (4)	Faktör (5)	Faktör (6)	Faktör sayısı
L (cm)	2	4	6	8	10	12	6
W/L Oranı	0.74	0.87	1	-	-	-	3
W/H Oranı	2.5	3	3.5	-	-	-	3
W/TW Oranı	1.5	2	3	-	-	-	3
TH/H Oranı	0.1	0.5	1	-	-	-	3
DH/H Oranı	0	0.5	1	-	-	-	3
v (m/s)	3.5	7.5	11.5	-	-	-	3

3.1.2 3B Baskı ve İmalat Süreci

Dentiküllerin karmaşık ve yüksek çözünürlüklü mikro-geometrilerini hassas bir şekilde üretebilmek amacıyla Şekil 3.2 baz alınarak Şekil 3.3'teki tasarımlar için eklemeli imalat yönteminden yararlanılmıştır. Fiziksel modeller, eriyik yığıma modelleme (FDM) teknolojisine sahip bir 3B yazıcı kullanılarak imal edilmiştir. Üretim sürecinde polilaktik asit (PLA) malzemesi ve Bambu Lab P1S 3B yazıcı kullanılmıştır. Bu spesifik imalat yöntemi; yüksek boyutsal hassasiyeti sağlamak ve üretimden kaynaklanabilecek istenmeyen yüzey hatalarının oluşturacağı sürüklemeyi en aza indiren pürüzsüz bir temel yüzey elde etmek amacıyla tercih edilmiştir. Üretim aşamasındaki kritik unsurlardan biri baskı yönelimidir; yazdırma sürecinin doğasında bulunan mikroskobik basamaklanma etkisinin birincil akış yönüyle etkileşime girmesini önlemek için tüm modeller üretim tablasına 0° açıyla yerleştirilmiştir.

**Şekil 3.2.** (a) Rijit bağlantılı sabit konfigürasyon, (b) Hareketli döner mafsallı konfigürasyonu



Şekil 3.3. Üç boyutlu (3B) baskı yöntemiyle imal edilen biyomimetik test geometrileri

3.1.3 Döner Mafsal Mekanizması

Bu araştırmanın, sisteme kinematik serbestlik dereceleri kazandırmanın akış kaynaklı titreşimi artırdığı yönündeki temel hipotezini test etmek üzere iki farklı montaj konfigürasyonu tasarlanmıştır: sabit bağlantılı ve dinamik olarak hareket edebilen bir mekanizma.

Sabit konfigürasyonda, 3B baskılı dentikül dizileri montaj tabanına rijit bir şekilde sabitlenmiş; böylece modelin hem yük hücresine hem de esnek kirişe göre sıfır serbestlik derecesine sahip olması sağlanmıştır. Hareketli konfigürasyon için ise, dentikül dizisi ile ana destek yapısı arasında bağlantı kuracak özel bir döner mafsal tasarlanmıştır (bkz. Şekil 3.2(b)).

Döner mafsal; 3B baskı ile üretilmiş rijit bir taban, yüksek hassasiyetli bir rulman ve hem rulmanı hem de köpek balığı derisi dentikülünü birleştirerek enine (transverse) eksen boyunca dönme hareketine izin veren bir bağlantı parçasından oluşmaktadır. Bu bağlantı, aerodinamik geometriyi rijit tabakadan bağımsızlaştırarak; dentiküllerin art izindeki bölgesel basınç farklarına uyum sağlamasına ve buna fiziksel olarak tepki vererek salınım yapmasına olanak tanımıştır. Hareketi kesin bir biçimde yalnızca bu dönme eksenine sınırlandıran mafsal; akışkan-katı etkileşiminden kaynaklanan momentum transferinin, destekleyici esnek kirişe aşağı yönlü olarak verimli bir şekilde aktarılmasını sağlamış ve böylece piezoelektrik dönüşüm için mevcut olan mekanik gerinimi en yüksek seviyeye çıkarmıştır.

3.2 Rüzgâr Tüneli Tesisi ve Akış Karakteristikleri

3.2.1 Tesis Spesifikasyonları ve Akış Kalitesi

Tüm deneysel incelemeler, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Isı-Akışkanlar Laboratuvarı'nda bulunan açık devreli rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneli, 500 mm genişlik, 500 mm yükseklik ve 1200 mm akış yönü uzunluğu boyutlarına sahip, yüksek düzeyde kontrol edilebilir bir test kesiti içermektedir.

Tünel, serbest akış hızının (U_∞) 0.2 m/s ile 12 m/s arasında hassas bir şekilde düzenlenmesine olanak tanıyan değişken frekanslı sürücü (VFD) kontrollü 4 kW (390 dev/dakika) eksenel bir fan ile tahrik edilmektedir. Gelen akışın düzenli olmasını sağlamak ve akustik, yapısal gürültüyü azaltmak amacıyla dinlendirme odası bir dizi ince gözenekli elek ile donatılmıştır. Test kesiti içerisindeki referans serbest akış türbülans yoğunluğunun (Tu) yaklaşık 5% seviyesinde ölçülmesi; sistemin, hassas sınır tabaka ve akışkan-yapı etkileşimi analizleri için elverişli, yüksek kaliteli ve üniform bir akış alanı sunduğunu doğrulamıştır.

3.2.2 Katı Cisim Blokaj Oranı Doğrulaması

Deneysel aerodinamikteki temel kısıtlamalardan biri katı cisim blokaj etkisidir. Kapalı bir test kesitine fiziksel bir model yerleştirildiğinde, hava akışı için kullanılabilecek kesit alanı daralır. Kütlenin korunumu ilkesi gereği bu daralma, modelin etrafındaki akışı yapay olarak ivmelendirmekte ve serbest akış koşullarına kıyasla olduğundan yüksek sürüklenme ve kaldırma ölçümlerine yol açmaktadır.

Bu çalışmada ölçülen aerodinamik kuvvetlerin yapay olarak yüksek çıkmadığından emin olmak için Katı Cisim Blokaj Oranı (BR), Denklem 4 ile hesaplanmıştır. Blokaj oranı, deneysel kurulumun akışa dik maksimum ön kesit alanının, rüzgâr tüneli test kesit alanına bölümü olarak tanımlanmaktadır:

$$BR = \frac{A_{model}}{A_{test}} \quad (D.4)$$

Burada A_{model} ; 3B baskılı dentikül dizisinin, sabit veya hareketli döner mafsallı ve akışa maruz kalan destek yapısının toplam ön alanını temsil ederken, A_{test} boş test kesitinin toplam kesit alanını ifade etmektedir.

Bu çalışmada test edilen fiziksel modellerin maksimum sınırlayıcı bölgesi için ön alan $A_{model} = 0.00454756 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Test kesiti boyutları dikkate alındığında tünel alanı $A_{test} = 0.25 \text{ m}^2$ 'dir. Bu değerlerin Denklem 5'te yerine konmasıyla şu sonuç elde edilir:

$$BR = \frac{0.00454756}{0.25} \times 100 = \%1.82 \quad (D.5)$$

Standart küt cisim aerodinamiğinde, %5'in altındaki bir blokaj oranı genellikle ihmal edilebilir kabul edilmektedir. Bu durum, deneysel kuvvet katsayılarının Maskell teorisi gibi karmaşık matematiksel blokaj düzeltmelerine ihtiyaç duyulmadan kullanılmasına olanak tanımaktadır (Maskell, 1963; Hackett ve Cooper, 2001). Bu deneysel kurulum için maksimum blokaj oranı %5 eşiğinin kesin olarak altında tutulduğundan, serbest akış hızı ve elde edilen aerodinamik kuvvetler yüksek doğruluğa sahip ve belirgin duvar etkisinden arınmış olarak değerlendirilmektedir.

3.3 Deneysel Konfigürasyonlar

Biyomimetik yapıları kapsamlı bir biçimde değerlendirmek amacıyla deneysel testler, aerodinamik kuvvet karakterizasyonu aşaması ile akış kaynaklı titreşim ve enerji hasadı aşaması olmak üzere iki ardışık faza ayrılmıştır. Her iki konfigürasyonda da uygulamalar; enerji hasadı potansiyelinin, sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin elde edilmesine odaklanmış, böylece yapısal tepkilerin bütünüyle aerodinamik ve kinematik bir perspektiften değerlendirilmesi sağlanmıştır.

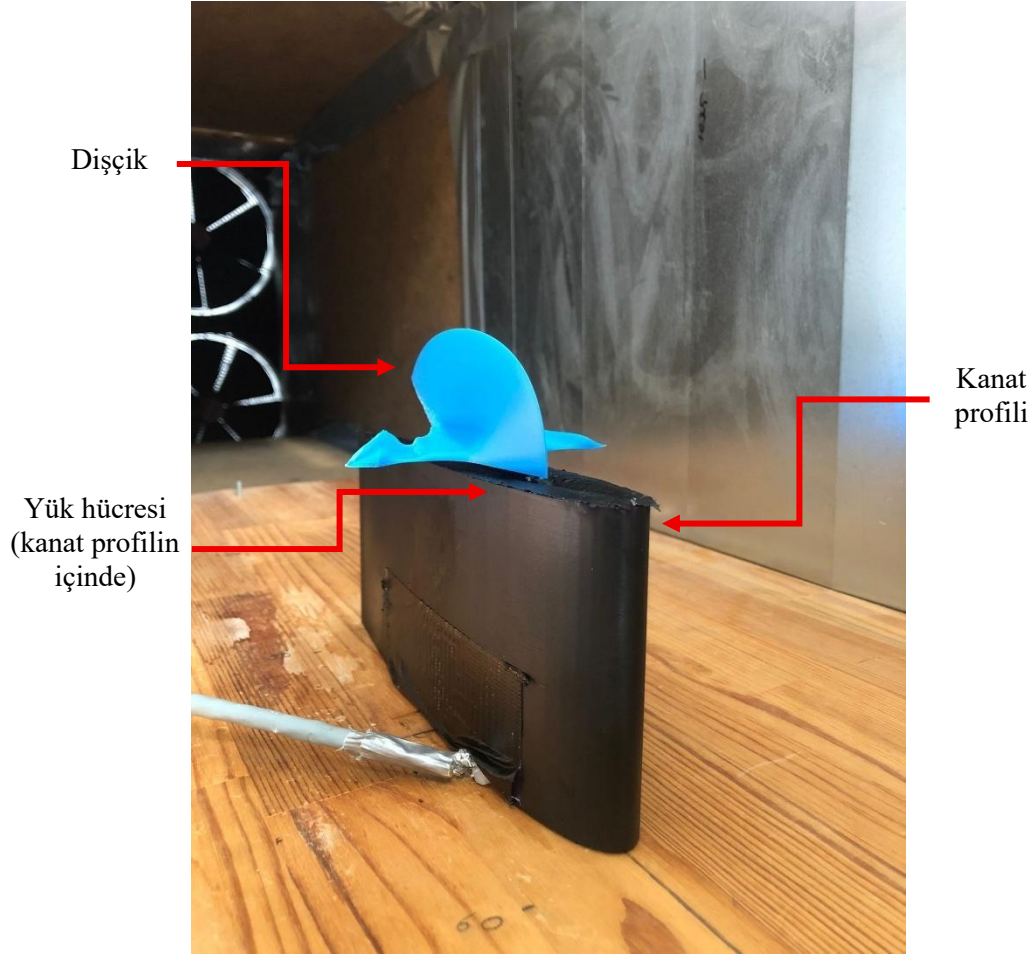
3.3.1 Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Konfigürasyonu

Biyomimetik geometrilere etki eden statik ve dinamik aerodinamik yükleri izole etmek ve hassas bir şekilde sayısallaştırmak amacıyla, bir tane 1 kg kapasiteli gerinim ölçer yük hücresi kullanan kuvvet ölçüm düzeneği geliştirilmiştir. Bu aşama hem sabit hem de hareketli döner mafsallı konfigürasyonları için gerçekleştirilmiştir.

Sensör tarafından kaydedilen ham kuvvetlerin yalnızca hedef köpek balığı derisi dentikül geometrilerine doğrudan etki eden basınç dağılımından kaynaklandığını garanti altına almak amacıyla, özel bir aerodinamik kalkan tasarlanmıştır. 1 kg'lık yük hücresi, rüzgâr tüneli test kesitine yerleştirilen 3B baskılı, rijit bir aerodinamik kanat profilinin içine tamamen hapsedilmiştir. Bu çevreleyici kanat profili kalkani, içindeki yük hücresi donanımıyla hiçbir şekilde mekanik temas kurmayacak ve fiziksel bir boşluk bırakacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yerleşim, hassas iç sensörü yüksek hızlı serbest hava akışına doğrudan maruz kalmaktan tamamen yalıtılmış, böylelikle sensör gövdesi üzerinde oluşabilecek parazit aerodinamik

kuvvetleri engellemiş ve içteki yük hücresinin doğrudan monte edilen modelden iletilen saf kuvvetleri kaydetmesine olanak tanımıştır (Şekil 3.4).

Sistemde tek bir yük hücresi kullanıldığı için kuvvet verilerinin toplanması ardışık olarak gerçekleştirilmiştir. Düzenek, akış yönündeki sürüklenme kuvvetlerini sistematik olarak kaydetmek üzere ilk olarak serbest akış hız vektörüne paralel biçimde hizalanmış ve sabitlenmiştir. Sürüklenme test matrisinin tamamlanmasının ardından donanım yeniden konfigüre edilmiş ve aynı akış koşulları altında enine kaldırma kuvvetlerini kaydetmek için gelen akışa göre 90 derece döndürülmüştür.

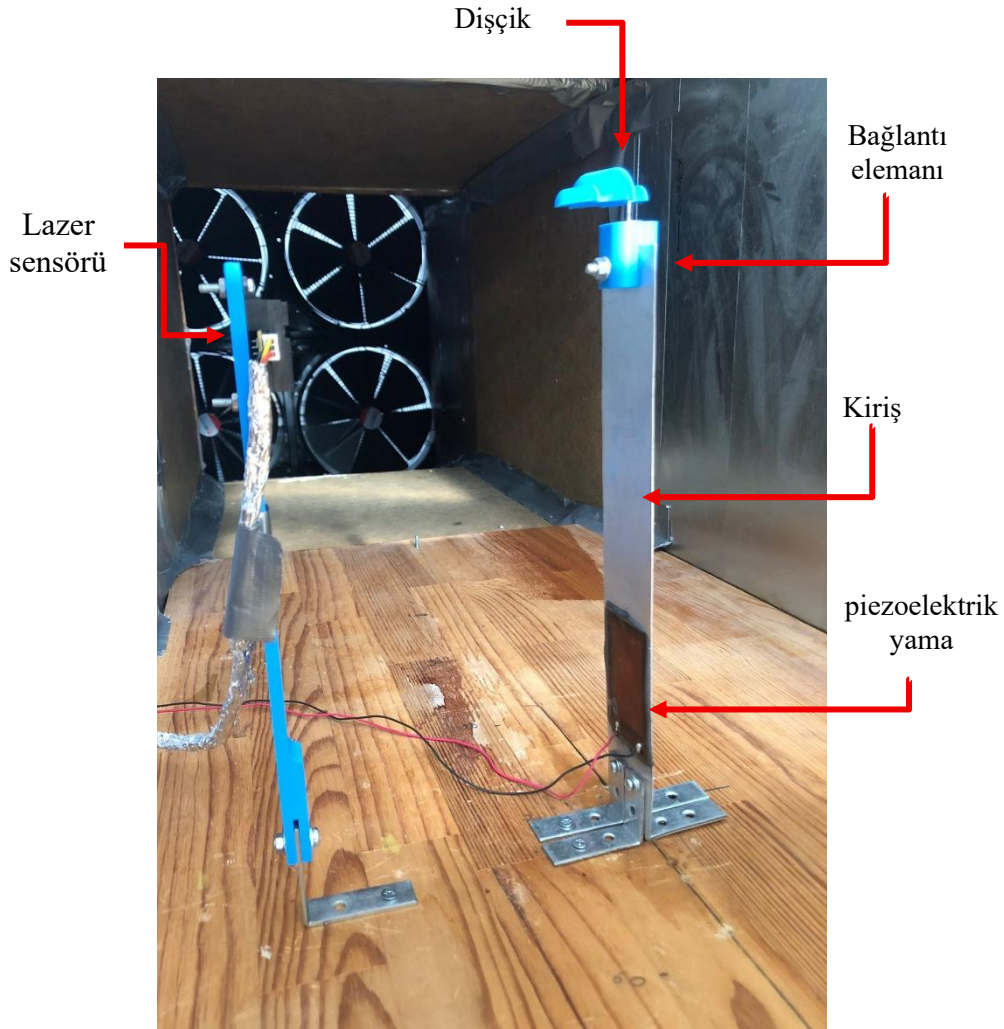


Şekil 3.4 Aerodinamik kuvvet ölçümleri için deneysel kurulum

3.3.2 Enerji Hasadı ve Kinematik Konfigürasyonu

Sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin kapsamlı karakterizasyonunun ardından, yük hücresi ve koruyucu kanat profili kalkarı rüzgâr tüneli test kesitinden tamamen çıkarılarak dinamik test aşamasına geçilmiştir.

Bu konfigürasyonda, biyomimetik modeller (hem sabit mafsallı yapısı hem de hareketli döner mafsallı yapısı), yüksek düzeyde esnekliğe sahip bir ankastre kirişin serbest ucuna doğrudan monte edilmiştir. Kirişin sabit ucu, rüzgâr tünelinin taban yapısına rijit bir şekilde sabitlenmiştir. Mekanik salınımları doğrudan piezoelektrik etki aracılığıyla alternatif elektrik gerilimine dönüştürmek amacıyla, bölgesel gerininin maksimum olduğu kiriş alt bölümüne bir piezoelektrik yama sıkıca yapıştırılmıştır. Kullanılan piezoelektrik yamanın modeli (P-876.A12 - (PZT)) olup Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5 Elektromekanik enerji hasadı deneysel kurulumu

Söz konusu enerji hasadı süreci, malzemenin elektriksel ve mekanik davranışlarını birbirine bağlayan piezoelektrik bünye denklemleri ile yönetilmektedir. Uzamsal elektriksel yer değiştirme, ε dielektrik geçirgenlik olmak üzere $D = \varepsilon E$ olarak ifade edilir. Bu ilişkiler malzemenin tüm yönleri için birleştirildiğinde temel denklemler şu şekilde elde edilir:

$$S = s^E T + d^t E \quad (D.6)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (D.7)$$

Burada S mekanik gerinim vektörü, T mekanik gerilme vektörü, E elektrik alan vektörü ve D elektriksel yer değiştirme vektörüdür. Sistemden elde edilen elektrik enerjisi, kullanılan piezoelektrik malzemenin spesifik özelliklerine ve akıştan doğacak mekanik gerilmenin büyüklüğüne doğrudan bağlıdır. Tasarlanan bu aeroelastik yapı için, mekanik yer değiştirme ve gerilim üretimi ile ilgili genel elektromekanik eşlenik hareket denklemleri şu şekilde tanımlanmıştır:

$$(m_b + m_a)\ddot{x} + c\dot{x} + kx - \theta V = F_x \quad (D.8)$$

$$C_{pz}\dot{V} + \frac{V}{R} + \theta\dot{x} = 0 \quad (D.9)$$

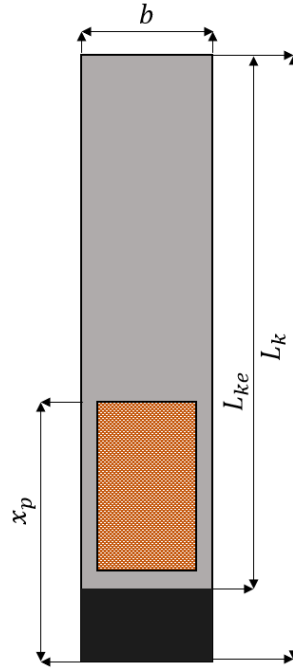
Bu denklemlerde x , $\dot{x}$ ve $\ddot{x}$ sırasıyla sistemin yer değiştirmesini, hızını ve ivmesini ifade etmektedir. Ayrıca m_b yapısal kütle, m_a aerodinamik ek kütle, c mekanik sönümlenme katsayısını, k yapısal direngenliği, θ elektromekanik eşleşme katsayısını, C_{pz} piezoelektrik katmanın iç kapasitansını, R dış yük direncini, V üretilen gerilimi ve F_x sisteme etki eden dış aerodinamik kuvveti temsil etmektedir.

Sistemin fiziksel kinematikini eşzamanlı olarak kaydetmek için, yüksek hassasiyetli bir lazer deplasman sensörü rüzgâr tüneli test kesitinin içine doğrudan monte edilmiştir. Lazer sensörünün test alanının içine yerleştirilmesi; lazer ışınının dışarıdaki şeffaf akrilik gözlem pencerelerinden yansıtılması durumunda ortaya çıkabilecek olası optik bozulma, kırılma veya sinyal zayıflaması etkilerini ortadan kaldırmıştır. İç bölgedeki bu lazer, esnek ankastre girişin ucundaki belirli bir noktayı hedefleyecek şekilde hizalanmış; böylelikle biyomimetik yapılar art izi ile etkileşime girdikçe kare ortalama karekök (RMS) titreşim genliğinin kesintisiz, yüksek güvenilirliğe sahip ve temassız bir şekilde izlenmesi sağlanmıştır.

Deneyisel çalışmada rüzgâr enerjisini mekanik titreşime dönüştürmek amacıyla kullanılan esnek ankastre kirişin yapısal ve geometrik özellikleri Tablo 3.2’de ve Şekil 3.6’da detaylandırılmıştır. Kirişin boyutları, sistemin doğal frekansını ve aeroelastik yunuslama (galloping) eşiğini optimize edecek şekilde belirlenmiştir.

Tablo 3.2. Ankastre kirişin geometrik özellikler

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Kiriş malzemesi	-	Alüminyum	-
Toplam uzunluk	L_k	255	mm
Serbest uzunluk	L_{ke}	210	mm
Kiriş genişliği	b	42	mm
Kiriş kalınlığı	t	0.5	mm
Piezoelektrik yama konumu	x_p	40	mm



Şekil 3.6. Kirişin boyutları

3.4 Özel Veri Toplama (DAQ) Mimarisi

Aerodinamik kuvvetlerdeki küçük dalgalanmaları ve anlık piezoelektrik gerilim sıçramalarını hassas bir biçimde kaydedebilmek amacıyla yüksek hassasiyetli özel bir Veri Toplama (DAQ) mimarisi tasarlanmıştır. Ticari olarak temin edilebilen standart veri kaydediciler, genellikle rüzgâr tüneli ortamlarının gerektirdiği yeterli çözünürlükten veya gürültü engelleme kapasitesinden yoksundur. Bu nedenle, optimum sinyal bütünlüğünü sağlamak üzere özel bir sinyal koşullandırma ve işleme hattı geliştirilmiş ve özel tasarlanmış bir Baskılı Devre Kartı (PCB) üzerine monte edilmiştir.

3.4.1 Güç Regülasyonu ve Sinyal Koşullandırma

Ölçüm süreci 1 kg kapasiteli gerinim ölçer yük hücresi ile başlamaktadır. Dahili Wheatstone köprüsü mikrovolt (mV/V) mertebesinde düşük bir diferansiyel gerilim ürettiğinden, yüksek güç kararlılığı ve hassas kuvvetlendirme gerekmektedir.

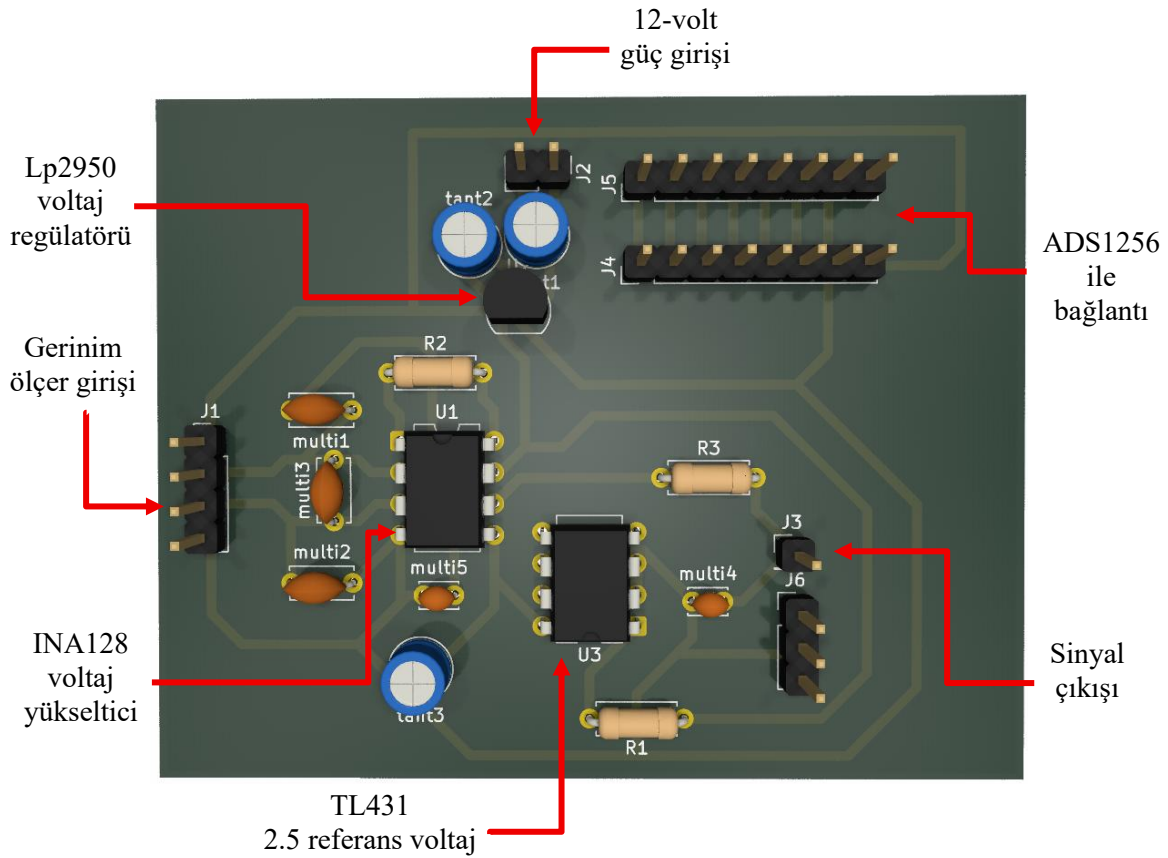
Sistem standart bir 12V adaptör ile beslenmiştir; ancak anahtarlamalı güç kaynakları doğaları gereği yüksek frekanslı dalgalanma gerilimi oluşturmaktadır. Analog sensörlerin ölçüm hassasiyetini korumak için gürültüsüz bir güç kaynağına ihtiyaç duyulması sebebiyle, LP2950 mikro güç, düşük düşümlü (LDO) doğrusal regülatör kullanılmıştır. LP2950, 12V beslemeyi kararlı ve düşük gürültülü 5V DC gerilime düşürerek güç kaynağındaki dalgalanmaların hassas analog ölçümleri bozmasını engellemiştir.

Analog-dijital dönüşümün doğruluğu, referans geriliminin hassasiyetine bağlıdır. Rüzgâr tüneli laboratuvarındaki ortam sıcaklığı değişimlerinden veya uzun süreli çalışmadan kaynaklanabilecek ölçüm kaymasını (drift) önlemek amacıyla devreye bir TL431 hassas şönt regülatörü entegre edilmiştir. TL431, sinyal koşullandırma entegreleri için sıcaklık dengelemeli, yüksek kararlılığa sahip bir referans gerilimi sağlayarak sıfır yük referans değerinin test matrisi boyunca sabit kalmasını güvence altına almıştır. Bu güç altyapısıyla beslenen INA128 hassas enstrümantasyon amplifikatörü, düşük genlikli yük hücresi sinyallerini kuvvetlendirmek amacıyla kullanılmıştır. INA128, özellikle Ortak Mod Engelleme Oranı (CMRR) ve çok düşük ofset gerilimi değerleri nedeniyle tercih edilmiş; böylece ortamdaki elektriksel gürültü aktif olarak engellenirken, küçük aerodinamik kuvvetlerin ölçülebilir bir makroskobik gerilim aralığına ölçeklendirilmesi sağlanmıştır.

3.4.2 Özel Baskılı Devre Kartı (PCB)

Elektromanyetik girişim (EMI) için doğası gereği anten işlevi gören ve parazitik kapasitanslardan olumsuz etkilenen deney kartı veya kablolarına dayanmak yerine, özel bir Baskılı Devre Kartı (PCB) kiCad programı yardımıyla tasarlanmış ve üretilmiştir (bkz. Şekil 3.7). Geliştirilen PCB, yüksek hassasiyetli analog ölçüm ortamlarında sinyal bütünlüğünü korumak için gerekli olan özel bakır yollar, kontrollü empedans ve sağlam fiziksel bağlantılar sunmuştur.

Veri toplama sisteminin gürültü seviyesi düşürmek ve hassas analog ölçüm değerlerini korumak amacıyla, devre mimarisine direnç (R_1, R_2, R_3), tantalyum kapasitör ($tant_1, tant_2, tant_3$) ve seramik kapasitörlerden ($multi_1 - multi_5$) oluşan çok katmanlı bir filtreleme ve ayrıştırma ağı entegre edilmiştir. Güç hatlarında yer alan tantalyum kapasitörler, yüksek hacimsel sığa (kapasitans) verimlilikleri ve kararlı frekans tepkileri nedeniyle seçilmiştir. Bu bileşenler, güç kaynağı kökenli düşük ve orta frekanslı gerilim dalgalanmalarını sönmölemek, ani akım gereksinimlerinde geçici enerji depolayarak sistem için bir toplu sığa havuzu görevi görmektedir. Böylece analog devre elemanlarının besleme gerilimindeki kararsızlıklar engellenmektedir.



Şekil 3.7. Özel veri toplama sistemi (DAQ) için tasarlanan ve imal edilen baskılı devre kartı (PCB)

Yüksek frekanslı gürültülerin sönümlenmesinde ise ultra düşük eşdeğer seri direnç ve eşdeğer seri endüktans değerlerine sahip seramik kapasitörler ($multi_1 - multi_5$) kullanılmıştır. Sinyal yükseltici ve analog-dijital dönüştürücü (ADC) gibi mikrovolt mertebesinde çalışan entegre devrelerin besleme pinlerine fiziksel olarak en yakın noktaya yerleştirilen bu kapasitörler, rüzgâr tüneli ortamındaki değişken frekanslı sürücülerden (VFD) açığa çıkan yüksek frekanslı elektromanyetik etkileri (EMI) ve anlık gerilim sıçramalarını giriş sinyallerini bozmadan doğrudan toprağa aktarmaktadır.

Devre mimarisinde yer alan (R_1, R_2, R_3) dirençleri, sinyal işleme ve güç düzenleme hattında birbirinden farklı üç temel işlevi yerine getirecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu dirençlerden biri, devredeki kapasitör bileşenleriyle koordineli çalışarak pasif bir RC alçak geçiren filtre oluşturmaktadır. Bu filtre, sayısallaştırma aşamasından önce sinyal örtüşmesini önlemekte ve çevresel kaynaklı yüksek frekanslı gürültüleri elimine etmektedir. İkinci direnç, dış kazanç direnci (R_G) olarak işlev görmekte ve yük hücresinden gelen düşük genlikli sinyallerin uygun makroskobik ölçüm aralığına ölçeklendirilmesini sağlamaktadır. Üçüncü direnç ise TL431 hassas regülatöre entegre edilerek, sistemin analog ölçümleri için kritik önem taşıyan kararlı referans geriliminin oluşturulmasında ve gerekli çalışma akımının sağlanmasında kullanılmıştır. Dirençlerin bu amaca yönelik spesifik konfigürasyonu, veri toplama sisteminin yüksek çözünürlüklü ve tekrarlanabilir veri kaydetmesi için gereken elektriksel altyapıyı sağlamaktadır.

3.4.3 Yüksek Çözünürlüklü Analog-Dijital Dönüşüm

Standart mikrodnetleyiciler genellikle 10 bit veya 12 bit Analog-Dijital Dönüştürücülere (ADC) sahip olup, bu donanımlar düşük gram-kuvvet seviyelerindeki dalgalanmaları kaydetmek için gereken çözünürlüğü sağlayamamaktadır. Yüksek veri doğruluğu elde etmek amacıyla, kuvvetlendirilen analog sinyal yüksek hassasiyetli 24 bit ADS1256 ADC'ye yönlendirilmiştir. Bu bileşen, aerodinamik sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerini yüksek bir hassasiyet düzeyiyle sayısallaştırarak köpek balığı derisi dentiküllerine etki eden mikroskobik türbülans kuvvetlerini kaydetmiştir. Merkezi dijital işlem birimi olarak görev yapan bir Arduino mikrodnetleyici; SPI (Seri Çevresel Arabirim) protokolü üzerinden ADS1256 ile doğrudan iletişim kurarak yüksek çözünürlüklü kuvvet verilerini belirlenen bir örnekleme hızıyla almış, veri paketlerini gerçek zamanlı izleme için ana bilgisayara aktarmıştır.

3.4.4 Gürültü Azaltma Stratejileri

Rüzgâr tüneli tesisleri, ağırlıklı olarak fan motorlarını kontrol eden büyük Değişken Frekanslı Sürücülerden (VFD) kaynaklanan şiddetli elektromanyetik girişime (EMI) doğası gereği açıktır. Saf aerodinamik veriler elde etmeyi güvence altına almak amacıyla, özel PCB tasarımına çok katmanlı bir gürültü azaltma stratejisi fiziksel olarak dâhil edilmiştir:

- Ekranlı Kablolama: Düşük gerilimli analog hatları dış EMI etkilerinden fiziksel olarak korumak için tüm sensör bağlantılarında kullanılmıştır.
- Ayrıştırma Kondansatörleri: Güç hatlarındaki yüksek frekanslı geçici sıçramaları (transient spikes) anlık olarak sönmek üzere INA128, ADS1256 ve Arduino'nun güç pinlerinin fiziksel olarak yakınına stratejik biçimde yerleştirilmiştir.
- Ortak Topraklama Topolojisi: Toprak döngülerinin yük hücresi okumalarında hatalı gerilimler indüklemesini önlemek amacıyla PCB üzerinde tek noktalı topraklama yerleşimi kullanılmıştır.
- Donanımsal Alçak Geçiren Filtreler: Yüksek frekanslı mekanik motor titreşimlerini ve elektriksel gürültüyü filtrelemek; böylece sayısallaştırma öncesinde sinyal örtüşmesini engellemek amacıyla ADC girişlerinden önce devreye pasif RC filtreler entegre edilmiştir.

3.5.5 Piezoelektrik Gerilim ve Kinematik İzleme

Deneyin enerji hasadı aşamasında fiziksel akışkan-yapı etkileşimi; kirişin deplasman verilerini kesintisiz olarak dijital bir osiloskoba aktaran, tünel içine yerleştirilmiş lazer sensörü yardımıyla izlenmiştir.

Eşzamanlı olarak, akış kaynaklı titreşim piezoelektrik yama üzerinde değişken bir yapısal gerinim oluşturmuştur. Bu fiziksel gerinim doğrudan piezoelektrik etkiyi tetikleyerek yüksek genlikli, geçici alternatif akım (AC) sinyalleri üretmiştir. Elektriksel sönmeme oluşturmada enerji hasadı mekanizmasının mutlak maksimum potansiyelini elde edebilmek için sistem açık devre gerilimini ölçecek şekilde ayarlanmıştır. Bu kararsız gerilim sıçramalarını hassas 5V mantık devresine yönlendirmek yerine; piezoelektrik yamadan elde edilen ham elektriksel çıktı doğrudan bağımsız bir dijital kayıt osiloskobuna bağlanmıştır. Osiloskop, değişken gerilim dalga formunun yüksek hızlı ve hassas bir şekilde görselleştirilmesini sağlamış; aerodinamik flutter tarafından üretilen tepeden tepeye ve kare ortalama karekök (RMS) gerilim değerlerinin elde edilmesine olanak tanımıştır.

3.5 Deneysel Prosedür ve Taguchi Matrisi Uygulaması

Biyomimetik enerji hasat sisteminin performansını sistematik olarak değerlendirmek ve deneysel hataları en aza indirmek amacıyla yüksek düzeyde yapılandırılmış bir test protokolü oluşturulmuştur. Deneysel iş akışı üç ardışık faza ayrılmıştır: sensör kalibrasyonu, ardışık aerodinamik kuvvet karakterizasyonu ve dinamik akışkan-yapı etkileşimi izleme. Tüm test matrisi; altı geometrik parametrenin ve serbest akış hızı seviyelerinin optimize edilmiş bir deney sayısı ile titiz bir istatistiksel değerlendirmesine olanak tanıyan Taguchi L18 ortogonal dizisine dayandırılmıştır. Tüm deneysel prosedür Tablo 3.3'te sunulmaktadır.

Tablo 3.3. Deneysel parametrelerin optimizasyonunda kullanılan Taguchi L18 ortogonal dizisi

Test no:	L	W/L	W/H	W/TW	TH/H	DH/TH	v
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3	3
4	2	1	1	2	2	3	3
5	2	2	2	3	3	1	1
6	2	3	3	1	1	2	2
7	3	1	2	1	3	2	3
8	3	2	3	2	1	3	1
9	3	3	1	3	2	1	2
10	4	1	3	3	2	2	1
11	4	2	1	1	3	3	2
12	4	3	2	2	1	1	3
13	5	1	2	3	1	3	2
14	5	2	3	1	2	1	3
15	5	3	1	2	3	2	1
16	6	1	3	2	3	1	2
17	6	2	1	3	1	2	3
18	6	3	2	1	2	3	1

3.5.1 Test Öncesi Sensör Kalibrasyonu ve Çevresel Standardizasyon

Rüzgâr tüneli testleri gerçekleştirilmeden önce, veri tekrarlanabilirliğini sağlamak ve enstrümantasyon kaymasını ortadan kaldırmak amacıyla standartlaştırılmış bir kalibrasyon prosedürü uygulanmıştır:

- **Yük Hücresi Kalibrasyonu:** Dahili 1 kg kapasiteli gerinim ölçer yük hücresi, hassas referans ağırlıklar kullanılarak kalibre edilmiştir. Doğrusal bir gerilim-kuvvet regresyon eğrisi oluşturmak amacıyla montaj aparatına 1 g ile 200 g arasında değişen bilinen kütleler asılmıştır. Kalibrasyon matrisi, R^2 (orijinal metindeki boşluğun determinasyon katsayısını ifade ettiği öngörülmektedir) değerinin 0.999'dan büyük olmasını garanti altına almak üzere her test gününün başlangıcında yeniden doğrulanmıştır.
- **Sıfır Yük Referans Doğrulaması:** Rüzgâr tüneli fanı çalıştırılmadan önce özel DAQ sistemi aktif hâle getirilerek 30 saniyelik bir sıfır yük referans verisi kaydedilmiştir. Aerodinamik kuvvetleri artık statik kütleden veya yapısal ön gerilimden izole etmek amacıyla, söz konusu referans değeri sonraki tüm veri noktalarından dijital olarak çıkarılmıştır.
- **Lazer Sensör Hizalaması:** Dinamik test aşaması için, tünel içine yerleştirilen lazer deplasman sensörü, manuel bir doğrusal hareket tablası yardımıyla ankastre giriş ucuna mikro adımlı yer değiştirmeler uygulanarak kalibre edilmiştir. Beklenen maksimum titreşim zarfı boyunca lazer noktasının hedef üzerinde tam merkezde kalmasını sağlamak üzere optik hizalama kontrol edilmiştir.

3.5.2 Kuvvet ölçüm sistemi

Birinci deneysel aşama, kesin olarak 3B baskılı dışçık geometrilerine etki eden saf aerodinamik yüklerin sayısallaştırılmasına odaklanmıştır. Adım adım uygulama aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir:

1. Taguchi matrisi tarafından belirlenen hedef köpek balığı derisi model konfigürasyonu, iç yük hücresi donanımına güvenli bir şekilde monte edilmiştir.
2. Rijit ve temassız 3B baskılı kanat profili, iç bileşenlerin etrafında tekdüze bir mekanik boşluk bırakılacak şekilde yük hücresinin üzerine indirilmiştir.
3. Yük hücresi aparatı, sürüklemeyi (drag) ölçmek amacıyla akış yönüne (streamwise) paralel olarak hizalanmıştır.

4. Rüzgâr tüneli test kesiti tamamen kapatılarak sızdırmazlığı sağlanmış ve eksenel fan, değişken frekanslı sürücü (VFD) aracılığıyla hedef serbest akış hızına (U_{∞}) getirilmiştir.
5. Başlangıçtaki geçici girdapların sönümlenmesi amacıyla akışın 60 saniye boyunca kararlı hâle gelmesi (stabilize olması) beklenmiştir.
6. Özel tasarım 24 bit DAQ sistemi, kuvvetlendirilmiş yük hücresi gerilimini 30 saniye boyunca kesintisiz olarak 500 Hz örnekleme hızıyla kaydetmiştir.
7. Sürükleme ölçümünün ardından rüzgâr tüneli fanı tamamen durdurulmuştur. Tüm yük hücresi çekirdek donanımı serbest akışa göre tam 90 derece döndürülmüş ve aynı koşullar altında enine kaldırma kuvvetlerini kaydetmek üzere 4., 5. ve 6. adımlar tekrarlanmıştır.

3.5.3 Enerji hasadı sistemi

Kuvvet karakterizasyonunun hemen ardından yük hücresi ve kanat profili kalkını sökülmesi; akışkan-yapı etkileşimini kaydetmek üzere Şekil 3.5'te görüldüğü gibi esnek ankastre giriş düzeneği kurulmuştur.

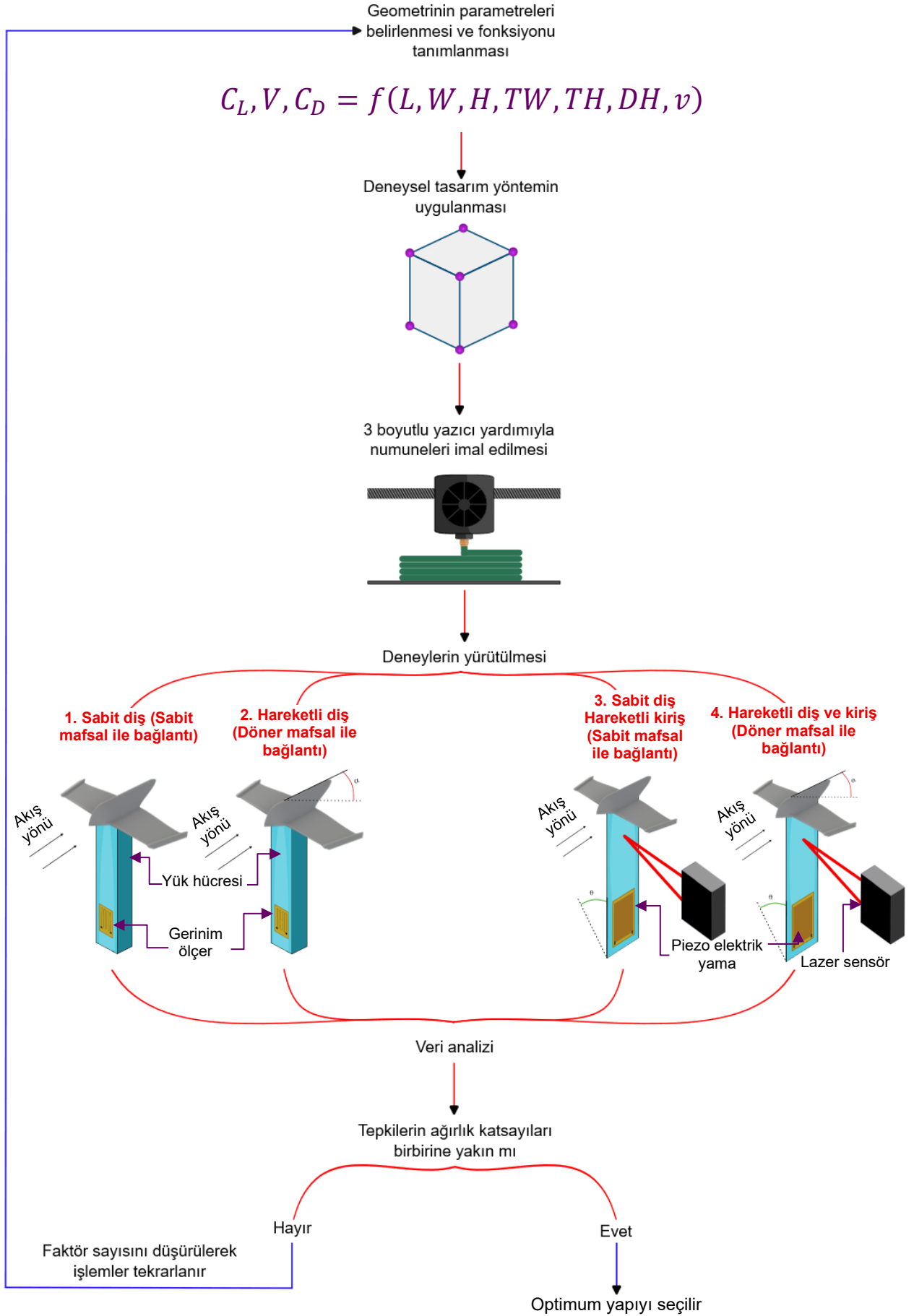
1. Seçilen köpek balığı derisi dişçik, esnek ankastre girişin serbest ucuna bağlanmış; rijit olarak sabitlenmiş bir mafsallık şeklinde veya düşük sürtünmeli döner mafsallık mekanizması aracılığıyla monte edilerek rüzgâr tüneli içine yerleştirilmiştir.
2. Rüzgâr tüneli kapatılmış ve serbest akış hızını operasyonel test aralığı boyunca kademeli olarak artırmak için VFD kullanılmıştır.
3. Hedef rüzgâr hızı kararlı hâle geldiğinde, tünel içi lazer deplasman sensörü giriş sapmasının gerçek zamanlı verisini kaydetmiş; kare ortalama karekök (RMS) titreşim genliğini hesaplamak üzere ham kinematik veriyi doğrudan dijital osiloskoba ve ardından ana bilgisayara aktarmıştır.
4. Eşzamanlı olarak, salınım yapan giriş alt bölümünde oluşan doğrudan piezoelektrik etki izlenmiştir. PZT yamasından elde edilen ham, değişken açık devre gerilim dalga formu doğrudan dijital kayıt osiloskobuna yönlendirilmiştir.
5. Osiloskop, yüksek frekanslı gerilim sıçramalarını yakalamış; (FFT) analizi aracılığıyla tepeden tepeye gerilim (V_{p-p}), RMS gerilimi (V_{RMS}) ve baskın dalgalanma frekansını (f) kaydetmiştir.
6. Detaylı veri analizini kolaylaştırmak amacıyla, dijital osiloskop tarafından alınan sinyaller kaydedilerek ana bilgisayara aktarılmıştır.

3.5.4 Taguchi L18 Matrisinin Uygulanması ve İstatistiksel Analiz

Hem sabit hem de özel döner mafsallı enerji hasadı mekanizmasının karakterizasyonu, üç ayrı operasyonel seviyede değerlendirilen yedi farklı parametreyi (köpek balığı derisi dentiküllerine ait altı geometrik varyasyon ve gelen rüzgâr hızı) içerdiğinden; standart bir tam faktöriyel test yaklaşımı $(6^1)(3^6) = 4374$ adet bağımsız rüzgâr tüneli testinin gerçekleştirilmesini gerektirecektir. Bu test hacmi lojistik açıdan uygulanabilir olmamakla birlikte, uzun süreli testler sırasında esnek bileşenler üzerinde yapısal yorulma riskini de belirgin şekilde artırmaktadır.

İstatistiksel verimliliği maksimize etmek amacıyla Taguchi L18 ortogonal dizisi uygulanmıştır. Laboratuvar içerisindeki ortam sıcaklığı veya barometrik basınç değişimleri gibi zamana bağlı çevresel sapmaları ortadan kaldırmak için, matris tarafından belirlenen 18 özel deney kombinasyonu rastgele bir sırayla gerçekleştirilmiştir. Yapılan 18 testin her biri için; ortalama sürüklenme kuvveti, ortalama kaldırma kuvveti, RMS titreşim yer değiştirmesi (genliği) ve RMS açık devre gerilimi değerleri ana bir analitik matriste derlenmiştir. Elde edilen bu çıktılar daha sonra Varyans Analizi (ANOVA) yürütmek ve Sinyal-Gürültü (S/N) oranlarını hesaplamak amacıyla JMP yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Kurulan bu matematiksel çerçeve, her bir bağımsız geometrik parametrenin sistem üzerindeki yüzde katkısını etkili bir biçimde izole etmiş ve biyomimetik enerji hasadı için optimum konfigürasyonu tanımlamıştır.

Tüm deneysel çalışma prosedürünü Şekil 3.8’de açıklanmaktadır.



Şekil 3.8. Deneysel çalışma prosedürünü ve ölçüm aşamalarını gösteren akış şeması

4. AERODİNAMİK KUVVET BULGULARI (BULGULAR VE TARTIŞMA)

Sistemin elektromekanik enerji hasadı potansiyelini değerlendirmeden önce, mekanik hareketi tetikleyen temel akışkan-yapı etkileşimlerinin izole edilmesi ve sayısallaştırılması büyük önem arz etmektedir. Bu bölüm, biyomimetik köpek balığı derisi dışık dizilerinin aerodinamik kuvvet karakterizasyonunu sunmaktadır. Yük hücresi düzeneğiyle, Taguchi L18 deney matrisindeki parametreler doğrultusunda meydana gelen sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri sistematik olarak değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, geleneksel sabit dizilimler ile özgün hareketli döner mafsallı konfigürasyonu arasında doğrudan karşılaştırmalı bir analiz yürütülmüştür. (FFT) ve Strouhal sayısı hesaplamalarını içeren frekans uzayı analizlerinden yararlanılarak, ortaya çıkan art izi dinamikleri karakterize edilmiştir. Son olarak, pasif akış manipülasyonu bağlamında optimum geometrik parametreleri belirlemek amacıyla aerodinamik verilere Taguchi yöntemi uygulanmıştır.

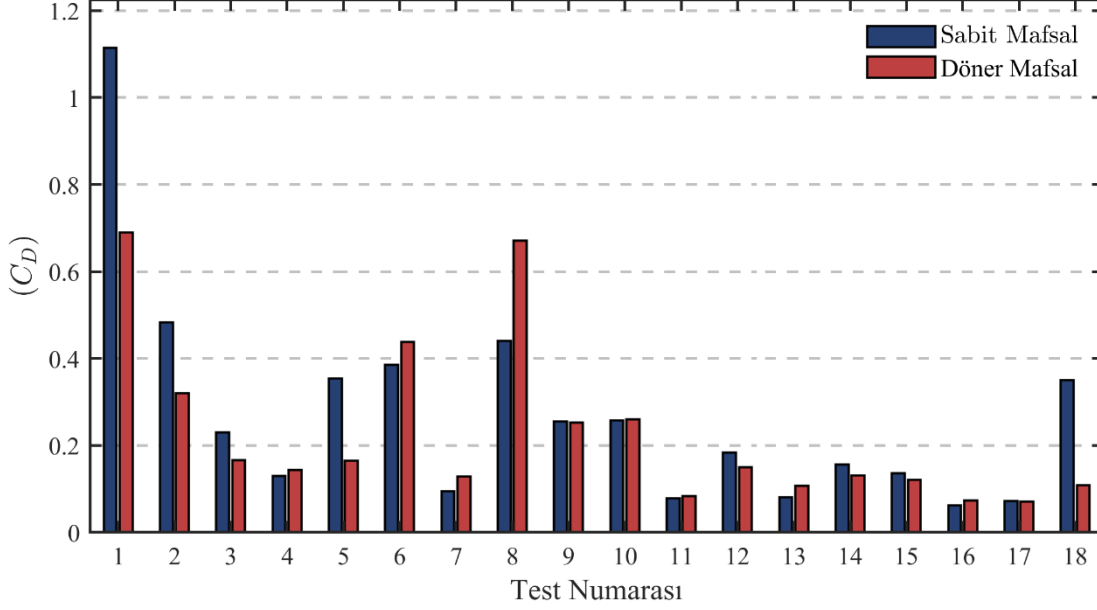
4.1 Aerodinamik Yük Analizi

Bu bölüm, dahili 1 kg kapasiteli yük hücresi düzeneği tarafından ardışık olarak kaydedilen ham aerodinamik kuvvetlerin kapsamlı bir karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Yük hücresini tutan mekanizmaya ek rüzgar yükü uygulanmaması için, mekanizma etrafına kanat profili kalkını oluşturulmuştur. Bu sayede okunan kuvvet verilerinin sadece dışık yapısından sağlandığı garanti altına alınmıştır. Taguchi ortogonal dizisinin belirlediği 18 deney koşulunda deneyler gerçekleştirilerek, kuvvet verileri hassas bir şekilde sayısallaştırılmıştır. Analizin temel amacı, sabit kontrol geometrilerindeki geleneksel statik sınır tabaka manipülasyonu ile hareketli döner mafsallı mekanizmasının sağladığı dinamik akışkan-yapı tepkilerini karşılaştırmaktır.

4.1.1 Sürüklenme Kuvvetlerinin Karakterizasyonu

Biyomimetik yapıların temel akışkan direnci ile pasif aerodinamik verimliliğini değerlendirmek amacıyla, akış yönündeki ortalama sürüklenme kuvvetleri ve bunlara karşılık gelen boyutsuz sürüklenme katsayıları (C_D), hız spektrumu boyunca sistematik biçimde incelenmiştir.

Sabit ve Döner Mafsalı Bağlantıların Ortalama Sürüklenme Katsayılarının Karşılaştırılması



Şekil 4.1. Sabit ve hareketli konfigürasyonların ortalama sürüklenme katsayılarının karşılaştırması

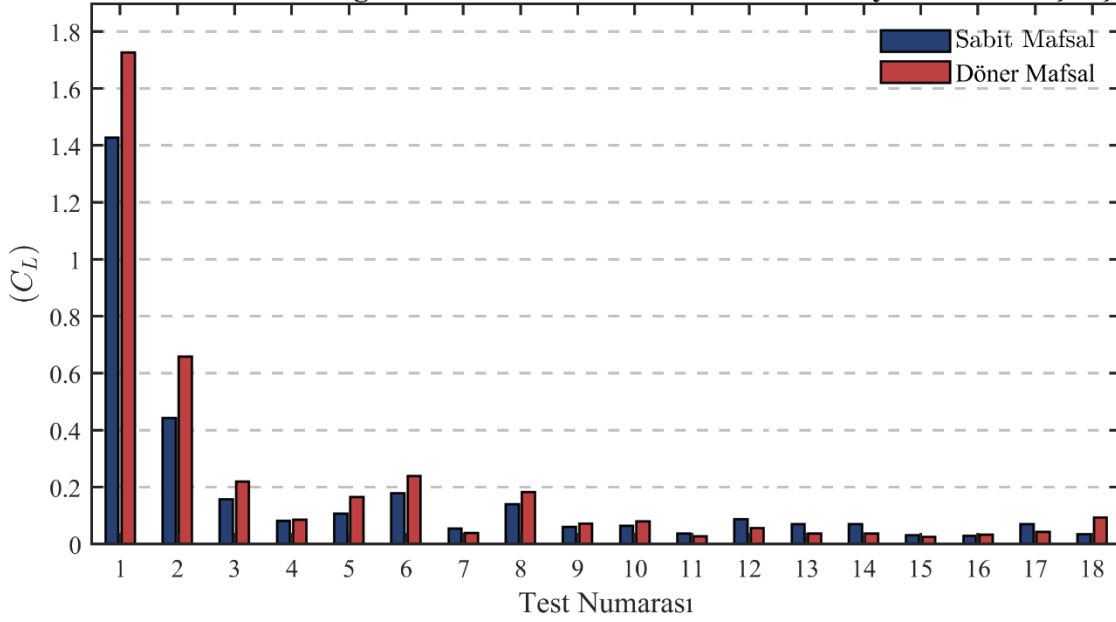
DeneySEL veriler, kinematik serbestlik derecelerinin eklenmesiyle elde edilen belirgin ve tutarlı bir aerodinamik avantajı ortaya koymaktadır. Test matrisinin tamamında, hareketli döner mafsal konfigürasyonu, rijit şekilde sabitlenmiş referans modele kıyasla ortalama sürüklenme katsayısını (C_D) önemli ölçüde düşürmüştür. Bu eğilim özellikle düşük akış hızlarında daha belirgindir. Örneğin, Test 1'de 3.5 m/s hız koşullarında ortalama C_D sabit konfigürasyon için 1.11, sisteme döner mafsalın eklenmesi haline ise 0.69 olarak ölçülmüştür. Söz konusu sürüklenme azaltımı olgusu, daha geniş toplam yüzey alanına ve daha yüksek açıklık oranlarına sahip geometrilerde daha da belirgin hâle gelmektedir. Matristeki en geniş orta ve yan alanlara sahip olan Test 18'de, modelin eklenmesine izin verildiğinde 0.35 olan sabit ortalama C_D değeri keskin bir düşüşle 0.10'a inmiştir.

Akışkanlar mekaniği perspektifinden değerlendirildiğinde bu kayda değer azalma, döner mafsalın son derece etkili, pasif bir yunuslama takip mekanizması olarak işlev gördüğünü göstermiştir. Rijit şekilde sabitlenmiş bir küt cisim, gelen hava akışını hücum kenarında durmaya zorlamıştır. Bu durum şiddetli sınır tabaka ayrılmasına ve geniş bir düşük basınçlı art izi bölgesine yol açarak sistemin aerodinamik performansını düşürmüştür. Buna karşın serbest hareket eden döner mafsal, dışık dizisinin pasif olarak dönmesine ve geometrik profilini bölgesel akım çizgileriyle sürekli olarak hizalamasına imkân tanımıştır. Bu dinamik hizalanma, serbest akış hızına (U_∞) dik olarak yansıtılan efektif ön alanı minimize etmiştir. Sonuç olarak sistem, köpek balığı derisi dışık geometrisine özgü yüzey sürtünmesi azaltımı avantajını korurken, basınç sürüklemesini Şekil 4.1'de gösterildiği gibi etkili bir şekilde azaltmıştır.

4.1.2 Kaldırma Kuvvetlerinin Karakterizasyonu

Akış yönündeki direncin en aza indirilmesi, yapısal yorulmayı ve malzeme hasarını önlemek açısından kritik öneme sahip olsa da bu durum enerji kazanımına doğrudan katkı sağlamamaktadır. Akış kaynaklı titreşim enerji hasadı mekanizmasının potansiyelini değerlendirmedeki temel ölçüt, sistemin kararsız ve değişken enine kuvvetler üretebilme kapasitesidir. Akışkan-yapı etkileşimini tetikleyen bu dalgalanan kuvvetlerin büyüklüğünü sayısallaştırmak amacıyla, tüm konfigürasyonlar için Kare Ortalama Karekök (RMS) kaldırma katsayıları ($C_{L_{rms}}$) hesaplanmıştır.

Sabit ve Döner Mafsallı Bağlantıların Ortalama Kaldırma Katsayılarının Karşılaştırılması



Şekil 4.2. Sabit ve hareketli konfigürasyonların kare ortalama karekök (RMS) taşıma katsayılarının karşılaştırması

Enine yük verileri, bu çalışmanın temel hipotezini açıkça doğrulamaktadır. Sisteme mekanik eklemleme kazandırılması, akışkan momentum transferini köklü bir biçimde artırmıştır. Test edilen konfigürasyonların büyük çoğunluğunda, özellikle düşük ve orta rüzgâr hızlarında çalışan, küçük yüzey alanına sahip modellerde, döner mafsallı RMS kaldırma katsayısını ($C_{L_{rms}}$) belirgin ölçüde artırmıştır. Örneğin Test 2'de, 7.5 m/s serbest akış hızında $C_{L_{rms}}$ değeri sabit durumda 0.44 iken, hareketli durumda 0.65'e yükselmiştir. Benzer bir artış Şekil 4.2'de, katsayının 0.108'den 0.165'e çıktığı Test 5'te de gözlemlenmiştir.

Tespit edilen bu güçlü dalgalanmalar, eklemli geometrilerin kendi art akış yapılarıyla dinamik bir etkileşime girdiğini göstermektedir. Sabit durumda üretilen kaldırma kuvveti ise tamamen modelin statik asimetrisinden veya klasik Von Kármán girdap dizisinden

kaynaklanmaktadır. Ancak hareketli mafsal, modelin değişen bölgesel art izi basınçlarına doğrudan tepki vererek fiziksel olarak salınım yapmasına olanak tanır. Bu fiziksel hareket, sınır tabaka ayrılma noktalarını gerçek zamanlı olarak değiştirerek etkili bir aeroelastik geri bildirim döngüsü oluşturur. Bahsedilen döngü, kopan girdapların şiddetini ve uzamsal tutarlılığını artırır. Böylece piezoelektrik bir kirişi uyarmak için gereken yüksek genlikli, alternatif enine yükler üretilmiş olur.

Geniş yüzey alanına sahip ve yüksek hızlarda test edilen konfigürasyonlarda, RMS kaldırma katsayısında kritik bir düşüş yaşandığı belirlenmiştir. Bu durumun, yüksek dinamik basınçların aerodinamik sönümlemeye yol açması ve yapının kinematik bir doygunluk sınırına ulaşmasından kaynaklandığı öngörölmüştür. Elde edilen bu dalgalanma farklılığı, kaldırma kuvvetindeki değişimleri en üst düzeye çıkarırken aerodinamik tutunma kaybını önleyecek optimum geometrik oranların belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu doğrultuda, Bölüm 4.3'te detaylandırılan Taguchi optimizasyon yönteminden yararlanılmıştır.

4.1.3 Reynolds Sayısı Bağımlılığı ve Ölçeklendirme

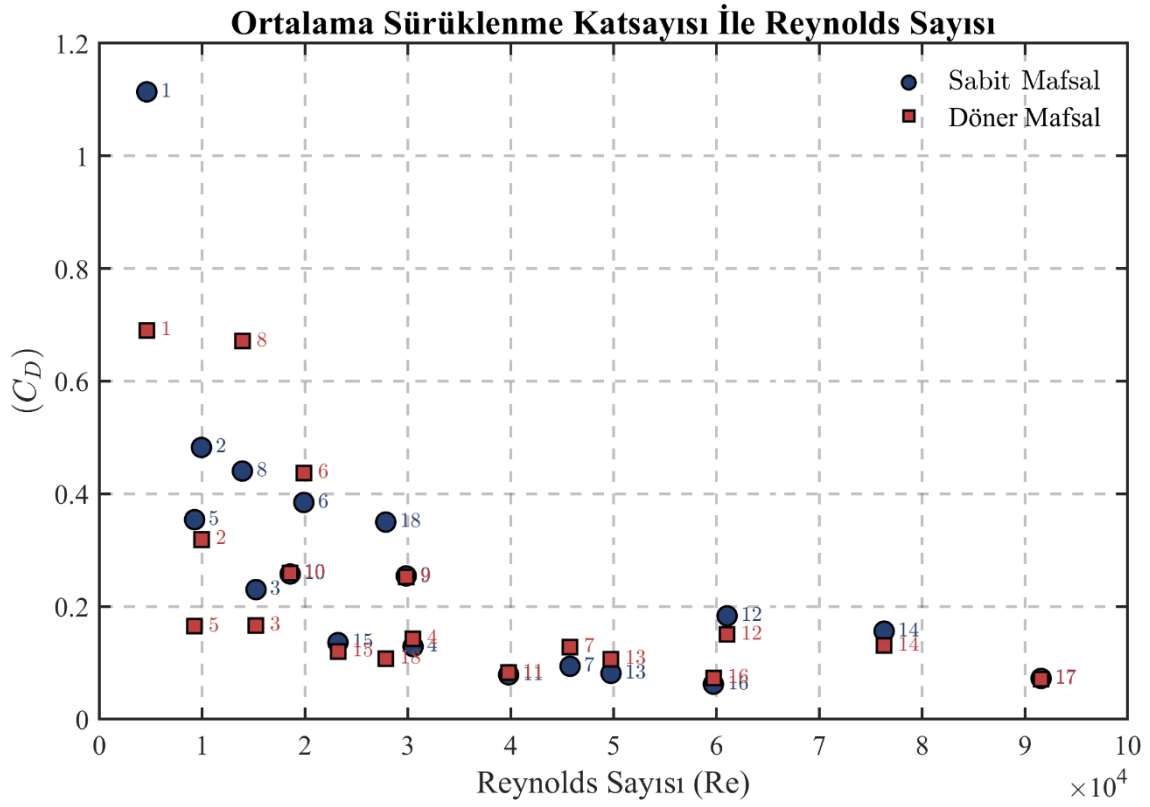
Biyomimetik yapıların ölçeklenebilir ve boyutsuz bir aerodinamik profilini oluşturmak için, kuvvet katsayıları Reynolds sayısının (Re) (Denklem 6) bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Reynolds sayısı, akışkan içindeki eylemsizlik kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını karakterize etmekte olup matematiksel olarak şu şekilde tanımlanır:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} \quad (D.10)$$

Burada ρ havanın yoğunluğunu, U_{∞} serbest akış hızını, μ dinamik viskoziteyi ve L ilgili dişçiğin karakteristik ön genişliğini ifade etmektedir. Deneysel parametrelere bağlı olarak test matrisi Tablo 4.1'de verildiği gibi, Test 1 - 17 arasında değişen kritik altı Reynolds rejimini kapsamaktadır.

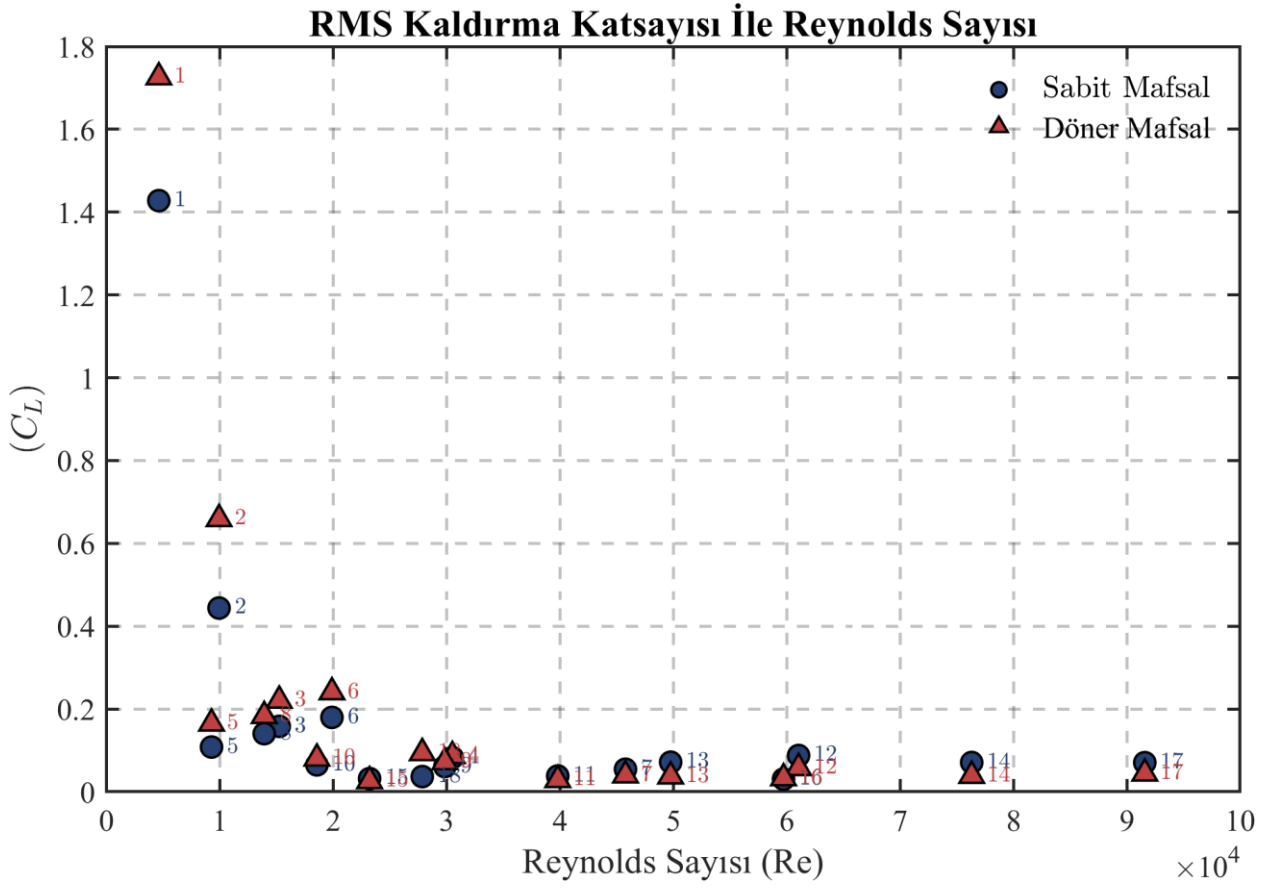
Tablo 4.1. Test konfigürasyonları ve bunlara karşılık gelen Reynolds sayıları

Test no	Reynolds Sayısı
1	4645
2	9955
3	15265
4	30530
5	9291
6	19911
7	45795
8	13937
9	29866
10	18583
11	39822
12	61060
13	49777
14	76325
15	23229
16	59733
17	91590
18	27875



Şekil 4.3. Sabit ve hareketli konfigürasyonlarda ortalama sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi

Ortalama sürüklenme katsayısının (C_D) Reynolds sayısına (Re) göre değişimi, döner mafsal mekanizmasının operasyonel esnekliğini göstermektedir. Klasik aerodinamikte, bu kritik altı rejimde yer alan küt cisimler, sınır tabakasının ayrılması ve yeniden tutunmasının karmaşık doğasından dolayı sürüklenme kuvvetinde genellikle ani dalgalanmalar sergilemektedir. Bununla birlikte deneysel veriler, hareketli konfigürasyonun test edilen tüm Reynolds spektrumu boyunca sürüklenme katsayısını istikrarlı bir biçimde azalttığını göstermiştir. Şekil 4.3'e bakıldığında eylemsizlik kuvvetlerinin nispeten düşük olduğu ($Re < 10^4$) veya daha yüksek geçiş türbülansına yaklaştığı ($Re > 8 \times 10^4$) durumlardan bağımsız olarak, döner mafsalın pasif yunuslama takip özelliği sürüklemeyi başarılı bir şekilde düşürmüştür. Bu bulgu, mafsalın sürüklenme azaltım mekanizmasının dar bir hız bandıyla sınırlı kalmadığını, aksine farklı akış rejimleri boyunca dinamik olarak ölçeklenebildiğini kanıtlamıştır.



Şekil 4.4 Sabit ve hareketli konfigürasyonlarda RMS kaldırma katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi

Benzer şekilde, RMS kaldırma katsayısının ($C_{L_{rms}}$) Reynolds sayısına bağlı olarak incelenmesi, eklemlili sistemin artan enerji hasadı potansiyelini ortaya koymaktadır. Veriler, daha yüksek Reynolds sayılarında art izinin giderek enerji kazanmasına bağlı olarak akışkan-yapı etkileşiminin gelişimini açıkça göstermiştir. Rijit olarak sabitlenmiş dişçikler Re spektrumu boyunca nispeten düz veya sönümlenmiş bir kaldırma tepkisi sergilemiştir. Diğer taraftan hareketli mafsal konfigürasyonu, enine kuvvet üretiminin güçlendirildiği bölgeleri ortaya çıkarmıştır. Yapının tabandan bağımsız hale getirilmesiyle dizilimler, bu çalışmada test edilen yüksek Reynolds rejiminin karakteristiği olan yüksek enerjili ve türbülanslı art izleriyle dinamik olarak senkronize olabilmektedir. Reynolds sayısına bağlı olarak görülen bu güçlenme, mafsal mekanizmasının yüksek verimli akış kaynaklı titreşim uygulamaları için ölçeklenebilir olduğunu göstermiştir.

Sürüklenme ve kaldırma verilerinin sentezlenmesi, çok serbestlik dereceli bu hasat mekanizmasının gerçek aerodinamik değerini ortaya koymuştur. Döner mafsallı, etkili bir aerodinamik mekanik doğrultucu olarak işlev görmüştür. Biyomimetik yüzeyin rijit bir tabakadan bağımsız hale getirilmesiyle sistem, ortalama C_D değerindeki düşüşün gösterdiği üzere istenmeyen sürüklenme direncini sönümlemiştir. Aynı zamanda bu bağımsız yapı, artan $C_{L_{rms}}$ değerinin ortaya koyduğu gibi yüksek genlikli ve yapıcı enine salınımları teşvik etmiştir. Bu dinamik akışkan-yapı etkileşimi, art izini yeniden düzenleyerek biyomimetik yüzeylerin pasif akış kontrolü yaklaşımını aktif mekanik enerji kazanımına dönüştürmüştür.

4.2 Frekans Uzayı ve Art İzi Dinamikleri

RMS kaldırma katsayısı enine aerodinamik kuvvetlerin genliğini sayısallaştırırsa da art izinin zamansal dinamiklerini tam olarak karakterize edememektedir. Akış kaynaklı titreşim (FIV) enerji hasadı mekanizmasının en yüksek verimde çalışabilmesi için, periyodik girdap kopmasının doğal rezonans frekans ile eşleşmesi gerekmektedir. Bu akışkan-yapı etkileşimini değerlendirmek amacıyla, enine yük hücresi ölçümlerinden elde edilen ham zaman verileri, zaman uzayından frekans uzayına dönüştürülmüştür.

4.2.1 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)

Dalgalandıran kaldırma kuvvetini tetikleyen baskın girdap kopma frekanslarını (f_s) belirlemek için ham kuvvet verilerine FFT analizi uygulanmıştır. Elde edilen spektral analiz, Tablo 4.2’de açıkça göstermiştir.

Tablo 4.2. Sabit ve hareketli konfigürasyonlar için elde edilen Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) spektrum analizleri

Test No:	Frekans sabit mafsalsal (Hz)	Frekans döner mafsalsal(Hz)
1	99.95	99.91
2	72.97	72.69
3	134.72	100
4	133.66	100.09
5	26.99	26.98
6	72.82	72.62
7	119.87	100.03
8	26.98	26.98
9	53.48	53.48
10	26.98	25.84
11	42.35	53.48
12	16.24	14.46
13	36.36	32.45
14	47.32	22.86
15	16.18	3.83
16	32.98	23.63
17	39.95	32.19
18	4.69	11.6

Sabitlenmiş konfigürasyonların spektral analizi, tümüyle statik geometriye ve serbest akış hızına bağlı olan belirgin girdap kopma tepe noktalarını ortaya koymuştur. Ancak döner mafsalsalın entegre edilmesi spektral enerji dağılımını temelden değiştirerek, bölgesel akış alanının fiziksel olarak modifiye edildiğini göstermiştir.

Sonuçlar ayrıca mafsalsal tarafından yönlendirilen iki farklı dinamik davranışı ortaya koymuştur. Belirli konfigürasyonlarda (Test 1, 5 ve 8 gibi), baskın frekans sabit ve hareketli durumlar arasında aynı kalmıştır. Bu durum, bölgesel basınç farklarının mekanizmanın eylemsizlik eşiğini aşmak için yetersiz kaldığını ve sistemin aerodinamik olarak rijit davranmasına yol açtığını göstermiştir. Buna karşın yüksek hassasiyete sahip

konfigürasyonlarda mafsalları, kopma frekansını belirgin ölçüde yeniden düzenlemiştir. Test 3'te yapının eklemelenmesine izin verilmesi, baskın frekansı 134.72 Hz'den 100 Hz'e düşürmüştür. Benzer şekilde Test 14'te frekans 47.32 Hz'den 22.86 Hz'e kaymıştır. Öte yandan Test 18'de frekans 4.69 Hz'den 11.6 Hz'e çıkmıştır. Bu frekans kayması, yapının artık art izine pasif olarak maruz kalmadığını göstermiştir. Böylece, yunuslama hareketinin sınır tabaka ayrılma zamanlamasını aktif bir şekilde belirlediği ve dinamik olarak eşleşmiş bir akışkan-yapı kopma frekansı oluşturduğu olgusu doğrulanmıştır.

4.2.2 Strouhal Sayısı (St) Karakterizasyonu

Elde edilen frekans bulgularını boyutsuzlaştırmak ve biyomimetik geometrilere yönelik bir aerodinamik model oluşturmak amacıyla, 18 konfigürasyonun tamamı için Strouhal sayısı (St) Denklem 7'de hesaplanmıştır. Akışın bölgesel kararsızlığından kaynaklanan eylemsizlik kuvvetlerinin, hız değişimlerinden kaynaklanan eylemsizlik kuvvetlerine oranını temsil eden Strouhal sayısı, matematiksel olarak şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$St = \frac{f_s \cdot D_c}{U_\infty} \quad (D.11)$$

Burada, f_s ve D_c sırasıyla, girdap kopma frekansı ve dişçik dizisinin akışa dik yöndeki karakteristik ön genişliğini ifade etmektedir.

Standart rijit küt cisimler, kritik altı Reynolds rejiminde genellikle $St \approx 0.2$ civarında yüksek düzeyde kararlı bir Strouhal sayısı sergiler. Bu çalışmada kullanılan sabit biyomimetik diziler için hesaplanan St değerleri geometriye bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermiştir. Hesaplanan St sayıları Test 12'de $St = 0.113$ olarak elde edilirken Test 7'de ise $St = 0.463$ 'e kadar yükselmiştir. Referans değerler arasında görülen bu geniş dağılım, köpek balığı derisi geometrilerinin sabit mafsallı durumda dahi art izi periyodikliğini, klasik küt cisimlerin aerodinamik davranışlarından büyük ölçüde farklılaştırdığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, hareketli mafsalları sağladığı kinematik serbestlik Strouhal sayılarında belirgin sapmalara yol açmıştır. Döner mafsalları pasif yunuslama hareketine izin verdiğinden, efektif ön genişlik sabit bir parametre olmaktan çıkıp salınım döngüsü boyunca sürekli değişen dinamik bir değişken haline almıştır. Bu durum, operasyonel Strouhal sayılarını doğrudan etkilemiştir. Örneğin, sabit durumdan hareketli duruma geçildiğinde St değeri Test 4'te 0.344'ten 0.258'e, Test 14'te ise 0.358'den 0.173'e gerilemiştir. Öte yandan Test 18'de, sabit durumdaki 0.161 olan St değeri 0.398'e yükselmiştir (bkz. Tablo 4.3). Ortaya çıkan bu sapmalar, dinamik bir akış kaynaklı titreşim hasat mekanizmasını standart rijit cisim Strouhal mekaniğiyle analiz etmenin hatalı

olduğunu göstermiştir. Fiziksel mafsalsal, en yüksek enerjiyi elde etmek için gereken rezonans durumlarını doğrudan kontrol etmektedir. Bu nedenle, eklemli enerji hasat sistemleri sadece basit birer mekanizma olarak görülmek yerine, akışkan ile yapının bir bütün olarak çalıştığı tam eşleşmiş sistemler şeklinde ele alınmalıdır.

Tablo 4.3. Test konfigürasyonları için hesaplanan Strouhal sayıları

Test No:	(St) Sabit mafsalsal	(St) Döner mafsalsal
1	0.423	0.422
2	0.169	0.169
3	0.234	0.174
4	0.344	0.258
5	0.268	0.268
6	0.388	0.387
7	0.463	0.386
8	0.402	0.402
9	0.428	0.428
10	0.456	0.437
11	0.393	0.496
12	0.113	0.101
13	0.359	0.32
14	0.358	0.173
15	0.462	0.109
16	0.39	0.28
17	0.363	0.292
18	0.161	0.398

4.3 Aerodinamik Sürüklemeye Yönelik Taguchi Optimizasyonu ve ANOVA Analizi

Biyomimetik dizilimlerin aerodinamik profilini belirleyen temel geometrik parametreleri sistematik biçimde saptamak amacıyla Taguchi L18 ortogonal dizisi analiz edilmiştir. Söz konusu aerodinamik optimizasyonun temel amacı, ortalama sürüklenme katsayısının (C_D) minimize edilmesidir. Bu doğrultuda, Sinyal-Gürültü (S/N) oranı (Denklem 8) matematiksel olarak aşağıda tanımlanan "En Küçük En İyi" (Smaller-is-Better) kriteri kullanılarak hesaplanmıştır:

$$S/N = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (D.12)$$

Burada y_i gözlemlenen tepki değerini (sürüklenme katsayısı), n ise gözlem sayısını ifade etmektedir. Pozitif yönde daha yüksek bir S/N değeri, düşük sürüklemeli optimum bir konfigürasyona işaret etmektedir. Her bir parametrenin istatistiksel etkisini hesaplamak amacıyla Varyans Analizi (ANOVA) yürütülmüş ve Kareler Toplamı (Sum of Squares - SS) üzerinden yüzde katkı oranları elde edilmiştir.

Tablo 4.4. Sürüklenme katsayısının ANOVA sonuçları

Faktör	DF	Kareler toplamı sabit mafsalsal	Kareler toplamı döner mafsalsal	F oranı sabit mafsalsal	F oranı döner mafsalsal	Prob > F sabit mafsalsal	Prob > F döner mafsalsal	Yüzdelik katkı sabit mafsalsal	Yüzdelik katkı döner mafsalsal
L(1,6)	1	0.340964	0.191573	20.008	20.316	0.0012	0.0011	32.206262	31.160802
W/L(1,3)	1	0.003325	0.002315	0.1952	0.2455	0.668	0.631	0.3141502	0.3765749
W/H(1,3)	1	0.005317	0.011949	0.312	1.2672	0.5887	0.2866	0.5022618	1.9436333
W/TW(1,3)	1	0.071676	0.025677	4.2061	2.723	0.0674	0.1299	6.7703376	4.1765681
TH/H(1,3)	1	0.145499	0.161138	8.5382	17.0884	0.0152	0.0020	13.74335775	26.21029189
DH/H(1,3)	1	0.055307	0.002815	3.2455	0.2985	0.1018	0.5968	5.2241553	0.4578854
v(1,3)	1	0.266187	0.125025	15.620	13.258	0.0027	0.0045	25.143102	20.336211
Hata	10	0.170410	0.094296	-	-	-	-	16.096371	15.338032
Toplam	17	1.058690	0.614791	-	-	-	-	100	100

4.3.1 Sabit Konfigürasyon

Rijit biçimde sabitlenmiş kontrol grubuna yönelik Taguchi analizi, aerodinamik tepkinin büyük ölçüde dentikülün makroskobik izdüşüm alanına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. ANOVA sonuçlarına göre, sürüklenme katsayısındaki toplam varyansa %32.2 oranında katkı sağlayan genel dentikül uzunluğu (L), birincil kontrol faktörüdür. Bunu %25.1 ile serbest akış Hızı (v) ve %13.7 ile mikro-geometrik yan çıkıntı yüksekliği oranı (TH/H) takip etmektedir.

Söz konusu rijit durumda yapı, temel olarak statik bir küt cisim işlevi görmektedir. Akışın dinamik olarak manipüle edilememesi; sürüklemeyi azaltmanın temel yolunun, sınır tabakayı bozan engelin statik uzunluğunu değiştirmekten geçtiğini göstermektedir. S/N oranı bulguları doğrultusunda sabit mafsallık için optimum düşük sürüklenme konfigürasyonu; maksimum uzunluk ($L = 12$ cm) ve orta seviye bir hız değerinin kullanıldığı Test 16'da ($S/N = 24.11$) elde edilmiştir (bkz. Tablo 4.4).

4.3.2 Hareketli Döner Mafsallık Konfigürasyonu

Birebir aynı geometrik parametrelerin hareketli döner mafsallık üzerinde incelenmesiyle, akışkan yapı etkileşimi dinamiklerinin köklü biçimde değiştiği görülmüştür. Dentikül uzunluğu (L) %31.1'lik katkısıyla yüksek etkisini korusa da; mikro geometrik yan çıkıntı yükseklik oranının (TH/H) istatistiksel önemi belirgin şekilde artmış ve modele katkısı neredeyse iki katına çıkarak %26.2 seviyesine ulaşmıştır. Öte yandan, serbest akış Hızının (v) etkisi %20.3'e gerilemiştir.

Ortaya çıkan bu istatistiksel tersinme, çalışmanın kritik bulgularından biridir. Bu durum, döner mafsallık dentiküle ait iç mikro-geometriyi kendisini çevreleyen akış alanıyla aktif biçimde eşleştirdiğini kanıtlamaktadır. Dentikülün yunuslama hareketinde serbest olması nedeniyle yan çıkıntılar (TH/H) artık yalnızca statik bir yüzey pürüzlülüğü olmaktan çıkmıştır; hücum açısını ve art izinin kuyruk kenarından kopma biçimini belirleyen aktif aerodinamik taşıma yüzeylerine dönüşmektedir. Hareketli konfigürasyonda sürüklenme azaltımına yönelik en yüksek S/N oranı, maksimum hızda (11.5 m/s) gerçekleştirilen Test 17'de ($S/N = 22.92$) elde edilmiştir. Bu sonuç, mafsallık mekanizmasının yüksek hızlı türbülanslı akışların neden olduğu standart sürüklenme dezavantajlarını aşmak için dentikülün özgül geometrisini başarılı bir şekilde kullandığını doğrulamaktadır.

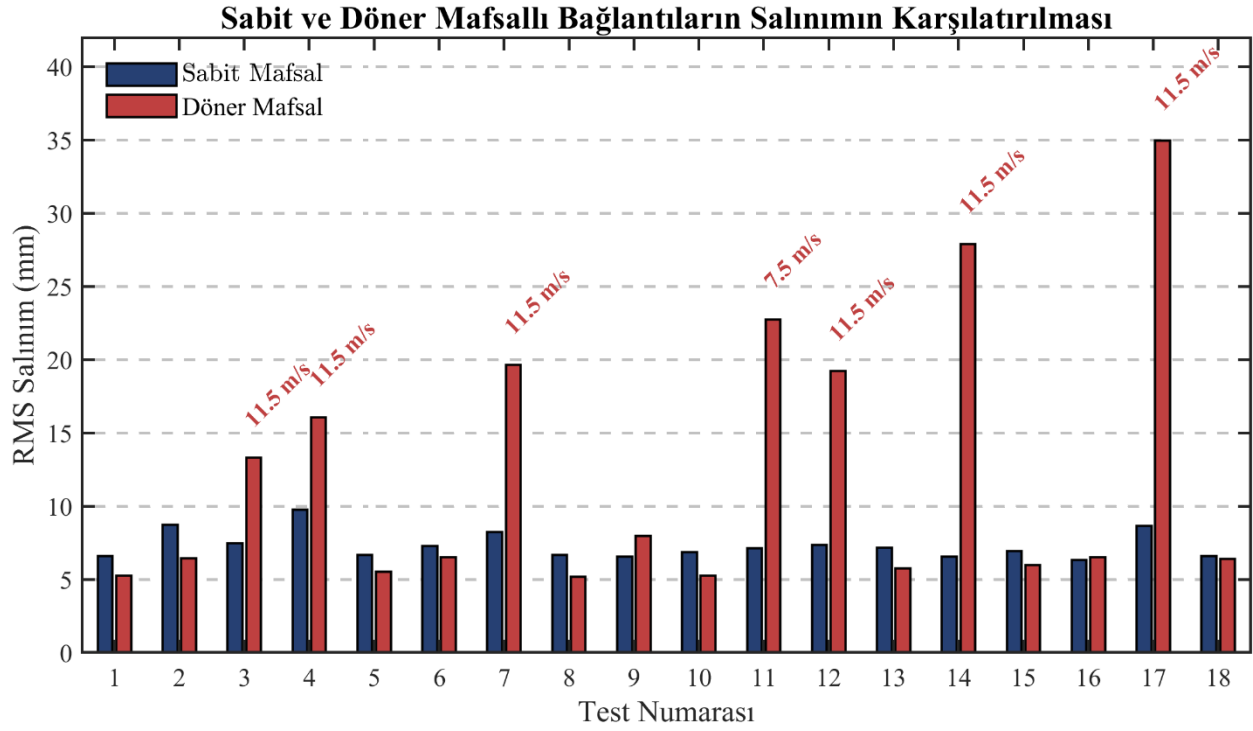
5. ENERJİ HASADI BULGULARI (BULGULAR VE TARTIŞMA)

Pasif akış kontrolü bağlamında sınır tabaka aerodinamiğinin manipüle edilmesi ve art izi kopma frekanslarının değiştirilmesi kritik önemdedir. Bununla birlikte bu çalışmanın nihai hedefi, söz konusu akışkan-yapı etkileşimlerini kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürmektir. Bu bölümde, biyomimetik sistemin enerji hasadı performansı sunulmaktadır. Statik kuvvet ölçümüne dayalı yük hücresi düzeneğinden esnek ankastre kiriş konfigürasyonuna geçilerek, yapının kinematik tepkisi değerlendirilmiştir. Tünel içine yerleştirilen lazer deplasman sensörüyle kaydedilen yapısal sapma ile piezoelektrik dönüştürücü tarafından üretilen açık devre gerilimi ilişkilendirilerek sistemin elektromekanik verimliliği sayısallaştırılmıştır. Ayrıca, hareketli döner mafsallı konfigürasyonunun geleneksel ve sabit mesnetli biyomimetik geometrilere göre enerji hasadı açısından sunduğu avantajları belirlemek üzere karşılaştırmalı bir analiz yürütülmüştür.

5.1 Kinematik Tepki ve Yapısal Sapma

Bölüm 4'te sunulan aerodinamik yük hücresi verileri, biyomimetik yapılara etki eden taşıma kuvvetlerini sayısallaştırmaktadır; ancak sistemin elektromekanik verimliliği, söz konusu akışkan kuvvetlerinin fiziksel yapısal gerinime (strain) dönüştürülme düzeyine bağlıdır. Aerodinamik taşıma kuvveti ile piezoelektrik gerilim üretimi arasındaki ilişkiyi kurmak amacıyla, enine kinematik tepkiyi (özellikle ankastre kirişin Kare Ortalama Karekök - RMS sapmasını) doğrudan ölçmek üzere Sharp marka bir lazer deplasman sensörü kullanılmıştır.

Kinematik veriler, döner mafsallı sağladığı fiziksel eklemlenmenin, akış kaynaklı titreşim açısından kritik bir mekanik amplifikatör işlevi gördüğünü doğrulamaktadır. En düşük serbest akış hızı sınırında (3.5 m/s), sabit ve hareketli konfigürasyonların bütünü yüksek oranda sönümlenmiş ve ihmal edilebilir sapma profilleri sergilemiştir. Bu hız değerinde incelenen tüm geometrilere yapısal sapma 5.0 mm ile 7.0 mm arasında seyretmiştir (örneğin Test 1'de sabit mafsallı için 6.57 mm, hareketli mafsallı için ise 5.23 mm kaydedilmiştir). Bu düşük Reynolds rejiminde bölgesel dinamik basınç, ankastre kirişin yapısal rijitliğini ve mafsallı mekanizmasının eylemsizlik sürtünmesini yenmek için yetersiz kalmıştır.



Şekil 5.1. Sabit ve hareketli konfigürasyonlara ait ankastre kiriş RMS salınım genliklerinin karşılaştırması

Hızın 7.5 m/s ve 11.5 m/s seviyelerine çıkmasıyla birlikte, iki sistemin kinematik tepkileri keskin bir biçimde farklılaşmıştır. Rijit biçimde sabitlenmiş konfigürasyonlar, tüm test koşullarında yüksek oranda sönümlenmeye devam etmiştir. Maksimum hızda (11.5 m/s) dahi rijit bağlantı, yapının kendi kopan art iziyle (shedding wake) etkileşime girmesini engellemiştir. Örneğin Test 17'de sabit konfigürasyon yalnızca 8.63 mm'lik bir RMS sapması gösterebilmiştir. Akışkan momentumu, enine salınıma dönüşmek yerine büyük ölçüde akış yönlü biçim sürüklemesi olarak sönümlenmiştir.

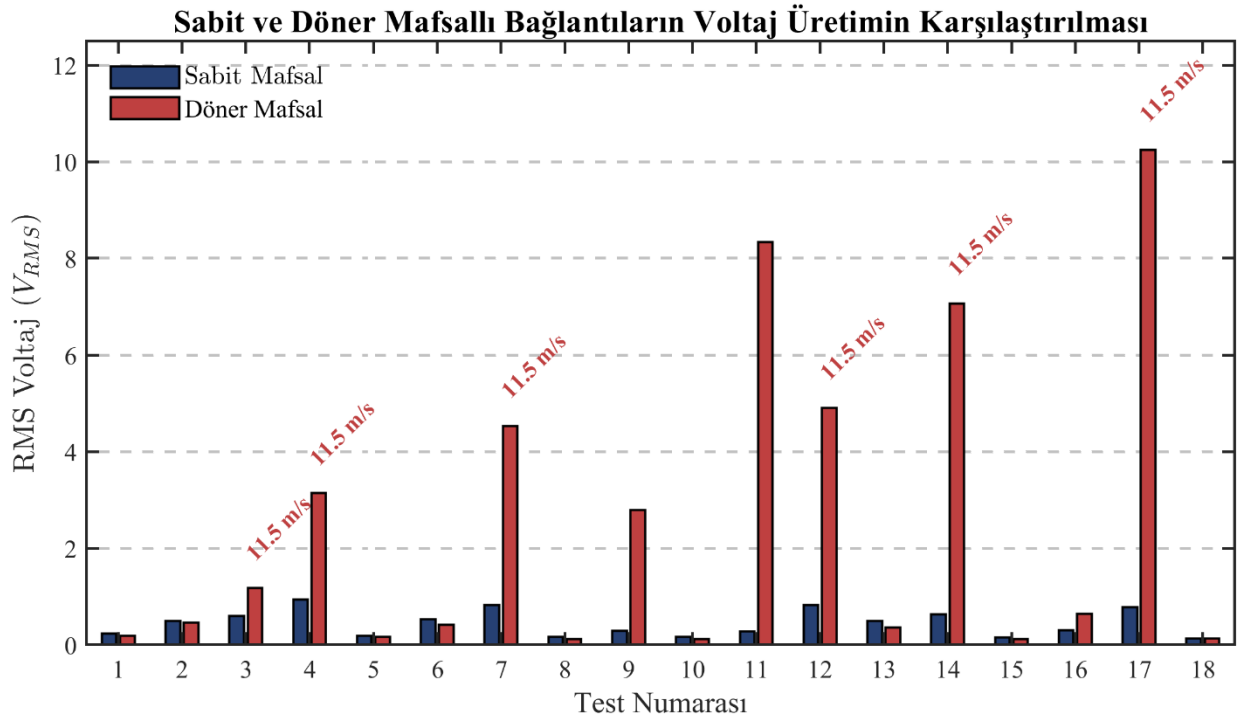
Buna karşın hareketli mafsal, yüksek genlikli aeroelastik kararsızlığı tetiklemiştir. Dentikül dizisinin rijit tabakadan bağımsızlaştırılmasıyla, mikro-geometrinin yunuslama hareketi yapması ve yerel hücum açısına uyum sağlaması olanaklı kılınmıştır. Bu pasif takip, belirgin bir art izi-gövde senkronizasyonunu tetikleyerek ankastre kirişi yüksek genlikli bir rezonans durumuna ulaştırmıştır. Test 17 ile birebir aynı koşullarda (11.5 m/s) hareketli konfigürasyon 34.94 mm'lik bir RMS sapması değerine ulaşmış; bu durum sabit modele kıyasla %400'ü aşan bir artışa karşılık gelmiştir.

Benzer artış eğilimleri, yüksek hız matrisi genelinde tutarlılık göstermiştir. Test 14'te (11.5 m/s) sapma değeri 6.54 mm'den (sabit) 27.88 mm'ye (hareketli) çıkarken; Test 11'de (7.5 m/s) 7.11 mm'den 22.72 mm'ye yükselmiştir. Elde edilen lazer deplasman verileri sistemin etki mekanizmasını açıkça ortaya koymaktadır: Döner mafsal, yüksek hızlı sınır tabaka türbülansını

büyük ölçekli ve yüksek genlikli mekanik gerinime dönüştürerek, yüksek piezoelektrik gerilim üretimi için gerekli olan fiziksel altyapıyı sağlamaktadır.

5.2 Piezoelektrik Gerilim Üretimi

Akışkanlar mekaniği ve yapısal kinematik, enerji hasadı mekanizmasının teorik altyapısını oluşturmaktadır. Bir sistemin performansının temel ölçütü, kinetik enerjiden uygun yöntemler ile dönüştürülen elektrik enerjisidir. Bu tez çalışmasında ankastre kirişin akış kaynaklı titreşiminden doğan değişken gerinim, kiriş köküne monte edilen (PZT) model piezoelektrik yama aracılığıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Sistem çıktısını, harici bir yük devresinin neden olabileceği elektriksel sönümlenme etkilerinden bağımsız olarak ölçmek amacıyla, 18 deney konfigürasyonunun tamamında açık devre RMS gerilimi dijital bir osiloskopla doğrudan kaydedilmiştir.



Şekil 5.2. Sabit ve hareketli konfigürasyonlar tarafından üretilen RMS voltaj değerlerinin karşılaştırması

Sonuçlar bu araştırmanın temel hipotezi olan hareketli bir döner mafsallın sisteme dâhil edilmesi ile enerji hasadı artışının sağlandığını göstermiştir. Diğer taraftan, düşük hızlarda (3.5 m/s) sabit ve hareketli konfigürasyonların ihmal edilebilir düzeyde gerilim üretmesi (ortalama 0.11 V ile 0.22 V RMS arası), söz konusu hızdaki dinamik basıncın kirişin yapısal rijitliğini ve mafsallın eylemsizlik sürtünmesini yenmek için yetersiz kaldığını göstermiştir.

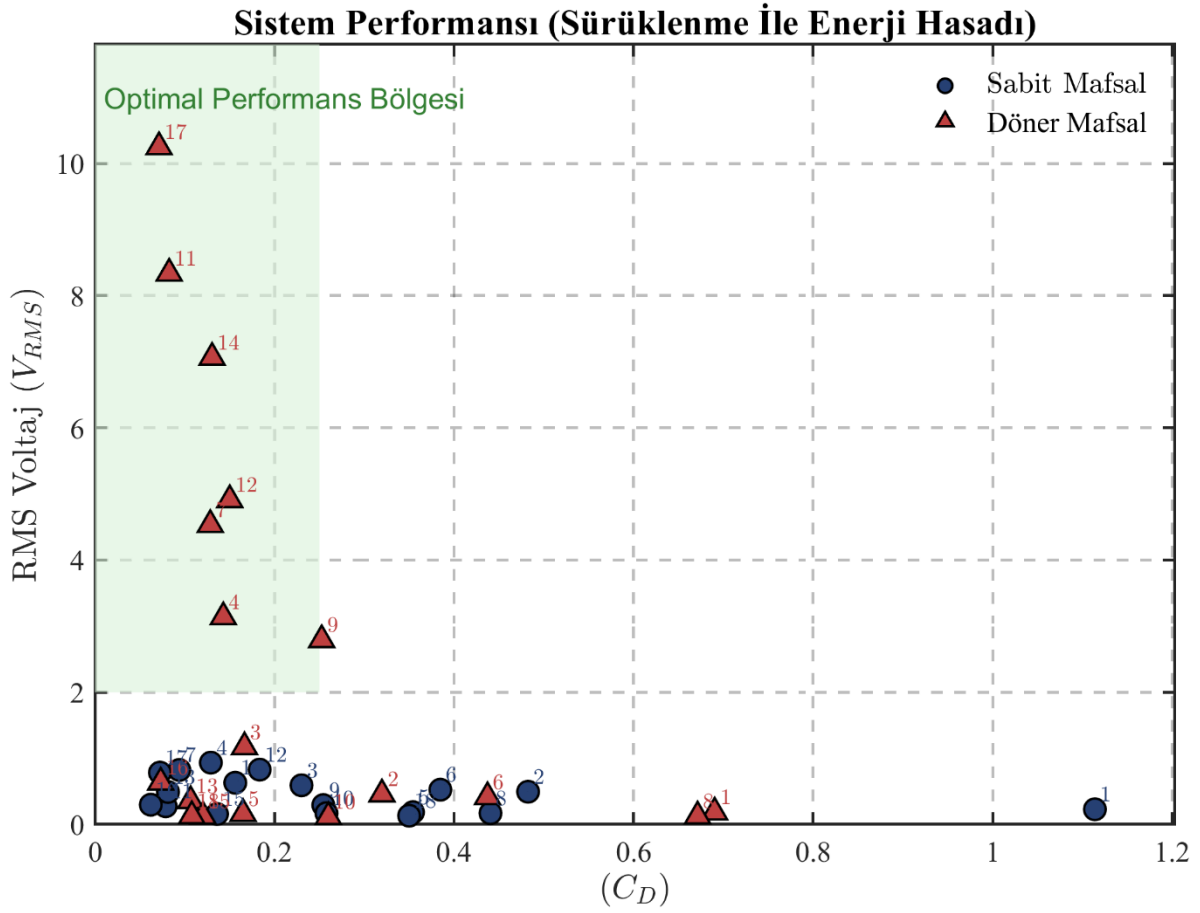
Akış hızı arttığında ise enerji üretim profilleri keskin biçimde farklılaşmıştır. Rijit biçimde sabitlenmiş konfigürasyonlar yüksek oranda sönümlenmiş, doğrusal bir gerilim tepkisi sergilemiştir. Örneğin, 11.5 m/s maksimum hızda gerçekleştirilen Test 17'de sabit kontrol geometrisi yalnızca 0.783 V değerinde bir RMS gerilimi üretirken, bu değer Test 14'te 0.630 V seviyesinde kalmıştır. Dişçik dizisinin rijit bağlantısı, yapının kendi art izi ile dinamik etkileşim kurmasını engelleyerek piezoelektrik dönüşüm için gerekli mekanik gerinimi büyük ölçüde kısıtlamıştır.

Buna karşın hareketli döner mafsall konfigürasyonları, artan hızlarda güç üretiminde üstel bir artış sergilemiştir. Döner mafsall sayesinde mikro-geometrinin aktif olarak yunuslama hareketi yapmasına ve değişken girdap basınçlarıyla senkronize olmasına olanak tanıyarak ankastre kirişi yüksek genlikli bir rezonans durumuna ulaştırmıştır. Aynı koşullara sahip Test 17'de hareketli konfigürasyon 10.248 V RMS gerilim üretmiştir. Bu sayede, sabit modele göre %1300'ün üzerinde bir kazanç elde edilmiştir. Tüm testlerin genelinde benzer sıçramalar gözlemlenmiştir. Test 11'de gerilim 0.275 V değerinden 8.336 V seviyesine çıkarken, Test 14'te bu değer sabit mafsalda 0.630 V değerinden döner mafsalda 7.062 V gibi bir sonuca yükselmiştir.

Gözlemlenen bu belirgin gerilim artışları, döner mekanizmanın sistemi elektromekanik olarak büyük ölçüde desteklediğini kanıtlamıştır Şekil 5.2. Akışı pasif olarak takip eden ve art izinin yapıyı aktif biçimde yönlendirmesine imkân tanıyan döner mafsall sistemi, biyomimetik profilin gerçek enerji hasadı potansiyelini açığa çıkarmıştır.

5.3 Elektromekanik Korelasyon ve Sistem Verimliliği

Bir FIV enerji hasadı mekanizmasının gerçek fizibilitesi, yalnızca ürettiği mutlak maksimum gerilimle ölçülmemelidir. Bunun yerine sistemin uygunluğu bütüncül elektromekanik verimliliğiyle belirlenmektedir. Aerodinamik enerji hasadı uygulamalarında bu verimlilik kavramsal olarak, üretilen elektrik enerjisinin maruz kalınan aerodinamik sürüklenme dezavantajına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu doğrultuda, önerilen biyomimetik sistemin nihai performansını değerlendirmek amacıyla, aerodinamik kuvvet ve piezoelektrik gerilim verileri sentezlenerek, bu bölümde incelenmiştir.



Şekil 5.3. Ortalama sürüklenme katsayısı ile üretilen RMS gerilimi arasındaki elektromekanik korelasyon

Klasik sabit mekanizmalı enerji hasadında temel bir tasarım zorluğu vardır. Elektrik üretimini artırmak için akıştan daha fazla enerji almak gerekir. Bu da ancak sistemi büyüterek veya daha küt yapılar kullanarak akışkanla olan etkileşimi artırmakla mümkündür. Ancak bu yaklaşım, akış yönündeki sürüklenme kuvvetini de önemli ölçüde artırarak yapıda erken yorulmalara yol açmaktadır.

Bu çalışmadaki hareketli mafsallı tasarımı ise söz konusu olumsuz etkiyi azaltmak adına bir alternatif sunmaktadır. Elde edilen veriler, döner mafsallı bu geleneksel aerodinamik kısıtlamayı belirli ölçüde esnettiğini göstermiştir. Aynı geometrik profiller için ortalama sürüklenme katsayıları (C_D) ile RMS gerilim çıktıları Şekil 5.3'te karşılaştırılmış olup, sabit ve hareketli konfigürasyonlar arasında belirgin bir elektromekanik ayrışma gözlemlenmiştir.

Bu durumu incelemek amacıyla, Taguchi deney tasarımında en geniş yüzey alanına sahip geometriye uygulanan en yüksek hızlı test koşulu (11.5 m/s) olan Test 17 ele alınmıştır. Aerodinamik analizlerde görüldüğü gibi, sabit kontrol geometrisi yüksek akışkan direncine yol açmış ve ortalama sürüklenme katsayısı $C_D = 0.35$ olarak ölçülmüştür. Söz konusu akış yönlü kuvvete rağmen rijit bağlantı, enine hareketi sönümlemiş ve yalnızca 0.783 V RMS değerinde

düşük bir piezoelektrik çıktı sağlamıştır. Bu doğrultuda sabit sistem düşük verimlilik göstermiş ve akışkan momentumunu elektrik enerjisine dönüştürmek yerine yapıda mekanik gerilmelere yol açmıştır (bkz. Şekil 5.3). Buna karşın, aynı biyomimetik geometri döner mafsallarıyla monte edilip birebir aynı serbest akış koşullarına maruz bırakıldığında, aerodinamik ve elektriksel performans karakteristikleri önemli ölçüde değişmiştir. Serbest hareket eden mafsalları, modelin yerel akım çizgileriyle pasif olarak hizalanmasına imkân tanımış ve böylece ortalama sürüklenme katsayısının C_D %70'in üzerinde bir düşüşle 0.10 seviyesine inmesini sağlamıştır. Eşzamanlı olarak bu dönme serbestliği, yapının art izindeki değişken girdap basınçlarıyla dinamik olarak senkronize olmasına olanak tanımıştır. Kurulan bu aeroelastik eşleşme, ankastre kirişi yüksek genlikli rezonansa ulaştırarak elektriksel çıktının 10.248 V RMS değerine yükselmesini sağlamıştır. Elde edilen bu doğrudan ilişki, sistem tasarımının etkinliğini göstermektedir. Dişçik geometrisinin sabit taşıyıcı yapıdan bağımsız hareket edebilmesi sayesinde, sistemde ikili bir optimizasyon sağlanmıştır. Pasif yunuslama hareketi ön basınç profilini küçülterek akış yönündeki sürüklemeyi azaltırken, dönme serbestliği ise art izindeki periyodik girdap kopmasının kirişin birincil eğilme modunu uyarmasına olanak tanımıştır. Bu mekanik yapı, köpek balığı derisi dişçik geometrisini yalnızca pasif bir sürüklenme azaltıcı yüzey olmaktan çıkararak yüksek verimli bir aero-elektromekanik sisteme dönüştürmüştür.

5.4 Elektromekanik Üretim İçin Taguchi Optimizasyonu ve ANOVA

Aerodinamik optimizasyon (Bölüm 4.4) sürüklemeyi en aza indirmeye odaklanırken; elektromekanik optimizasyon, Kare Ortalama Karekök (RMS) gerilim çıktısını maksimize etmeyi amaçlamıştır. 18 test konfigürasyonuna ait Sinyal-Gürültü (S/N) oranları, matematiksel olarak aşağıda tanımlanan "En Büyük En İyi" (Larger-is-Better) formülasyonu (Denklem 9) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$S/N = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (D.13)$$

Burada y_i gözlemlenen tepki değerini (RMS gerilimi), n ise gözlem sayısını ifade etmektedir. Pozitif yönde daha yüksek bir S/N değeri, enerji hasadı açısından daha optimum bir konfigürasyona işaret etmektedir. ANOVA sonucunda elde edilen yüzde katkı oranları Tablo 5.1'de görüldüğü gibi, önerilen sistemin en belirgin yeniliğini, yani biyomimetik geometrinin mekanik aktivasyonunu vurgulamaktadır.

Tablo 5.1. Üretilen voltaj cevapları için ANOVA tablosu

Faktör	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı sabit mafsalsal	Kareler toplamı döner mafsalsal	F oranı sabit mafsalsal	F oranı döner mafsalsal	Prob > F sabit mafsalsal	Prob > F döner mafsalsal	Yüzdelik katkı sabit mafsalsal	Yüzdelik katkı döner mafsalsal
L(1,6)	1	1.24893	1913.7574	1.1836	3.2504	0.3021	0.1016	1.014042557	10.80392943
W/L(1,3)	1	1.46364	2.7481	1.3871	0.0047	0.2662	0.9469	1.188371844	0.015514129
W/H(1,3)	1	0.68469	1948.9144	0.6489	3.3101	0.4392	0.0989	0.555919706	11.00240482
W/TW(1,3)	1	0.08417	281.9151	0.0798	0.4788	0.7834	0.5047	0.068340069	1.591524007
TH/H(1,3)	1	4.04086	13.5886	3.8296	0.0231	0.0788	0.8823	3.280891647	0.076713107
DH/H(1,3)	1	0.14272	51.7389	0.1353	0.0879	0.7207	0.773	0.115878515	0.292086878
v(1,3)	1	104.94689	7613.0226	99.4609	12.9301	<.0001	0.0049	85.20942939	42.97857134
Hata	10	10.55157	5887.846	-	-	-	-	8.567126275	33.23925629
Toplam	17	123.16347	17713.5311	-	-	-	-	100	100

5.4.1 Sabit Mafsallı Yönteminin Sınırlılıkları

Rijit biçimde sabitlenmiş piezoelektrik kirişin istatistiksel analizi, standart aeroelastik enerji hasadı mekanizmalarının sınırlılıklarını açıkça göstermektedir. ANOVA sonuçları, serbest akış Hızının (v) sisteme bütünüyle hâkim olduğunu ve gerilim çıktısındaki toplam varyansa %85.2 gibi yüksek bir oranda katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Dentiküle ait biyomimetik geometrinin istatistiksel açıdan anlamlı bir etkisi bulunmamıştır; yan çıkıntı yüksekliği (TH/H) yalnızca %3.2 oranında katkı sağlarken, makroskobik uzunluğun (L) etkisi ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır. Rijit bağlantının dinamik akış takibini sönümlemesi nedeniyle sistem, yalnızca statik bir yüzeye çarpan akışkan hızının doğrudan oluşturduğu şiddetli etkiyle gerilim üretebilmiştir.

5.4.2 Döner Mafsalın Geometrik Aktivasyonu

Döner mafsalın entegrasyonu, piezoelektrik üretimi belirleyen matematiksel kuralları temelden değiştirmiştir. Hareketli konfigürasyonda, serbest akış hızının (v) baskınlığı keskin bir düşüşle %42.9'a gerilemiştir. Geriye kalan varyans ise doğrudan biyomimetik geometri tarafından üstlenilmiştir. Genişlik-Yükseklik oranı (W/H) önem kazanarak gerilim üretimine %11.0 oranında katkıyla en etkili ikinci faktör hâline gelmiş; onu %10.8'lik katkıyla dışçık Uzunluğu (L) yakından takip etmiştir.

Bu bulgu, Bölüm 5.3'te gözlemlenen belirgin gerilim sıçramalarının salt yüksek rüzgâr hızlarından kaynaklanmadığını; dentikülün özgül şekli tarafından aktif olarak yönlendirildiğini kanıtlamaktadır. Yapının bağımsızlaştırılmasıyla mafsal; optimum genişlik-yükseklik oranının ve uzunluğun aerodinamik bir kaldıraç gibi işlev görmesine olanak tanımıştır. Geometri, kopan girdapları dinamik olarak yakalamış, yunuslama açısını senkronize etmiş ve kirişi yönlendirerek yüksek genlikli galoplamaya ulaştırmıştır.

S/N oranı tepkisi, enerji hasadı için nihai optimum konfigürasyonu kesin olarak tanımlamaktadır. Test 17, en yüksek S/N oranını (40.21) vererek maksimum 10.248 V RMS gerilim üretmiştir. Bu nihai konfigürasyon; geniş bir makroskobik izdüşüm alanını ($L = 12$ cm), belirli mikro-geometrik oranları ($W/L = 0.87$, $W/H = 2.5$) ve maksimum test hızını (11.5 m/s) birleştirerek söz konusu performansı elde etmiştir. Bu konfigürasyon ikili bir optimum duruma ulaşmıştır. Akış yönündeki sürüklemeyi pasif olarak sönmölemek için kendi geometrisini kullanırken, enine elektromekanik gerinimi aktif bir şekilde maksimize etmiştir.

5.5 Yük Direnci Eşleştirmesi ve Güç Analizi

Sistemin enerji hasadı başarımını değerlendirmek amacıyla, en uygun yükleme koşullarında elde edilen en yüksek elektriksel güç çıktısının belirlenmesi gerekmektedir. Piezoelektrik enerji hasatlayıcılar yüksek oranda kapasitif iç empedans özelliği göstermektedir; bu durum, dış devreye aktarılan gücün bağlanan yük direncine büyük ölçüde bağlı olduğu anlamına gelmektedir. Aerodinamik galoplama mekanizmasından elektriksel yüke güç aktarımını en üst düzeye çıkaran en uygun direnç değerini bulmak amacıyla bir empedans eşleştirme analizi gerçekleştirilmiştir.

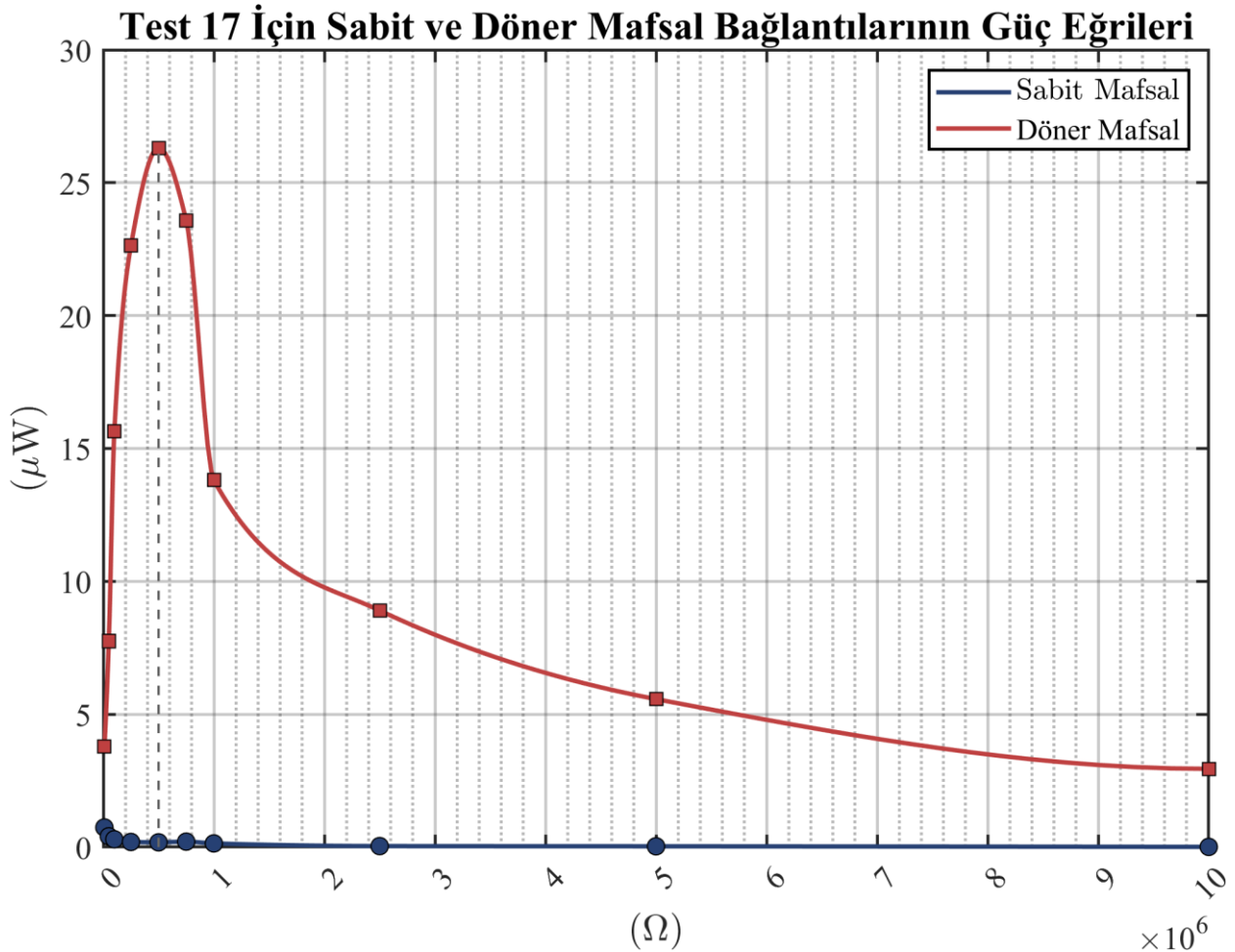
Belirli bir direnç yükü üzerinde piezoelektrik sistem tarafından üretilen elektriksel güç (P), Ohm Kanunu ve kare ortalama karekök (etkin) gerilimi kullanılarak aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (D.14)$$

Burada:

P , hesaplanan gerçek gücü (μW cinsinden) ifade etmektedir. V_{RMS} , yük üzerinde ölçülen kare ortalama karekök gerilimini belirtmektedir. R , uygulanan dış yük direncini (Ω cinsinden) göstermektedir.

Güç eğrisini elde etmek için, dış elektrik yükünü $10\text{ k}\Omega$ ile $10\text{ M}\Omega$ arasında taramak amacıyla ayarlanabilir bir direnç modülü kullanılmıştır. Rüzgâr tüneli en uygun galoplama hızında çalıştırılmış ve her bir ayırık direnç aralığı için kararlı durum kare ortalama karekök gerilimi kaydedilmiştir. Bu tarama işlemi, aerodinamik enerji dönüşüm verimliliğini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla hem referans alınan sabit mafsallı giriş hem de biyomimetik döner mafsallı mekanizması için gerçekleştirilmiştir. Döner mafsallı yapılandırmasına yönelik güç taraması, Test 17'de belirlenen en uygun aerodinamik parametreler (örneğin 11.5 m/s rüzgâr hızı ve optimum dentikül aralığı) koşullarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4. Test 17'nin güç eğrisi

Yukarıdaki güç-direnç eğrisinde gösterilen deneysel sonuçlar, iki mekanik yapılandırma arasındaki enerji hasadı yeteneğinde çarpıcı bir fark olduğunu ortaya koymaktadır.

Sabit Mafsal Başarımı: Rijit referans kiriş, en düşük düzeyde akışkan-yapı etkileşimi sergilemiş ve düşük direnç değerlerinde yaklaşık 0.74 μW seviyesinde en yüksek güç çıktısı üretmiştir.

Döner Mafsal Başarımı: Biyomimetik döner mafsal, girdap kaynaklı titreşimleri ve galoplama genliğini belirgin ölçüde artırmıştır. Sistem, en uygun eşleştirilmiş 500 k Ω empedans değerinde mutlak en yüksek değer olan 26.31 μW seviyesine ulaşarak belirgin bir güç tepe noktası oluşturmuştur.

Bu en uygun yük durumu, dış direncin dönüştürücünün çalışma frekansındaki iç empedansı ile eşleştiğinde en yüksek gücün aktarıldığı piezoelektrik hasatlayıcıların kuramsal davranışını doğrulamaktadır. Geleneksel sabit desteğin özel tasarım döner mafsal geometrisiyle değiştirilmesi sonucunda, hasat edilebilir en yüksek güç 35 katından fazla artırılmış olup; bu durum önerilen biyomimetik tasarımın belirgin aerodinamik üstünlüğünü kanıtlamaktadır.

6. SONUÇ

Bu araştırmanın temel amacı, biyomimetik köpek balığı derisi dişçiklerinin hem sürüklenme azaltma hem de enerji hasadı mekanizması olarak kullanım potansiyelini incelemektir. Bu tez kapsamında özel tasarlanan bir rüzgâr tüneli veri toplama sistemi ile hem aerodinamik kuvvetler hem de enerji hasadı verileri detaylı olarak ölçülmüştür. Parametre sayısının fazla olması sebebiyle deney adedini sistematik olarak azaltmaya yarayan Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada dikkate alınan parametreler ve seviyeleri gereğinde Taguchi L18 ortogonal tablosu göz önüne alınmıştır. Deneyler bu tablo dikkate alınarak hem sabit mafsallık hem de döner mafsallık durumları için yapılmıştır. Elde edilen deneysel veriler çalışmanın temel hipotezini destekler nitelikte gerçekleşmiştir. Kinematik serbestlik derecelerinin sisteme dahil edilmesi, biyomimetik yüzeylerin akış yönündeki sürüklenmesini azaltmıştır. Bu durum aynı zamanda piezoelektrik dönüşüm için gereken enine mekanik gerininin de yüksek bir verimle artmasını sağlamıştır. Çalışma ayrıca, eklemli biyomimetik yüzeylerin aerodinamik ve elektromekanik fizibilitesini temel bir küt cisim ölçeğinde ortaya koymuştur. Deneysel ve istatistiksel verilerden elde edilen en önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Aerodinamik yük hücresi verileri, döner mafsallık küt cisim enerji hasadı mekanizması ilişkili geleneksel sürüklenme dezavantajlarını başarıyla aştığını kanıtlamıştır. Taguchi Varyans Analizi (ANOVA), rijit biçimde sabitlenmiş dentiküllerde akışkan-yapı etkileşiminin tamamen makroskobik uzunluk (L , %32.2 katkı) tarafından domine edildiğini ortaya koymuştur. Ancak hareketli mafsallık entegre edilmesi mikro-geometriyi dinamik olarak aktif hâle getirmiştir. Yan çıkıntı yüksekliği oranının (TH/H) istatistiksel önemi neredeyse iki katına çıkarak %26.2'ye ulaşmış; bu durum, mafsallık dentikülün bölgesel akışın yunuslamasını proaktif bir şekilde takip eden aktif bir kaldırma yüzeyi olarak işlev görmesine imkân tanıdığını kanıtlamıştır. Söz konusu pasif adaptasyon, tüm akış rejimleri boyunca biçim sürüklenmesinde çok büyük bir düşüşle sonuçlanmıştır.

Lazer deplasman analizi, aerodinamik taşıma kuvvetinin yüksek mekanik gerinime başarıyla dönüştürüldüğünü doğrulamıştır. Yüksek serbest akış hızlarında (11.5 m/s) rijit biçimde sabitlenmiş modeller şiddetli aeroelastik sönümlemeye maruz kalmış ve ankastre girişin yapısal sapmasını yalnızca 8.63 mm RMS ile sınırlandırmıştır. Buna karşın, döner mafsallık kısıtlanmamış dönme serbestliği, art izindeki periyodik girdap kopmasının yapıyı güçlü ve yapıcı bir şekilde uyarmasına olanak tanıyarak yüksek genlikli galoplamayı tetiklemiştir. Hareketli mafsallık, fiziksel yapısal sapmayı 34.94 mm RMS değerine yükseltmiş; bu da %400'ü aşan bir iyileştirme oranına karşılık gelmiştir.

Çalışmada diğer bir çıktı da piezoelektrik gerilim çıktısındaki üstel artış olmuştur. Rijit enerji hasadı mekanizması için ANOVA, gerilimin neredeyse tamamen akışkan hızının doğrudan oluşturduğu etki (%85.2 katkı) tarafından yönlendirildiğini kanıtlamış ve dentikülün gerçek şeklini istatistiksel açıdan anlamsız kılmıştır. Döner mafsalları bu sınırlamayı ortadan kaldırmıştır. Yapının bağımsızlaştırılmasıyla hıza olan bağımlılık %42.9'a gerilemiş ve özgül biyomimetik geometri (W/H ve L) enerji üretiminin aktif yönlendiricisi hâline gelmiştir. Taguchi S/N oranı tepkisi, nihai optimum konfigürasyon olarak kesin biçimde Test 17'yi ($L = 12$ cm, $W/L = 0.87$, $W/H = 2.5$, $v = 11.5$ m/s) belirlemiştir. Bu tekil optimum konfigürasyon, aerodinamik sürüklemeyi en aza indirirken 10.248 V RMS değerinde belirgin bir tepe elektrik çıktısı üreterek ikili bir optimum duruma ulaşmıştır.

Sonuç olarak bu araştırma, mekanik olarak eklemlendiğinde biyomimetik köpek balığı derisi yapılarının pasif sürüklemeye azaltıcı olarak geleneksel rollerinin ötesine geçtiğini başarıyla göstermektedir. Önerilen döner mafsalları mimarisi, bu biyolojik geometrileri yüksek verimli, aktif aero-elektromekanik doğrultuculara dönüştürmekte; yeni nesil akış kaynaklı titreşim enerji hasadı mekanizmaları için yüksek düzeyde ölçeklenebilir bir temel oluşturmaktadır.

Gelecek çalışmalarda teknolojinin gerçek dünya uygulamalarına yönelik optimizasyonu ve ölçeklendirilmesi için gelecekteki araştırmalara temel oluşturabilecek bazı alanlar belirlenmiştir. Mevcut deneysel matriste biyomimetik diziler, sürüklemeye ve kaldırma kuvvetlerini hassas ölçebilmek adına izole kütle cisimleri olarak incelenmiştir. Ancak doğal dişçikler, kavisli yüzeylerin karmaşık basınç gradyanları içinde çalışmaktadır. Gelecekte, bu hareketli dizilerin doğrudan NACA kanat profillerine, rüzgâr türbinlerine ve insansız hava araçlarına entegre edilmesi düşünülmüştür. Bu entegrasyon kapsamında, döner mafsalları değişen hücum açılarındaki ve sınır tabaka ayrılma noktasındaki ters basınç gradyanlarına tepkisi incelenmelidir. Ayrıca, gerçek ölçekli uygulamalarda çok sayıda mekanizma yakın mesafelerde çalışacağı için ardışık, kademeli ve paralel düzenlerin aeroelastik davranışları da ele alınmalıdır.

KAYNAKÇA

- Ali, A., Shaukat, H., Elahi, H., Taimur, S., Manan, M. Q., Altabey, W. A., ... & Noori, M. (2025). Advancements in energy harvesting techniques for sustainable IoT devices. *Results in Engineering*, 26, 104820.
- Almuradi, S. A. (2025). An Experimental Study of Boundary Layer Characteristics in Flat Plate Transition Region at Different Surface Roughness. *International Review of Aerospace Engineering*, 18(1), 40.
- Anderson, E. J., MacGillivray, P. S., & Demont, M. E. (1997). Scallop Shells Exhibit Optimization of Riblet Dimensions for Drag Reduction. *The Biological Bulletin*, 192(3), 341–344.
- Bai, X., Zhang, X., & Yuan, C. (2016). Numerical Analysis of Drag Reduction Performance of Different Shaped Riblet Surfaces. *Marine Technology Society Journal*, 50(1), 62–72.
- Bechert, D. W., & Bartenwerfer, M. (1989). The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs. *Journal of Fluid Mechanics*, 206, 105–129.
- Bechert, D. W., Bruse, M., & Hage, W. (2000). Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin. *Experiments in Fluids*, 28(5), 403–412.
- Bechert, D. W., Bruse, M., Hage, W., Hoeven, J. G. T. V. D., & Hoppe, G. (1997). Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, 338, 59–87.
- Bhatia, D., Yadav, D., & Xie, C. (2022). Aerodynamic drag reduction through sharkskin denticle: an experimental approach. *Seventh International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2022)*, 12302.
- Bhatia, D., Zhao, Y., Yadav, D., & Wang, J. (2021). Drag Reduction Using Biomimetic Sharkskin Denticles. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11(5), 7665–7672.
- Bixler, G. D., & Bhushan, B. (2013). Fluid Drag Reduction with Shark-Skin Riblet Inspired Microstructured Surfaces. *Advanced Functional Materials*, 23(36), 4507–4528.
- Bolat, F. C. (2020). An experimental analysis and parametric simulation of vibration-based piezo-aeroelastic energy harvesting using an aerodynamic wing profile. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(7), 5207–5214.
- Boomsma, A., & Sotiropoulos, F. (2016). Direct numerical simulation of sharkskin denticles in turbulent channel flow. *Physics of Fluids*, 28(3), 035106.
- Bushnell, D. M., & Moore, K. J. (1991). Drag Reduction in Nature. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1), 65–79.
- Caram, J. M., & Ahmed, A. (1991). Effect of riblets on turbulence in the wake of an airfoil. *AIAA Journal*, 29(11), 1769–1770.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid mechanics : fundamentals and applications* (4th ed.). New York, Ny: Mcgraw-Hill Education.
- Chen, H., Zhang, X., Che, D., Zhang, D., Li, X., & Li, Y. (2014). Synthetic Effect of Vivid Shark Skin and Polymer Additive on Drag Reduction Reinforcement. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 425701.
- Chen, H., Zhang, X., Ma, L., Che, D., Zhang, D., & Sudarshan, T. S. (2014). Investigation on large-area fabrication of vivid shark skin with superior surface functions. *Applied Surface Science*, 316, 124–131.

- Chen, Z., Wang, Y., Wang, S., Huang, H., Yuan, K., Li, S., ... & Xu, Y. (2023). Fluid–structure interaction on vibrating square prisms considering interference effects. *Physics of Fluids*, 35(12).
- Cheng, Z., Lien, F. S., Dowell, E. H., & Yee, E. (2023). Triggering of galloping in structures at low Reynolds numbers. *Journal of Fluids and Structures*, 118, 103860.
- Choi, K.-S. (1989). Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets. *Journal of Fluid Mechanics*, 208, 417–458.
- Coustols, E., & Schmitt, V. (1990). Synthesis of Experimental Riblet Studies in Transonic Conditions. *Fluid Mechanics and Its Applications*, 4, 123–140.
- Dean, B., & Bhushan, B. (2010). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1929), 4775–4806.
- Delcour, L., Bral, A., Van Langenhove, L., & Degroote, J. (2022). Investigating the influence of compressibility on the second mode flutter instability of a clamped–free cylinder in axial flow using fluid–structure interaction simulations with the Chimera technique. *Journal of Fluids and Structures*, 109, 103469.
- Demchenko, Y., Ivanov, O., & Vedenev, V. (2025). Experimental investigation of rotational vortex-induced vibrations of a circular cylinder attached to an elastic beam. *Journal of Fluids and Structures*, 133, 104266.
- Dillon, E., Norris, R., & O’Dea, A. (2017). Dermal denticles as a tool to reconstruct shark communities. *Marine Ecology Progress Series*, 566, 117–134.
- Domel, A. G., Saadat, M., Weaver, J. C., Haj-Hariri, H., Bertoldi, K., & Lauder, G. V. (2018). Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(139), 20170828.
- Feld, K., Kolborg, A. N., Nyborg, C. M., Salewski, M., Steffensen, J. F., & Berg-Sørensen, K. (2019). Dermal Denticles of Three Slowly Swimming Shark Species: Microscopy and Flow Visualization. *Biomimetics*, 4(2), 38.
- Fish, F. E., Howle, L. E., & Murray, M. M. (2008). Hydrodynamic flow control in marine mammals. *Integrative and comparative biology*, 48(6), 788–800.
- Ghimire, A., Dahl, R. B., Shen, S. F., & Chen, P. Y. (2024). Shark skin denticles: From morphological diversity to multi-functional adaptations and applications. *Advanced Functional Materials*, 34(35), 2307121.
- Gong, H., Patel, U. N., Rothstein, J. P., & Modarres-Sadeghi, Y. (2026). Fluid elasticity enhances galloping of flexibly mounted square prisms in cross-flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1035, A8.
- Hackett, J. E., & Cooper, K. R. (2001). Extensions to Maskell’s theory for blockage effects on bluff bodies in a closed wind tunnel. *The Aeronautical Journal*, 105(1050), 409–418.
- Hough, G. R. (1980). *Viscous Flow Drag Reduction*. USA: AIAA.
- Jiao, F., Sayad Saravi, S., & Cheng, K. (2016). Investigation on an integrated approach to design and micro fly-cutting of micro-structured riblet surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(18), 3291–3300.

- Kinaci, O. K., Demirhan, A. E., & Duranay, A. (2022). Vortex-induced vibrations of a single-degree-of-freedom circular cylinder in the vicinity of the free surface. *Applied Ocean Research*, 124, 103202.
- Lang, A., Motta, P., Habegger, M. L., & Hueter, R. (2012). Shark Skin Boundary Layer Control. *The IMA Volumes in Mathematics and Its Applications*, 139–150.
- Lauder, G. V., Madden, P. G., Mittal, R., Dong, H., & Bozkurtas, M. (2006). Locomotion with flexible propulsors: I. Experimental analysis of pectoral fin swimming in sunfish. *Bioinspiration & biomimetics*, 1(4), S25-S34.
- Lauder, G. V., Wainwright, D. K., Domel, A. G., Weaver, J. C., Wen, L., & Bertoldi, K. (2016). Structure, biomimetics, and fluid dynamics of fish skin surfaces. *Physical Review Fluids*, 1(6).
- Liu, B., & Zhu, H. (2021). Secondary lock-in of vortex-induced vibration and energy transfer characteristics of a vibrating cylinder subject to cross buoyancy. *Physics of Fluids*, 33(7).
- Liu, Y., Gu, H., Jia, Y., Liu, J., Zhang, H., Wang, R., ... Zhang, Q. (2019). Design and preparation of biomimetic polydimethylsiloxane (PDMS) films with superhydrophobic, self-healing and drag reduction properties via replication of shark skin and SI-ATRP. *Chemical Engineering Journal*, 356, 318–328.
- Maskell, E. C. (1963). *A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel* (No. ARCRM3400).
- Miklosovic, D. S., Murray, M. M., Howle, L. E., & Fish, F. E. (2004). Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) flippers. *Physics of fluids*, 16(5), L39-L42.
- Moslemi, A., Rashidi, M., Nazar, A. M., & Sharafi, P. (2025). Advancements in vibration-based energy harvesting systems for bridges: A literature and systematic review. *Results in Engineering*, 26, 104622.
- Neumann, D. L., & Dinkelacker, A. (1991). Drag measurements on V-grooved surfaces on a body of revolution in axial flow. *Applied Scientific Research*, 48(1), 105–114.
- Özkan, M., & Erkan, O. (2022). Control of a boundary layer over a wind turbine blade using distributed passive roughness. *Renewable Energy*, 184, 421–429.
- Özkan, M., Basaran, S., & Erkan, O. (2023b). Energy Harvesting by V-Shape Bluff Bodies with Various Apical Angles Attached to a Revolute Joint. *Energy Technology*, 11(10), 2300579.
- Özkan, M., Erkan, O., & Basaran, S. (2024). Flag Fluttering-Triggered Piezoelectric Energy Harvester at Low Wind Speed Conditions. *Energy Technology*, 12(4), 2301194.
- Özkan, M., Erkan, O., Basaran, S., & Bolat, F. C. (2023a). Numerical and experimental investigation of the aerodynamic performance of anomalous energy harvester geometries. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56(2), 024002.
- Pan, J., Chen, H., Zhang, D., Zhang, X., Yuan, L., & Aobo, L. (2013). Large-scale solvent-swelling-based amplification of microstructured sharkskin. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23(7), 075018.
- Qin, H., Shi, X., Wu, C., Chen, Y., Hu, H., & Huang, Q. (2026). Bioinspired Surface Texturing: From Natural Prototypes to Advanced Applications and Future Perspectives. *Journal of Bionic Engineering*, 1-33.
- Qiu, H., Chauhan, K., & Lei, C. (2020). A numerical study of drag reduction performance of simplified shell surface microstructures. *Ocean Engineering*, 217, 107916.

- Reidy, L. W., & Anderson, G. W. (1988). Drag reduction for external and internal boundary layers using riblets and polymers. *26th Aerospace Sciences Meeting*.
- Savino, B. S., & Wu, W. (2024). Thrust generation by shark denticles. *Journal of Fluid Mechanics*, 1000, A80.
- Seify Davari, M., Seifi Davari, H., & Ntantis, E. L. (2026). A comprehensive review of engineered surface roughness on the aerodynamic performance of horizontal-axis and vertical-axis wind turbine blades. *Physics of Fluids*, 38(2).
- Sharma, V., & Dutta, S. (2022). Experimental and Numerical Investigation of Bio-Inspired Riblet for Drag Reduction. *Journal of Fluids Engineering*, 145(2), 1–62.
- Song, X. Y., Li, P., Zhang, X. R., Zhang, X. L., Peng, Z. R., Fan, Y. W., & Fang, J. R. (2025). Recent advances in renewable energy to drive low-carbon cold storage operations and energy storage. *Journal of Energy Storage*, 139, 118851.
- Subaschandar, N., Kumar, R., & Sundaram, S. (1999). Drag Reduction Due to Riblets on a GAW(2) Airfoil. *Journal of Aircraft*, 36(5), 890–892.
- Sundaram, S., Viswanath, P. R., & Rudrakumar, S. (1996). Viscous drag reduction using riblets on NACA 0012 airfoil to moderate incidence. *AIAA Journal*, 34(4), 676–682.
- Sundaram, S., Viswanath, P. R., & Subaschandar, N. (1999). Viscous Drag Reduction Using Riblets on a Swept Wing. *AIAA Journal*, 37(7), 851–856.
- Sureshkumar, E. M., Arjomandi, M., Cazzolato, B. S., & Dally, B. B. (2018). Spatial and temporal concentration of hydrokinetic energy in the wake of a bluff body. *Ocean Engineering*, 164, 181–198.
- Tezcan, S., Özkan, M., Özdemir, M., & Başaran, S. (2026). Analysis and optimization of single and tandem bluff body configurations for enhanced flow-induced vibrations and energy harvesting potential. *Ocean Engineering*, 343, 123377.
- Walsh, M. (1980). Drag Characteristics of V-Groove and Transverse Curvature Riblets. In *Viscous Flow Drag Reduction*. AIAA.
- WALSH, M. (1982). Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. *20th Aerospace Sciences Meeting*.
- Walsh, M. (1990). Riblets. In *Viscous Drag Reduction in Boundary Layers*. AIAA.
- Walsh, M. J. (1983). Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique. *AIAA Journal*, 21(4), 485–486.
- Wen, L., Weaver, J. C., & Lauder, G. V. (2014). Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *Journal of Experimental Biology*, 217(10), 1656–1666.
- Williamson, C. H. (1996). Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Rev Fluid Mechanics*, p477 [63 p, 182 ref, 27 fig]
- Xia, Q., Li, H., Song, N., Wu, Z., Wang, X., Sun, X., ... & Yang, C. (2023). Research on flexible collapsible fluid-driven bionic robotic fish. *Ocean Engineering*, 276, 114203.
- Xia, Y., Huang, G., Dai, Y., & Yang, C. (2026). Mount's Passive Plunge Effects on Aerodynamic and Energy Harvesting of Membrane Wings. *AIAA Journal*, 64(3), 1485–1496.
- Xu, Y., Song, W., & Zhao, D. (2018). Efficient Optimization of Ringlets for Drag Reduction over the Complete Mission Profile. *AIAA Journal*, 56(4), 1483–1494.

- Yang, Z., Zhang, Y., Li, Z., Lin, S., Gu, Y., Liao, W., & Kan, J. (2025). Design and characterization of a wind-adaptable piezoelectric energy harvester utilizing a rigid-flexible compound blunt body. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 223, 111913.
- Ye, M., Ren, Y., Zhang, S., Ma, H., Hu, X., & Haidn, O. J. (2025). Sloshing suppression with a controlled elastic baffle via deep reinforcement learning and SPH simulation. *arXiv preprint arXiv:2505.02354*.
- Yuan, Y., Wang, H., Yang, C., Sun, H., Tang, Y., & Zhang, Z. (2023). Exploring the potential of flow-induced vibration energy harvesting using a corrugated hyperstructure bluff body. *Micromachines*, 14(6), 1125.
- Zhang, L. B., Abdelkefi, A., Dai, H. L., Naseer, R., & Wang, L. (2017). Design and experimental analysis of broadband energy harvesting from vortex-induced vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 408, 210-219.
- Zhou, Z., Shang, X., Xia, Y., & Zhu, P. (2026). Dragonfly-wing-inspired bluff-body piezoelectric harvester for efficient low-wind-speed energy harvesting. *Micromachines*, 17(3), 380.
- Zulkefli, N.F., Ahamat, M.A., Safri, N.F.M., Nur, N.M., Rafie, A.S.M. (2020). Aerodynamic Performance of Shark Skin Shape Vortex Generator. In: Rajendran, P., Mazlan, N., Rahman, A., Suhadis, N., Razak, N., Abidin, M. (eds) Proceedings of International Conference of Aerospace and Mechanical Engineering 2019 . Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore.