

# طراحی و مدل‌سازی دستگاه آزمایشگاهی افسار پرواز با هدف تحلیل عملکرد پرواز حشرات

زینب غلامی شعبانی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،  
sh.zeinab24@gmail.com

عبدالمجید خوشنود\*

دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، khoshnood@kntu.ac.ir

## چکیده

دستگاه آسیاب پروازی وسیله‌ای است که به مطالعه بر روی پرواز حشرات می‌پردازد. به کمک این وسیله می‌توان پارامترهای اصلی عملکرد پرواز همچون مسافت، سرعت و مدت زمان پرواز را محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. این وسیله علاوه بر حوزه هوافضا که به ارتقاء و بهینه‌سازی وسایل پرنده موجود می‌پردازد و می‌تواند الهام بخش ساخت ریزپرنده‌های بال‌زن باشد، در علوم کشاورزی نیز به منظور مبارزه با آفات و تولید محصولات کشاورزی بیشتر و مرغوب تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله به طراحی و ساخت یک نمونه دستگاه آسیاب پروازی پرداخته شده است که در عین سادگی، اطلاعات مفید و گسترده‌ای از عملکرد پرواز حشرات را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. بعد از توضیح مختصری درباره انواع روش‌های موجود در تحقیق بر روی پرواز حشرات و معرفی دستگاه‌های آسیاب پروازی، ابتدا معادلات حاکم بر دستگاه ارائه، سپس، نحوه ساخت و روش آزمایش بیان و به بررسی و مقایسه داده‌های حاصله از آزمایش و مقایسه آنها با دستگاه‌های مشابه و ارتقاء یافته، پرداخته شده است، و در نهایت، مزایا و معایب این دستگاه بیان می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آسیاب پروازی، هوافضا، کشاورزی، مسافت پرواز، مدت زمان پرواز، سرعت پرواز.

## Designing and dynamic modeling of a laboratory stand tethered flight for performance analysis of insect flight

Z. Gholami Shabani  
A. Khoshnood

Department of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
Department of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

## Abstract

The insect flight mill is a device that used for studying insect flight. With this tool, the main parameters of flight such as distance, speed and duration can be calculated and analyzed. In addition to the aerospace field, which focuses on improving and optimizing existing flying devices and can be inspiring for the construction of micro air vehicle (MAV), it is also used in agriculture to combat pests and increase the quantity and quality of agriculture products. This article discusses the design and construction of a sample insect flight mill device that provides researchers with valuable and extensive information on insect flight performance while being simple. After a brief explanation of the various exiting methods in insect flight research and the introduction of insect tethered flight device, the governing equations of the device are presented. Then, the construction method and testing procedure are described, followed by an analysis and comparison of the obtained data with similar and upgraded devices. Finally, the advantages and disadvantages of the device are discussed.

**Keywords:** Insects flight mill, Aerospace, Agriculture, Flight distance, Flight speed, Flight duration.

عملکرد پرواز رو به جلو و حالت معلق می‌باشد. بیشتر مطالعات انجام شده بر روی پرواز رو به جلوی حشرات به وسیله تونل باد صورت گرفته است. هدف اصلی این مطالعات شامل مشاهده سینماتیک بال در طول پرواز پایدار و ناپایدار، و همچنین کنترل پرواز بوده است. مطالعات پرواز رو به جلو به مدل‌سازی ریاضی بسیار دقیق و شناسایی سیستم بر مبنای مشاهده سینماتیک به طور خاص نمی‌پردازد. مطالعاتی هم که بر روی رانش و آیرودینامیک پرواز رو به جلو بوده است بسیار محدود است، چرا که با استفاده از شبیه‌سازی‌های دینامیکی صورت گرفته، و این مطالعات آزمایشگاهی در مقایسه با مطالعات پرواز معلق، بسیار محدود شده می‌باشند [۱ و ۲].

به طور کلی، برای بررسی پرواز حشرات دو روش اصلی وجود دارد، یکی این است که حشره را در طبیعت و پرواز آزادانه‌ای که دارد ردیابی و شناسایی کنند تا اطلاعات مورد نظر را به دست آورند، که این روش بسیار سخت، پیچیده و زمان‌بر است. روش دیگر استفاده از آزمایشگاه‌های پروازی از جمله آسیاب‌های پروازی است، این روش،

## ۱- مقدمه

مطالعه بر روی حشرات منجر به تحولات بسیار جالب و شگفت‌انگیزی در علوم بنیادی شده است. محدود کردن مطالعه حشرات به مطالعه بر روی پرواز آنها این پتانسیل را دارد که درهای بسیاری را به روی اکتشافاتی باز کند که در کاربردهای مهندسی بسیار مفید خواهد بود. در حال حاضر بیشتر مطالعات انجام شده بر روی حشرات مربوط به پرواز معلق آنها در محیط‌های پروازی آزاد یا بسته می‌شود. با این حال حوزه تحقیقاتی پرواز رو به جلوی حشرات، موضوعی است که کمتر به آن پرداخته شده است و فهم این موضوع بسیار مهم است، چرا که بیشتر پرواز حشرات شامل جست‌وجوی غذا، تعقیب حشرات دیگر، یافتن مناطقی برای مهاجرت و یا فرار از شکارچیان می‌شود که به طور مکرر و در طیف وسیعی از پکت‌ها و سرعت‌های پروازی انجام می‌شود. همچنین می‌توان استدلال کرد که بسیاری از ویژگی‌های پرواز حشرات در درجه اول برگرفته از پرواز رو به جلو و یا حداقل برای تعاملی بین

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: khoshnood@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۲۰/۰۶/۲۷

بسیار ساده و کارآمد است و با استفاده از آن می‌توان اطلاعات نسبتاً دقیق و خوبی را از عملکرد پرواز حشرات بدست آورد [۳-۹]. همچنین، از آنجایی که عواملی همچون دما، رطوبت، نور و سرعت باد بر روی پرواز حشرات تاثیرگذار هستند [۱۰ و ۱۱]، می‌توان این شرایط را به خوبی در آزمایشگاه‌ها فراهم کرد تا نتایج حاصله دقیق‌تر و کارآمدتر باشند.

## ۲- معرفی دستگاه‌های آسیاب پروازی

اولین آسیاب‌های پروازی به دهه ۱۹۵۰ میلادی بر می‌گردد. اولین آن در سال ۱۹۵۲ و توسط کروگ طراحی و استفاده شده است. مدل بعدی مربوط به آزمایشات دینگل می‌شود که اتصال به صورت ثابت و استاتیکی می‌باشد به طوری که مدت زمان بال‌زدن به کمک افراد با تجربه و توانمند مشاهده و گزارش می‌شد. اولین آسیاب پرواز چرخشی، متحرک و پیویا که جریان هوا را شبیه‌سازی می‌کرد توسط کوتر و در سال ۱۹۹۳ طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. مدل توسعه یافته الکترونیکی به همراه ضبط پرواز در سال ۲۰۱۳ ارائه شد [۵]. اگرچه این طرح‌ها دارای تغییرات جزئی هستند، اما همه آنها تقریباً بر اساس یک اصل هستند؛ حشره با استفاده از یک چسب مناسب، اغلب از طریق پشت قفسه سینه، به یک بازوی آسیاب فولادی یا پلاستیکی متصل می‌شود و به حشره اجازه داده می‌شود تا در یک محیط دایروی پرواز کند. آسیاب‌های پروازی بسیار سازگار هستند و طرح‌های جدیدتر می‌توانند حشرات با اندازه‌های مختلف را در خود جای دهند. داده‌های جمع‌آوری شده توسط آسیاب پروازی شامل مسافت طی شده توسط حشره بر حسب متر، مدت زمان پرواز بر حسب ثانیه و سرعت پرواز بر حسب متربرثانیه می‌باشند. با استفاده از یک زبان برنامه‌نویسی (MATLAB)، می‌توان داده‌های پروازی را برای هر حشره به طور جداگانه استفاده کرد و زمان شروع و پایان هر پرواز را جداگانه استخراج نمود و در نهایت مدت زمان، مسافت طی شده و سرعت پروازی برای هر پرواز را محاسبه و پردازش کرد [۱۲ و ۱۳].

## ۳- معادلات حاکم بر دستگاه

همانطور که در بخش قبلی بیان شد با استفاده از دستگاه آسیاب پروازی یکسری داده جمع‌آوری می‌شود، داده‌های جمع‌آوری شده شامل مواردی همچون تعداد کل چرخش‌ها، تعداد چرخش‌ها در مدت زمان یک دقیقه، و مدت زمان کل پرواز حشره خواهد بود. از آنجایی که مسیر حرکت حشره یک مسیر دایروی است، پس در نتیجه می‌توان مسافت پروازی حشره که همان محیط دایره است را بدست آورد.

$$S = 2\pi r \quad (1)$$

که در آن  $r$  شعاع دایره و بر حسب متر است. برای بدست آوردن مسافت کل پرواز حشره بر حسب متر، کافی است مسافتی را که حشره در یک دور چرخش کامل طی می‌کند را در تعداد کل چرخش‌ها ضرب کرد.

$$S_{total} = S(C) \quad (2)$$

که در آن  $C$  تعداد کل چرخش‌ها خواهد بود. یکی از داده‌های

جمع‌آوری شده تعداد چرخش‌های کامل حشره در مدت زمان یک دقیقه است که با استفاده از این داده می‌توان سرعت یا بسامد زاویه‌ای بر حسب رادیان برثانیه و در نتیجه مدت زمان طی شده در یک دور چرخش حشره بر حسب ثانیه و فرکانس یا بسامد پروازی حشره را بر حسب هرتز را بدست آورد [۱۴].

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f \quad (3)$$

یک رابطه‌ای بین سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای در حرکت دایره‌ای یکنواخت وجود دارد، در نتیجه می‌توان با استفاده از معادله (۴) اندازه سرعت پروازی حشره را بر حسب متربرثانیه بدست آورد:

$$v = r\omega = r\dot{\theta} \quad (4)$$

با وجود ثابت بودن اندازه سرعت، چون جهت سرعت تغییر می‌کند پس شتاب خواهیم داشت که به آن شتاب مرکزگرا یا شتاب جانب‌مرکز گویند و بر حسب متربرمجذورثانیه است.

$$a_c = \frac{v^2}{r} = r\omega^2 \quad (5)$$

$a_c$  شتاب مرکزگرا،  $v$  سرعت مماسی،  $r$  شعاع پرواز،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای است. بر اساس قانون دوم نیوتن، نیروی مرکزگرا نیز از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$F_c = m a_c = m \frac{v^2}{r} = m r \omega^2 \quad (6)$$

که در این رابطه  $m$  جرم حشره و بر حسب کیلوگرم است. با داشتن شتاب زاویه‌ای می‌توان گشتاور و قدرت پرواز یک حشره در حال چرخش برای چرخاندن میل پروازی را بدست آورد:

$$a_{tan} = \dot{v} = \frac{dv}{dt} = r\dot{\omega} = r\ddot{\theta} \quad (7)$$

که در این رابطه  $a_{tan}$  شتاب مماسی و واحد آن متربرمجذورثانیه است. و همچنین مطابق رابطه (۸)، رابطه‌ای بین شتاب مماسی و شتاب زاویه‌ای وجود خواهد داشت:

$$\begin{cases} \alpha = \dot{\omega} \\ \omega = \frac{v}{r} \\ a_{tan} = r\alpha \end{cases} \quad (8)$$

شتاب زاویه‌ای ( $\alpha$ ) و واحد آن رادیان برمجذورثانیه است.

حال با داشتن شتاب زاویه‌ای، شعاع بازوی پرواز و جرم حشره، می‌توان نیروی مماسی و در نتیجه مقادیر گشتاور و قدرت پرواز حشره را بدست آورد:

$$F_t = m a_{tan} = m (r\alpha) \quad (9)$$

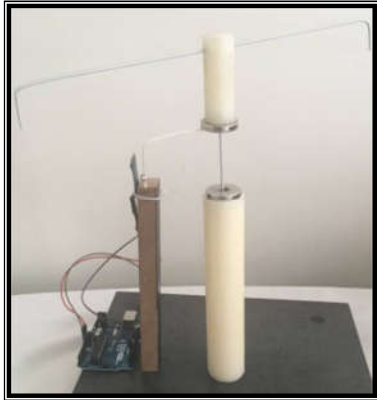
$$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v} \rightarrow L = mrv = mr^2\omega \quad (10)$$

$$\tau = \frac{dL}{dt} = mr^2 \frac{d\omega}{dt} = mr^2\alpha = I\alpha \quad (11)$$

از آنجایی که بردارهای  $r$  و  $v$  در حرکت دایروی بر یکدیگر عمود هستند، ممنتوم زاویه‌ای از رابطه (۱۰) به دست خواهد آمد.  $\tau$  نیروی گشتاور در حرکت دایروی بر حسب نیوتن در متر و  $I$  ممان اینرسی بر حسب کیلوگرم در مترمربع است. از آنجایی که بازوی آسیاب پروازی در وسط محور دستگاه قرار دارد، مقدار ممان اینرسی را می‌توان از رابطه (۱۲) محاسبه نمود. حال با داشتن سرعت زاویه‌ای و گشتاور می‌توان مقدار قدرت پرواز حشره را از رابطه (۱۳) بدست آورد:

$$I = \frac{1}{12} M L^2 \quad (12)$$

را به خوبی نشان می‌دهد. این وسیله از دو بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول میل پروازی است که چرخش‌ها را هنگام اتصال حشره فراهم می‌کند، و بخش دوم که شامل یک لپ‌تاپ متصل به برد آردینو به منظور جمع‌آوری و پردازش داده‌ها است.



شکل ۱- نمایی از آسیاب پرواز ساخته شده.

بخش اول و اصلی این وسیله شامل یک استوانه کوچک به قطر ۲۰ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر، یک استوانه بزرگ به قطر ۳۵ و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر که هر دو از جنس پلی‌اتیلن بوده، دو آهنربای نئودیمیوم به منظور شناوری، میله نازکی به قطر ۲ و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر که ما بین دو استوانه قرار می‌گیرد، بازوی آسیاب پروازی هم که حشره به آن متصل می‌شود از جنس تفلون بوده و دارای طولی به اندازه ۳۰ سانتی‌متر است، انتهای میله را هم ۹۰ درجه خم می‌کنیم. بخش دوم وسیله که بخش الکتریکی است و تعداد چرخش‌های آسیاب پروازی را شمارش می‌کند. در این آزمایش از یک نوع مگس سبز استفاده شده است. این نوع مگس دارای سایزی کوچک با طول بدنه ۱۰ میلی‌متر است. از آنجاییکه اندازه این نوع مگس بسیار کوچک است، اتصال حشره را بسیار سخت کرده است و برای اتصال آن از میکروسکوپ استفاده شده است. ابتدا حشره را به مدت ده دقیقه در یخچال قرار می‌دهند تا حشره بی‌حس یا به اصطلاح بیهوش گردد و سپس با استفاده از چسب، یک سوزن را به پشت قفسه سینه حشره می‌چسبانند.

## ۵- روش آزمایش

حشره را مطابق شکل ۲ به بازوی آسیاب پروازی متصل کرده و حشره شروع به بال‌زدن می‌کند و آزمایش شروع می‌شود. با اتصال برد آردینو به کامپیوتر، داده‌ها جمع‌آوری و در نهایت پارامترهای اساسی پرواز حشره از جمله مسافت و سرعت پروازی بدست خواهند آمد. همانطور که در بخش‌های گذشته بیان شد، هنگامیکه مگس شروع به پرواز کردن می‌کند یک مسیر دایروی را طی خواهد کرد و با هر بار عبور آهنربای بسیار کوچک از مقابل حسگر اثر-هال یک دور چرخش اندازه‌گیری و ثبت می‌شود و در نهایت با شمارش تعداد چرخش‌ها و مدت زمان پروازی، داده‌های که در جدول ۱ بیان شده‌اند به دست خواهند آمد. قابل ذکر است که داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از برنامه MATLAB به پارامترهای اصلی پرواز تبدیل شده و نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ قابل مشاهده‌اند.

$$p_f = \tau\omega \quad (13)$$

که در آن  $M$  مجموع جرم حشره، بازوی آسیاب پروازی، استوانه کوچک و یک رینگ آهنربای نئودیمیوم می‌باشد،  $L$  طول بازوی آسیاب پروازی و  $P_f$  قدرت پرواز حشره بر حسب وات است. نیروی آیرودینامیکی افقی حشره که برای چرخش میل پروازی با یک سرعت ثابت لازم می‌باشد، نیز از رابطه (۱۴) بدست می‌آید:

$$F_H = \frac{M}{L} \quad (14)$$

که در آن  $F_H$  نیروی آیرودینامیکی افقی بر حسب نیوتن است. جسمی که بر روی یک دایره حرکت می‌کند، یک شتاب مرکزگرا تولید می‌کند تا در مقابل شتاب گریز از مرکز که آن را می‌خواهد به سمت بیرون حرکت دهد، مقابله کند، پس یک غلت به سمت داخل دایره دوران ایجاد می‌شود. زاویه غلت زاویه‌ای است که حشره حول محور جانبی خود با سطح افقی می‌سازد. این زاویه از رابطه (۱۵) بدست می‌آید:

$$\tan \varphi = \frac{F_c}{W} \quad (15)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{v^2}{r a_g} \right)$$

$\varphi$  زاویه غلت بر حسب درجه،  $F_c$  نیروی جانب مرکز،  $W$  وزن حشره،  $v$  سرعت بر حسب متربرثانیه،  $r$  شعاع دایره بر حسب متر،  $a_g$  شتاب جاذبه  $(a_g = 9.81 \frac{m}{s^2})$  است.

## ۳-۱- اندازه حشره و پارامترهای بدنی آن

با استفاده از یک کولیس، عرض و طول قفسه سینه، طول بدن و از این دست پارامترها اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت وزن، حجم و چگالی حشره از روابط زیر تعیین می‌شوند [۳].

$$w = F_g = M_{insect} a_g \quad (16)$$

$$V_{insect} = \frac{\pi}{6} L_b W_T T_T \quad (17)$$

$$\rho_{insect} = \frac{M_{insect}}{V_{insect}} \quad (18)$$

$V_{insect}$  حجم حشره بر حسب میلی‌متر مکعب،  $L_b$  طول بدن حشره بر حسب میلی‌متر،  $W_T$  عرض قفسه سینه،  $T_T$  ضخامت قفسه سینه،  $\rho_{insect}$  چگالی حشره بر حسب  $(\frac{gr}{mm^3})$  و  $M_{insect}$  جرم حشره بر حسب گرم است. برای اندازه‌گیری وزن حشره از ترازوی دیجیتال استفاده می‌کنند. مساحت بال حشره هم با استفاده از برنامه پردازش تصاویر اندازه‌گیری می‌شود.

## ۳-۲- فرکانس بال‌زنی حشره

روش‌های بسیاری برای بدست آوردن فرکانس بال‌زنی وجود دارد، یکی از این روش‌ها بدست آوردن فرکانس بال‌زنی با استفاده از جرم و مساحت بال حشره است. این روش، روشی است که به صورت تجربی و تحلیلی بدست آمده است [۱۵ و ۱۶].

$$f = k \sqrt{\frac{g}{\rho} \left( \frac{\sqrt{m}}{A} \right)} = K \frac{\sqrt{m}}{A} \quad (19)$$

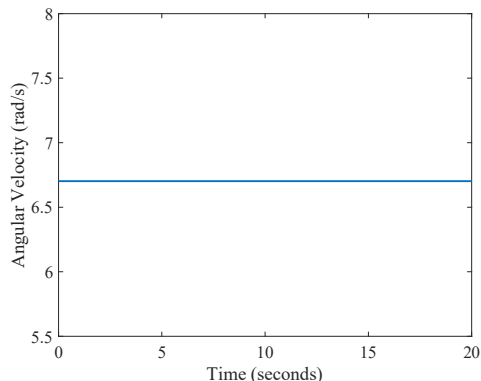
$$f \approx 317 \frac{\sqrt{m}}{A}$$

## ۴- طراحی و ساخت دستگاه

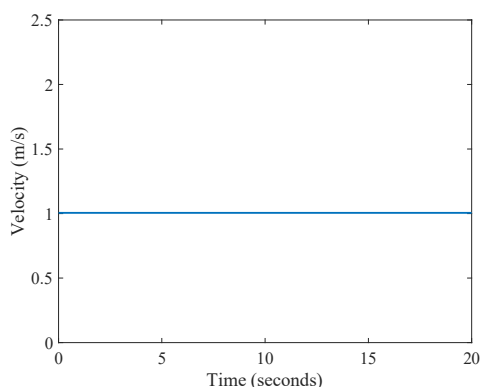
شکل ۱ طرحواره‌ای از قسمت‌های مختلف دستگاه آسیاب پروازی



شکل ۲- نمایی از اتصال حشره به دستگاه آسیاب پروازی.



شکل ۵- سرعت زاویه‌ای مگس بر حسب رادیان بر ثانیه



شکل ۶- سرعت خطی مگس بر حسب متر بر ثانیه

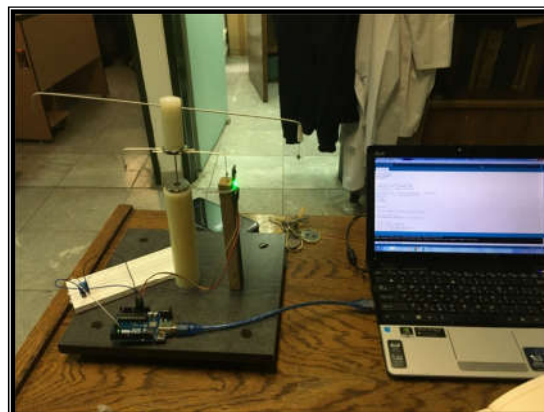
همانطور که در بخش ۳-۱ بیان شد، با داشتن یک کولیس دیجیتال می‌توان به مشخصات و ویژگی‌های بدنی حشره دست یافت. این مقادیر برای مگس ذکر شده در این پژوهش تحت جدول ۲ جمع‌آوری و ارائه شده است.

جدول ۲- داده‌هایی از ویژگی‌های ظاهری مگس و فرکانس بال‌زنی آن.

insect mass (gr)	insect length (mm)	thorax width (mm)	thorax thick (mm)
۰/۲۵	۷	۴	۲
density (gr/mm <sup>3</sup> )	wing span (mm)	wing area (mm) <sup>2</sup>	f (HZ)
۰/۰۰۸۵	۱۱	۴۴	۱۱۴

## ۶- بحث و بررسی داده‌های بدست آمده از آزمایش

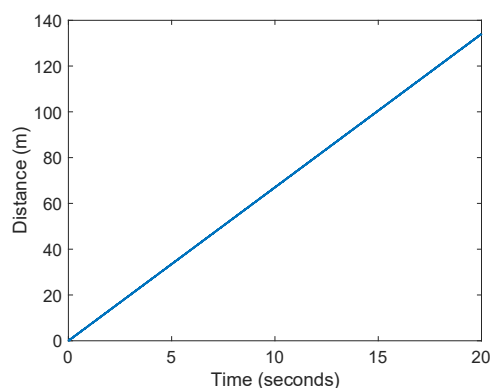
همانطور که در بخش قبل ذکر گردید، مگس مورد استفاده در این پژوهش مگس سبز است و همانطور که مشاهده می‌شود سرعت پرواز رو به جلوی آن یک متر بر ثانیه، زاویه غلت ۳۴ درجه، نیروی آیرودینامیکی ۰/۰۰۰۱ نیوتن و فرکانس بال‌زنی آن ۱۱۴ هرتز می‌باشد که با مقایسه با مگس آبی (مگس میوه) [۱۷ و ۱۸] با سرعت پروازی رو به جلوی ۱/۴ متر بر ثانیه، کل مدت زمان پروازی ۱۸۰۰ ثانیه، کل مسافت طی شده ۱۸۰۹ متر، زاویه غلت ۴۴/۵ درجه، نیروی آیرودینامیکی ۰/۰۰۰۰۲ نیوتن و فرکانس بال زنی ۱۵۹ هرتز و همچنین در مقایسه با زنبور



شکل ۳- اتصال برد آردوینو به کامپیوتر و شروع آزمایش.

جدول ۱- داده‌های اصلی بدست آمده از پرواز مگس

rpm	revolution	total time (s)	gravity ( $\frac{m}{s^2}$ )
۶۴	۱۹۲۰	۱۸۰۰	۹/۸۱
insect mass (kg)	radius flight mill (m)	length flight mill (m)	w ( $rad/s$ )
۰/۰۰۰۲	۰/۱۵	۰/۳	۶/۷
v ( $m/s$ )	f ( $1/s$ )	distance (m)	a <sub>c</sub> ( $m/s^2$ )
۱/۰۰۵	۱/۰۶	۱۸۰۹	۶/۷۳۷
F <sub>c</sub> (N)	bank angle (°)	( $rad/s^2$ )α	I (kg.m <sup>2</sup> )
۰/۰۰۱۶۸	۳۴	۰/۷	۰/۰۰۰۳۷
a <sub>t</sub> ( $m/s^2$ )	(N.m) τ	P <sub>f</sub> (w)	F <sub>H</sub> (N)
۰/۱۰۵	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱



شکل ۴- مسافت کلی طی شده توسط مگس بر حسب متر

مورد آخر این است که در آزمایشات از حشراتی با وزن ها متفاوت استفاده می‌شود. تفاوت در وزن حشرات به طور قابل توجهی بر روی حداکثر سرعت پروازی آنها موثر خواهد بود. با وجود همه این موارد، با کنترل کردن اثرات ناشی از این محدودیت‌ها، این دستگاه می‌تواند یک رویکردی جایگزین به جای تونل‌های باد در مطالعه بر روی پرواز رو به جلوی حشرات در شرایط کنترل شده باشد، و در آینده می‌توان از آن به عنوان یک ابزار متداول برای تحقیق بر روی پرواز حشرات استفاده کرد. در آخر هم، مطمئناً تفاوت‌هایی در کنترل سرعت بین پرواز آزاد و پرواز با دستگاه آسیاب پروازی وجود دارد. در پرواز آزاد، حشره می‌تواند سرعت خود را با هر ترکیبی از فراز بدن و متغیرهای سینماتیکی بال تنظیم کنند، در حالیکه در مطالعه با آسیاب پروازی، فراز بدنه محدود می‌شود و فقط به تغییرات سینماتیکی بال اجازه داده می‌شود تا سرعت را در هر شرایط آزمایشی تنظیم و تعدیل کند. با این حال، با وجود محدود کردن گام بدن، بررسی توانایی بردار نیرو با استفاده از تغییرات سینماتیکی بال در دسترس خواهد بود. همچنین، سرعت پروازی حشرات در آسیاب پرواز تحت تاثیر محدودیت‌های بصری است [۲۵] و تفاوت‌های بین پرواز آزاد و متصل در آسیاب پرواز ممکن است به فرآیند کنترل بصری نیز بستگی داشته باشد. می‌توان با بهبود دستگاه آسیاب پروازی به بررسی فرآیند کنترل بصری در حشرات نیز پرداخت و به سوالات بسیاری در این زمینه پاسخ داد.

#### ۸- سپاسگزاری

از دانشکده بهداشت دانشگاه تهران و جناب آقای دکتر کامران اکبرزاده، مسئول بخش موزه حشره‌شناسی این دانشکده، بابت همکاری در تهیه حشره و مراحل اتصال آن به میل پروازی نهایت تشکر و قدرانی را داریم.

#### ۹- مراجع

- [1] Delacato C. *Magnetically Levitated Insect Flight Mill For Forward Flight Control Analysis*. BSc Thesis, Pennsylvania State University, 2016.
- [۲] ناظمیان علانی، محسن، ولی‌پور، محمدصادق. بررسی تجربی ساختار سطح لباس بالدار بر عملکرد آیرودینامیکی مهندسی مکانیک / دانشگاه تبریز doi: 321-330. 52(4): 1401; 10.22034/jmeut.2023.52199.3127
- [3] Mohammed M, El-Shafie H, Alqahtani N. Design and validation of computerized flight-testing systems with controlled atmosphere for studying flight behavior of red palm weevil, *rhynchophorus ferrugineus* (Olivier). *Sensors*. 2021 Mar 17;21(6):2112.
- [4] Sauvard D, Imbault V, Darrouzet É. Flight capacities of yellow-legged hornet (*Vespa velutina nigrithorax*, Hymenoptera: Vespidae) workers from an invasive population in Europe. *PLoS one*. 2018 Jun 8;13(6):e0198597.
- [5] Minter M, Pearson A, Lim KS, Wilson K, Chapman JW, Jones CM. The tethered flight technique as a tool for studying life-history strategies associated with migration in insects. *Ecological entomology*. 2018 Aug;43(4):397-411.
- [6] Bruzzone OA, Villacide JM, Bernstein C, Corley JC. Flight variability in the woodwasp *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae): an analysis of flight data using wavelets. *Journal of Experimental Biology*. 2009 Mar 1;212(5):731-7
- [7] Carol, Clarck. *Emory biologists show how monarchs fly differently, but meet up and mate*. Emory news center-Emory

عسل [۱۹] با سرعت ۰/۵۶۲ متر بر ثانیه، کل مدت زمان پروازی ۱۱۱۴ ثانیه و کل مسافت طی شده ۱۸۳۴ متر است، می‌توان نتیجه گرفت که دستگاه ساخته شده به داده‌های خوبی دست یافته است، البته با ذکر این موضوع که دستگاه آسیاب پروازی به کار رفته برای آزمایش مگس آبی در مقایسه با دستگاه ساخته شده در این پژوهش به روزتر بوده و دارای امکانات بیشتری از جمله امکان تصویربرداری با دوربین‌های پرسرعت می‌باشد.

ذکر این نکته ضروری است که دستگاه آسیاب پروازی ساخته شده در این پژوهش دارای مزیت‌هایی نسبت موارد مشابه است که از جمله این موارد می‌توان به ارزان بودن مواد به کار رفته در ساخت این وسیله اشاره کرد که موجب کاهش هزینه ساخت این وسیله شده است و مورد بعدی، سادگی و قابل فهم بودن زبان برنامه نوشته شده برای این دستگاه است که کار را برای تمامی افراد با هر گونه پیشینه پژوهشی سهل و آسان می‌کند.

#### ۷- نتیجه‌گیری

وجود محور شناور، در مقایسه با آسیاب‌های پروازی سنتی که با محورهای مکانیکی کار می‌کنند، دارای اصطکاک مکانیکی بسیار کمتری بوده و با حتی می‌توان گفت که آن را از بین می‌برد، بنابراین امکان پیمایش دقیق‌تر و ساده‌تری را برای حشره فراهم می‌کند، همچنین امکان استفاده از دمپرهای آیرودینامیکی که حشره باید بر آن غلبه کند را فراهم می‌کند. به علاوه، این سیستم امکان پرواز نیمه آزاد را برای حشره و در یک محیط کنترل شده، فراهم می‌آورد و می‌توان از آن برای بررسی‌های بعدی در زمینه‌های آیرودینامیک حشرات، دینامیک، حسگر و کنترل در پرواز رو به جلو استفاده کرد. این وسیله در مقایسه با امکان پرواز آزادی که به حشره در تونل باد داده می‌شود، دارای چندین محدودیت است. اول اینکه، سرعت پرواز مگس که با این وسیله بدست می‌آید و مشاهده می‌شود، در مقایسه با پرواز آزاد بسیار کمتر است. با این حال، حشرات از جمله مگس در پرواز آزاد به سختی به یک حالت پایدار می‌رسند. به عنوان مثال، مگس در یک محفظه‌ای به اندازه ۱/۶ مترمکعب می‌تواند به حداکثر سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه و سرعت متوسط ۱/۳ متر بر ثانیه برسد و آن هم با شتاب و کاهش سرعت مداوم [۲۰]. دومین مورد این است که در آزمایشاتی که با این دستگاه یعنی پرواز متصل صورت می‌گیرد، فرکانس بال‌زنی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲۰ و ۲۱]، اما می‌توان گفت که این اختلاف فرکانس بال‌زنی بسیار قابل توجه نبوده و قابل صرف نظر کردن است [۲۲]. مورد سوم این است که چرخش آسیاب پرواز باعث ایجاد عدم تقارن در دو بال حشره می‌شود. می‌توان در تحقیقات و بررسی‌ها، اثر این عدم تقارن را در سرعت رو به جلو ناچیز در نظر گرفت، اما می‌توان با استفاده از شعاع میله‌ای که به اندازه کافی بزرگ است، این موضوع را برطرف کرد. چهارم، میانگین نیروی برآ در پرواز متصل چیزی در حدود ۶۹/۵ درصد از وزن متوسط حشره است که بیانگر این مطلب است که حشره در پرواز متصل به نیروی برآ کمتری نسبت به پرواز آزاد نیاز دارد [۲۳]. یکی از راه‌های تخمین دقیق‌تر نیروهای آیرودینامیکی ایجاد شده توسط بال‌های حشره، استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات عددی با بازسازی دقیق سینماتیک بال و تغییر شکل آن است [۲۴]. و

university.

- [8] Somerville AG, Gleave K, Jones CM, Reimer LJ. The consequences of *Brugia malayi* infection on the flight and energy resources of *Aedes aegypti* mosquitoes. *Scientific Reports*. 2019 Dec 5;9(1):18449.
- [9] Naranjo SE. Assessing insect flight behavior in the laboratory: a primer on flight mill methodology and what can be learned. *Annals of the Entomological Society of America*. 2019 May 7;112(3):182-99.
- [10] Jones KL, Shegelski VA, Marculis NG, Wijerathna AN, Evenden ML. Factors influencing dispersal by flight in bark beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae): from genes to landscapes. *Canadian Journal of Forest Research*. 2019;49(9):1024-41.
- [11] Rowley WA, Graham CL. The effect of temperature and relative humidity on the flight performance of female *Aedes aegypti*. *Journal of Insect Physiology*. 1968 Sep 1;14(9):1251-7.
- [12] Lago C, Garzo E, Moreno A, Barrios L, Marti-Campoy A, Rodríguez-Ballester F, Ferreres A. Flight performance and the factors affecting the flight behaviour of *Philaenus spumarius* the main vector of *Xylella fastidiosa* in Europe. *Scientific Reports*. 2021 Sep 2;11(1):17608.
- [13] Wang S, He J, Xu J, Wang Y, Pan W. A new method for studying insect orientations. In 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP) 2013 Dec 16 (Vol. 1, pp. 41-45). IEEE.
- [14] J.L.Merriam. *Engineering mechanics dynamic*. Second Chapter, John Wiley & Sons.
- [15] Deakin MA. Formulae for insect wingbeat frequency. *Journal of Insect Science*. 2010 Jan 1;10(1).
- [16] Byrne DN, Buchmann SL, Spangler HG. Relationship between wing loading, wingbeat frequency and body mass in homopterous insects. *Journal of Experimental Biology*. 1988 Mar 1;135(1):9-23.
- [17] Hsu SJ, Thakur N, Cheng B. Speed control and force-vectoring of bluebottle flies in a magnetically levitated flight mill. *Journal of Experimental Biology*. 2019 Feb 15;222(4):jeb187211.
- [18] Hsu SJ, Cheng B. Retinal slip compensation of pitch-constrained blue bottle flies flying in a flight mill. *Journal of Experimental Biology*. 2020 Jun 1;223(11):jeb210104.
- [19] Kenna D, Cooley H, Pretelli I, Ramos Rodrigues A, Gill SD, Gill RJ. Pesticide exposure affects flight dynamics and reduces flight endurance in bumblebees. *Ecology and Evolution*. 2019 May;9(10):5637-50.
- [20] Bompfrey RJ, Walker SM, Taylor GK. The typical flight performance of blowflies: measuring the normal performance envelope of *Calliphora vicina* using a novel corner-cube arena. *PLoS One*. 2009 Nov 18;4(11):e7852.
- [21] Kutsch W, Stevenson P. Time-correlated flights of juvenile and mature locusts: a comparison between free and tethered animals. *Journal of Insect Physiology*. 1981 Jan 1;27(7):455-9.
- [22] Betts CR, Wootton RJ. Wing shape and flight behaviour in butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea and Hesperioidea): a preliminary analysis. *Journal of experimental biology*. 1988 Sep 1;138(1):271-88.
- [23] Dickinson MH. Comparison of encoding properties of campaniform sensilla on the fly wing. *Journal of experimental biology*. 1990 Jul 1;151(1):245-61.
- [24] Ribak G, Barkan S, Soroker V. The aerodynamics of flight in an insect flight-mill. *PloS one*. 2017 Nov 1;12(11):e0186441.
- [25] Liu G, Dong H, Li C. Vortex dynamics and new lift enhancement mechanism of wing-body interaction in insect forward flight. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016 May;795:634-51.