

بررسی استحصال انرژی از جریان اطراف مقطع دو بعدی بال نامتناهی نزدیک سطح

علی اسماعیلی
استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد،
مشهد، ایران
aliesmaeili@um.ac.ir

فاطمه لطف‌آبادی
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه
فردوسی مشهد، مشهد، ایران
fatemeh.lotfabadi@mail.um.ac.ir

چکیده

این مطالعه، به بررسی الگوی جریان انتهای بالواره همراه با پیژوالکتریک در مجاورت سطح زمین با هدف بهینه‌سازی نیروهای آیرودینامیکی در پرنده کوچک بال ثابت در رژیم جریان مادون صوت و آشفته می‌پردازد. در مرحله اول ایرفویل متاثر از اثر سطح شبیه‌سازی شده است و در مرحله دوم ایرفویل همراه با تیر شبیه‌سازی شده است. سپس در مرحله سوم شبیه‌سازی ایرفویل همراه با پیژوالکتریک طراحی می‌شود. در انتها به مقایسه این سه شبیه‌سازی و تحلیل و بررسی جریان حول ایرفویل و تیر پیژوالکتریک پرداخته شده است. هدف مطالعه حاضر برداشت انرژی از الگوی جریان ایجاد شده در اطراف مقطع دوبعدی بال و دستیابی به بهترین طراحی پرنده کوچک بال ثابت برای به حداقل رساندن زمان و هزینه که منجر به یک راه حل بهینه و همگرا برای افزایش مداومت پروازی است می‌باشد. نتایج این شبیه‌سازی نشان دادند در صورت حضور پیژوالکتریک، ضرایب آیرودینامیکی بهبود یافته و علاوه بر آن $2/5$ میکرو وات توان الکتریکی تولید شده است که می‌توان این انرژی الکتریکی حاصل شده را در جهت شارژ باتری‌ها یا تامین انرژی سنسورهای خاص استفاده نمود.

کلمات کلیدی: پیژوالکتریک، نیروهای آیرودینامیکی، برداشت انرژی

۱- مقدمه

در پژوهش‌های صورت گرفته از گذشته تا به امروز هدف طراحی پرنده‌های کوچک بال ثابت کاهش ابعاد، وزن و افزایش مدت زمان پرواز در کاربردهای نظامی و غیر نظامی بوده است [۱]. پژوهشگران راه‌های خلاقانه برای برداشت انرژی جریان سیال با استفاده از ژنراتورهایی مانند تیریبوالکتریک [۲]، پیژوالکتریک [۳]، ترموالکتریک [۴] و پیروالکتریک [۵] ارائه کرده‌اند. در هنگام پرواز، اجزای سازه پرنده‌های کوچک بال ثابت تحت نیروهای آیرودینامیکی دچار ارتعاشات می‌شوند. ارتعاشات را می‌توان به سه دسته گالوپینگ، فلاتر و ارتعاشات گردابه‌ای جریان تقسیم کرد. گالوپینگ یک ناپایداری آیروالاستیک شامل فرکانس‌های پایین با دامنه نوسانات بزرگ است و در زوایای حمله بالا به دلیل غیر خطی بودن نیروهای آیرودینامیکی اتفاق می‌افتد [۶]. فلاتر یک نوسان خود متحرک مخرب است که به دلیل برهم‌کنش نیروهای اینرسی الاستیکی و آیرودینامیکی ایجاد می‌شود، به طوری که انرژی جریان سیال به ساختار آیروالاستیک منتقل می‌شود و بیشترین انرژی مبتنی بر سیکل دامنه نوسانات محدود و معین سازه استخراج می‌شود. با این حال نوسانات سیکل محدود منجر به آسیب و خستگی سازه می‌شود [۷]. ارتعاشات ناشی از گردابه‌های جریان را می‌توان به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین منابع انرژی پرنده‌های کوچک معرفی کرد. با توجه به شرایط جریان، می‌توان با بکارگیری دستگاه‌های برداشت کننده انرژی جریان، بخشی از انرژی مورد نیاز سیستم‌های کنترلی پرنده را تامین کرد. مطالعات تجربی با هدف بررسی ویژگی‌ها و اثر برهم‌کنش برداشت کننده انرژی مبتنی بر خطوط جریان بالادست و خطوط جریان پایین دست ایرفویل صورت گرفته است. از نتایج مشهود است که برداشت انرژی ناشی از برخاستگی جریان سیال تأثیر قابل توجهی بر دامنه ارتعاشات، فرکانس و توان خروجی جریان سیال عبوری از انتهای بال دارد [۸]. به علاوه می‌توان با استحصال انرژی از جریان سیال، انرژی الکتریکی باتری‌ها یا تجهیزات کمکی مانند محرک‌ها و سنسورها را با حفظ مداومت

پروازی در پرنده‌های کوچک تغذیه کرد [۹]. ویژگی‌های مانند سادگی معماری، مقیاس پذیری، دوام بالا و پایداری مکانیکی باعث شده است که نانوژنراتورهای پیزوالکتریک خود را به عنوان گزینه انتخابی ترجیحی برای بسیاری از پژوهشگران در این حیطه معرفی کنند [۱۰]، [۱۱]. قابلیت منابع انرژی اضافی به کلید موضوع تبدیل شده است که استفاده از باتری‌ها برای تغذیه سیستم های کمکی، منجر به سنگینی و کاهش ظرفیت ترابری می‌شود. پیزوالکتریک علاوه بر اینکه پتانسیل تامین انرژی را دارد قادر به بهبود عملکرد آیرودینامیکی نیز است به طوری که بال با پیزوالکتریک نسبت نیروی برآ به پسا بیشتری در مقایسه به بال بدون پیزوالکتریک داشته است [۱۲] [۱۳]. استحصال انرژی از پیزوالکتریک در بال نوسانی نیز مورد بررسی قرار گرفته است به طوری که راندمان آیرودینامیکی افزایش یافته و انرژی مصرفی با کاهش روبرو بوده است [۱۴].

علاوه بر این، هنگامی پرنده نزدیک سطوح از جمله آب یا خاک پرواز می‌کند در میدان جریان سیال اطراف آن تغییراتی بوجود می‌آید که آن را اثر سطح می‌نامند. این تغییرات، اثرات مستقیم بر آیرودینامیک و کنترل پرواز پرنده دارد و برای ادامه پرواز باید زمینه‌سازی‌هایی لازم در نظر گرفته شود. اثر سطح بیشتر هنگام فراز و فرود پرنده و نیز پرواز کروز با ارتفاع کم نمود پیدا می‌کند. با بررسی پرواز پرندگان بزرگ مانند مرغ دریای می‌توان مشاهده کرد که آنها از مزایای آیرودینامیکی القایی اثر سطح برای حفظ انرژی در پروازهای طولانی مدت استفاده می‌کنند. مرغ دریایی خود را به سطح زمین نزدیک می‌کند تا پروازهای طولانی تری را تجربه کند. رفتار آیرودینامیکی پرنده‌های کوچک در پرواز نزدیک سطح با پدیده افزایش برآ و کاهش پسا مواجه می‌شود. هنگامی که ایرفویل نزدیک سطح در فاصله کمتر از نصف طول ایرفویل قرار می‌گیرد، در آیرودینامیک آن دو تغییر ایجاد می‌شود؛ یکی افزایش برآ و دیگری کاهش پسا است که در نهایت موجب افزایش نسبت برآ به پسا می‌شود. علت افزایش برآ به دلایل فشردگی هوای بین بال و دیواره رخ می‌دهد و منجر به تشکیل بالشتک‌های هوا در زیر بال می‌شود و نیز اثر کوبیدن جریان به سطح زیرین ایرفویل منجر به افزایش فشار سطح زیرین ایرفویل می‌شود.

از آنجایی که ریزپرنده‌ها دارای ابعاد کوچکی هستند و از نظر مداومت پروازی و محموله قابل حمل با مشکلات عدیده‌ای روبرو هستند لذا تامین بخشی از انرژی مورد نیاز آنها از محیط پروازی می‌تواند بسیار مفید باشد و منجر به افزایش مدت زمان پرواز شود. از طرفی دیگر، به دلیل ابعاد کوچک این پرنده‌ها، بخش زیادی از زمان پرواز نزدیک به سطوح مختلف نظیر دیوارها یا سطح زمین پرواز خواهند کرد. با توجه به اثر مثبت وجود سطح بر عملکرد آیرودینامیکی، از مبدل‌های پیزوالکتریک برای استحصال انرژی از گردابه‌ها می‌توان استفاده کرد که مورد مطالعه تحقیق حاضر است. در این پژوهش، بالواره‌ای که در نزدیکی سطح زمین در حال حرکت است شبیه‌سازی می‌شود و فیزیک جریان در اطراف این بالواره مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس تیر پیزوالکتریک به صورت پرچی با الهام از پره‌های مرغ دریایی به لبه فرار این بالواره نصب می‌شود و معادلات حاکم بر تیر پیزوالکتریک را به معادلات جریان سیال (معادلات ناویر استوکس) کوپل کرده و با حل این معادلات، به ازای مقاومت الکتریکی مشخص، میزان ولتاژ استحصال شده توسط تیر پیزوالکتریک محاسبه می‌شود.

۲- فرایند حل معادلات حاکم بر مسئله

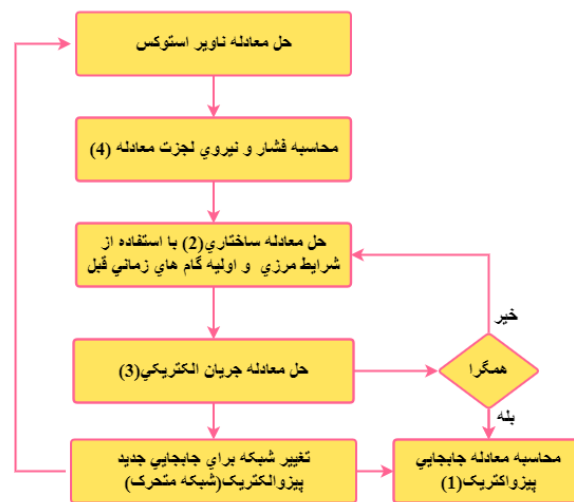
معادله حل جریان با پیزوالکتریک شامل الگوریتم سه طرف بین، آشفتگی جریان سیال، جریان الکتریکی و رفتار ساختاری پیزوالکتریک است که موجب پیچیدگی شبیه سازی شده است. الگوریتم سه طرف حیطه آیرودینامیکی، مکانیکی و الکتریکی را کوپل و توسعه داده است. برای حل معادلات کوپل الکترومکانیکی، جابجایی عرضی پیزوالکتریک $y(x, t)$ را می‌توان با سری مطلق و همگرا توابع ویژه بر اساس بسط زیر بیان کرد:

$$y(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r(t) \quad (1)$$

$$\eta_r(t) = \frac{1}{\omega_{rd}} \int_{\tau=0}^t [f(\tau) - \chi_r v(\tau)] e^{-\zeta_r \omega_r (t-\tau)} \sin(\omega_{rd}(t-\tau)) d\tau, \chi_r = \vartheta \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} \quad (2)$$

$$v(t) = e^{-t/\tau_c} \left(\int e^{-t/\tau_c} \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \frac{d\eta_r(t)}{dt} dt + c \right) \quad (3)$$

c یک ثابت دلخواه بسته به شرط اولیه اعمال شده در معادله (۳) است. از آنجایی که جابجایی اولیه و سرعت اولیه تیر صفر در نظر گرفته شده است، این ثابت دلخواه صفر است ($c = 0$) معادلات کوپل الکترومکانیکی، یعنی معادله (۲) و معادله (۳)، به گونه‌ای به دست می‌آیند که ولتاژ خروجی $v(t)$ و پاسخ مکانیکی $\eta_r(t)$ با حل عددی این معادلات به دست می‌آیند. پس از آن، جابجایی عرضی پیزوالکتریکی در هر موقعیت می‌توان پاسخ مکانیکی در معادله (۱) تعیین کرد. نیروی ناشی از جریان سیال از توزیع فشار و تنش برشی لزجت دیوار با ادغام روی سطح تیر پیزوالکتریک به دست می‌آید.



شکل ۲: فلوچارت معادلات حاکم بر مسیر و فرایند حل آن‌ها

نیروی سیال توزیع شده در هر سلول شبکه بر روی توابع ویژه به شرح زیر پیش‌بینی می‌شود:

$$f_r(t) = \int_{x=0}^L (f_p(x, t) + f_v(x, t)) \phi_r(x) dx \quad (4)$$

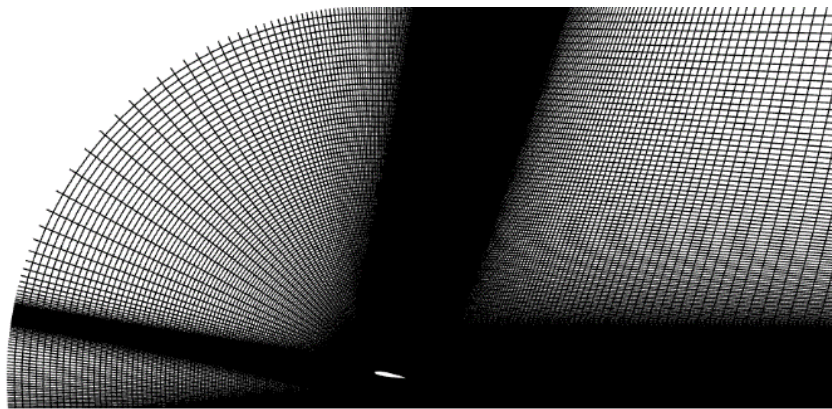
که در آن $f_p(x, t)$ و $f_v(x, t)$ فشار خالص و نیروهای لزجت هستند که روی سطح تیر اعمال می‌شوند. در هر مرحله زمانی، نیروی مودال ناشی از سیال f_r ثابت فرض شده و در حل ساختار معادله استفاده می‌شود. معادلات کوپل الکترومکانیکی، یعنی معادلات (۲) و (۳)، به طور مکرر حل می‌شوند تا زمانی که ولتاژ همگرا و پاسخ مکانیکی در هر مرحله زمانی پیدا شود. انحراف پیزوالکتریک با استفاده از معادله (۱) تعیین می‌شود، و شبکه محاسبات سیال متعاقباً بر این اساس تغییر می‌کند. در نهایت معادلات RANS حل شده بر روی سیال و تغییر شکل شبکه و نیروهای تصحیح شده روی سطوح پیزوالکتریک اندازه‌گیری می‌شوند. این مراحل حل در هر مرحله زمانی تکرار می‌شوند تا زمانی که تغییرات در شکل پیزوالکتریک در یک معیار از پیش تعیین شده همگرا شوند. معادلات حاکم بر جریان سیال لزج و تراکم ناپذیر بر اساس معادلات ناپایدار ناویر-استوکس توصیف شده است. رابطه معادلات تعادل جرم و موازنه حرکت برای یک سیال تراکم ناپذیر به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \right) \quad (6)$$

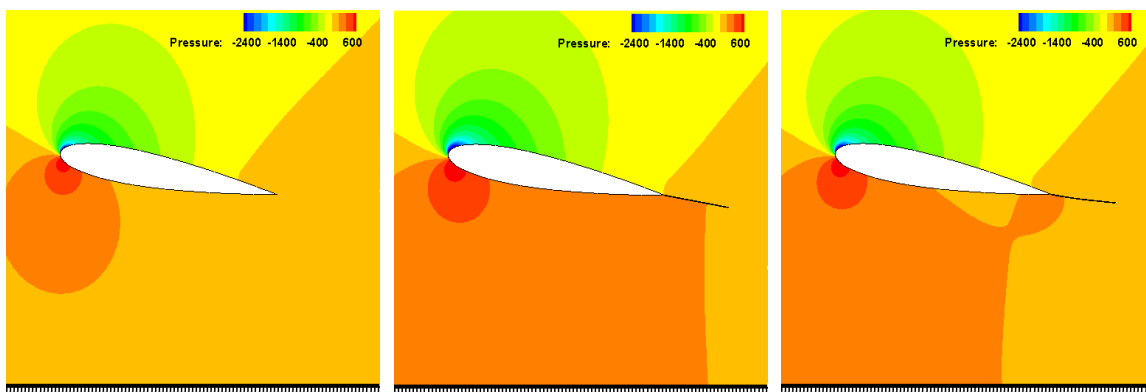
۳- تعریف مسئله و شبیه‌سازی

شبیه‌سازی با ایرفویل NACA0015 در زاویه حمله ۱۰ درجه و فاصله سطح ۰/۸ و جریان تراکم‌ناپذیر و آشفته در رینولدز ۲۴۰۰۰۰ صورت گرفته است. شبکه‌بندی ایجادشده از نوع با سازمان بوده و با نزدیک‌تر شدن به سطح دیواره و ایرفویل متراکم‌تر می‌شود.



شکل ۱: شبکه‌بندی

۴- نتایج



ایرفویل

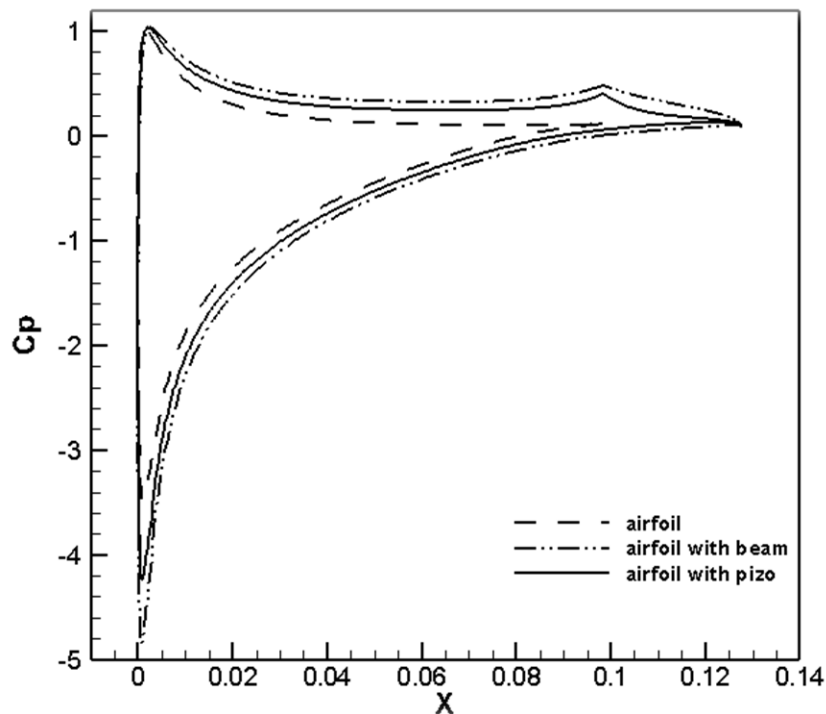
ایرفویل با تیر

ایرفویل با پیزوالکتریک

شکل ۳: مقایسه کانتور فشار حول بالواره با شرایط مختلف به ازای فاصله از سطح مشخص ۰/۸ و زاویه حمله ۱۰ درجه

با مقایسه کانتورهای فشار فوق، مشهود است که فشار زیر ایرفویل با تیر و با پیزوالکتریک نسبت به حالت ایرفویل افزایش پیدا کرده و به تبع از فشار که منجر به افزایش برآ می‌شود. داده‌های موجود در جدول (۱) صحت این نتیجه را تایید می‌کند. همچنین

اضافه شدن تیر به انتهای ایرفویل، جریان در نوک ایرفویل تحت تاثیر قرار داده است که باعث بزرگ شدن و تاخیر در منطقه حباب جدایش شده است.



شکل ۴: مقایسه ضریب فشار بالواره در شرایط مختلف به ازای زاویه حمله ۱۰ درجه و فاصله از سطح ۰/۸

نمودار ضریب فشار فوق بیان می‌کند که اضافه شدن تیر به ایرفویلی که در مجاورت سطح قرار دارد منجر به افزایش فشار سطح زیر ایرفویل شده که این افزایش فشار سبب افزایش برآ می‌شود و نیروهای آیرودینامیکی روی سطح به دلیل عدم حضور دیواره در بالای ایرفویل به نسبت نیروهای آیرودینامیکی سطح زیرین ایرفویل کمتر دچار تغییر شده است.

جدول ۱: مقایسه ضریب برآ و ضریب پسا در زاویه حمله ۱۰ درجه و فاصله سطح ۰/۸

	ضریب برآ	ضریب پسا
کار تجربی احمدوشارما [۱۵]	۰/۹۸	۰/۰۲۲
ایرفویل	۰/۹۳	۰/۰۲۲
ایرفویل با تیر	۱/۳۸	۰/۰۲
ایرفویل با پیزوالکتریک	۰/۹۵	۰/۰۱۹

با دقت به مقادیر جدول فوق می‌توان دریافت که حضور پیزوالکتریک باعث کاهش ضریب پسا نسبت به حالت ایرفویل و حالت ایرفویل با تیر است. همچنین نیرو برآ نسب به حالت ایرفویل افزایش پیدا کرده است. اگر چه نیرو برآ در حالت ایرفویل با تیر از حالت ایرفویل با پیزوالکتریک بیشتر است که علت آن متحرک بودن پیزوالکتریک است زیرا با جابجایی پیزوالکتریک فشار ایجاد شده در سطح زیرین آن تغییر کرده و شبیه‌سازی متغیر با زمان است اگر چه داده‌های گزارش شده متوسط‌گیری شده است.

۵- نتیجه‌گیری

داده‌های فوق‌نشان می‌دهند اضافه شدن تیر حتی بدون فعال کردن قسمت متحرک شبیه‌سازی منجر به بهبود نیروهای آیرودینامیکی شده است. مطالعه حاضر یک راه حل بهینه و همگرا برای پرندگان کوچک ارائه کرده است که با حداقل زمان و هزینه منجر به افزایش مداومت پروازی شده است و ایده پیزوالکتریک برای پرنده کوچک بال ثابت که در مجاورت سطح پرواز می‌کنند قابل توجه است زیرا منجر به کاهش ۱۵ درصدی ضریب پسا و افزایش ۲ درصدی ضریب برآ شده است.

مراجع

- [¹] Xiang, J.; Wu, Y.; Li, D., (2015), Energy harvesting from the discrete gust response of a piezoaeroelastic wing, modeling and performance evaluation. *J. Sound Vib.* 343, 176–193. <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2014.12.023>
- [²] Chandrasekhar, A.; Vivekananthan, V.; Khandelwal, G.; Kim, S.J., (2019), A fully packed waterproof, humidity resistant triboelectric nanogenerator for transmitting Morse code. *Nano Energy* 60, 850–856. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.04.004>
- [³] Vivekananthan, V.; Chandrasekhar, A.; Alluri, N.R.; Purusothaman, Y.; Joong Kim, W.; Kang, C.N.; Kim, S.J., (2019), A flexible piezoelectric composite nanogenerator based on doping enhanced lead-free nanoparticles. *Mater. Lett.* 249, 73–76. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.02.134>
- [⁴] Yang, Y.; Guo, W.; Pradel, K.C.; Zhu, G.; Zhou, Y.; Zhang, Y.; Hu, Y.; Lin, L.; Wang, Z.L., (2012), Pyroelectric nanogenerators for harvesting thermoelectric energy. *Nano Lett.* 12, 2833–2838. <https://doi.org/10.1021/nl3003039>
- [⁵] Wang, Z.; Yu, R.; Pan, C.; Li, Z.; Yang, J.; Yi, F.; Wang, Z.L., (2015), Light-induced pyroelectric effect as an effective approach for ultrafast ultraviolet nanosensing. *Nat. Commun.* 6, 8401. <https://doi.org/10.1038/ncomms9401>
- [⁶] Chabart, O.; Lilien, J., (1998), Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 74–76, 967–976. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00088-9](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00088-9)
- [⁷] Li, D.; Wu, Y.; Da Ronch, A.; Xiang, J., (2016), Energy harvesting by means of flow-induced vibrations on aerospace vehicles. *Prog. Aerosp. Sci.* 86, 28–62. <https://doi.org/10.1016/J.PAEROSCI.2016.08.001>
- [⁸] Zhao, D.; Ega, E., (2014), Energy harvesting from self-sustained aeroelastic limit cycle oscillations of rectangular wings. *Appl. Phys. Lett.* 105, 103903. <https://doi.org/10.1063/1.4895457>
- [⁹] A. Esmaeili · J. M. M. Sousa; , (2020), Flow-Driven Piezoelectric Energy Harvester on a Full-Span Wing for Micro-aerial-vehicle (MAV) Application *Arabian Journal for Science and Engineering* <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04526-2>
- [¹⁰] Toprak, A.; Tigli, O., (2014), Piezoelectric energy harvesting: state-of-the-art and challenges. *Appl. Phys. Rev.* 1, 031104. <https://doi.org/10.1063/1.4896166>
- [¹¹] Esmaeili, A.; Sousa, J.M.M., (2017), Power density ratio optimization of bimorph piezocomposite energy harvesters using a multidisciplinary design feasible method. *Compos. Struct.* 165, 171–179. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.01.031>
- [¹²] E.P. Pereira¹, A. Esmaeili¹ & J.M.M. Sousa¹; , (2021), Energy Harvesting from Piezoelectric Fringes at the Trailing edge of a Finite Wing with Leading-edge Tubercles;
- [¹³] Eduardo Piteira Pereira;, (2019), Piezoelectric Energy Harvesting from Flow-Induced Vibrations in Micro Aerial Vehicles;
- [¹⁴] Buyuan Guo, Yafeng Zhang, Jiajia Zhang;, (2020), Dynamic analysis of piezoelectrically driven flapping wing;
- [¹⁵] Ahmed MR, Sharma SD, (2005) An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect. *Experimental Thermal and Fluid Science.* Jul 1;29(6):633-47.