

مطالعه تجربی و عددی برداشت انرژی از بارگذاری هارمونیک وارد بر بال میکروپهادهای دارای نسبت منظری بالا

روح اله یگانه¹، سید امین باقرزاده^{2*}، مهدی صالحی²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد

* bagherzadeh@pmc.iaun.ac.ir, 8514143131

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 بهمن 1396

پذیرش: 02 اردیبهشت 1397

ارائه در سایت: 27 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

پیزوالکتریک

میکروپهباد

برداشت انرژی

نسبت منظری

چکیده

در این پژوهش با استفاده از مواد پیزوالکتریک یک میکرو ژنراتور به منظور تأمین انرژی مدارهای الکتریکی یک میکروپهباد طراحی شده است. برای این منظور، یک بال کامپوزیتی کامل هواپیما شامل تمامی اجزای سازه‌ای آن مانند ریبها، اسپارها و پوسته‌ها به کمک نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس طراحی شد. بر روی اسپار این بال یک قطعه از جنس پیزوالکتریک مدل‌سازی شده است. این بال به صورت تیر یکسر گیردار مدل شده که انتهای آن با فرکانس‌ها و دامنه‌های مشخص به صورت نوسانی تحریک می‌شود. در طی نوسان، میزان تنش و کرنش اجزای بال با استفاده از روش المان محدود کسب شده و اختلاف پتانسیل با کوپل معادلات حاکم پیزوالکتریک با کرنش‌ها محاسبه شده است. پس از آن، یک مدل آزمایشگاهی با مشخصات کاملاً مشابه با مدل عددی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. مقایسه نتایج به دست آمده از حل‌های عددی با آزمایش‌های تجربی به منظور صحت‌سنجی حاکی از خطاهای قابل قبول مطالعات عددی است. سپس اثر متغیرهای تأثیرگذار بر نتایج همچون نسبت منظری بال، ابعاد ماده‌ی پیزوالکتریک، ضخامت اسپار و فرکانس تحریک بر میزان اختلاف پتانسیل ایجاد شده مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت، نتایج به دست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

Experimental and numerical studies on energy harvesting from harmonic loads acting upon the wings of high aspect ratio MAVs

Roohollah Yeganeh, Seyed Amin Bagherzadeh*, Mehdi Salehi

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

* P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, bagherzadeh@pmc.iaun.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 06 February 2018

Accepted 22 April 2018

Available Online 17 May 2018

Keywords:

Piezoelectric

MAV

Energy Harvesting

Aspect Ratio

ABSTRACT

In this study, a microgenerator is designed to supply the energy needed for electrical circuits of a MAV using piezoelectric materials. For this purpose, a composite airplane wing including all structural elements such as the ribs, spars and skins was designed in COMSOL multiphysics software. On the spar of this wing, a piezoelectric piece is modeled. The wing is modeled as a cantilever beam that its end is excited in an oscillatory manner with given frequencies and amplitudes. During the oscillation, the stress and strain of the wing elements are obtained using the finite element method and the amount of the generated voltage is calculated by coupling the piezoelectric governing equations with the strains. Next, an experimental model is created with the same characteristics of the numerical model and tested. The comparison of the results obtained by the numerical solutions with the experimental tests for the verification indicates acceptable errors of numerical studies. Afterwards, the effects of parameters such as the aspect ratio, the size of the piezoelectric material the spar thickness and the excitation frequency on the generated voltage are studied. Finally, the results have been discussed.

شده‌اند [1]. یکی از حوزه‌هایی که در این زمینه توجه متخصصان را به خود معطوف ساخته است، صنعت هوایی به ویژه هواپیماهای بدون سرنشین است؛ چرا که کمبود انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری‌ها یک مسئله محدودیت‌ساز برای مداومت پروازی آن‌ها است [2]. استفاده از ارتعاشات آیرودلاستیک⁵ برای تولید انرژی در پرنده‌های بدون سرنشین می‌تواند یکی از راهکارها برای رفع محدودیت‌های یاد شده باشد. در این روش، برداشت کننده‌های پیزوالکتریک از ارتعاشات آیرودلاستیک ناشی از تداخل

1- مقدمه

در طول دو دهه گذشته، توسعه روش‌هایی به منظور برداشت انرژی¹ از ارتعاشات محیطی، جامعه محققین را به سمت خود سوق داده است. این روش‌ها بر توانایی مواد فعالی همچون پیزوالکتریک² و مگنتواستریکتیو³ به منظور تولید پتانسیل الکتریکی در پاسخ به یک تنش⁴ مکانیکی پایه‌گذاری

¹ Energy Harvesting

² Piezoelectric

³ Magnetostrictive

⁴ Stress

⁵ Aeroelastic

پیزوالکتریک از جمله موادی هستند که اثر پیزوالکتریک از خود نشان می‌دهند. سرامیک‌های پیزوالکتریک به‌طور عمده از جنس باریم تیتانات^۶ و تیتانات زیرکونات سرب^۷ با علامت اختصاری PZT می‌باشند. از انواع انعطاف‌پذیر آن می‌توان به پلی وینیلید فلوراید^۸ با علامت اختصاری PVDF که نوعی پلیمر است نام برد. در این مقاله به‌دلیل انعطاف‌پذیری زیاد از پیزوالکتریک نوع پلیمری استفاده شده است [10].

مواد پیزوالکتریک به خاطر دارا بودن خواص دوگانه الکترومکانیکی، از روابط کوپل میدان‌های الکترومکانیکی تبعیت می‌کنند. این روابط کوپل شده به شکل معادلات (1) و (2) قابل بیان است. به این روابط، معادلات متشکله گفته می‌شود. در حالت کلی دو معادله اساسی بر رفتار پیزوالکتریک‌ها حاکم است [10]:

$$S = s^E T + d^T E \quad (1)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2)$$

در معادلات بالا S بیانگر بردار کرنش‌ها، s^E ماتریس نرمی، T بردار میدان صفر یا ثابت استرس، d ماتریس ثوابت کرنشی ماده پیزوالکتریک، E بردار میدان‌های الکتریکی، D بردار چگالی بار الکتریکی تغییرمکان‌یافته و ε ضریب نفوذپذیری است. معادله (2) بیانگر اثر مستقیم پیزوالکتریک است که بر حسگرها و ژنراتورها حاکم است و معادله (1) بیانگر اثر معکوس پیزوالکتریک‌ها است که برای بیان معادلات حاکم بر عملگرها به کار می‌رود. ماتریس‌های گسترش یافته در معادلات (1-2) به‌صورت معادله (3-8)

است:

$$S^T = [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ S_5 \ S_6] \quad (3)$$

$$S^E = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T^T = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ T_6] \quad (5)$$

$$d^T = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$D^T = [D_1 \ D_2 \ D_3] \quad (7)$$

$$E^T = [E_1 \ E_2 \ E_3] \quad (8)$$

به‌دلیل رفتار ناهمسانگرد حاکم بر مواد پیزوالکتریک، ثابت‌های این مواد با دو زیرنویس مجزا نشان داده شده‌اند.

3- مدل‌سازی و روش حل مساله

3-1- مدل‌سازی نرم افزاری

در این پژوهش یک بال کامل هواپیما به‌صورت سه بعدی مدل شده است که شامل ریب^۹، اسپار^{۱۰}، پوسته^{۱۱} و قطعات پیزوالکتریک می‌باشد (شکل 1). برای این بال، یکی از هواپرها سری ناکا به نام AG24-il انتخاب شده است که در میکروپهپادها متداول است. مشخصات بال مدل‌سازی شده با

آیرودینامیک و سازه هواپیماهای بدون سرنشین برای کاربرد در مدارهای الکترونیکی ضروری با تکیه بر ارتعاشات خود تحریکی استفاده می‌کنند. بدیهی است که این اثر برای میکروپهپادهای دارای نسبت منظری بالا اثربخش‌تر خواهد بود. از این‌رو، در مقاله حاضر به مطالعه تجربی و عددی برداشت انرژی از بارگذاری هارمونیک وارد بر بال میکروپهپادهای دارای نسبت منظری بالا پرداخته شده است.

انرژی تولید شده توسط پیزوالکتریک برای اولین بار در دانشگاه ام‌آی‌تی مورد بررسی قرار گرفت [3]. پس از آن کاربردهای برداشت انرژی از مواد پیزوالکتریک به شدت مورد بررسی قرار گرفت. اولین استفاده پیزوالکتریک در علم هوافضا به منظور برداشت انرژی را می‌توان مطالعه استیون آر دانست [4]. در این مطالعه یک مدل پروازی ساخته شده و میزان انرژی برداشت شده از پیژوسرامیک مورد بررسی قرار گرفت و با انرژی بال خورشیدی مقایسه شد. یکی دیگر از تحقیقات درباره برداشت انرژی از ارتعاشات، پژوهش‌های کارلوس دی مارکوبی است که در ابتدا برداشت انرژی بر پایه ارتعاشات را بر روی یک صفحه الکترومکانیکی مورد بررسی قرار داد سپس در پژوهشی دیگر ارتعاشات آیرودینامیک را در برداشت انرژی از یک تیر یکسر گیردار آزمایش کرد [5]. از دیگر پژوهش‌های حائز اهمیت می‌توان از پژوهش عبدالکفی نام برد. او در این پژوهش برداشت انرژی از یک ایرفویل صلب را مورد بررسی قرار داد و پدیده فلاتر را در قبال برداشت انرژی بررسی کرد [6]. محمدرضا اصغرزاده برداشت انرژی در یک تیر دوزنقه‌ای را به‌عنوان نمونه‌ای از بال دوزنقه‌ای هواپیما با روش تحلیلی اویلر-برنولی مورد بررسی قرار داد [7]. از پژوهش‌هایی که اخیراً در مورد برداشت انرژی از ارتعاشات پیزوالکتریک انجام گرفته می‌توان به پژوهش جینوو زیانگ اشاره کرد که در آن یک مدل آیرودینامیک خطی در مواجهه با تندباد پریودیک مورد بررسی قرار گرفت [8]. همچنین در پژوهش ینینگ وو یک برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک بر پایه ایرفویل با دو درجه آزادی و امکان برداشت انرژی از حرکت ایرفویل مورد بررسی قرار گرفته است [9].

با بررسی پژوهش‌های یاد شده مشاهده می‌شود که در تمامی موارد، مدل‌سازی بال به‌عنوان تیر یکسر گیردار صورت گرفته که ارزش اجرایی چندانی در عمل ندارد؛ چرا که در آن‌ها از اجزای سازه‌ای بال صرف‌نظر شده است. همچنین در تمامی بررسی‌هایی که قبلاً در این مسیر صورت گرفته است، روش حل به‌صورت حل تحلیلی بوده و از نرم‌افزار المان محدود در مبحث مطرح شده به ندرت استفاده شده است. از این‌رو، در پژوهش حاضر یک بال هواپیما که دربرگیرنده تمامی اجزا تشکیل‌دهنده آن است به‌صورت سه بعدی با روش حل المان محدود توسط نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس مورد بررسی قرار گرفته است و با مدل آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است. همچنین بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر برداشت انرژی از بال میکروپهپادها مورد بررسی قرار گرفته که در نوع خود بی‌سابقه است.

2- روابط حاکم بر مواد پیزوالکتریک

به موادی که قابلیت تولید ولتاژ الکتریکی بر اثر اعمال نیروی مکانیکی و به‌طور معکوس تولید نیروی مکانیکی بر اثر اعمال ولتاژ الکتریکی را داشته باشند، پیزوالکتریک گفته می‌شود. اثر پیزوالکتریک در تورمالین^۲، کوارتز^۳، کرات سدیم^۴، نمک راشل^۵ و برخی بلورهای دیگر دیده شده است. سرامیک‌های

^۵ Potassium Sodium Tartrate

^۶ BaTiO₃

^۷ Lead Zirconate Titanate

^۸ (C₂H₃F)_n

^۹ Rib

^{۱۰} Spar

^{۱۱} Skin

¹ MAV

² Tourmaline

³ Quartz

⁴ NaClO₃

Root	PVDF	0.1	1	8	1
------	------	-----	---	---	---

4- صحت سنجی

پس از انجام مدل سازی های نرم افزاری و آزمایشگاهی، نتایج به دست آمده از حل عددی با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش صحت سنجی شده اند. برای این منظور از بالی با نسبت منطری 8 استفاده شده است که با اعمال جابه جایی 10% طول بال در نوک بال و با فرکانس یک هرتز تحریک می شود. نمونه آزمایشگاهی مورد استفاده، مطابق مشخصات بیان شده در بخش 3 است. نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی در "شکل 6" آورده شده است.

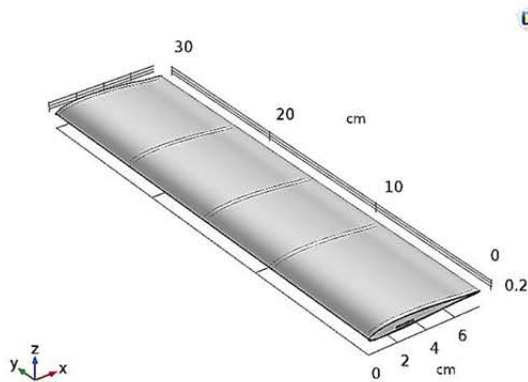


Fig. 1 The wing modeled via COMSOL multiphysics software
شکل 1 بال مدل شده توسط نرم افزار COMSOL multiphysics

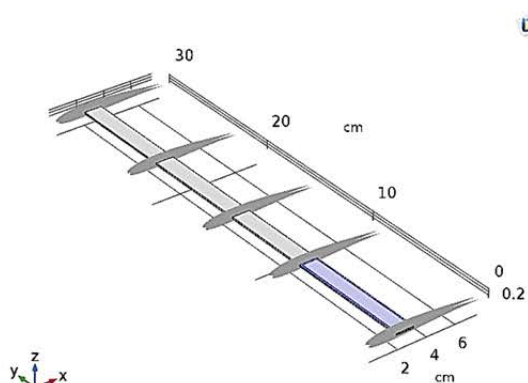


Fig. 2 The internal components of the wing modeled via COMSOL multiphysics software
شکل 2 اجزای داخلی بال مدل شده توسط نرم افزار COMSOL multiphysics

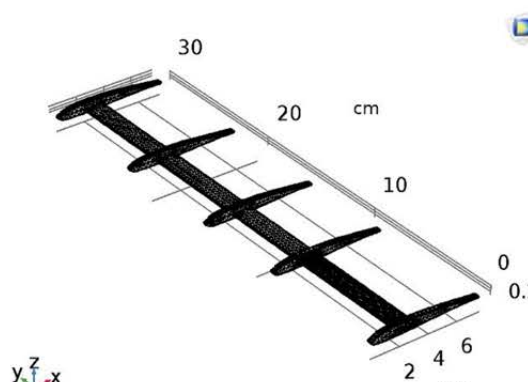


Fig. 3 Meshing of the internal components of the wing via COMSOL multiphysics software
شکل 3 مش بندی اجزای داخلی بال توسط نرم افزار COMSOL multiphysics

نسبت های منطری 8، 10 و 12 در جدول 1 آورده شده است. همچنین ابعاد پیزوالکتریک استفاده شده در بال در جدول 2 آورده شده اند. به دلیل بازدهی بیشتر فلز آلومینیوم نسبت به مواد دیگر، جنس اسپار بال از آلومینیوم 3003-H18 انتخاب شده است [2]. جنس ریبها دقیقاً همانند اسپار انتخاب شده است. همچنین جنس پوسته بال از فایبرگلاس با زمینه رزین اپوکسی انتخاب شده است. مشخصات اسپار مدل شده برای نسبت های منطری 8، 10 و 12 در جدول 3 آورده شده است. در این پژوهش، پیزوالکتریک روی قسمت ریشه بال¹ سوار شده است که در قالب برداشت کننده انرژی ایفای نقش می کند (شکل 2). پس از مدل سازی بال، مسئله به روش المان محدود² مورد بررسی قرار گرفته است. مش بندی اجزای داخلی و پوسته ی بال به ترتیب در "شکل های 3 و 4" ارائه شده است. مش بندی در نرم افزار به صورت اتوماتیک با کیفیت درجه بندی "fine" و از نوع مثلثی انجام گرفته است. حل المان محدود توسط نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس صورت پذیرفته و مقادیر تنش و کرنش و سایر پارامترها به کمک آن محاسبه شده است. سپس با کوپل کردن مقادیر به دست آمده با روابط حاکم بر مواد پیزوالکتریک بیان شده در بخش 2، مقدار اختلاف پتانسیل به وجود آمده محاسبه شده است.

3-2- مدل سازی آزمایشگاهی

به منظور مدل سازی آزمایشگاهی، یک نمونه با مشخصاتی کاملاً منطبق بر مدل ایجاد شده در حل عددی ساخته شده است. مدل ساخته شده دارای نسبت منطری 8 و دهانه بال 30 سانتی متر و عرض 7.5 سانتی متر می باشد. اسپار انتخاب شده مطابق مدل مورد استفاده در حل عددی از جنس آلومینیوم 3003-H18 در ابعاد 30 سانتی متر در 1.2 سانتی متر می باشد که در بال در فاصله 2.5 سانتی متر از لبه حمله بر روی وتر ایرفویل قرار گرفته است.

پس از ساختن نمونه آزمایشگاهی، بال در قسمت ریشه روی یک شاسی که کاملاً مهار شده است، محکم شده است. سپس مکانیزم لنگ و لغزنده بر روی همان شاسی جهت تحریک نوک بال نصب شده است. در قسمت نوک بال³ با استفاده از مکانیزم لنگ و لغزنده⁴ و یک استپر موتور، جابه جایی با اندازه 10% طول بال و فرکانس مشخص اعمال شده است. "شکل 5" نشان دهنده مدل آزمایشگاهی ساخته شده شامل شاسی، مدل و نحوه چیدمان مدل و مکانیزم تحریک است. در این مدل، جابه جایی مورد نیاز نوک بال توسط استپر موتور دقیقاً بر روی مدل ساخته شده اعمال شده است. پس از آن خروجی ولتاژ تولید شده توسط پیزوالکتریک به وسیله دیتا لاگر ثبت شد.

جدول 1 مشخصات بال مدل سازی شده

Table 1 Characteristics of the wing modeled

ردیف	نسبت منطری	Span (cm)	Chord (cm)
1	8	60	7.5
2	10	75	7.5
3	12	90	7.5

جدول 2 مشخصات پیزوالکتریک مورد استفاده

Table 2 Characteristics of the piezoelectric material

ردیف	طول (cm)	عرض (cm)	ضخامت (cm)	نوع پیزوالکتریک	محل قرار گیری
1	10	10	0.2	PVDF	Wing Root

¹ Wing Root

² Finite Element Analysis

³ Wing Tip

⁴ Crank Yoke

ابتدا بال با نسبت منظری 8 مدل‌سازی شده است. سپس شرایط مرزی طبق جدول 4 شرایط مرزی اعمال شده روی بال برای حل عددی

Table 4 Boundary conditions of the wings for the numerical solution

شرایط مرزی	جابه‌جایی نوک بال (cm)	فرکانس تحریک (Hz)	نسبت منظری	ردیف	
ریشه بال	fix	6	1	8	1
	fix	7.5	1	10	2
	fix	9	1	12	3

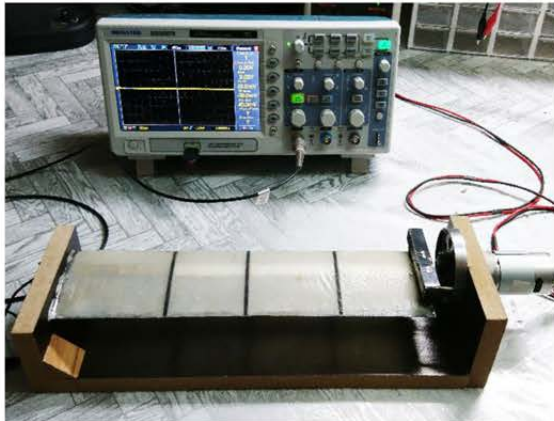


Fig. 5 The experimental model of the wings

شکل 5 مدل آزمایشگاهی بال

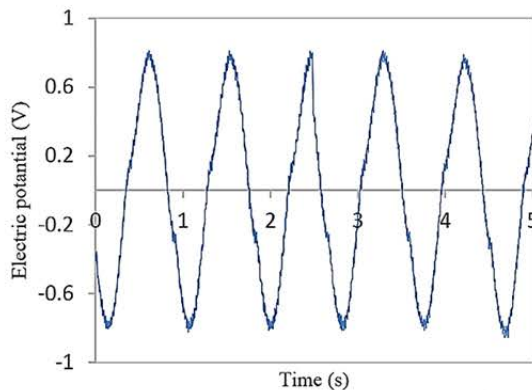


Fig. 6 The output voltage obtained from the experimental test for the wing of aspect ratio 8 and the excitation frequency 1

شکل 6 ولتاژ خروجی کسب شده از آزمایش تجربی برای بال با نسبت منظری 8 و فرکانس تحریک 1 هرتز

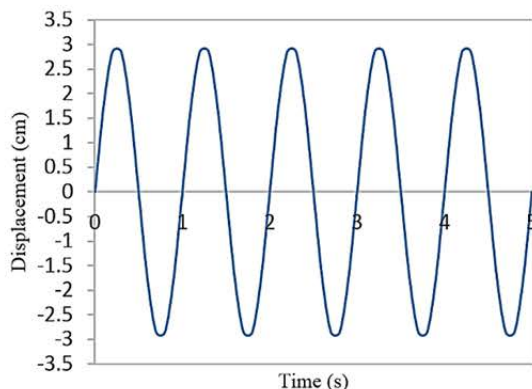


Fig. 7 The displacement applied to the wing tip of aspect ratio 8 and the excitation frequency 1 for the numerical solution

شکل 7 جابه‌جایی اعمال شده روی نوک بال با نسبت منظری 8 و فرکانس تحریک 1

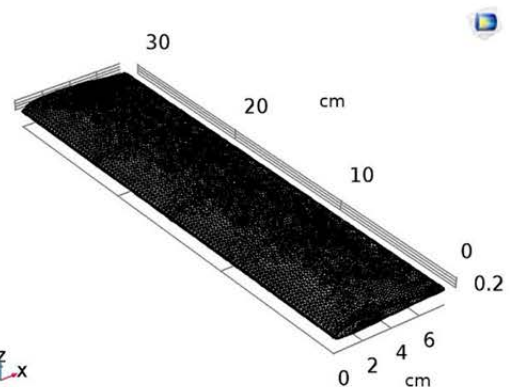


Fig. 4 Meshing of the wing surfaces via COMSOL multiphysics software

شکل 4 مش‌بندی پوسته‌ی بال توسط نرم‌افزار COMSOL multiphysics

جدول 3 مشخصات اسپار مدل‌سازی شده

Table 3 Characteristics of the spars

ردیف	نسبت منظری	طول (cm)	عرض (cm)	ضخامت (cm)	جنس
1	8	30	1	0.1	3003-H18
2	10	37.5	1	0.1	3003-H18
3	12	45	1	0.1	3003-H18

مطابق "شکل 6" مشاهده می‌شود که میزان ولتاژ پیک تا پیک¹ تولید شده توسط پیزوالکتریک 1.6 ولت می‌باشد. در "شکل 6" شکستگی موجود در نمودار مربوط به لقی ناچیز موجود در مکانیزم تحریک به دلیل قفل نشدن مکانیزم می‌باشد.

از سوی دیگر، به منظور حل نرم‌افزاری پس از طراحی بال با نسبت منظری 8 مطابق مشخصات بیان شده در بخش 3، شرایط مرزی مسئله به صورت ثابت کردن کامل ریشه بال و سپس ایجاد جابه‌جایی کلی 6 سانتی‌متر (+3 سانتی‌متر در جهت مثبت محور Z و -3 در جهت منفی محور Z) بر روی نوک بال اعمال شده است. نرخ تغییر مکان از آستانه منفی تا آستانه مثبت جابه‌جایی، با فرکانس یک هرتز تعریف شده است. "شکل 7" نشانگر نمودار جابه‌جایی اعمال شده بر روی نوک بال است. بال به مدت پنج ثانیه در معرض جابه‌جایی قرار گرفته است و ولتاژ خروجی از میکروژنراتور ارزیابی شده است. "شکل 8" ولتاژ تولید شده توسط پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. با استفاده از "شکل 8" مشاهده می‌شود که مقدار ولتاژ پیک تا پیک خروجی از حل عددی 1.76 ولت است.

با مقایسه مقدار ولتاژ خروجی از نتایج آزمایشگاهی و حل نرم‌افزاری می‌توان مشاهده کرد که در آزمایش تجربی، مقدار اختلاف پتانسیل پیک تا پیک به میزان 0.16 ولت کمتر از حل نرم‌افزاری است که به دلیل وجود اختلافاتی از قبیل لقی ناچیز مکانیزم تحریک، مقدور نبودن ایجاد کامل شرط کلمپ در محیط آزمایشگاهی و اختلاف ناچیز بین پیزوالکتریک در محیط عملی و تئوری است. با استفاده از مقدار ولتاژهای یاد شده، میزان خطا 9.1 درصد است که در محدوده قابل قبول قرار دارد.

5- نتایج

5-1 بررسی اثرات نسبت منظری

¹ Peak-to-Peak

اختلاف پتانسیل در بال با نسبت منظری 10 و 12 بررسی شده است. نتایج به دست آمده از این نسبت‌های منظری به ترتیب در جدول‌های 7 و 8 آورده شده است. با توجه به جدول‌های 6-8 مشخص می‌شود که با افزایش طول پیزوالکتریک، ابتدا اختلاف پتانسیل تولید شده افزایش یافته و پس از آن تنزل یافته است. همان‌گونه قبلاً گفته شد تولید انرژی در پیزوالکتریک با کرنش رابطه دارد، همچنین خود کرنش نیز طبق قانون هوک با تنش مرتبط

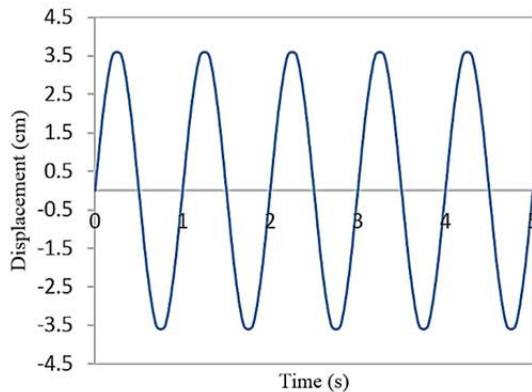


Fig. 9 The displacement applied to the wing tip of aspect ratio 10 and the excitation frequency 1 for the numerical solution

شکل 9 جابه‌جایی اعمال شده روی نوک بال بانسبت منظری 10 و فرکانس تحریک 1 هرتز برای حل عددی

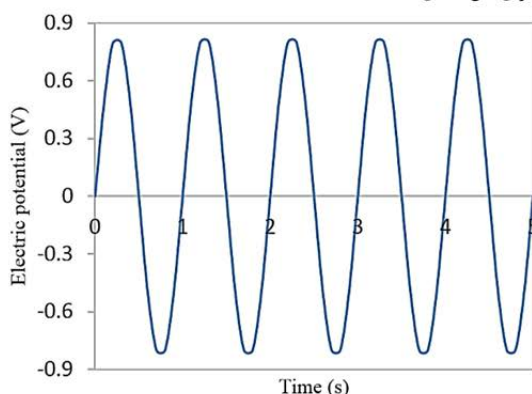


Fig. 10 The voltage generated by the wing of aspect ratio 10 and the excitation frequency 1 for the numerical solution

شکل 10 اختلاف پتانسیل تولید شده در بال بانسبت منظری 10 و فرکانس تحریک 1 هرتز برای حل عددی

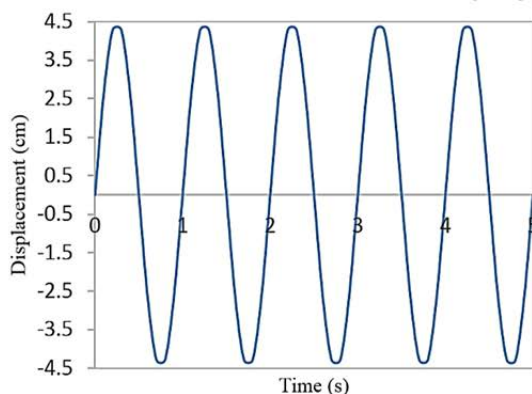


Fig. 11 The displacement applied to the wing tip of aspect ratio 10 and the excitation frequency 1 for the numerical solution

شکل 11 جابه‌جایی اعمال شده روی نوک بال بانسبت منظری 12 و فرکانس تحریک 1 هرتز برای حل عددی

هرتز برای حل عددی

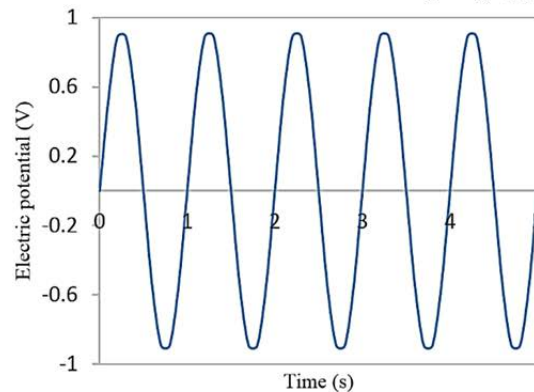


Fig. 8 The voltage generated by the wing of aspect ratio 8 and the excitation frequency 1 for the numerical solution

شکل 8 اختلاف پتانسیل تولید شده در بال بانسبت منظری 8 و فرکانس تحریک 1 هرتز برای حل عددی

جدول 4 بر روی آن اعمال شده است. نمودار جابه‌جایی اعمال شده بر روی نوک بال و ولتاژ تولید شده توسط پیزوالکتریک بیشتر در "شکل‌های 7 و 8" آمده است. مشاهده می‌شود که مقدار پیک تا پیک اختلاف پتانسیل ایجاد شده 1.76 ولت به دست آمده است.

در قدم بعد، بال با نسبت منظری 10 مدل‌سازی شده است و شرایط مرزی جدول 4 بر روی آن اعمال شده است. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که اندازه PVDF در تمام نسبت منظری‌ها ثابت است. "شکل 9" بیانگر جابه‌جایی اعمال شده بر نوک بال با نسبت منظری 10 است. با استفاده از "شکل 10" مشاهده می‌شود که مقدار پیک تا پیک اختلاف پتانسیل ایجاد شده 1.6 ولت است.

در نهایت، تحلیل بال با نسبت منظری 12 صورت پذیرفته است. "شکل 11" نشانگر میزان جابه‌جایی اعمال شده روی نوک بال است. همچنین نمودار خروجی نرم‌افزار مربوط به اختلاف پتانسیل تولید شده در "شکل 12" آورده شده است. با استفاده از "شکل 12" مشاهده می‌شود که مقدار ولتاژ تولید شده توسط بال با نسبت منظری 12، مقدار 0.65 در بازه مثبت و مقدار 0.65 ولت در بازه منفی است، که پیک تا پیک آن مقدار 1.3 ولت است.

ولتاژ استخراج شده از سه نسبت منظری بررسی شده در جدول 5 آمده است. همان‌طور که از جدول 5 مشخص است افزایش نسبت منظری و اعمال تحریک با دامنه‌ی متناسب با نسبت منظری، موجب کاهش اختلاف پتانسیل تولیدی شده است. دلیل این امر آن است که با افزایش نسبت منظری نرمی بال افزایش می‌یابد و تنش و به طبع آن کرنش ایجاد شده در اسپار بال کاهش می‌یابد. تولید انرژی در پیزوالکتریک با کرنش رابطه دارد، بنابراین با کاهش کرنش انرژی تولید شده کاهش یافته است.

5-2- بررسی اثرات طول پیزوالکتریک

در این بخش نسبت طول پیزوالکتریک به طول بال در مقادیر 30، 45، 60، 75 و 90 درصد طول اسپار، روی اسپار بال مدل‌سازی شده است. ابتدا تأثیر افزایش اندازه پیزوالکتریک بر روی ایجاد اختلاف پتانسیل در بال با نسبت منظری 8 بررسی شده است. نتایج به دست آمده از نسبت منظری 8 در جدول 6 آورده شده است. در این بخش به منظور جلوگیری از طولانی شدن مطلب، از آوردن نمودارهای مربوط به ولتاژ تولید شده توسط پیزوالکتریک‌ها خودداری شده است. در گام بعد، تأثیر اندازه پیزوالکتریک بر روی ایجاد

جدول 8 اختلاف پتانسیل ایجاد شده توسط بال با نسبت منظری 12 و اندازه‌های مختلف پیزوالکتریک

Table 8 The voltage created generated by the wings of aspect ratios of 12 and various piezoelectric sizes

ولتاژ تولید شده (V)	طول پیزوالکتریک (cm)	ردیف
1.2	13.5	1
1.24	20.25	2
1.26	27	3
1.2	33.75	4
1.16	40.5	5

3-5- بررسی اثرات ضخامت اسپار بال

در این بخش تأثیر ضخامت اسپار بر انرژی تولید شده توسط پیزوالکتریک بررسی شده است. برای این کار به صورت نمونه، یک بال با نسبت منظری 8 مدل‌سازی شده است. همچنین طول پیزوالکتریک مقدار 8 سانتی‌متر فرض شده است. سپس شرایط مرزی طبق جدول 4 بر روی آن اعمال شده است. میزان ولتاژ تولید شده نسبت به افزایش ضخامت اسپار در جدول 9 آمده است.

در این قسمت با افزایش ضخامت اسپار فاصله سطحی که پیزوالکتریک بر روی آن مدل شده است از تار خنثی بیشتر شده است. با استناد به این که در تحلیل‌ها از جابه‌جایی استفاده شده است، این نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش ضخامت، نیروی بیشتری به بال وارد شده است. در نتیجه ممان بیشتری در اسپار بال به وجود آمده است. با توجه به روابط ممان خمشی و همچنین روابط کرنش، این نتیجه گرفته می‌شود که کرنش در سطح اسپار افزایش یافته است. بنابراین ولتاژ با افزایش ضخامت اسپار افزایش داشته است.

4-5- بررسی اثرات تغییر فرکانس تحریک

در این قسمت تأثیر افزایش فرکانس تحریک بر انرژی تولید شده توسط پیزوالکتریک بررسی شده است. در این مطالعه فرکانس تحریک از مقدار 1 تا 6 اعمال شده است. با اعمال شرایط مرزی متفاوت این نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش فرکانس تحریک میزان اختلاف پتانسیل تولید شده نیز افزایش یافته است. پارامتر اساسی دیگری که با افزایش فرکانس تغییر کرده است و در فرایند الکتریسیته تولید شده اهمیت ویژه‌ای دارد توان RMS¹ است. با توجه به داده‌های خروجی از دیتالاگر مشخص شد که با افزایش فرکانس توان مفید خروجی هم افزایش یافته است. در جدول 10 نرخ تغییرات ولتاژ و توان مفید تولید شده نسبت به افزایش فرکانس آورده شده است.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با دو روش تجربی و عددی به بررسی برداشت انرژی از ارتعاشات بال یک میکروپهپاد توسط مواد پیزوالکتریک پرداخته شد. برای حل

جدول 9 میزان ولتاژ تولید شده نسبت به افزایش ضخامت اسپار بر روی بال با نسبت منظری 8

Table 9 The amount of voltage produced relative to the increase of spar thickness on the wing with the AR 8

ولتاژ تولید شده (V)	ضخامت اسپار (cm)	ردیف
1.68	0.1	1
4.2	0.15	2
6	0.2	3
7.8	0.25	4
9.6	0.3	5

¹ Root mean square

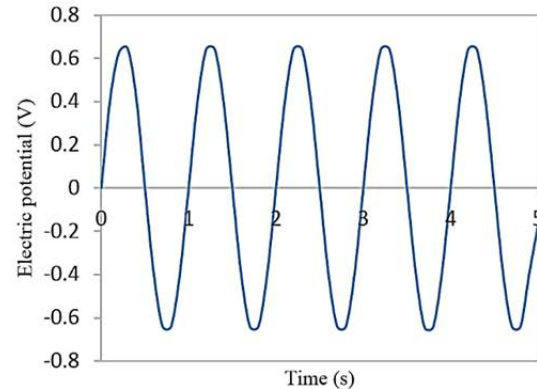


Fig. 12 The voltage generated by the wing of aspect ratio 12 and the excitation frequency 1 for the numerical solution

شکل 12 اختلاف پتانسیل تولید شده در بال با نسبت منظری 12 و فرکانس تحریک 1 هرتز برای حل عددی

جدول 5 ولتاژ استخراج شده از بال‌های دارای نسبت منظری 8، 10 و 12 با اندازه‌ی ثابت پیزوالکتریک در فرکانس 1 هرتز

Table 5 The voltage generated by the wings of aspect ratios of 8, 10 and 12 with a fixed size of the piezoelectric at the frequency of 1 Hz

ولتاژ تولید شده (V)	میزان جابه‌جایی اعمال شده (cm)	نسبت منظری	ردیف
1.76	6	8	1
1.6	7.5	10	2
1.3	9	12	3

است. لحظه‌ای که نمودار جابه‌جایی محور زمان را قطع می‌کند، روی سطح پیزوالکتریک دو نوع تنش در جهت‌های مخالف هم ایجاد شده است که قسمتی از اسپار دارای تنش با علامت مثبت و قسمت دیگر دارای تنش با علامت منفی است. این اختلاف علامت تنش باعث به وجود آمدن دو نوع اختلاف پتانسیل با علامت‌های مثبت و منفی روی پیزوالکتریک شده است و همین اختلاف علامت در ولتاژ تولید شده باعث خنثی شدن مقداری از ولتاژ تولید شده می‌شود. به همین خاطر با افزایش طول پیزوالکتریک از مقداری معین، اختلاف پتانسیل تولید شده کاهش می‌یابد.

جدول 6 اختلاف پتانسیل ایجاد شده توسط بال با نسبت منظری 8 و اندازه‌های مختلف پیزوالکتریک

Table 6 The voltage created generated by the wings of aspect ratios of 8 and various piezoelectric sizes

ولتاژ تولید شده (V)	طول پیزوالکتریک (cm)	ردیف
1.76	9	1
1.84	13.5	2
1.88	18	3
1.8	22.5	4
1.6	27	5

جدول 7 اختلاف پتانسیل ایجاد شده توسط بال با نسبت منظری 10 و اندازه‌های مختلف پیزوالکتریک

Table 7 The voltage created generated by the wings of aspect ratios of 10 and various piezoelectric sizes

ولتاژ تولید شده (V)	طول پیزوالکتریک (cm)	ردیف
1.4	11.25	1
1.46	16.875	2
1.5	22.5	3
1.42	28.125	4
1.26	33.75	5

جدول 10 میزان ولتاژ و توان مفید تولید شده نسبت به تغییرات فرکانس تحریک بر روی بال با نسبت منطری 8

اسپار، میزان اختلاف پتانسیل تولید شده نیز افزایش خواهد یافت. با افزایش ضخامت اسپار فاصله سطحی از اسپار که پیزوالکتریک روی آن مدل شده است، از تار خنثای اسپار افزایش می‌یابد. با فاصله گرفتن از تار خنثی، تنش ایجاد شده در پیزوالکتریک نیز افزایش یافته است که این امر باعث افزایش ولتاژ تولید شده توسط پیزوالکتریک خواهد شد. در نتیجه با افزایش ضخامت اسپار انرژی بیشتری تولید خواهد شد.

در آخر با افزایش فرکانس، ولتاژ تولید شده توسط پیزوالکتریک همچنین به تبع آن توان مفید تولید شده نیز افزایش یافت. بنابراین با افزایش فرکانس تحریک توان تولید شده افزایش خواهد یافت.

7- فهرست علائم

سانتی‌متر	cm
بردار چگالی بار الکتریکی تغییر مکان یافته	D
ماتریس ثوابت کرنشی	d
بردار میدان‌های الکتریکی	E
هرتز	Hz
میلی‌ولت	mV
Polyvinylidene fluoride	PVDF
Lead zirconate titanate	PZT
توان متناوب (Root mean square)	RMS
بردار کرنش	S
ماتریس نرمی	S^E
نشان دهنده میدان صفر یا ثابت استرس	T
ولتاژ	V

علائم یونانی

ضریب نفوذ پذیری	ϵ
-----------------	------------

8- مراجع

- H. S. Kim, J. H. Kim, J. Kim, A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 6, pp. 1129-1141, 2011.
- S. Mohammadi, A. Khodayari, A. Esfandiari, Energy Harvesting from clamped beam vibrations with a piezoelectric layer via strain energy method, *Proceedings of The 2nd international Emerging Trends in Energy Conservation – ETEC*, Tehran, Iran, February 19-20, 2013. (in Persian)
- T. Starmer, Human-powered wearable computing, *IBM Systems Journal*, Vol. 35, No. 3.4, pp. 618-629, 1996.
- S. R. Anton, D. J. Inman, Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles, *Proceedings of The Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008*, Vol. 692824, San Diego, California, United States, March 12-15, 2008.
- C. De Marqui, W. G. Vieira, A. Erturk, D. J. Inman, Modeling and analysis of piezoelectric energy harvesting from aeroelastic vibrations using the doublet-lattice method, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 133, No. 1, pp. 011003, 2011.
- A. Abdelkefi, Aeroelastic energy harvesting: A review, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 100, pp. 112-135, 2016.
- M. Asgharzadeh, K. Jahani, A. Kianpoor, M. H. Sadeghi, Investigating energy harvesting from unimorph trapezoidal beam vibrations using distributed parameters method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 96-102, 2015. (in Persian)
- J. Xiang, Y. Wu, D. Li, Energy harvesting from the discrete gust response of a piezoaeroelastic wing: Modeling and performance evaluation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 343, pp. 176-193, 2015.
- Y. Wu, D. Li, J. Xiang, A. Da Ronch, A modified airfoil-based piezoaeroelastic energy harvester with double plunge degrees of freedom, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, Vol. 6, No. 5, pp. 244-247, 2016.
- A. Tolo, M. Gharib, H. Roodi, *Piezoelectric and its Application*, Tehran: Elyas, 2012. (in Persian)

جدول 10 میزان ولتاژ و توان مفید تولید شده نسبت به تغییرات فرکانس تحریک بر روی بال با نسبت منطری 8

Table 10 The voltage and RMS power produced relative to the variation of the excitation frequency on the wing with the AR 8

ردیف	فرکانس تحریک (Hz)	ولتاژ تولید شده (V)	توان مفید (mV)
1	1	1.62	560
2	2	2.02	680
3	3	2.18	720
4	4	2.28	740
5	5	2.28	760
6	6	2.34	780

عددی، یک بال کامپوزیتی کامل هواپیما شامل تمامی اجزای سازه‌ای آن مانند ریب‌ها، اسپارها و پوسته‌ها به کمک نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس طراحی شد. بر روی اسپار این بال یک قطعه از جنس پیزوالکتریک مدل‌سازی شده است. این بال به صورت تیر یکسر گیردار مدل شده که انتهای آن با فرکانس‌ها و دامنه‌های مشخص به صورت نوسانی تحریک می‌شود. در طی نوسان، میزان تنش و کرنش اجزای بال با استفاده از روش المان محدود کسب شد و اختلاف پتانسیل با کوپل معادلات حاکم پیزوالکتریک با کرنش‌ها محاسبه شد. پس از آن، یک مدل آزمایشگاهی با مشخصات کاملاً مشابه با مدل عددی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور صحت‌سنجی، نتایج به دست آمده از حل نرم‌افزاری با نتایج به دست آمده از مدل تجربی مقایسه شد. با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل تجربی، خطای 9.1 درصد برای مدل عددی به دست آمد.

در این پژوهش تأثیرات متغیر نسبت منطری، افزایش طول پیزوالکتریک، افزایش ضخامت اسپار و افزایش فرکانس تحریک بر تولید انرژی بررسی شد. با افزایش نسبت منطری مشاهده گردید که این کار با فرض ثابت بودن اندازه پیزوالکتریک و اعمال جابه‌جایی با دامنه ده درصد از طول بال، روی نوک بال باعث کاهش تولید انرژی خواهد شد. با افزایش نسبت منطری، کرنش ایجاد شده روی اسپار کاهش می‌یابد. همچنین همان‌گونه که از روابط پیزوالکتریک مشخص است با کاهش نرخ کرنش، انرژی کمتری تولید می‌شود. در نتیجه با افزایش نسبت منطری در شرایط مذکور انرژی کمتری تولید خواهد شد.

در قسمت بعد با افزایش طول پیزوالکتریک، ابتدا ولتاژ تولید شده افزایش یافت (تقریباً تا 50 درصد طول اسپار) و سپس با افزایش طول پیزوالکتریک، ولتاژ تولید شده کاهش یافت. دلیل این امر این است که زمانی که مکان نوک بال به نقطه صفر حرکت می‌رسد، در اسپار تغییر جهت ممان خمشی بوجود می‌آید. به عبارت دیگر با رسیدن نوک بال به نقطه صفر حرکت (نقطه‌ای که نمودار محور زمان را قطع می‌کند) علامت تنش به وجود آمده تغییر می‌کند. طبق معادلات حاکم بر پیزوالکتریک‌ها، میزان انرژی تولید شده توسط پیزوالکتریک با نرخ کرنش ایجاد شده در آن تناسب دارد. با این تفاسیر در لحظه‌ای که نمودار جابه‌جایی محور زمان را قطع می‌کند روی سطح پیزوالکتریک دو نوع تنش با علامت‌های مخالف هم ایجاد شده است و قسمتی از اسپار دارای تنش با علامت مثبت و قسمتی دیگر دارای تنش با علامت منفی است. این اختلاف علامت باعث به وجود آمدن دو نوع اختلاف پتانسیل با علامت‌های مختلف روی پیزوالکتریک شده که باعث افت ولتاژ تولید شده را نتیجه داده است. بنابراین اگر اندازه پیزوالکتریک تا حدی باشد که در محدوده تنش متقابل به وجود آمده نباشد ولتاژ خروجی بیشتری تولید خواهد کرد.

با افزایش ضخامت اسپار این نتیجه استنباط شد که با افزایش ضخامت