

مروری بر طراحی کوادکوپترها با الهام از حشرات به ویژه سنجاقک در تحویل بسته های پستی در مناطق شهری

نیکتا عابدی^۱، محمدرضا سجادی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، Niktaabedi@gmail.com

۲- هیئت علمی، دانشگاه شیراز، شیراز، mrsajjadi@shirazu.ac.ir

خلاصه

در این مقاله به مروری بر طراحی کوادکوپترهای الهام گرفته شده از حشرات به خصوص سنجاقک می پردازیم. سنجاقکها به دلیل ویژگی های پروازی خارق العاده و برتری که نسبت به سایر حشرات دارند برای طراحی کوادکوپترها مورد توجه قرار گرفته اند. سنجاقکها مجهز به دو جفت بال کاملاً مستقل هستند. تسلط بالای سنجاقکها بر باله های خود منجر به معلق بودن^۱، پرواز سریع رو به جلو^۲، سریع چرخیدن^۳ و به طرفین پرواز کردن و حتی پرواز گلاйдینگ^۴ آنها میشود. یک ربات الهام گرفته از سنجاقک که می تواند به طور موثری سینماتیک حرکت آن را تقلید کند، به طور بالقوه عملکرد پروازی برتری نسبت به سایر طرح های ربات های الهام گرفته شده از حشرات از خود نشان می دهد. الهام گرفتن از نحوه ی پرواز حشرات این امکان را می دهد تا بتوان کوادکوپترهایی با بازده بالا را طراحی و تولید کرد. علیرغم عدم وجود بافت ماهیچه ای در کوادکوپترها سیستم های الکترومکانیکی ای طراحی شده است که تا حد زیادی پرواز کوادکوپترها را به حشرات شبیه کرده است. دستیابی به پرواز آزادانه سنگ بنای نسل بعدی کوادکوپترهای الهام گرفته از حشرات است که علاوه بر پرواز به چندین حالت مانور مشابه حشرات مجهز خواهند شد. در این مقاله قصد داریم به مرور مقالات در بررسی حرکت سنجاقک و کوادکوپترها و همچنین علت های الهام گرفتن از سنجاقک در طراحی کوادکوپترها و آزمایش های انجام شده و همچنین ارائه پیشنهادهایی برای پیشبرد طراحی کوادکوپترها در این زمینه بپردازیم.

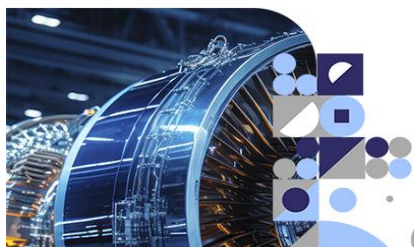
کلمات کلیدی: کوادکوپترها، پرواز حشرات، بیومکانیک، الهام از طبیعت، سیستم پروازی الهام گرفته شده از طبیعت، سنجاقک

³ Turning swiftly

⁴ Gliding

¹ Hovering

² Fast forward



مقدمه

سنجاقک‌ها یکی از قدیمی‌ترین و قابل‌مانورترین^۱ حشرات پرنده روی زمین هستند. عملکرد پرواز آنها بسیار فراتر از بسیاری از گونه‌های دیگر حشرات است.

سنجاقک‌ها می‌توانند در هوا معلق بمانند، تا ۵۴ کیلومتر در ساعت پرواز کنند، با سه بار بال‌زدن ۱۸۰ درجه بپیچند و به طرفین پرواز کنند، در محیط شناور بمانند و حتی به عقب پرواز کنند. آنها با سرعت و دقت شگفت‌انگیزی طعمه را در هوا دنبال می‌کنند.

مهندسان از سنجاقک الهام گرفته‌اند تا کوادکوپترهایی در مقیاس میکرو شامل چهار بال طراحی کنند؛ به عنوان مثال ربات دراگون‌فلای^۲ WowWee [1] و دلفلای^۳ [2] دو نمونه از این نوع کوادکوپترها هستند. در طراحی این کوادکوپترها، لبه‌های جلویی دو بال اصلی امتداد یافته‌اند تا لبه جلویی دو جفت بال عقب را تشکیل دهند و در نتیجه هر چهار بال در یک صفحه می‌چرخند و هیچ تمایزی بین بال‌های جلو و عقب وجود ندارد.

همانطور که در طبیعت مشاهده می‌شود، سنجاقک‌ها بال‌های جلویی و عقبی خود را به طور مستقل توسط عضلات قوی و پیچیده قفسه سینه خود کنترل می‌کنند. در نتیجه، دو جفت بال از سینماتیک و زوایای فاز نسبی^۴ متفاوت در حالت‌های پرواز مختلف استفاده می‌کنند.

استفاده از دو جفت بال مستقل نه تنها از لحاظ آیرودینامیکی نیروی بالابری را نسبت به یک جفت بال افزایش می‌دهد بلکه پایداری پرواز را افزایش می‌دهد و کنترل کوادکوپتر را در حالت‌های مختلف پرواز بهینه می‌کند. سیستم‌های پروازی بیولوژیکی به طور عمده پیچیده هستند و نمی‌توان آن‌ها را به طور مستقیم مورد تحلیل عددی قرار داد.

به همین دلیل یک جفت بال متحرک با الهام از سنجاقک طراحی شده تا مکانیزم حرکت بال سنجاقک را در حالت پرواز شناور و حرکت رو به جلو شبیه‌سازی کند و علاوه بر آن نیروهای آیرودینامیکی و میدان‌های جریان را مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار دهد [3].

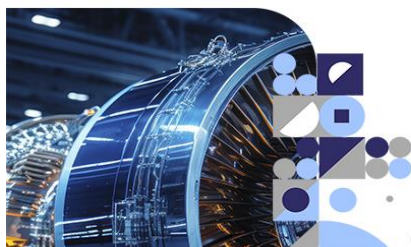
بال طراحی شده این امکان را می‌دهد تا سینماتیک حرکت کوادکوپتر را در صفحات دارای ضربات بالا بررسی کنیم و نحوه پرواز حشرات را به صورت دقیق‌تر مورد بررسی و مطالعه قرار دهیم.

¹ Maneuverable flyers

² Dragonfly

³ Delfly

⁴ Relative phase angles



حشرات و عملکرد پرواز آنها

حشرات پرواز کننده های ماهری هستند که می توانند پایداری خود را حتی در رویارویی با وزش شدید باد حفظ کنند.

تحقیقات در رابطه با ریزپرنده^۱ به خصوص ریزپرنده های الهام گرفته شده از طبیعت مانند سنجاقک، زنبور، پرندگان و پروانه ها در برخی از کشورها گسترش یافته است. به طور کلی کوادکوپترهای الهام گرفته شده از طبیعت به ۳ دسته تقسیم می شوند: کوادکوپترهای الهام گرفته شده از سنجاقک، کوادکوپترهای الهام گرفته شده از پرندگان و کوادکوپترهای الهام گرفته شده از پروانه ها [۴].

سنجاقک ها یکی از پایدارترین و قابل مانورترین حشرات در طبیعت هستند. آنها یکی از محدود گونه هایی هستند که می توانند طعمه ها را در هوا شکار کنند. حالت افقی بدن سنجاقک ها به آنها اجازه می دهد حالت های پرواز را از معلق بودن^۲ به حرکت رو به جلو یا چرخش سریع تغییر دهند و یک هدف را از نزدیک دنبال کنند؛ علاوه بر آن برخلاف اکثر حشرات، سنجاقک ها می توانند به سمت عقب یا طرفین حرکت کنند و یا حتی بدون اینکه بال های خود را حرکت بدهند، پرواز کنند. سرعت آنها به ۹۰ کیلومتر بر ساعت وشتابی برابر با ۱۳۰ متر بر مجذور ثانیه می رسد [۳]. حداکثر نیروی رانشی که بال های آنها ایجاد می کنند می تواند تا ۱۳ برابر وزن بدن آنها افزایش یابد. فیلم های گرفته شده از نحوه پرواز سنجاقک نشان می دهد که سنجاقک ها تنها با سه ضربه بال زدن ۱۸۰ درجه می چرخند. به طور کلی، فرکانس ضربان بال سنجاقک از ۲۰ تا ۹۰ هرتز متغیر است [۳]. همچنین نشان داده شده است که سنجاقک ها عملکرد شگفت انگیزی در پرواز بدون بال زدن دارند و بازده بالایی تولید می کنند که قابل مقایسه با کوادکوپترهای مدل سازی شده با اعداد رینولدز^۳ بسیار بالا است.

بال های سنجاقک بر خلاف پرندگان و خفاش فاقد ماهیچه و استخوان است؛ علاوه بر آن مورفولوژی^۴ بال سنجاقک شامل باله هایی با ابعاد متفاوت است که از رزیلین^۵، بال های شیاردار^۶، نودوس^۷ و تروستیگما^۸ تشکیل شده است که تاثیر بسیاری در ساختار حرکتی بال ها و عملکرد پرواز سنجاقک دارد [۵].

در پرواز معمولی هر دو جفت بال در صفحه ضربه^۹ به ۸ حالت متفاوت حرکت می کنند. صفحه ضربه تقریباً به صورت عمودی قرار دارد و بال ها به طور مستقل با زاویه حمله بزرگتر به حرکت در می آیند. در شکل ۱ مختصات سه بعدی یک جفت بال سنجاقک ترسیم شده است.

⁶ wing corrugation

⁷ Nodus

⁸ Pterostigma

⁹ Stroke plane

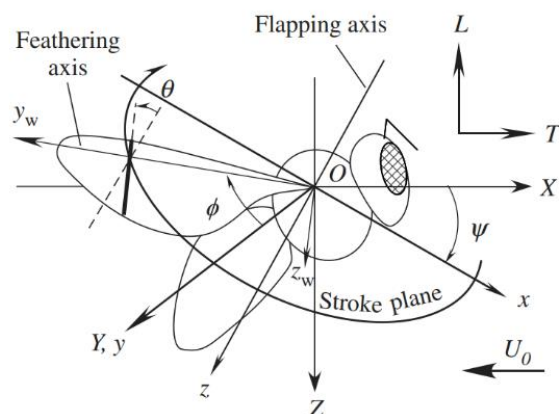
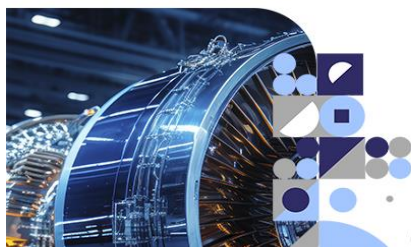
¹ Micro Air Vehicle (MAV)

² hovering

³ Reynolds number (Re)

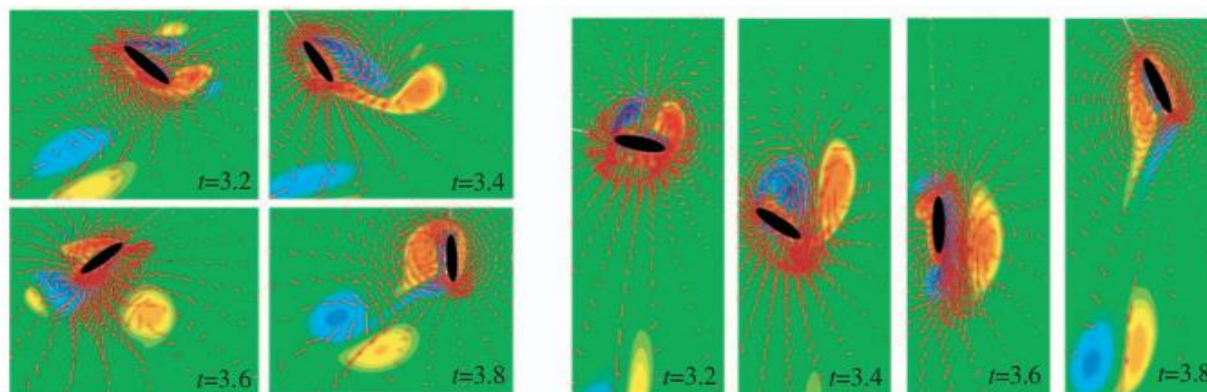
⁴ Morphology

⁵ Resilin



شکل ۱: سیستم مختصات سه بعدی یک جفت بال سنجاچک [۶].

در مطالعاتی که با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۱ انجام شد، نیروهای آیرودینامیکی وارد بر بال‌ها حین بال زدن در بازه‌های زمانی متفاوت بررسی شد و همچنین فرآیند ایجاد گردابه‌ها^۲ نیز محاسبه شد. در نتیجه‌ی این مطالعات هنگام بال زدن یک نیروی عمودی بزرگ در طول هر حرکت رو به پایین ایجاد می‌شد و نیروی عمودی میانگین برای تحمل وزن سنجاچک کافی بود؛ علاوه بر آن در طول هر حرکت رو به پایین یک جفت گرداب ایجاد می‌شد [۷].



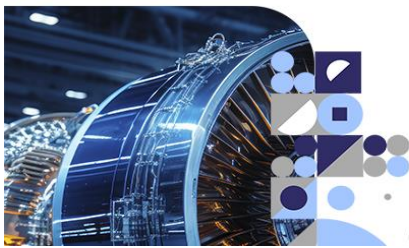
شکل ۲: دینامیک سیالات محاسباتی^۳ از گردابه‌ها^۴ (قرمز، چرخش خلاف جهت عقربه‌های ساعت؛ آبی، چرخش در جهت عقربه‌های ساعت) و میدان‌های سرعت (بردارهای قرمز) در دوره چهارم را نمایش می‌دهد [۸].

³ Computational Fluid Dynamics (CFD)

⁴ Vortex

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)

² The vortex shedding process



استفاده از مکانیزم های پیچیده سیال ناپایا^۱ نیازی به وجود هندسه، حرکات یا کنترل پیچیده بال ندارد. بنابراین سنجاقک حین پرواز نیروهای آیرودینامیکی بزرگی با ساختار بال و سینماتیک نسبتاً ساده ایجاد می کند.

تقریباً ۹۰۰۰ نوع از پرندگان در طبیعت وجود دارند [۹]. پرندگان توانایی های پرواز خود را در گذر زمان به انسان نشان داده اند و بارها الهام بخش آنها در طراحی سیستم های الهام گرفته شده از طبیعت بوده اند. از آنجایی که نحوه پرواز پرندگان از فناوری های کلیدی در توسعه هواپیماها بوده است، تحقیقات سیستم های پروازی الهام گرفته شده از طبیعت با پروازکننده هایی مانند پرندگان آغاز می شود. برای مثال پرنده هوشمند^۲ یکی از ربات های الهام گرفته شده از مرغ دریایی است. این ربات بال هایی به طول ۱.۹۶ متر، بدنه ای به طول ۱.۰۶ متر و وزنی برابر با ۴۵۰ گرم دارد. استفاده از مکانیزم بال های موازی مرغ دریایی می تواند حرکت پیشگی نوک بال را در حین بال زدن کنترل کند.

پرندگان بال های خود را برای تنظیم ارتفاع و سرعتشان حین پرواز حرکت می دهند. آن ها دارای چند حالت اساسی پرواز مانند پرواز گلاйдینگ^۳، اوج گرفتن^۴ و پرواز با قابلیت بال زدن^۵ هستند.

معلق بودن ساده ترین حالت پرواز است. در این حالت وضعیت بال های پرنده در طول پرواز تقریباً حفظ می شود و حرکت افقی با افزایش ارتفاع حاصل می شود.

برای اوج گیری، از جریان هوای بالارونده برای افزایش ارتفاع پرواز پرنده استفاده می شود و سپس از پرواز گلاйдینگ برای رسیدن به حرکت افقی با جریان هوای غیربالایی^۶ استفاده می شود.

پرواز گلاйдینگ در پرندگان به سرعت باد، درگی^۷ که هوا ایجاد می کند و وزن پرندگان بستگی دارد؛ هرچه قدر درگ هوا و وزن پرندگان بیشتر باشد، ارتفاع پرواز سریع تر کاهش می یابد.

خط جریان های^۸ بدن پرنده [۱۰]، تناسب ابعادی^۹ بزرگ تر [۱۱]، هندسه های مختلف [۱۲] و حالت های مختلف پرواز از عوامل کلیدی پرندگان برای کاهش مقاومت در شرایط متغیر جریان هوا هستند.

پرندگان برای رسیدن به سرعت رو به جلو باید بر مقاومت هوا در پرواز غلبه کنند و معمولاً برای رسیدن به نیروی محرکه رو به جلو باید بال های خود را تکان دهند [۴]. فرآیند تغییر شکل بال ها در حین بال زدن تأثیر قابل توجهی بر ویژگی های آیرودینامیکی پرندگان دارد؛ علاوه بر آن چگونگی تنظیم بال ها هنگام فرود و پرواز در جریان ناپایدار هوا برای رسیدن به آیرودینامیک بهینه تر، بسیار حائز اهمیت است [۱۳].

⁶ Non-rising airflow

⁷ Drag

⁸ Stream lines

⁹ Aspect ratio

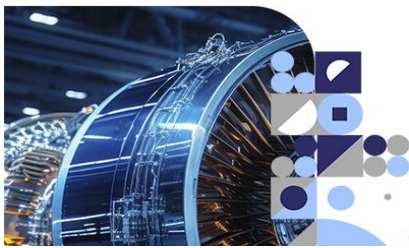
¹ Unsteady fluid

² Smart bird

³ Gliding flight

⁴ Soaring flight

⁵ Flapping flight



انتظار می‌رود کوادکوپترهای الهام گرفته شده از پرندگان در آینده عملکرد آیرودینامیکی خوب مانند تطبیق پذیری آسان تر با محیط اطراف را داشته باشند، قابلیت مانور بالا، بازده پرواز بالا یعنی مصرف کم انرژی و طی کردن مسافت طولانی تر و کاهش هزینه های تولید را به همراه داشته باشند. کوادکوپترهای طراحی شده با الهام از پرندگان نحوه پرواز را تقلید می کند. یعنی ایرفویل^۱ با حرکت دادن لبه ی عقب باعث ایجاد نیروی بالابری^۲ و رانش^۳ کوادکوپتر می شود اما از لحاظ بازده آیرودینامیکی همچنان بازده مشابه با بازده آیرودینامیکی پرندگان ایجاد نمی کند و با آن فاصله دارد. فرکانس بال زدن این نوع کوادکوپترها معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ هرتز است [۱۱]. نیروی بالابری با حرکت رو به جلو و در سرعت بالا ایجاد می شود. فرکانس کم بال زدن و نرخ جرمی^۴ بالای بال ها باعث ایجاد رابطه ی کوپل^۵ بین آیرودینامیک، ساختار و مکانیزم های پرواز می شود. بنابراین نمی توان در طراحی کوادکوپترهایی با بازده بالا و عملکرد بهتر از این نکته چشم پوشی کرد [۱۰].

حشرات قابلیت فوق العاده ای در مانور و پایداری پرواز دارند که این قابلیت ها در معلق بودن^۶، برخاستن سریع^۷، توقف سریع و اوج گیری سریع^۸ مشاهده می شود [۴]. با توسعه سریع فناوری نمایش جریان پیشرفته^۹ و فناوری شبیه سازی عددی^{۱۰}، درک سیستماتیک و عمیقی از مکانیزم پرواز حشرات در ۲۰ سال گذشته به دست آمده است [۱۴].

بررسی آیرودینامیک کوادکوپترهای الهام گرفته شده از طبیعت

برای درک آیرودینامیک پرواز بیولوژیکی، محققان شروع به تحقیقات آیرودینامیکی بر روی سیستم های پرواز الهام گرفته از زیست شناسی با استفاده از تکنیک های تجربی و روش های شبیه سازی عددی^{۱۱} کرده اند. تکنیک های تجربی اغلب می توانند پارامترهای پرواز را برای شبیه سازی های عددی ارائه دهند، که عمدتاً برای تحقیق در برخی از پروازهای بیونیک ساده شده استفاده می شوند، همچنین شبیه سازی عددی هزینه آزمایشی را کاهش می دهد و به سرعت نتایج آیرودینامیکی را به دست می آورد.

در آزمایش های اولیه تنها از دوربین هایی با سرعت شاتر بالا استفاده شد تا فرکانس بال زدن و زاویه بال ها را حین بال زدن اندازه گیری کنند. این آزمایش کمک زیادی به تجزیه و تحلیل ویژگی های آیرودینامیکی موجودات پرنده داشته است. برای دستیابی به پارامترهای دقیق تر سینماتیک پرواز، یک روش اندازه گیری شامل ترکیبی از سه دوربین با سرعت بالا و فناوری پردازش تصویر استفاده شد و پارامترهای سینماتیک مانند زاویه بال زدن و زاویه حمله حشرات مختلف اندازه گیری شد [۴، ۱۵، ۱۶]. علاوه بر این به منظور انعکاس واقعی تر اثر تغییر شکل بال بر جریان، و ارائه اطلاعات دینامیکی برای شبیه سازی عددی، تغییر شکل دینامیکی در حین پرواز اندازه گیری شد.

⁷ Fast taking off

⁸ Fast climbing

⁹ Advanced flow display

¹⁰ Numerical simulation

¹¹ Numerical simulation method

¹ Airfoil

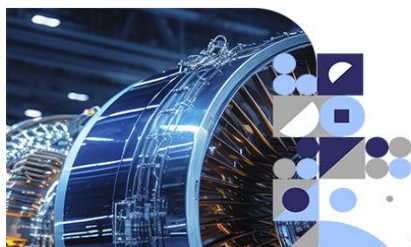
² Lift force

³ Thrust force

⁴ Mass ratio

⁵ Coupling relationship

⁶ Hovering



اخیراً اندازه‌گیری حجم براساس میانگین فازی سرعت سنجی تصویر ذرات (PIV)^۱ انجام شده است. این روش از اندازه‌گیری سرعت میدان جریان برای تخمین ویژگی‌های نیروی بالابر و درگ بال‌های متحرک با نسبت ابعاد کوچک استفاده می‌کند. علاوه بر این با ظهور فناوری تست PIV با میدان کامل سه بعدی و تفکیک زمانی، روش تخمین فشار بر اساس دینامیک ورتکس^۲ نیز در مطالعه مکانیزم‌های جریان بیونیک استفاده می‌شود [۴].

کوادکوپترهایی که قابلیت بال زدن دارند، راندمان پرواز بالایی نیز دارند. بارگذاری نیروها (نیروی رانش/نیروی کل ورودی) به طور گسترده‌ای به عنوان معیار کارایی برای حرکت بال‌ها از جمله کوادکوپترهای چند روتور^۳ استفاده می‌شود. در جدول زیر نشان در مقایسه ای که بین ربات Delfy و حشرات انجام شده است، محققان دریافته‌اند که حشرات توانایی بارگذاری نیروی بیشتری نسبت به کوادکوپترهای چند روتور دارند.

	Effective disk loading		Power loading	
	lb/ft ²	N/m ²	lb/hp	gf/W
Hawkmoth [17]	0.18	8.6	70.0	42.6
Micro rotor 1 [17]	0.18	8.6	30.0	18.2
Orchid bee [17]	0.45	21.5	50.0	30.4
Micro rotor 2 [17]	0.45	21.5	20.0	12.2
Phantom 2 [18]	1.45	69.3	6.6	4.0
KUBectle-S [19]	0.13	6.2	8.2	5.0
Dragonfly [17]	0.13	6.2	40.0	24.3
Delfly Nimble [20]	0.38	18.4	8.2	5.0

جدول ۱: این جدول مقایسه‌ی بارگذاری توان‌ها برای حشرات و کوادکوپترهای میکرو روتور مختلف را نشان می‌دهد. توان بارگذاری زنبور ارکیده و شباهنگ^۴ حداقل دو برابر بیشتر از میکرو روتورها با بارگذاری مشابه است [۲۱].

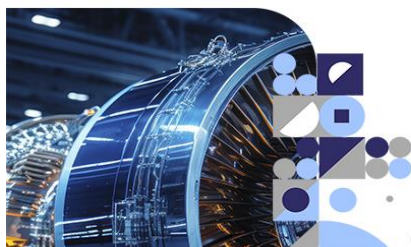
حشرات به دلیل داشتن عناصر الاستیک در بافت ماهیچه‌ای بال‌هایشان، علاوه بر ذخیره انرژی نیروهای اینرسی را به حداقل می‌رسانند در نتیجه بارگذاری توان را افزایش می‌دهند. اما در کوادکوپترها به دلیل اینکه بال‌ها نیروی اینرسی زیادی تحمل می‌کنند، توان اضافی مورد نیاز برای غلبه بر نیروهای اینرسی منجر به بارگذاری توان کمتر می‌شود. همچنین از آنجایی که بیشتر بال‌های بال‌زن در کوادکوپترها به چنین ذخیره‌سازی انرژی توسط ماهیچه‌های الاستیک مجهز نیستند و میانگین توان اینرسی سیکل آنها نزدیک به صفر نیست، مقادیر بارگذاری توان نسبتاً پایین‌تری دارند.

¹ Particle Image Velocimetry (PIV)

² Vortex

³ Multi-rotor

⁴ Hawkmoth



همچنین کوادکوپترهای الهام گرفته شده از حشرات در فرکانسهای بسیار پایین تری نسبت به کوادکوپترهای قدیمی تک روتوری و چند روتوری کار می کنند و بنابراین برای استفاده در محیط عمومی و برای کاربرد در دنیای واقعی محبوب تر و ایمن تر هستند.

بیشتر کوادکوپترهای الهام گرفته شده از پرندگان، بال های خود را در دامنه های نسبتاً کوچکتر از ۱۰۰ درجه و فرکانس های پایین تر از ۱۰ هرتز تکان می دهند [۲۱]. بنابراین تولید حرکت بال زدن سریع مانند حرکت بال با دامنه بال زدن و زاویه چرخش زیاد برای ایجاد نیروی بالابر کافی، اولین مانع در ساخت کوادکوپترها با الهام از پرندگان است.

در پرواز پرندگان به دلیل چرخش بال های بزرگ و زاویه ی بال ها می توان نیروهای آیرودینامیکی مفیدی در حین حرکت بالا و پایین ایجاد کرد و امکان معلق بودن در پرواز را فراهم کرد. در غیاب یک محرک مانند عضله ی حشرات در کوادکوپترها، موتورهای الکترومغناطیسی ساخته شده است که با مکانیزم های بال زدن ترکیب شده و برای شبیه سازی بال زدن حشرات و پرندگان در کوادکوپترها مورد استفاده قرار می گیرد [۲۱].

برای غلبه بر وزن بدنه کوادکوپتر، زاویه ی بال زدن بزرگ برای ایجاد نیروی عمودی و نیروی رانشی ضروری است. برای حل این چالش، مکانیزم های مختلف بال زدن برای تولید زاویه بال زدن بالا در ربات هایی شامل یک جفت بال پیشنهاد شده است.

پرندگان و کوادکوپترهای الهام گرفته شده از حشرات و پرندگان، در دُم خود عمدتاً از سطح (های) کنترل^۱ برای ایجاد گشتاور کنترلی^۲ استفاده می کنند تا وضعیت خود را در طول پرواز حفظ کنند [۲۲، ۲۳] در غیاب سطوح کنترل دُم، حشرات با تغییر مکانیزم های حرکت بال زدن خود و یا تغییر مرکز ثقل^۳ با تغییر وضعیت خود گشتاور کنترلی ایجاد می کنند. مانند حشرات، کوادکوپترهای الهام گرفته شده از آن ها نیز بدون دُم پرواز ناپایدار خواهند داشت و نیازمند یک سیستم فیدبک فعال^۴، شامل مولد گشتاور کنترلی^۵ برای تغییر ارتفاع، سیستمی متشکل از سنسورها برای تشخیص ارتفاع است تا بتواند در هوا باقی بماند.

بررسی چالش ها و محدودیت ها در طراحی کوادکوپترهای الهام گرفته شده از طبیعت

در دو دهه گذشته اصول پرواز حشرات به طور گسترده مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است و اطلاعات زیادی در زمینه ایجاد نیرو و کنترل ارتفاع کوادکوپترهای الهام گرفته شده از حشرات به دست آمده است [۲۱]. برخی از این اصول در کوادکوپترهایی با بال متحرک استفاده شده و توانسته اند پروازی آزادانه داشته باشند. با این وجود بازده پرواز این کوادکوپترها همچنان از بازده پرواز حشرات کمتر است. بنابراین افزایش بازده پرواز، برای پرواز به مدت طولانی یکی از مهم ترین مباحث تحقیقاتی است.

کوادکوپترها معمولاً در ارتفاع های مشخص پرواز می کنند و به دلیل تلاطم هوای ناشی از طبیعت و سازه های شهری دچار ناپایداری در پرواز می شوند. بنابراین محققان در تلاش هستند تا سیستم های پرواز پرندگان و حشرات را که به آن ها اجازه می دهد به طور

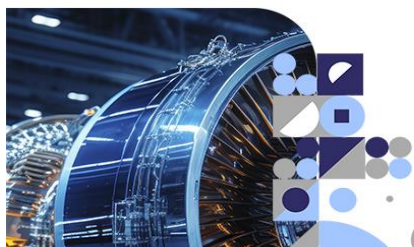
⁴ Active feedback system

⁵ Control moment generator

¹ Control surface

² Control moment

³ Center of gravity (CG)



مداوم وضعیت خود را در طول پرواز بدون توقف در هوای متلاطم یا بد تغییر دهند و سقوط نکنند را بیاموزند و از آن در طراحی کوادکوپترها بهره ببرند. جدول ۲ به بررسی پرندگان و پایداری پرواز آن‌ها پرداخته است.

Approach	Model Animal	Targeted Function	Mechanical Components
Morphing-wing-based gliding	1. Northern goshawk	Responsive body	A front propeller, adjustable tail, wings Wing ex-intensions linked to wrists
	2. Pigeon	Seamless feather	
Wing-flapping-based agility	3. Fruit Fly	High acceleration	Flapping wings High DoF * of wings Anti-whirl transmission, flexible wing membrane Wing twist modulation
	4. Bat	Acrobat flight	
	5. Swallow	Multimodal flight	
	6. Hummingbird	Hovering	
Attitude control in flight	7. Birds	Seamless hovering and horizontal flight	Mechanism of shifting the center of gravity Soft actuators Elytra-like wings
	8. Insects	High-speed flapping	
	9. Beetle	Recovering from flipping over	

جدول ۲: بررسی پایداری پرواز در پرندگان و حشرات مختلف که با سه رویکرد مختلف شامل کوادکوپترهای بدون موتور با بال‌های شکل پذیر^۱، قابلیت تطابق سریع نسبت به تغییرات بوسیله بال‌های متحرک^۲ و کنترل ارتفاع پرواز^۳ مورد بررسی قرار گرفته است [۲۴].

برای دستیابی به پروازهای طولانی مدت و طی کردن مسافت‌های طولانی انرژی مورد استفاده برای پرواز باید حفظ شود. بهبود بهره‌وری توان کوادکوپترها ساده است، اما با استفاده از استراتژی‌های پرواز الهام گرفته شده از طبیعت^۴ می‌توان کارایی آن‌ها را بهبود بخشید. برای این کار میتوان رفتار پرواز پرندگان مهاجر را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. محققان در دانشگاه نیومکزیکو^۵ طراحی مفهومی یک کوادکوپتر با بال‌های چندگانه‌ی ۷ شکل را که از آیرودینامیک پرواز پرندگان الهام گرفته شده بود را آزمایش

⁴ Biomimetic

⁵ New Mexico State University

¹ Morphing-Wing-Based Gliding

² Wing flapping-based agility

³ Altitude control in flight



کردند و به راندمان پیشران ۷۳.۸٪ دست یافتند [۲۵]. همچنین محققان در دانشگاه چیبا^۱ با الهام از پرواز حشرات، پیکربندی بهینه روتور برای افزایش ۷۰٪ نیروی بالابری را کشف کرده‌اند [۲۶] تا بتوان به پرواز با بازده بالاتر دست یافت. هرچه اندازه کوادکوپترهای طراحی شده کوچکتر باشد، بازه‌ی عملکردی آن محدودتر خواهد بود. به عنوان مثال، کوادکوپترهایی در مقیاس حشرات نمی‌توانند اشیاء را حمل کنند؛ بنابراین، دستیابی به تعادل بین کارایی و حداقل وزن ممکن، با توجه به کاربرد مورد نظر کوادکوپترها نیز یکی از مباحث ضروری است که باید به آن توجه داشته باشیم.

علاوه بر پایداری پرواز، گریز از برخورد^۲، کاهش آسیب پذیری^۳، حمل و گرفتن یک وسیله در طول پرواز^۴ چالش‌های دیگری است که محققان در طراحی کوادکوپترها با آن مواجه شده‌اند؛ اجتناب از حیوانات، اشیاء پرنده و همچنین دیوارها و سایر موانع به توابع بسیار هوشمند برای محاسبه فاصله دقیق از موانع نیاز دارد.

همچنین باله‌های روتور استفاده شده در کوادکوپترها برای عملکرد آیرودینامیکی بالا انعطاف‌ناپذیر و تیز هستند و می‌توانند به خود هواپیما، افراد، حیوانات و دیوارها در هنگام سقوط آسیب بزنند. بنابراین برای کاهش آسیب ناشی از این کوادکوپترها باید مواد و ساختار اولیه با دقت انتخاب شوند.

بررسی کاربرد کوادکوپترهای الهام گرفته شده از حشرات در حمل و نقل بسته‌های پستی در شهر شیراز

یکی از کاربردهای قابل توجه کوادکوپترها در دنیای واقعی و محیط‌های عمومی، حمل و نقل مواد غذایی و اقلام سبک در سطح شهر است. با توجه به چابکی، سرعت و انعطاف‌پذیری این پهپادها، امکان تحویل سریع‌تر و کارآمدتر مواد غذایی در مناطق مختلف شهری فراهم می‌شود. در جدول ۳، به بررسی و مقایسه توانایی‌های حمل و نقل بسته‌های پستی توسط کوادکوپترهای الهام گرفته شده از حشرات و طبیعت، و مقایسه عملکرد آن‌ها در شهر شیراز، با توجه به پارامترهای مختلف از جمله ظرفیت بار، مصرف انرژی و کارایی در شرایط مختلف جوی و کارایی در مسافت‌های کوتاه و بلند، پرداخته‌ایم.

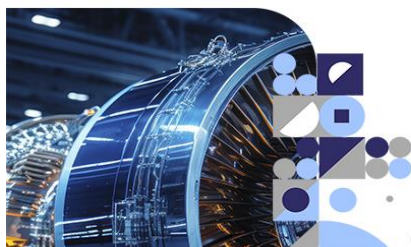
نوع کوادکوپتر	ظرفیت بار	میزان مصرف انرژی	مدت زمان طی کردن مسیر با شارژ کامل	کارایی در حمل و نقل بسته‌ها	مقاومت در برابر شرایط مختلف جوی
Delfly Nimble [27]	۴ گرم	طی کردن بیش از ۱ کیلومتر با یک بار شارژ کامل	حدود ۵ دقیقه	نامناسب	ناپایدار
BionicOpter [28]	۵۰ تا ۱۰۰ گرم	طی کردن مسافت ۳ الی ۶ کیلومتر با یک بار شارژ کامل	حدود ۱۵ تا ۳۰ دقیقه	مناسب برای مسافت‌های نسبتاً طولانی	مقاوم در برابر شرایط جوی متلاطم و پایدار

³ Damage Mitigation

⁴ Grasping during Flight

¹ Chiba University

² Collision Avoidance



مقاوم و پایدار	مناسب برای مسافت های کوتاه	حدود ۸ تا ۱۲ دقیقه	طی کردن مسافت ۱.۲ الی ۳ کیلومتر با یک بار شارژ کامل	۹۵ گرم	Pteryx Skybird (Ornithopter)
نسبتاً پایدار	مناسب برای مسافت های نسبتاً طولانی	حدود ۱۱ دقیقه	طی کردن مسافت ۱۱ کیلومتر با یک بار شارژ کامل	حداکثر ۲.۲۷ کیلوگرم	Dove Drone [29]
مقاوم در برابر شرایط جوی متلاطم و پایدار	مناسب برای مسافت های طولانی	حدود ۴۰ تا ۵۰ دقیقه	طی کردن مسافت ۴۱ الی ۵۱ کیلومتر با یک بار شارژ کامل	حداکثر ۱.۲ کیلوگرم	Quantum Systems Trinity F90+ [30]

جدول ۳: این جدول مشخصات فنی و عملکردی انواع مختلف کوادکوپترهای الهام گرفته شده از حشرات و طبیعت را شامل می شود، که شامل اطلاعاتی درباره نوع کوادکوپتر، ظرفیت بار، میزان مصرف انرژی، مدت زمان طی کردن مسیر با شارژ کامل، کارایی در حمل و نقل بسته ها و مقاومت در برابر شرایط مختلف جوی است.

در این مقایسه، هر کوادکوپتر بر اساس پنج معیار کلیدی مورد ارزیابی قرار گرفته است و برای هر معیار، امتیازی بین ۱ تا ۱۰ اختصاص داده شده است. امتیازدهی به این صورت انجام می گیرد که بهترین عملکرد در هر معیار، امتیاز ۱۰ و کوادکوپترهای دیگر بسته به فاصله عملکردشان از بهترین گزینه، امتیازهای کمتری دریافت می کنند.

معیارهای مورد بررسی شامل ظرفیت بار، میزان مصرف انرژی، مدت زمان پرواز با شارژ کامل، کارایی در حمل و نقل بسته ها و مقاومت در برابر شرایط جوی است.

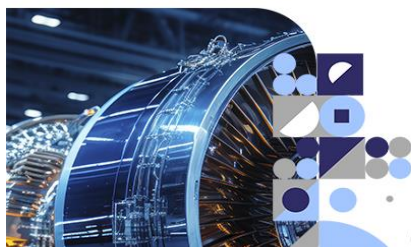
برای ظرفیت بار، کوادکوپتری که توانایی حمل بیشترین وزن را دارد (ترینیتی اف ۹۰ پلاس^۱) با ظرفیت حداکثر ۱.۲ کیلوگرم، امتیاز ۸ را دریافت می کند و کوادکوپتر داو^۲ با توجه به ظرفیت حداکثر ۲.۲۷ کیلوگرم بار، امتیاز کامل ۱۰ را کسب کرده است و سایر کوادکوپترها به دلیل ظرفیت بار کمتر امتیازهای پایین تری کسب کرده اند. در میزان مصرف انرژی، هر چه مصرف انرژی کوادکوپتر کمتر بوده باشد، امتیاز بیشتری به آن اختصاص داده شده است؛ برای مثال، کوادکوپتر دلفلای^۳ به دلیل مصرف بسیار کم انرژی، امتیاز ۱۰ را دریافت می کند.

در مدت زمان پرواز با شارژ کامل، کوادکوپترهایی که زمان بیشتری قادر به پرواز بوده اند، امتیاز بیشتری دریافت می کنند. برای مثال کوادکوپتر ترینیتی اف ۹۰ پلاس با قابلیت پرواز به مدت ۴۰ دقیقه امتیاز ۱۰ را کسب می کند و کوادکوپترهایی که زمان پرواز کمتری داشتند، امتیاز پایین تری کسب می کنند. همچنین کارایی در حمل و نقل بسته ها براساس توانایی کوادکوپترها در حمل و نقل بسته ها

³ Delfly Nimble

¹ Quantum Systems Trinity F90+

² Dove Drone



و مسافت‌هایی که می‌توانستند طی کنند امتیازبندی شده است؛ بنابراین کوادکوپترهایی که برای حمل بسته‌های سنگین و مسافت‌های طولانی مناسب‌تر بوده‌اند، امتیاز بیشتری کسب کرده‌اند.

در نهایت، برای مقاومت در برابر شرایط جوی، کوادکوپترهایی که در شرایط مختلف جوی پایدارتر بودند، مانند ترینیتی اف ۹۰ پلاس، امتیاز کامل ۱۰ را دریافت کرده‌اند، در حالی که کوادکوپترهایی که مقاومت کمتری در برابر شرایط جوی سخت داشتند، امتیاز کمتری کسب کرده‌اند. این روش امتیازدهی کمک می‌کند تا عملکرد هر کوادکوپترها به صورت دقیق و جامع مقایسه شود.

در نتیجه در این مقایسه، ترینیتی اف ۹۰ پلاس با ۴۲ امتیاز به عنوان بهترین کوادکوپتر، به دلیل ظرفیت بار بالا، زمان پرواز طولانی و مقاومت در برابر شرایط جوی در نظر گرفته می‌شود. همچنین کوادکوپتر داو^۱ با ۳۷ امتیاز به علت قابلیت حمل بارهای سنگین‌تر و مناسب بودن برای طی کردن مسافت‌های طولانی در رتبه‌ی دوم قرار دارد. کوادکوپترهای تریکس^۲ و بایونیک اوپتر^۳ با امتیازات متوسط و به ترتیب ۲۶ و ۳۱ امتیاز در رتبه‌های بعدی قرار دارند و برای حمل و نقل بسته‌های کوچک به منظور پیمودن مسافت‌های کوتاه در شهر شیراز مناسب هستند.

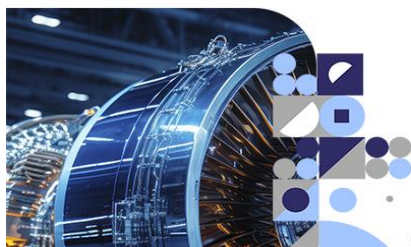
کوادکوپتر دلفای^۴ با وجود مصرف کم انرژی، به دلیل ظرفیت بار و زمان پرواز محدود، امتیاز ۱۹ و کمترین امتیاز را کسب کرده است که برای کاربرد های کوچک‌تر مناسب است و در رتبه آخر قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری و رهنمون‌ها

در این مقاله، به مروری بر بررسی ساختار و قابلیت‌های پروازی سنجاک‌ها و مقایسه آن‌ها با پرندگان، پرداخته شده است تا از این طریق بتوان به طراحی بهینه‌ای برای کوادکوپترهای الهام گرفته شده از حشرات، به ویژه برای کاربرد آن‌ها در حمل و نقل بسته‌های پستی، دست یافت. سنجاک‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد پروازی خود، از جمله مانورپذیری بالا و قدرت پرواز در شرایط پیچیده، منبع الهام مناسبی برای طراحی کوادکوپترها هستند. در این مقاله، با مرور تحقیقات موجود در زمینه پرواز حشرات و شبیه سازی ویژگی‌های آن‌ها، به این نتیجه رسیده‌ایم که با الگوبرداری از مکانیزم‌های پروازی حشرات، می‌توان کوادکوپترهایی با کارایی و پایداری بیشتر طراحی کرد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از بال‌های مستقل و طراحی‌های مبتنی بر سینماتیک حشرات، به ویژه سنجاک‌ها می‌تواند پایداری و کنترل کوادکوپترها را بهبود بخشد. این پیشرفت‌ها در شرایط پروازی دشوار، مانند وزش بادهای شدید یا محیط‌های مملو از موانع فیزیکی، منجر به بهبود عملکرد کوادکوپترها می‌شود. براساس مرور منابع مختلف علمی، می‌توان چندین رهنمون برای بهبود طراحی و عملکرد کوادکوپترهای الهام‌گرفته از حشرات ارائه داد. نخست، تحقیقات بیشتر در زمینه بیومکانیک پروازی سنجاک‌ها و پرندگان، به منظور شبیه‌سازی الگوهای پروازی بهینه و دستیابی به طراحی‌های مؤثرتر است. دوم، توسعه مواد سبک و فناوری‌های نوین با هدف کاهش وزن و افزایش بازدهی کوادکوپترها ضروری به نظر می‌رسد؛ استفاده از این مواد سبک و فناوری‌های پیشرفته در ساختار بال‌ها و بدنه می‌تواند کارایی پرواز را افزایش دهد. سوم، طراحی سیستم‌های کنترل پیشرفته

³ BionicOpter
⁴ Delfly Nimble

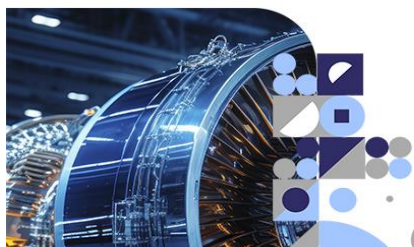
¹ Dove Drone
² Pteryx Skybird (Ornithopter)



و استفاده از حسگرهای دقیق برای افزایش پایداری و مدیریت بهتر مانورهای پروازی نیز یکی دیگر از عوامل کلیدی به شمار می‌آید. در نهایت، این نوآوری‌ها می‌توانند منجر به کاربردهای گسترده‌تر کوادکوپترها در محیط‌های پروازی پیچیده، مانند عملیات جستجو و نجات یا نظارت بر محیط‌زیست شوند. با توجه به این رهنمون‌ها، می‌توان به طراحی کوادکوپترهایی با عملکرد بهتر و قابلیت‌های پیشرفته‌تر دست یافت.

مراجع و منابع

- [1] Wowwee. "flytech:dragonfly." Wowwee.
<http://www.wowwee.com/en/products/toys/flight/flytech:dragonfly> (accessed).
- [2] Delfy. "Delfy." <http://www.delfly.nl/> (accessed).
- [3] C.-D. Dileo, Xinyan, "Design of and Experiments on a Dragonfly-Inspired Robot," *Advanced Robotics*, vol. 23, pp. 1003-1021, 2009, Art no. 7-8, doi: 10.1163/156855309X443160.
- [4] J. a. H. Han, Zhe and Tian, Fang-Bao and Chen, Gang, "Review on bio-inspired flight systems and bionic aerodynamics," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, 2020, doi: 10.1016/j.cja.2020.03.036.
- [5] R. a. L. Noda, Xiaohui and Hefler, Csaba and Shyy, W and Qiu, Huihe, "The interplay of kinematics and aerodynamics in multiple flight modes of a dragonfly," *Journal of Fluid Mechanics*, 2023, doi: 10.1017/jfm.2023.471.
- [6] H. N. a. K. Isogai, "Effects of Flapping Wing Kinematics on Hovering and Forward Flight Aerodynamics," *AIAA journal*, vol. 49, pp. 1750-1762, 2011, Art no. 8, doi: 10.2514/1.J050968. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. (AIAA).
- [7] E. a. W. Salami, Thomas and Montazer, Elham and Nik Ghazali, Nik Nazri, "A review of aerodynamic studies on dragonfly flight," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, p. 095440621986113, 2019, doi: 10.1177/0954406219861133.
- [8] Z. J. Wang, "The role of drag in insect hovering," *Journal of Experimental Biology*, vol. 207, no. 23, pp. 4147-4155, 2004.
- [9] W. Shyy, H. Aono, C. Kang, and H. Liu, *An Introduction to Flapping Wing Aerodynamics*. Cambridge University Press, 2013.
- [10] B. Tobalske, "Biomechanics of bird flight," *The Journal of experimental biology*, vol. 210, pp. 3135-46, 2007, doi: 10.1242/jeb.000273.
- [11] S. Y. L. a. G. R. S. a. W. K. Milsom, "Have wing morphology or flight kinematics evolved for extreme high altitude migration in the bar-headed goose?," *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, vol. 148, pp. 324-331, 2008, Art no. 4, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2008.05.009>.
- [12] D. Lentink and M. H. Dickinson, "Rotational accelerations stabilize leading edge vortices on revolving fly wings," *Journal of Experimental Biology*, vol. 212, no. 16, pp. 2705-2719, 2009, doi: 10.1242/jeb.022269.
- [13] D. L. Altshuler *et al.*, "The biophysics of bird flight: functional relationships integrate aerodynamics, morphology, kinematics, muscles, and sensors," *Canadian Journal of Zoology*, vol. 93, no. 12, pp. 961-975, 2015, doi: 10.1139/cjz-2015-0103.
- [14] M. Sun, "Insect flight dynamics: stability and control," *Reviews of Modern Physics*, vol. 86, no. 2, pp. 615-646, 2014.



- [15] S. N. Fry, R. Sayaman, and M. H. Dickinson, "The aerodynamics of hovering flight in *Drosophila*," *Journal of Experimental Biology*, vol. 208, no. 12, pp. 2303-2318, 2005.
- [16] D. L. Altshuler, W. B. Dickson, J. T. Vance, S. P. Roberts, and M. H. Dickinson, "Short-amplitude high-frequency wing strokes determine the aerodynamics of honeybee flight," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, no. 50, pp. 18213-18218, 2005.
- [17] M. Ramasamy, T. E. Lee, and J. G. Leishman, "Flowfield of a rotating-wing micro air vehicle," *Journal of aircraft*, vol. 44, no. 4, pp. 1236-1244, 2007.
- [18] D. Birunner. "maximum climb altitude of a drone." <http://www.technik-consulting.eu/en/analysis/drone.html> (accessed).
- [19] H. V. Phan, S. Aurecianus, T. K. L. Au, T. Kang, and H. C. Park, "Towards the long-endurance flight of an insect-inspired, tailless, two-winged, flapping-wing flying robot," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5059-5066, 2020.
- [20] M. Karásek, F. T. Muijres, C. De Wagter, B. D. Remes, and G. C. De Croon, "A tailless aerial robotic flapper reveals that flies use torque coupling in rapid banked turns," *Science*, vol. 361, no. 6407, pp. 1089-1094, 2018.
- [21] H. V. Phan and H. C. Park, "Mimicking nature's flyers: a review of insect-inspired flying robots," *Current Opinion in Insect Science*, vol. 42, pp. 70-75, 2020.
- [22] A. E. Holness, H. A. Bruck, and S. K. Gupta, "Characterizing and modeling the enhancement of lift and payload capacity resulting from thrust augmentation in a propeller-assisted flapping wing air vehicle," *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 10, no. 1, pp. 50-69, 2018.
- [23] C. De Wagter, S. Tijmons, B. D. Remes, and G. C. de Croon, "Autonomous flight of a 20-gram flapping wing mav with a 4-gram onboard stereo vision system," in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014: IEEE, pp. 4982-4987.
- [24] S. Tanaka, A. Asignacion, T. Nakata, S. Suzuki, and H. Liu, "Review of biomimetic approaches for drones," *Drones*, vol. 6, no. 11, p. 320, 2022.
- [25] E. Billingsley, M. Ghommam, R. Vasconcellos, and A. Abdelkefi, "On the aerodynamic analysis and conceptual design of bioinspired multi-flapping-wing drones," *Drones*, vol. 5, no. 3, p. 64, 2021.
- [26] Y. Li, K. Yonezawa, R. Xu, and H. Liu, "A biomimetic rotor-configuration design for optimal aerodynamic performance in quadrotor drone," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 824-839, 2021.
- [27] "Delfly." <https://www.delfly.nl/> (accessed).
- [28] Festo. "BionicOpter." <http://www.festo.com/bionics> (accessed).
- [29] D. Drone. "Dove." Dove Drone (accessed).
- [30] Quantum-Systems. "Trinity F90+ Disaster Relief Mission." <https://quantum-systems.com/blog/2023/02/02/trinity-f90-disaster-relief-mission/> (accessed).