هجدهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن هوافضای ایران
دانشگاه صنعتی امیرکبیر- بهمن‌ماه۱۳۹۸
aero18-00830247

مروری بر ساختار پرنده‌های بدون سرنشین

شاهین درویش پور[۱]، جعفر روشنی‌یان[۲]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۲- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

چکیده

در این مقاله به مرور ساختارهای مختلف مورد استفاده در پرنده‌های بدون سرنشین پرداخته شده است، ابتدا بر اساس فعالیت‌های انجام شده، پرنده‌های بدون سرنشین به چهاردسته اصلی افق‌برخاست، عمودبرخاست، ترکیبی و زیست پایه تقسیم بندی شده اند، سپس به مرور انواع پرنده‌های ساخته شده ذیل این دسته بندی‌ها پرداخته شده است، در این مقاله تمرکز بر روی ساختار پرنده‌های بدون سرنشین است، بنابراین از پرداختن به پرنده‌های فضایی و دو(چند)زیست به دلیل استفاده از ساختار مشابه و هم چنین خاک هوشمند(که در برخی فعالیت‌های مشابه مورد بررسی قرار گرفته است) پرهیز شده است.

واژگان کلیدی: *پهپاد، پرنده بدون سرنشین، مرور، ساختار پرواز، دسته بندی پرنده‌های بدون سرنشین*

۱- مقدمه

پرنده‌های بدون سرنشین در سالهای اخیر توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده اند، طی چند دهه اخیر شاهد توسعه انواع مختلفی از پرنده‌های بدون سرنشین بوده ایم که در بخش‌ها و ابعاد مختلفی دارای خلاقیت و نوآوری بوده اند، هر کدام از این پرنده‌ها مزایا و معایبی دارند که آنها را برای ماموریت‌های مختلفی مناسب یا نامناسب می‌سازد.

بررسی کلی پرنده‌های بدون سرنشین ضمن مشخص کردن میزان توسعه در این صنعت به ما کمک می‌کرد تا در استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین در ماموریت‌های مختلف بتوانیم انتخاب مناسبی داشته باشیم یا در صورت نیاز به توسعه پرنده ای جدید، با پیشینه پرنده و فعالیت‌های مشابه انجام شده در آن حوزه آشنا شویم، تمام اینها ما را بر آن داشت تا به مرور ساختار پرنده‌های بدون سرنشین بپردازیم.

در این مقاله به کمک بررسی فعالیت‌های مشابه انجام شده و با کمی اصلاحات در دسته بندی های پیشین، به ارائه یک دسته بندی کلی از پرنده‌های بدون سرنشین بر اساس ساختار آنها پرداخته ایم و سپس انواع مختلف پرنده‌های بدون سرنشین را ذیل این دسته بندی‌ها بررسی کرده ایم.

این بررسی حاصل مرور چند صد پایان نامه و مقاله داخلی و خارجی است، سعی شده است در هر بخش به معرفی فعالیت‌های شاخص انجام شده در آن بخش پرداخته شود تا ضمن بررسی مزایا و معایب پرنده‌ها از ذکر فعالیت‌های مشابه جلوگیری شود، بنابراین ضمن تایید امکان غفلت از برخی پژوهش‌ها باید یادآوری شود که در این مقاله تنها برخی از موارد برگزیده ذکر شده اند.

۲- دسته بندی پرنده‌های بدون سرنشین

دسته بندی پرنده‌های بدون سرنشین غالبا بر اساس وزن و ابعاد انجام می‌شود به عنوان نمونه می‌توان به دسته بندی سازمان هواپیمایی کشوری [1]، هولند [2]، ارجمندی [3]، ویبل [4] و حسنعلیان [5] اشاره کرد، دسته بندی حسنعلیان نسبت به سایر دسته بندی‌ها مشخص، مناسب و جامع تر است. در بیشتر دسته بندی های فوق توجهی به ساختار پرنده‌های بدون سرنشین نشده و توجه به وزن و ابعاد نیز غالبا به سلیقه محققین یا سازمان ها انجام شده است، همین امر سبب چندگانگی دسته بندی‌ها و وجود تفاوت در تعاریف رده‌های پرنده‌های بدون سرنشین شده است.

جدول ۱- رده‌بندی تعریف شده برای پرنده‌های بدون سرنشین توسط حسنعلیان بر اساس جرم و ابعاد [5]

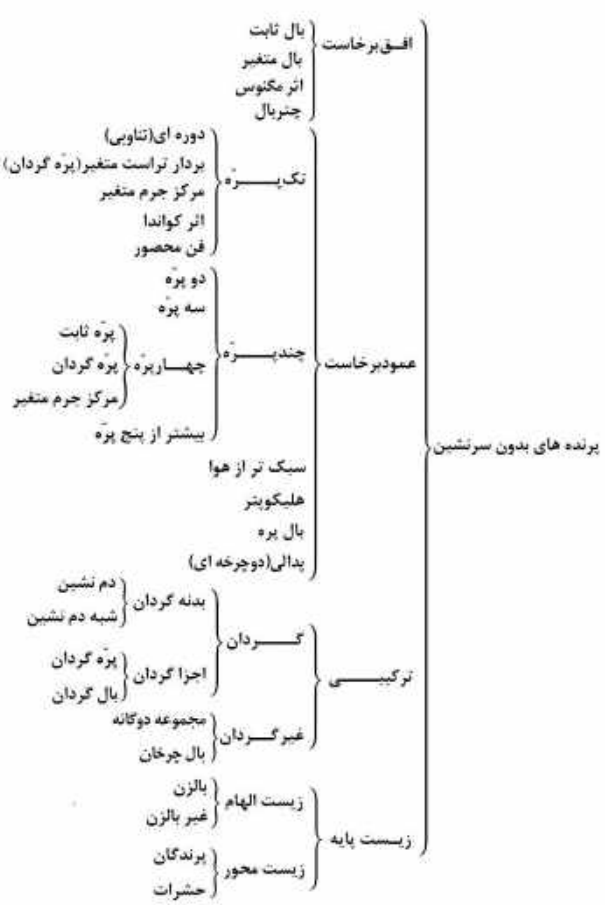
رده	محدوده وزن	محدوده دهانه بال
UAV	۵ تا ۱۵۰۰ کیلوگرم	۲ تا ۶۱ متر
µUAV	۲ تا ۵ کیلوگرم	۱ تا ۲ متر
MAV	۵۰ تا ۲۰۰۰ گرم	۱۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر
NAV	۳ تا ۵۰ گرم	۲.۵ تا ۱۵ سانتی‌متر
PAV	۰.۵ تا ۳ گرم	۰.۲۵ تا ۲.۵ سانتی‌متر
SD	۰.۰۰۵ تا ۰.۵ گرم	۱ تا ۲.۵ میلی‌متر

حسنعلیان پس از این رده بندی به ارائه یک دسته بندی کلی برای پرنده‌های بدون سرنشین پرداخته است، شیوه دسته بندی حسنعلیان بر پایه رده‌های فوق بوده است، او و همکارش هر رده را به تعدادی دسته بندی تقسیم کرده اند، اما به این دلیل که رده‌های فوق تنها در وزن و ابعاد تفاوت دارند، در این شیوه آنها ذیل هر رده مجبور به ذکر چند دسته بندی تکراری شده اند، به عنوان نمونه دسته بندی بال ثابت(یا موارد دیگر) ذیل بیشتر رده‌ها آورده شده است، جز این، چند اشکال دیگر در کار آنها دیده می‌شود، به عنوان مثال آنها در کنار دسته بندی VTOL دسته بندی هلی‌کوپتر و چهارپرّه[۱] را هم قرار داده اند، حال آنکه هر دو این دسته بندی‌ها زیرمجموعه VTOL محسوب می‌شوند(دسته بندی‌های دیگری نیز مشابه این در کار آنها یافت می‌شود) آنها همچنین در هر رده تعدادی پرنده را در دسته بندی "نامشخص[۲]" جای داده اند چنین مشکلی بیشتر به دلیل ماهیت دسته بندی آنها به وجود آمده است، هر چند این دسته بندی به خوبی وزن و ابعاد پرنده های بدون سرنشین را پوشش می‌دهد اما ساختار پرنده های بدون سرنشین را به بهترین نحو ممکن مورد توجه قرار نمی‌دهد.

عدنان سعید و همکارانش نیز تلاش ارزشمندی را برای دسته بندی پرنده‌های ترکیبی[۳] انجام داده اند [6]، آنها بر خلاف حسنعلیان و همکارش دسته بندی خود را بر پایه عملکرد و ساختار پرنده‌ها انجام داده اند و در نتیجه کار آنها از این نظر بسیار مناسب و جامع شده است، تنها اشکال کار آنها این است که تعدادی از پرنده‌های ترکیبی(در دسته‌های مجموعه دوگانه[۴] و پرّه‌گردان) را در پژوهش خود مورد مطالعه قرار نداده اند.

[1] Quadrotor
[2] Unconventional
[3] Hybrid
[4] Dual Systems

براساس دو دسته بندی اساسی انجام شده توسط حسنعلیان و سعید و با در نظر گرفتن ملاحظاتی که یاد شد، ما پرنده‌های بدون سرنشین را به چهار رده اساسی تقسیم کرده ایم، افق‌برخاست[1]، عمودبرخاست[2]، ترکیبی و زیست‌پایه[3] هر کدام از این رده‌های اساسی به چند دسته بندی تقسیم بندی شده اند تا بررسی پرنده‌های بدون سرنشین ذیل این دسته بندی‌ها به شکلی منسجم انجام شود.



شکل ۱- دسته بندی پرنده‌های بدون سرنشین

پرنده‌های افق‌برخاست به چهار دسته بندی بال ثابت، بال متغیر، پرنده‌های اثر مگنوس[4] و چتربال[5] تقسیم بندی شده اند، همچنین پرنده‌های عمودبرخاست را به دسته‌های اساسی تک‌پرّه[6]، چندپرّه[7]، سبک تر از هوا، هلی‌کوپتر، بال‌پرّه[8] و پدالی[9] تقسیم بندی کرده ایم. در دسته بندی پرنده‌های تک‌پرّه ما چهار زیردستهٔ دوره ای[10](شبه بالزن)، بردار پیشران متغیر[11](پرّه گردان)، مرکزجرم متغیر[12] و اثر کواندا[13] را خواهیم داشت، در دسته بندی چندپرّه نیز زیردسته‌های دوپرّه[14]، سه‌پرّه[15]، چهارپرّه و بیش از چهار پرّه را در نظر گرفته ایم، هر کدام از این زیردسته‌ها به چند گروه شامل پرّه ثابت، پرّه گردان[16] و مرکزجرم متغیر تقسیم بندی شده اند.

رده پرندگان ترکیبی، ترکیبی از رده عمودبرخاست و افق‌برخاست هستند، آنها را به صورت کلی به دو دسته بندی گردان[17] و غیرگردان[18] تقسیم بندی کرده ایم، دسته بندی پرندگان ترکیبی گردان به دو زیردسته بدنه گردان[19] و اجزا گردان تقسیم بندی شده اند، در زیردسته بدنه گردان ما دو گروه دم‌نشین‌ها[20] و شبه‌دم‌نشین‌ها[21] را خواهیم داشت و در زیردسته اجزاء گردان، گروه‌های پرّه‌گردان‌ها و بال‌گردان‌ها[22] را خواهیم داشت. دسته بندی پرندگان ترکیبی غیرگردان نیز به دو زیردسته مجموعه دوگانه[23] و بال چرخان[24] تقسیم بندی شده اند.

رده پرندگان زیست پایه را به دو دسته بندی زیست الهام[25] و زیست محور[26] تقسیم بندی کرده ایم، دسته بندی زیست الهام از دو زیردسته بال‌زن[27] و غیربال‌زن تشکیل شده است و دسته بندی زیست محور به دو زیردسته پرندگان و حشرات تقسیم می‌شود.

برخی از دسته های بررسی شده در واقع به دو یا چند دسته تعلق دارند، به عنوان مثال پرندگان بالزن عمودبرخاست نیز هستند اما وجه غالب طراحی آنها، شبیه سازی پرواز واقعی پرندگان است، بنابراین در نهایت به صورت جداگانه و ذیل رده زیست پایه مورد بررسی قرار گرفته اند تا ایده اصلی آنها برای پرواز مورد توجه قرار بگیرد.

بدین ترتیب ما خواهیم توانست تمام ساختارهای پرنده‌های بدون سرنشین را درقالب فوق مورد بررسی قرار دهیم.

۳- افق برخاست‌ها

رده افق‌برخاست شامل پرندگانی می‌شود که برای پرواز نیازمند باند پرواز یا طی کردن مسیری به صورت افقی هستند، این حرکت می‌تواند توسط موتورهای پرنده ایجاد شود یا با یک نیروی اولیه خارجی(مانند پرندگان پرتابی). فرآیند نشست این پرندگان هم غالبا به صورت افقی انجام می‌شود. در این مقاله غالبا منظور از فاز برخاست، هر دو فاز نشست و برخاست است.

۳-۱ بال ثابت

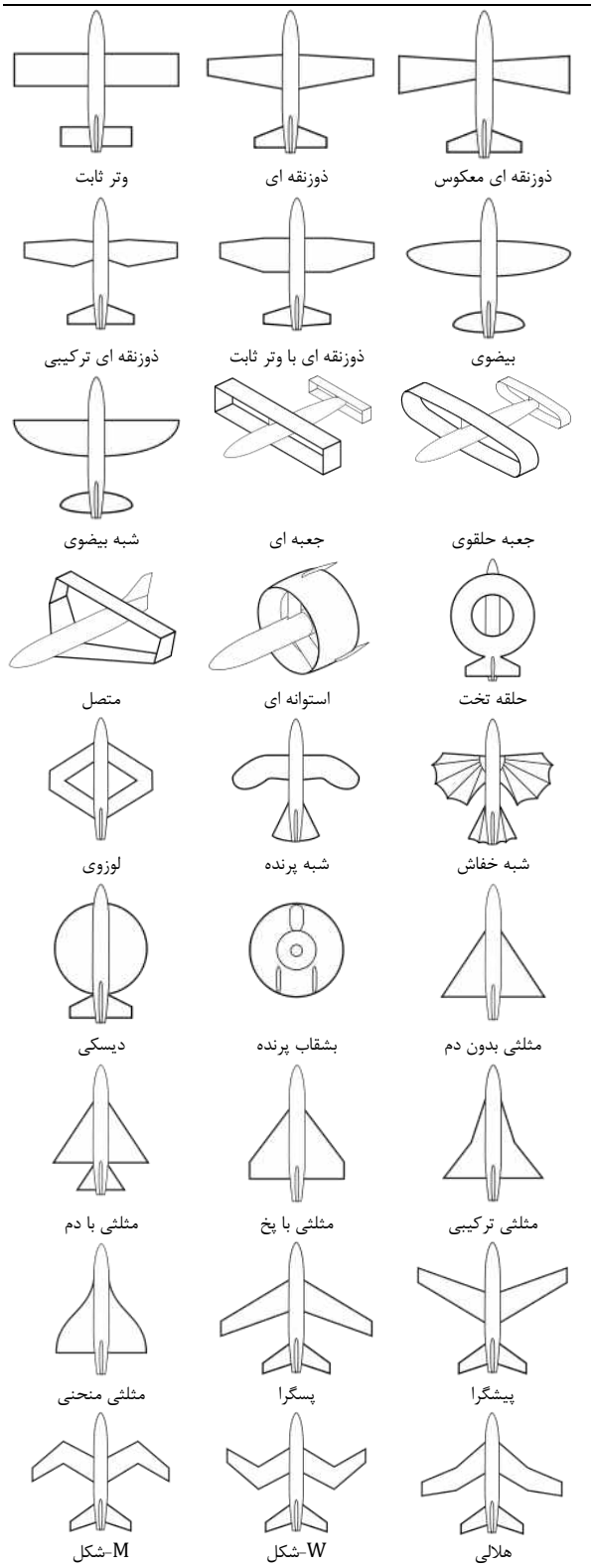
دسته بندی بال‌ثابت در رده پرندگان افق‌برخاست به پرندگان کلاسیک اطلاق می‌شود که از نیروی برآر ایجاد شده در اثر حرکت بال در جریان هوا برای پرواز استفاده می‌کنند. پرندگان بال ثابت می‌توانند از انواع مختلف بال و حتی بیش از یک بال(بسته به ماموریت خود) برای پرواز استفاده کنند.

پرندگان بال ثابت می‌توانند از نظر تعداد، جانمایی و شکل دم نیز انواع متفاوتی را تشکیل دهند، اما فرآیند پرواز آنها بر اساس تولید نیروی برآر توسط بال است و این تفاوت‌ها برای افزایش بهره‌وری یا مسائلی مانند مانورپذیری، افزایش ظرفیت بار و مسائلی از این دست ایجاد می‌شوند.

---

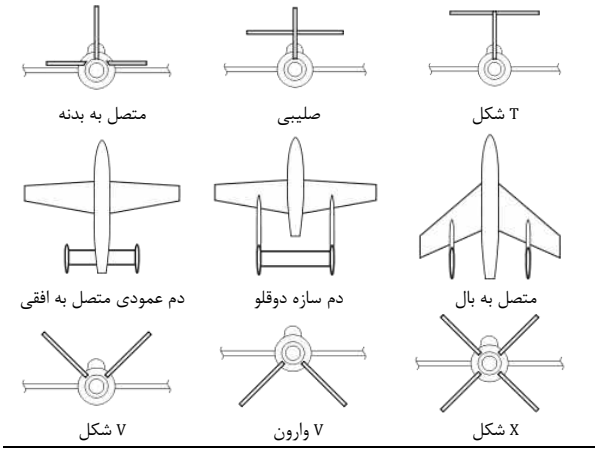
[1] Horizontal Takeoff and Landing
[2] Vertical Takeoff and Landing
[3] Bio-Based
[4] Magnus Effect
[5] Paraglider
[6] Monorotor
[7] Multirotor
[8] Wing Rotor
[9] Cyclocopter
[10] Cyclic(Ornicopter)
[11] Thrust Vectored
[12] Moving CoG(Moving Mass)
[13] Coanda Effect
[14] Dirotor(Bi-Copter or Bi-Rotor)
[15] Trirotor(Tri-Copter)
[16] Tilt Rotor
[17] Tilt
[18] non-Tilt
[19] Tilt Body
[20] Tail-Sitter
[21] Semi Tail-Sitter
[22] Tilt Wing
[23] Dual System
[24] Rotary Wing
[25] Bio-Inspired
[26] Bio-Based(Cyborg)
[27] Flapping UAV

جدول ۲- ساختارهای مختلف بال

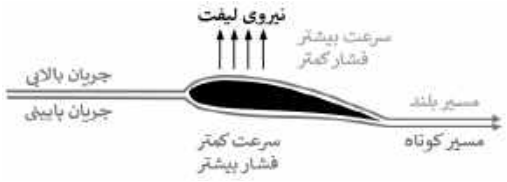


مشابه بال، دم پرندگان بال ثابت نیز ساختارهای متفاوت و متنوعی دارند، که هر یک کاربردهای مختلفی دارند، بررسی ویژگی های تک تک آنها خارج از موضوع این پژوهش است، بنابراین به صورت جزئی به بررسی آنها نخواهیم پرداخت.

جدول ۳- ساختارهای مختلف دم

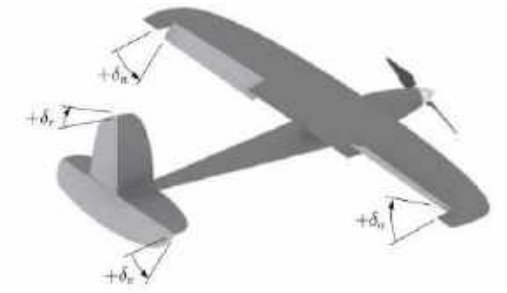


یک پرنده بال ثابت به طور معمول از یک بال، یک دم افقی، یک دم عمودی و یک موتور پیشران غالبا ملخی تشکیل شده است. روی سطح بال و دم‌ها سطوح کنترلی تعبیه شده اند که با تغییر انحنای بال یا دم جریان هوا و در نتیجه نیروی برآر را کنترل می‌کنند. به کمک سه سطح کنترلی روی بال، دم افقی و دم عمودی و نیروی پیشران قادر خواهیم بود این نوع پرنده‌ها را کنترل کنیم.



شکل ۲- نحوه تولید برآر در بال

پرنده‌های بال ثابت پرنده‌هایی با ساختاری بسیار ساده هستند، در آنها می‌توان از انرژی سوختی، خورشیدی و الکتریکی برای ایجاد نیروی پیشران استفاده کرد، در ابعاد مختلفی قابل پیاده سازی هستند و در بازه وسیعی از ارتفاع پرواز می‌کنند با تمام اینها به دلیل قابلیت حمل سوخت بیشتر، غالبا مداومت پروازی بالایی نیز دارند. با وجود تمام این مزایا آنها نیازمند باند پرواز برای نشست و برخاست هستند و برخلاف پرندگان عمودبرخاست قابلیت پرواز ایستا ندارند.



شکل ۳- سطوح کنترلی پرنده بدون سرنشین بال ثابت

با تمام این معایب و مزایا آنها پرکاربردترین پرندگان بدون سرنشین هستند و چندین هزار مدل از آنها تا کنون در سراسر دنیا ساخته شده است، به عنوان نمونه، تنها در کشور چین حدود ۱۶۵۰ مدل مختلف از این نوع پرنده توسعه داده شده است.[7]

شکل ۴- نمونه‌هایی از پرندگان بدون سرنشین بال ثابت

۳-۲ بال متغیر(تغییر شکل پذیر)

دسته بندی بال متغیر در رده پرندگان افق‌برخاست از نظر انواع و عملکرد بسیار شبیه به دسته بندی بال ثابت است، با این تفاوت که بسته به رژیم پروازی یا موارد دیگر، بال این پرندگان شکل متفاوتی به خود می‌گیرند، این تغییر شکل می‌تواند در مشخصات جزئی بال مانند زاویه پسگرایی یا پیشگرایی باشد و یا تغییر شکل به صورت عمده تری انجام شود.

شکل ۵- نمونه ای از یک بال با زاویه پسگرایی متغیر[8]

بررسی آیرودینامیکی و معادلات پرواز در فاز تغییر شکل بال از چالش‌های مهم این دسته از پرندگان است که پژوهش‌های بسیاری تا کنون در رابطه با آنها انجام شده است، از جمله پایان نامه دستورانی در دانشگاه فردوسی مشهد. [9]

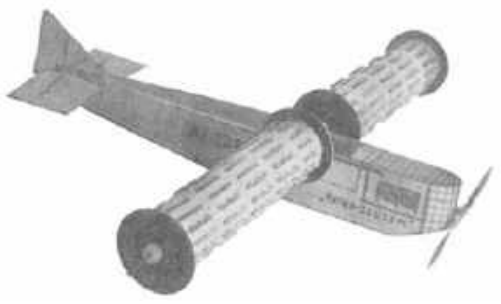
پرندگان بالزن نیز از نوع پرندگان بال متغیر محسوب می‌شوند که در بخش پرندگان زیست‌پایه مورد بررسی قرار گرفته اند.

شکل ۶- پرنده با بال تغییر شکل پذیر ناسا Dydren I2000 [10]

به دلیل تشابه سازوکار پرواز در این پرنده‌ها با پرندگان بال ثابت، و تنوع بسیار زیاد آنها، به همین معرفی ساده اکتفا می‌کنیم.

۳-۳ اثر مگنوس

این دسته از پرنده‌های افق‌برخاست بر پایه پدیده ای آیرودینامیکی به همین نام ساخته می‌شوند، اثر مگنوس باعث می‌شود به استوانه یا کره دواری که در مسیر جریان سیال قرار دارد یا در محیط سیالی در حال حرکت است نیرویی در جهت عمود بر مسیر حرکتش و متناسب با جهت و سرعت چرخش آن وارد شود، اثر مگنوس برای اولین بار توسط‌هاینریش گوستاو مگنوس فیزیک دان آلمانی بررسی شده و برای اولین بار نیز در کنترل کشتی مورد استفاده قرار گرفته است. [11]

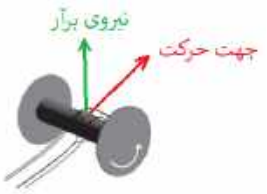


شکل ۷-پرنده مگنوس با بال استوانه ای با سطح ناهموار [11]

پرّه‌های مختلفی در دسته بندی پرّه‌های مگنوس قرار می‌گیرند از یک استوانه ساده تا استوانه ای که با پرّه‌هایی پوشیده شده باشد، برخی محاسبات نشان می‌دهند که استوانه ای با سطح زبر یا استوانه ای با ناهمواری‌های متقارن بهینه تر از یک استوانه با سطح صاف عمل می‌کنند. [11]

به طور معمول نیروی مگنوس از دو نیروی برآر عمود بر جریان هوا و پسار موازی با جریان هوا تشکیل می‌شود، اصطکاک بین سطح چرخان و جریان هوای اطراف آن باعث به وجود آمدن گشتاوری می‌شود که باید توسط سیستمی مکانیکی خنثی شود. از طرف دیگر چرخش استوانه باعث به وجود آمدن نیروهای ژیروسکوپی می‌شود، در نتیجه کنترل پرنده باید بر اساس اصل تقدم ژیروسکوپی انجام شود. [11]

نیروی برآر تولید شده توسط استوانه به نسبت سرعت جنبی به سرعت جریان آزاد بستگی دارد، برخلاف پرندگان بال ثابت که نیروی برآر در آنها به زاویه حمله وابسته است. به عنوان نمونه برای دیسک دوار شکل۸ وارد شدن یک گشتاور مثبت در جهت مثبت غلت باعث حرکت دیسک در جهت مثبت سمت می‌شود. [11]



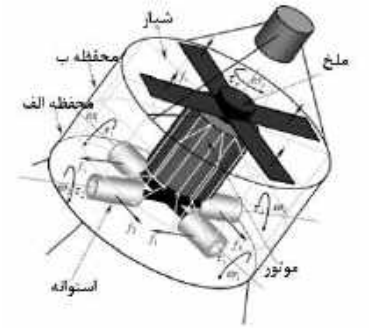
شکل ۸-تولید نیروی برآر توسط استوانه چرخان

بدین ترتیب با توجه به نکات یاد شده، پرنده مشابه یک پرنده بال ثابت کنترل خواهد شد، با این تفاوت که تاثیر سطوح کنترلی مانند پرنده بال ثابت نخواهد بود و بیشتر مشابه هلیکوپتر عمل خواهد کرد. [11]

در این نوع پرنده‌ها در صورت از دست رفتن یا ایجاد نقص در موتورها به دلیل قابلیت چرخش خودکار بال(که در انواع خاصی از بال مگنوس اتفاق می‌افتد) پرنده تا مدتی به پرواز خود ادامه خواهد داد و از این نظر امنیت پرواز بیشتر از سایر پرندگان بدون سرنشین خواهد بود اما وابستگی جهت نیروی برآر به جهت سرعت جریان هوا و کنترلر پیچیده تر در کنار ملاحظات آیرودینامیکی بسیار، باعث شده است استفاده از این پرنده‌ها با مشکلات خاص خود روبرو باشد. [11]

معادلات دینامیکی و مدل ریاضی چنین پرنده ای به همراه معادلات آیرودینامیک آن توسط سیفرت استخراج شده است. [11] همچنین مدل‌های مختلفی از آن تا کنون توسعه داده شده است، به عنوان نمونه هو و همکارانش به توسعه پرنده مگنوس ترکیب شده با فن محصور پرداخته اند [12] ، هی نیز اختراعی بر اساس ترکیب پرنده‌های بال ثابت و اثر مگنوس به ثبت رسانده است.[13] بادالامانتی نیر به عنوان رساله دکتری خود تحقیقات مفصل و ارزشمندی در حوزه پرنده‌های اثر مگنوس انجام داده

است، او ضمن ساخت نمونه ای از پرنده اثر مگنوس، چندین طرح مفهومی‌نیز در این حوزه ارائه کرده است. [14]



شکل ۹-پرنده ترکیبی اثرمگنوس و فن محصور هو و همکارانش [12]

شکل ۱۰-طرح‌هایی از پرنده اثر مگنوس سمت راست([15]) سمت چپ([16])

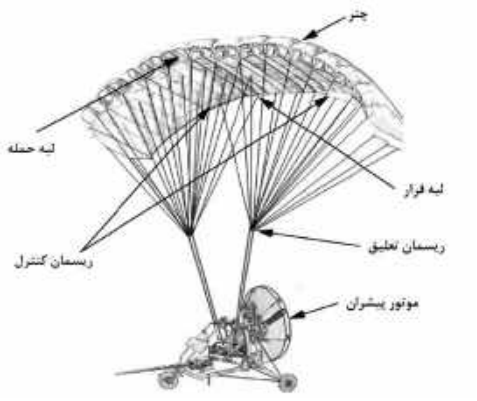
شکل ۱۱-طرح‌های مفهومی‌ارائه شده توسط بادالامانتی برای پرنده اثر مگنوس [14]

۳-۴ چتربال

چتربال یا پاراگلایدر دقیقا مشابه نمونه های با سرنشین خود ساخته می‌شود، در این پرنده ها یک چتر نقش بال را برای تولید نیروی برآر ایفا می‌کند، موتور پیشران پرنده توسط کابل هایی به چتر متصل شده است که غالبا به ملخی با گام ثابت متصل است.

از این پرندگان بدون سرنشین می‌توان برای جابجایی محموله های سنگین استفاده کرد، با توجه به اینکه معمولا از موتورهای سوختی در آنها استفاده می‌شود، مداومت پروازی بالایی دارند، هزینه ساخت نسبتا پایینی دارند و علاده بر پایداری مناسب، نسبت به اغتشاشات نیز مقاوم اند. با این حال مدلسازی ریاضی آنها به دلیل حرکات نوسانی که فاصله بین مرکز جرم چتر و محموله ایجاد می‌کند، اثر قابل توجه تغییر پیشران بر روی زاویه فراز، انعطاف پذیری ریسمان ها که منجر به حرکت فراز و سمت می‌شود و پر بودن چتر از هوا که باعث می‌شود با هر تغییری در حرکت چتر نرخ جریان عوض شود بسیار چالش برانگیز است.[17]

کنترل این پرنده ها به کمک ریسمان‌هایی متصل به چتر انجام می‌شود، این ریسمان ها با دوران چتر، جریان هوا روی آنرا تغییر می‌دهند، در نتیجه جهت نیروی برآر و پسار تولید شده توسط چتر(که مقطعی مانند بال ثابت دارند) تغییر کرده و پرنده در مسیر مورد نظر حرکت خواهد کرد.



شکل ۱۲ ساختار یک چتربال بدون سرنشین [17]

طراحی، مدلسازی ریاضی و کنترل چنین پرنده ای توسط بینگ‌بینگ و همکارانش انجام شده است، معادلات دینامیکی به دست آمده توسط آنها به کمک نتایج واقعی به دست آمده از مدل ساخته شده صحت سنجی شده است.

شکل ۱۳ چتربال بدون سرنشین بینگ‌بینگ و همکارانش [17]

۴- عمودبرخاست‌ها

پرندگان این دسته برای پرواز نیازمند باند نشست و برخاست نیستند و به وسیله نیروی پیشران غالبا الکتریکی و به کمک ملخ قادر به نشست و برخاست عمودی هستند.

۴-۱ تک پرّه

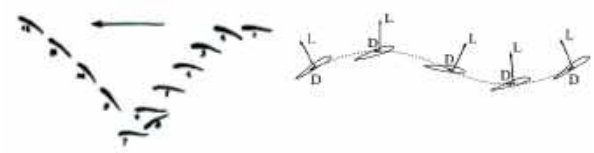
در پرنده‌های تک پرّه به دلیل وجود تنها یک موتور، کنترل پرنده و خنثی کردن گشتاور عکس العملی حاصل از چرخش پرّه، مسئله چالش برانگیزی است، به همین دلیل نوآوری‌ها و خلاقیت‌های پرشماری برای رفع این مشکل پیشنهاد شده است، همین موضوع باعث به وجود آمدن انواع مختلفی از این نوع پرنده‌ها شده است. بر اساس همین نوآوری‌های انجام شده برای کنترل پرنده با یک پرّه، این رده را به چهار ردهٔ دوره ای(شبه بالزن)، بردار رانش متغیر، مرکز جرم متغیر و اثر کواندا تقسیم کرده ایم، دسته ای از پرنده‌ها با نام متعارف مونوکوپتر[1] را با وجود استفاده از یک پرّه در رده بال‌پرّه بررسی کرده ایم و در این بخش مورد بررسی قرار نگرفته اند.

۴-۱-۱ دوره ای(شبه بالزن)

این دسته از پرنده‌ها را می‌توان شبه‌بالزن یا تک پرّه تناوبی نامید، این دسته از پرنده‌ها، هلیکوپترهایی بدون دم و تنها با یک پرّه هستند که تغییرات دوره ای یا تناوبی در پرّه آنها مبنای پرواز و کنترل آنهاست. دم

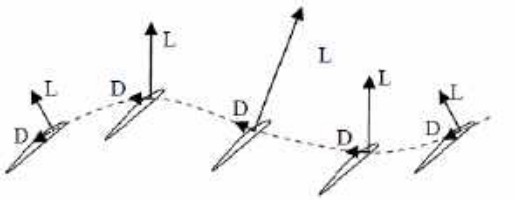
[1] Monocopter

هلیکوپتر در کنار تمام مزایایی که دارد، از جمله کمک به پایداری و مانورپذیری، هزینه زیادی برای سیستم دارد، مصرف انرژی پرنده را بالا می‌برد، آلودگی صوتی دارد و در برابر نیروهای خارجی مانند باد، کنترل مجاز محدودی دارد. برای رفع این مشکل محققان دانشگاه دلف برای اولین بار طرحی ارائه کردند که در آن از یک پرّه بدون دم برای پرواز استفاده می‌شد. در این طرح پرّه‌ها علاوه بر حرکت چرخشی خود، حرکات عمودی و گردشی را به صورت دوره ای انجام می‌دهند، بدین ترتیب علاوه بر نیروی رانش، مانند یک بال نیروی پسار نیز تولید خواهند کرد، از این نیرو می‌توان برای کنترل پرنده استفاده کرد. [18]



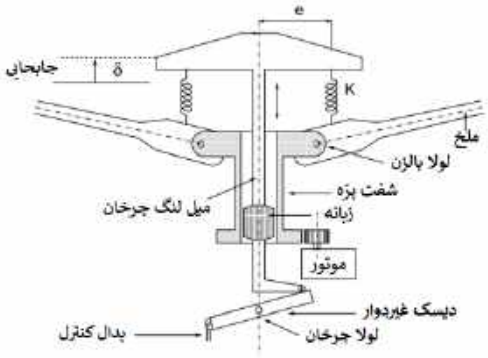
شکل ۱۴-حرکت گردشی و انتقالی در پرنده‌های دوره ای[18]

ایرفویلی مانند شکل۱۳ را در نظر بگیرید که در مسیری نوسانی حرکت می‌کند، این فرآیند شبیه اتفاقی است که در پرنده‌های دوره ای اتفاق می‌افتد، میانگین برآیند نیروهای آیرودینامیکی در یک چرخه، یک نیروی جلوبرنده در خلاف جهت پسار و یک نیروی بالابرنده خواهد بود. چون مولفه افقی نیروی برآر در هنگام پایین آمدن پرّه در مسیر حرکت خود، بزرگتر از مولفه افقی نیروی برآر در هنگام بالا رفتن پرّه در مسیر حرکت خود می‌باشد، لذا برآیند نیروهای افقی، در خلاف جهت پسار خواهد شد. [19]



شکل ۱۵-شبیه سازی بخشی از حرکت پرّه در پرنده‌های تک پرّه دوره ای [19]

برآیند نیروی رو به جلو در یک سیکل کامل در جهت خلاف نیروی پسار بوده و بر خلاف یک هلیکوپتر صفر نمی‌شود، این نیروی برآیندی می‌تواند با گشتاور عکس العملی حاصل از چرخش پرّه مقاومت کند و در نتیجه نیازی به پرّه یا فن دمی برای خنثی سازی گشتاور عکس العملی وجود نخواهد داشت. [20]

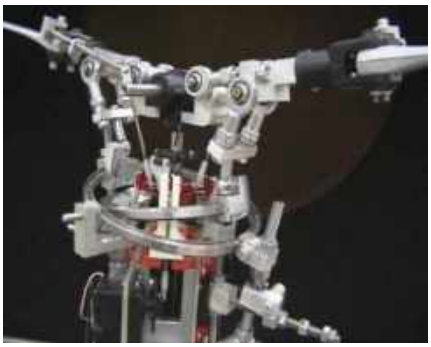


شکل ۱۶-سازوکار حرکت دوره ای پرنده [18]

حرکت انتقالی پرنده باعث به وجود آمدن اغتشاشات مزاحم در پرنده می‌شود، برای این مشکل ایده‌های مختلفی مطرح شده است، از جمله استفاده از یک جفت ملخ ساده دیگر(چهار پرّه)، استفاده از سه پرّه و استفاده از ملخ‌های نامتقارن. [20]

شکل ۱۷-نمونه ای از یک پرنده تک پرّه دوره ای با ملخ‌های نامتقارن[20]

در این پرنده‌ها همانند هلیکوپترها، انحراف مجموعه صفحه سواش عامل ایجاد کنترلهای تناوبی و تجمعی است. گردش صفحه پرّه، صفحات ملخ‌ها را به صورت نامتقارن نسبت به محور اصلی کج می‌کند، در نتیجه تغییر مقدار زاویه بال زنی، نیرویی در صفحه افقی به وجود نخواهد آورد، این مسئله باعث می‌شود کنترل سمتی و کنترل دوره ای(تناوبی) مستقل از یکدیگر باشند و بر یکدیگر اثری نداشته باشند. [19]



شکل ۱۸-سازوکار صفحه سواش[1] در آرنیکوپتر ساخته شده در دانشگاه دلف [19]

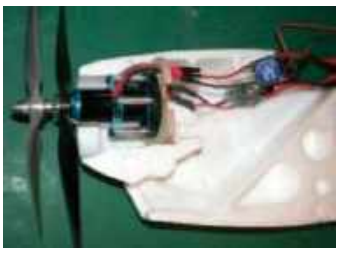
معادلات دینامیکی پرنده و مدل ریاضی آن برای اولین بار توسط هولتن استخراج شده است [18] در این نوع پرنده به دلیل استفاده از تنها یک پرّه و عدم استفاده از پرّه دمی(مانند هلی‌کوپترها) برای پایداری سمتی، مصرف انرژی کمتر است، در عوض اما سازوکار کنترل پیچیده تر از انواع هلی‌کوپترهاست.

علاوه بر دانشگاه دلف نسخه ای آزمایشگاهی در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی توسط فرشیدنقش [19] و نسخه ای نیز توسط هلگرز و همکارانش در دانشگاه علوم کاربردی آمستردام توسعه داده شده است.[21]

۲-۱-۴ بردار پیشران متغیر

این دسته از پرنده‌ها از یک موتور غالبا بدون جاروبک تشکیل شده اند که به صورت هم زمان قادر به ایجاد چرخش ساعتگرد و پادساعتگرد است(دوجهته)، دو ملخ ساعتگرد و پادساعتگرد به کمک این نوع موتورها نیروی پیشران مورد نیاز پرنده را در حالی تأمین می‌کنند که گشتاوری به پرنده اعمال نخواهند کرد.

[1] Swash Plate



شکل ۱۹-موتور دوجهته و ملخ‌های متصل به آن

این موتور غالبا بر روی یک عملگر سروو سوار می‌شود که آن را در جهات مختلف می‌گرداند این تغییر در بردار پیشران حرکت طولی و عرضی را ممکن می‌کند، با تغییر در سرعت چرخش پرّه‌ها امکان حرکت سمت محقق می‌شود.

شکل ۲۰-نمونه ای از پرنده تک پرّه با بردار رانش متغیر به همراه یک دوربین[22]

پرنده‌های این دسته با توجه به عدم حضور گشتاور عکس العملی مزاحم و استفاده از سازوکار جهت دهی بردار رانش، معادلات ساده تری دارند و در حالت پرواز شناوری به سادگی می‌توان آنها را به صورت یک جرم و نیرو مدل کرد، به نظر می‌رسد به همین دلیل، تحقیقی بر روی مدلسازی آنها انجام نشده است، دست کم موردی به نظر نگارندگان این مقاله نرسیده است، بررسی آیرودینامیک دو پرّه به دلیل تزاحم جریان هوای عبوری روی دو پرّه، مسئله چالش برانگیزی است با این حال شبیه سازی عددی آیرودینامیکی چنین پرّه‌هایی توسط گرازیا انجام شده است.[23]

این دسته از پرنده‌ها نسبت به سایر پرندگان تک پرّه به دلیل عدم نیاز به خنثی سازی گشتاور عکس العملی، ساختار ساده تری دارند و کنترل آنها نیز ساده تر است. با توجه به فضای خالی زیر پرنده امکان جابجایی بار را دارند و نسبتا هزینه کمتری دارند اما در صورت از دست رفتن یکی از پرّه‌ها یا ملخ‌ها کنترل پرنده غیرممکن می‌شود، بنابراین حاشیه امنیت پایینی دارند(این مساله در مورد سایر تک پرّه‌ها نیز صادق است).

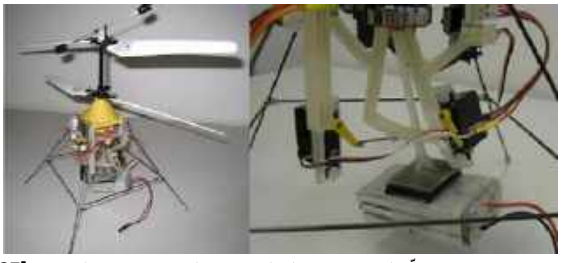
نمونه‌های کمی‌از این نوع پرنده ساخته شده است، از جمله آنها می‌توان به Bombardier OL327، EADS Dornier SEAMOS(and [24]GEAMOSو [25] Kamov KA-137 اشاره کرد.

شکل ۲۱-پرنده تک‌پرّه GEAMOS ساخت شرکت EADS[26]

۳-۱-۴ مرکز جرم متغیر

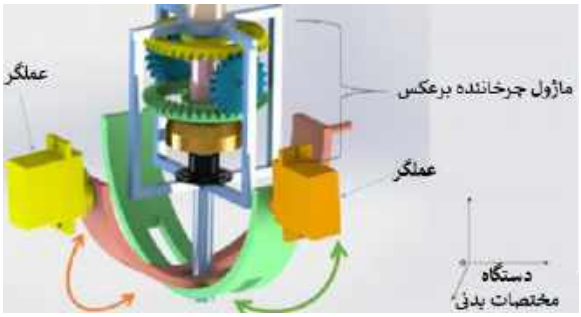
این دسته از پرنده‌ها مشابه پرنده‌های دستهٔ بردار رانش متغیر هستند با این تفاوت که روش مورد استفاده در این پرنده‌ها برای جهت دهی بردار رانش بر اساس جابجایی مرکز جرم است، اجرام متحرکی در این پرنده‌ها تعبیه شده اند که با جابجایی آنها مرکز جرم پرنده کنترل می‌شود، یکی از چالش‌های این روش کنترل، امکان تغییر قابل توجه ممان اینرسی پرنده است که می‌تواند مدل سازی یا خطی سازی انجام شده را از اعتبار ساقط کند.

در گذشته سازوکار جابجایی مرکز جرم به شکل گسترده ای در زیردریایی‌ها، موشک‌ها و بالن‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته است اما اخیرا در پرنده‌های چندپرّه نیز مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲۲-پرنده تک پرّه با مرکز جرم جابجا شونده ساخته شده توسط برمس [27]

در این نوع از پرنده‌ها، سازوکارهای جرم متحرکی برای جابجایی مرکز جرم تعبیه شده اند که می‌توانند در انواع مختلفی طراحی شوند، از جمله سیستم‌های قرقره، ریل، تسمه، چرخ دنده و موارد دیگر. حرکت سمت توسط ایجاد اختلاف سرعت در پرّه‌ها به دست می‌آید اما حرکات دیگر بر اساس جابجا کردن مرکز جرم. با توجه به اینکه بردار نیروی رانش غالبا ثابت است(جز در مانور سمت) با جابجایی مرکز جرم در راستای محور عرضی، نیروی رانش، گشتاوری حول محور طولی پرنده و با جابجایی مرکز جرم در راستای محور طولی، گشتاوری حول محور عرضی ایجاد خواهد شد که به ترتیب حرکات غلت و فراز را نتیجه خواهند داد.



شکل ۲۳-نمونه سازوکار جابجایی مرکز جرم در پرنده تک‌پرّه [28]

برمس معادلات دینامیکی چنین پرنده ای را مورد بررسی قرار داده است [27]، همچنین وی و همکارانش به طور جداگانه به بررسی پایداری [29] و کنترل[30] چنین پرنده ای نیز پرداخته اند و نمونه ای آزمایشگاهی از آن را توسعه داده اند، سرآبادانی نیز مدلسازی، کنترل و ساخت پرنده ای مشابه را در ابعاد میکرو در دانشگاه صنعتی شریف مورد بررسی قرار داده است. [31]

در این نوع پرنده‌ها پیچیدگی مربوط به پرنده‌های با پرّه‌های بیشتر یا صفحه رقصان وجود ندارد اما جفت[1] و غیرخطی بودن معادلات و متغیر بودن

[1] Couple

ماتریس ممان اینرسی و مرکز جرم با زمان و اضافه شدن نیروهای مزاحم در اثر حرکت اجرام متحرک از مواردی هستند که مدلسازی این پرنده را بسیار پیچیده می‌کنند.

۴-۱-۴ اثر کواندا

عبور جریان سیال از روی سطح باعث افت فشار استاتیک و نهایتا تولید نیروی برآر می‌شود(اثر کواندا)، ژان لویس بر این اساس طرح پرنده‌ای گنبدی شکل را توسعه داد که به پرنده کواندا معروف شد. یک ملخ هوا را به درون مجرای نصب شده در قسمت فوقانی پهپاد مکیده و با تزریق انرژی، جریان هوای پرسرعت را روی سطح گنبدی شکل آن هدایت می‌کند. جریان پرسرعت هوا با عبور از این سطح محدب شتاب گرفته و باعث افت فشار استاتیک می‌شود. بنابراین قسمت عمده ای از نیروی برآر مورد نیاز برای به پرواز در آوردن پهپاد در این ناحیه از بدنه تشکیل می‌شود. [32]

شکل ۲۴-پرنده ساخته شده بر اساس اثر کواندا

ایده این کار برای اولین بار توسط کولین ارائه شد و بعدها کار وی توسط دیگران توسعه داده شد.[33]

این پرنده دارای یک بدنه دوار مانند بشقاب پرنده است که یک فن یا ملخ در قسمت فوقانی آن جریان پرسرعت هوا را روی سطح هدایت می‌کند. کاهش فشار استاتیک روی سطح این وسیله باعث تولید نیروی برآر و پرواز آن می‌شود. کنترل حرکات و مانورهای آن نیز به کمک بالک‌هایی که روی بدنه نصب شده است صورت می‌گیرد، هندسه خاص و الگوی پیچنده جریان روی سطح این پرنده با سایر وسایل پرنده موجود متفاوت است.

جریان هوا در ادامه با بالک‌های ثابت پایدارساز برخورد می‌کند و در نتیجه تغییر جهت می‌یابد این تغییر مسیر باعث تولید گشتاوری در جهت مخالف گشتاور عکس العملی ملخ می‌شود که در نهایت مانع چرخش حول محور سمت می‌شود.

به منظور کنترل زاویه سمت تعدادی از این بالک‌ها به صورت متحرک در نظر گرفته شده اند. این پرّه‌های متحرک علاوه بر کنترل زاویه سمت به تنظیم وضعیت پرنده در شرایطی که دور موتور افزایش می‌یابد کمک می‌کنند.

جهت کنترل طولی و عرضی، سطوحی در انتهای قوس منحنی تعبیه شده اند که در شکل۲۲ با رنگ متفاوت مشخص شده اند، این سطوح کنترلی با منحرف کردن جریان هوا گشتاور لازم برای کنترل زوایای غلت و فراز را فراهم می‌کنند.

شکل ۲۵-بالک‌های تعبیه شده برای کنترل پرنده کواندا

معادلات دینامیکی این نوع پرنده، مدل سازی‌های ریاضی و محاسبات آیرودینامیکی آن توسط کولینز مورد بررسی قرار گرفته اند[34] همچنین ماهان پرواز این پرنده را در فاز ایستا مورد بررسی قرار داده است. [32]

برخلاف پرنده‌های فن محصور و بال ثابت‌ها در این نوع پرنده‌ها می‌توان تجهیزات و محموله را در داخل پرنده جانمایی کرد، این نوع پرنده همچنین آلودگی صوتی کمتری تولید می‌کند و برای استفاده در مناطق شهری از چندپرّه‌ها و هلی‌کوپترها امن تر و مناسب تر است اما نسبتا آیرودینامیک پیچیده تری داشته و دینامیک آن به شکل بدنه وابسته است.

ندلکات در پژوهشی به صورت مفصل به مرور و بررسی پرنده‌های اثر کواندا پرداخته است[35] ، همچنین تارنمای اینترنتی پرنده کواندا[1] تعداد زیادی مقاله، گزارش، ثبت اختراع، ایده و گزارش فنی مرتبط با این نوع پرنده‌ها را گردآوری کرده است.

۵-۱-۴ فن محصور[2]

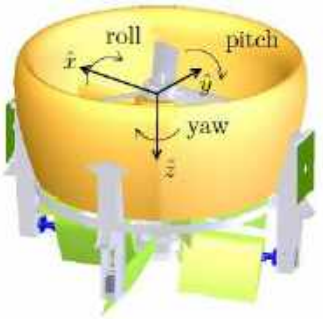
این دسته از پرنده‌ها از یک محفظه به همراه یک فن(یا ملخ) تشکیل شده اند و به کمک سطوح کنترلی تعبیه شده در انتهای محفظه به کنترل پرنده می‌پردازند. این دسته از پرنده‌ها را می‌توان در رده دم نشین نیز دسته بندی کرد، اما به دلیل اینکه پرواز آنها متکی به تنها پرّهٔ آنهاست(و از بال یا پیشبال[3] استفاده نمی‌کنند) در این رده دسته بندی شده اند.

نیروی پیشران این پرنده توسط یک فن یا ملخ و گاهی دو فن یا ملخ به صورت هم‌محور تامین می‌شود، در قسمت خروجی فن بالک‌هایی تعبیه شده است که با هدایت جریان باعث حرکت پرنده در فضا می‌شوند، مانورهای نشست و برخاست با افزایش و کاهش سرعت فن یا ملخ ممکن می شوند، با چرخش هر چهار بالک به یک اندازه، جریان هوا مانند گردابه به گردش در خواهد آمد و باعث حرکت سمت پرنده می‌شود.

شکل ۲۶-پرنده عمودپرواز فن محصور شرکت AD&D Hornet [36]

[1] www.coanda.co.uk
[2] Ducted Fan
[3] Canard

با توجه به شکل۲۴ در صورتی که دو بالک در راستای محور y در صفر درجه باقی بمانند، آنگاه با حرکت هم زمان دو بالک در راستای x می‌توان حرکت غلت را ایجاد کرد، به همین ترتیب با عکس این فرآیند حرکت فراز به دست خواهد آمد.



شکل ۲۷-ساختار یک پرنده عمودپرواز تک پرّه فن محصور[37]

در صورتی که از تنها یک فن استفاده شود برای خنثی کردن گشتاور عکس العملی حاصل از چرخش پرّه لازم است مقدار اولیه ای برای زاویه تمام بالک‌ها در نظر گرفت تا جریان هوا در جهت مخالف گشتاور حاصل از پرّه‌ها بچرخد.

اریکسون و همکارانش به شبیه سازی و مدل سازی چنین پرنده ای پرداخته اند و به کمک ساخت نمونه آزمایشگاهی صحت مدلسازی انجام شده را مورد بررسی قرار داده اند. [37]

در این نوع پرنده‌ها بازده ملخ به دلیل استفاده از محفظه افزایش می‌یابد همچنین برای تولید یک پیشران ثابت در مقایسه با ملخ بدون محفظه، به ملخ کوچکتری احتیاج خواهیم داشت، همچنین این امکان برای ما فراهم است تا محفظه را طوری طراحی کنیم که در سرعت‌های بالا بازده بالاتری داشته باشد با همه اینها این نوع پرنده‌ها آلودگی صوتی کمتری دارند و در پرنده‌های ترکیبی مانند پرّه‌گردان‌ها نیز قابل استفاده اند اما در کنار تمام این مزایا، آیرودینامیک پیچیده تری نسبت به ملخ‌های بدون محفظه دارند، برای رسیدن به بازده بالا فاصله ملخ و محفظه باید خیلی کم باشد، دور موتور بالایی نیاز دارند و در زاویه حمله بالا بخش‌هایی از محفظه دچار واماندگی می‌شوند و پسار آیرودینامیکی تولید می‌کنند.

نمونه ای تجاری از این نوع پرنده توسط شرکت Honeywell و آژانس تحقیقات پیشرفته دفاعی امریکا تحت عنوان T-Hawk توسعه داده شده است. نمونه مشابهی نیز توسط شرکت Finmeccanica توسعه داده شده است. [38]

شکل ۲۸-پرنده تک پرّه با فن محصور شرکت Honeywell[39]

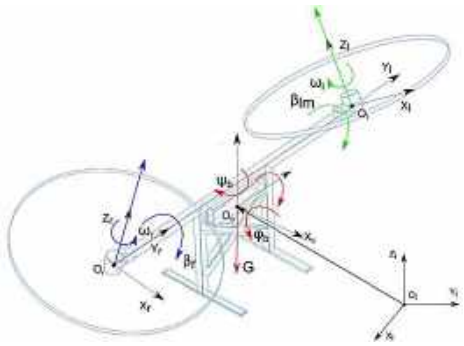
شکل ۲۹-پرنده تک پرّه با فن محصور شرکت Finemeccanica[38]

۴-۲ چندپرّه

چندپرّه‌ها از دو و بیشتر پرّه یا ملخ تشکیل شده اند و سازوکار اصلی پرواز آنها تولید نیروی پیشران از چرخش ملخ و کنترل پرنده با استفاده از کنترل سرعت موتورها است. این دسته از پرنده‌ها به خصوص چهارپرّه‌ها بسیار محبوب هستند و بیش از هزاران مدل از آنها در چند دهه گذشته ساخته شده است، علت این امر را می‌توان در سادگی ساخت و کنترل آنها پیدا کرد.

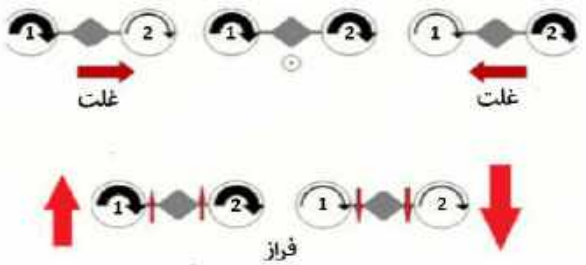
۴-۲-۱ دوپرّه‌ها

دو پرّه‌ها از دو موتور و ملخ که در خلاف جهت یکدیگر می‌چرخند(تا گشتاور عکس العملی یکدیگر را خنثی کنند) تشکیل شده اند.



شکل ۳۰-جهت دهی بردار رانش در پرنده‌های عمودبرخاست دوپرّه

اساس حرکت این دسته از پرنده‌ها جهت دهی بردار رانش است، هر یک از پرّه‌ها و موتورش به یک سروو موتور متصل است که آنرا حول محور عرضی می‌گرداند، بنابراین می‌توان آنها را پرّه گردان نیز نامید. حرکت سمت می‌تواند مانند پرنده‌های تک پرّه بر اساس اختلاف سرعت بین دو پرّه به دست آید، در این حالت حرکت سمت و حرکت غلت با یکدیگر جفت خواهند بود، راه دیگر دوران دادن موتورها به اندازه یکسان اما در خلاف جهت یکدیگر است، در این حالت تنها حرکت سمت به دست خواهد آمد. حرکت فراز با افزایش یا کاهش هم زمان و یکسان سرعت موتورها به دست می‌آید.



شکل ۳۱-نحوه حرکت پرنده عمودبرخاست دوپرّه [40]

چالوپا و همکارانش به بررسی مدل ریاضی پرنده عمودبرخاست دوپرّه پرداخته اند [41] همچنین فردوسی روی مدل سازی و ارائه کنترل فازی برای چنین پرنده ای تحقیق کرده است. [42]

این دسته از پرنده‌ها به دلیل عدم نیاز به دم افقی پایدارساز و استفاده از ظرفیت موتور دوم برای پرواز، عملکرد بهتری نسبت به هلی‌کوپترها دارند، همچنین از نظر پایداری نیز از تک پرّه‌ها و هلی‌کوپترها وضعیت بهتری دارند. [42]

شکل ۳۲-پرنده دوپرّه با ملخ محصور ناسا و شرکت Trek[43]

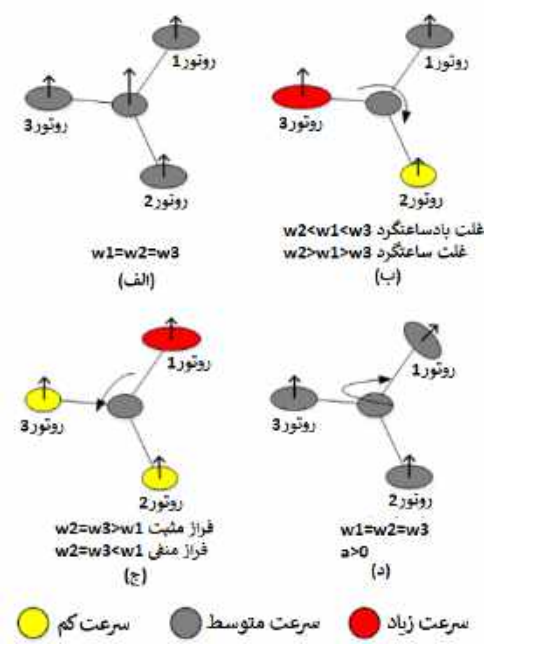
علاوه بر فعالیت‌های یادشده، موارد متعددی از این نوع پرنده ساخته و آزمایش شده اند، به عنوان مثال آگاروال به معرفی و ساخت یک نمونه اولیه از چنین پرنده ای پرداخته است [40]. شرکت ناسا با همکاری شرکت Trek Aerospace Inc پرنده عمودبرخاست دوپرّه ای را با ترکیب فن محصور توسعه داده است.[43] نموه ای نیز توسط پاپاکریستوس و همکارانش در دانشگاه پاتراس یونان توسعه داده شده است. [44]

شکل ۳۳-پرنده عمودبرخاست دو پرّه پاپاکریستوس [44]

۲-۲-۴ سه‌پرّه

این دسته از پرنده‌ها از سه موتور تشکیل شده اند که معمولا روی اضلاع یک مثلث متساوی الساقین قرار گرفته اند، گشتاورهای عکس العملی دو موتور با یکدیگر خنثی می‌شوند برای خنثی کردن گشتاور موتور سوم آنرا روی یک موتور سروو سوار می‌کنند و از جهت دهی بردار پیشران برای حفظ تعادل پرنده استفاده می‌کنند.

شکل۳۴ سازوکار پرواز را در چنین پرنده ای نشان می‌دهد، برای نشست و برخاست از زمین مثل تمام پرنده‌های عمودبرخاستی که تا به حال بررسی کرده ایم باید سرعت چرخش موتورها یک اندازه باشند (قسمت الف شکل ۳۱) اما برای خنثی کردن گشتاور عکس العملی موتور اول باید موتور شماره ۱ تا جایی که گشتاور عکس العملی چرخش خود را خنثی کند حول محور طولی دوران کند(قسمت د شکل۳۴) حال اگر میزان این دوران کمتر از حد لازم برای خنثی کردن گشتاور عکس العملی باشد حرکت سمت متناسب با جهت دوران موتور ۱ به دست خواهد آمد و در صورتی که این دوران بیشتر از حد لازم باشد حرکت سمت در جهت خلاف آن به دست خواهد آمد. در نقطه تعادل اگر بین موتورهای ۲و۳ اختلاف سرعت به وجود بیاوریم حرکت غلت در جهت موردنظر ما به دست خواهد آمد(قسمت ب شکل۳۴)، همچنین حرکت فراز با به وجود آوردن اختلاف بین سرعت موتور ۱ و مجموع سرعت موتورهای ۲و۳ به دست خواهد آمد(قسمت ج شکل۳۴).



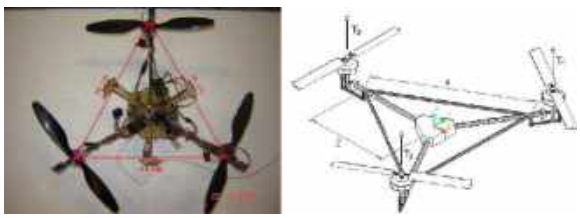
شکل ۳۴-سازوکار پرواز پرنده عمودبرخاست سه‌پرّه [45]

معادلات دینامیکی و مدل ریاضی چنین پرنده ای توسط خوان و همکارانش استخراج شده است. [45]

نمونه‌های تجاری و غیرتجاری زیادی از پرنده عمودپرواز سه‌پرّه وجود دارد به عنوان نمونه آغویی در دانشگاه امیرکبیر نمونه ای از پرنده سه‌پرّه را توسعه داده است [46]، کاستلن و همکارانش در دانشگاه سارلند آلمان پرنده ای با سه موتور گردان به جای یک موتور توسعه داده اند[47] . همچنین نمونه‌هایی از شرکت‌های مختلف به صورت تجاری وجود دارد.

شکل ۳۵-پرنده‌های سه‌پرّه تجاری الف) Y3 Tricopter ب) Goolsky CX-33 ج) Tricopter Drone د) FeiYu Y6 Scorpion Tricopter ARF FlyFly Hobby RC Tricopter

همچنین طراحی شبیه سازی و کنترل نمونه ای از سه‌پرّه توسط سانچز و همکارانش توسعه داده شده است.[48]

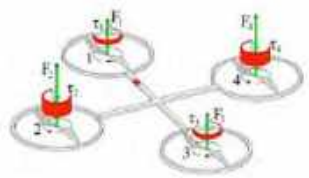


شکل ۳۶-پرنده سه‌پرّه توسعه داده شده توسط سانچز و همکارانش [48]

۳-۲-۴ چهارپرّه

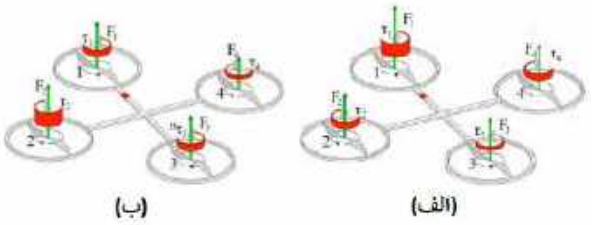
پرنده‌های چهارپرّه از زمان پیدایش به دلیل سادگی ساخت و کنترل به سرعت بین مردم و محققان محبوب شده اند و تا کنون هزاران مقاله در رابطه با این پرنده‌ها به طبع رسیده است، در این تحقیق چند مورد از پرنده‌هایی که بر اساس این دسته از پرنده‌ها توسعه داده شده اند و سازوکار پرواز متفاوتی دارند را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

دسته متداولی از پرنده‌های چهارپرّه با پرّه ثابت[1] ساخته می‌شوند، این نوع متعارف چهارپرّه‌ها که از چهار موتور و ملخ مستقر شده در چهار راس یک مربع تشکیل شده اند، موتورهای این دسته دو به دو خلاف جهت یکدیگر می‌چرخند تا گشتاور عکس العملی حاصل از چرخش موتور و ملخ‌ها خنثی شود.



شکل ۳۷-مانور سمت پرنده عمودبرخاست چهارپرّه [49]

نحوه حرکت این وسیله بدین صورت است که ملخ‌های دو به دو روبروی یکدیگر در یک جهت و مخالف جهت جفت ملخ دیگر(که گام آنها نیز مخالف دو ملخ دیگر است) می چرخند. جهت افزایش یا کاهش ارتفاع بایستی به صورت همزمان دور تمامی موتورها را به یک اندازه افزایش یا کاهش داد. با افزایش سرعت روتورهای ساعتگرد و کاهش سرعت روتورهای پادساعتگرد و بالعکس، پرنده حول محور سمت خواهد چرخید. شکل۳۴سرعت موتورها در حرکت سمت را به صورت نمادین نمایش می‌دهد. [49]



شکل ۳۸-الف) مانور فراز ب) مانور غلت [49]

در صورت برابر نبودن گشتاورهای موتورهای روبه‌روی یکدیگر، پرنده حول محورهای طولی و عرضی دوران خواهد نمود. شکل ۳۵ (الف) و (ب) نمایشی از وضعیت سرعت موتورها در حرکت غلت و فراز هستند. [49]

با چرخش پرنده به اندازه ۴۵ درجه حول محور z ساختار متداول دیگری از این دسته از پرنده به وجود می‌آید که به ساختار X یا ضربدر معروف است، ساختار X نیز به طریقی مشابه ساختار یادشده(+ یا به‌علاوه) پرواز می‌کند.

مقالات فراوانی به روش‌های مختلف معادلات دینامیکی و مدل ریاضی خطی و غیرخطی چهارپرّه را استخراج کرده اند، یکی از اولین و کامل ترین فعالیت‌ها، پژوهش ساباتینو به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه KTH سوئد است.[50]

نداشتن محدودیت اندازه و هزینه، کم عملگر بودن، قدرت مانورپذیری، کنترل آسان و دینامیک نه چندان پیچیده، استفاده از ملخ با گام ثابت، مانورپذیری و تعادل بالا از جمله مزایای این دسته از پرنده‌هاست، در عین حال مداومت پروازی پایین با توجه به استفاده از موتورهای الکتریکی و خطرات استفاده از آنها در محیط‌های شهری را می‌توان از جمله معایب این نوع پرنده‌ها دانست. [49]

با ساختار چهارپرّه پرنده‌های مختلفی توسعه داده شده اند،هاف و همکارانش با ترکیب چهارپرّه و ملخ محصور به توسعه پرنده ای در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه Arctic نروژ پرداخته اند. [51]

شکل ۳۹-چهارپرّه با فن محصورشده هاف و همکارانش [51]

دسته ای از پرنده‌های چهارپرّه به صورت هم محور ساخته می‌شوند، در این نوع پرنده‌ها هشت پرّه به صورت دوبه‌دو هم محور در آرایش یک چهارپرّه قرار می‌گیرند، عملکرد این پرنده‌ها مشابه پرنده‌های چهارپرّه است با این تفاوت که در مانورهای گردش برای ایجاد گشتاور باید سرعت دوران زوج موتورهای هم مرکز به اندازه $\Delta\omega$ کاهش و افزایش یابند تا چرخش آنها حول محور مشترک خود تولید گشتاور کند، به همین ترتیب سایر موتورها باید به صورتی اختلاف سرعت پیدا کنند که گشتاور تولیدی آنها در راستای مورد نیاز برای انجام مانورهای لازم به نحوی که در بخش چهارپرّه توضیح داده شد باشند.

شکل ۴۰-پرنده‌های هشت پرّه هم محور از چهار پرّه هم محور به صورت چینش متداول چهارپرّه‌ها تشکیل شده اند

معادلات پرنده با در نظر گرفتن مجموع پرّه‌های هم مرکز به عنوان یک واحد تولید رانش و توضیحاتی که در رابطه با سازوکار تولید گشتاور ارائه شد مشابه یک چهارپرّه خواهد بود، به صورت جزئی تر معادلات چنین پرنده ای نخستین بار توسط ژیانجیان‌چن و همکارانش ارائه شده است. [52]

پایداری این نوع پرنده به دلیل خنثی شدن گشتاورهای تولید شده توسط پرّه و پرّه در هر بازوی پرنده توسط جفت دیگرش بیشتر از چهارپرّه بدون جفت پرّه هم محور است.[53]

نمونه‌های متعددی از این نوع چهارپرّه توسعه داده شده است، از جمله آنها می‌توان به زرافشان [53] و مجد [54] اشاره کرد.

[1] Fixed Rotor

شکل ۴۱-پرنده چهارپرّه هم محور زرافشان و همکارانش [53]

نوع دیگری از پرنده‌ها که از توسعه چهارپرّه‌ها ایجاد شده اند، دایناکوپترها هستند، دایناکوپتر عنوان پرنده ایست که از یک چهارپرّه و دوموتور هم محور در مرکز خود که میان یک محفظه قرار گرفته اند تشکیل شده است، ایده این پرنده از دایناسورها گرفته شده است، دایناسورها از دو مغز استفاده می‌کند، یکی برای کنترل حرکت بدن و دیگری برای کنترل اندام‌های حیاتی، این پرنده نیز در اصل یک چهارپرّه است و مجموعه فن محصور و دو موتور هم محور در مرکز آن در زمان نیاز به پیشران بیشتر فعال می‌شوند و به صورت کاملا مجزا از چهارپرّه صرفا وظیفه تولید نیروی پیشران اضافی را بر عهده دارد. مدلسازی و دینامیک پرواز این پرنده توسط فلاح زاده انجام شده است [55] و نمونه ای از آن توسط حقیقی ساخته شده است. [56]

چهارپرّه هم محور را می‌توان در دسته هشت‌پرّه و دایناکوپتر را در دسته پنج و شش‌پرّه دسته بندی کرد اما به این دلیل که سازوکار اصلی پرواز آنها مشابه چهارپرّه‌هاست آنها را در این بخش مورد بررسی قرار دادیم.

شکل ۴۲-پرنده MAST100 با ساختاری مشابه دایناکوپتر

مشابه تک‌پرّه‌ها و دیگر چندپرّه‌ها، پرنده‌های چهارپرّه را نیز با ساختار پرّه گردان توسعه داده اند، بر خلاف پرّه ثابت‌ها، این دسته از چهارپرّه‌ها بر روی مکانیزمی سوار هستند که امکان گرداندن آنها و جهت دهی بردار رانش را فراهم می‌کند.

شکل ۴۳-نمونه ای از پرنده‌های چهارپرّه با پرّه گردان

سازوکار کلی پرواز این پرنده‌ها به صورت کلی مشابه چهارپرّه‌هاست با این تفاوت که بر اساس نوع طراحی ممکن است به عنوان مثال برای مانور فراز به جای افزایش و کاهش سرعت موتورها از جهت‌دهی بردار رانش استفاده شود. سازوکار گردش موتورها هم مانند سایر پرّه گردان‌ها توسط موتورهای سروو انجام می‌شود.

نعمتی به عنوان رساله دکتری خود در دانشگاه سینسیناتی به صورت کامل دینامیک یک پرّه گردان چهارپرّه را مورد بررسی قرار داده است و در مورد کنترل و سخت افزار مورد نیاز چنین پرنده ای تحقیق کرده است، در انتها نیز نمونه آزمایشگاهی از چنین پرنده ای را پیاده سازی کرده است [57]همچنین سنکول نیز به مدلسازی چنین پرنده ای پرداخته است. [58]

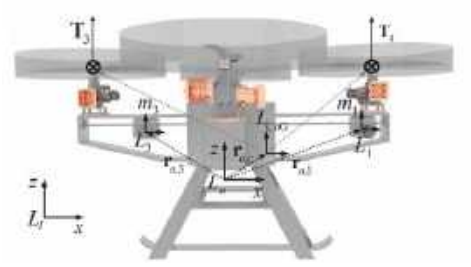
به طور کلی این سازوکار مانورپذیری پرنده را افزایش می‌دهد و در عین حال بازدهی بیشتری برای ما خواهد داشت اما در برابر چهارپرّه‌ها کنترل و دینامیک پیچیده تری دارد. [57]

علاوه بر موارد یادشده نمونه‌های آزمایشگاهی و تجاری مختلفی از این نوع پرنده توسعه داده شده است، به عنوان نمونه می‌توان به بن جنید اشاره کرد که به کمک دو موتور سروو امکان گردش پرّه‌ها را در دو جهت برای پرنده ایجاد کرده است [59]، همچنین از موارد تجاری می‌توان به Inspire 1 Pro ساخت شرکت DJI اشاره کرد.

شکل ۴۴-پرنده چهارپرّه گردان طراحی شده توسط بن جنید و همکارانش [59]

شکل ۴۵-پرنده چهارپرّه گردان Inspire 1 Pro شرکت DJI

یکی از ابداعات دیگری که در کنار جهت‌دهی بردار رانش برای کنترل پرنده و استفاده حداکثری از توان موتورها ارائه شده است، استفاده از سازوکار جابجایی مرکز جرم برای کنترل چهارپرّه است که برای اولین بار توسط‌هاوس و همکارانش در دانشگاه زاگرب کرواسی ارائه شد.[60]



شکل ۴۶-پرنده طراحی شده توسط‌هاوس و همکارانش [60]

بر روی بازوهای پرنده ریل‌هایی تعبیه شده است که به موتور سروو امکان جابجایی در طول آنرا می‌دهد، برای انجام مانور فراز وزنه‌های بازوهای موازی با محور طولی در راستای محور طولی جابجا می‌شوند، این جابجایی مرکز جرم را در راستای محور طولی جابجا می‌کند، با توجه به ایجاد اختلاف در طول بازوی نیروی‌های پیشران ملخ‌ها، گشتاور تولیدی توسط آنها با یکدیگر خنثی نشده و پرنده در راستای محور عرضی صاحب گشتاور می‌شود. به همین ترتیب برای ایجاد مانور غلت وزنه‌های بازوهای عرضی باید جابجا شوند، مانور سمت نیز مانند چهارپرّه ایجاد می‌شود.

معادلات دینامیکی چنین پرنده ای و مدل سازی ریاضی آن، همچنین شبیه سازی پرنده در نرم افزار Gazebo توسط‌هاوس استخراج و بررسی شده است [60]، همچنین سایر موارد مربوط به این نوع پرنده مانند کنترل[61] ، اثبات روابط، پایداری، شناسایی و امکان سنجی[62] و ملاحظات طراحی [63] توسط محققان دانشگاه زاگرب به سرپرستی‌هاوس در دانشگاه زاگرب انجام شده است.

در این نوع چهارپرّه به شکل حداکثری از نیروی موتور استفاده می‌شود، بنابراین بازدهی پرنده افزایش می‌یابد اما پیچیدگی ساخت، کنترل و مدل سازی این پرنده با توجه متغیر بودن مرکز جرم و ممان اینرسی و همچنین ظهور مشتق ممان اینرسی در معادلات حرکت در کنار نیاز به مکانیزم جابجایی مرکز جرم مطمئن، طراحی و ساخت آنها را در مقایسه با چهارپرّه‌های دیگر پیچیده تر می‌کند. [62]

در رابطه با پرنده‌های چهارپرّه تعدادی ایده اجرایی نشده بر اساس استفاده از فن دایسون توسط محققین ارائه شده است که به دلیل ساخته نشدن، از اختصاص یک دسته بندی جداگانه به آنها خودداری کردیم، فن دایسون توسط طراحی به همین نام در سال ۲۰۰۹ ثبت اختراع شد، اختراعی نیز توسط شرکت توشیبا در سال ۱۹۸۱ ثبت شده است.[64] در این نوع فن یک کمپرسور، هوا را به سمت حلقه ای هدایت می‌کند، منحنی حلقه به گونه ای طراحی شده است که هوا روی آن جریان پیدا می‌کند و به صورت افقی ادامه پیدا می‌کند.

شکل ۴۷-شکل هندسی حلقه در فن دایسون [65]

فن دایسون در واقع آلودگی صوتی بالا و راندمان پایینی دارد، به همین دلیل ایده‌های طراحی پرنده بدون سرنشین بر اساس آنها در حد ایده و تئوری باقی مانده اند. تلاش‌های انجام شده در راستای طراحی چنین پرنده‌هایی نیز غالبا کامل نیستند، به عنوان مثال بدری به مدلسازی و کنترل چهارپرّه ای بر اساس فن دایسون پرداخته است. [65] اما این مدلسازی به شکل دقیق انجام نشده است و در مورد گشتاورهای لازم برای کنترل پرنده توضیحات کافی ارائه نکرد است.

شکل ۴۸-نمونه ای از طرح‌های ارائه شده بر اساس فن دایسون

به دلیل امنیتی که حذف ملخ‌ها می‌تواند برای پرنده‌های بدون سرنشین به وجود بیاورد و با توجه با مانورپذیری مناسب و قابلیت پرواز ایستا در چهارپرّه‌ها، ترکیب چهارپرّه با فن دایسون می‌تواند بسیار مناسب فضاهای شهری باشد، به همین دلیل طرح مفهومی هرا بر اساس فن دایسون در مسابقات طراحی پهپاد Red Dot سال ۲۰۱۷ برنده بهترین طراحی شده است.[66]

شکل ۴۹-طرح مفهومی‌هرا براساس فن دایسون [66]

۴-۲-۴ پنج پرّه و بیشتر

پرنده‌های بیش از چهارپرّه سازوکاری شبیه به چهاردسته قبلی دارند، برای پرنده‌های با موتورهای زوج مشکل گشتاور عکس العملی وجود ندارد اما برای ضرایب فرد راهکاری مانند آنچه در تک پرّه یا سه‌پرّه عنوان شد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل ۵۰-شش‌پرّه Typhoon H شرکت Yuneec چین

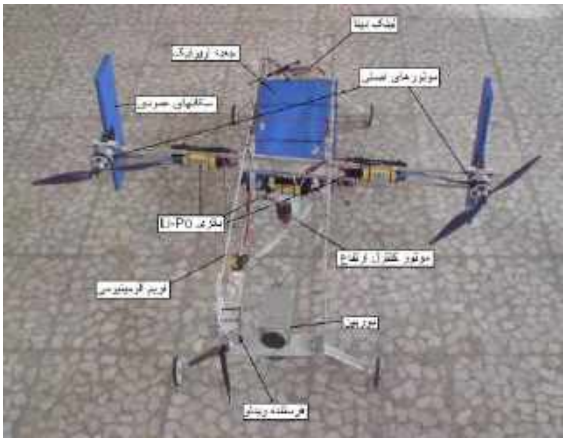
شکل ۵۱-نمونه ای از شش‌پرّه با پرّه گردان توسعه داده شده توسط ریل و همکارانش[67]

۴-۳ سبک تر از هوا

پرنده‌های سبک تر از هوا شامل بالن و کشتی‌های هوایی می‌شوند، در این پرنده‌ها از گاز سبکی مانند هوای داغ یا هیدروژن در محفظه‌های حجیم برای کاهش چگالی کلی پرنده استفاده می‌کنند. عملگرهای مختلفی برای حرکت و کنترل پرنده ممکن است انتخاب شود، از جمله تغییر مرکز جرم و یا استفاده از نیروی پیشران ملخ.

از بالن‌ها بیشتر برای مقاصد هواشناسی و تحقیقاتی استفاده می‌شود، برخی از انواع بالن در اتمسفر و برخی در شرایط نزدیک به مرز فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند، اخیرا از بالن‌های بدون سرنشین در ارائه سرویس اینترنت نیز استفاده شده است. معمولا تنها ارتفاع این بالن ها کنترل می‌شود و عملگری برای کنترل وضعیت یا موقعیت آنها در نظر گرفته نمی‌شود، دلیل این موضوع را می‌توان در کاربرد این پرندگان و شرایط جوی پیدا کرد، بنابراین می‌توان گفت کنترل آنها معمولا به صورت پیش‌تنظیم انجام می‌شود.

نوعی از پرنده‌های سبک تر از هوا با عنوان عروس دریایی وجود دارند که به دلیل شبیه سازی رفتار عروس دریایی در دسته زیست‌پایه مورد بررسی قرار گرفته اند.



شکل ۵۲-بخش ناوبری و کنترل کشتی هوایی دانشگاه گیلان [68]

معمولا عملگرهای پیشران این دسته از پرنده‌ها از جنس فن محصور یا ملخی هستند، در برخی مواقع نیز پیشران جت وظیفه کنترل کشتی هوایی را بر عهده دارد. تنظیم ارتفاع نیز توسط همین عملگرها انجام می‌شود. در کنار اینها کشتی هوایی می‌تواند از سکان‌های افقی و عمودی برای کنترل بیشتر و مقاومت در برابر باد استفاده کند.

معادلات دینامیکی پرنده مذکور و مدل سازی ریاضی آن با در نظر گرفتن سه موتور توربوفن توسط گامون انجام شده است، در مورد پهپادها نیز این معادلات صادق هستند.[69]

پرنده‌های سبک تر از هوا مصرف انرژی کم و مداومت پروازی بالایی دارند و نسبتا نیز دینامیک و کنترل ساده ای دارند اما ابعاد بزرگ، خطرات استفاده از هیدروژن و مشکلات مربوط به انتخاب جنس و طراحی شکل بالن از چالش‌های استفاده از این نوع پرنده‌ها هستند. [68]

ساخت و استفاده از این پرنده‌ها پس از منسوخ شدن آنها به دلیل انفجار گاز هیدورژن در سال‌های اول پیدایش آنها، در سالهای اخیر رو به افزایش گذاشته است و مواردی برای کاربردهای مختلف مثل هواشناسی، تصویربرداری یا تبلیغات ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته اند.

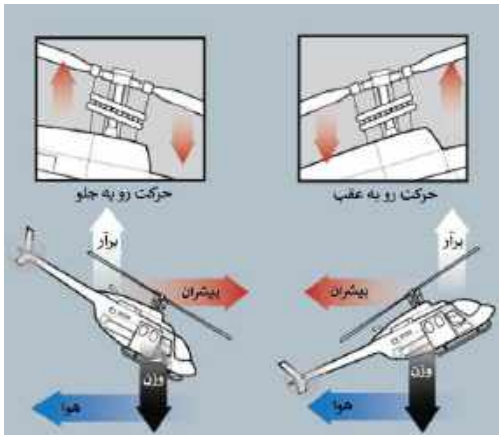
شکل ۵۳-کشتی هوایی دانشگاه گیلان [68]

شکل ۵۴-الف)کشتی هوایی ناسا[70] ب)کشتی هوایی AS-500 [71] ج)کشتی هوایی Aurora[72] د)کشتی هوایی Lotte[73]

۴-۴ هلی‌کوپتر

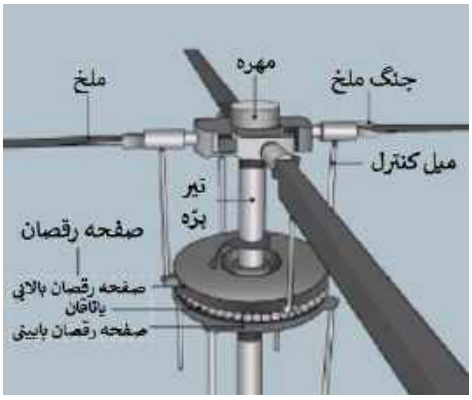
هلی‌کوپتر از یک پرّه با یک یا چند ملخ که غالبا به کمک صفحه رقصان کنترل می‌شوند، و یک دم با فن یا ملخ پایدار ساز تشکیل شده است.

پرواز هلیکوپتر بر اساس نیروی پیشران تولید شده توسط ملخ ممکن می‌شود، برای غلبه بر گشتاور عکس العملی حاصل از چرخش ملخ معمولا یک دم با ملخ یا فن وظیفه تولید گشتاور مقاوم را ایفا می‌کند، همچنین سرعت این فن حرکت سمت را تعین می‌کند، مانورهای فراز و غلت نیز با صفحه رقصان به دست می‌آیند. [74]



شکل ۵۵-عملکرد صفحه رقصان

سازوکار موجود در هلی‌کوپتر امکان گرداندن صفحه چرخش را در جهت طولی و عرضی فراهم می‌کند.



شکل ۵۶-سازوکار عملکرد صفحه رقصان

معادلات دینامیکی و مدل سازی ریاضی هلی‌کوپتر با پرّه دم دار توسط سالازار انجام شده است [75]، همچنین مدل سازی یک نمونه در ابعاد میکرو توسط محمد بررسی شده است. [76]

هلی‌کوپترها مانورپذیری بالایی دارند و ضمن اینکه از تمام مزایای عمودبرخاست‌ها برخوردارند به دلیل اینکه غالبا از موتورهای سوختی استفاده می‌کنند، مداومت پروازی بالاتری نیز دارند اما دینامیک آنها به ویژه صفحه رقصان و نحوه کنترل آن پیچیده تر است و نسبتا آلودگی صوتی بیشتری دارند. [74] در بیشتر مواقع نیز اثرات ژیروسکوپی ملخ با جرم و ممان اینرسی بالا، کنترل آنرا با پیچیدگی همراه می‌کند.

تقریبا انواع هلی‌کوپترهای با سرنشین به صورت بدون سرنشین نیز توسعه داده شده اند، به عنوان مثال شرکت DPI UAV Systems نمونه ای دوپشته[1] را توسعه داده است. [38]

شکل ۵۷-هلی‌کوپتر بدون سرنشین دوپشته شرکت DPI UAV Systems[38]

شکل ۵۸-هلی‌کوپتر توسعه داده شده توسط محمد و همکارانش [76]

۴-۵ بال‌پرّه[2]

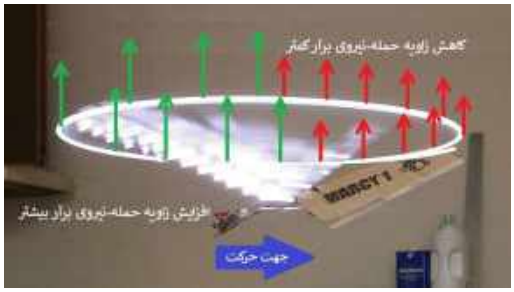
این دسته از پرنده‌ها به جای ملخ یا ترکیب بال و دم از یک بال چرخان تشکیل شده اند که تمام بدنه پرنده را تشکیل داده است، می‌توان نام بدنه چرخان را یا پرنده چرخان را برای آنها مورد استفاده قرار داد، ایده تک بال‌ها از پرنده دانه افرا گرفته شده است، و به نام سامارا نیز معروف است.

همچنین دسته ای از پرندگان ترکیبی با عنوان بال چرخان تعریف شده اند که بر اساس ترکیب بال چرخان و بال ثابت توسعه داده شده اند، باید توجه داشت که این دو دسته با یکدیگر تفاوت دارند.

۴-۵-۱ تک بال‌پرّه

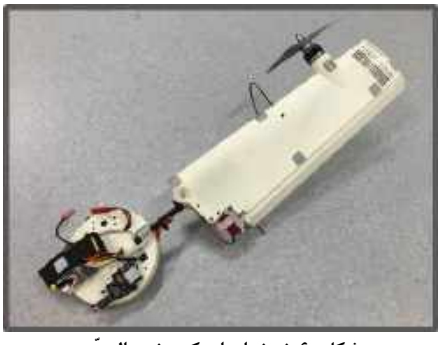
تک بال‌پرّه یا نیم بال‌پرّه یا بال و پرّه که به مونوکوپتر نیز موسوم است، از یک بال و پرّه متصل به آن تشکیل شده است، با چرخش پرّه و تولید نیروی پیشران بال نیز حول مرکز جرم به دوران درآمده و در اثر این چرخش نیروی برآر لازم برای پرواز پرنده تامین می‌شود.

مرکز جرم این پرنده جایی بین بال و مرکز کنترل و باطری‌ها است، سعی می‌کنند پرنده را طوری طراحی کنند که مرکز جرم خارج از بال باشد. نیروی پیشران تولید شده توسط پرّه از این مرکز جرم فاصله دارد و گشتاور تولید شده توسط آن، پرنده را حول محور قائم خود به گردش در می‌آورد، چرخش پرنده و در نتیجه چرخش بال باعث ایجاد نیروی برآری می‌شود که از آن برای پرواز پرنده استفاده می‌شود، با افزایش یا کاهش سرعت موتور می‌توان ارتفاع پرنده را تعین کرد، برای پرواز در صفحه از مکانیزمی برای گرداندن صفحه چرخش به نام گام سیکلی استفاده می‌شود. [77] به این ترتیب که در هر دور چرخش، زاویه حمله از طریق بالچه تعبیه شده روی بال تغییر داده می‌شود، تا هنگامی‌که بال در فاز پیشروی قرار دارد برآر بیشتری تولید کند و در فاز پسروی برآر کم تر(و بالعکس) بدین ترتیب در فازی از چرخش که نیروی برآر در جهت حرکت مطلوب قرار دارد زاویه حمله افزایش و در فاز عکس آن زاویه حمله کاهش پیدا می‌کند. [78]



شکل ۵۹-سازوکار گام سیکلی در پرنده‌های بال‌پرّه

معادلات دینامیکی و مدل ریاضی پرنده تک بال‌پرّه توسط ماتیک استخراج شده است[79] ، همچنین تفرشی نیز به مدلسازی و کنترل چنین پرنده ای پرداخته است. [80]



شکل ۶۰-نمونه ای از یک پرنده بال‌پرّه

از مهم ترین ویژگی‌های این پرنده این است که در پرواز شناوری و ایستا ذاتا پایدار است تک‌بال‌پرّه همچنین از نظر مکانیکی ساده است، عملگرهای کمی دارد، شکل و پیکربندی آن ساده است و در مقایسه با پرندگان دیگر مداومت پروازی بیشتری دارد. اما به دلیل پرواز در رینولدز پایین مدل سازی آیرودینامیکی آن به سادگی قابل انجام نبوده [78] و برای استفاده در محیط‌های شهری امن نیست، در مقایسه با سایر پهپادها نیز کنترل آن نسبتا پیچیده است.

برای اولین بار شرکت لاکهید مارتین[3] به طراحی چنین پرنده ای پرداخته پس از آن تعداد قابل توجهی از این نوع پرنده ساخته شده است که مواردی از آنها که شبیه سازی شده دانه افرا هستند در بخش زیست الهام‌ها نیز قابل دسته بندی هستند، به عنوان نمونه‌های دیگر شاخصی [78] و اکبری [77] در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی به طراحی و ساخت چنین پرنده ای اقدام کرده اند. همچنین صفایی در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی اقدام به طراحی، ساخت و کنترل نمونه ای از این پرنده

[1] Tandem
[2] Wing Rotor
[3] Lockheed Martin

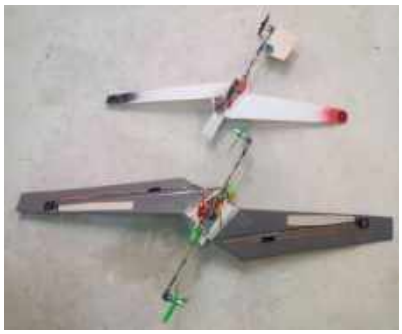
کرده است. [81] نمونه ای نیز در دانشگاه صنعتی شریف توسط ابراهیمی‌ساخته شده است. [82]

شکل ۶۱-پرنده تک بال‌پرّه(سامارا) دانشگاه مریلند[83]

۴-۵-۲ دو بال‌پرّه

این دسته از پرنده‌ها نیز ساختاری مشابه تک بال‌پرّه دارند با این تفاوت که به جای یک بال از دو بال برای پرواز استفاده می‌کنند، هر دو بال مجهز به سطوح کنترلی برای کنترل پرنده هستند.

سازوکار این پرندگان نیز مانند ساختارشان مشابه تک بال‌پرّه است، با این تفاوت که هنگامی‌که یک بال در فاز پیشروی است، دیگری در فاز پسروی است. بنابراین لازم است زاویه حمله بالی که در فاز پسروی است دقیقا قرینه بال دیگر باشد، البته در صورتی که از بال متقارن استفاده شود.



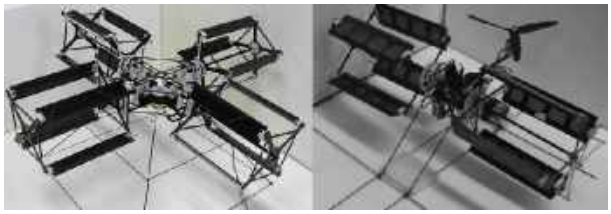
شکل ۶۲-نمونه ای از پرنده دو بال‌پرّه

این پرنده‌ها نیروی برآر بیشتری تولید می‌کنند اما در عوض الگوریتم کنترلی پیچیده تری دارند.

نمونه ای از این پرنده توسط جکلی توسعه داده شده است.[84]

۴-۶ پدالی(دوچرخه ای)

این دسته از پرنده‌های عمودبرخاست از چند بال که به صورت پدال بر روی یک محور چرخان نصب شده اند برای تولید نیروی برآر استفاده می‌کنند.



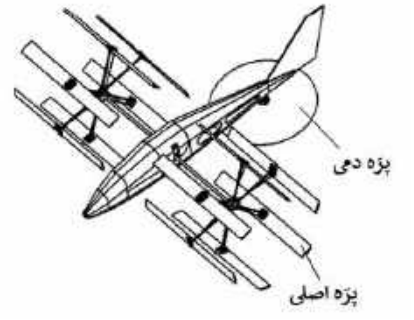
شکل ۶۳-نمونه‌هایی از یک پرنده پدالی [85]

این پرّه‌ها مانند حرکت پدال دوچرخه یا پرّه‌های آسیاب آبی به حرکت درآمده و تولید نیروی برآر می‌کنند. به همین دلیل به پرنده دوچرخه ای موسوم هستند.در ابتدا این پرنده‌ها عموما نیاز به سرعت اولیه داشتند و معمولا به شکل دست پرتاب عمل می‌کردند، اما نمونه‌های جدیدتر آنها به صورت عمودبرخاست پرواز می‌کنند.

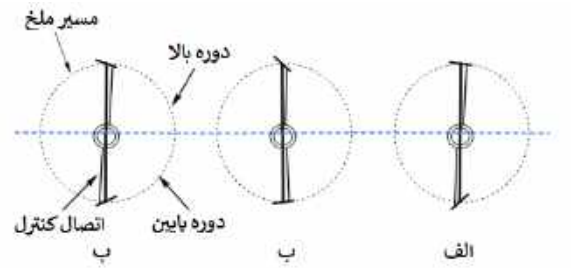
به صورت کلی امکان استفاده از پرّه‌های پدالی به جای ملخ در پرنده‌های بدون سرنشین وجود دارد و به طور بالقوه انواع مختلف پرنده‌های چندپرّه را می‌توان به شکل پدالی توسعه داد مانند مواردی که در شکل۶۰ آورده شده اند.

به عنوان مثال اگر سازوکار پرنده ای پدالی مانند شکل۶۱ را در نظر بگیریم،دو پدال نمایش داده شده با استفاده از نیروی موتور به گردش در می‌آیند، مکانیز کنترلی زاویه حمله بالک‌ها را کنترل می‌کند، بر این اساس این پرنده تقریبا مشابه پرنده سه‌پرّه قابل کنترل خواهد بود، با این تفاوت که گشتاور عکس العملی تولید شده توسط پدال‌ها در جهت محور عرضی تولید می‌شود که برای خنثی کردن آن باید پرّه ای در دم تعبیه شود.

به صورت کلی اگر زاویه حمله تمام بالک‌ها یکسان باشد هیچ نیروی برآری تولید نمی‌شود، به همین دلیل توسط مکانیزمی زاویه حمله بالک‌هایی که در فاز پسروی قرار دارند کاهش می‌یابد تا نیروی برآر مجموعه بالک‌ها مقداری مثبت باشد. [86]

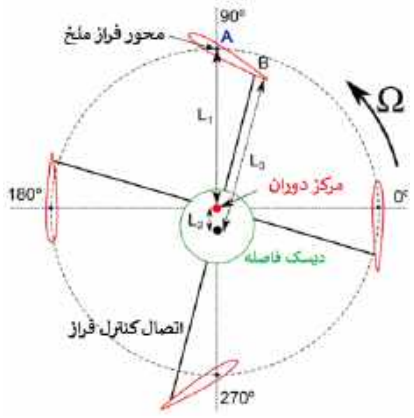


شکل ۶۴-پرنده پدالی نمونه[86]



شکل ۶۵-تغییر زوایای حمله بالک‌ها برای تولید نیروی برآر [86]

وضعیت بالک‌های یک پرنده پدالی در یک دوره کامل در شکل۶۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶۶-وضعیت بالک‌های یک پرنده پدالی در یک دوره کامل

معادلات دینامیکی پرنده پدالی توسط هو استخراج شده است [86]، همچنین تحقیق مفصل و ارزشمندی توسط مک‌ناب در رابطه با مدل سازی پرنده پدالی و مقایسه نتایج شبیه سازی با آزمایش‌های تجربی انجام شده است.[87]

پرنده‌های پدالی در تولید نیروی برآر عملکرد بهتری دارند و نسبتا آلودگی صوتی آنها نیز کمتر است اما سازوکار عملگر آنها و همچنین مدل دینامیکی و مدل سازی آیرودینامیکی آنها پیچیده تر است، همچنین سرعت سیر پایین و ارتعاشات زیادی دارند.

علاوه بر نمونه توسعه داده شده توسط هو [86] نمونه‌های دیگری نیز از این نوع پرنده ساخته شده است، از جمله نمونه کوچکی که توسط بندیکت و همکارانش در دانشگاه تگزاس توسعه داده شده است[88] و مدلی از آن که با ساختار چهار پرّه‌ها توسط تیم UMD توسعه داده شده است. [85] محققین دانشگاه مریلند نیز در پروژه ای به توسعه چنین پرنده ای پرداخته اند. [89]

شکل ۶۷-پرنده پدالی محققین دانشگاه مریلند [89]

۵- پرندگان ترکیبی

پرنده‌های ترکیبی از ترکیب دو گروه عمودبرخاست و افق‌برخاست به وجود می‌آیند، این دسته از پرنده‌ها از مزایای هر دو گروه به صورت هم زمان بهره‌مند می‌شوند و بازدهی و کارآیی بیشتری خواهند داشت.

۵-۱ گردان[1]ها

در این دسته از پرنده‌ها، تمام یا بخشی از بدنه به گونه ای طراحی می‌شود که قابلیت گردش داشته باشند تا پرنده بتواند فاز نشست و برخاست را به صورت عمودی و فاز پرواز سیر را به صورت افقی و مشابه افق برخاست‌ها انجام دهد.

۵-۱-۱ بدنه گردان

در این دسته از پرندگان بر خلاف پرّه‌گردان‌ها و بال‌گردان‌ها، تمام بدنه گردش ۹۰ درجه ای را تجربه می‌کند تا پرواز ترکیبی محقق شود، دسته مهمی‌از این پرنده‌ها را دم نشین‌ها تشکیل می‌دهند که ایده آنها توسط نیکولاس تسلا دانشمند برجسته امریکایی-کروات در سال ۱۹۲۸ مطرح شد [90]، اما اولین موارد ساخته شده پرنده‌های XFY-1 و XFV-1 ساخت شرکت‌های Convair و Lockheed هستند که در دهه ۱۹۵۰ توسعه داده شدند.[6]

پرندگان دم نشین همانطور که از نام آنها پیداست فاز نشست و برخاستی عمودی شبیه به موشک دارند و در فاز پرواز سیر به صورت افقی پرواز می‌کنند. سازوکار پرواز سیر آنها می‌تواند مشابه بال ثابت‌ها یا با استفاده از روش‌های دیگری باشد.

شکل ۶۸-نمونه ای از یک پرنده بدون سرنشین ترکیبی دم نشین

ساختار یک پرنده دم نشین معمولی به صورتی که در شکل۶۶ نشان داده شده است خواهد بود، که تشکیل شده است از دو پرّه که مخالف جهت حرکت یکدیگر می‌چرخند در میانه بدنه بالهای پرنده و سطوح کنترلی لازم برای کنترل پرنده قرار دارند و در انتها دم پرنده قرار دارد که در فاز نشست و برخاست تکیه گاه پرنده است.

شکل ۶۹-ساختار کلی یک پرنده دم نشین

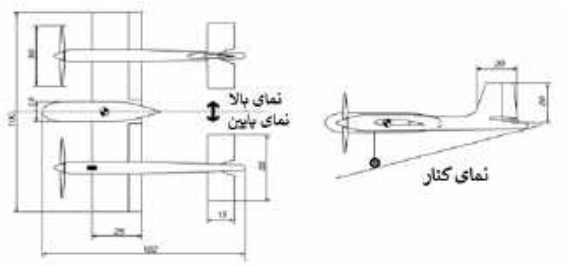
پرواز مانند بیشتر پرنده‌های ترکیبی از سه فاز نشست/برخاست، فاز انتقالی و فاز پرواز سیر تشکیل می‌شود، فاز برخاست این پرنده‌ها به دلیل قرار گرفتن نیروی پیشران در نوک پرنده از پایداری بیشتری نسبت به سایر پرنده‌های ترکیبی برخوردار است فاز انتقالی به کمک سطوح کنترلی تعبیه شده در دم و بال انجام می‌شود، فاز سیر نیز مانند پرنده‌های بال ثابت انجام می‌شود.

معادلات حرکت این نوع پرنده مشابه پرندگان بال ثابت خواهد بود، و علاوه بر مزایای پرنده‌های بال ثابت مانند مداومت پروازی بالا نیازی به باند نشست و برخاست نخواهد داشت، اما فاز انتقالی این پرنده مانند سایر پرندگان ترکیبی پیچیدگی‌های خاص خود را دارد.

از ترکیب این دسته از پرنده‌ها با سایر پرنده‌ها انواع مختلف و متنوعی توسعه داده شده است، به عنوان نمونه کوبو به طراحی، مدلسازی و طراحی کنترلر پرنده دم نشین با دو دم پرداخته است.[91]

وانگ و همکارانش نیز به شبیه سازی و مدلسازی یک پرنده دم نشین با چهار دم و پرّه روی آنها پرداخته اند.[92]

[1] Tilt



شکل ۷۰-پرنده دم نشین توسعه داده شده توسط کوبو [91]

شکل ۷۱-پرنده دم نشین طراحی شده توسط وانگ و همکارانش[92]

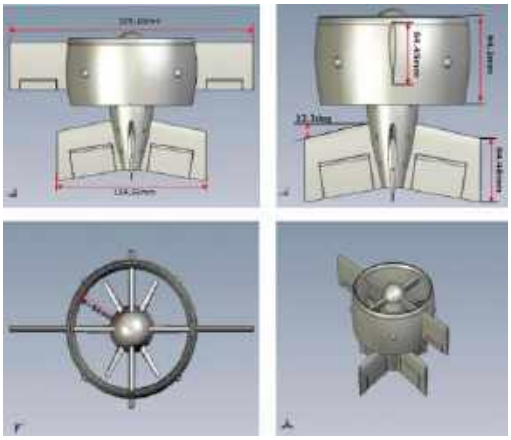
سازندگان پرنده دم نشین Flexrotor از تغییر گام ملخ برای ایجاد گشتاور غلت و فراز در فاز شناوری و نشست و برخاست عمودی استفاده می‌کنند، آنها همچنین برای جلوگیری از چرخش سمت در این فازها از دو پرّه کوچک در انتهای بالها(با جهت چرخش عکس یکدیگر) برای ایجاد گشتاور لازم استفاده کرده اند. [6]

شکل ۷۲-پرنده Flexrotor ساخت شرکت Aerovel[93]

دسته ای از تلاش‌ها نیز بر پایه ترکیب فن محصور با دم نشین‌هاست، به عنوان نمونه کرمی‌در دانشگاه صنعتی شریف به طراحی دم نشین با پیشران ملخی و طراحی کنترلر مقاوم برای آن پرداخته است. [94] همچنین جانگ وهمکارانش به طراحی، شبیه سازی، مدلسازی و کنترل چنین پرنده ای با فن محصور پرداخته اند.[95]

شکل ۷۳-پرنده دم نشین با فن محصور ساخته شده توسط جانگ و همکارانش [95]

ژائو نیز به عنوان رساله کارشناسی ارشد به بررسی ایده ی پرنده ای دم نشین با فن محصور پرداخته است که در نهایت پس از مدلسازی، شبیه سازی و طراحی کنترلر به ساخت نمونه اولیه ای منجر شده است که بیشتر ترکیب تک‌پرّه فن محصور و بال ثابت است.[96] استفاده از فن محصور این امکان را فراهم می‌کند تا در کنار سطوح کنترلی از بالک‌های فن محصور که به صورت جداگانه کنترل می‌شوند برای کنترل وضعیت پرنده استفاده کرد.



شکل ۷۴-پرنده دم نشین طراحی شده توسط ژائو [96]

از نمونه‌های تجاری چنین پرنده ای نیز می‌توان به پرنده ساخت شرکت Martin اشاره کرد.[97]

بارث و همکارانش نیز با تبدیل دم به یک تکیه گاه و حذف نقش عملگری و پایداری سازی آن به ارائه نوع دگیری از پرنده دم نشین پرداخته اند، آنها از دو پرّه ثابت برای تولید پیشران و از دو سطح کنترلی و یک دم عمودی برای کنترل پرنده استفاده کرده اند که مانورپذیری پرنده را افزایش داده است.[98]

شکل ۷۵-پرنده دم نشین شرکت مارتین [97]

شکل ۷۶-پرنده دم نشین توسعه داده شده توسط بارث و همکارانش [98]

پرندگان دم نشین در مقایسه با سایر پرندگان ترکیبی پیچیده تر و چالش برانگیز تر هستند، در این پرنده‌ها ابعاد و اندازه و نوع ملخ و ایرفویل بال باید به دقت انتخاب شوند تا بتوانند برای هر دو فاز برخاست(و نشست) و پرواز سیر مناسب باشند. از طرفی برای کاهش اغتشاشات جریان هوا در فاز نشست و برخاست لازم است بالی با ضریب منظری بالا و وتری باریک داشته باشیم در حالی که چنینی انتخابی در فاز پرواز سیر ظرفیت حمل محموله(شامل وزن پرنده) را کاهش می‌دهد. همچنین در مواردی که از یک

پرّه استفاده می‌شود، فاز انتقالی توسط فرآیندی به نام واماندگی و افتادن[1] انجام می‌شود که می‌تواند پرنده را کاملا از کنترل خارج کند. به علاوه در فاز پرواز عمودی ناپایدار هستند و به سختی می‌توانند روی پایگاه متحرک فرود بیایند اما در عوض انتخاب‌های بسیاری برای طراحی بال یا دم آنها پیش روی طراحان قرار دارد و در صورت استفاده از بیش از یک پرّه امکان دستیابی به سرعت‌های بالا در فاز پرواز سیر وجود خواهد داشت. [6] به همین دلیل بیشتر پرندگان دم نشین هنوز در فاز طراحی و توسعه قرار داشته و کمتر به شکل انبوه مورد استفاده قرار گرفته اند.

دسته ای دیگر از پرندگان بدنه گردان عملکردی مشابه دم نشین‌ها دارند با این تفاوت که در آنها دم و بال با یکدیگر ترکیب شده و مشخصا چیزی به نام دم در آنها وجود ندارد، این پرندگان را شبه‌دم نشین[2] می‌نامیم.

در پرندگان شبه‌دم نشین نیز بر خلاف دم نشین‌ها که معمولا از یک پرّه استفاده می‌کنند از دو پرّه یا بیشتر(غالبا با گام ثابت) استفاده می‌شود، بخش قابل توجهی از این پرندگان را نیز بالهای پرنده[3] تشکیل می‌دهند.

در این ترکیب جدید به دلیل استفاده از بیش از دو پرّه، نسبت نیروی پیشران به وزن افزایش می‌یابد. در این پرندگان اگرچه اثرات مخرب بال روی دم حذف و به دلیل حذف دم در وزن صرفه جویی می‌شود اما علاوه بر معایب و چالش‌های پرندگان دم نشین به دلیل حذف دم کنترل پرنده با دشواری‌ها و پیچیدگی‌های خاص خود انجام می‌شود که در اغلب موارد نیز راه حل‌های خاصی را می‌طلبد. [6]

شکل ۷۷-پرنده شبه دم نشین ساخته شده توسط نیتو و همکارانش[99]

پرندگان شبه‌دم نشین با وجود تنوعی که در ایده پردازی داشته اند نسبتا پرندگان جدیدی محسوب می‌شوند و فعالیت‌های عمده ای در بخش مدل سازی و کنترل آنها انجام نشده است، اما از معدود فعالیت‌های انجام شده می‌توان به پژوهش هاچ‌استباخ اشاره کرد که به مدل سازی و کنترل پرنده VertiKUL پرداخته است، این پرنده از چهار پرّه در آرایش چهارپره و دو بال ثابت تشکیل شده است و از سطوح کنترلی برای کنترل پرنده استفاده نمی‌کند و تنها از نیروی پیشران پرّه‌ها و به کمک پیشران تفاضلی[4] فازهای پرواز عمودی، انتقالی و پرواز سیر را انجام می‌دهد.[100] محققین دانشگاه سانتا کروز طرح مشابهی را تحت عنوان Quadshot توسعه داده اند که مانند VertiKUL از چهار پرّه در آرایش چهارپرّه اما به همراه بالهای دارای سطوح کنترلی برای پرواز بهره می‌برد. مدل هشت‌پرّه چنین پرنده ای نیز با دو بال موازی توسط آنها تحت نام Jumpship به صورت تجاری توسعه داده شده است.[101]

شکل ۷۸-پرنده شبه دم نشین VertiKUL[100]

به عنوان یک نمونه تجاری موفق از چنین پرنده ای می‌توان پرنده X-VERT ساخت شرکت Eflite را نام برد که از مانورپذیری بالایی برخوردار بوده و از سطوح کنترلی برای کنترل پرنده در هر دو حالت پرواز افقی و عمودی استفاده می کند.

شکل ۷۹-پرنده X-VERT ساخت شرکت Eflite

نیتو و همکارانش مدلی را با ساختار پرّه گردان توسعه داده اند که از دو پرّهٔ گردان روی یک بدنه بال مثلثی شکل تشکیل شده است. [99] پرنده نیتو و همکارانش با وجود شباهتی که به بال پرنده دارد اما در واقع از پره‌های گردان استفاده می‌کند و هیچ سطح کنترلی در آن تعبیه نشده است اما تلاش‌هایی نیز در راستای توسعه بالهای پرنده انجام شده است، از جمله آنها می‌توان به پرنده VD200 موسسه تحقیقات هواگرد چنگدو چین و بال پرنده شرکت Google اشاره کرد. در بالهای پرنده بدنه و بال به صورت یکپارچه طراحی می‌شوند و وظیفه کنترل پرنده بر عهده سطوح کنترلی تعبیه شده روی بدنه خواهد بود و غالبا(جز در مواردی مانند پرنده نیتو و همکارانش و پرنده VertiKUL) در آنها از پرّه‌های ثابت با گام ثابت استفاده می‌شود. پرنده موسسه چنگدو از دو پرّه ثابت برای تولید نیروی پیشران استفاده می‌کند در حالی که شرکت Google از چهار پرّه برای تولید نیروی پیشران استفاده کرده است. [102]

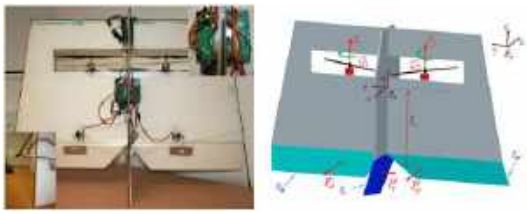
شکل ۸۰-بال پرنده VD200[102]

ریس نیز به عنوان رساله کارشناسی ارشد در مرکز مطالعات اپتیک مکزیک به مدلسازی، شبیه سازی، طراحی و ساخت یک شبه‌دم نشین با چهار پرّه نامتقارن پرداخته است و نمونه ای از آن را با موفقیت آزمایش کرده است. [103]

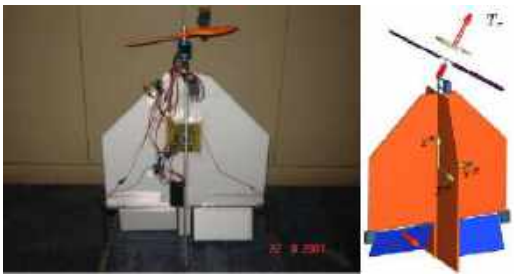
[1] Stall and Tumble
[2] Semi-Tail Sitter
[3] Flying Wings
[4] Differential Thrust

شکل ۸۱-پرنده شبه دم نشین توسعه داده شده توسط ریس و همکارانش [103]

دسته ای از تلاش‌ها در راستای طراحی پرنده‌های بدون سرنشین شبه‌دم نشین معطوف به ساخت نوعی بال‌های صفحه ای شده است، در این دسته به جای بالهای متعارف از بالهای پهن و کوتاه با ضریب منظری پایین شبیه به بال پرنده استفاده می‌شود. به عنوان مثال تا و همکارانش[104] و همچنین گارسیا و همکارانش[105] به طراحی، مدلسازی، کنترل و ساخت چنین پرنده ای پرداخته اند. در حالی که تا از پرّه‌های ثابت استفاده کرده است، گارسیا از پرّه گردان برای کنترل پرنده استفاده کرده است.



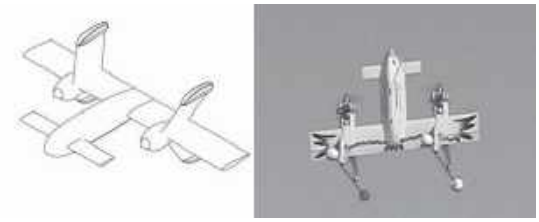
شکل ۸۲-پرنده شبه دم نشین طراحی شده توسط تا و همکارانش [104]



شکل ۸۳-پرنده شبه دم نشبن طراحی شده توسط گارسیا و همکارانش [105]

در طراحی این دو، دم عمودی به صورت بالک های بلندی روی بال(بدنه) درآمده اند، بالک های تعبیه شده در انتهای بدنه نیز علاوه بر کمک به پایداری در پرواز عمودی، نقش دم افقی را در پرواز سیر ایفا می‌کنند.

از ترکیب این پرنده‌ها با انواع مختلف بال نیز پرنده‌های مختلفی ایجاد می‌شود، به عنوان نمونه استون به طراحی پرنده دم نشین با ترکیب بال T شکل پرداخته است. [106]



شکل ۸۴-پرنده شبه دم نشین طراحی شده توسط استون [106]

همچنین حسینی در طرحی متفاوت به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی به طراحی و ساخت یک پرنده شبه دم نشین با ترکیب چهارپرّه و دو بال ثابت پرداخته است، این پرنده از دو بال موازی به همراه چهار پرّه تشکیل شده است که در فاز برخاست مانند چهارپرّه و در فاز سیر به صورت یک بال ثابت با دو بال موازی عمل می‌کند. [107]

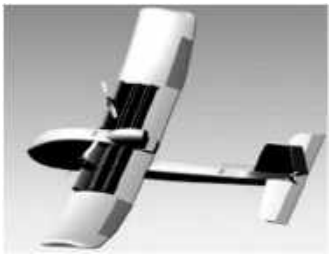
فرجی نیز به طراحی پرنده ای موسوم به شارکی پرداخته است که از دو بال به شکل مثلث متساوی الساقین متعامد(که یکی کوچکتر از دیگری است) به همراه چهار پرّه روی بال‌های مثلث‌ها تشکیل شده است، این پرنده در فاز برخاست مانند یک چهارپرّه عمل می‌کند و در فاز سیر به صورت یک بال ثابت، در این فاز بال مثلثی شکل کوچک تر نقش دم عمودی را ایفا می‌کند. [108] نسخه‌های تجاری مشابهی از این نوع پرنده توسط شرکت‌های Xplus و ATMOS توسعه داده شده اند. [6]

شکل ۸۵-پرنده شبه دم نشین موسوم به شارکی طراحی شده توسط کورونل(بدون موتورها)[109]

۲-۱-۵ اجزا گردان

در پرندگان ترکیبی با اجزا گردان جهت گیری اولیه بدنه در طول پرواز حفظ می‌شود و تنها بخش‌هایی از پرنده که عمدتا بال و پرّه‌ها هستند گردش می‌کنند.

یکی از پرطرفدارترین نوع پرنده‌های ترکیبی با اجزاء گردان، پرّه‌گردان‌ها هستند، در این دسته از پرنده‌ها تمام یا بخشی از پرّه‌ها گردان هستند و سایر بخش‌های پرنده مانند بالها و بدنه در تمام فازهای پرواز ثابت هستند.



شکل ۸۶-پرنده موردنظر فنگ در استخراج معادلات یک پرّه گردان [110]

پرنده‌های پرّه گردان با بیشتر آرایش‌های چندپرّه‌ها مورد تحقیق و آزمایش قرار گرفته اند، همچنین مواردی نیز در ترکیب با سایر انواع پرندگان مانند بال ثابت یا فن محصور ساخته شده اند. به عنوان نمونه فنگ به مدلسازی نمونه ای از پرّه گردان دوپرّه در ترکیب با بال ثابت پرداخته است. [110]

در این دسته از پرنده‌ها علاوه بر بهره مندی از مزایای پرنده‌های بال ثابت مانند مداومت پروازی بالا، نیازی به باند نشست و برخاست نخواهیم داشت، در مقایسه با سایر پرندگان ترکیبی نیز مکانیزم انتقالی ساده تری داریم در عوض اما علاوه بر بازدهی آیرودینامیکی کمتر، به سازه ی پیچیده تری نیز نیاز خواهیم داشت. در پرندگان پرّه گردان مانند بال گردان‌ها در انتخاب عملگرهای مناسب با عملکرد قابل قبول با چالش‌های جدی روبرو هستیم. [6]

در فاز برخاست، پرّه‌گردان‌ها مانند چندپرّه‌ها عمل می‌کنند که در بخش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفته اند، پس از فاز انتقالی و در پرواز سیر مانند پرندگان بال ثابت عمل خواهند کرد، پرّه‌ها وظیفه تولید نیروی پیشران را برعهده خواهند داشت و سطوح کنترلی برای کنترل پرنده مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

ایده اولیه این پرنده‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط شرکت هلی‌کوپتر سازی Bell ارائه شد [6]، نمونه‌های دیگری پس از آن توسط شرکت‌ها و پژوهشگران دیگر توسعه داده شد، از این بین می‌توان به پرنده ساخته شده توسط محققان دانشگاه نانجینگ در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد. [111]

شکل ۸۷-پرنده ساخته شده توسط محققان دانشگاه دانجینگ در تست تونل باد [111]

نمونه ای نیز از ترکیب بال مثلثی شکل و دو فن محصور در داخل بالها توسط شرکت Agusta توسعه داده شده است. اینکار پایداری پرنده را در حالت شناوری افزایش می‌دهد اما اثر جریان هوای حاصل از چرخش پرّه‌ها روی بدنه به خصوص در فاز انتقالی مشکلاتی را ایجاد می‌کند.[112]

شکل ۸۸-پرنده پرّه‌گردان توسعه داده شده توسط شرکت Agusta [112]

پرندگان ترکیبی پرّه گردان مختلفی نیز به کمک سه پرّه توسعه داده شده اند، به عنوان مثال کارلسون ترکیبی از پرّه گردان با بال پرنده ارائه داده است که در آن موتور سومی‌در مرکز بدنه نزدیک به انتهای آن قرار داده شده که در فرآیند برخاست به دو موتور دیگر کمک می‌کند، همچنین امکان انجام مانور سمت گیری را فراهم می‌کند، سطوح کنترلی نصب شده روی بال‌ها مانورهای غلت و فراز را انجام می‌دهند، موتور عقبی در فاز پرواز افقی مشارکت نمی‌کند اما با شیب ۱۰ درجه نصب شده است تا در فاز انتقالی بخشی از نیروی افقی لازم را فراهم کند.[113]

شکل ۸۹-پرنده طراحی شده توسط کارلسون در دانشگاه بیرگام امریکا [113]

کار مشابهی توسط یوکسک و همکارانش در سال ۲۰۱۴ در دانشگاه فنی استانبول انجام شده است با این تفاوت که به جای موتور سوم از دو فن هم محور با فن محصور، که در خلاف یکدیگر می‌چرخند، استفاده شده است که وظیفه تولید برآر برای برخاست عمودی را بر عهده دارند.[114]

شکل ۹۰-پروژه انجام شده توسط یوکسک و همکارانش[114]

شرکت BirdsEyeView نیز پرنده مشابهی را با پرّه‌های هم محور توسعه داده است. [115]

شکل ۹۱-پرنده FireFly6 Pro ساخت شرکت BirdsEyeView[115]

شرکت QuantumSystems مدلی تجاری از چنین پرنده ای با سه پرّه گردان توسعه داده است، موتور سوم روی دم پرنده نصب شده است و در هر سه فاز پرواز مورد استفاده قرار می‌گیرد.[116]

شکل ۹۲-پرنده تجاری Trinity شرکت کوانتوم سیستمز[116]

اگرچه نمونه های فوق غالبا به صورت بال پرنده طراحی شده بودند اما نمونه های مختلفی نیز در ساختار متعارف بال ثابت و به همراه دم افقی و عمودی طراحی شده اند، به عنوان نمونه می‌توان پرنده Nimbus شرکت Foxtech را نام برد که از دم V شکل استفاده کرده است.

شکل ۹۳-پرنده Nimbus شرکت Foxtech[117]

پرّه گردان در آرایش چهارپرّه‌ها نیز توسعه داده شده است، پرنده Phantom Swift شرکت Boeing نیز به شکل کلی مشابه پرنده اکتاس است، با این تفاوت که به جای پرّه گردان از فن محصور گردان استفاده می‌کند و به جای دو فن هم محور از دو فن غیرهم‌محور استفاده می‌کند.

این پرنده در جریان مسابقات طراحی پرنده‌های عمود پرواز سازمان صنایع دفاعی امریکا، DARPA، ساخته شده و برنده رقابت‌ها بوده است.[118]

شکل ۹۴-پرنده PhantomSwift شرکت Boeing [118]

نمونه‌های مشابه دیگر پرنده‌های تجاری Tron از شرکت QuantomSystems است. که از چهار موتور برای فاز برخاست استفاده می‌کند که دو موتور عقبی در فاز سیر افقی خاموش و موتورهای جلویی نیروی پیشران افقی را تولید می‌کنند. [119]

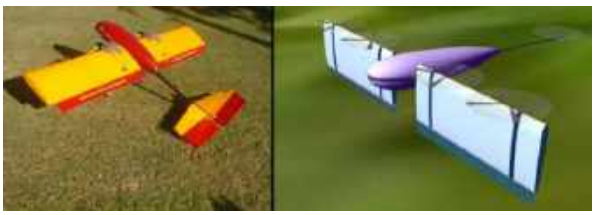
شکل ۹۵-پرنده تجاری Tron ساخت شرکت QuantomSystems [119]

۳-۱-۵ بال گردان

این دسته از پرنده‌ها در ساختار بال ثابت اما با قابلیت بال گردان طراحی می‌شوند، مجموعه بال و موتور متصل به آن حدود ۹۰ درجه می‌گردند اما باقی قسمت‌های بدنه ثابت باقی می‌ماند. تاریخچه این نوع از پرنده‌ها به دهه ۶۰ تا ۷۰ میلادی باز می‌گردد، زمانی که شرکت Boeing پرنده با سرنشین خود بال گردان خود را توسعه داد.

پرواز این پرنده‌ها مانند سایر پرنده‌های ترکیبی از سه فاز نشست و برخاست عمودی، فاز انتقالی و فاز پرواز سیر افقی تشکیل شده است، در فاز نشست و برخاست عمودی بال‌ها در زاویه ۹۰ درجه قرار می‌گیرند، به صورتی که تراست تولیدی پره‌ها درجهت عکس نیروی وزن اعمال شود، پس از فاز انتقالی پرنده به صورت بال ثابت به پرواز خود ادامه می‌دهد، در پرواز شناوری نیز مانند دوپرّه‌ها عمل می‌کنند که پیشتر به آن اشاره کردیم.

به عنوان نمونه در سال ۲۰۰۰ دانشجویان دانشگاه آریزونا طرح چنین پرنده ای را ارائه دادند و مدل سازی، شبیه سازی، آیرودینامیک، طراحی کنترلر، بهینه سازی و هدایت آن در قالب پروژه‌های مختلفی توسط آنها انجام شده است.[120]



شکل ۹۶-پرنده طراحی شده توسط دانشجویان دانشگاه آریزونا و حالت شناوری [120]

فاز انتقالی مانند سایر پرنده‌های ترکیبی از چالش‌های این دسته از پرنده‌هاست، معادلات غیرخطی جفت باید پس از استخراج برای به دست آوردن مسیر مناسب از طریق الگوریتم‌های هدایت به کار برده شوند، در مرحله بعد طراحی کنترلر مناسب برای این فاز از مسائلی است که باید مورد توجه قرار گیرد.

در مقایسه با پرّه گردان‌ها، بال گردان‌ها به دلیل نیاز به عملگرهای قوی تر چالش‌های بزرگ تری پیش روی طراحان و مهندسان قرار می‌دهند. [6]

یکی دیگر از چالش‌های این دسته از پرنده‌ها قرارگیری بال در معرض جریان هوا در هنگام مانور نشست و برخاست است، هرچند که سرعت نشست و برخاست بسیار کمتر از پرواز سیر است اما نیروهای برآر و پسار حاصل از حرکت جریان هوا روی بال در معرض جریان و همچنین جریان‌های در نزدیکی زمین از مواردی است باید مورد توجه قرار گیرد.

معادلات مربوط به مدل ریاضی پرنده بال گردان با ساختار متعارف بال ثابت‌ها و دو موتور متصل به بالها، توسط میکس و همکارانش انجام شده است. [121]

در سالهای اخیر نمونه‌های مختلفی از پرنده‌های ترکیبی به ویژه بال چرخان ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته است، به عنوان مثال سازندگان AT-10 برای کاهش اثرات اغتشاشات و نیروی پسار، تنها بخشی از بال را به صورت گردان طراحی کرده اند.[122]

آسترمن و همکارانش به جای استفاده از پرّه با گام ثابت از پرّه‌های با گام متغیر استفاده کرده اند که به همراه شهپرها کنترل وضعیت در فاز شناوری را آسان تر کرده است.[123]

شکل ۹۷-پرنده بال گردان توسعه داده شده توسط آسترمن و همکارانش[123]

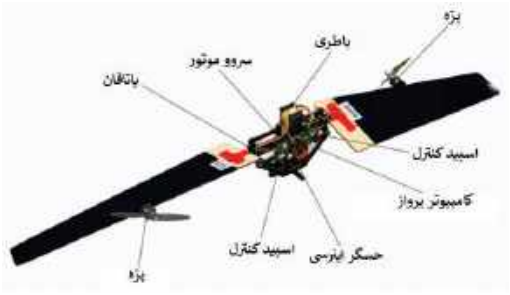
صمدزاده نیز به طراحی و ساخت یک پرنده با چهار بال گردان اقدام کرده است [124]، که مدلسازی، طراحی و کنترل نمونه مشابه آن توسط ستینسوی و همکارانش انجام شده است. آنها از دو بال گردان و پرّه‌هایی در آرایش چهارپرّه برای طراحی خود استفاده کرده اند.[125]

شکل ۹۸-پرنده بال گردان ستینسوی و همکارانش [125]

نمونه‌هایی نیز با استفاده از بیش از ۴ پرّه اما در آرایش بال ثابت توسعه داده شده اند. [6] مانند پرنده بال گردان NASA که از ده پرّه الکتریکی روی بال‌های گردان استفاده می‌کند. به کمک این پرّه‌ها که در بالی ۳ متری نصب شده اند پرنده آنها قادر به حمل ۲۸ کیلوگرم بار و نشست و برخاست عمودی شده است. [126]

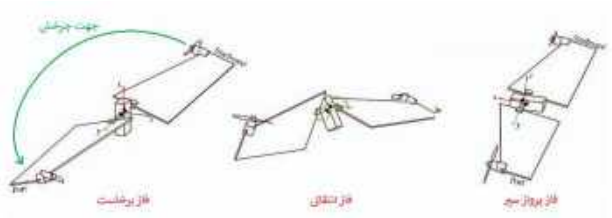
شکل ۹۹-پرنده بال گردان ناسا با ده پرّه [126]

نوع خاصی از پرنده بال گردان با ترکیب بال چرخان لو و همکارانش توسعه داده شده است، در این پرنده در فاز برخاست عمودی بال نقش ملخ را ایفا می‌کند و مانند بال‌پرّه(که پیشتر به آن اشاره کردیم) با چرخیدن وظیفه تولید نیروی برآر را ایفا می‌کند در فاز پرواز سیر، بال ثابت شده و پرنده مانند یک پرنده بال ثابت به پرواز خود ادامه می‌دهد، در این فاز وظیفه تولید نیروی پیشران بر عهده پره یا موتور خواهد بود که به صورت گردان تعبیه شده است تا گشتاورهای لازم برای کنترل پرنده را تولید کند، هرچند در این پرنده تنها بخشی از بال گردان است اما می‌توان آنرا در دسته بال گردان دسته بندی کرد.[127]



شکل ۱۰۰-پرنده بال گردان لو و همکارانش[127]

فازهای مختلف پرواز و فاز انتقالی پرنده لو در شکل۹۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰۱-فازهای مختلف پرواز پرنده بال گردان و بال‌پرّه لو و همکارانش [127]

شرکت Iridium Dynamics نیز نیز پرنده‌ای را تحت عنوان Halo توسعه داده است که از بالهای چرخان استفاده می‌کند، در فاز برخاست عمودی این بالها مانند تک‌پرّه چرخان وظیفه تولید نیروی پیشران عمودی را بر عهده دارند، در این فاز تمام بدنه به همراه بالها می‌چرخند و دم پرنده نیز مانند بال به صورت ملخ مورد استفاده قرار می‌گیرد، پس از فاز انتقالی بال و دم به صورت ثابت درآمده و مانند بال ثابت‌ها وظیفه تولید نیروی لیفت و کنترل پرنده را ایفا می‌کنند.

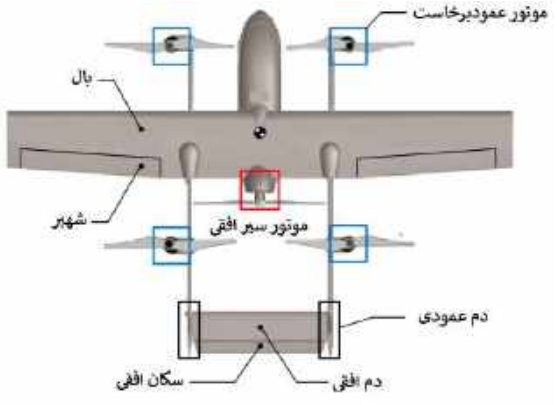
شکل ۱۰۲-پرنده بال چرخان شرکت Iridium Dynamics[128]

۵-۲ غیرگردان‌ها

در این مجموعه، پرنده در عین حال که پرنده ای ترکیبی به حساب می‌آید اما نیازی به گردش و فاز انتقالی برای تبدیل از عمودبرخاست به افق برخاست ندارد.

۵-۲-۱ مجموعه دوگانه

این دسته از پرنده‌ها از دو سیستم عمودبرخاست و سیر افقی جداگانه به صورت هم زمان بهره مند هستند و در هر فاز بنابر نیاز یکی از سیستم‌ها فعال و دیگری غیرفعال است. به دسته ای از پرنده‌ها که از سوخت دوگانه استفاده می‌کنند نیز اصطلاحا مجموعه دوگانه گفته می‌شود که نباید با این نوع از پرندگان اشتباه گرفته شود.



شکل ۱۰۳-ساختار یک پرنده دوگانه نمونه

ساختار این پرنده‌ها غالبا ترکیبی از چندپرّه و بال ثابت است هرچند در مقایسه با بال گردان یا پرّه گردان‌ها پیچیدگی فاز انتقالی را ندارند اما بی استفاده بودن یک سیستم در هر فاز، وزن اضافی به سیستم تحمیل می‌کند و اجازه بهره مندی از تمام ظرفیت موتورها را به طراح نمی‌دهد چنین ساختار غیربهینه ای با وجود سادگی و امکان استفاده از طرح‌های مختلف بال، چندان بین طراحان محبوب نبوده و نمونه‌های زیادی از آن توسعه داده نشده است.

یکی از قدیمی‌ترین نمونه‌های پرنده‌ای با مجموعه دوگانه را شرکت Skirosky تحت عنوان Dragon در سال ۲۰۰۰ توسعه داده است، این پرنده از دو ملخ محصور برای پرواز عمودی و از یک موتور دیگر با محفظه برای پرواز سیر استفاده می‌کند. سطوح کنترلی تعبیه شده روی بال‌ها در پرواز سیر و عمودی به کنترل وضعیت پرنده کمک می‌کنند[36]

شکل ۱۰۴-پرنده ترکیبی با مجموعه دوگانه شرکت Skirosky[36]

نمونه ای نیز از ترکیب هلی‌کوپتر و بال ثابت تحت عنوان HADA توسعه داده شده است که در فاز برخاست مانند هلی‌کوپتر و در پرواز سیر مانند بال ثابت عمل می‌کند، در این فاز موتور تعبیه شده در دم پرنده وظیفه تولید نیروی پیشران را بر عهده خواهد داشت.[129]

شکل ۱۰۵-پرنده مجموعه دوگانه HADA[129]

کارهای مشابهی نیز با الهام از چهارپرّهٔ پرّه ثابت برای فاز برخاست انجام شده است، به عنوان نمونه شرکت Arcturus به ساخت نمونه تجاری از چنین پرنده ای پرداخته است.[130] آلتکی نیز طرح مشابهی را با استفاده از موتورهای هم محور با ترکیب بال V شکل ارائه کرده است.[131] نمونه‌هایی با طرح‌های دیگری از بال و دم نیز توسعه داده شده است.

شکل ۱۰۶-پرنده ترکیبی با مجموعه دوگانه Arcturus موسوم به Jump20[130]

شکل ۱۰۷-پرنده ترکیبی با مجموعه دوگانه توسعه داده شده توسط آلتکی [131]

همچنین طرحی نیز توسط شرکت Airborn برای ترکیب بال ثابت و دوپرّه ارائه شده است که به کمک شرکت سوئیسی AG در نمایشگاه هوایی برلین رونمایی شده است، در این ساختار پرواز عمودی به صورت یک دوپرّه و پرواز سیر به صورت یک بال ثابت انجام می‌شود.[132]

شکل ۱۰۸-پرنده مجموعه دوگانه شرکت Airborn[132]

۲-۲-۵ بال چرخان

در دسته ای از پرنده‌های با مجموعه دوگانه، بال در دو فاز برخاست و پرواز سیر مشارکت دارد، در فاز برخاست به عنوان پرّه و در فاز پرواز سیر به عنوان بال نیروی برآر لازم برای پرواز پرنده را تامین می‌کند، این دسته را بال چرخان نام گذاری کردیم.

موتور پیشران پرنده در فاز پرواز سیر فعال شده و بال چرخان غیرفعال می‌شود، به همین دلیل آنها را در دسته مجموعه دوگانه طبقه بندی کرده ایم، هر چند که بال در هر دو فاز به شکل مختلفی مشارکت دارد.

شکل ۱۰۹-پرنده NLR Stop Rotor[133]

شرکت بوینگ نمونه ای از این نوع پرنده را موسوم به X-50 توسعه داده است، نمونه ای نیز با همکاری با آزمایشگاه دریایی ایالات متحده تحت عنوان NRL توسعه داده شد، تمام این پروژه‌ها به دلیل مشکلات و پیچیدگی‌های مدلسازی و آیرودینامیک فاز انتقالی و ناتوانی در انتقال از فاز برخاست عمودی به فاز پرواز سیر لغو شدند. [6]

اطلاعات زیادی در مورد پرندگان فوق به صورت عمومی‌منتشر نشده است، بنابراین در مورد معادلات دینامیکی و کنترل آنها نمی‌توان اظهار نظر کرد.

شکل ۱۱۰-پرنده Boeing X50 Dragonfly[6]

۶- زیست پایه

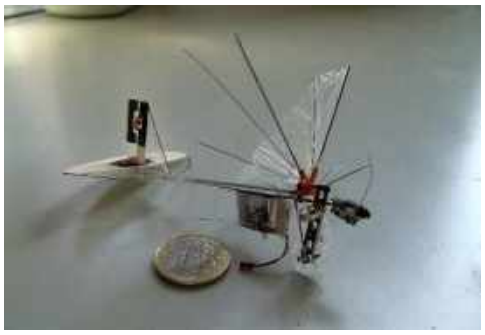
پهپادهای این دسته به نوعی با پرندگان زنده مرتبط می‌شوند، یا به شکل مستقیم از پرنده‌های زنده الهام گرفته شده اند و از سازوکار پرواز آنها تقلید می‌کنند و یا پرنده‌های زنده بخشی از سازوکار پرواز آنها هستند. بر این اساس این رده را به دو دسته زیست الهام و زیست‌محور تقسیم بندی کرده ایم.

۶-۱ زیست الهام

زیست الهام پرنده‌هایی هستند که در ساخت آنها از طبیعت الهام گرفته شده یا پرواز پرنده ای زنده را شبیه سازی می‌کنند. از این دسته بندی پرنده‌های الهام گرفته شده از دانه درخت افرا با عنوان سامارا در دسته بندی بال‌پرّه از رده عمودبرخاست‌ها بررسی شده اند.

۶-۱-۱ بالزن[1]

دسته پرنده‌های بالزن در ده سال گذشته بسیار پرطرفدار بوده و تحقیقات فراوانی در رابطه با آنها انجام شده است، این دسته از پرنده‌ها به جای روش‌های متعارف پیشین از بال زدن برای تولید نیری برآر لازم برای پرواز استفاده می‌کنند، بال زدن پرنده‌ها علاوه بر حرکت انتقالی شامل پیچش در بال هم می‌شود که پیاده سازی آن در سیستم‌های مکانیکی چالش مهمی است. این پرنده‌ها غالبا در دو نوع بال پیچنده و ثابت(غیر پیچنده) ساخته می‌شوند که نوع پیچنده آنها کارآمدتر و پیچیده تر است.



شکل ۱۱۱-پرنده بالزن Delfly[134]

منبع تولید نیروهای لازم برای پرواز در پرنده‌ها و حشرات، نیروهای آیرودینامیکی حاصل از حرکت نوسانی توأم با پیچش بالهاست، محاسبات آیرودینامیکی نشان می‌دهند بال زدن کارآمدترین روش در رینولدزهای پایین است. [135]

در هنگام پایین آمدن، بال به طور کامل گسترده شده و بیشترین نیروی برآر و پیشران را تولید می‌کند، هنگام بالا رفتن بال جهت نیروی برآر برعکس است، بنابراین خمش بال در هنگام بالا رفتن بال، باعث کاهش نیروی پسار و گشتاور اینرسی بال شده و در نتیجه پرواز با اتلاف انرژی کمتری انجام می‌شود.

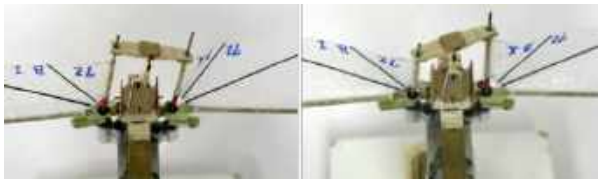
شکل ۱۱۲-پیچش بال در پرواز پرنده واقعی[136]

پیچش بال این امکان را فراهم می‌کند که در هر مقطع از بال، زاویه حمله لازم برای تولید برآر کافی در طول حرکت بال زدن تولید شود. بدون وجود پیچش نیروی پسار قابل توجهی ایجاد می‌شود. اینکار در پرندگان به لطف بالهای انعطاف پذیر به شکل کامل انجام می‌شود. [137]

بر روی معادلات دینامیکی و آیرودینامیک پرنده‌های بال زن فعالیت‌های بسیار زیادی در داخل و خارج از ایران انجام شده است، از جمله تاروردی زاده[138] مظاهری[139] بهشت کار[135] رشیدی[140] و خسروی[137] همچنین خدابخش[141] یک حشره بالزن را مدلسازی کرده است. زارع نیز مدل شش درجه آزادی را برمبنای آیرودینامیک غیرپایا استخراج کرده است. [142]

کاراسک به عنوان رساله دکتری خود تحقیقات ارزشمندی بر روی مدلسازی، شبیه سازی و ساخت یک بالزن الهام گرفته شده از مرغ مگس خوار انجام داده است. [136]

شکل ۱۱۳-مکانیزم بال زن در پرنده مرغ مگس خوار[143]



شکل ۱۱۴-نمونه سازوکار مورد استفاده برای ایجاد پیچش در بال[143]

سازوکار بالزن در بین ریز پرنده‌ها به خصوص در رینولدز پایین کارآمد ترین روش است، پرنده بالزن مصرف انرژی پایینی دارد و در ارتفاع کم پرواز می‌کنند، در کنار اینها این نوع پرنده‌ها عمودپرواز هستند [137] و مانورپذیری بالایی دارند و در مواردی که نیاز به استتار باشد به خوبی عمل می‌کنند[144] ، در کنار تمام این مزایا طراحی آنها بسیار پیچیده است و با توجه به پرواز در رینولدز پایین بررسی آیرودینامیک آنها نیز مسئله ای چالش برانگیز است.[137] با توجه به ابعاد کوچک شان نیازمند به عملگرها و حسگرهای حساسی نیز هستند.[145]

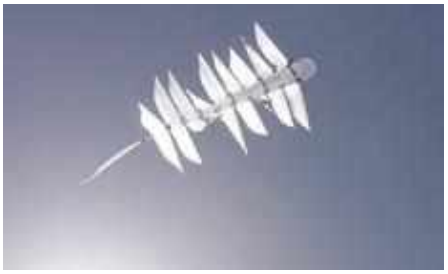
[1] Flapping Wing

شکل ۱۱۵-ساختار درونی پرنده کینون و همکارانش [143]

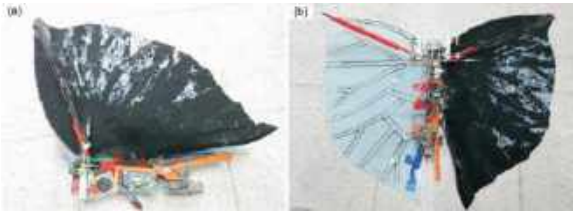
در مقایسه با سایر پرنده‌های بدون سرنشین تعداد پرنده‌های بالزن و پژوهش‌های انجام شده بر روی آنها بسیار زیاد است، برای نمونه مرادی [146] در دنباله کار خسروی [137] و سرباز [147] به ساخت یک نمونه از آن و موسوی [148] به ساخت نمونه دیگری در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی پرداخته اند. کینون و همکارانش با الهام از مرغ مگس خوار نمونه ای از پرنده بال زن را توسعه داده اند. [143] محققین دانشگاه دلف نیز دو مدل را بر اساس پرواز حشرات اما همراه با دم به نام‌های DelflyI و DelflyII طراحی کرده اند. [134] همچنین شرکت فستو پرنده ای را بر اساس سنجاقک توسعه داده است.[149] چن و همکارانش نیز مدلی را بر اساس پروانه توسعه داده اند. [144] گروهی نیز به توسعه پرندگان بالزن الهام گرفته از حشرات پرداخته اند از جمله جمعی از محققین دانشگاه‌های برتر دنیا(MIT،هاروارد، واشنگتن و چندی دیگر).[150]

شکل ۱۱۶-پرنده DelFlyII دانشگاه دلف [134]

شکل ۱۱۷-پرنده بال زن سنجاقک شرکت فستو [149]



شکل ۱۱۸-طرح مفهومی‌از پرنده ای با بیش از دو بال



شکل ۱۱۹-پرنده توسعه داده شده توسط چن با الهام از پروانه [144]

شرکت فستو همچنین پرنده ای را با الهام از روش پرواز خفاش و مرغ دریایی توسعه داده است.[152] [151]

شکل ۱۲۰-پرنده بالزن شرکت فستو با الهام از خفاش[151]

شکل ۱۲۱-پرنده بالزن شرکت فستو با الهام از مرغ دریایی[152]

به جز موارد فوق شرکت فستو پرندگانی را نیز با الهام از پنگوئن، سفره ماهی و پروانه توسعه داده است که در تارنمای این شرکت معرفی شده اند.[153]

۲-۱-۶ غیربالزن

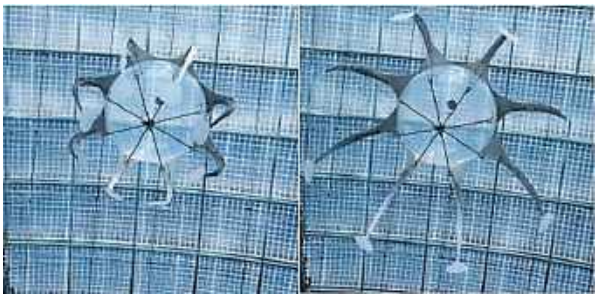
در دسته غیربالزن تنها نمونه موجود پرنده عروس دریایی است که آنهم عملکردی مشابه بالزن‌ها دارد. این دسته از پرنده بر اساس عملکرد عروس دریایی و نحوه حرکت آن طراحی شده است. و از روشی که عروس دریایی در آب برای ایجاد نیروی پیشران توسط بازوهای خود استفاده می‌کند برای پرواز در هوا استفاده می‌کند.

شکل ۱۲۲-پرنده عروس دریایی شرکت فستو[154]

پرنده از یک بالن گاز سبک مانند هلیوم تشکیل شده است که تعدادی بازوی مکانیکی در قسمت تحتانی آن قرار گرفته است. در مرکز پرنده چرخندهٔ مایلی تعبیه شده است، نیرو ابتدا به چرخندهی مایل و سپس به یک ردیف چرخندهٔ هشت تایی منتقل می‌شود .این چرخندهها قدرت هشت محور را تأمین می‌کنند، که هر یک از آنها یک لنگ را فعال کرده و آن نیز به نوبهی خود باعث حرکت یکی از هشت بازوی ربات می‌شود .به گفته سازندگان، ساختار شاخکها از آناتومی عملکردی بالهی ماهی مشتق شده است. این بازوها با هم یک حرکت رو به جلو مشابه عروس دریایی، تولید می‌کنند.

کنترل حرکت پرنده در فضای سه بعدی تحت تأثیر جابجایی وزن می‌باشد. برای این منظور، یک آونگ که در دو جهت حرکت می‌کند، در نظر گرفته شده است .آونگ در ربات در قسمت شمالی آن قرار دارد و باعث تناسب حرکت می‌شود . مرکز جرم ربات و همچنین خود ربات در جهت حرکت آونگ، حرکت می‌کنند .با استفاده از حرکت پریستالیک[1] ربات در هر جهت فضایی حرکت می‌کند. [155]

حرکت پریستالیک، سازوکار مورد استفاده عروس دریایی، توسط الگوریتم‌های تطبیقی پیاده سازی و کنترل می‌شوند.



شکل ۱۲۳-سازوکار پرواز پرنده عروس دریایی [154]

احمدزاده به عنوان رساله کارشناسی ارشد در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بر روی مدل سازی دینامیکی و آیرودینامیکی چنین پرنده ای تحقیق کرده است. [155]

این پرنده وزن کمی‌دارد، نسبتا کم صدا و بی خطر است و قابلیت پرواز ایستا و عمودی دارد، در کنار این مزایا اما مکانیزم پیچیده ای برای پرواز دارد.

شرکت فستو اولین مدل از چنین پرنده ای را ارائه کرده است. [154] همچنین صفری نیز به بررسی آیرودینامیک و ساخت نمونه آزمایشی از چنین پرنده ای اقدام کرده است. [156]

۲-۶ زیست محور(اندامگان رایانه ای[2])

در این دسته از پرندهها بخشی از سازوکار پرواز از موجودات زنده تشکیل می‌شود، غالبا تلاش‌ها در این زمینه بر روی کنترل پرنده‌های زنده تمرکز دارند.

بخشی از فعالیت‌ها بر روی تمرین و آموزش پرندگان برای پرواز متمرکز شده است مانند فعالیت محققین دانشگاه‌هاروارد [157] و بخشی از فعالیت‌ها نیز بر روی کنترل مستقیم پرنده. این کار با ارسال سیگنال‌های کنترل به مغز، شبکه عصبی و یا عضلات انجام می‌شود و تا کنون بر روی برخی حشرات و پرندگان آزمایش شده است.

سازوکار حرکت سیستم عضلانی بر اساس ارسال فرامین حرکتی مغز توسط اعصاب به عضلات است، این فرامین سیگنال‌هایی الکترونیکی با ولتاژ پایین هستند که می‌توانند توسط دستگاه‌های خارجی تولید و به عضله، سیستم عصبی یا مغز وارد شوند، الکترودهای لازم توسط عمل جراحی در بدن پرنده یا حشره کار گذاشته می‌شوند و کنترل اعضای پرنده را بر عهده می‌گیرند.

شکل ۱۲۴-نمونه ای از حشرات پرنده کنترل شونده از راه دور

در روش آموزش، به پرنده آموزش داده می‌شود که به چه شکلی پرواز کند، کنترل پرنده می‌تواند به صورت یافتن مبدا و مقصد باشد و یا با استفاده از عملگرهایی که نیازی به عمل جراحی نداشته باشند. به عنوان مثال تحریک پرنده یا حشره به وسیله نور، صوت یا ضربه. به عنوان مثال بوزکارت به کنترل یک شب‌پره با استفاده از بالن پرداخته است.[158]

شکل ۱۲۵-انجام عمل جراحی برای کارگذاشتن عملگرهای کنترلی[159]

در این نوع پرندهها مصرف انرژی بسیار کم است و امکان انجام بخش‌های مهمی‌از پرواز مانند تشخیص و عبور از موانع می‌تواند توسط پرنده زنده انجام شود اما پیچیدگی‌های پزشکی، عمل جراحی و موانع دیگری چون نقض حقوق حیوانات و قوانین محیط زیستی در کنار احتمال از دست رفتن پرنده در فرآیند پرواز یا ایجاد اختلال در ماموریت توسط عضو زنده از چالش‌های پیش روی چنین پرنده‌هایی است.

فعالیت‌های تقریبا زیادی بر روی حشرات انجام شده است، اما بر روی پرندگان و حشرات پرنده به دلیل پیچیدگی آنها، فعالیت‌های کمتری انجام شده است. به عنوان مثال ساتو در پژوهش‌های مختلفی به بررسی کنترل حشرات و مطالعات چند حشره پرنده پرداخته است. [161] [160] [159] محققین دانشگاه شادونگ چین نیز بر روی کنترل کبوتر از طریق کنترل سیگنال‌های مغزی فعالیت کرده اند.

[1] Peristaltic

[2] Cyborg

شکل ۱۲۶-کبوتر کنترل شونده از طریق مغز دانشگاه شادونگ چین[162]

۷- جمع بندی

در این پژوهش سعی کردیم با توجه به منابع در دسترس به بررسی پیشرفت‌های صورت گرفته در ساختار پرنده‌های بدون سرنشین و سازوکار پرواز آنها بپردازیم، مشخص است که در چنین پژوهشی با توجه به محدودیت‌های موجود امکان پرداختن به تک تک فعالیت‌ها ممکن نیست، اما سعی شده است تا حد ممکن چارچوب کلی پیشرفت‌های صورت گرفته مشخص شود، قطعا می‌پذیریم که این مقاله کامل نیست و ممکن است از پرداختن به برخی از موارد غفلت کرده باشیم، اساسا چنین فعالیتی باید به شکلی مستمر انجام شده و مرتبا تکمیل شود، بنابراین همکاری و همیاری محققین عزیز می‌تواند در آینده نواقص این پژوهش را برطرف کند.

۸- مراجع

[۱] س. ه. کشوری, "مقررات پهپادها," سازمان هواپیمایی کشوری, تهران, اسفند ۹۷.

[2] L. Brooke-Holland, "Unmanned Aerial Vehicles (drones): An Introduction," House of Common Library, UK, 2012.

[3] S. A. M. N. Z. Dr. Maziar Arjomandi, "CLASSIFICATION OF UNMANNED," Report for Mechanical Engineering class, University of Adelide, Australia, 2006.

[4] R. H. R.E. Weibel, "Safety considerations for operation of different," in *Proceedings of the 4th Aviation Technology,Integration and Operations Forum, AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical,Conference, Workshop and Exhibit*, 2004.

[5] A. A. M. Hassanalian, "Classifications, applications, and design challenges of drones: A review," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 91, pp. 99-131, May 2017.

[6] A. B. Y. C. C. Adnan S. Saeed, "A survey of hybrid Unmanned Aerial Vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 98, pp. 91-105, 2018.

[7] Wikipedia, "Chines Uavs," [Online]. Available: en.wikipedia.org/wiki/List_of_unmanned_aerial_vehicles_of_China. [Accessed 4 June 2019].

[8] S. A. R. DaochunLi, "A review of modelling and analysis of morphing wings," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 100, pp. 46-62, 2018.

[۹] ه. دستورانی, "پایان نامه: بررسی جریان پتانسیل روی پهپادها و ریزپهپادها با پیکربندی‌های عملیاتی," دانشگاه فردوسی مشهد, مشهد, ۱۳۹۱.

[10] V. K. K. a. L. J. R. Zheng Min, "Aircraft morphing wing concepts with radical geometry change," *The IES Journal Part A Civil & Structural Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 188-195, 2010.

[11] JostSeifert, "A review of the Magnus effect in aeronautics," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 55, pp. 17-45, 2012.

[12] Y. Z. G. J. Qingming Hou, "Modeling and control of a magnus-effect-based ducted fan aerial vehicle," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 934-941, 2015.

[13] H. W. S. B. Tang Jiwei, "High-altitude unmanned plane equipped with Magnus effect propulsion system". China Patent CN103434640A, 15 07 2015.

[14] C. Badalamenti, "Thesis: On the Application of Rotating Cylinders to Micro Air Vehicles," City University London, London, 2010.

[15] "Ameblo," [Online]. Available: https://ameblo.jp/fusimiseisakujo/page-7.html. [Accessed 25 Oct 2019].

[16] "RC TWIN ROTOR WING Magnus Effect Plane," [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=pKG7jKjetfI&t=58s. [Accessed 25 Oct 2019].

[17] Y. H. J. H. J. X. Bingbing LI, "A new modeling scheme for powered parafoil unmanned aerial vehicle platforms: Theory and experiments," *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019.

[18] T. v. Holten, "A single rotor without reaction torque: a violation of Newton's Laws or feasible?," in *28th European Rotorcraft Forum*, Bristol, 2002.

[۱۹] ف. ن. شاهانی, "پایان نامه: طراحی و ساخت آرنیکوپتر," دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, دانشکده مکانیک, تهران, ۱۳۹۳.

[20] M. P. Jia Wan, "The ornicopter - A tailless helicopter with active flapping blades," *Aeronautical Journal -New Series*, vol. 118, no. 1205, pp. 743-773, 2014.

[21] R. K. T. v. H. S. v. d. B. M. Heiligers, "Development of a Radio-Controlled Ornicopter: a Single Rotor Helicopter without Reaction Torque," in *Proceedings of the 2005 International Powered Lift Conference*, Texas, 2005.

[22] VGR-Systems, "Thrust vectoring coaxial Drone Update," DIY, 14 Aug 2016. [Online]. Available: https://diydrones.com/profiles/blogs/thrust-vectoring-coaxial-drone-update. [Accessed 7 June 2019].

[23] T. Maria GraziaDe Giorgi, "Numerical investigation of the performance of Contra-Rotating Propellers for a Remotely Piloted Aerial Vehicle," *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 1011-1018, 2017.

[24] MKROXTON, "EADS Dornier VTOL-Marinedrohne SEAMOS," EDAS, 1 Mar 2014. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=mUITKwiGZwQ. [Accessed 24 June 2019].

[25] Avistar, "Kamov Ka-137," Avistar, 2002. [Online]. Available: http://www.aviastar.org/helicopters_eng/ka-137.php. [Accessed 24 June 2019].

[26] wikipedia, "GEAMOS/SEAMOS," wikipedia, [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Dornier_GEAMOS/SEAMOS.

[27] S. L. Christian Bermes, "New Design of the Steering Mechanism for a Mini Coaxial Helicopter," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, 2008.

[28] K. Pradeep. K.Yadav, "Dynamic model of a MAV with COG shifting mechanism," in *Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, Kanpur, 2014.

[29] C. B. S. B. a. R. S. Dario Schafroth, "Micro Helicopter Steering: Review and Design for the muFly Project," in *IEEE/ASME International Conference on Mechtronic and Embedded Systems and Applications*, Bejing, 2008.

[30] K. S. D. S. S. B. Christian Bermes, "Control of a Coaxial Helicopter with Center of Gravity Steering," in *Intl. Conf. on SIMULATION, MODELING and PROGRAMMING for AUTONOMOUS ROBOTS*, Venice, 2008.

[۳۱] ع. س. تفرشی, "پایان نامه: ساخت و کنترل یک پرنده بدون سرنشین عمود پرواز(coaxial) در ابعاد میکرو مبتنی بر جابجایی مرکز جرم," دانشگاه صنعتی شریف, تهران, ۹۲.

[۳۲] ب. ماهان, "پایان نامه: شناسایی دینامیک مقید پرنده کواندا در پرواز ایستایی," دانشگاه صنعتی شریف, تهران, ۹۷.

[33] R. J. Collins, "COANDA – A NEW AIRSPACE PLATFORM FOR UAVS," Coanda.co.uk, 2002.

[34] B. Collins, "Engineering Investigation Report 23 : The Coanda disk aircraft development program," coanda.co.uk, Dorset, 2013.

[35] F. NEDELCUŢ, "TOWARDS A NEW CLASS OF AERIAL VEHICLES USING THE COANDA EFFECT," University of Romania, 2007.

[36] K. Munson, Jane's Unmanned Aerial Vehicles and Targets, UK: Jane's Information Group, 2003.

[37] B. W. Mattias Eriksson, "Thesis: Performance estimation of a ducted fan UAV," Linköpings universitet, Sweden, 2006.

[38] A. I. o. A. a. Astronautics, "Unmanned Aircraft Roundup 2015," American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[39] AVIDLLC, "T-HAWK MAV," AVIDLLC, [Online]. Available: http://www.avidaerospace.com/t-hawk-mav/. [Accessed 25 June 2019].

[40] A. M. a. K. K. Shlok Agarwal, "Design and Fabrication of Twinrotor UAV," in *Second International Conference on Advanced Information Technologies and Applications*, 2013.

[41] J. P. J. N. Petr Chalupa, "Modelling of Twin Rotor MIMO System," in *25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM* , 2014.

[۴۲] ح. فردوسی, "پایان نامه: مدل‌سازی و کنترل سیستم TRMS با استفاده از ANFIS," ۱۳۸۹, دانشگاه صنعتی اصفهان, اصفهان, منطق فازی و .

[43] NASA, "Ducted Fan Designs Lead to Potential New Vehicles," [Online]. Available: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2010/t_4.html. [Accessed 8 june 2019].

[44] K. A. A. T. Christos Papachristos, "Design and experimental attitude control of an unmanned Tilt-Rotor aerial vehicle," in *15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Tallinn, 2011.

[45] H. M. T. Sai Khun Sai, "Modeling and Analysis of Tri-Copter (VTOL) Aircraft," *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology* , vol. 3, no. 6, pp. 54-62, 2015.

[۴۶] ع. ر. آغویی, "پایان نامه: ساخت پهپاد سه موتوره," دانشگاه صنعتی امیرکبیر, تهران, ۱۳۹۵.

[47] M. D.Kastelan, "Fully Actuated Tricopter with Pilot-Supporting Control," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 9, pp. 79-84, 2015.

[48] A. S. O. G. R. L. J. Escare˜no, "Triple Tilting Rotor mini-UAV: Modeling and Embedded Control of the Attitude," in *American Control Conference*, Washington, 2008.

[۴۹] س. ن. غ. ع. ا. اکبری, "مدلسازی دینامیکی کامل کوادروتور، شبیه‌سازی مدل غیرخطی در نرم‌افزار متلب و کنترل زوایا," در *اولین کنفرانس سراسری مهندسی مکانیک ایران*, شیراز, ۱۳۹۲.

[50] F. SABATINO, "Quadrotor control: modeling, nonlinear control design, and simulation," KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015.

[51] S. O. H. a. A. Rones, "Modular Design of Integrated Duct Fan Quadrotor Structure," the Arctic University of Norway, 2017.

[52] D. L. Y. B. a. Z. X. Xiangjian Chen, "Modeling and Neuro-Fuzzy Adaptive Attitude Control for Eight-Rotor MAV," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 9, no. 6, pp. 1154-1163, 2011.

[53] P. Zarafshan, "Design and Fabrication of an Autonomous Octorotor Flying Robot," in *3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics October*, Tehran, 2015.

[54] B. MajdSaied, "Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of an Octorotor UAV using motors speeds measurements," *IFAC PapersOnLineVolume*, vol. 50, no. 1, pp. 5263-5268, 2017.

[۵۵] م. ف. زاده, "پایان نامه: مدلسازی و بررسی دینامیک پرواز پرنده دایناکوپتر," دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, تهران, ۱۳۹۷.

[۵۶] ک. حقیقی, "پایان نامه: طراحی و ساخت یک پنتاکوپتر پروانه محصور براساس اطلاعات آماری," دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, تهران, ۱۳۹۷.

[57] A. Nemati, "Designing Modeling and Control of a Tilting Rotor Quadcopter," University of Cincinnati, Cincinnati, 2016.

[58] F. S. a. E. Altuğ, "Modeling and Control of a Novel Tilt – Roll Rotor Quadrotor UAV," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, 2013.

[59] A. D. D. C. S. B. B. V. Z. Ali Bin Junaid, "Design and Implementation of a Dual-Axis Tilting Quadcopter," *MDPI Robotics*, vol. 7, no. 4, 2018.

[60] N. P. K. B. B. M. M. O. S. B. Tomislav Haus, "A novel concept of attitude control for large multirotor-UAVs based on moving mass control," in *24th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Athen, 2016.

[61] A. I. M. C. M. O. S. B. Tomislav Haus, "Mid-Ranging Control Concept for a Multirotor UAV with Moving Masses," in *26th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2018.

[62] M. O. S. B. Tomislav Haus, "A concept of a non-tilting multirotor-UAV based on moving mass control," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Miami, 2017.

[63] M. O. S. B. Tomislav Haus, "Design considerations for a large quadrotor with moving mass control," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Arlington, 2016.

[64] H. Wallop, "Dyson fan: was it invented 30 years ago?," Telegraph, 20 oct 2009. [Online]. Available: https://www.telegraph.co.uk/technology/news/6377644/Dyson-fan-was-it-invented-30-years-ago.html. [Accessed 25 June 2019].

[۶۵] م. بدری, "پایان نامه: طراحی کنترل‌کننده غیرخطی برای کوادکوپتر بدون پره," دانشگاه تبریز, تبریز, ۱۳۹۵.

[66] T. TURNER, "THE DYSON OF DRONES," Yanko Design, 18 8 2017. [Online]. Available: https://www.yankodesign.com/2017/08/18/the-dyson-of-drones/. [Accessed 25 June 2019].

[67] D. B. a. A. F. Markus Ryll, "Modeling and Control of FAST-Hex:a Fully–Actuated by Synchronized–Tilting Hexarotor," in *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, 2016.

[۶۸] س. بصیری, "پایان نامه: طراحی، ساخت و کنترل ربات پرنده با قابلیت تعقیب عوارض زمین با استفاده از پردازش تصویر مبتنی بر منطق فازی," دانشگاه گیلان, گیلان, ۱۳۸۹.

[69] M. T. F. ,. a. C. Q. Stephen M. Gammon, "The Mathematical Model of the Tri-Turbofan Airship for Autonomous Formation Control Research," University of Texas at San Antonio , Texas, 2006.

[70] A. M. J. H. J. J. S. P. J. a. B. C. Elfes, "Autonomous flight control for a Titan exploration aerobot," in *ISAIRAS*, 2005.

[71] T. Report, "The utonomous Blimp Project of LAAS-CNRS: Achievements in Flight Control and Terrain Mapping," France, 2005.

[72] J. d. P. E. A. J. B. S. M. S. M. L. B. Ramos, "Autonomous flight experiment with a robotic unmanned airship," in *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2001.

[73] Kornienko, ""System Identification Approach for Determining Flight Dynamical Characteristics of an Airship from Flight Data," University of Stuttgart, Stuttgart, 2006.

[۷۴] م. مجنون, "پایان نامه: کنترل سلسله مراتبی یک بالگرد مدل," دانشگاه صنعتی اصفهان, اصفهان, ۱۳۸۸.

[75] T. SALAZAR, "Mathematical Model and Simulation for a Helicopter with Tail Rotor," *Advances in Computational Intelligence, Man-Machine Systems and Cybernetics*, pp. 27-33, 2010.

[76] H. P. T. a. T. M. Hari Muhammad, "MATHEMATICAL MODELING, SIMULATION AND IDENTIFICATION OF MICRO COAXIAL HELICOPTER," *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 19, no. 2, pp. 353-364, 2012.

[۷۷] و. اکبری, "پایان نامه: طراحی و ساخت پرنده تک بال," دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, تهران, ۱۳۹۵.

[۷۸] م. شاخصی, "پایان نامه: بررسی دینامیک پرنده تک بال و طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی," دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, تهران, ۱۳۹۳.

[79] M. T. a. M. J. Gašper Matič, "Mathematical Model of a Monocopter Based on Unsteady Blade-Element Momentum Theory," *Journal of Aircraft (JA)*, vol. 52, no. 6, 2015.

[۸۰] م. تفرشی, "پایان نامه: مدلسازی و طراحی سیستم هدایت و کنترل برای یک میکرو پهپاد تک بال," دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, تهران, ۱۳۹۳.

[۸۱] ا. صفایی, "پایان نامه: طراحی و ساخت سیستم خلبان خودکار با استفاده از کنترل تطبیقی برای یک هواپیمای بدون سرنشین," دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی, تهران, ۱۳۹۲.

[۸۲] م. ابراهیمی, "پایان نامه: مدل سازی و طراحی کنترلر خطی ریزپرنده تک باله," دانشگاه صنعتی شریف, تهران, ۱۳۹۳.

[83] D. J. P. a. J. S. H. Evan R Ulrich, "From falling to flying: the path to powered flight of a robotic samara nano air vehicle," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 5, no. 4, 2010.

[84] D. jekkyll, "Monocopter," 26 Sep 2015. [Online]. Available: https://insta-arduino.tumblr.com/post/129945521246/arduino-

[۱۰۷] ش. ح. سربسی, "پایان نامه: ساخت یک پهپاد عمودپرواز بال پیچنده چهار موتوره," دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, تهران, ۱۳۹۴.

[۱۰۸] ف. فرجی, "پایان نامه: مدل سازی دینامیکی و کنترل یک پرنده ترکیبی," دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, تهران, ۱۳۹۵.

[109] A. C. H. B. a. o. Rafael Coronel Bueno Sampaio, "Novel hybrid electric motor glider-quadrotor MAV for in-flight/V-STOL launching," in *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2014.

[110] Q. L. ,. W. ,. Z. Xiaoxing Fang, "Control strategy design for the transitional mode of tiltrotor UAV," in *IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*.

[111] W. H. S. Yanguo, "Design of flight control system for a small unmanned tiltrotor aircraft," *Chin. J. Aeronaut*, vol. 22, no. 3, 2009.

[112] M. Hirschberg, "Project Zero," AgustaWestland, 1 may 2013. [Online]. Available: http://evtol.news/2013/05/01/project-zero/. [Accessed 25 June 2019].

[113] S. Carlson, "A Hybrid Tricopter/Flying-Wing VTOL UAV, Stephen Carlson," in *52nd Aerospace Sciences Meeting*, Maryland, 2014.

[114] U. O. Y. D. A. T. A. C. A. V. B. Y. H. C. S. B. M. U. Y.O. Aktas, "A low cost prototyping approach for design analysis and flight testing of the turac vtol uav," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE*, 2014.

[115] BirdsEyeView, "FireFly6," [Online]. Available: https://www.birdseyeview.aero/products/firefly6. [Accessed 7 Nov 2019].

[116] Quantum-Systems, "Trinity-F9," [Online]. Available: https://www.quantum-systems.com/trinity-f9. [Accessed 9 June 2019].

[117] Foxtech, "Nimbus VTOL User Manual," Foxtech, 2018.

[118] A. Times, "Phantom Swift," [Online]. Available: https://aviation-times.aero/boeing-phantom-swift-selected-darpa-x-plane-competition. [Accessed 9 June 2019].

[119] Quantum-Systems, "Tron-F9," [Online]. Available: https://www.quantum-systems.com/tron-f9. [Accessed 9 June 2019].

[120] J. J. D. D. M. O. C. V. L. W. A. A. Rodriguez, "Robust LPV H∞ Gain-Scheduled Hover-to-Cruise Conversion for a Tilt-Wing Rotorcraft in the Presence of CG Variations," in *46th IEEE Conference on Decision and Control New Orleans*, Los Angles, 2007.

[121] D. M. a. D. Seitz, "Dynamics of Control System Design for a TiltWing Vehicle," in *AIAA Student Conference*, California, 2000.

[122] M. Streetly, Jane's All the World's Aircraft: Unmanned, London: IHS Jane's, 2014-2015.

[123] J. H. Y. D. D. M. T. Ostermann, "CONTROL CONCEPT OF A TILTWING UAV DURING LOW SPEED MANOEUVRING," in *28TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE AERONAUTICAL SCIENCES*, 2018.

[۱۲۴] ا. ص. زاده, "طراحی و ساخت پرنده بدون سرنشین بال متحرک," دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, تهران, ۱۳۹۷.

[125] S. D. C. H. K. O. E. S. M. U. ⇑. M. A. E. Cetinsoy, "Design and construction of a novel quad tilt-wing UAV," *Mechatronics*, vol. 22, pp. 723-745, 2012.

[126] K. Barnstorff, "Ten-Engine Electric Plane Completes Successful Flight Test," NASA, 30 Apr 2015. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/langley/ten-engine-electric-plane-completes-successful-flight-test. [Accessed 8 Nov 2019].

[127] L. T. S. W. D. S. B. S. C. H. T. G. S. S. a. o. Jun En Low, "Design and dynamic analysis of a Transformable Hovering Rotorcraft (THOR)," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore, 2017.

[128] IridiumDynamics, "Halo," IridiumDynamics, [Online]. Available: https://iridiumdynamics.com/product-category/uavs/#product-1. [Accessed 22 Nov 2019].

[129] Embention, "HADA," Embention, [Online]. Available: https://www.embention.com/projects/hada-helicopter-adaptive-aircraft/. [Accessed 8 Nov 2019].

[130] Arcturus, "Jump 20," Arcturus, [Online]. Available: https://arcturus-uav.com/product/jump-20. [Accessed 25 June 2019].

arduinopromini-hmc5883l-monocopter. [Accessed 2019 June 11].

[85] E. Ackerman, "Mutant Quadrotor MAV Lifts Off After a Century of Development," IEEE, 22 Jul 2011. [Online]. Available: https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/diy/mutant-quadrotor-mav-lifts-off-after-a-century-of-development. [Accessed 2019 June 11].

[86] K. L. a. W. H. Yu Hu, "The Research on the Performance of Cyclogyro," in *6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO)*, Kansas, 2012.

[87] M. L. McNabb, "DEVELOPMENT OF A CYCLOIDAL PROPULSION COMPUTER MODEL AND COMPARISON WITH EXPERIMENT," Mississippi State University, Mississippi, 2001.

[88] H. A. B. M. H. V. a. C. I. Zachary, "Design, Development, and Flight Test of a Small-Scale Cyclogyro UAV Utilizing a Novel Cam-Based Passive Blade Pitching Mechanism," *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 5, no. 2, pp. 145-162, 2013.

[89] E. S. H. a. I. C. Moble Benedict, "Development of a Micro Twin-Rotor Cyclocopter Capable of Autonomous Hover," *Journal of Aircraft*, vol. 51, no. 2, pp. 672-676, 2014.

[90] N. TESLA, "APPARATUS FOR AERIAL TRANSPORTATION". US,New York Patent 223,915, 4 Oct 1928.

[91] S. S. Daisuke Kubo, "Tail-Sitter Vertical Takeoff and Landing Unmanned Aerial Vehicle: Transitional Flight Analysis," *JOURNAL OF AIRCRAFT*, vol. 45, no. 1, pp. 292-297, 2008.

[92] Z. C. Z. Y. Xinhua Wang, "Modeling and control of an agile tail-sitter aircraft," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 352, pp. 5437-5472, 2015.

[93] Aerovel, "Aerovel," Aerovel, [Online]. Available: http://Aerovelco.com/flexrotor. [Accessed 7 Nov 2019].

[۹۴] ح. کرمی, "پایان نامه: طراحی کنترل کننده مقاوم برای پهپاد دم نشین با پیشران ملخی در فاز پرواز ایستا," دانشگاه صنعتی شریف, تهران, ۱۳۸۹.

[95] J. C. a. D. H. S. Yeondeuk, "A Comprehensive Flight Control Design and Experiment of a Tail-sitter UAV," in *Guidance Navigation and Control Co-located Conference*, boston, 2013.

[96] H. W. Zhao, "Development of a Dynamic Model of a Ducted Fan VTOL UAV," RMIT University, 2009.

[97] Martinuav, "V-BAT," Martinuav, [Online]. Available: http://martinuav.com/portfolio/v-bat/. [Accessed 24 June 2019].

[98] J.-P. C. B. R. L.-M. M. C. J. M. F. Jacson M. O. Barth, "Fixed-wing UAV with transitioning flight capabilities :Model-Based or Model-Free Control approach? A preliminary study," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Dallas, 2018.

[99] J. V.-C. P.-V. V. S. R. S. Sergio Garcia-Nieto, "Motion Equations and Attitude Control in the Vertical Flight of a VTOL Bi-Rotor UAV," *electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 207-229, 2019.

[100] C. N. B. T. J. D. S. Menno Hochstenbach, "Design and Control of an UnmannedAerial Vehicle for AutonomousParcel Delivery with Transition fromVertical Take-off to Forward Flight-VertiKUL, a Quadcopter Tailsitter," *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 7, no. 4, pp. 395-405, 2015.

[101] T. Robotics. [Online]. Available: https://transition-robotics.com. [Accessed 7 Nov 2019].

[102] Navaldrone, "VD200," Navaldrone, [Online]. Available: http://www.navaldrones.com/VD200.html. [Accessed 7 Nov 2019].

[103] A. F. Reyes, "DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN UAV WITH HYBRID FLIGHT CAPABILITIES," Centro De Investigaciones En Optica , A.C., Leon, 2018.

[104] I. F. L. Duc Anh Ta, "Modeling and Control of a Convertible Mini-UAV," in *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, Milan, 2011.

[105] A. S. J. E. R. L. O. Garcia, "Tail-sitter UAV having one tilting rotor: Modeling, Control and Real-Time Experiments," in *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, 2008.

[106] R. H. Stone, "The T-wing tail-sitter unmanned air vehicle: From design concept to research flight vehicle," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 218, pp. 417-433, 2004.

[131] J. Aletky, "Out of the Black: SLT VTOL UAV," 31 oct 2014. [Online]. Available: https://diydrones.com/profiles/blogs/out-of-the-black-slt-vtol-uav. [Accessed 25 June 2019].

[132] UAVVision, "Rheinmetall Airborne Systems Tactical Hybrid UAS," UAVVision, 3 Sep 2012. [Online]. Available: https://www.uasvision.com/2012/09/03/rheinmetall-airborne-systems-tactical-hybrid-uas/. [Accessed 8 Nov 2019].

[133] U. N. R. Lab, "Stop-Rotor Rotary Wing Aircraft," US Naval Research Lab, [Online]. Available: https://www.nrl.navy.mil/techtransfer/available-technologies/electronics/stop-rotor-rotary-wing-aircraft. [Accessed 11 June 2019].

[134] M. G. D. W. R. R. R. a. B. v. O. G.C.H.E. de Croon, "Design, Aerodynamics, and Autonomy of the DelFly," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 7, no. 2, 2012.

[۱۳۵] ن. ب. کار، "پایان نامه: شبیه سازی دینامیک سامانه پیشران یک پرنده مکانیکی بال زن،" دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۹۰.

[136] M. Karasek, "Thesis: Robotic hummingbird: Design of a control mechanism for a hovering flapping wing micro air vehicle," Universite libre de Bruxelles, Bruxelles, 2014.

[۱۳۷] ه. خسروی، "پایان نامه: شبیه سازی پرنده مکانیکی بال زن،" دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۵.

[138] A. Y.-K. K. M. Bahram Tarvirdizadeh, "A mathematical model for a flapping-wing micro aerial vehicle," in *17th IASTED international conference on Modelling and simulation*, Montreal, 2006.

[۱۳۹] ک. م. ا. س. نیکروان، "شبیه سازی دینامیک و ارزیابی تجربی عملکرد اجزای سامانه ی پیشران یک بال زن،" در *هفتمین همایش انجمن هوافضای ایران*، تهران، ۱۳۸۶.

[۱۴۰] رشیدی، "پایان نامه: مدلسازی و شبیه سازی دینامیک بالزن صلب،" دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۱.

[۱۴۱] ح. خدابخش، "پایان نامه: مدل سازی و طراحی کنترلر پرواز شناور یک شبه حشره بالزن،" دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۸۹.

[۱۴۲] ه. زارع، "پایان نامه: مدل‌سازی دینامیک پرواز شش درجه آزادی یک پرنده بال‌زن الاستیک با رویکرد آیرودینامیک ناپایا،" دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۹۷.

[143] K. K. W. a. A. A. Matthew Keennon, "Development of the Nano Hummingbird: A Tailless Flapping Wing Micro Air Vehicle," in *50th AIAA Aerospace Science Meeting*, Tennessee, 2012.

[144] L.-S. C. Y. L. Z.-J. W. a. P.-C. L. Bo-Hsun Chen, "Design of a Butterfly Ornithopter," *Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 7-16, 2016.

[۱۴۵] آ. افتخاری، "پایان نامه: امکان سنجی مدلسازی، طراحی و ساخت ربات های حشره،" دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۵.

[۱۴۶] آ. مرادی، "پایان نامه: ساخت پرنده مکانیکی بالزن،" دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۵.

[۱۴۷] س. سرباز، "پایان نامه: آیرودینامی پرنده مکانیکی بالزن،" دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۵.

[148] س. موسوی، "پایان نامه: طراحی و ساخت پرنده مکانیکی بالزن و آنالیز تجربی پارامترهای هندسی و پروازی آن،" دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۲.

[149] Festo, "BionicOpter," [Online]. Available: https://www.festo.com/group/en/cms/10224.htm. [Accessed 11 June 2019].

[150] P. C. S. B. F. N. T. J. K. Y. M. M. S. R. K. R. J. W. M. A. Graule, "Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion," *Science*, vol. 352, no. 6288, pp. 978-982, 2016.

[151] Festo, "BionicFlyingFox," Festo, [Online]. Available: https://www.festo.com/group/en/cms/13130.htm. [Accessed 8 Nov 2019].

[152] Festo, "SmartBird," Festo, [Online]. Available: https://www.festo.com/group/en/cms/10238.htm. [Accessed 8 Nov 2019].

[153] Festo, "Innovations," Festo, [Online]. Available: https://www.festo.com/group/en/cms/10156.htm. [Accessed 8 Nov 2019].

[154] Festo, "AirJelly, Glides through the air by peristaltic motion," Festo Co, Denkendorf.

[۱۵۵] م. احمدزاده، "پایان نامه: تحلیل رفتار ایروالاستیک بازوی ربات AirJelly،" دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۲.

[۱۵۶] م. صفری، "طراحی و ساخت مکانیزم جلو برنده با الهام از روش حرکت عروس دریایی برای سامانه های سبک تر از هوا،" دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۶.

[157] S. f. E. Biology, "Auto-pilots need a birds-eye view," 1 Jul 2011. [Online]. Available: https://phys.org/news/2011-07-auto-pilots-birds-eye-view.html. [Accessed 13 June 2019].

[158] A. Bozkurt, "Balloon-Assisted Flight of Radio-Controlled Insect Biobots," *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, vol. 60, no. 9, 2009.

[159] T. T. V. D. K. I. A. M. M. Hirotaka Sato, "Deciphering the Role of a Coleopteran Steering Muscle via Free Flight Stimulation," *Current Biology*, vol. 25, no. 6, pp. 798-803, 2015.

[160] C. W. B. Y. P. E. B. B. E. C. G. L. J. M. V. J. F. H. a. M. M. M. Hirotaka Sato, "Remote radio control of insect flight," *Front. Integr. Neurosci*, 2009.

[161] Y. P. B. B. H. Sato, "RADIO-CONTROLLED CYBORG BEETLES:A RADIO-FREQUENCY SYSTEM FOR INSECT NEURAL FLIGHT CONTROL," in *EEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2009.

[162] biotele, "THE CYBORG ZOO," [Online]. Available: http://www.biotele.com/cyborgzoo.html. [Accessed 13 June 2019].