

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

# زی روبری :

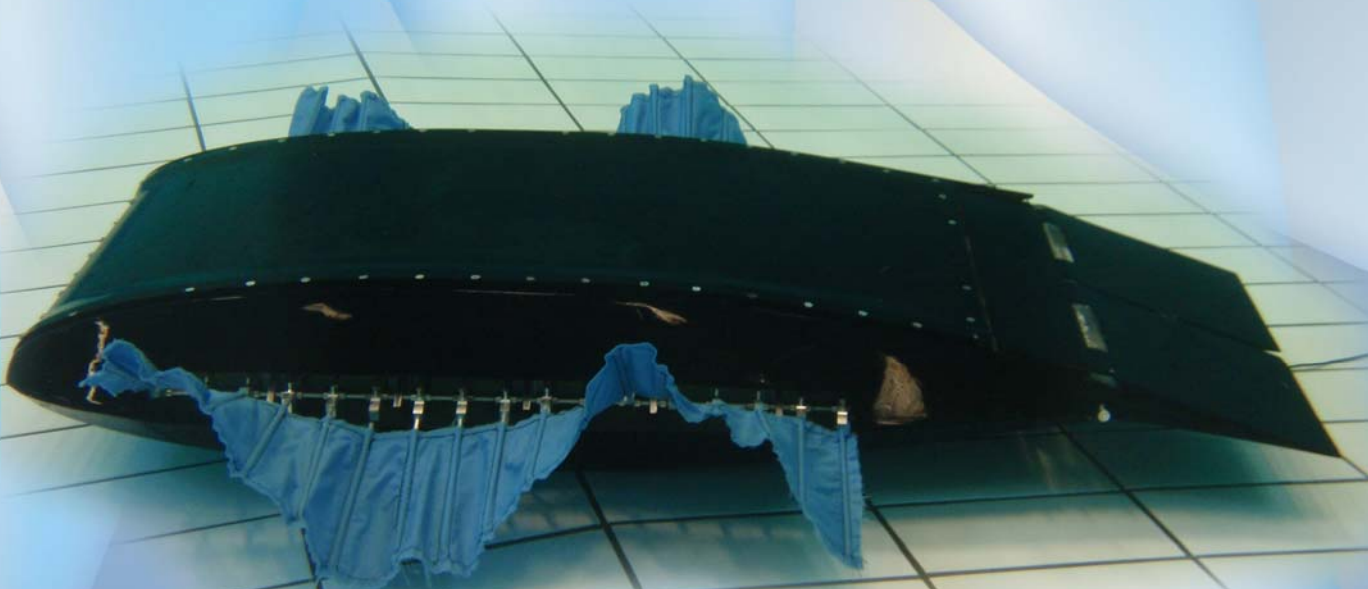
طراحی رباتیک الهام یافته از طبیعت

## BIOMIMETICS:

*Bio-inspired Robotics  
A practical approach*

نگارنده:

آرین پورباقری ج





دانشکده مهندسی هوافضا  
دانشگاه صنعتی شریف

پایان نامه کارشناسی

**زی روبری ؛**

**طراحی رباتیک الهام یافته از طبیعت**

«رویکردی کاربردی»

نویسنده:

آرین پورباقری ج.

اساتید راهنما:

دکتر روح الله دهقانی فیروزآبادی

دکتر حسن حدادپور



Aerospace Engineering Department  
Sharif University of Technology

# **Biomimetics;**

## **Bio-inspired Robotics**

*A practical approach*

A dissertation submitted to the department of Aerospace Engineering of Sharif University of Technology in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science

By:

Aryan Pourbaghery J.

Advisors:

Dr. Roohollah Dehghani Firouzabadi

Dr. Hassan Haddadpour

## چکیده

"زی‌روبری" یا روبری و الگوبرداری از زیست و طبیعت، ایده بنیادین الهام گرفتن از طبیعت مادر برای حل مشکلات بشر (خصوصاً در زمینه مهندسی و عرصه توجه خاص این پژوهش یعنی رباتیک)، است که بیش از پیش به سمتی می‌رود که رویکردی تعیین کننده در بسیاری از پروژه‌های حال حاضر دنیا باشد؛ طبیعت به عنوان منبع الهام و گنجینه پاسخ و زاینده جوشان راه‌حل همواره چندین قدم از دانش‌های تجربی پیش بوده است. چه از یک سو، اصولاً این دانش‌ها زاده مشاهدات طبیعی اند؛ و از سوی دیگر، طبیعت برای به تکامل رساندن راه‌حل‌های ذاتی‌اش مجال کافی داشته است. در این پژوهش سعی بر آن بوده، گستره فراخ دانش‌ها، فن‌ها، و فناوری‌های درگیر در زی‌روبری در مقابل چشمان خواننده قرار گیرد و سازمانی در ذهن خواننده ترسیم گردد که به واسطه آن تصویر بزرگ از آن چه زی‌روبری می‌خوانندش از دست نرود.

در این مجموعه کوشیده‌ایم اقیانوسی باشیم به عمق اندک! و به آن می‌بالیم.

از این رهیاب، قصد داریم نسبت به برخی نقایص موجود در ارایه پژوهش‌های حاضر در ادبیات نیاز الگوی درست ایجاد نماییم.

در مسیر پیشرفت محتوا، پس از معرفی اندک، به ترتیب گذاری از بسط دانش‌ها و فناوری‌های کلیدی و تحلیل‌های چنین دانش-هایی در رباتیک طبیعت، به سوی رباتیک زی‌الهام‌یافته، و آینده ترسیمی دنیای فناوری‌های رباتیک داریم و در این بین به بسط زی‌روبری و المان‌هایش می‌پردازیم. در این بین، در صدد بوده ایم هم نیاز مهندسین زی‌روبر و هم نیاز دانشمندان زی‌الهام‌یافته را برآورده نماییم. پژوهش حاضر عصاره‌ای از جان‌مایه‌های کتابی است که تحت همین عنوان در حال نوشته شدن است.

## فهرست درون

صفحه	عنوان
۱	چکیده
۱۲	بخش ۱. دیاچه
۱۲	باور ما
۱۲	سخن نخست
۱۲	چه برای فروش آورده ایم؟
۱۳	شیمایی از نوشتار پیش رو
۱۴	بخش ۲. دانش ها و فناوری های کلیدی
۱۴	هوش مصنوعی
۱۵	تعریف و طبیعت هوش مصنوعی
۱۶	عامل هوشمند
۱۶	مسایل هوش مصنوعی
۱۸	الکترونیک و مخابرات هوافضایی
۱۹	مهندسی مواد پیشرفته
۲۰	فناوری های انرژی محرکه
۲۱	ماهچه شیمیایی رفت و برگشتی (RCM)
۲۴	دانش های زیست شناسی
۲۵	عملکرد ماهچه
۳۰	بخش ۳. طبیعت و انواع حرکت
۳۱	پرواز (حرکت سیالی)
۳۱	پرواز آبی
۳۵	آناتومی
۳۵	مسیر تکامل
۳۸	اشکال مختلف شناکردن
۳۸	رکوردهای شناگران و شیرجه زنان
۴۰	بررسی مکانیزم بالزنش (باله زنش)

۴۲	تحلیل هیدرودینامیک
۴۸	پرواز پرندگان
۴۸	ماهیچه های پروازی پرندگان
۴۹	ابزارها و تکنیک ها
۴۹	برای انجام مشاهدات روی پرواز و شیرجه پرندگان
۴۹	برای مشاهده دینامیک جمعیت پرنده ها
۵۰	ساختار بال پرندگان
۵۱	پرهای پروازی در بال پرندگان
۵۲	ساختار پر رتبه یک
۵۹	روش های پرواز هوایی
۵۹	پرواز بی بالزنش (بدون بال زدن) در پرندگان (هواسرش)
۶۱	پرواز بالزنش
۶۲	پرواز نوبتی
۶۳	طراحی بهینه پرنده ها از نگاه زیرسامانه ها
۶۶	بررسی توان دراختیار و توان موردنیاز پرواز
۶۷	دسته بندی پرندگان بر اساس صاف پیمودن مسیر پرواز
۶۷	مدل سازی دینامیکی و شبیه سازی
۶۸	پرواز حشرات
۶۹	پروازهای با ماهیت ترکیبی و انواع دیگرگون پرواز
۷۰	حرکت زمینی
۷۰	انواع حرکت زمینی
۷۱	حرکت زمینی و تاثیرات هزینه جابه جایی:
۷۴	طراحی ساختار پا با توجه به مأموریت
۷۵	حرکت زیرسطحی
۷۵	حرکت آویزان
۷۶	بخش ۴. زیروبری
۷۷	پرواز حشرات، منبع الهام
۸۰	پرواز پرندگان، منبع الهام

۸۰	تغییر شکل
۸۲	بهینگی پرواز
۸۲	شناگران طبیعت، منبع الهام
۸۴	حرکت زمینی، منبع الهام
۸۶	بخش ۵. رباتیک زی‌روبر
۸۶	ره‌ریزها (رسانگر هوایی ریز)
۸۹	روش شناسی طراحی
۹۹	نانوپرنده‌ها (فراریزپرنده‌ها)
۱۱۱	بخش ۶. آینده‌ها
۱۱۶	دنیای پیش‌رو؛ آینده‌های فرا‌رو:
۱۱۸	پیوست ۱
۱۲۸	پیوست ۲
۱۲۹	مراجع

## فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱ دانش‌های پایه‌ای و ارتباط دوبه‌دویشان که در زایش و شکل‌گیری دانش‌های شناختی نقش کلیدی داشته‌اند.....	۱۵
شکل ۲ شماتیک یک سامانه هوش مصنوعی نوعی.....	۱۷
شکل ۳ پایگاه داده فناوری‌های توسعه یافته در زمینه ماهیچه‌های مصنوعی؛ مواردی که نام کمپانی یا مسئول پروژه ذکر نشده، در حد ایده و پژوهش بوده، و از این رو، یا در سطح توسعه فن‌آوری کاری انجام نشده، یا ما نمی‌دانسته‌ایم! در هر حال، این جدول به مانند یک مرور ادبیات (و بازار فناوری) نسبتاً کامل در این زمینه می‌تواند عمل کند.....	۲۱
شکل ۴ نسل‌های مختلف RCM توسعه داده شده تاکنون؛.....	۲۲
شکل ۵ پارامترهای عملکردی ماهیچه شامل (a) نیرو و (b) نیرو و توان و بازده به صورت تابعی از سرعت انقباض و انقباض آن.....	۲۶
شکل ۶.....	۲۷
شکل ۷ نمودارهای مربوط به ماهیچه‌های قرمز و سفید ماهی کارپ شناگر.....	۲۸
شکل ۸ هزینه ویژه (بر واحد جرم) جابه‌جایی گونه‌های مختلف جانوران زمینی و دریایی تابعی از جرم آن‌ها.....	۲۹
شکل ۹ هزینه جابه‌جایی ویژه در حالت دویدن برای انواع خانواده‌های جانوران (پستانداران، پرندگان، خزندگان، دوزیستان، سخت پوستان، حشرات، هزارپایان).....	۳۰
شکل ۱۰ هزینه جابه‌جایی ویژه کمینه برای گونه‌های رایج حرکتی (راه‌رفتن و دویدن، پرواز کردن، شنا کردن، وسایل نقلیه ماشینی، انسان به کمک دستگاه‌های مصنوعی، و شنا کردن روی سطح آب).....	۳۲
شکل ۱۱ هزینه جابه‌جایی ویژه کمینه به تفکیک گونه‌های مختلف شناگران آبی (ماهی‌ها، غیرماهی‌ها، شناگران روآبی یا سطحی).....	۳۲
شکل ۱۲ تصویر یک پرنده‌ماهی که قادر است بیش از ۱۰۰ متر هواسریش کند. (عکس از پیتر پارکس از -Animals Animals Earth Scenes).....	۳۳
شکل ۱۳ تصویر یک کوسه که متخصصین تکامل ادعا می‌کنند نسل مادر خانواده ماهی ری (Ray Fish) طی تکامل بوده است که بنا به ۱. فشار زیاد آب در آن اعماق اقیانوس ۲. عدم زاویه دید کوسه نسبت به زیر شکمش و تلاش برای دیدن آن زیر (!) هنگام شکار ماهی‌های کوچک‌تر طی قرون تکامل یافته و به شکل صاف و پهن‌تر کنونی این خانواده رسیده است. (عکس از National Geographic).....	۳۳
شکل ۱۴ چند نمونه از بهینه‌ترین متحرکان زمین، یعنی شناگران، که به ترتیب شکل ایرویدینامیک سطوحشان، هماهنگی دسته-جمعی حیرت‌انگیزشان، و حفظ بهینگی در عین تنوع اندازه کم‌ظریفشان را به رخ می‌کشد. ....	۳۴
شکل ۱۵ تصویر آناتومی اجزای خارجی بدن یک ماهی نوعی.....	۳۵
شکل ۱۶ توالی مسیر تکامل ساده شده از روابط ۵ خانواده از ماهی‌ها در تحلیل عملکرد باله‌ها.....	۳۶
شکل ۱۷ توالی مسیر تکامل ساده شده از روابط نسل‌های منتخب ماهی‌های با باله‌های پره‌دار برای نمایش دو گرایش عمومی در طراحی باله‌های سینه‌ای.....	۳۶



- شکل ۱۸ مدلی پیشنهادی فیش (۱۹۹۶) برای مسیر تکامل نحوه شناکردن و انواع آن و شماتیک نشان دهنده این تکامل و نیروهای مؤثر پیشران در هر مرحله ..... ۳۷
- شکل ۱۹ سه شکل کلی شنا کردن به همراه نمونه شناکننده: ..... ۳۸
- شکل ۲۰ بادبان ماهی رکورددار سرعت شنا در بین شناگران و شیرجه زنان کره آبی با سرعت شنای ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت ..... ۳۹
- شکل ۲۱ آناتومی ۶ ماهیچه‌ای برای یک مکانیزم باله زن (a) نما از جانب به ماهیچه دورکننده *abductor superficialis* (Abs) ..... ۴۰
- شکل ۲۲ پروفیل‌های سینماتیک برای بال زدن با تغییر سرعت شنا در بازه TL/s6-1 ..... ۴۱
- شکل ۲۳ نتایج آزمایش الکترومایوگرافی را برای ماهیچه باله سینه‌ای در هنگام بال زدن ..... ۴۲
- شکل ۲۴ نمای از چپ جابه‌جایی نوک باله ماهی نسبت به بدن آن (پایه باله). جهت حرکت نوک باله پیرامون حلقه پشتی پادساعتگرد و پیرامون حلقه شکمی ساعتگرد می‌باشد. هر خط نماینده یک مورد از دنباله و خطوط ضخیم نماینده میانگین دنباله هستند. A جلو، P عقب، D پشتی و V شکمی است. .... ۴۳
- شکل ۲۵ پروفیل بردارهای سرعت حول سطح ماهی در بازه‌های زمانی مختلف حین یک بار باله زدن نتیجه دینامیک سیالات محاسباتی در سرعت شنای 45 cm/s ..... ۴۳
- شکل ۲۶ شماتیک دینامیک وارد بر یک ماهی نوعی ..... ۴۵
- شکل ۲۷ اختلاف فاز بین بدن و گردابه؛ فاز ۰ یا ۳۶۰ نشان دهنده برخورد با گردابه (ابتدا و انتهای عبور گردابه) است ..... ۴۶
- شکل ۲۸ تقابل قالب حرکت ماهی در جریان آرام (A) و جریان آشفته (B) (عکس از مرجع Error: Reference source not found) ..... ۴۷
- شکل ۲۹ ساختار اسکلت و ماهیچه‌های یک پرنده نوعی ..... ۴۹
- شکل ۳۰ چهار شکل پایه‌ای بال‌پرندگان به همراه ضریب منظری بال از گونه‌های قرقاول (راست-بالا)، یاعو (مرغ-نوروزی) (راست-پایین)، عقاب (چپ-بالا)، و مرغ درازپا (چپ-پایین) ..... ۵۰
- شکل ۳۱ ساختار بال و پرها (عکس از [lab.fws.gov](http://lab.fws.gov)) ..... ۵۲
- شکل ۳۲ ساختار پر رتبه ۱ و اجزای آن ..... ۵۴
- شکل ۳۳ آلولا، فلپ لبه حمله بال‌های عقاب! ..... ۵۶
- شکل ۳۴ تغییر رفتار جریان با افزایش زاویه حمله تا رخداد جدایش ..... ۵۶
- شکل ۳۵ تأثیرگذاری جالب آلولا بر آرام‌سازی جریان و تأخیر پدیده جدایش در زوایای حمله بالا ..... ۵۶
- شکل ۳۶ بررسی قیاسی ساختار پر رتبه ۱ سه گونه جغد، کبوتر و ژئولوپتروس ..... ۵۷
- شکل ۳۷ پرهای جغد چگونه بی‌صدا کار می‌کنند؟ ..... ۵۸
- شکل ۳۸ دسته‌بندی انواع بال‌های پرندگان ..... ۵۸
- شکل ۳۹ بلندپروازی (ایستا) (عکس از <http://www.paulnoll.com>) ..... ۶۰
- شکل ۴۰ بلند پروازی شیب ارتفاع ..... ۶۰

- شکل ۴۱ بلند پروازی دمایی ..... ۶۰
- شکل ۴۲ بلند پروازی پویا (عکس از <http://www.paulnoll.com>) ..... ۶۱
- شکل ۴۳ ساختار استخوان پرندگان در مقابل استخوان پستانداران ..... ۶۳
- شکل ۴۴ مرغ مگس خوار با فرکانس بالزنش ۸۰ بار در ثانیه ..... ۶۴
- شکل ۴۵ مرغ مگس خوار در حال پرواز در فاز عقب ضرب ..... ۶۵
- شکل ۴۶ مسیر طی شده توسط نوک بال مرغ مگس خوار حین پرواز ایستا ..... ۶۵
- شکل ۴۷ بررسی توان در اختیار و توان مورد نیاز پرواز برای دو پرنده کاملا متفاوت مرغ مگس خوار (بالا) و کرکس پشت سفید (پایین) ..... ۶۶
- شکل ۴۸ یک دنباله انیمیشن تولید شده از حرکت بال ضرب زاغ حین برخاست ..... ۶۷
- شکل ۴۹ مدل مکانیکی اجزای اسکلت پرنده ..... ۶۷
- شکل ۵۰ نتیجه مدل سازی، بهینه سازی، ترکیب، و انیمیشن سازی برای یک مسیر خاص و برای سه پرنده دلخواه زاغ، گنجشک و عقاب ..... ۶۸
- شکل ۵۱ انواع حرکت بی پا ..... ۷۱
- شکل ۵۲ مدل حرکتی آونگ معکوس ساده شده ..... ۷۲
- شکل ۵۳ یک دیاگرام فرضی اثبات شده برای حرکت چهار پا ..... ۷۲
- شکل ۵۴ مدل تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل حین قدم زدن و دویدن؛ هزینه جابه جایی الگوهای حرکتی تمایل به کمینه شدن دارد. .... ۷۳
- شکل ۵۵ مصرف اکسیژن به عنوان معیار متابولیسم ماهیچه ای و مصرف انرژی در جانور تابعی از سرعت دویدن برای گونه های مختلف جانوران ..... ۷۳
- شکل ۵۶ رویکرد طراحی ساختار پا بر اساس قدرت (گونه گورکن آرمادیلو) (B) در مقابل طراحی بر مبنای سرعت (گونه نسل مادر اسب، اکیوس) (A) ..... ۷۴
- شکل ۵۷ حرکت گیون ها به عنوان نمونه ای از حرکت آویزه ای ..... ۷۵
- شکل ۵۸ راست: چسب های ولکرو به کار رفته در کفش های ورزشی چپ: ریز ساختار مکانیزم چسبیدن قلاب های دو لایه چسب ولکرو به هم ..... ۷۷
- شکل ۵۹ سازه انتوموپتر با الهام از سازه بدن حشرات به گونه ای طراحی و ساخته شده که با سوداستفاده از پدیده تشدید مصرف انرژی و لذا هزینه جابه جایی را به شدت کاهش می دهد. .... ۷۸
- شکل ۶۰ سه نمای ساختار انتوموپتر طراحی و ساخته شده ..... ۷۹
- شکل ۶۱ چند مکانیزم راهبری به کار رفته در ریزربات پرنده انتوموپتر ..... ۷۹
- شکل ۶۲ روبات سوئیفت با جمع کردن پرهای هر بال روی هم قادر به تغییر شکل بال ها در وضعیت های مختلف است و از این راه به پرواز فوق بهینه ای دست می یابد. (عکس از <http://www.roboswift.nl>) ..... ۸۰

- شکل ۶۳ تصویر دو نمونه پرستوی مهاجر سویفت واقعی ..... ۸۱
- شکل ۶۴ روبوسویفت سه دوربین حمل می کند؛ دو تا روی بال ها برای نگاه به جلو نصب شده و یکی زیر شکم آن برای نگاه به پایین است زاویه دید آن ها با مخروط ها نشان داده شده است. با استفاده از یک صفحه نمایش قابل نصب در جلو چشمان خلبان به صورت عینک، او می تواند از نگاه دوربین های روبوسویفت تصاویر را ببیند. (عکس از <http://www.roboswift.nl>) ..... ۸۲
- شکل ۶۵ روباتونا ربات ماهی زیروبر دانشگاه MIT ..... ۸۳
- شکل ۶۶ ساختار داخلی طراحی (بالا) و نقشه جانب (پایین) روباتونا ..... ۸۳
- شکل ۶۷ ربات سه پایه استرایدر آزمایشگاه روما نماینده فناوری مبتنی بر مفهوم جابه جایی دینامیک منفعل ..... ۸۵
- شکل ۶۸ تفکیک بندی کلاس های گونه گون پرندهگان با توجه به رینولدز جریان و وزن کل ..... ۸۷
- شکل ۶۹ نموداری مقایسه ای از اعداد رینولدز (Re) و ماخ (M) برای کلاس های مختلف هواپیما ..... ۹۰
- شکل ۷۰ مکانیزم بالزن اختراعی دانسیو و همکاران (۲۰۰۷) (عکس از مرجع (Error: Reference source not found) ..... ۹۱
- شکل ۷۱ عکس ربات بالزن کلتک به نام ریزخفاش ..... ۹۱
- شکل ۷۲ تصویری از ابعاد بسیار کوچک قطعات و مدار SMD طراحی شده و کنترل از دور و سیم ها ..... ۹۲
- شکل ۷۳ تصاویری از Delfly محصول زیروبرکردن پرواز سنجاقک و تاخیر و تقدمات فاز بالزنش دو جفت بال نسبت به هم (فاز مخالف پرواز ایستا، موافق پرواز رو به جلو و...) ..... ۹۲
- شکل ۷۴ سه نمای Delfly ..... ۹۳
- شکل ۷۵ تصاویر مقایسه ای از نسخه ۱ و ۲ Delfly، تفاوت در ابعاد چشمگیر است. (عکس ها برگرفته از <http://delfly.nl>) ..... ۹۴
- شکل ۷۶ ربات بالزن محصول دانشگاه بریگام یانگ زیروبر سنجاقک ..... ۹۴
- شکل ۷۷ وزن ریزپرنده ساخته شده توسط دانشگاه صنعتی شریف؛ میزان سبکی اجزای ریزپرنده ساخته شده چشمگیر است ..... ۹۶
- شکل ۷۸ آزمایشگاه میکروپرنده دانشگاه تهران و تعدادی از محصولات نخستینش ..... ۹۷
- شکل ۷۹ شمایل مفهومی ماهی ربات ساخته شده در آزمایشگاه میکروپرنده دانشگاه تهران (عکس ها از آزمایشگاه میکروپرنده) ..... ۹۸
- شکل ۸۰ سورنا ۲؛ نسخه دوم ربات انسان نما ملی محصول آزمایشگاه دکتر یوسفی کما (عکس از نارنجی) ..... ۹۹
- شکل ۸۱ عکس نمونه واقعی اثبات کننده فناوری (که فعلا در تعریف ریزپرنده و نه نانوپرنده یعنی کمتر از ۱۵ سانتی متر جای می گیرد) محصول نهایی پایان فاز اول (این نمونه با بلندکردن تمامی وزن خودش و منبع انرژی اش، کارکرد سامانه پیشرانش را به اثبات رساند. آن به یک میله که از سر دیگر لولا شده، مقید گردیده بود) ..... ۱۰۱
- شکل ۸۲ شمایل مفهومی محصول نهایی پایان فاز دوم (فاز کنونی) ..... ۱۰۱
- شکل ۸۳ پیکربندی های متفاوت مشابه موارد استفاده شده طی فاز اول برای شروع بررسی اثرگذاری سامانه کنترل پیش از طراحی بدون دم ..... ۱۰۲
- شکل ۸۴ شمایل مفهومی محصول نهایی پایان فاز سوم (عکس ها از ایروایرنمنت) ..... ۱۰۳
- شکل ۸۵ پروتوتایپ حشره ریزمکانیکی در دانشگاه کالیفرنیا در برکلی ..... ۱۰۳

شکل ۸۶ شکل مکانیزم بالزنش در دو فاز بالاضرب و پایین ضرب و تکامل آن طی دو فاز از پروژه در سال های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶ که نهایتاً موفق به تولید 0.1mN برا شده اند. .... ۱۰۴

شکل ۸۷ مکانیزم های برآزی مگس دیپترا تحت تأثیر ایرودینامیک ناپایا و متناسب با آن ..... ۱۰۵

شکل ۸۸ شماتیک ساده شده ساختار نانوپرنده هاوارارد ..... ۱۰۵

شکل ۸۹ جزئیات ماهیچه های پروازی مگس دیپترا ..... ۱۰۶

شکل ۹۰ مکانیزم ساده سازی شده از قفسه سینه مگس در مقایسه با مکانیزم رباتیک قفسه سینه پیاده سازه شده ..... ۱۰۶

شکل ۹۱ بررسی طراحی ساختار بال و مکانیزم های لولایی خمشی در کنار گیرهای به کاررفته در پایه آن ..... ۱۰۷

شکل ۹۲ مفصل لولایی خمشی که با تعداد گیر مفصل محدود شده است ..... ۱۰۸

شکل ۹۳ مدل ساده خمشی برای ممان های اعمال شده به لولای بال مدل خوبی است ..... ۱۰۸

شکل ۹۴ (بالا) پروتوتایپ ساخته شده در سایز فوق العاده کوچک (پایین) انجام تست مقید روی پروتوتایپ با ایجاد انگیزش محرک پیزوالکتریک و مشاهده حرکت صعودی موفقیت آمیز نانوپرنده ..... ۱۱۰

شکل ۹۵ نگاهی به گذشته؛ سیر ظهور فناوری های کلیدی طی قرن بیستم ..... ۱۱۱

شکل ۹۶ نقشه راه رهپاد های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ توسط وزارت دفاع آمریکا ..... ۱۱۵

شکل ۹۷ پایگاه داده فناوری های توسعه یافته در زمینه ماهیچه های مصنوعی نتیجه مطالعات روی گستره وسیعی از این فناوری-ها ..... ۱۲۸

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱ لیست ۱۰ شناگر برتر بین شناگران و شیرجه زنان کره آبی، زمین.....	۳۹
جدول ۲ فرکانس بالزنش تعدادی از گونه‌های مختلف پرندگان.....	۶۴
جدول ۳ پیش‌بینی زمان‌بندی ظهور و رشد فناوری های کلیدی رباتیک زی‌روبر در حیطه های فناوری‌های محاسبات و مواد پیشرفته (برگرفته از داده‌های آژانس برنامه ریزی اقتصادی ژاپن).....	۱۱۲
جدول ۴ پیش‌بینی زمان‌بندی ظهور و رشد فناوری های کلیدی رباتیک زی‌روبر در حیطه های فناوری‌های منابع انرژی و اتوماسیون (برگرفته از داده‌های آژانس برنامه ریزی اقتصادی ژاپن).....	۱۱۳

این صفحه به عمد خالی گذاشته شده است.

## بخش ۱. دیباچه

### باور ما

" الَّذِي خَلَقَ سَبْعَ سَمَاوَاتٍ طِبَاقًا مَّا تَرَى فِي خَلْقِ الرَّحْمَنِ مِن تَفَؤُوتٍ فَارْجِعِ الْبَصَرَ هَلْ تَرَى مِن فُطُورٍ! "

همان که هفت آسمان را طبقه طبقه بیافرید ، در آفرینش خدای بخشایشگر هیچ گونه اختلاف ، بی نظمی و نقصان نخواهی یافت ،

پس باز بنگر آیا خللی در آن می بینی ؟!

سوره پربرکت مُلک، آیه ۳

### سخن نخست

حیطه زی‌روبوری یا ایده بنیادین الهام گرفتن از طبیعت مادر برای حل مشکلات بشر (خصوصاً در زمینه مهندسی و عرصه توجه خاص این پژوهش یعنی رباتیک)، می رود که رویکردی تعیین کننده در بسیاری از پروژه‌های حال حاضر دنیا باشد؛ به هر حال علمی که از دیرباز خاستگاهشان دریافت و فهم پدیده‌های طبیعی و تحلیل آن‌ها بوده است این بار در سطحی دیگر برای به‌کارگیری همان قوانین نهادینه طبیعی باز به خود طبیعت روی آورده اند تا از راه‌حل‌های ازپیش‌بهبینه آن بهره یابند. در عین حال، طبیعت به عنوان منبع الهام و گنجینه پاسخ و زاینده جوشان راه‌حل همواره چندین قدم از دانش‌های بشری (خصوصاً دانش‌های تجربی<sup>۱</sup>) پیش بوده است، چه از یک سو، اصولاً این دانش‌ها زاده مشاهدات طبیعی اند؛ و از سوی دیگر، طبیعت به لحاظ داشتن فرصت کافی (میلیون‌ها و میلیارد‌ها سال؛ بسیار بیش از عمر بشر روی زمین)، برای به تکامل رساندن راه‌حل‌های ذاتی‌اش مجال کافی داشته است.

### چه برای فروش آورده‌ایم؟

در این پژوهش بسیار سعی شده، گستره فراخ دانش‌ها، فن‌ها، و فناوری‌های درگیر در زی‌روبوری در مقابل چشمان خواننده قرار گیرد و بسیاری از جاها تنها به اشارات مجمل و ارجاع دادن خواننده به مراجع مبسوط‌تر بسنده نموده‌ایم. به طور کلی تلاش بر این است، سازمانی در ذهن خواننده ترسیم گردد و تصویر بزرگی از آن چه زی‌روبوری می‌خوانندش ترسیم گردد.

در این مجموعه کوشیده‌ایم اقیانوسی باشیم به عمق اندک و کافی!

تصویری باشیم به بزرگی این دانش که گاه‌گذاری خواننده را در نگاهی موشکافانه، به گوشه‌ای از آن می‌بریم و باز بازمی‌گردانیم! بی آن که در تلاطم جزئیات اغلب بی‌دلیل (!) دچار فراموشی‌اش کنیم. تلاش نموده‌ایم آن‌چه دیگران نتوانسته‌اند جمعاً در هزاران صفحه موشکافانه بگویند، به پژوهش‌گر عمل‌گرا بگوییم. از این رهیاب، قصد داریم نسبت به نقایص موجود در پژوهش‌های موجود در ادبیات و در بین جمعی از پژوهشگران در عرصه آموزندگی، که گویی بایستی آرمان نوشتن باشد و به فراموشی سپرده شده، و به برداشت بیننده غالباً ریشه در برداشت کژتابانه از مفهوم مالکیت معنوی دارد، بازبیداری داده و الگویی در جهت درست ارائه نماییم. در یک کلام این پژوهش را با هدف آموزنده بودن<sup>۲</sup> نوشته‌ایم و بس.

<sup>۱</sup> به گفته اینشتین ، البته، دانشی نیست که پایه‌های تجربی نداشته باشد!

<sup>۲</sup> و نه فراموش گشتن!

## شمایی از نوشتار پیش رو

هر چند سعی کرده ایم نوشته تا حد خوبی پوشا بسیاری از زمینه های مورد بحث باشد، این نکته از ذهن دور نماند که پرداختن به چنین زمینه به ذات بین رشته ای<sup>I</sup> و حتی چندرشته ای<sup>II</sup> از عهده و حوصله این مقال خارج است. از این روست که مدتی در صدد نوشتن کتابی تحت همین عنوان برآمده ایم تا مگر به کار بست آن چاره کرد به خوبی (لااقل به از پیش) حق مطلب را ادا نماییم. ناگفته نماند تمام هممان در این نوشته نیز به فراخور ظرفیتش جز این نبوده است.

در بخش دوم مقدماتی از آن چه باور داریم برای آگاهی دادن به خواننده نسبت به منزل های گونه گون در جاده ای که در آن قدم نهاده (و نه به هیچ وجه تمامی پیش نیاز های طی آن) آورده ایم. کوتاه سخن؛ پیش آمادگی.

از این رهگذر، هم دانش ها و فناوری های مورد نیاز برای آن دسته از پژوهشگران عملگرا مطرح گردیده که تمایل به کنکاش در نیم دوم یعنی مهندسی (به خصوص رباتیک) زی روبر<sup>III</sup> و اجرای پروژه ها و تجربه های دست اندر کار<sup>IV</sup> دارند، و هم برای آن دسته از پژوهشگران نظری تر که متمایل به کاوش در نیم اول یعنی دانش زی الهام یافته<sup>V</sup> اند.

بخش سوم را به آنالیز انواع حرکت و شرایط آن در الهام گاه زین پسمان، طبیعت، از نگاه دانش ها و فناوری های بنیادین مطرح شده در بخش پیشین، اختصاص داده ایم.

سپس طبیعت را، همان گونه که در واقعیت نیز هست، پیوندگاه دانش های پیشین با فناوری های کاربردی پسین قرار داده ایم و مفهوم زی روبری را به فراخور نیاز شرح و بسط داده ایم. این جا همان پلی است که میان دو سوی داستان، یعنی دنیای طبیعت و دانش ها با مسأله و کاربردهای رباتیک و مهندسی برقرار ساخته ایم.

با فراهم آوردن بستر مناسب، حال در بخش پنجم، سری به دنیای رباتیک الهام یافته از حیات می زنیم و به فراخور مجال به تحلیل مسایل و بسط موضوع می پردازیم.

در نهایت، همانطور که هر سخنی را درآمدی است، نتیجه گیری های لازم را در قالب آینده های متصور برای فناوری های کلیدی و خط هادی مسیر رباتیک زی روبر ترسیم می نماییم.

بدیهی است این کوشش، چون هر ممنوع برخاسته از انسان خود، کم کاستی نیست...؛ پس خوانندگان را به حکم نگاه موشکافانه و نظراتشان پیرو آن، سپاسگزاریم.

---

<sup>I</sup> Interdisciplinary

<sup>II</sup> Multidisciplinary

<sup>III</sup> Biomimetic Engineering (Biomimetic Robotics)

<sup>IV</sup> Hands-On Experiences

<sup>V</sup> Bio-inspired Science



## بخش ۲. دانش‌ها و فناوری‌های کلیدی

دانش‌های مختلف پایه هوافضایی (ایرودینامیک، دینامیک سازه، ایروالاستیسیته، عملکرد، دینامیک پرواز و کنترل، راهبری و طراحی)، هوش مصنوعی، الکترونیک و مخابرات هوایی، مهندسی مواد پیشرفته، مهندسی نرم افزار و... در این حیطه مورد نیازند. اصولاً رویکردها در این مقال به کاربرد خلاقانه این دانش‌های بنیادین در خلق راه‌حل‌های نوآورانه می‌باشد. به عنوان نمونه در زمینه کنترل و تست پروتوتایپ ربات ساخته‌شده نیاز به طراحی و ساخت تستگاه<sup>I</sup> بهینه با کمترین میزان تداخل و بیشترین میزان ایمنی، و بیشینه دسترسی، سرعت و دقت در گرفتن داده‌های آزمایش از پارامترهای هدف و ثبت آن‌ها با کمترین هزینه است. در پژوهشی<sup>۱</sup> که اخیراً انجام داده و قصد ارسال آن به کنفرانس‌های بین‌المللی را داریم، کوشیده‌ایم با بررسی دینامیک پرواز ربات پرنده هدف به عنوان یک پلتفرم رایج رباتیک هوایی و هندسه مسأله و قیود حاکم، و استفاده از ترکیبی هندسی از تنها تعدادی نخ‌واره تستگاهی نوآورانه پیشنهاد دهیم که با کمترین هزینه و تداخل در پارامترهای اندازه‌گیری، بیشترین میزان امنیت در عین بیشترین دامنه تغییر آن پارامترها و پاسخگویی<sup>II</sup> بیشینه در انتقال سیگنال‌های حرکتی به حسگرها را در اختیار می‌گذارد. در آینده قصد داریم به گسترش ایده نخ‌واره‌های صرفاً نخ (بدون الاستیسیته) و تعریف نخ‌واره‌هایی با بروز الاستیسیته با ضرایب یانگ دلخواه در عبور از حدمرز<sup>III</sup>‌هایی بپردازیم که بدین وسیله پاسخگویی منفعل تستگاه در اعمال قیود را ذاتاً هوشمندتر نماییم. ایده دیگر می‌تواند پیشنهاد یک تست غیرمخرب ارتعاشی با وصل کردن دو سر تعدادی نخ‌واره به نقاطی از پیش تعیین شده از سامانه و تغییر فرکانس عامل‌های ارتعاش مانند محرکه‌ها شامل موتور و ... و یافتن روابط فرکانسی بین چندین دوتایی از کل سامانه پیچیده<sup>IV</sup> مان و تخمین رفتار آن با نوعی گسسته‌سازی یا حداقل درون یابی بین دوتایی‌ها برای پیش‌بینی رفتار بین دو نقطه دلخواه روی سامانه باشد.

یا در پژوهشی<sup>۲</sup> جدیدتر دست به بررسی روش‌شناسی طراحی و طراحی مسیر طراحی گونه‌ای رایج از ریزربات‌های پرنده زده‌ایم. کاری که پیش از این نسبت به آن مبادرت نشده بود.

در این مقال فرض بر آن نموده‌ایم که خواننده نسبت به دانش‌های پایه هوافضایی شناخت حداقلی دارد. و لذا به چند موضوع جدیدتر هوش مصنوعی، الکترونیک و مخابرات هوایی و مهندسی مواد پیشرفته که کمتر بدان توجه می‌شده، اشاراتی می‌نماییم.

### هوش مصنوعی<sup>۳</sup>

هوش مصنوعی به هوشی که یک ماشین از خود نشان می‌دهد و یا به دانشی در کامپیوتر که سعی در ایجاد آن دارد گفته شد و به طور خلاصه آن را "دانش شناخت و طراحی عامل‌های هوشمند" تعریف نموده‌اند. یک عامل هوشمند سامانه‌ای است که با شناخت محیط اطراف خود، شانس موفقیت خود را بالا می‌برد و از این رویکرد در سطح بالاتری "علوم شناختی" را نیز در کاربردهای خود درگیر می‌نماید. در واقع دانش‌های شناختی دربرگیرنده عناصر مختلفی از حیطه‌های ریاضیاتی تر شامل عصب-دانش<sup>V</sup> و هوش مصنوعی تا حیطه‌های علوم انسانی از جمله آموزش، زبان‌شناسی، مردم‌شناسی، روان‌شناسی، و فلسفه است. مار توفیف معروفی از سه سطح آنالیز در علوم شناختی داده است که عبارتند از نظریه محاسباتی، نمایش و الگوریتم و پیاده‌سازی سخت‌افزار. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سطوح مختلف آنالیز در دانش‌های شناختی آن را به مجموعه دانشی با طبیعت بین‌رشته‌ای تبدیل نموده که دانشمندان رشته‌های روان‌شناسی، عصب‌دانش، زبان‌شناسی، فلسفه ذهن، علوم کامپیوتر، مردم‌شناسی،

<sup>I</sup> Test Stand

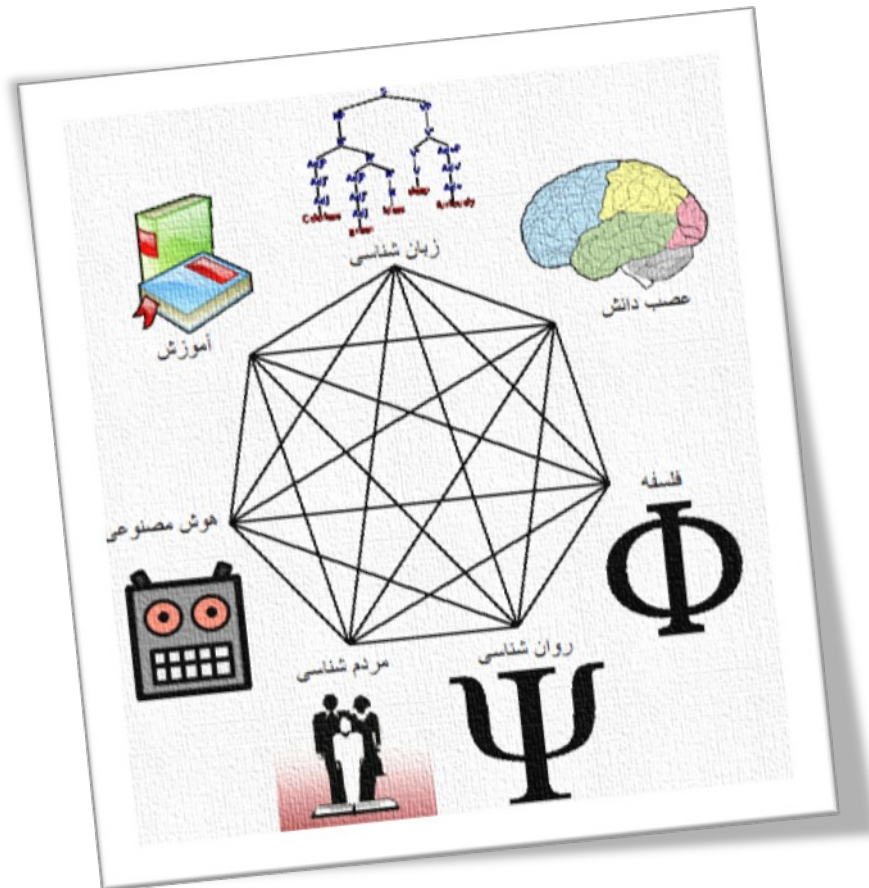
<sup>II</sup> Responsiveness

<sup>III</sup> Threshold

<sup>IV</sup> Complex System

<sup>V</sup> Neuroscience

جامعه‌شناسی و زیست‌شناسی به ارتقای آن کمک می‌نمایند. حیطة تمرکز آن البته بیشتر در زمینه‌های هوش مصنوعی، توجه، آگاهی نسبت به و پردازش زبان، یادگیری و توسعه و حافظه است که تحت روش‌های پژوهشی آزمایشات رفتاری، عکس‌برداری مغزی، مدل‌سازی رایانه‌ای، و روش‌های عصب‌زیست‌شناسانه، به بررسی‌شان پرداخته می‌شود.



شکل ۱ دانش‌های پایه‌ای و ارتباط دوبه‌دویشان که در زایش و شکل‌گیری دانش‌های شناختی نقش کلیدی داشته‌اند

جان مکارتی که واژه هوش مصنوعی را در سال ۱۹۵۶ استفاده نمود، آن را "دانش و مهندسی ساخت ماشین‌های هوشمند" تعریف کرده‌است. تحقیقات و جستجوهای انجام شده برای رسیدن به ساخت چنین ماشین‌هایی مرتبط با بسیاری از رشته‌های علمی دیگر می‌باشد، مانند علوم رایانه، روان‌شناسی، فلسفه، عصب‌شناسی، علوم ادراکی، تئوری کنترل، احتمالات، بهینه‌سازی و منطق.

### تعریف و طبیعت هوش مصنوعی

هنوز تعریف دقیقی که مورد قبول همه‌ی دانشمندان این علم باشد برای هوش مصنوعی ارایه نشده‌است، و این امر، به هیچ وجه مایه‌ی تعجب نیست. چرا که مقوله‌ی مادر و اساسی‌تر از آن، یعنی خود هوش در فلسفه ذهن هم هنوز بطور همه‌جانبه و فراگیر تن به تعریف نداده‌است. در واقع، می‌توان نسل‌هایی از دانشمندان را سراغ گرفت که تمام دوران زندگی خود را صرف مطالعه و تلاش در راه یافتن جوابی به این سؤال عمده نموده‌اند که: هوش چیست؟

اما اکثر تعریف‌هایی که در این زمینه ارایه شده‌اند بر پایه یکی از ۴ باور زیر قرار می‌گیرند:

۱. سیستم‌هایی که به طور منطقی فکر می‌کنند
۲. سیستم‌هایی که به طور منطقی عمل می‌کنند

۳. سیستم‌هایی که مانند انسان فکر می‌کنند

۴. سیستم‌هایی که مانند انسان عمل می‌کنند

شاید بتوان هوش مصنوعی را این گونه توصیف کرد: "هوش مصنوعی عبارت است از مطالعه این که چگونه کامپیوترها را می‌توان وادار به کارهایی کرد که در حال حاضر انسان‌ها آن‌ها را بهتر انجام می‌دهند."

## عامل هوشمند

در پژوهش پول و همکاران (۱۹۹۸)<sup>۴</sup> از واژه "هوش محاسباتی" به عنوان مترادفی برای "هوش مصنوعی" سود برده شده است و رویکردشان به مسأله هوش، رویکردی محاسباتی و قابل پیاده‌سازی با منطق ریاضی سخت‌افزارهای حاضر است. خواننده همچنین به مطالعه کار جدید این پژوهشگران که در سال ۲۰۱۰ توسط انتشارات دانشگاه کمبریج تحت عنوان "هوش مصنوعی: مبانی عامل‌های محاسباتی"<sup>۵</sup> ارجاع داده می‌شود. در این اثر، نگارندگان تلاش نموده‌اند تا ابتدا با تعریف عامل به طور کلی و سپس عامل‌های هوش مصنوعی، ساختار و کنترل سلسله مراتبی آن‌ها و سپس ارایه سطح آنالیز نمایش و استدلال استنتاجی<sup>۱</sup>، پس از آن تشریح یادگیری و برنامه‌ریزی، و نهایتاً استدلال پیرامون افراد و روابط یک سامانه آگاهی‌بنا<sup>۲</sup> و برنامه‌ریزی‌های رابطه‌ای<sup>۳</sup>، یادگیری و استدلالات احتمالی<sup>۴</sup> در بستر محاسباتی که فراهم نموده‌اند به ارایه تصویری بزرگ با ماهیت محاسباتی از مسأله هوش مصنوعی ارایه دهند.

## مسائل هوش مصنوعی

سرخط مسایلی که در هوش مصنوعی با آن سر و کار داریم عبارتند از؛

- استدلال کسر<sup>۷</sup>، استدلال<sup>VI</sup> و حل مسأله
- نمایش آگاهی
- برنامه‌ریزی
- پردازش زبان طبیعی
- یادگیری
- حرکت و دست‌کاری
- تشخیص<sup>VII</sup>
- هوش اجتماعی
- خلاقیت
- هوش جامع<sup>VIII</sup>

با رویکرد هوش محاسباتی، در توضیح برای این زمینه همین بس که عملاً نحوه تفکر ربات پرنده برای تصمیم‌گیری، کنترل و هدایت و ناوبری و کلیه اعمال خودکار و نیمه خودکار ربات پرنده باید طراحی، برنامه‌نویسی و پیاده‌سازی گردد و چه بسا هرچه می‌توانیم با الهام گرفتن از طبیعت که در موارد بیشماری راه حل‌های بهینه را در اختیار گزارده، هوش سطح بالاتری را در ربات

<sup>I</sup> Representing and Reasoning

<sup>II</sup> Knowledge-based System

<sup>III</sup> Relational Planning

<sup>IV</sup> Probabilistic Reasoning

<sup>V</sup> Deduction

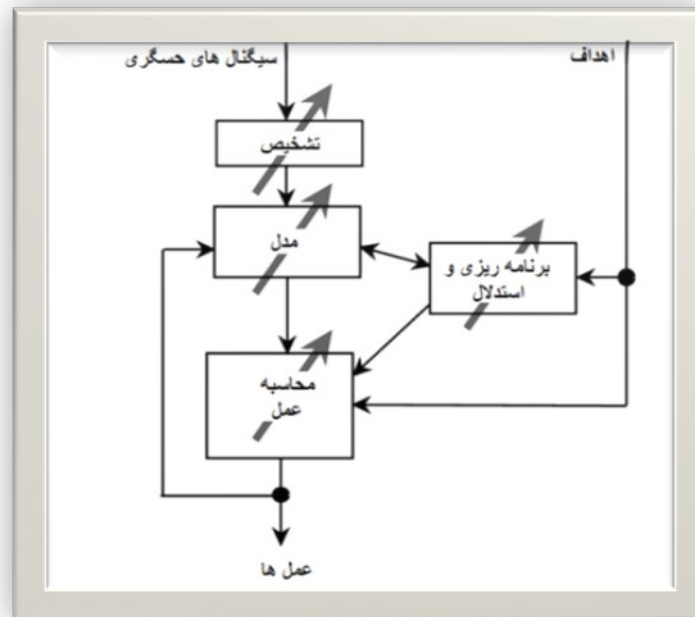
<sup>VI</sup> Reasoning

<sup>VII</sup> Perception

<sup>VIII</sup> General Intelligence

پرنده مان پیاده سازی نماییم. در این راستا با توجه به مسایل مربوط در این زمینه که در بالا مطرح شده طی چند سال گذشته در چند زمینه مطالعاتی را انجام داده ایم که در زمینه استنتاج و یادگیری و تشخیص نتایج پژوهش هایمان در قالب مقاله ای پژوهشی در کنفرانس بین المللی محاسبات نرم و سامانه های هوشمند IEEE سال ۲۰۰۸ در دانشگاه ناگویا ژاپن به چاپ رسیده است که خواننده را به خواندن آن پژوهش که در نوع خود مجموعه نوآوری هایی را در زمینه ترکیبی مدل های محاسباتی هوش مصنوعی و هوافضا ارایه می کند تشویق می نماییم.<sup>۶</sup>

به اختصار در این مقاله پژوهشی سعی بر آن بوده که ابتدا مساله خوشه بندی<sup>I</sup> که نوع خاصی از مساله جامع تر طبقه بندی<sup>II</sup> می باشد ابتدا با استفاده نوآورانه از روش جستجوی هارمونی<sup>III</sup> پاسخ بهینه یابد، در حالی که کل مساله خوشه بندی بنا به روش C-Means از رویکرد فازی مطرح شده و بررسی می گردد. الگوریتم پیشنهادی نهایتا برای یک دسته داده ساختگی و یک دسته داده مربوط به شاتل فضایی مورد ارزیابی قرار می گیرد که نسبت به رقبای پیشین خود هم در سرعت همگرایی و هم در جهانی بودن<sup>IV</sup> یافتن پاسخ بهینه و دقت آن مزیت چشمگیر دارد. در یک نگاه، موضوعات مطرح شده، در حیطه یادگیری ماشین قرار می گیرند که شماتیک فرایند آن در یک سامانه هوش مصنوعی مشابه زیر می باشد:



شکل ۲ شماتیک یک سامانه هوش مصنوعی نوعی<sup>۷</sup>

<sup>I</sup> Clustering  
<sup>II</sup> Classification  
<sup>III</sup> Harmony Search  
<sup>IV</sup> Globality

## الکترونیک و مخابرات هوافضایی

از سویی کاربرد روزافزون محصولات فناوری‌های ممز<sup>1</sup> و نمز<sup>2</sup> در زمینه‌های بسیاری از این دست، چه با رویکرد تولیدکننده این قطعات و چه با رویکرد کاربر آن‌ها در فناوری‌های مقصد، به صورت چشمگیری، شرایط موافق موفقیت بزرگ در آن عرصه می‌نماید. از سوی دیگر، از آن جایی که، به تجربه، ساخت ربات‌های پرنده (خصوصاً ریزپرنده‌ها) بنا به ضرورت فن آوری به سمت استفاده از قطعات الکترونیکی و مخابراتی هدایت شده، لذا طراحی و ساخت زیرسیستم‌های چنین پرنده‌هایی از منبع قدرت (باتری) و موتور و کنترل‌سرعت و سیگنال و سنسور ها و ... تا رادیوکنترل و میکروکنترلر و IMU و قطعات راهیابی جی پی اس و ... همگی با دانش الکترونیک و مخابرات عجین گشته است. لذا برای کسی که قصد ورود به زمینه‌های ساخت و پیاده سازی دارد، شناخت خوبی نسبت به این فناوری‌ها بیش از پیش یک باید محسوب می‌گردد.

به عنوان پیش نیاز می‌توان گفت شناخت حداقلی به تحلیل و طراحی مدار، الکترونیک، برنامه نویسی میکروکنترلر (حداقل یکی از مجموعه میکروکنترلرهای AVR Atmega32,64,128، 8051-8086، Xylinx FPGA و ... ) و ساختار داده و متدهای برنامه نویسی، و شناخت مناسب نسبت به خواص قطعات الکترونیکی و سنسور ها و ... نیاز است.

به عنوان نمونه، بخش‌هایی از یک کد AVR را که برای راه اندازی یک موتور Brushless DC توسط نرم‌افزار CodevisionAVR به زبان C نوشته ایم، در [پیوست 1](#) می‌آوریم. این کد قصد دارد دور چهار موتور براشلس کالیبره شده در یک ربات پرنده را به طور هوشمند با سیگنال‌های ارسالی اش به دور دلخواه رسانده و در آن دور حفظ نماید؛ در واقع به عنوان مغز تصمیم‌گیرنده ربات برای موتورهای محرکش عمل کند. بدیهی است در صورت نیاز به داشتن دورهای متفاوت خاص و محرکه‌های متفاوت بنا به مأموریت و مکانیزم موردنظر کد قابل اصلاح خواهد بود.

---

<sup>1</sup> MEMS (MicroElectroMechanical Systems)

<sup>2</sup> NEMS (NanoElectroMechanical Systems)

## مهندسی مواد پیشرفته

فناوری های کلیدی مهندسی مواد اعم از منابع ذخیره انرژی (که اهمیت حیاتی در چنین پروژه‌هایی دارند) چون باتری های لیتیم-یون<sup>۱</sup>، مواد ترکیبی<sup>۲</sup>، مواد هوشمند چون آلیاژهای حافظه‌دار<sup>۳</sup> و مواد پیزوالکتریک<sup>۴</sup> و مکانیزم‌های ماهیچه‌های مصنوعی<sup>۵</sup> (نقطه عطفی در فناوری‌های انرژی و محرکه‌های آینده) و ... همه و همه درهای جدیدی را به روی طراحان ربات‌های هوایی و رباتیک‌هوایی کاران گشوده اند و ساخت ربات های پرنده با تعریف ماموریت هایی که چند دهه پیش غیر ممکن می نمود، را ممکن ساخته است. به عنوان مثال با کمک فناوری نانوپودرها و روش های نوین ساخت و به کارگیری ترکیب های بدیع امروزه باتری لیتیم یون با فناوری برتر و با نسبت ظرفیت ذخیره سازی انرژی به وزن و حجم بسیار بالاتر از نسل های نیکل کادمیوم و یا سرب اسیدی قبلی، امکان ساخت پرنده هایی با ماموریت های طولانی تر و شعاع عملیاتی وسیعتر مهیا گشته است. نمونه دیگر تکنولوژی سلول های خورشیدی است که بیش از پیش در حال رشد و شکوفایی است و با امکان تمرکز و ذخیره سازی بیشتر انرژی خورشیدی امکان ساخت ربات های پرنده در اندازه های بسیار کوچکتر از نسلهای قبلی این فناوری همچون پروژه سابق هلیوس ناسا فراهم آمده است. در این راستا طی پژوهش های چند ساله گذشته، دست به تالیف دو مقاله پژوهشی در زمینه ی راهبردی باتری های لیتیم یون با فناوری بالا (نسبت ظرفیت ذخیره سازی به وزن و حجم بسیار بالا و تعداد سیکل های شارژ و دشارژ بالا) زدیم که برای چاپ به ژورنال های معتبر بین المللی ارسال شده است. به طور خلاصه در یکی<sup>۶</sup> تحلیلی جامع از خواص و فناوری های برتر نانوپودرها به بررسی عملکرد این باتری ها پرداخته ایم و در دیگری<sup>۷</sup> با استفاده از روش شبکه های عصبی به عنوان یکی دیگر از مدل‌های رایانه‌ای هوش مصنوعی برای پیش‌بینی رفتار پارامترها به پیش‌بینی برخی خواص اشاره شده در باتری ها با درصد مواد و ترکیب های نوین همت گماردیم.

---

<sup>۱</sup> Li-ion Batteries

<sup>۲</sup> Composites

<sup>۳</sup> Shape Memory Alloys(SMAs)

<sup>۴</sup> Piezo-electrics

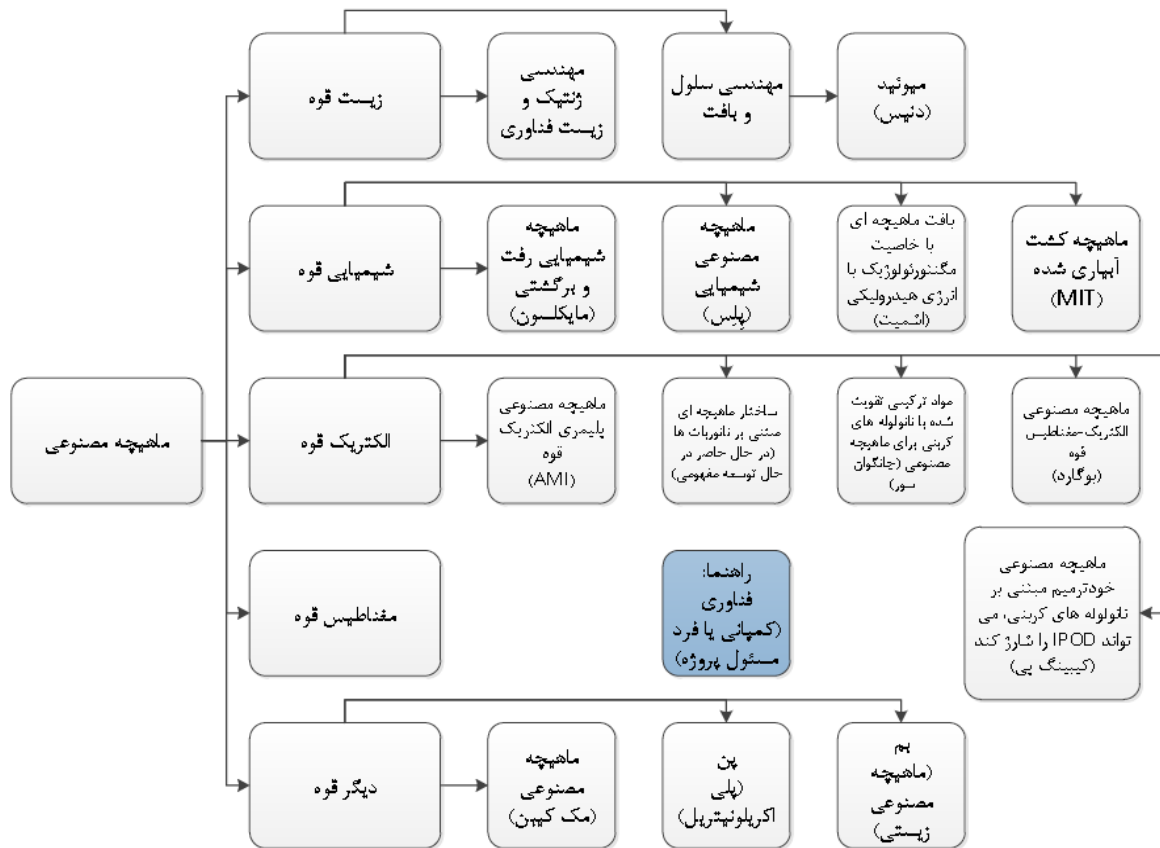
<sup>۵</sup> Artificial muscles

## فناوری‌های انرژی محرکه<sup>۱</sup>

فناوری‌های انرژی محرکه سطوح و انواع گونه‌گون دارد. از سطح تولید انرژی از منابع مختلف انرژی اعم از فسیلی، هسته‌ای، پیل-سوختی، خورشیدی، بادی، آبی، زمین‌گرمایی، زیست‌ماده، زیست‌گاز و ... بگیرید، تا فناوری‌های تبدیل انرژی از شکلی از آن به شکل دیگر (خصوصاً تبدیل اشکال مختلف به شکل انرژی جنبشی یعنی محرکه!) به همراه مبدل‌های اشکال مختلف حرکت تولید شده به یکدیگر (خصوصاً تبدیل رفت و برگشتی به دورانی و برعکس) و یا فناوری‌های ترکیبی یعنی آنچه به عنوان فناوری‌های نوی خلاصه و بهینه‌کننده سلسله مراحل تولید محرکه از منبع خام انرژی شناخته می‌شود (خصوصاً انواع از تولید به مصرف آن! یعنی فناوری‌هایی که انرژی را از شکل خام و پایه‌ای آن به انرژی جنبشی از شکل مطلوب با بازده بالا و بدون نیاز به تبدیل حرکت) مانند انواع فناوری‌های ماهیچه‌های مصنوعی که به طور خاص با توجه به الهام‌یافتگی‌شان از طبیعت و نوآوری بالایشان این‌جا مورد علاقه خواهند بود. در ذیل نتایج مطالعات مبسوط در این زمینه را به صورت دسته‌بندی انواع مختلفی از فناوری‌های ماهیچه مصنوعی توسعه یافته در گوشه‌کنار دنیا به تفکیک نوع منبع پایه انرژی و با ذکر کمپانی یا مسئول پروژه آورده و به همین بسنده می‌نماییم (در ضمن با توجه به گمان نامفهوم بودن نمودار در زبان فارسی نمونه اولیه تهیه‌شده به انگلیسی را در [پیوست ۲](#) ارایه می‌نماییم):

---

<sup>۱</sup> Energetics



شکل ۳ پایگاه داده فناوری های توسعه یافته در زمینه ماهیهه های مصنوعی؛ مواردی که نام کمپانی یا مسئول پروژه ذکر نشده، در حد ایده و پژوهش بوده، و از این رو، یا در سطح توسعه فن آوری کاری انجام نشده، یا ما نمی دانسته ایم! در هر حال، این جدول به مانند یک مرور ادبیات (و بازار فناوری) نسبتاً کامل در این زمینه می تواند عمل کند.

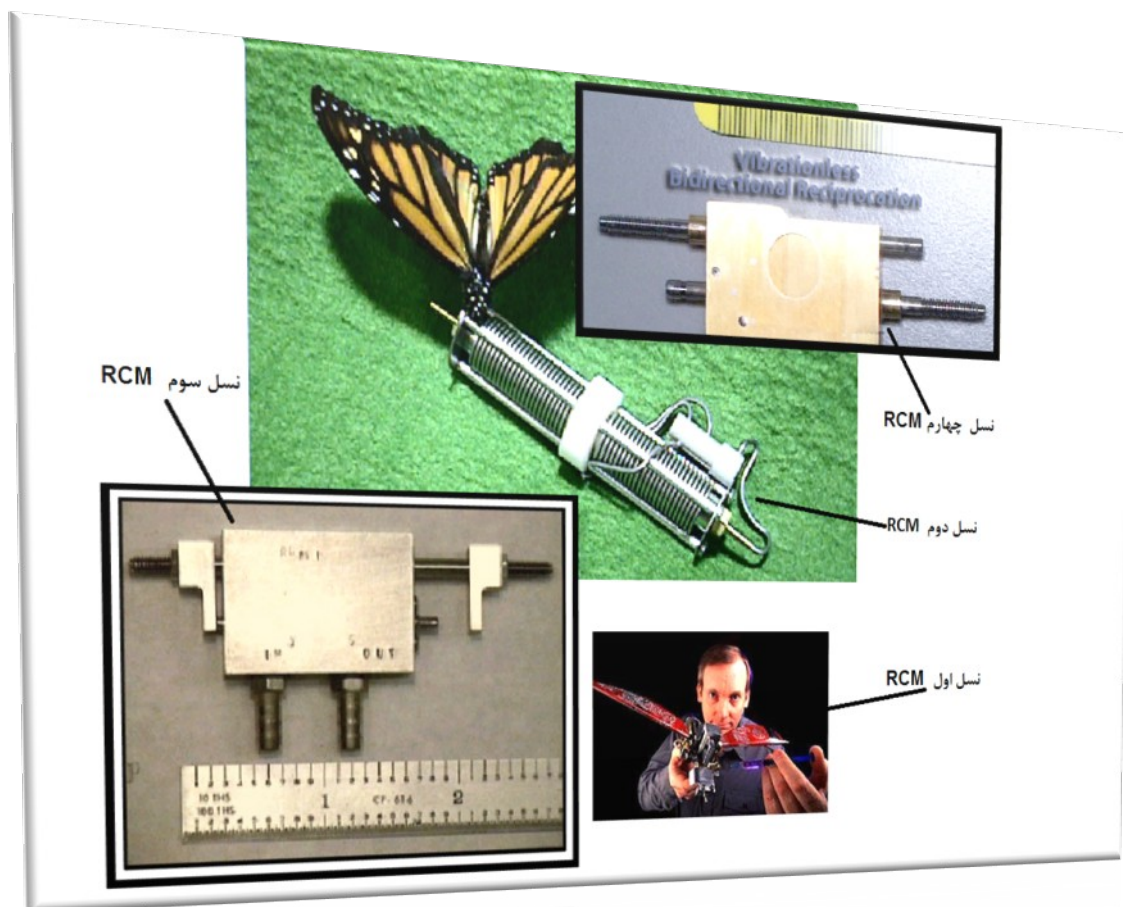
### ماهیهه شیمیایی رفت و برگشتی (RCM)

برخلاف آنچه گفتیم، به عنوان یکی از موفق ترین (با کسب جایزه برتر پیرلی از بین ۱۰۰۰ پروژه برتر سراسر دنیا) و بزرگ ترین پروژه ها از این بین، نمی توانیم از پروژه انتوموپتر<sup>۱</sup> مایکلسون و همکاران<sup>۱۱</sup> بگذریم (!) که در آن برای سامانه قدرت به جای موتورهای گردشی متعارف از پیکربندی نامتعارف و ایده نوآورانه ماهیهه شیمیایی رفت و برگشتی<sup>۱۱</sup> برای تولید حرکت رفت و برگشتی بال ها به طور مستقیم از محلول سوخت استفاده شده است. بدین صورت دیگر نیازی به یک بار ذخیره سازی انرژی در باتری (اتلاف انرژی)، یک بار تبدیل انرژی الکتریکی ذخیره شده به انرژی جنبشی مکانیکی از نوع دورانی موتور (بار دیگر اتلاف انرژی)، و یک بار هم تبدیل انرژی دورانی به حرکت رفت و برگشتی بال ها توسط یک سامانه مبدل (باز هم اتلاف انرژی) نیست و انرژی شیمیایی ذخیره شده در محلول سوخت با تزریق آن به مکانیزم طراحی شده RCM<sup>۱۱</sup>، به طور مستقیم و با کمترین اتلاف به انرژی جنبشی از نوع حرکت رفت و برگشتی بال ها تبدیل می گردد.

<sup>۱</sup> Entomopter

<sup>۱۱</sup> RCM=Reciprocating Chemical Muscle





شکل ۴ نسل‌های مختلف RCM توسعه داده شده تاکنون؛

همان گونه که مشاهده می شود بال های ربات نسل اول با خمیدن پوسته آلومینیومی کوکاکولا به شکل ایرفویل (!) تهیه شده بود، چرا که این نسل تنها هدفش اثبات امکان ایجاد حرکت بالزنش با استفاده از حرکت رفت و برگشتی RCM بود. فرکانس رفت و برگشت در نسل اول به ۱۰ هرتز می رسید و نیروی تولید شده چند پوند نیرو بود. اما برای امکان پرواز یک پرنده ۵۰ گرمی نیاز می بود که اندازه آن بسیار کوچک شده و درعین حال سرعت رفت و برگشت سه برابر گردد. نسل دوم بسیار کوچک تر و سبک تر بود و درعین حال می توانست چند پوند نیرو تولید کند. سرعت بیشینه آن هم نسبت به قبل دو برابر شده بود. RCM در حقیقت بیش از یک عملگر است. آن همچنین شامل اندازه گیری و ذخیره سوخت، اتاقک واکنش، مجموعه شیرآلات ریز، و یک سامانه کنترل است. نسل دوم بسیار اصلاح شد تا اینرسی عملگر و به تبع آن محدودیت های هنگام استارت و پرتاب اولیه هر فاز را کم کند. نسل سوم باز هم در اندازه کوچک شد و فناوری درگاه های داخلی را برای نمونه ۱ به ۱ عملگر که برای انتوموپتر ۵۰ گرمی استفاده می شد را در خود داشت. فرکانس رفت و برگشت به ۷۰ هرتز می رسید که دو برابر سرعت مورد نیاز برای بالزنش انتوموپتر بود. در نسل چهارم مکانیزم مکانیکی داخلی از نو طراحی گردید تا ارتعاشات حذف گردند. نسل سوم به خاطر تک شفت بودن دچار ارتعاشی ذاتی با فرکانس بالزنش بود. در نسل چهارم از دو شفت رفت و برگشت کننده استفاده شد که فازهای آن ها به طور

مکانیکی تنظیم می گردد تا عکس هم و برابر حرکت کنند و ارتعاش را خنثی نمایند. نسخه نهایی RCM 2.5 برابر کوچک تر از نسل چهارم است. ره‌ریز (رسانگر هوایی ریز)<sup>۱</sup> انتوموپتر مریخی نیاز به RCM بزرگتری دارد، در حالی که فرکانس بالزنش<sup>۲</sup> آن نصف نسخه زمینی آن است.

---

<sup>۱</sup> MAV (Micro Air Vehicle)

<sup>۲</sup> Flapping

## دانش‌های زیست‌شناسی

دانش‌های زیست‌شناسی به عنوان پژوهنده یک قطب از دو قطب مبحث زی‌روب‌ری یعنی مرجع و منبع الهامات که همانا زی، یعنی زیست و حیات و طبیعت باشد، بسیار کلیدی هستند. از این دسته به خصوص می‌توان به فیزیولوژی همسنجی<sup>I</sup>، آناتومی<sup>II</sup> جانوری، زیست‌انرژی، تکامل و زیست‌شناسی تکاملی<sup>III</sup>، عصب‌دانش زیستی<sup>IV</sup>، جانورشناسی<sup>V</sup>، و خصوصا فناوری‌هایی چون زیست‌فناوری<sup>VI</sup>، و ... اشاره نمود.

همان طور که خواهیم دید بسیاری از بررسی‌های زیستی در زمینه‌های مختلف طراحی، دینامیکی، سازه و سامانه‌های مختلف زیستی حین پیشبرد و تکمیل مطالب مربوط به تحلیل انواع پرواز (بسیاری از حرکات را در قالب تعریف پرواز می‌دانیم) مطرح خواهندگردید. در این بخش پیش تر سعی می‌کنیم مقدماتی بر آن چه به طور مشترک نسبت به غالب مطالب نیاز به التفات است، اشاره نماییم. لذا در حیطه این دانش‌ها کمی به محرکه‌های طبیعی یعنی ماهیچه‌ها و مبحث پیرو آن زیست‌انرژی در قالب دانش-های بالا می‌پردازیم؛ چراکه بحث بهینگی جابه‌جایی موضوعی است، که از این به بعد بیش از پیش بدان توجه خواهیم نمود و الهام خواهیم گرفت!

---

<sup>I</sup> Comparative Physiology

<sup>II</sup> Anatomy

<sup>III</sup> Evolution & Evolutionary Biology

<sup>IV</sup> Biological NeuroScience

<sup>V</sup> Zoology

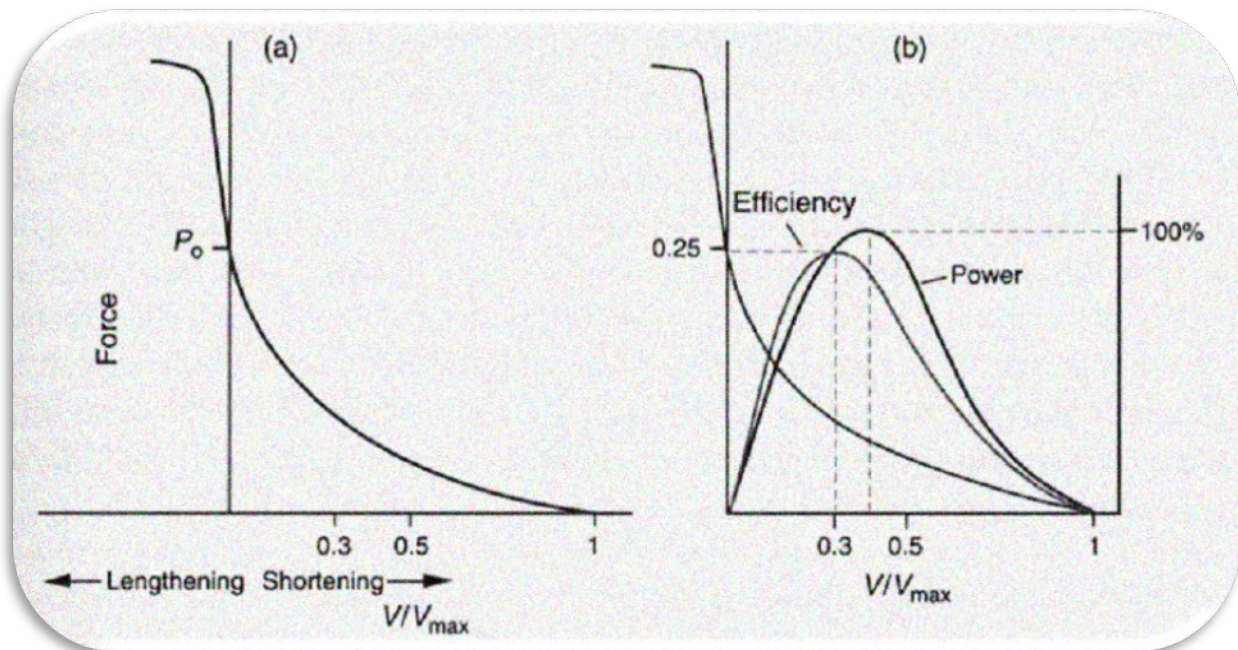
<sup>VI</sup> Biotechnology

## عملکرد ماهیچه

در زیر عملکرد ماهیچه به صورت تابعی از انقباض و انقباض آن به نمایش درآمده است.<sup>۱۲</sup> در نمودار  $a$  میزان نیروی ایجاد شده توسط یک بافت ماهیچه ای به صورت تابعی از کمیت بی بعد نسبت سرعت انقباض آن به سرعت بیشینه نمایش داده شده است. بدیهی است انقباض بافت ماهیچه ای هم به همین صورت ولی با علامت منفی و با تقسیم بر سرعت بیشینه بی بعد می گردد. در نمودار  $b$  هم کمیت های بازده مکانیکی و نسبت توان (توان مکانیکی تولید شده بیشینه در آن حالت به توان ایده ال؛ توان ایده ال =  $P_0 * V_{max}$ ) در کنار همان نمودار نیروی تولید شده به نمایش درآمده اند. پر روشن است که میزان نیروی تولید شده با افزایش اندازه سرعت انقباض کاهش می یابد. در مورد بازده و نسبت توان نمودار زنگوله ای آن ها نشان می دهد که ابتدا افزایش این کمیت ها را تا حد بیشینه ای داشته و سپس با کاهش آن ها تا صفر در سرعت بیشینه مواجه خواهیم بود. وجود این سرعت بیشینه هم به لحاظ فیزیولوژی قابل شهود است و تفاوت آن را به عنوان مثال در ماهیچه پای قورباغه و لاک پشت به وضوح می توان مشاهده کرد. نکته قابل توجه دیگر تاخیر اندک حد بیشینه توان تولیدی بافت ماهیچه ای در مقایسه با بازده آن است که بحث انتخاب ساختار های ماهیچه ای برای ماموریت های مختلف برای رسیدن به توان بیشینه با توان مصرفی کمینه و همچنان داشتن توان مصرفی حداکثر را پیش می کشد. بدیهی است برای رسیدن به این نقطه (چنانچه قید سرعت و نیرو نداشته باشیم) باید در بین دو نقطه بیشینه دو نمودار بازده و نسبت توان یعنی نوار مشخص شده با دو خط نقطه چین یک نقطه را انتخاب کنیم. به طور کلی هر چه توان مورد نیاز مانور دلخواه بیشتر باشد، انتخاب به سمت راست نوار متمایل می شود. بدیهی است اگر توان مورد نیاز مانور دلخواه از توان بیشینه بافت ماهیچه ای انتخابی بیشتر باشد، انتخاب بافت ماهیچه ای به اشتباه انجام شده و نیاز به بازگشت و اصلاح در قسمت انتخاب بافت ماهیچه ای از چرخه طراحی مان داریم. از طرفی هر چه ماهیچه انتخابی بیشینه توان تولیدی بیشتری داشته باشد (بسیار بیشتر از توان مورد نیاز) در نمودار به سمت چپ در نوار اشاره شده حرکت می کنیم. به وضوح یافتن یا کشت بافت ماهیچه ای که توان بیشینه مانور آن برابر توان بازده بیشینه (توان در نقطه بیشینه بازده) یعنی نسبت سرعت تقریباً به طور متوسط  $0.3$  باشد، مناسب ترین انتخاب برای طراحی مان است. باز هم واضح است که انتخاب ماهیچه ای با توان بازده بیشینه بیش از توان مورد نیاز مانور عملاً (به دلیل عدم کارکرد در شرایط بهینه) افت بازده را به همراه داشته و هر چند عملگر<sup>I</sup> مورد انتخاب توان عملیاتی بالاتری از توان مورد نیاز ماموریت دارد اما به اصطلاح عامیانه آفتابه خرج لحیم کرده ایم.<sup>II</sup> اگر قید سرعت کمینه مانور مثلاً برای ایجاد حرکت نوسانی بال زدن با فرکانس و دامنه دلخواه داشته باشیم، با اعمال محدودیت خط چین سوم از چپ، نوار را محدود تر می کنیم. بدیهی است اگر سرعت کمینه کمتر از سرعت بازده بیشینه باشد در تصمیم گیری ما اثری نداشته چنانچه بیشتر از سرعت توان بیشینه باشد اگر توان سرعت کمینه همچنان بیشتر از توان مورد نیاز مانور باشد بلافاصله همان نقطه یعنی سرعت کمینه را به عنوان نقطه طراحی انتخاب می کنیم. در صورت کمتر بودن توان سرعت کمینه از توان مورد نیاز در این حالت نیاز به بازگشت و تجدید نظر در ماهیچه انتخابی است.

<sup>I</sup> Actuator

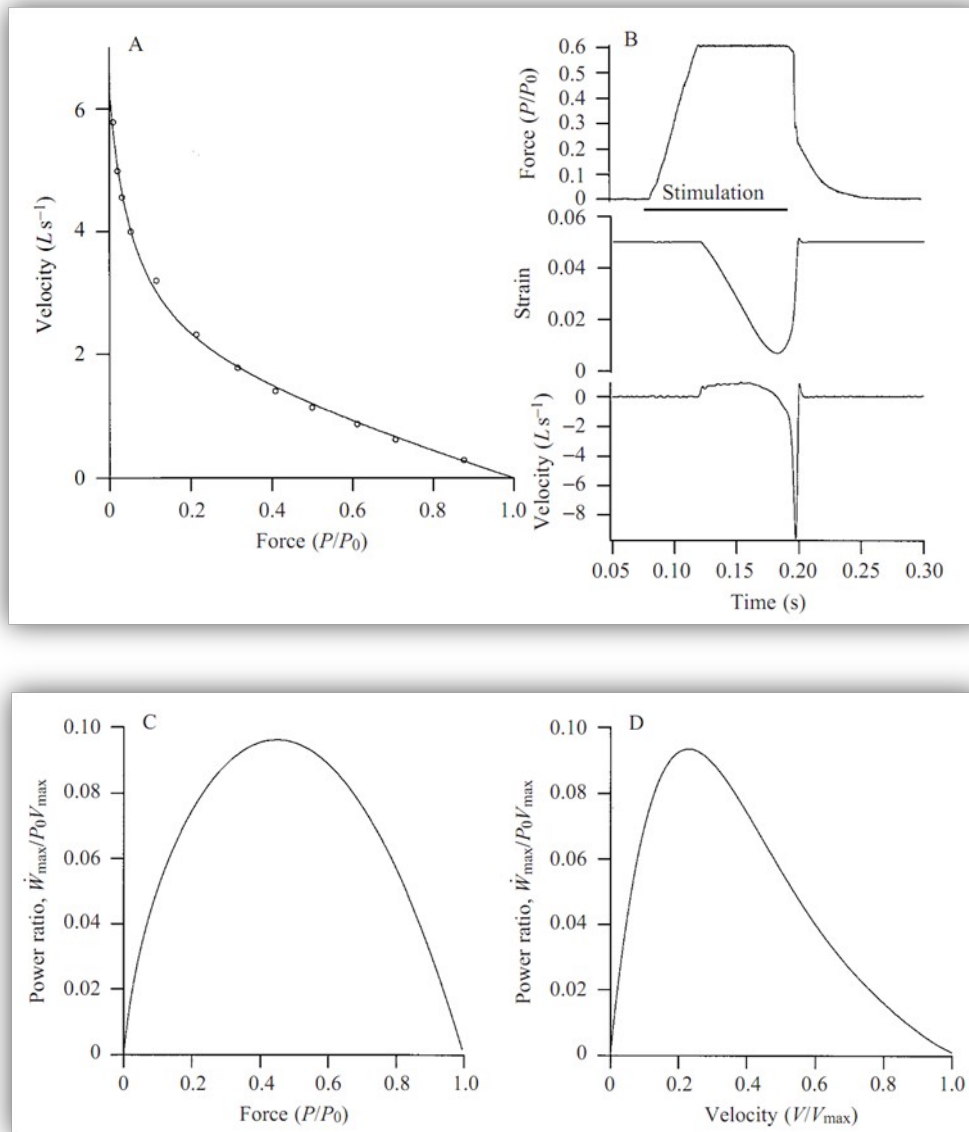
<sup>II</sup> به تعبیر فنی طراحی Overkill نموده ایم.



شکل ۵ پارامترهای عملکردی ماهیچه شامل (a) نیرو و (b) نیرو و توان و بازده به صورت تابعی از سرعت انقباض و انقباض آن

چنانچه قید نیروی کمینه در کار باشد نیز با اعمال قید خط چین چهارمی این باز نوار را از راست محدودتر می کنیم. بدیهی است چنانچه سرعت نیروی کمینه از سرعت توان بیشینه بیشتر باشد در تصمیم گیری سابق ما تاثیری ندارد و در صورتی که از سرعت کمینه مانور کمتر باشد نیاز به بازگشت و اصلاح در انتخاب ماهیچه است. چنانچه فقط قید نیروی بیشینه داشته وقید سرعت کمینه نداشته باشیم، برای ماهیچه های با تاخیر توان بیشینه نسبت به بازده بیشینه، نیاز به بازگشت و اصلاح ماهیچه است. بدیهی است تمامی فرایندهای بالا برای تصمیم گیری به طور آینه ای تغییر می یابند چنانچه بافت ماهیچه ای انتخابی تاخیر بازده بیشینه نسبت به توان بیشینه داشته باشد. به عنوان مثال، در همین حالت آخری، در مورد ماهیچه های با تاخیر بازده بیشینه نسبت به توان بیشینه به توان متناظر نیروی کمینه نگاه می کنیم. اگر این توان همچنان بیش از توان مورد نیاز مانور باشد، سرعت متناظر نیروی کمینه را به عنوان نقطه طراحی انتخاب می کنیم. در غیر اینصورت به اصلاح ماهیچه باز می گردیم.

در شکل ۶ چند نمودار مشابه برای یک نمونه واقعی از ماهیچه تاندونی ساق پای یک موش آورده شده است.<sup>۱۳</sup> داده های نمایش داده شده، مربوط به ماهیچه ای با وزن 4.3mg با طول فیبر 8.7mm و سرعت کوتاه شدگی بیشینه 6.28Ls-1 که در آن L طول ماهیچه است، و تنش ایزومتریک اوج P0 برابر با 271kNm-2 می باشد. نیرو به صورت نسبت به تنش ایزومتریک بیشینه (در سرعت صفر) اعلام شده است.



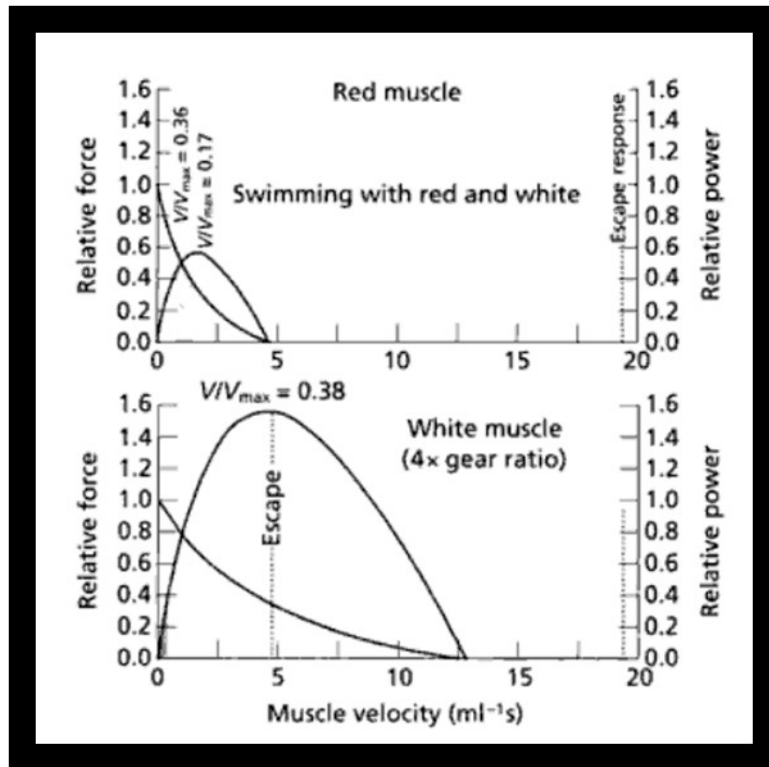
شکل ۶

(A) نمودار رابطه هم‌نوی نیروی بی بعد با سرعت بدست آمده با استفاده از انقباض های کوتاه کننده بافت بارگذاری شده؛ یک معادله هذلولوی-خطی به داده ها درون یابی شده است. (مارش و بنت ۱۹۸۶)<sup>۱۴</sup>

(B) داده های ضبط شده از نیرو، کرنش، سرعت مربوط به یک کوتاه شدگی ماهیچه ای در حین یک انقباض هم‌نوا. وقتی نیرو با گیره مقید شده باشد، ماهیچه در کوتاه ترین حالت خود قرار دارد که امکان تعیین سرعت کوتاه شدگی اوج را با تقسیم کرنش به زمان می دهد.

(C, D) توان اوج نمایش داده شده به صورت نسبت توان که در آن  $\dot{W}_{max}$  توان خروجی بیشینه هم‌نوا بوده، و نظیر نیروی (C)  $0.45P_0$  و سرعت  $0.23V_{max}$  (D) است.

به عنوان نمونه دیگر نمودارهای مربوط به ماهیچه های قرمز و سفید ماهی کارپ شناگر که منحنی های طول سارکومیر(یک مشخصه ساختار ماهیچه ای موثر در رفتار مشابه ماهیچه ای) مطابق با ماهیچه های پای قورباغه دارد را در پایین می آوریم که هم گونه ای از ماهی (کارپ شناگر) و هم گونه ای از دوزیستان (قورباغه) را نیز مورد بررسی قرار دهیم.

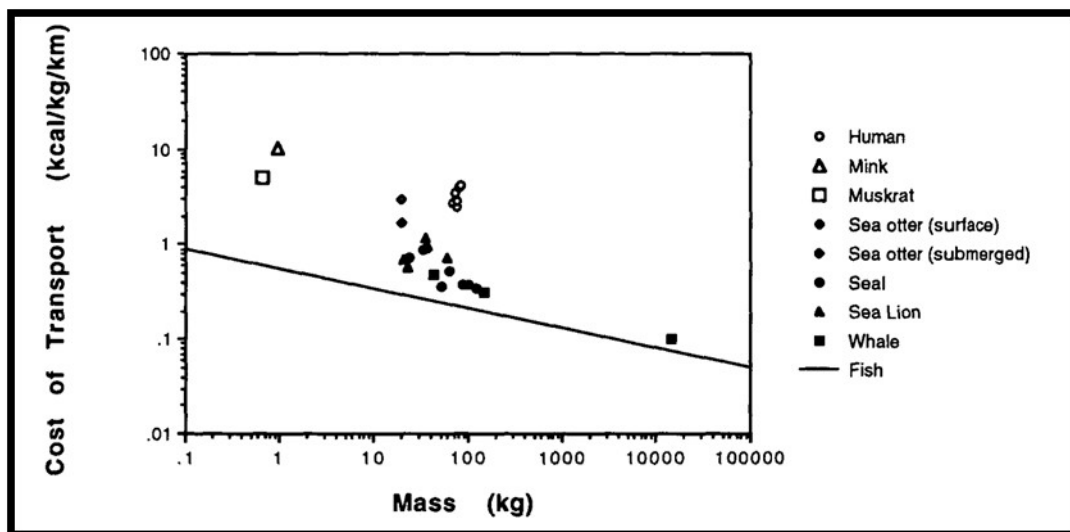


شکل ۷ نمودارهای مربوط به ماهیچه های قرمز و سفید ماهی کارپ شناگر

نمودارهای نسبت نیرو بر حسب سرعت برای ماهیچه های قرمز و سفید ماهی کارپ باز هم هذلولوی-خطی بوده و نمودارهای نسبت توان بر حسب سرعت هم مشابه زنگوله ای می باشند. توضیح این که در طول شنای پایدار تنها ماهیچه های قرمز فعالند حال آن که در پاسخ فرار ماهیچه های سفید نیز فعال می گردند. این در حالی است که ماهیچه های سفید با قرار گرفتن در ناحیه پشت ماهی (و با داشتن نسبت دنده یا نسبت اثر ۴ برابر) وارد عمل شده از تغییر طول (طول سارکومیر) بیش از حد ماهیچه های قرمز جلوگیری می کنند و در عین حال نیروی تولید شده را نیز حداکثر نگه می دارند. در شنای پایا ماهیچه قرمز با سرعتی برابر ۰.۷ تا ۱.۵ ML/S یا نسبت سرعتی برابر ۰.۱۷ تا ۰.۳۸ که در این بازه بازده و توان بیشینه تولید می شود، منقبض می گردد. ماهیچه های قرمز توانایی تولید تمام لازم برام انجام مانور فرار را ندارند چرا که بایستی برای این کار با سرعت تقریبا ۱۳ برابر سابق یعنی ۲۰ ML/S یا نسبت سرعت ۵.۱ منقبض شوند که این تقریبا ۴ برابر سرعت بیشینه آن ها است. لذا این مانور از عهده آن ها به تنهایی خارج است. این کار برای ماهیچه های سفید با نسبت دنده ۴ برابر نیاز به سرعت ۱/۴ برابر دارد که نسبت سرعت آن با توجه به سرعت بیشینه آن ها ۰.۳۸ خواهد بود که طبق نمودار بیشینه توان خروجی هم در همین نقطه تولید می گردد. بر عکس در شنای پایا ماهیچه های سفید، از آن جا که مجبورند در بازه نسبت سرعت ۰.۰۱ تا ۰.۰۳ منقبض شوند، به شدت کم توان و کم بازده هستند.<sup>۱۵</sup>

در نهایت به عنوان اشاره ای کوچک و نمایش میزان تأثیرگذاری آن چه مطرح شد، نموداری<sup>۱۶</sup> از هزینه جابه جایی تعدادی از گونه های مختلف زمینی و دریایی جانوران را در شکل ۸ آورده ایم. پر واضح است که ساختارهای مختلف ماهیچه ای تابع وزن و مکانیزم-

های جابه‌جایی که آن هم به طبع تابع مأموریت از دیدگاه طراحی می‌باشد، تأثیر به‌سزایی در مصرف انرژی حین جابه‌جایی<sup>۱</sup> دارد. در آینده روی مفهوم هزینه جابه‌جایی و عوامل مؤثر بر آن در گونه‌های مختلف جانوران بحث خواهیم نمود. قابل توجه است که در این جامعه‌وال دریایی کمترین هزینه ویژه جابه‌جایی را داشته و انسان‌ها پس از سمورها و موش‌های ابی (کرموش) پرهزینه‌ترین آن‌ها هستند.



شکل ۸ هزینه ویژه (بر واحد جرم) جابه‌جایی گونه‌های مختلف جانوران زمینی و دریایی تابعی از جرم آن‌ها

<sup>۱</sup> Transport

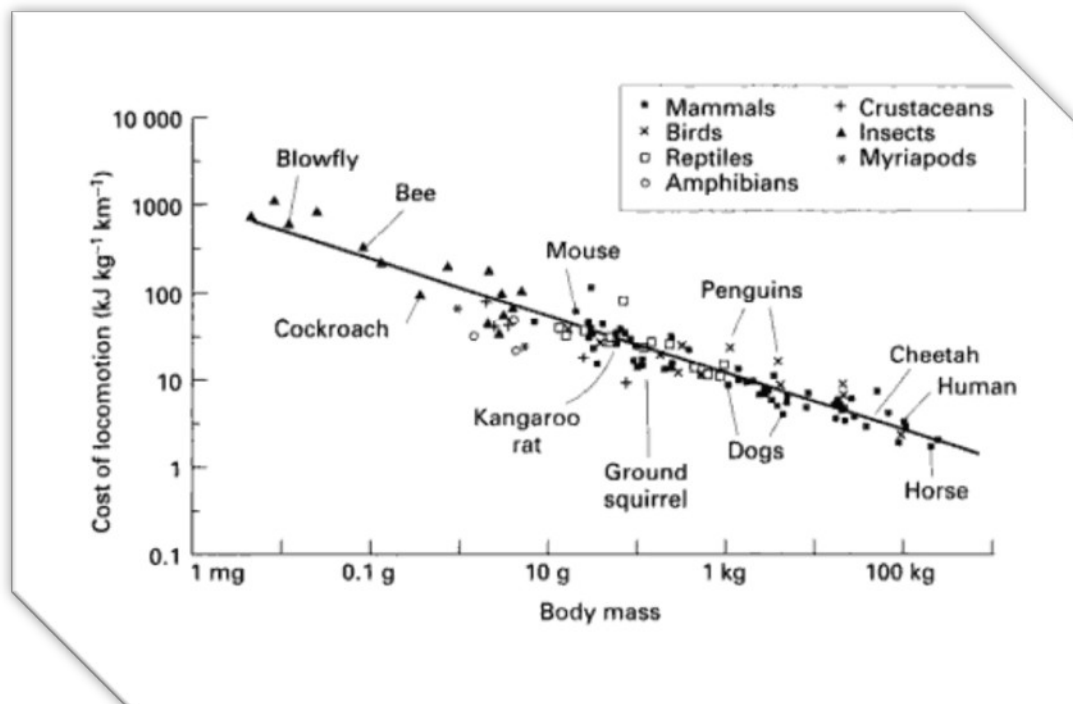


### بخش ۳. طبیعت و انواع حرکت<sup>۱۷</sup>

برای حرکت به مفهوم کلی آن و با در نظر گرفتن فضای رخ دادن و الگوی رخ دادن چهار دسته می توان در نظر گرفت که عبارتند از؛

- پرواز (سیالی)
- زمینی
- زیرسطحی
- آویزان

با توجه به اهمیت بحث انرژی حرکت، هزینه جابه جایی ویژه در حالت دویدن (یا معادل دویدن!) برای انواع خانواده های جانوران (پستانداران، پرندگان، خزندگان، دوزیستان، سخت پوستان، حشرات، هزارپایان) مختلف روی یک نمودار دویل لگاریتمی را در شکل ۹ آورده ایم تا به بسط بیش تر این موضوع پردازیم.



شکل ۹ هزینه جابه جایی ویژه در حالت دویدن برای انواع خانواده های جانوران (پستانداران، پرندگان، خزندگان، دوزیستان، سخت پوستان، حشرات، هزارپایان)<sup>۱۸</sup>

هر چند هزینه جابه جایی با افزایش جرم افزایش می یابد، جانوران کوچکتر مستقل از خانواده آن ها در بین جانوران یا تعداد پاهایشان، برای انتقال یک واحد جرم بدنشان به مسافت داده شده هزینه بیشتری متحمل می شوند. تفاوت بین خانواده های مختلف جانوران در شیب خطشان اندک است.

<sup>۱</sup> Locomotion

اما در بین روش های جابه جایی شناکردن کم هزینه ترین، سپس پرواز کردن و نهایتاً راه رفتن و دویدن می باشند. برای اثبات این مدعا، بلافاصله نمونه‌ی دیگری را از نمودار هزینه ویژه جابه‌جایی کمینه را تابع وزن موجود متحرک این بار به تفکیک گونه‌های مختلف حرکتی راه رفتن و دویدن، پرواز کردن، شناکردن، وسایل نقلیه ماشینی، انسان به کمک دستگاه‌های مصنوعی، و شناکردن روی سطح آب در شکل ۱۰ به تصویر می کشیم.<sup>۱۹</sup>

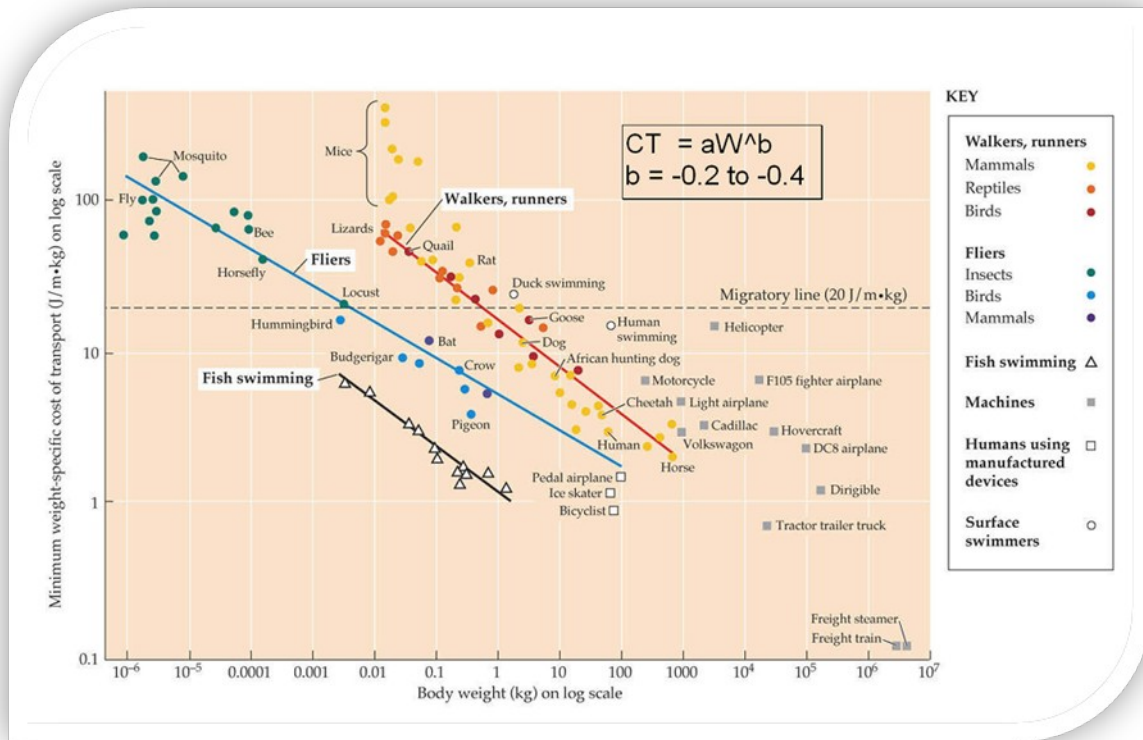
از آن جایی که درصدی که جرم ماهیچه از جرم کل بدن این جانداران را تشکیل می‌دهد متفاوت است، چه بسا نرمالایز کردن داده ها نسبت به جرم ماهیچه (به جای جرم کل) می توانست جالب تر باشد. در عین حال نکته جالب دیگر این است که شناکردن برای پستانداران و پرندگان به خصوص در سطح آب هزینه بردار است.

## پرواز (حرکت سیالی)

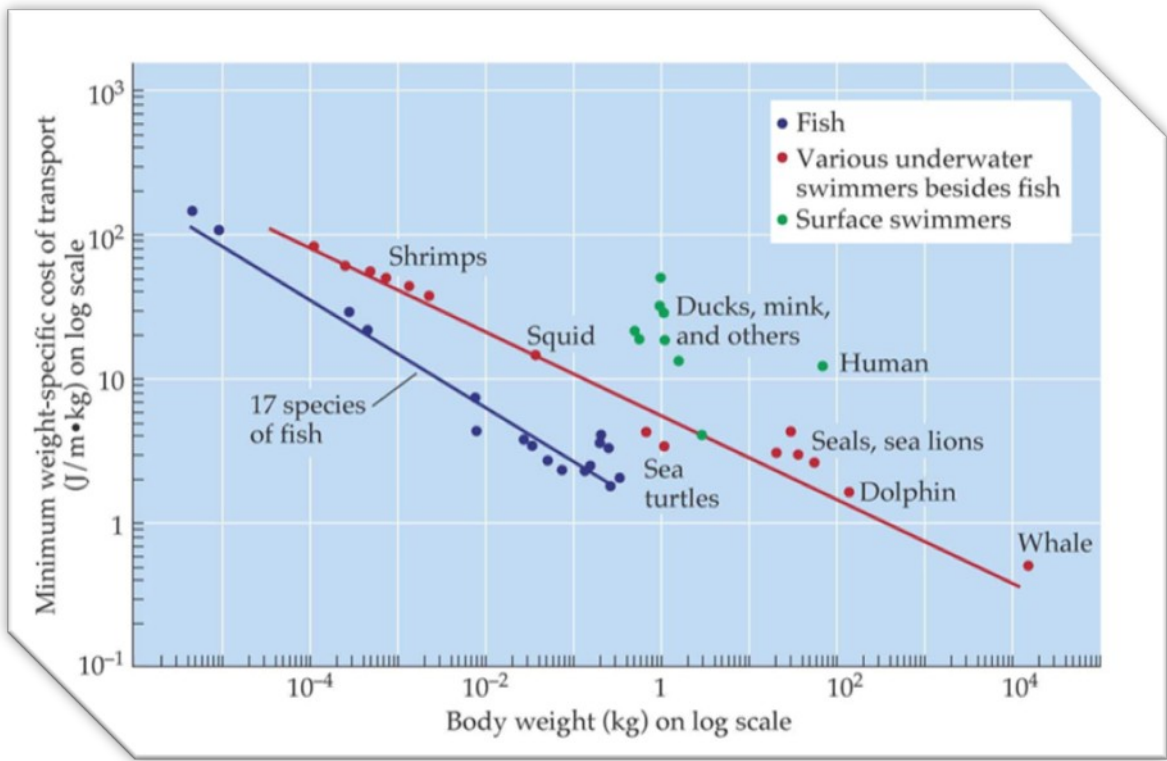
۱. پرواز آبی
۲. پرواز پرندگان
۳. پرواز حشرات
۴. و ۵. پروازهای با ماهیت ترکیبی و انواع دیگر پرواز

## پرواز آبی

شناگران به عنوان کم‌هزینه‌ترین متحرکان کره آبی، گونه‌های بسیار دارند. برای بررسی شناکردن این دسته بسیار متنوع در زمین، نمودار هزینه ویژه جابه‌جایی کمینه را تابع وزن موجود شناگر به تفکیک گونه‌های مختلف کلی در شکل ۱۱ آورده‌ایم. در بین شناگران هم نمودار به همان سبک تهیه گردیده و مشابه نمودار شکل ۱۰ بسیار گویاست.



شکل ۱۰ هزینه جابه جایی ویژه کمینه برای گونه‌های رایج حرکتی (راه رفتن و دویدن، پرواز کردن، شنا کردن، وسایل نقلیه ماشینی، انسان به کمک دستگاه‌های مصنوعی، و شنا کردن روی سطح آب)



شکل ۱۱ هزینه جابه جایی ویژه کمینه به تفکیک گونه‌های مختلف شناگران آبی (ماهی‌ها، غیرماهی‌ها، شناگران روآبی یا سطحی)



شکل ۱۲ تصویر یک پرنده ماهی که قادر است بیش از ۱۰۰ متر هواسرش کند. (عکس از پیتر پارکس از *Animals Animals-Earth Scenes*)



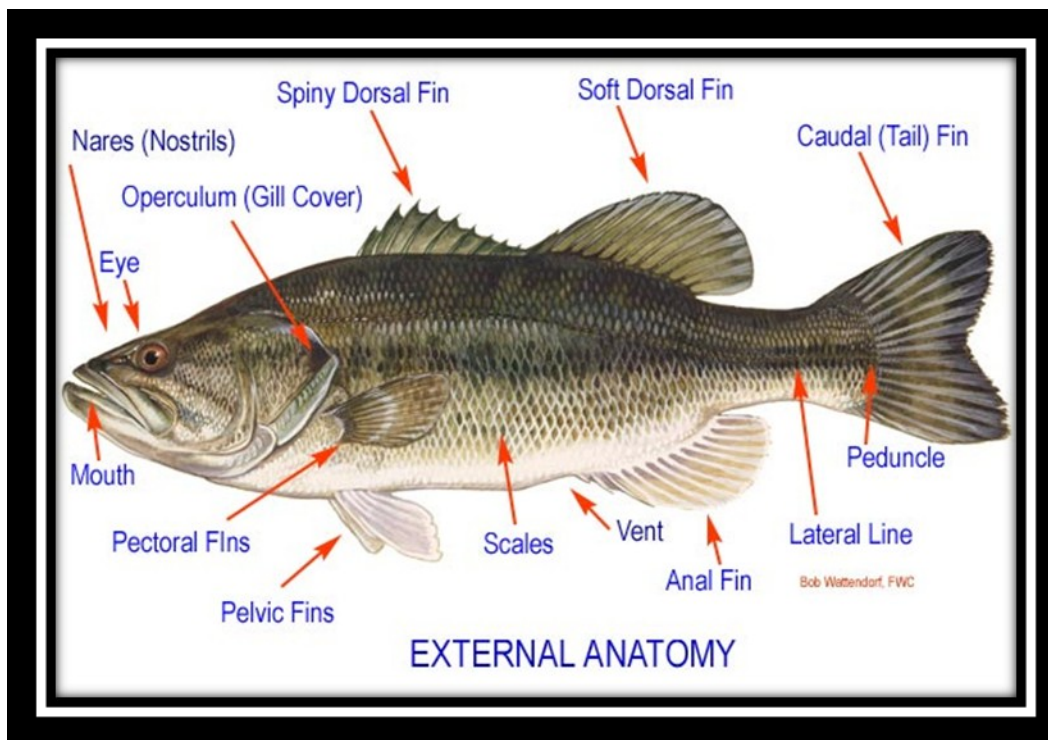
شکل ۱۳ تصویر یک کوسه که متخصصین تکامل ادعا می کنند نسل مادر خانواده ماهی ری (Ray Fish) طی تکامل بوده است که بنا به ۱. فشار زیاد آب در آن اعماق اقیانوس ۲. عدم زاویه دید کوسه نسبت به زیر شکمش و تلاش برای دیدن آن زیر (!) هنگام شکار ماهی های کوچک تر طی قرون تکامل یافته و به شکل صاف و پهن تر کنونی این خانواده رسیده است. (عکس از National Geographic)



شکل ۱۴ چند نمونه از بهینه ترین متحرکان زمین، یعنی شناگران، که به ترتیب شکل ایرویدینامیک سطوحشان، هماهنگی دسته جمعی حیرت انگیزشان، و حفظ بهینگی در عین تنوع اندازه کم نظیرشان را به رخ می کشد.

برای شروع ابتداء، سری به بررسی آناتومی ماهی‌ها با تقریباً ۲۱۰۰۰ گونه<sup>I</sup> به نمایندگی از شناگران زده و سپس بررسی تکامل زیست‌شناسی گونه‌های مختلف شناکردن را از سر می‌گیریم.

## آناتومی



شکل ۱۵ تصویر آناتومی اجزای خارجی بدن یک ماهی نوعی

## مسیر تکامل

تحلیل‌های هیدرودینامیک تجربی از عملکرد باله در کوسه‌ها<sup>II</sup> و داده‌های لازم برای بررسی قیاسی روی عملکرد باله‌ها در چهار خانواده نسل بعدی آن‌ها با باله‌های شبکه‌ای پره‌دار<sup>III</sup> در شکل ۱۶ نمایش داده شده‌اند. به طور کلی در نسل‌های ابتدایی دم دو شعبه با شعبه بالایی بزرگ‌تر داریم که ستون بدنه در امتداد شعبه بالایی ادامه یافته است.<sup>IV</sup> مانند کوسه‌ها و سگ‌ماهی یا ماهی‌خاویار) این در حالی است که در نسل‌های مشتق شده بعدی باله‌های دمی از خارج شکل متقارن‌تری دارند<sup>V</sup> اکثر خانواده‌های بنیادی در درخت تکامل (که نسل‌های دیگر از آن‌ها مشتق می‌شوند) یک باله پشتی هم دارند که همراه پره‌های شبکه‌ای نرمی است.<sup>VI</sup> در حالی که نسل‌های بعدی نوعاً صاحب باله پشتی با بخش استخوانی جلویی و بخش نرم شبکه‌ای پشتی هستند.<sup>VII</sup> ۲۰

<sup>I</sup> شایان ذکر است خزندگان با حدود ۶۸۰۰ گونه و دوزیستان با تقریباً ۴۳۵۰ گونه بخش‌های دیگری از این جامعه شناگران را تشکیل می‌دهند.

<sup>II</sup> Chondrichthyes

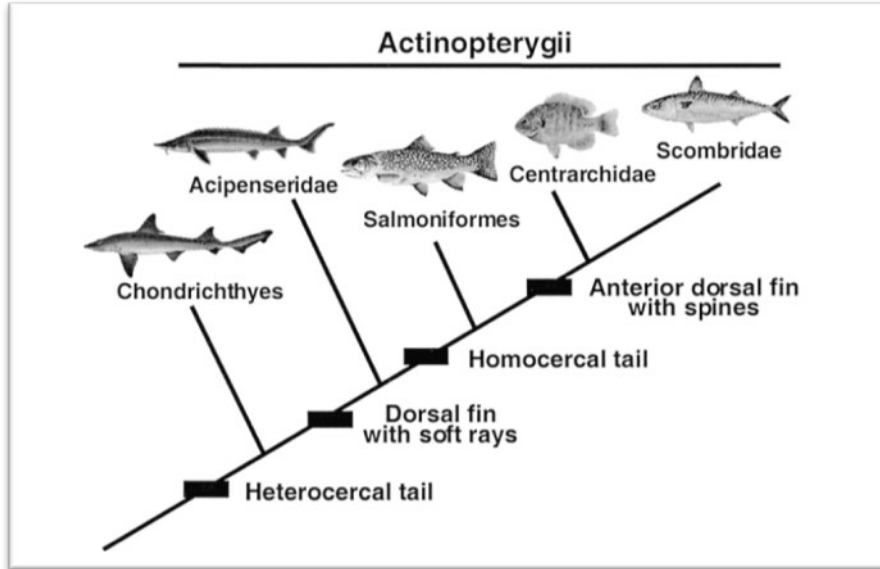
<sup>III</sup> Actinopterygii

<sup>IV</sup> heterocercal

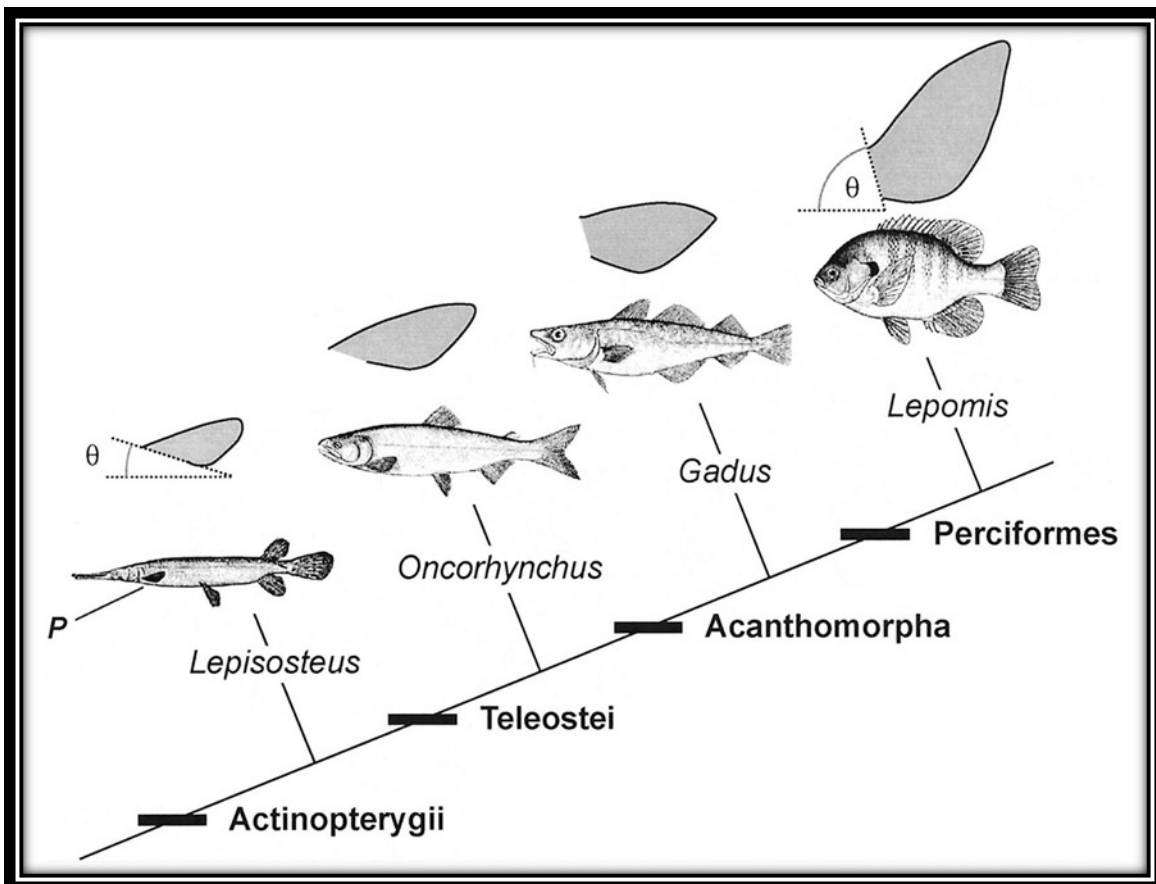
<sup>V</sup> homocercal

<sup>VI</sup> مانند Sturgeon, Acipenseridae, and Trout, Salmoniformes

<sup>VII</sup> مانند Bluegill, Centrarchidae, and Mackerel, Scombridae



شکل ۱۶ توالی مسیر تکامل ساده شده از روابط ۵ خانواده از ماهی ها در تحلیل عملکرد باله ها

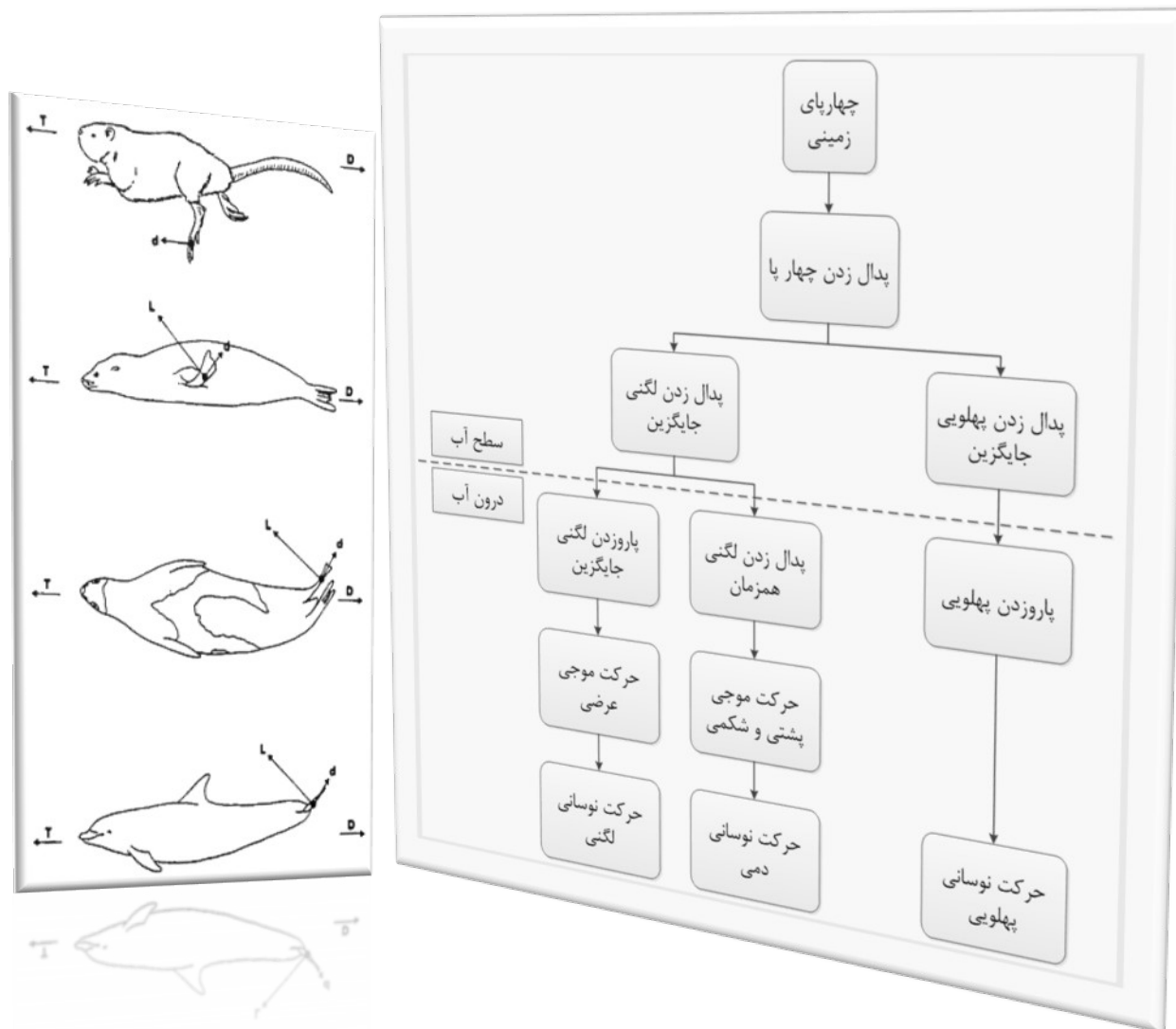


شکل ۱۷ توالی مسیر تکامل ساده شده از روابط نسل های منتخب ماهی های با باله های پره دار برای نمایش دو گرایش عمومی در طراحی باله های سینه ای

ابتداء، باله سینه ای از موقعیت نواحی شکمی در نسل های پایه ای به موقعیت های پشتی و جانبی در نسل های مشتق تغییر مکان داده و زاویه نصب آن هم از یک وضعیت نسبتاً افقی به وضعیت های عمودی تر تغییر یافته است. تصاویر بزرگ شده از باله جانبی بالای هر نسل هم به تناسب طول کل بدن همان ماهی بزرگ شده اند تا قابل مقایسه باشند.<sup>۳۱</sup>

در مطالعه ای در سال ۱۹۹۶<sup>۱</sup> آقای فیش مدلی پیشنهادی برای تکامل نحوه شناکردن و انواع آن، با ابتدا قرار دادن جابه جایی روی سطحی زمینی و اعمال فرایند تکامل بر روی آن، پیشنهاد داده است که مطابق زیر است.

وی پیشران ناشی از پدال زدن چهارپا، پدال زدن پهلویی جایگزین، پدال زدن لگنی جایگزین، پاروزدن لگنی جایگزین، پدال زدن لگنی همزمان، و پاروزدن پهلویی را به طور غالب ناشی از نیروی پسا ارزایی نموده و نیروی پیشران حرکت موجی عرضی و حرکت موجی پشتی-شکمی را به طور غالب عکس العمل شتابی و پیشران نوسان لگنی و نوسان پهلویی و نوسان دمیی را به صورت غالب نیروی برامی داند.



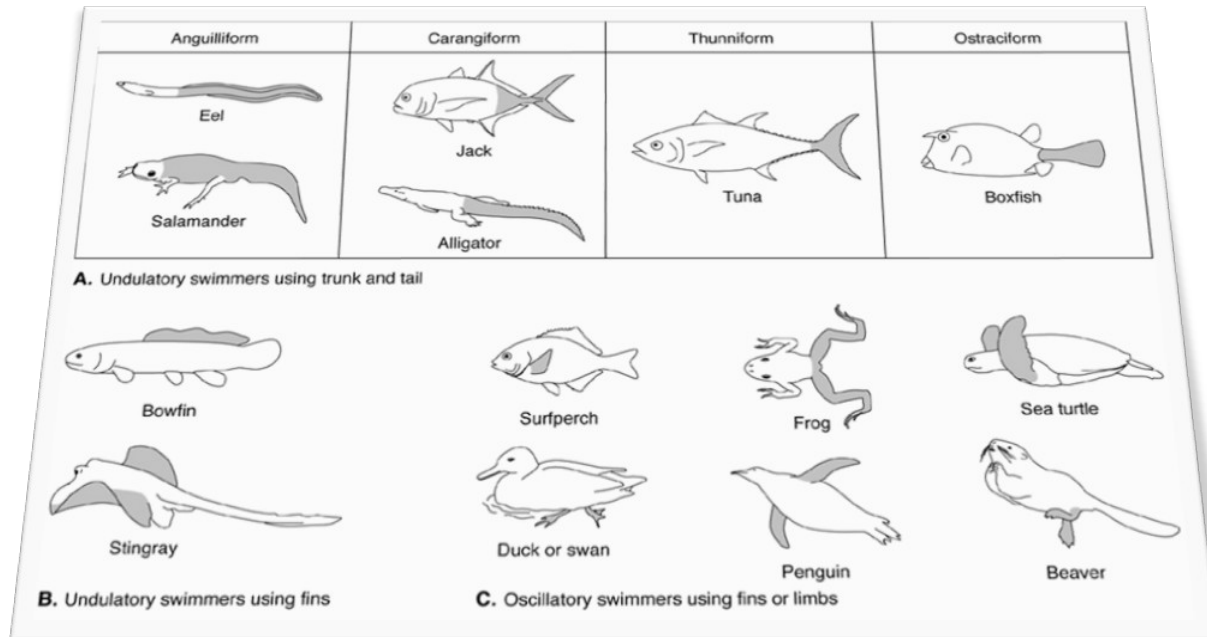
شکل ۱۸ مدلی پیشنهادی فیش (۱۹۹۶) برای مسیر تکامل نحوه شناکردن و انواع آن و شماتیک نشان دهنده این تکامل و نیروهای مؤثر پیشران در هر مرحله



مدل پیشنهاد شده فیش دنباله ای از تغییرات گزار موده‌های شناکردن را از حالت های پایه ای که مبتنی بر پدال زدن پسا بنیان بوده است به حالت های متکامل تر که مبتنی بر حرکت های نوسانی برا بنیان می باشد به تصویر می کشد. خط چین حدفاصل تغییر از شنای سطحی (روی سطح آب) به شنای زیرسطحی (درون آب) را نشان می دهد.

### اشکال مختلف شناکردن

در یک جمع بندی از آن چه گفته شد، شکل های گوناگون شناکردن را با توجه به نوع حرکات شنا و ابزار آن در یک جا برای مقایسه به همراه نمونه ای از اجراکننده آن شنا و اسم تخصصی آن گونه در می آوریم؛ به طور کلی شناکردن در سه شکل کلی



شکل ۱۹ سه شکل کلی شناکردن به همراه نمونه شناکننده:

۱. شنای حرکت موجی با بدن و دم (و نوسانی با دم) (A)

۲. شنای حرکت موجی با باله ها (B)

۳. شنای حرکت نوسانی با باله ها و اعضا (C)

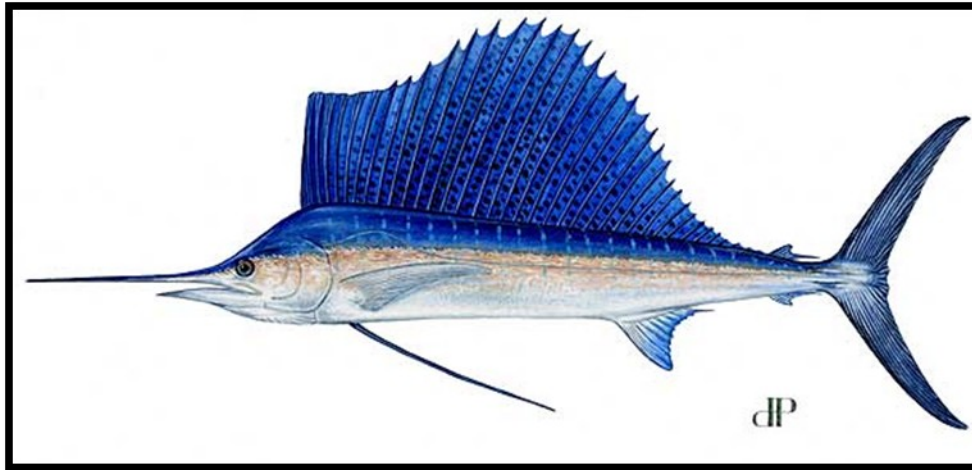
### رکوردهای شناگران و شیرجه زنان

در این بخش تیتروار به رکوردهای شناگران می پردازیم که می تواند خصوصا از دیدگاه طراحی و عملکردی الهام بخش باشد. رکورد سرعت از آن بادبان ماهی<sup>۱</sup> با ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت (!) است. لیست ۱۰ شناگر برتر بدین ترتیب است<sup>۲</sup>:

<sup>۱</sup> SailFish

جدول ۱ لیست ۱۰ شناگر برتر بین شناگران و شیرجه زنان کره آبی، زمین

مایل بر ساعت	کیلومتر بر ساعت	اسم فنی گونه ماهی	
۶۸	۱۱۰	Sailfish	.۱
۵۰	۸۰	Marlin	.۲
۴۸	۷۸	Wahoo	.۳
۴۶	۷۴	Tunny	.۴
۴۴	۷۰	Bluefish tuna	.۵
۴۳	۶۹	Great blue shark	.۶
۴۰	۶۴	Bonefish	.۷=
۴۰	۶۴	Swordfish	.۷=
۳۵	۵۶	Four-winged flying fish	.۹=
۳۵	۵۶	Tarpon	.۹=



شکل ۲۰ بادبان ماهی رکورددار سرعت شنا در بین شناگران و شیرجه زنان کره آبی با سرعت شنای ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت

(تقریباً ۱۵ برابر سرعت شناگران انسان!، عکس از [FloridaFishingInfo.net](http://FloridaFishingInfo.net))

رکورد شتاب، اما، احتمالاً مربوط می شود به پایک های خشن<sup>۱</sup> که هنگام شکار انفجارهای کوچک شتابی شان مقداری بیش از ۲۰ برابر شتاب جاذبه زمین (g20) پیدا می کند.

جالب است بدانید که پنگوئن ها با وجود سرعت اندکشان هنگام راه رفتن، با توانایی شناکردن در سرعت ۳۶ کیلومتر بر ساعت شناگران قابلی هستند.

رکورد استقامت، اما، از آن ماهی آزاد<sup>۲</sup> است که می تواند مسافت ۱۰۰۰ کیلومتر به سمت بالای رودخانه آن هم در خلاف جهت آب (!) با سرعت ۴.۲ کیلومتر بر ساعت شنا کند. دیگر رکوردداران می توانند فک های مودار<sup>۳</sup> با شناکردن مسافت ۱۲۰۰۰ کیلومتر و

<sup>۱</sup> Aggressive Pikes

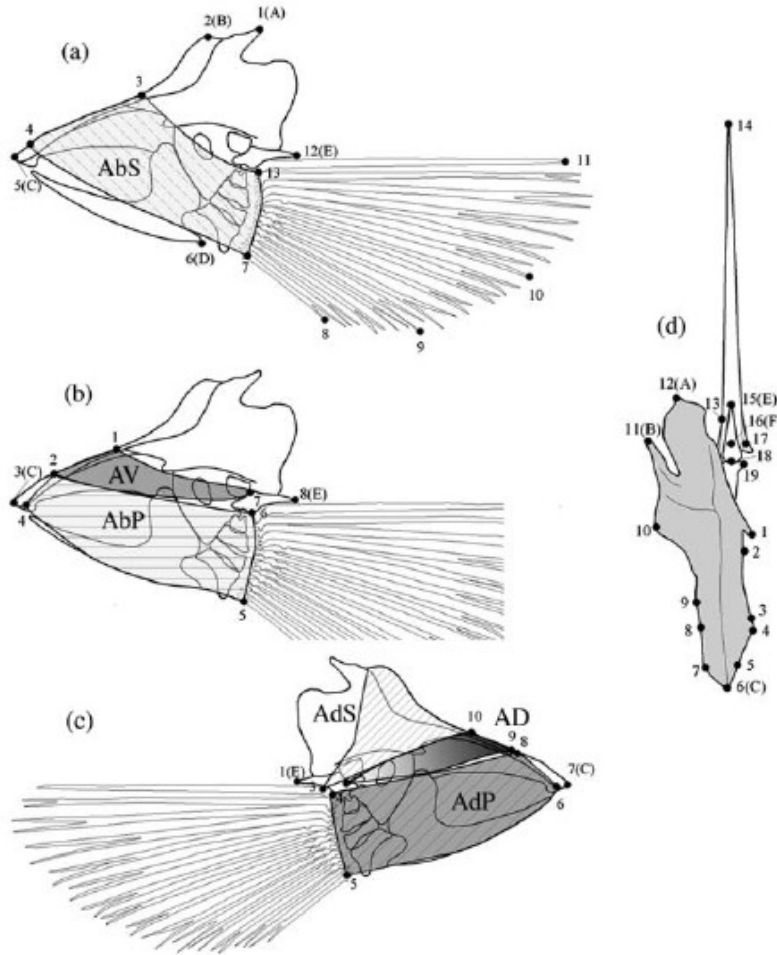
<sup>۲</sup> Salmon

<sup>۳</sup> Fur Seal

وال های خاکستری<sup>IV</sup> با ۱۹۰۰۰ کیلومتر و نیز وال های آبی باشند که هنگامی که با نیزه شکار می شوند به مدت ۲ ساعت با سرعت ۲۷ کیلومتر بر ساعت قادرند از دست صیادان بگریزند.

### بررسی مکانیزم بالزنش (باله زنش)<sup>I ۲۳</sup>

برای یک مکانیزم باله زن در یک ماهی آکواریومی<sup>II</sup> نیاز به شش ماهیچه منقبض شونده است که مطابق شکل زیر آناتومی آن به نمایش درآمده است.



شکل ۲۱ آناتومی ۶ ماهیچه ای برای یک مکانیزم باله زن (a) نما از جانب به ماهیچه دورکننده (abductor superficialis (AbS) نما از جانب با حذف ماهیچه دورکننده (abductor superficialis (AbS) و (arrector ventralis (AV) و نمایش ماهیچه های دورکننده (abductor profundus (AbP) و (c) نمای میانی به سه ماهیچه اصلی نزدیک کننده (adductor profundus (AdP) ، (adductor superficialis (AdS) و (arrector (AD) dorsalis (d) نما از جلو برای فراهم آوردن یک دستگاه مختصات سه بعدی برای شبیه سازی رایانه ای فعالیت های ماهیچه، برتری مکانیکی، پارامترهای ضربه باله

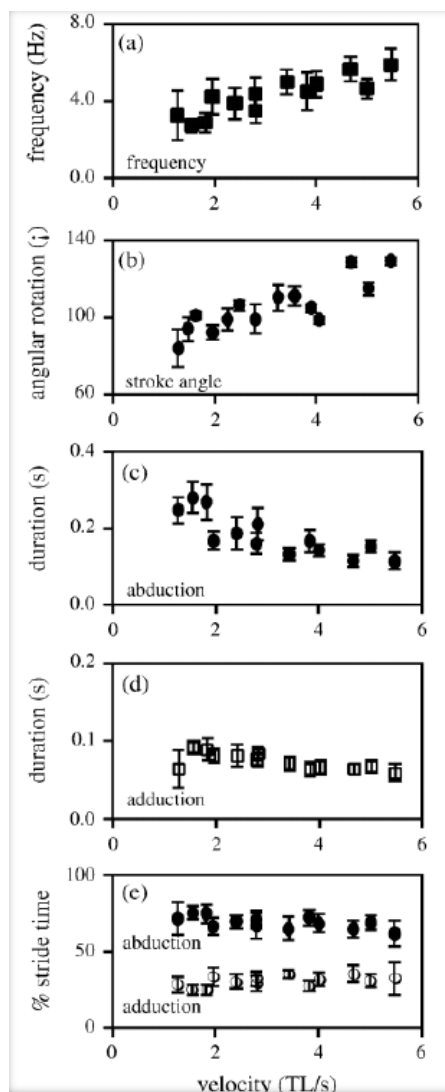
<sup>IV</sup> Grey Whale

<sup>I</sup> Flapping

<sup>II</sup> گونه Gomphosus Varius

در شکل ۲۱ از پروتکل شکل سنجی برای کمی سازی طراحی مکانیکی باله و مشخص کردن پارامترهای سازه ای برای یک مدل زیست‌مکانیکی باله استفاده شده است (اعداد روی شکل)

نمودار شکل ۲۲ پروفیل‌های سینماتیک را برای بال‌زدن تابعی از تغییر سرعت شنا از ۱ تا ۶ طول ماهی<sup>۱</sup> در ثانیه به نمایش می‌گذارد:

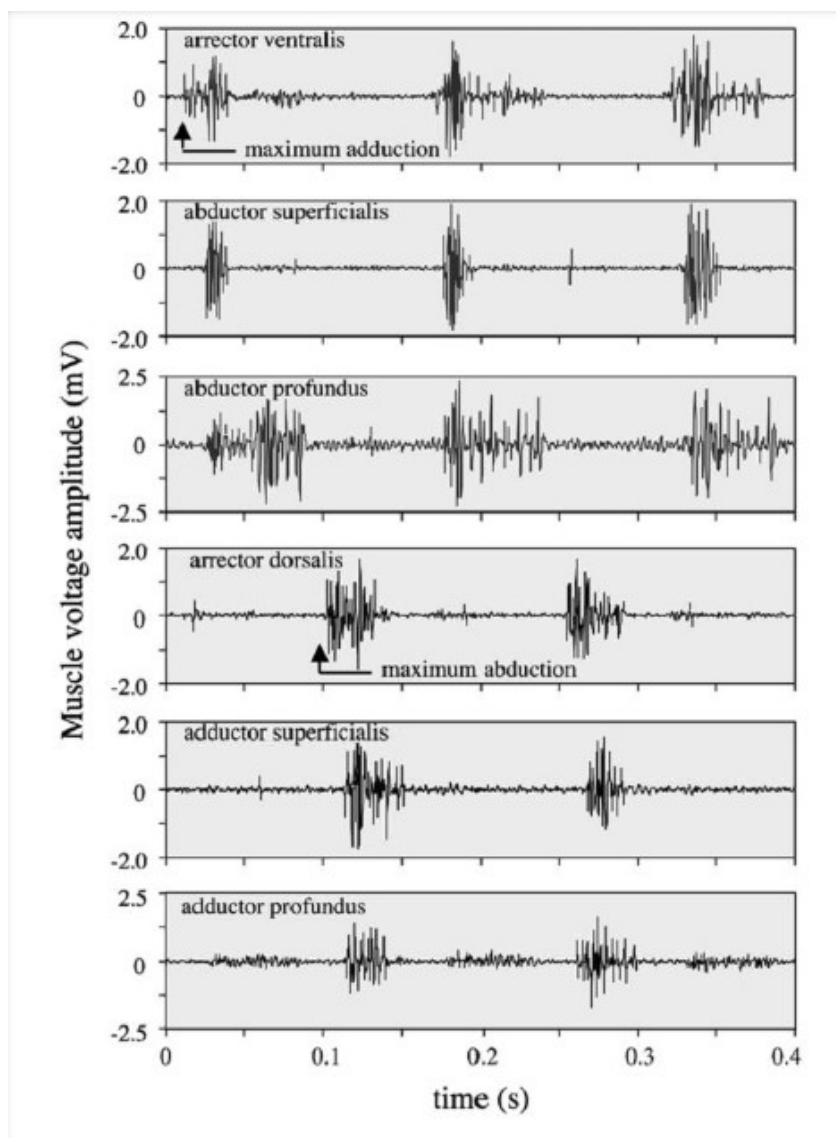


شکل ۲۲ پروفیل‌های سینماتیک برای بال‌زدن با تغییر سرعت شنا در بازه TL/s6-1

(a) فرکانس باله زدن با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. (b) زاویه ضربه با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. این در حالی است که (c) فازدوری (از مرکز بدن) و (d) فاز نزدیکی با افزایش سرعت شنا کاهش می‌یابند. (e) هر چند، درصد زمان پیمایش، که به صورت درصدی از زمان ضربه کل بیان می‌شود، در این گستره سرعت ثابت است.

<sup>۱</sup> TL=Total Length

نمودار شکل ۲۳ نتایج آزمایش الکترومایوگرافی (نمایش ولتاژ سیگنال های ماهیچه ای)<sup>I</sup> را برای ماهیچه باله سینه ای در هنگام بال زدن یک ماهی آکواریومی<sup>II</sup> در سرعت شنای 3.8 TL/s که TL طول بدن ماهی است، نشان می دهد:



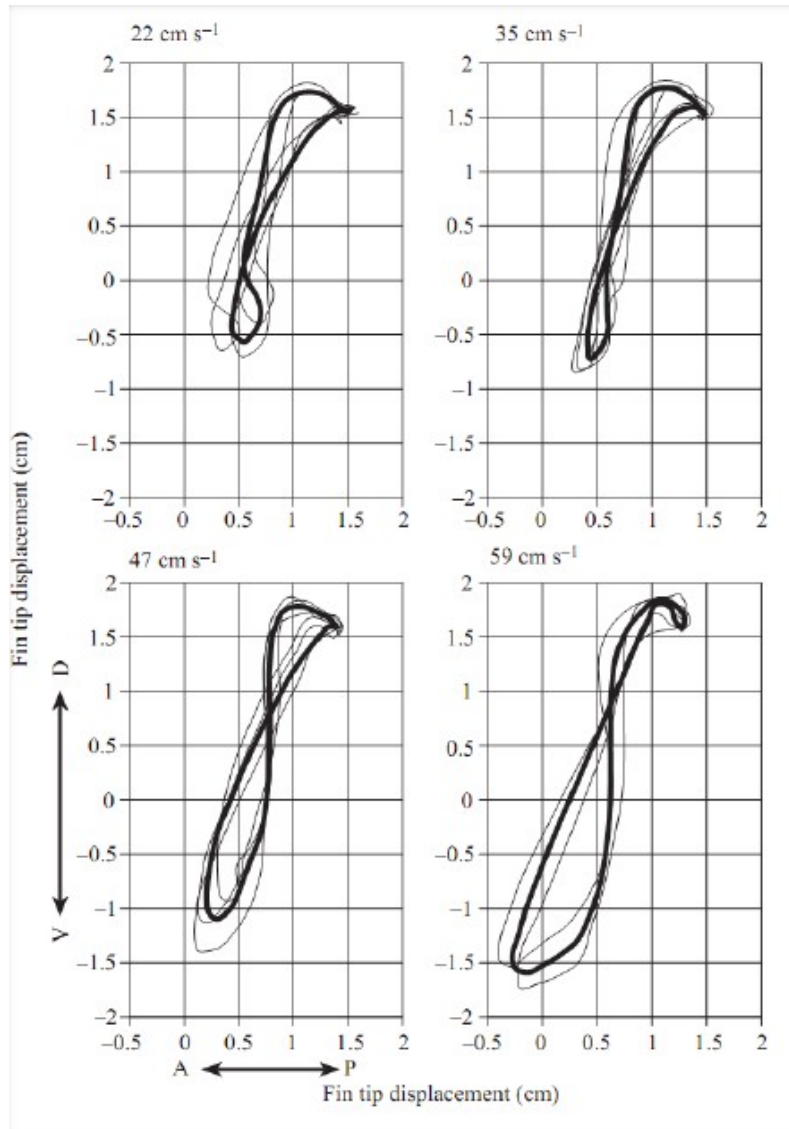
شکل ۲۳ نتایج آزمایش الکترومایوگرافی را برای ماهیچه باله سینه ای در هنگام بال زدن

یک فعال سازی ماهیچه های پایین رو(سه سیگنال بالا) و بالارو (سه سیگنال پایین) توان لازم برای چرخه محرک باله را فراهم می آورد. بیشینه های سینماتیک نیز در شکل ۲۳ نشان داده شده اند. جابه جایی نوک باله در سرعت های شنای مختلف برای همان گونه ماهی در شکل ۲۴ به نمایش درآمده است.<sup>۲۴</sup>

<sup>I</sup> Electromyography (EMG)

<sup>II</sup> همان گونه Gomphosus Varius

تحلیلی از هیدرودینامیک همان گونه ماهی توسط رامامورتی و همکاران (۲۰۰۲) انجام شده که قسمتی از نتایج آن به صورت پروفیل بردارهای سرعت حول سطح ماهی در بازه های زمانی مختلف حین یک بار باله زدن در شکل ۲۵ به نمایش در آمده است:

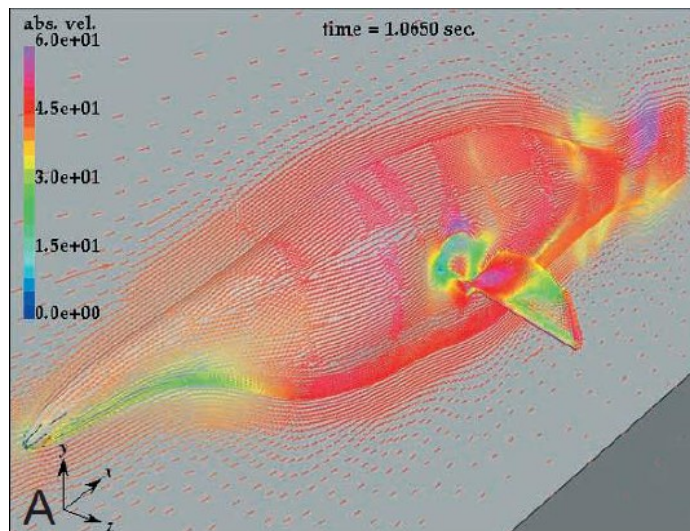


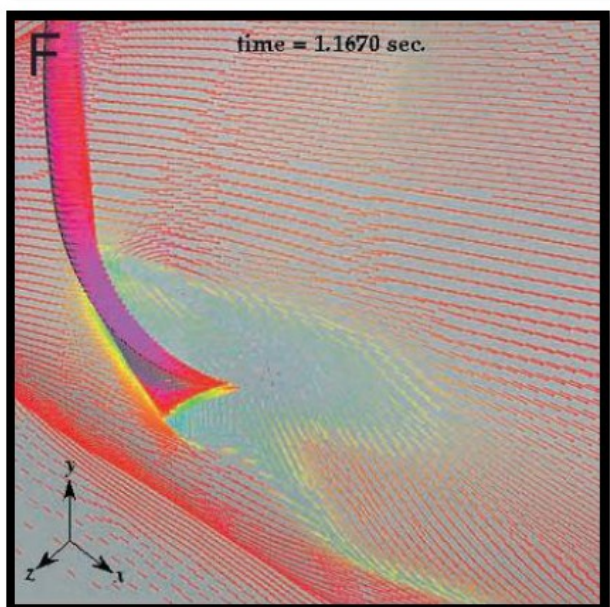
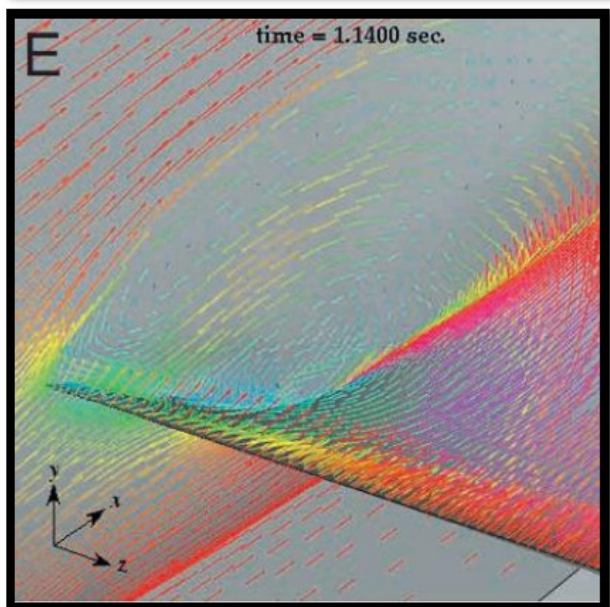
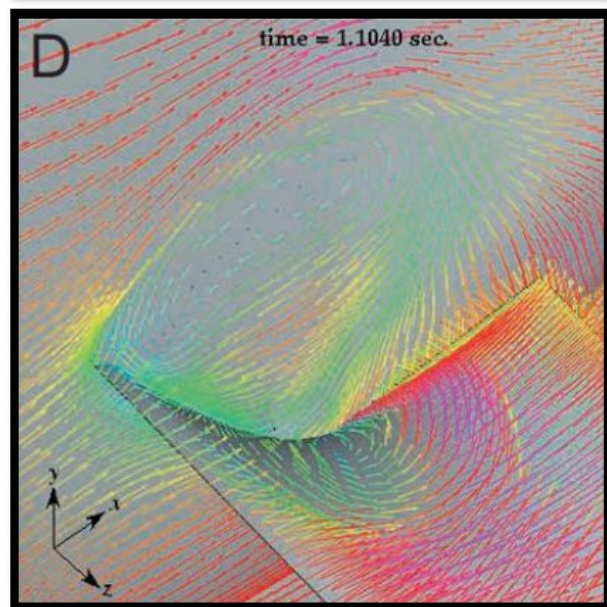
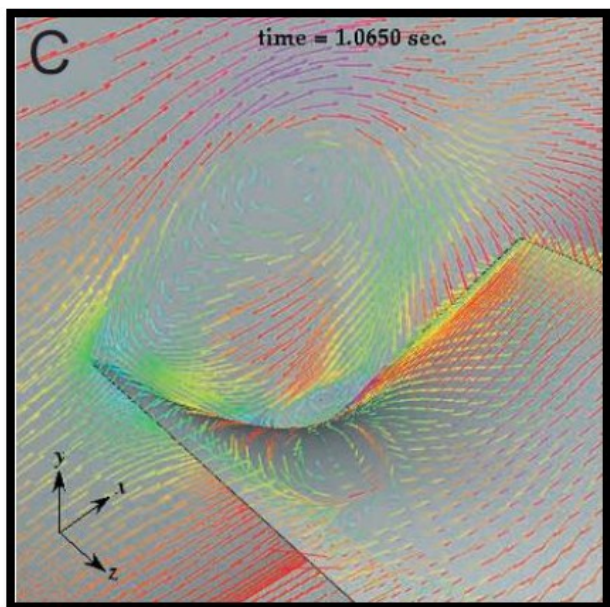
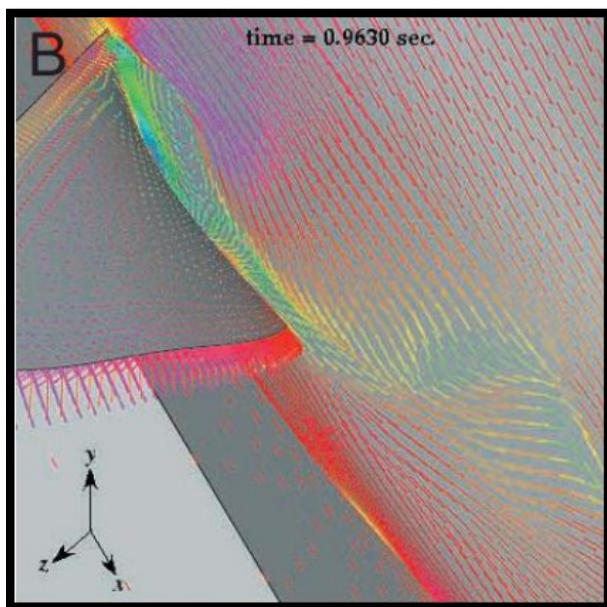
شکل ۲۴ نمای از چپ جابه جایی نوک باله ماهی نسبت به بدن آن (پایه باله). جهت حرکت نوک باله پیرامون حلقه پشتی پادساعتگرد و پیرامون حلقه شکمی ساعتگرد می باشد. هر خط نماینده یک مورد از دنباله و خطوط ضخیم نماینده میانگین دنباله هستند. A جلو، P عقب، D پشتی و V شکمی است.

شکل ۲۵ پروفیل بردارهای سرعت حول سطح ماهی در بازه های زمانی مختلف حین یک بار باله زدن نتیجه دینامیک سیالات محاسباتی در سرعت شنای  $45 \text{ cm/s}$

(بردارهای سرعت بنا به اندازه  $4 \text{ cm/s}$  رنگ شده و طول یکسان دارند.)

(A) پروفیل سرعت در  $t=1.065 \text{ s}$  با  $84\%$  پایین رو





شکل ۲۵ پروفیل بردارهای سرعت حول سطح ماهی در بازه های زمانی مختلف حین یک بار باله زدن نتیجه دینامیک سیالات محاسباتی در سرعت شنا  $45\text{cm/s}$

(بردارهای سرعت بنا به اندازه رنگ شده و طول یکسان دارند.)  
(B-F) نما از نزدیک به تقاطع باله و بدنه:

(B)  $t=0.963\text{ s}$  یا 32% پایین رو

(C)  $t=1.065\text{ s}$  یا 84% پایین رو

(D)  $t=1.104\text{ s}$  یا 8% بالا رو

(E)  $t=1.140\text{ s}$  یا 43% بالا رو

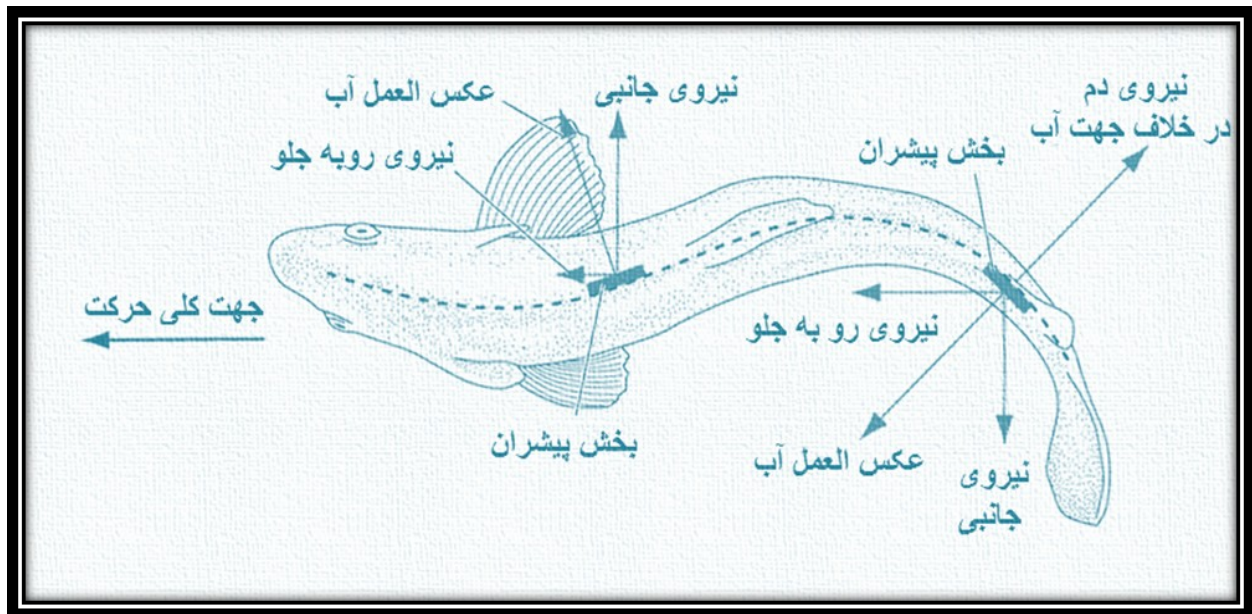
(F)  $t=1.167\text{ s}$  یا 68% بالا رو



ماهی های قزل آلا به عنوان نمونه ای دیگر، تنها ماهیچه های جلویی خود را در حین شنای بین گردابه های ناشی جریان آب به کار می گیرند. لیاو و همکاران در پژوهشی در مجله ساینس<sup>۲۶</sup> با روش های آشکارسازی کمی جریان همراه با الکترومایوگرافی از مود حرکتی جدیدی که ماهی های قزل آلا برای سرخوردن بین گردابه های ایجاد شده به صورت عمدی استفاده می کنند، پرده برداشتند. شایان ذکر است که این مانورهای حیرت آور، تنها با استفاده از ماهیچه های محوری جلویی بدن ماهی اجرا می شدند. کاهش چشمگیر فعالیت ماهیچه ای در زمان سوداستفاده از گردابه ها، در مقایسه با ماهی هایی که از شنای حرکت موجی یاری می جویند، به وضوح مؤید کاهش هزینه جابه جایی است.

در این آزمایش گردابه هایی که با عبور جریان آزاد از روی یک نیم استوانه با مقطع D شکل (یک دایره که تقریباً از وسط بریده شده باشد) ایجاد شد، به نامجاده کارمن شناخته می شوند. مشاهده شد که در مقایسه با شنا کردن در جریان آزاد، ماهی ها چه در حفظ موقعیت حاضر خود در شنای ثابت یا حرکت در خلاف جهت آب در شنای پیشرو کار ساده تری را به عهده دارند (درست مانند دوچرخه سواری که پشت دوچرخه سوار جلویی رکاب می زند و پیش می رود. یا پرواز دسته جمعی بسیاری از پرندگان) برای این کار تنها لازم است که سینماتیک بدنشان را با گردابه های گسیل شده همگون کنند. با استفاده از روش سرعت سنجی تصویر دیجیتال ذره<sup>۱</sup> و ویدیوی سرعت بالا، روشن گشت که قزل آلاها به جای شنا به درون گردابه ها، از بین آن ها شنا می کنند و لذا به جای آن که نیروی پیشران خروجی را بیشینه کنند، توان ورودی را کمینه می کنند.

به طور کلی شماتیک نیروهای وارد بر ماهی از دو نمای مختلف به شکل زیر است:

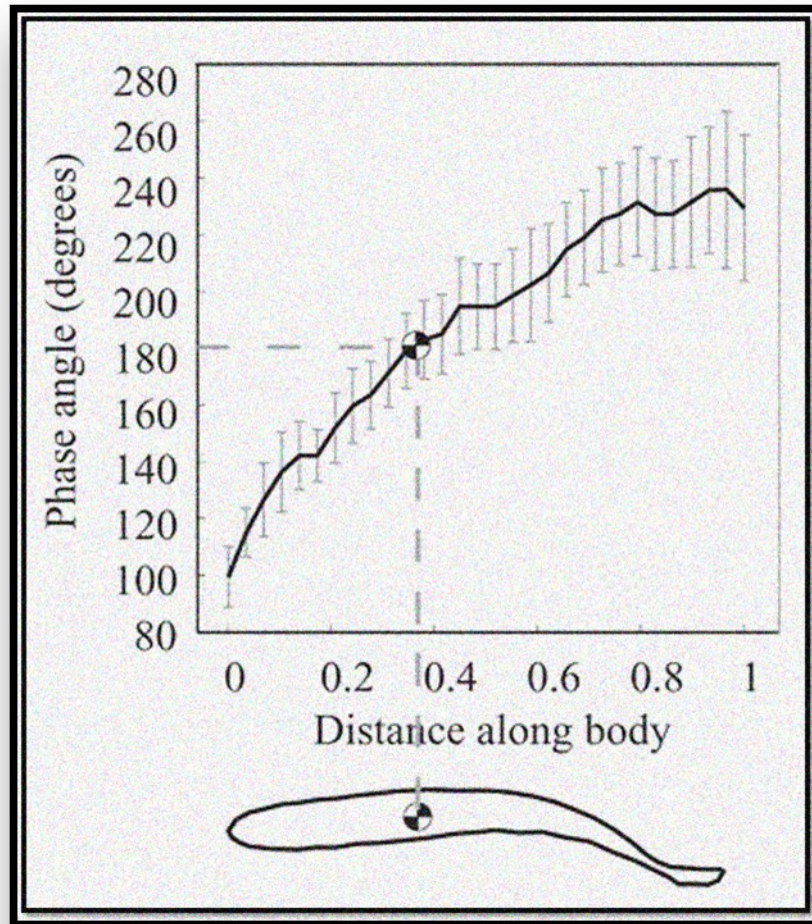


شکل ۲۶ شماتیک دینامیک وارد بر یک ماهی نوعی

به نحوی کمی تر، هنگام شنا نزد گردابه، تمامی بدن ماهی به گونه ای تغییر شکل می دهد که مرکز جرم در دورترین نقطه نسبت به مرکز گردابه گذرنده باشد (اختلاف فاز ۱۸۰ درجه). قسمت هایی از بدن که جلوتر از مرکز جرم هستند هنگام گذر از گردابه

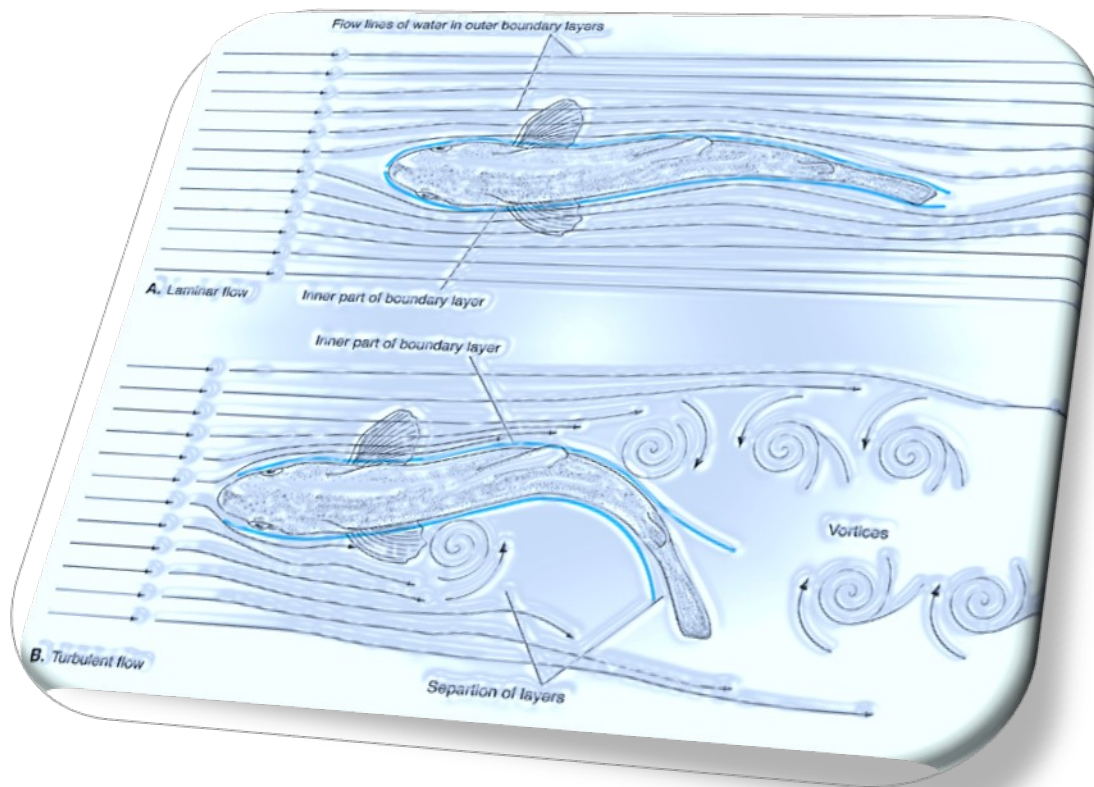
<sup>۱</sup> Digital Particle Image Velocimetry (DPIV)

سعی در دور شدن از آن دارند (اختلاف فاز کمتر از ۱۸۰ درجه) و قسمت هایی که پس از مرکز جرم واقع شده اند به مرکز گردابه در حال گذر نزدیک می شوند (اختلاف فاز بیشتر از ۱۸۰ درجه).



شکل ۲۷ اختلاف فاز بین بدن و گردابه؛ فاز ۰ یا ۳۶۰ نشان دهنده برخورد با گردابه (ابتدا و انتهای عبور گردابه) است.

قزل آلاها در پایین دست استوانه D، فرکانس دم زدن خود را با فرکانس گسیل گردابه ها همگون می کنند و جابه جایی های عرضی بزرگی در بدنشان به خاطر این مطابقت به وجود می آورند. این خواص سینماتیک مطرح شده مشخصات مود حرکتی خاصی است که آهنگ گام کارمن نامیده می شود. در گستره ای از سرعت ها و محیط های مختلف، قزل آلاها که گام کارمن را انتخاب نموده اند طول موج بدنی (توصیفی از شکل بدن بر اساس یک موج سینوسی) بلندتری از طول موج دنباله پشت سیلندر (فاصله پایین دست دو گردابه) دارند. این نتیجه تعامل متفاوت سر و گردابه نسبت به تعامل دم و گردابه است و تضمین می کند که جریان با زاویه برخورد مناسب با بدن برای ایجاد نیروی برا وارد می شود.



شکل ۲۸ تقابل قالب حرکت ماهی در جریان آرام (A) و جریان آشفته (B) (عکس از مرجع ۱۷)

مطابق در یک جریان آرام حرکت قالب حرکت موجی پیشران ساده است در حالی که در یک جریان آشفته، استفاده از گام کارمن اجازه می دهد که بدن به مانند یک هیدروفویل خودتصحیح کننده عمل کند. به علاوه مشاهدات الکترومایوگرافی نشان داده که به هنگام فعالسازی این مود حرکتی تنها تعداد معدودی از ماهیچه های محوری ماهی به کار گرفته می شوند (ماهیچه های محوری جلویی). طراحی هیدروفویل های الهام گرفته از این پدیده می تواند به ساخت ربات ها زیر آبی با هزینه جابه جایی بسیار پایین کمک کند. با انجام مطالعات شباهت جریان و طراحی های متناسب هوا می توان ایرفویل ها و مکانیزم های لازم برای ساخت ربات های پرنده (خصوصا ریزپرنده های متاثر از جریان های آشفته کوچک) طراحی نمود که هزینه جابه جایی آن ها به شدت کاهش یافته چه بسا ساخت نمونه هایی با فرم فاکتور های بسیار کوچک که پیش از این ممکن نبوده، امکان پذیر گردد.

در حال حاضر، ۲۹ رده، ۱۹۵ خانواده، ۲۰۲۹ نسل، بیش از ۹۷۰۰ گونه پرنده شناخته می شود که سرتاسر قاره ها و زیست بوم ها پراکنده اند. بنا به پراکتور و لینچ (۱۹۹۳) تمامی رده های امروزی پرندگان احتمالا از یک ریشه اجدادی مشترک (اما هنوز نامشخص) در دوره کرتیسس<sup>I</sup> (بیش از ۶۵ میلیون سال پیش) برخاسته اند.

نه تنها در بین پرندگان، که بین تمامی گونه های جانوری در طبیعت که قادر به پروازند، دوسومشان از مکانیزم بالزنش برای پرواز استفاده می کنند.

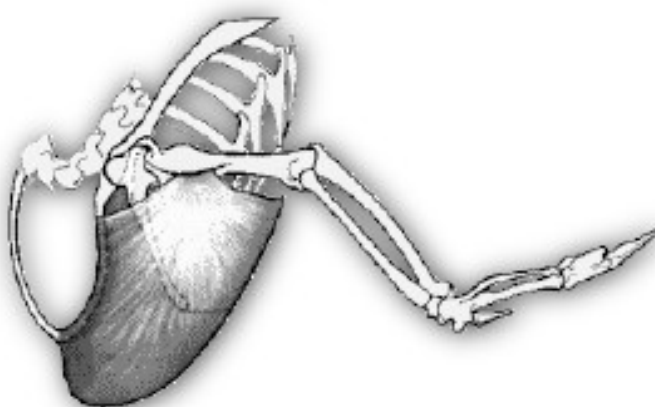
بزرگترین پرنده قادر به پرواز از لحاظ ابعاد، مرغان دریایی آلباتروس دورگرد با بزرگترین پهنه بال برابر ۳.۴ متر هستند. از لحاظ وزن گونه ای به نام کوری باسترده سنگین ترین پرنده قادر به پرواز است که می تواند تا ۲۰ کیلوگرم وزن داشته باشد. یک پرنده شبیه لاشخور که نسل آن منقرض شده است، و به نام عامه تتراتورن عظیم الجثه<sup>II</sup> شناخته می شود، حدود ۷۵ کیلوگرم وزن داشته و پهنه بال آن ۱ متر بوده است.

نمونه های سنگین دیگر، قوهای خاموش، کرکس آمریکایی، و گونه هایی از پلیکان ها هستند.

به طور کلی با افزایش اندازه پرنده توان تولید شده در ماهیچه های آن به همان نسبت افزایش حجم پرنده و متعاقبا وزن آن افزایش نمی یابند، لذا پرندگان بزرگتر بسیار سخت تر می توانند مانور برخاست را انجام دهند. از طرفی غذای مورد نیاز برای چنین پرنده ای که تمام مدت از روش بالزنش پرواز می کند، بسیار زیاد می شد. لذا بیشتر پرنده های بزرگ از روش بلند پرواز کردن با باز کردن بال ها استفاده می کنند.

<sup>I</sup> Cretaceous

<sup>II</sup> نام تخصصی جانورشناسی *Argentavis Magnificens*



شکل ۲۹ ساختار اسکلت و ماهیچه‌های یک پرنده نوعی

دو ماهیچه اصلی پروازی به هر بال وصل می‌شوند. ماهیچه ی پکتورالیس یا ماهیچه بغلی که توان لازم برای پایین ضرب را فراهم می‌کند و در پرندگان به تناسب خیلی بزرگ است (تا ۳۵ درصد وزن بدن). ماهیچه سوپراکوراکوئیدوس بسیار کوچکتر است و تاندونی دارد که خم می‌شود تا به بالای استخوان بازو متصل شود. سوپراکوراکوئیدوس می‌تواند توان بالا ضرب را در صورت نیاز تامین کند، اما بیشتر اوقات چرخش سریع استخوان بازو را در بالای مسیر بالا ضرب موجب می‌شود. (پور و همکاران ۱۹۹۷) به علاوه ۴۸ ماهیچه دیگر هم در بال و پیرامون شانه هستند که گستره وسیع حرکات بال و پرهایش را ممکن می‌کنند.

### ابزارها و تکنیک‌ها<sup>۳۰</sup>

از جمله ابزارها و تکنیک‌های رایج مورد استفاده برای بررسی پرواز پرندگان چند مورد به اختصار در ذیل بیان می‌شود.

#### برای انجام مشاهدات روی پرواز و شرحه پرندگان

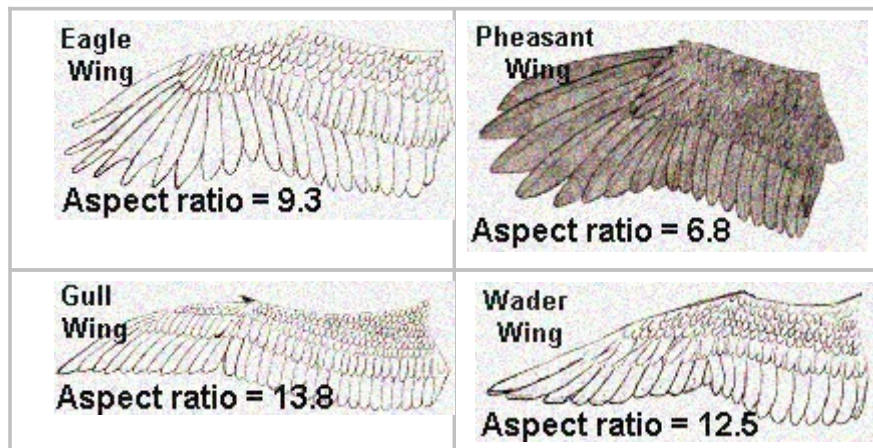
- دوربین با سرعت (تصویربرداری) بالا؛ برای ضبط پرواز
- میکروسکوپ الکترونی؛ برای اندازه گیری تعداد و نوع فیبرهای ماهیچه ای در ماهیچه های مختلف پروازی
- سونومیکرومتر؛ برای اندازه گیری باز شدن و جمع شدن بال حین پرواز در یک تونل باد یا آب
- ترکیبی از گیج نیرو برای اندازه گیری نیروهای وارده والکترومایوگرافی؛ برای اندازه گیری انرژی مصرفی لازم برای پرواز پرنده
- تونل باد و تونل آب؛ برای انجام مشاهدات پرواز پرنده در آزمایشگاه

#### برای مشاهده دینامیک جمعیت پرنده ها

- پابندهایی برای شناسایی پرندگان متفاوت و تعیین سن پرندگان که در زمان های متفاوت فصل تولید مثل می‌رسند.
- دوربین دوچشمی برای دیدن پرندگان و شناسایی منبع غذایی آن‌ها
- چسب اندازه گیری برای محاسبه اندازه قلمرو گونه‌ها و تخمین تعداد کل آن‌ها

## ساختار بال پرندگان

چهار شکل پایه ای بال پرندگان<sup>۳۱</sup> به همراه ضریب منظری بال<sup>I</sup> از نمونه پرنده مورد نظر در پایین آورده شده اند. این چهار بال به ترتیب مربوط به قرقاول، یاعو(مرغ نوروزی)، عقاب، و مرغ درازپا هستند. این نمونه ها منتهی الیه ها را در طراحی بال پرندگان به نمایش می گذارند. از بیش از ۹۷۰۰ گونه پرندگان، بال های گوناگونی با این الگوهای کلی با تغییراتی در این گستره نشان داده شده، مشاهده می گردد.



شکل ۳۰ چهار شکل پایه ای بال پرندگان به همراه ضریب منظری بال از گونه های قرقاول (راست- بالا)، یاعو(مرغ نوروزی)(راست- پایین)، عقاب(چپ- بالا)، و مرغ درازپا(چپ- پایین)

۱. قرقاول یا گنجشک شاخه نشین<sup>II</sup>؛ بال های مشابه این ضریب منظری پایینی حدود ۳ تا ۶ دارند که به دارندگان خود اجازه شروع انفجاری و دفعی پرواز را می دهند و برای پرواز نسبتا با سرعت پایین قدرتی<sup>III</sup> مناسب هستند، اما برای پرواز از نوع سرش خوب نیستند.
۲. یاعو (مرغ نوروزی)<sup>IV</sup> بال هایی با طول متوسط با ضریب منظری حوالی ۱۲.۵ دارند که همچنین در انتها پس از نیمه اول تیز و روبه عقب هستند. این بال ها برای برخاست کندتر هستند، ولی امکان رسیدن به سرعت بیشینه بالاتری را علاوه بر امکان قدری سرش فراهم می کنند. این بال ها برای مهاجران مسیره های دور مناسبند.
۳. عقاب<sup>V</sup> ها و لاشخورها بال ها گسترده و بلندی با ضریب منظری حول و حوش ۹.۳ دارند که پره های انتهایی انگشتانی از هم جدا شده هستند که به اجرای کنترل های جزئی حین پرواز سرش کمک می کنند (مانند ایرفویل ها). این ها اساسا پرندگان زمینی هستند که در ارتفاعات بالا از سطح زمین پرواز می کنند تا به کمک انواع گوناگونی از جریان های رو به بالای هوایی از بالزنش اجتناب خودداری کنند.

<sup>I</sup> Aspect Ratio

<sup>II</sup> Pheasant

<sup>III</sup> Low-speed powered flight

<sup>IV</sup> Wader

<sup>V</sup> Eagle

۴. مرغان دریایی<sup>I</sup> بال های بلند و نازکی با ضریب منظری تقریباً ۱۳.۸ و بالاتر بدون انگشت هستند. این بال ها برای سرش بالای دریا نزدیک به سطح بسیار مناسب هستند، چرا که تغییرات اندک جهت باد را به استفاده بهینه خود می رسانند. جالب است که بعضی گونه های این مرغان (آلباتروس ها) قادرند تا ۶ ساعت از همین جریان های هوایی روی سطح دریا استفاده کرده و سرش کنند و بعضی وقت ها در همان حال سرش به خواب می روند و استراحت می کنند!

بسیاری از پرندگان دریایی، مثل مرغان دریایی آلباتروس، بال های بلند و باریک نوک تیز دارند تا بتوانند مسافت های طولانی بالای اقیانوس در مقابل بادهای اقیانوسی هواسرش کنند. درازای بال برای زیادی تولید می کند، در حالی که شکل باریک و نوک تیز کمک به کاهش پسا در حال هواسرش می کند.

بال های بلند و گسترده عقاب مساحت سطح بال بزرگی مناسب برای بلند پروازی<sup>II</sup> بر روی جریان های گرم بالارونده دارند. فاصله های بین پرها در انتهای بال به کاهش بال کمک نموده و برای کنترل دقیق در سرعت های پایین به کار می روند. لک لک ها، پلیکان ها، باز شکاری و ... بال های این چینی دارند.

بال های کوتاه و گرد به قراول ها اجازه برخاست های سریع، مانورپذیری خوب، و هواسرش های کوتاه می دهند. بسیاری از پرندگان جنگلی بال های کوتاه و گرد دارند که مناسب دورهای تند و تیز در پرواز بین درختان هستند. مشابه یک هواپیمای جت پرسرعت، پرستوها بال های نسبتاً کوچک، باریک و مخروطی شونده (با باریک شونده از ابتدا به انتها) دارند. این بال ها می توانند به سرعت زده شوند و تا با پسای اندک سرعت حرکت ایجاد نمایند. سریع ترین پروازکنندگان در دنیای پرندگان، شاهین های فالکون و پرستوهای مهاجر سوئیت، بال های این شکلی دارند.

### پره های پروازی در بال پرندگان<sup>۳۲</sup>

همانطور که در شکل نشان داده شده است، وقتی یک پر بیرونی را بررسی می کنیم، در می یابیم که موهای روی پر به یکدیگر پیوسته اند، به طوری که یک سطح صاف و نرم را تشکیل می دهند. این حالت به دلیل وجود قلابهای بسیار ریزی در سر ریز موهایی است که بوسیله آن ها با ریزموهای موی مجاور قفل می شوند. پره های پروازی در دو دسته ریمج<sup>III</sup> و رتریس<sup>IV</sup> شناخته می-شوند. ریمج ها را می توان به سه گروه تقسیم بندی کرد:

پره های نخستین (رتبه یک)، رتبه دو و رتبه سه. رتبه یک ها پرنده را در میان هوا به پیش می رانند. آن ها بزرگترین پره های پروازی و دورترین آن ها نسبت به بدن پرنده هستند که سوار و چسبیده به پوست بال در قسمت به اصطلاح دست پرنده هستند. در اکثر گونه های پرنده ۱۰ پر رتبه یک در هر بال هستند. اگر این پره های پروازی آسیب ببینند یا از دست بروند، پرنده توان پرواز خود را از دست می دهد. پره های رتبه دو در راستای قسمت به اصطلاح بازوی بال پرنده قرار گرفته اند و پرنده را با تولید برا درهوا نگه می دارند. تعداد پره های رتبه دو بین گونه های مختلف بسیار تغییر می کند. پرنده گانی که بر روی تخم خود می خوابند ۹ یا ۱۰ پر رتبه دو دارند. اما گونه هایی از کبک ۲۰ تا دارند. آزمایش ها نشان داده اند که اگر نیمی از پره های رتبه دو حذف شوند، یک پرنده همچنان قادر به پرواز خواهد بود، اما مقداری از توانایی کنترل خود را از دست خواهد داد. رتبه سه ها پره های پروازی با تعداد اندک اند و تعداد آن ها بنا به گونه تغییر می کند.

گروه اصلی دیگر از پره های پروازی، پره های دمی هستند که رتریس خوانده می شوند. رتریس ها به طور عمده با هدایت و تعادل سر و کار دارند. در واقع کارکرد رادر را دارند و به پرنده اجازه پیچ و خم در پرواز را می دهند. به علاوه، این پرها به عنوان یک ترمز بهینه قبل از فرود عمل می کنند. تعداد رتریس ها بنا به گونه پرنده ها تغییر می کند، اما معمولاً بین ۱۰ تا ۱۲ تا است.

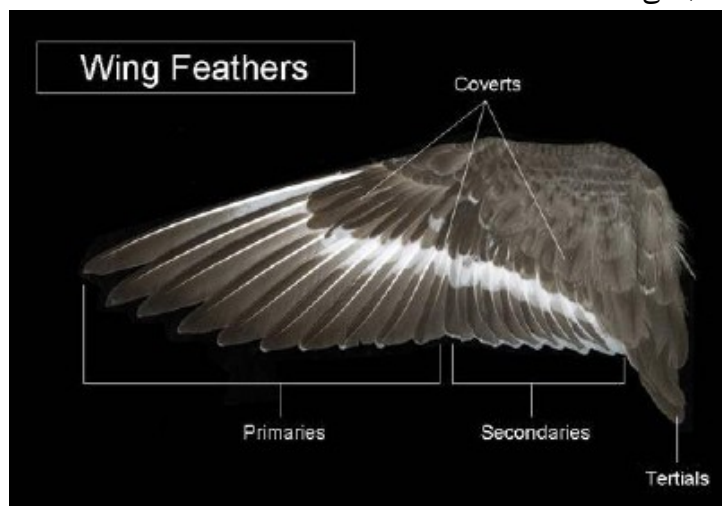
<sup>I</sup> (Sea) Gull

<sup>II</sup> Soaring

<sup>III</sup> Remige

<sup>IV</sup> Retrice

و آخرین گروه اصلی، پرهای حدفاصل<sup>I</sup> هستند که به بدن پرنده شکل کلی و آیرودینامیک آن را می دهند و در عین حال آن را عایق کرده و در موارد نیاز ضدآب می کنند.



شکل ۳۱ ساختار بال و پرها (عکس از [lab.fws.gov](http://lab.fws.gov))

ساختار پر رتبه یک

ساختار و قسمت های پر رتبه یک در شکل های زیر به همراه نام تخصصی آن ها آمده است. اما چند قسمت مهم: رشته مو<sup>II</sup>: به شاخه های مختلف محور اصلی<sup>III</sup> که پره ها<sup>IV</sup> را تشکیل می دهند. ریزمو<sup>V</sup>: از رشته موها خارج شده و توسط قلاب ها به هم قفل می شوند. ریزقلاب<sup>VI</sup>: قلاب های بسیار ریزی که به هم قفل شده و ریزموها و لذا ساختار پیوسته پر را به هم نگه داشته و پسا را کاهش می دهند.

<sup>I</sup> Contour Feathers

<sup>II</sup> Barb

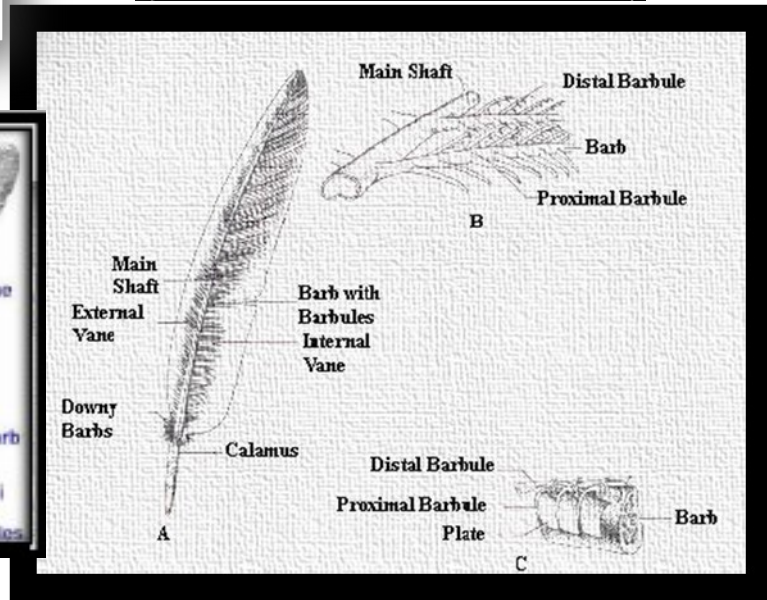
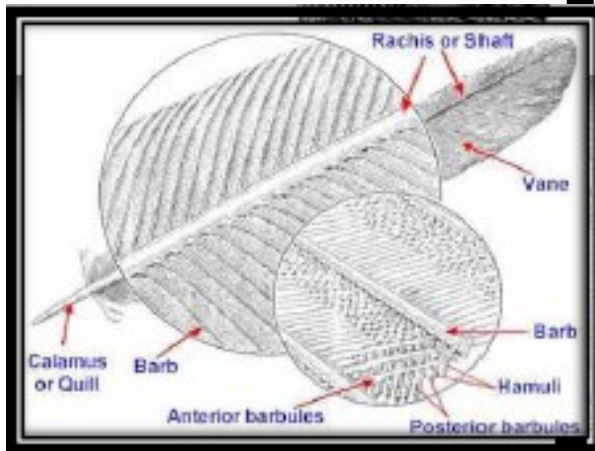
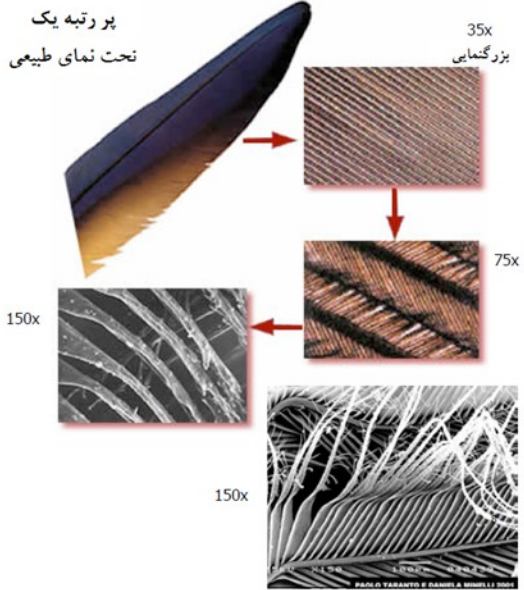
<sup>III</sup> Rachis

<sup>IV</sup> Vane

<sup>V</sup> Barbule

<sup>VI</sup> Barbicel

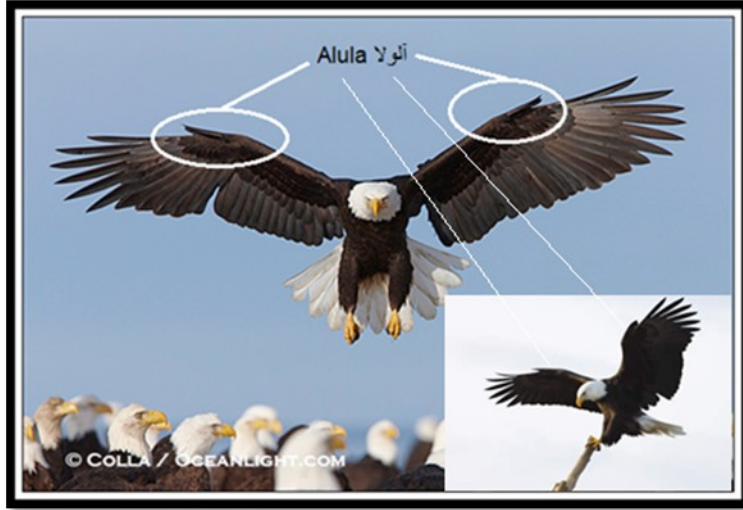




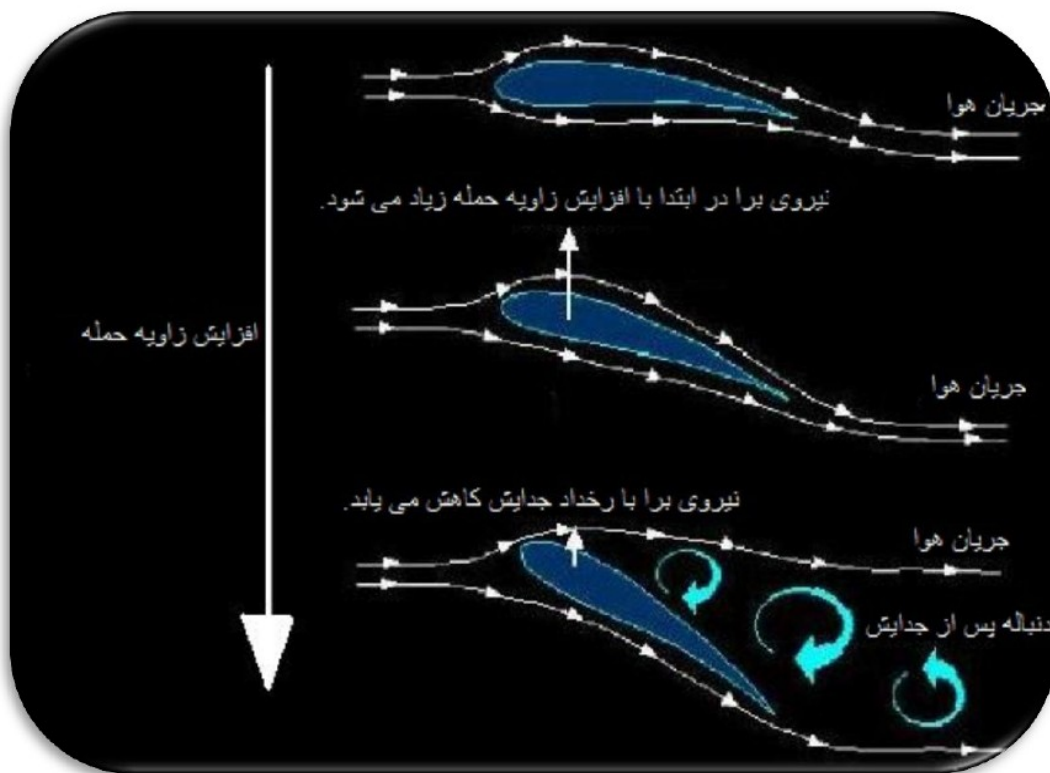
شکل ۳۲ ساختار پر رتبه ۱ و اجزای آن  
 (عکس‌ها از <http://lab.fws.gov> و <http://www.vetscite.org> و <http://fernbank.edu>)

علاوه بر پرهای اصلی پروازی، انواع پرهای پروازی دیگری هم در برخی پرنده‌ها مشاهده می‌شود که عموماً کارکرد افزایش مانورپذیری، کنترل، بهینه‌سازی آیرودینامیک بال، امکان پذیر ساختن عملیات نشست و برخاست خاص و ... دارند. یک مثال بارز می‌تواند پرهایی به نام آلولا<sup>I</sup> باشد که روی انگشتان به اصطلاح شست بال پرنده‌گانی مثل عقاب چسبیده‌اند و در کارکردی همچون فلپ لبه حمله<sup>II</sup> از نوع شکاف<sup>III</sup> پدیده استال را در زوایای حمله بالا خصوصاً هنگام فرود آمدن پرنده به تاخیر می‌اندازند.

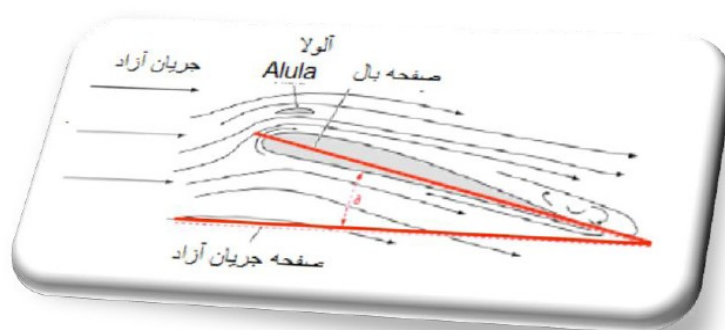
<sup>I</sup> Alula  
<sup>II</sup> Leading-edge flap  
<sup>III</sup> Slot



شکل ۳۳ آلولا، فلپ لبه حمله بال‌های عقاب!



شکل ۳۴ تغییر رفتار جریان با افزایش زاویه حمله تا رخداد جدایش



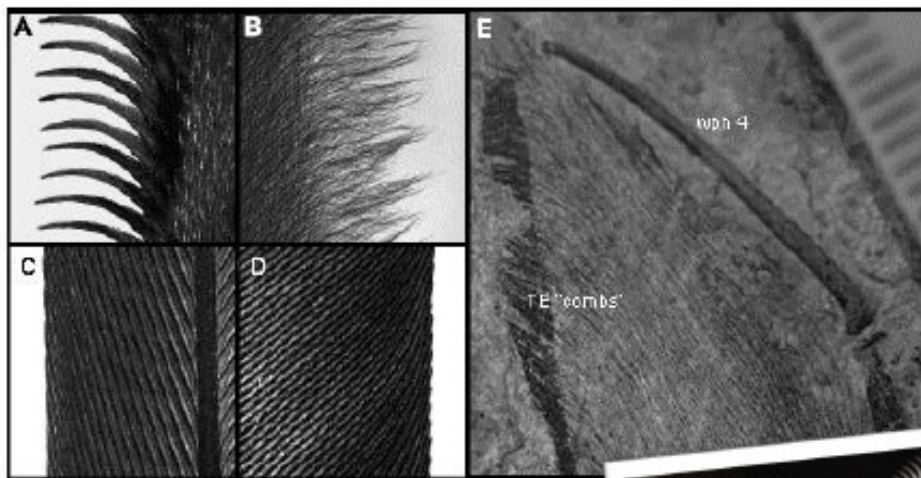
شکل ۳۵ تأثیرگذاری جالب آلولا بر آرامسازی جریان و تأخیر پدیده جدایش در زوایای حمله بالا

همانطور که در شکل ۳۴ و شکل ۳۵ مشاهده می شود پر آلولا با هدایت جریان بالاگذر در حالتی که زاویه حمله افزایش یافته جدایش را به تاخیر انداخته و اثرگذاری بال را حفظ نموده است.

از تکنیک های دیگر ارتقای ایرودینامیک به کاررفته در پره های پرندگان خصوصا پرندگان بلندپرواز مثل بازشکاری می توان به شکاف<sup>۱</sup> های بین پره های رتبه یک در انتهای بالشان اشاره کرد که آشفتگی جریان را کاهش می دهند.

نمونه خارق العاده دیگر جغد است که به لحاظ آکوستیک به طرز شگفت انگیزی پرواز بی صدایی دارد؛ به طوری که موش های شکار این پرنده شب هنگام صدای پرواز این پرنده را در جنگل نمی شنوند! اما تکنیک های به کار رفته در بال های پرندگانی مانند جغد، ژئولوپتروس (گونه ای ماقبل تاریخ از پرندگان بی سر و صدا) برای دستیابی به چنین قابلیتی عبارتند از؛

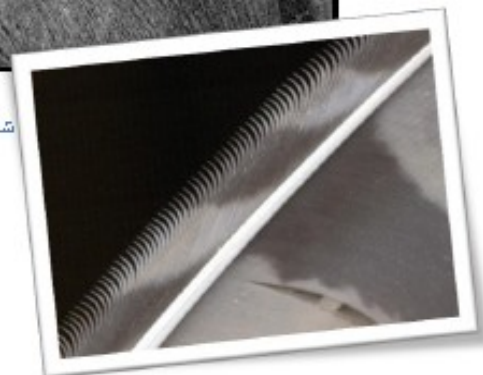
- لبه حمله بال ها مانند شانه دندانانه است.
- لبه فرار بال ها مانند پارچه کهنه رشته رشته است.
- پره های سطحی و حدفاصل در مقایسه با سایر پرندگان بسیار نرم و لطیف هستند.



شکل ۳۶ بررسی کیفی ساختار پر رتبه ۱ سه گونه جغد، کبوتر و ژئولوپتروس



- (A) لبه حمله (LE) پر رتبه یک جغد
- (B) لبه فرار (TE) پر رتبه یک جغد
- (C) لبه حمله (LE) پر رتبه یک کبوتر
- (D) لبه فرار (TE) پر رتبه یک کبوتر



(E) ساختار شانه ای لبه فرار ژئولوپتروس (برگرفته از یکمن و همکاران ۲۰۰۷)<sup>۳۳</sup>

(عکس از: <http://dragonsoftheair.files.wordpress.com>)

شکل ۳۶

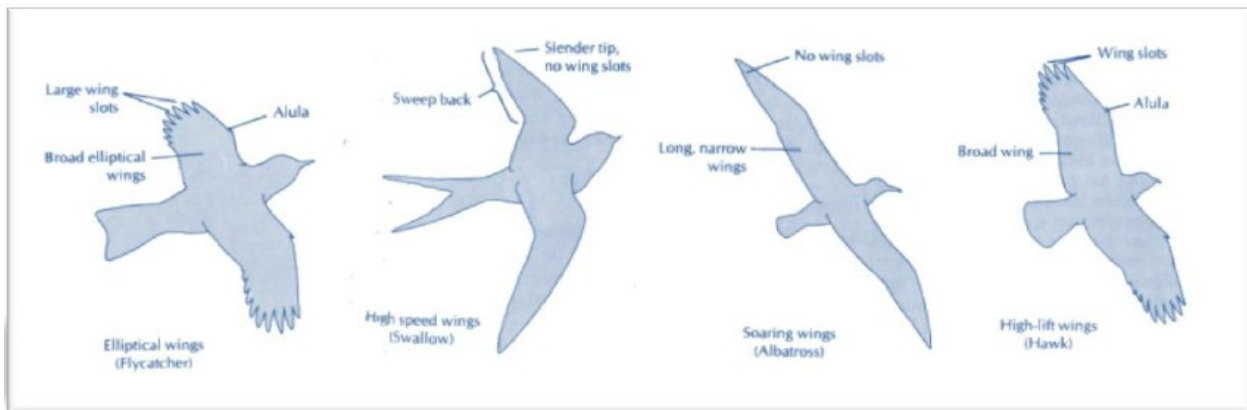
تصویر زیر برگرفته از وبگاه How stuff works، جمع بندی ای بر گفته های فوق است:

<sup>۱</sup> Slot



شکل ۳۷ پروهای جغد چگونه بی صدا کار می کنند؟

در مجموع، دسته بندی دانشنامه ویکیپدیا از بال ها را می آوریم که مشابه دسته بندی ذکر شده می باشد (که شامل چهار دسته اشاره شده در بالا است):



شکل ۳۸ دسته بندی انواع بال های پرندگان

## روش‌های پرواز هوایی

پرنده‌گان در هوا به روش‌های گوناگون و به تبع آن مکانیزم‌های گوناگون متناسب با آن‌ها پرواز می‌کنند که این روش‌ها و مکانیزم‌ها عبارتند از؛

- پرواز بی بالزنش (بدون بال زدن) در پرنده‌گان (هواسرش)
- پرواز بالزنش
- پرواز نوبتی

### پرواز بی بالزنش (بدون بال زدن) در پرنده‌گان (هواسرش)

به طور کلی پرواز هواسرش به دلیل نیاز به نسبت برا به پسا<sup>I</sup> بالا و پیچیده شدن و هزینه بردار شدن تصاعدی پرواز بالزنش با افزایش اندازه (به دلیل آهنگ رشد بالاتر جرم نسبت به اندازه)، در بین پرنده‌گان بزرگتر همچون لاشخورها، شکارچیان بزرگ، پلیکان‌ها و لک‌لک‌ها، و از این دست رایج‌تر و در بین پرنده‌گان کوچک‌تر کمتر رایج است.

پارامتر مهم دیگر نسبت هواسرش<sup>II</sup> است که به عبارتی برابر عکس شیب خط مسیر هواسرش نیز هست. به عنوان نمونه مرغ فولمار (مرغی مانند مرغ طوفان) تنها یک متر در هر ۸.۵ متری که هواسر می‌خورد پایین می‌آید (یعنی نسبت هواسرش ۸.۵). لاشخور سیاه آمریکایی، در مقابل، می‌تواند ۲۲ متر به ازای هر متر کاهش ارتفاع هواسر بخورد به عبارتی لاشخوری که فقط ۵۰ متر از سطح زمین ارتفاع دارد می‌تواند قبل از رسیدن به زمین مسیری بیش از ۱ کیلومتر را هواسر بخورد (نسبت هواسرش ۲۲)!

به جز در هوای ساکن، بسیاری از پرنده‌گان از جریان‌های هوایی که معمولاً به دو صورت بزرگ و منطقه‌ای یا کوچک و محلی هستند، برای هواسرش استفاده می‌کنند. جریان‌های بزرگ می‌توانند ناشی از ناهمواری‌های جغرافیایی مانند پرتگاه‌ها، دره‌ها، کوه‌ها، ساختمان‌های بلند و ... یا ناشی تغییرات منطقه‌ای شرایط هوا همچون دما مثلاً صعود جریان هوایی گرم شده از تابش خورشید و انعکاس زمین (جریان‌های روبه بالای دمایی) باشد. این حالت خاص و بهینه از پرواز هواسرش که در ارتفاع بالا توسط پرنده‌گانی نظیر عقاب، لاشخور و باز شکاری با بارگذاری بال<sup>III</sup> کوچک و ضریب منظری بال به نسبت متوسط تا کوچک انجام می‌گیرد، بلندپروازی<sup>IV</sup> یا بلندپروازی ایستا<sup>V</sup> هم خطاب می‌گردد.

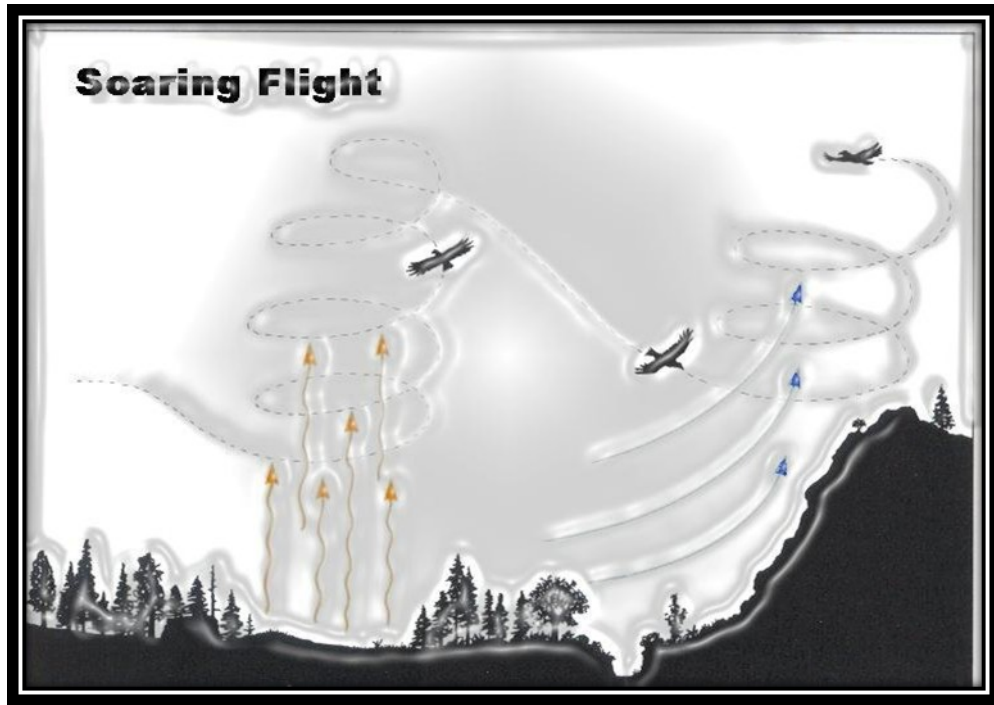
<sup>I</sup> L/D

<sup>II</sup> Glide Ratio

<sup>III</sup> Wing Loading

<sup>IV</sup> Soaring

<sup>V</sup> Static Soaring

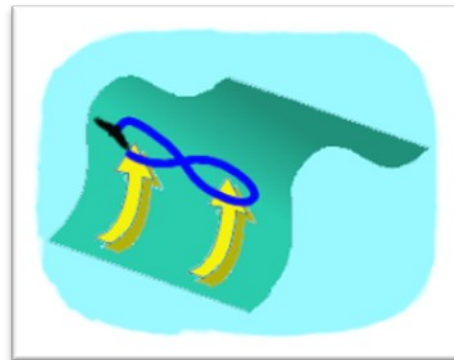


شکل ۳۹ بلندپروازی (ایستا) (عکس از <http://www.paulnoll.com>)

با دسته بندی بلندپروازی ایستا بنا به علت آن، به دو دسته عمده بلندپروازی شیب ارتفاع<sup>I</sup> و بلندپروازی دمایی<sup>II</sup> می رسیم<sup>۳۳</sup>.

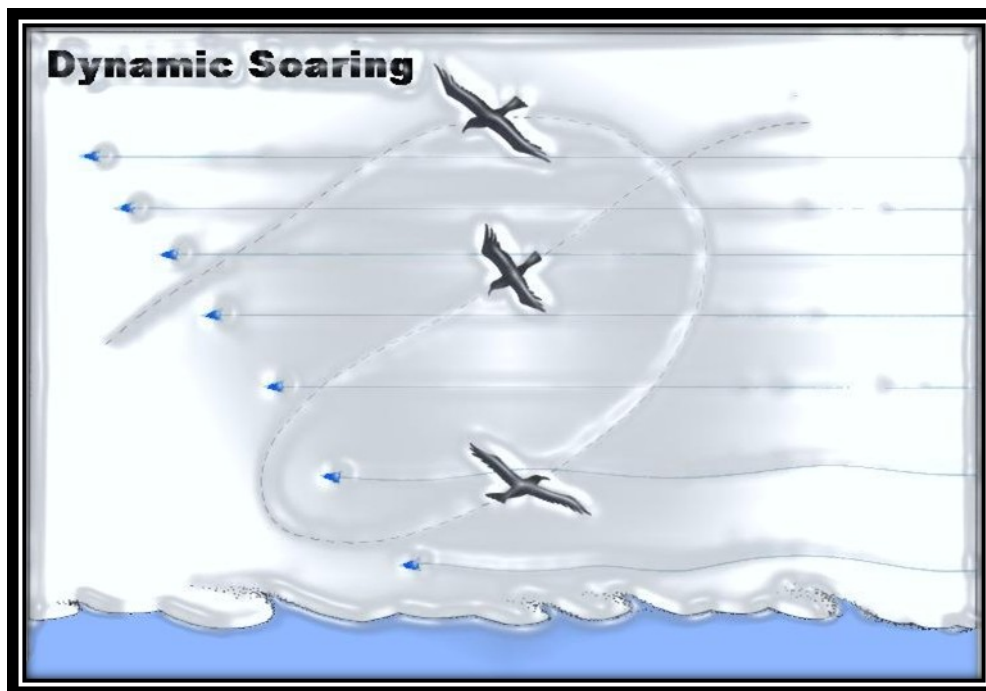


شکل ۴۱ بلند پروازی دمایی



شکل ۴۰ بلند پروازی شیب ارتفاع

<sup>I</sup> Slope Soaring  
<sup>II</sup> Thermal Soaring



شکل ۴۲ بلند پروازی پویا (عکس از <http://www.paulnoll.com>)

از سوی دیگر، آلباتروس ها و گونه هایی از این دست، بالای دریا که از این جریان ها خبری نیست، از جریان های کوچک محلی ناشی از برخورد باد و امواج و یا از تفاوت های سرعت حرکت با سرعت جریان باد استفاده می کنند. در اولی ماهیت این جریان ها کوچک و مقطعی است. لذا پرندگان دریایی نزدیک سطح دریا پرواز می کنند تا یک پرواز زیگزاگی از یک جریان هوایی به جریان هوایی بعدی داشته باشند. در دومی هم، پرنده حرکتی رفت و برگشتی (رو و پشت به باد) در بالای سطح آب اجرا کرده و با استفاده بهینه از انرژی جریان هوا، در حرکت پشت به باد سرعت گرفته و پس از تغییر جهت در حرکت رو به باد مجدداً با استفاده از باد ارتفاع می گیرد. به این حالت پرواز هواسرش مناسب بال های با ضریب منظری و بارگذاری بال بزرگ، بلند پروازی پویا<sup>۱</sup> هم می گویند.

### پرواز بالزنش

مکانیزم بالزنش شامل دو مرحله پایین ضرب و بالا ضرب است:<sup>۲۴</sup>

- پایین ضرب: بال به پایین و جلو ضربه می زند و تولید برا و پیشران می کند.
- بالا ضرب: بال به داخل به سمت بدن خم می شود (به طور عمده به دلیل چرخش استخوان بازو پیرامون محور طولی) و سپس بالا می آید و دوباره گسترده می شود تا برای پایین ضرب بعدی آماده گردد. نیروی برای آیرودینامیک منفعل<sup>۲</sup> نیروی لازم برای باز جمع کردن بال در بالا ضرب را در بسیاری از شرایط کروز در اختیار می گذارد، اگرچه حین برخاست نیروی بالا ضرب باید تامین گردد.<sup>۲۵</sup>

<sup>۱</sup> Dynamic Soaring

<sup>۲</sup> Passive



در پرواز بالزنش برخلاف پرواز هواسرش که در آن ساختار کلی بال ثابت می ماند، مشخصات هندسی بال (پهنه بال و طول وتر بال، قوس بال و...)، زاویه حمله آن (متناسب با توزیع فشار روی بال) تغییر می یابند.

همان گونه که گفته شد در فرایند بالزنش، پره‌های پروازی نخستین (رتبه ۱) به طور عمده کار پیشرانش پرنده را به عهده دارند. این پرها در زاویه ای قرار گرفته اند که ناحیه کم فشار پر به سمت جلوی پرنده قرار می گیرد و پرنده را به پیش می راند. بیشترین برا و نیروی پیشران در فاز پایین ضرب بال ها به دست می آیند. حین بالآمدن بال ها در بالا ضرب، پره‌های رتبه دو هم به تولید برا کمک می کنند.

در دو فاز این پرواز به ترتیب در فاز پایین ضرب غالب نیروی پیشران (علاوه بر نیروی برا) که به سمت جلو و بالاست و وزن و نیروی پسا را خنثی می کند، تولید می شود و در فاز بالا ضرب هم مقداری نیروی پیشران به همراه مقداری نیروی پسا تولید می گردد. برای کمینه کردن نیروی پسا، قسمت بیرونی بال در راستای مسیر حرکت قرار می گیرد تا زاویه حمله آن صفر گردیده و پسا کاهش یابد. به علاوه، پرنده تا قسمتی بال هایش را به داخل تا می کند و بدینوسیله با کاهش پهنه بال از پسای آن می کاهد.

از ابتدایی ترین مطالعاتی که به نوعی در این زمینه پیشرو بوده اند، می توان به پژوهش هایی اشاره نمود که در دهه هفتاد میلادی توسط ناسا و موسسه فن آوری ماساچوست (MIT) انجام شده اند خصوصا پژوهش احمدی و همکاران در سال ۱۹۷۵<sup>۳۶</sup> یا مجموعه پژوهش هایی که در کنفرانسی در همان سال ارایه شدند که انجمن فلسفه ای آمریکا به همین منظور تحت عنوان پرواز پرنندگان، دیمانسیون های معنی دار، انحراف آن ها از نیاز های شباهت ابعادی، و تاثیر این انحراف بر آیرودینامیک پرواز برگزار نموده بود. به علاوه خواننده برای مطالعه مفصلی روی پدیده های پرواز خصوصا از دیدگاه آیرودینامیک و دینامیک سیالات به مراجع<sup>۳۷</sup> و<sup>۳۸</sup> ارجاع داده می شود.

### پرواز نیوتنی

گاهی اوقات هم پرنده گانی هستند همچون دارکوب یا باز کوچک کسترل که پروازی ترکیبی از خود به نمایش می گذارند. یعنی قدری از بالزنش استفاده نموده و سرعت و ارتفاع می گیرند و سپس هواسر می خورند که به نوعی با توجه به اندازه و ضریب منظری نسبتا کوچک بال هایشان، در عین حفظ مانورپذیری بهینه سازی مصرف انرژی را هم به همراه دارد.

## طراحی بهینه پرنده ها از نگاه زیرسامانه‌ها

پرندگان دارای بال‌های با ضریب منظری پایین، مانند فاخته (قمری) و دارکوب، نیاز به فرار سریع از دست شکارچیان و دورهای تند و تیز دارند. اما شکارچسانی چون شاهین و قوش بال‌هایی با ضریب منظری بالا دارند که به آن‌ها قابلیت ماندگاری پرواز (حفظ وضعیت پروازی) با سرعت بالا برای مدت طولانی را می‌دهند. این پرندگان توانایی بال‌زدن به سرعت دارکوب‌ها را که مانورپذیرترند، ندارند.<sup>۳۹</sup>

ساختار استخوان‌های بسیاری از پرندگان، توخالی است تا وزن کاهش یابد و در عین حال طراحی سازه‌ای داخل آن‌ها به صورت یک شبکه<sup>۱</sup> از میله‌تارها که بدون افزایش وزن استخوان‌ها، بسیار محکمشان می‌کند تا نیروهای لازم برای پرواز را تحمل کنند. (برعکس پرندگانی که نیازی به پرواز ندارند و در عوض شیرجه می‌زنند، به وزن استخوان‌های توپر نیازمندند. مانند پنگوئن‌ها) به جای دندان‌های نسبتاً سنگین، پرندگان فک و منقارهای سبک دارند.



شکل ۴۳ ساختار استخوان پرندگان در مقابل استخوان پستانداران

حتی سامانه تولید مثل این پرندگان، به صورت خاص طراحی شده تا اندازه را کوچک کند. یک پرنده ماده تنها یک تخمدان دارد که به طور طبیعی خیلی کوچک است. در فصل تولید مثل، تخمدان تا ۱۵۰۰ برابر اندازه اش افزایش می‌یابد! در این مدت که توانایی پروازش ضعیف گردیده، پرنده ماده بیشتر متکی به پرنده نر برای غذا یافتن می‌شود.

<sup>۱</sup> Lattice

برای موفقیت در و ماندگاری پرواز، یک پرنده به ماهیچه های عظیمی نیازمند است. به عنوان یک رکورد، بیش از ۳۰ درصد وزن بدن یک مرغ مگس خوار را ماهیچه های آن تشکیل می دهند.

فرکانس بال زدن پرنده ها بسته به گونه آن ها و سرعت پرواز و وزنشان تفاوت می کند.

جدول ۲ فرکانس بالزنش تعدادی از گونه های مختلف پرندهگان<sup>۱</sup>

پرنده	فرکانس بال زدن (بالضرب در ثانیه)
مرغ ماهیخوار (حواصیل)	۲
مرغ شاه ماهی خوار (هرینگ گال)	۲.۸
سار	۵.۱
قرقاول	۹
مرغ مقلد آمریکای شمالی	۱۴
مرغ تیتس	۲۵-۲۷
مرغ مگس خوار گلوسرخ	۸۰

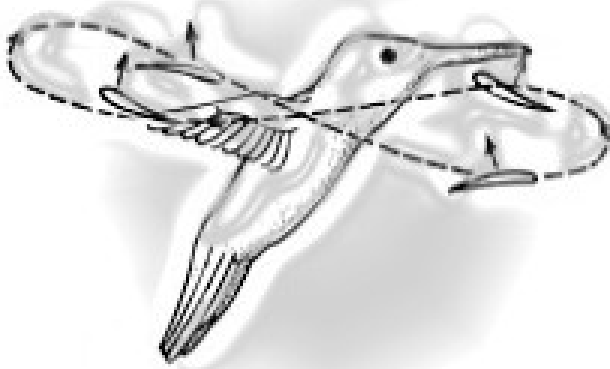


شکل ۴۴ مرغ مگس خوار با فرکانس بالزنش ۸۰ بار در ثانیه

مرغان مگس خوار به عنوان یک استثنا، توانایی پرواز شبیه هلی کوپتر ها دارند. این ها در واقع تنها گونه های شبه پرنده هستند که قابلیت پرواز ایستای پایدار واقعی را دارند. آن ها علاوه بر پرواز ایستا، می توانند پرواز به جلو، عقب(۱)، جهات، بالا و پایین را اجرا کنند. بعضی از گونه های آن ها تا ۱۰۰ بار در ثانیه نیز بال می زنند. مفصل های شان ای خارق العاده آن ها (از نوع گوی و

<sup>۱</sup> ر.ک. مرجع ۷۷

کاسه) این امکان را برایشان را فراهم می کند که بتوانند بدون جابه جایی، به صورت معکوس (از پشت) بال بزنند یعنی به حای فاز بالاضرب، فاز عقب ضرب<sup>۱</sup> داشته باشند و امکان جاروب کردن کامل یک ۸ انگلیسی را در مسیر بال زدن فراهم می کنند.



شکل ۴۶ مسیر طی شده توسط نوک بال مرغ مگس خوار حین پرواز ایستا



شکل ۴۵ مرغ مگس خوار در حال پرواز در فاز عقب ضرب

ماهیچه های پروازی به اسکلت پرنده در ناحیه سینه چسبیده اند. ماهیچه های قوی با مقدار زیادی از رگ های خونی رنگ تیره تری داشته و به ماندگاری در پرواز کمک می نمایند. ماهیچه های با رنگ روشن تر، برای پرواز انفجاری تند و تیز به کار می روند. به عنوان مثال، پرنده گان بازیگوش ماهیچه های سینه ای روشن تر دارند. این در حالی است که پرنده گان نیازمند به پروازهای طولانی، ماهیچه های سینه ای تیره دارند. بعضی از پرنده گان، مانند کبوتر، ترکیبی از ماهیچه های تیره و روشن را در ناحیه سینه خود دارند که به آن ها اجازه می دهد در عین حال که می توانند سریع بگریزند، مسافت های طولانی را نیز بتوانند پیمایند.

شش های پرنده بسیار با شش های ما متفاوت است. شش های آن ها متصل به مجموعه ای از کیسه های کوچک هوایی است که در تمامی بدن، حتی در داخل ماهیچه های سینه ای، پراکنده اند. هر نفس به طور خاص فرایند می شود تا اکسیژن بسیار بیشتری از آن چه شش های ما قادر به استخراج آن هستند، از هوا جذب گردد. همان طور که گفته شد، هزینه جابه جایی پرواز کردن به طور معمول از تمام اشکال جابه جایی بیشتر است. این سامانه تنفس، به پرنده گان اجازه می دهد که حتی در شرایط ارتفاعات بسیار زیاد و بالای سر رشته کوه ها اکسیژن مورد نیاز خود را تامین کنند.

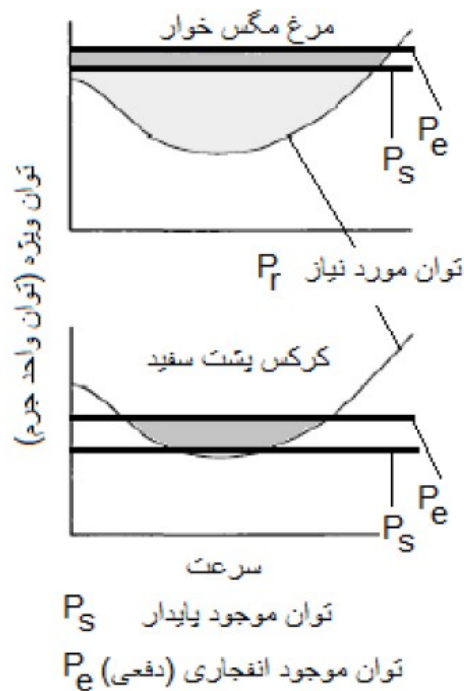
حتی دفع مواد اضافی در این موجودات هم در راستای کاهش وزن و اندازه رخ می دهد؛ به طوری که مایعات خروجی به جای از جنس اوره بودن که جرم مولی  $60.06 \text{ gram/mol}$  و چگالی  $31.32 \text{ gr/cm}^3$  دارد از جنس اسید اوریک است که جرم مولی  $168 \text{ gram/mol}$  و چگالی  $31.87 \text{ gr/cm}^3$  دارد. از طرفی دیگر، این به مدیریت آب بدن هم که در مورد آن ها بسیاری جدی است کمک می کند. به طوری که آب خروجی بدن تنها به صورت اسید اوریک خارج می گردد و از این طریق به بهینه ترین شکل ممکن چرخه خود را در بدن تکمیل می کند.

<sup>۱</sup> Backstroke

قلب پرندگان که خون را به اعضا پمپ کرده و اکسیژن را در بدن به گردش می اندازد، به نسبت از پستانداران بزرگ تر و قوی تر است. به همین ترتیب پرندگان مهاجر از پرندگان نامهاجر قلب بزرگتری دارند. برای تامین انرژی پرندگان مواد غذایی با انرژی زیاد مصرف کرده و آن را به صورت چربی ذخیره می کنند. پرندگان در حال پرواز بسیار بیشتر از حال استراحت در لانه بر روی شاخه درخت انرژی مصرف می کنند (تقریباً ۱۵ برابر؛ این نسبت برای انسان در حال دویدن در مقابل انسان در حال استراحت نشسته بین ۳ تا ۵ برابر است!). به همین علت است که با وجود تمامی بهینه سازی های طراحی برای پرواز، همچنان پرواز برای پرند هزینه بردار است و بسیار از پرندگان برای پرواز خود محدودیت های قایل می شوند. به طوری که بیش از ۳۵ گونه پرند دیگر پرواز نمی کنند و تعداد زیادی هم به ندرت پرواز می کنند.

### بررسی توان در اختیار و توان مورد نیاز پرواز

به طور کلی الگوهای پروازی تابع نوع بال، شکل بدن، زیست بوم و رژیم غذایی دارد. اما به طور کلی پرندگان کوچک تر، توان ویژه بیشتری در اختیار دارند و لذا در گستره بیشتری از سرعت های پروازی قادر به عملکرد هستند. این در حالی است که پرندگان بزرگ جثه تر با در اختیار داشتن توان کمتر، در گستره محدودتری از سرعت های پروازی مجبور به پروازند. نمودار زیر این مسأله را به خوبی برای دو نمونه مرغ مگس خوار و کرکس پشت سفید به نمایش می گذارد؛<sup>۴</sup>



شکل ۴۷ بررسی توان در اختیار و توان مورد نیاز پرواز برای دو پرند ه کاملاً متفاوت مرغ مگس خوار (بالا) و کرکس پشت سفید (پایین)

خطوط افقی نشان دهنده توان موجود<sup>۱</sup> پایدار و کوتاه مدت مقطعی توسط سیستم پیشران (بالزش) پرند ه است. خطوط منحنی هم مقدار تقریبی توان مورد نیاز پرواز در گستره ای از سرعت های متعارف را نمایش می دهد.

<sup>۱</sup> Power available

## دسته بندی پرندگان بر اساس صاف پیمودن مسیر پرواز

- مسیر مستقیم؛ مانند مرغابی و گنجشک
- مسیر موجی؛ مانند دارکوب و فنچ
- هر دو؛ زاغ کبود

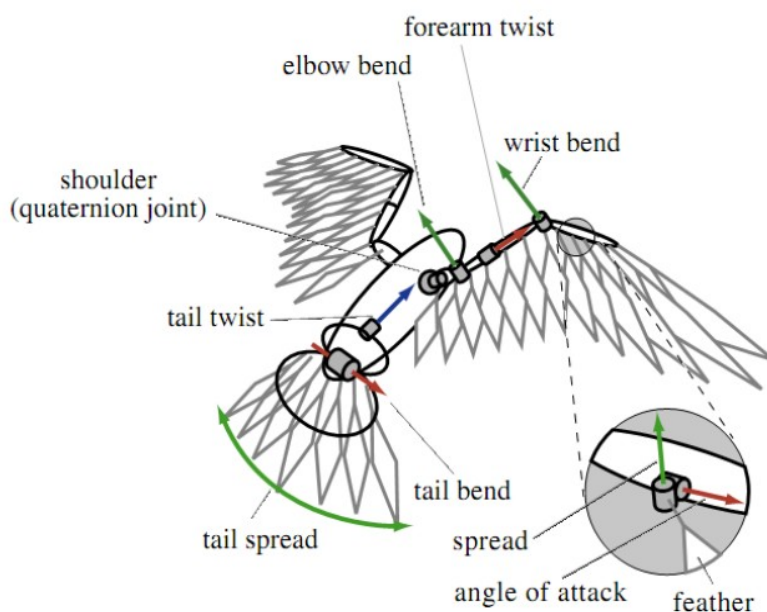
## مدل سازی دینامیکی و شبیه سازی

وو و پوپوویچ (۲۰۰۳)<sup>۴۱</sup> یک مدل مبتنی بر فیزیک مسأله برای تولید انیمیشن پرواز پرندگان ارائه داده اند. روش پیشنهادی تعداد واقعی بال زدن ها برای دنباله کردن مسیر دلخواه با مدل کردن پرنده به صورت اسکلتی مفصل دار با پره های قابل انحنای کشسان محاسبه می کند. حرکت پرنده با اعمال کردن گشتاورها و نیروهای آیرودینامیکی در زمان تحت شبیه سازی دینامیک پیشرو خلق می شود. برای هر بالزنش مسأله بهینه سازی به صورت جداگانه حل می شود تا طبیعی ترین حرکت تولید شود. پرواز نهایی با به هم پیوستن این سری از بالزنش های بهینه ایجاد می گردد. این مدل جزئی پرواز پرنده امکان ایجاد پرواز پرندگان گوناگون برای اجرای مانورهای گوناگون از جمله برخاست، کروز، به سرعت کاهش ارتفاع یافتن، دورزدن، و فرود آمدن را فراهم می آورد.



شکل ۴۸ یک دنباله انیمیشن تولید شده از حرکت بال ضرب زاغ حین برخاست

مدل مکانیکی اجزای اسکلت پرنده به صورت شکل ۴۹ می باشد.

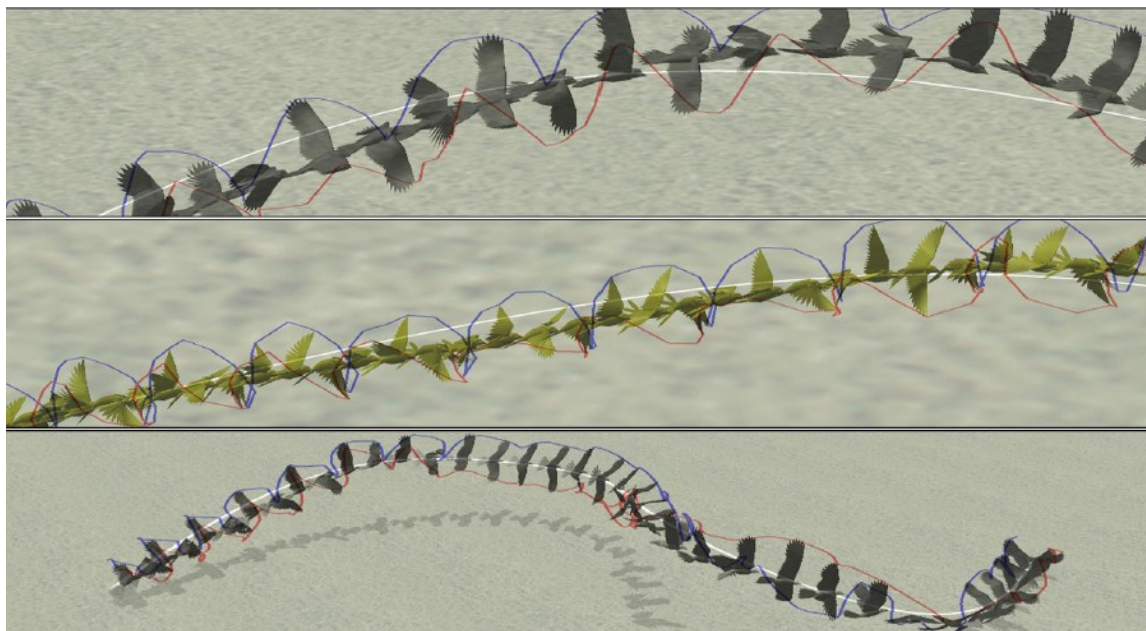


شکل ۴۹ مدل مکانیکی اجزای اسکلت پرنده

برای مدل کردن هر دو حرکت پیچشی و خمشی پیش بازو و دم هر کدام به دو اتصال تقسیم شده اند. مفصل های متحرک شامل دو شانه (shoulder)، دو خمشی آرنج (Elbow bend)، دو پیچشی پیش بازو (Forearm twist)، دو خمشی مچ (Wrist)

(bend) ، خمشی دم (Tail bend) ، پیچشی دم (Tail twist) ، پخشی دم (Tail spread) هستند. مفصل شانه سه درجه آزادی و بقیه مفصل ها هر کدام یک درجه آزادی دارند. بدنه ۶ درجه آزادی دارد که نماینده موقعیت و وضعیت جهانی آن است.

نتیجه چهار مرحله مدل سازی، بهینه سازی، ترکیب، و شبیه سازی انیمیشن برای یک مسیر خاص دلخواه و برای سه پرنده دلخواه زاغ، گنجشک و عقاب به ترتیب در زیر آمده است.



شکل ۵۰ نتیجه مدل سازی، بهینه سازی، ترکیب، و انیمیشن سازی برای یک مسیر خاص و برای سه پرنده دلخواه زاغ، گنجشک و عقاب

کار مشابهی با تکیه برهمزمان بودن انجام محاسبات و البته با بسط مکانیزم های دینامیکی و کنترلی کمتر نسبت به پژوهش فوق توسط ژو و همکاران انجام شده است.<sup>۴۲</sup>

## پرواز حشرات

از آنجایی که کانون توجه بسیاری از ربات کاران و خصوصا رهبریز<sup>۱</sup> کاران به حشرات، نحوه پروازشان و الهام گرفتن از آن معطوف بوده، سعی نموده ایم این مبحث را با رویکردی کاربردی تر در بخش ربات های الهام گرفته از طبیعت بررسی نموده و در آنجا به بسط تعدادی از مکانیزم های الهام یافته پروازی خصوصا در دسته حشرات بپردازیم؛ از این روی مورد توجه قرار دادن حوصله محدود این پژوهش، در این جا تنها به سرخط دامنه مطالعات بسنده می نماییم:

مطالعه ما بر پرواز حشرات شامل پرواز حشرات الگو به ترتیب گونه های معروف مگس، گونه های معروف زنبور، سنجاقک و گونه های معروف پروانه ها، بید و پشه، ویژگی های پرواز گونه های شبه حشره مرغ مگس خوار، ویژگی ها و شرایط زیستی اعم از ساختار بال، ماهیچه (!) ها، مکانیزم های رباتیک، دینامیک و کنترل پرواز، مکانیزم های تصمیم گیری، آیرودینامیک ناپایای جریان و روش های داده گیری و اندازه گیری و آشکارسازی، ریشه شناسی و پدیده تکامل، و ... می باشد.

<sup>۱</sup> MAV (Micro Air Vehicle)

## پروازهای با ماهیت ترکیبی و انواع دیگرگون پرواز

ما انواع دیگر پرواز را به طور کلی به دو دسته پروازهای با ماهیت ترکیبی و انواع دیگرگون پرواز تقسیم بندی نموده ایم که چه از رویکردهای مختلف طراحی و چه از لحاظ شرایط پروازی اعم از شرایط جریان، تکنیک های برآزایی و پیشرانش، مکانیزم های رباتیک، دینامیک و کنترل پرواز، شرایط و مکانیزم های زیستی و ... همانند موارد پیشین خود به تنهایی موضوع مجموعه پژوهش های بسیار می توانند گردند. لذا پرداختن به آن ها، خارج از حوصله این مقاله بوده و تنها به ذکر سرخط ها اکتفا می نمایم پروازهای با ماهیت ترکیبی عموماً از سوی گونه هایی از جانوران رخ می دهد که انتظار به نوع دیگری از پرواز یا جابه جایی در آن ها هست. به عنوان مثال قابلیت شنا کردن در گونه هایی از مرغابی ها، بیدها (!)، و ... یا قابلیت پرواز کردن و هواسرش در گونه هایی از ماهی ها یا قابلیت شنا کردن جانوران با حرکت زمینی همچون سگ ها، مارها و ... و یا پرواز و هواسرش گونه هایی که عموماً حرکت زمینی دارند همچون گونه ای از مارها، گونه ای از سنجاب ها، و ... می تواند از این دست باشد. بدیهی است تمرکز مطالعه ما مطابق سرخط های عنوان شده برای پدیده های پیشین بوده است.

انواع دیگرگون پرواز را می توان به گونه های خاص تعلق داد؛ آن هایی که به خاطر نامتعارف بودن پروازشان و یا مکانیزم های پروازشان به سختی می توان در یکی از طبقات پیشین دسته بندیشان نمود. از این دست می توان پرواز خفاش ها را هم از رویکرد جریان و دینامیک آن و هم از رویکرد کنترل، راهبری و مسیریابی نام برد. الگوی دیگر که پیش از این نیز بر خواص دوگانه و خارق العاده پرواز آن تاکید گردیده، مرغ مگس خوار می باشد. دیگری ماهی پرنده یا پرنده ماهی<sup>I</sup> می باشد که در عین شناگری ماهر بودن، قادر است از آب به بیرون بجهد(خصوصاً برای فرار از ماهیان شکارچی) و تا ۱۰۰ متر هواسر بخورد. به عنوان دسته ای دیگر و پیرو گرایش همیشگیمان به ریشه شناسی پرواز، به گونه های جانوری ماقبل تاریخ که ریشه های پروازهای کنونی در آن ها یافت می شود نیز گذری داشته ایم. از این دست می توان به گونه های معروف معروفترین پرندهگان ماقبل تاریخ یعنی تروسار<sup>II</sup> ها و به طور عام آویلا<sup>III</sup> ها که اجداد بسیاری از پرندهگان کنونی محسوب می گردند، به علاوه پلزیوسار<sup>IV</sup> ها که اجداد بسیاری از خزندگان و شناگران کنونی هستند اشاره نمود. بازهم محورهای مطالعه مطابق آن است که در پیش آمده است.

---

<sup>I</sup> Flying Fish

<sup>II</sup> Pterosaur

<sup>III</sup> Avilae

<sup>IV</sup> Plesiosaur



در دو حرکت زمینی و آویزه‌ای نیز تنها به ذکر مفاهیم پایه‌ای<sup>I</sup> بسنده نموده و بسط آن‌ها را به فرصت دیگری موکول می‌نماییم.

## حرکت زمینی

چرخه تحرک<sup>II</sup> که طی آن محرک ( که در غالب مجموعه‌های طبیعی و محرک‌های مصنوعی الهام‌گرفته از آن‌ها، سامانه‌های ماهیچه‌ای خواهد بود) یک دور رفتاری را طی نموده و باعث دوام حرکت می‌گردد، شامل دو فاز است؛

• فاز تاب خوردن<sup>III</sup> (بازیابی)

• فاز ایستایش<sup>IV</sup> (پیشرانش)

اگر پیمایش<sup>V</sup> را فاصله‌ای که جانور بین اولین گذاشتن یک پا و نقطه گذاشتن بعدی همان پا طی می‌کند، بدانیم، ضریب وظیفه<sup>VI</sup> را نسبت زمان ایستایش بر زمان پیمایش تعریف می‌نماییم.

به طور طبیعی، جابه‌جایی بدون فازهای فوق و صرفاً محوری، لاجرم از نوع حرکت موجی (مانند مار) خواهد بود.

## انواع حرکت زمینی

• حرکت جوارچی: آهنگ گام برداشتن<sup>VII</sup> (ترکیب و ترتیب زمین گذاشتن و برداشتن پاها)

۱. متقارن (قدم زدن<sup>VIII</sup>، سرعت‌گرفتن<sup>IX</sup> و یورتمه رفتن<sup>X</sup>)

۲. نامتقارن (تاخت<sup>XI</sup>)

○ چندین پا

○ چهارپا: شامل قدم زدن، سرعت‌گرفتن، یورتمه رفتن و تاختن

○ دوپا: قدم زنان (انسان‌ها، میمون‌های بزرگ، بعضی پرندگان، ...)

○ جهندگان (کانگورو، خرگوش‌ها، بعضی از پرندگان، ملخ‌ها، کک، ...)

○ بالا رفتن از ناهمواری‌ها: گریه‌سانان، سنجاب‌ها (جهت قوزک پا در سنجاب‌سانان برای تناسب با این مأموریت برعکس است)

○ لی‌لی کردن: کانگوروها، ...

• بی‌پا:

○ حرکت موجی عرضی<sup>XII</sup>

○ حرکت حول محوری<sup>XIII</sup>

<sup>I</sup> ر.ک. مرجع ۷۷

<sup>II</sup> Locomotor Cycle

<sup>III</sup> Swing Phase

<sup>IV</sup> Stance Phase

<sup>V</sup> Stride

<sup>VI</sup> Duty Factor

<sup>VII</sup> Gait

<sup>VIII</sup> Walk

<sup>IX</sup> Pace

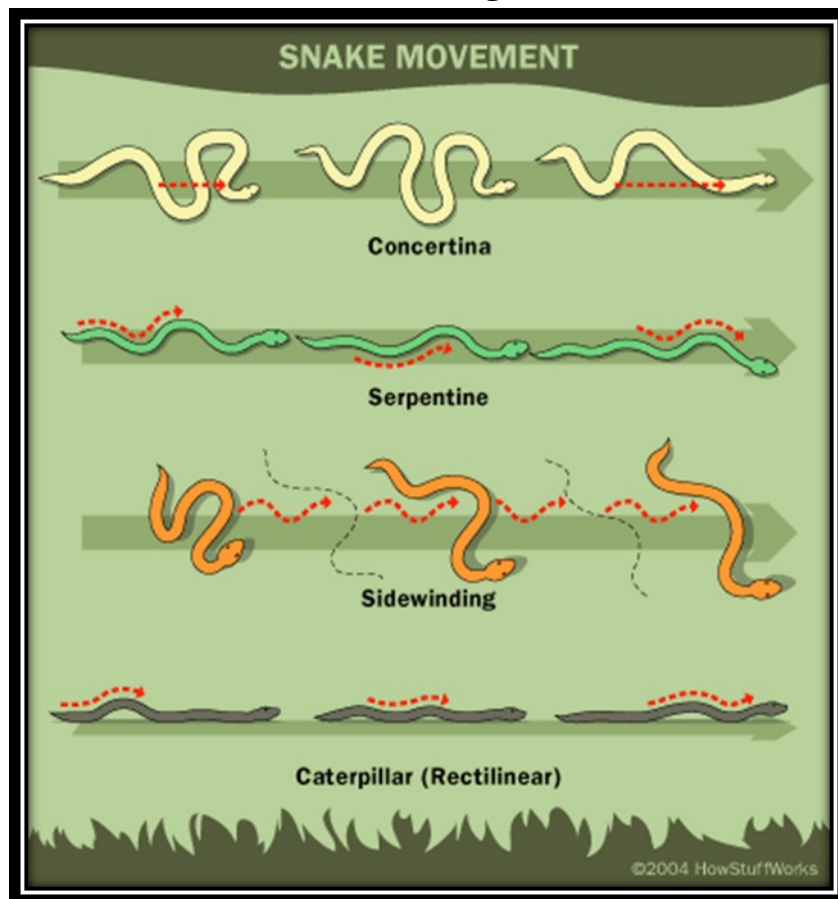
<sup>X</sup> Trot

<sup>XI</sup> Gallop

<sup>XII</sup> Lateral Undulation (Serpentine)

<sup>XIII</sup> Concertina

- حرکت پشت جاروب<sup>I</sup> (قسمت عقبی پیرو قسمت جلویی نیستند بلکه به صورت عرضی حرکت می کنند!)
- حرکت شبکه ای (راست خطی)<sup>II</sup>



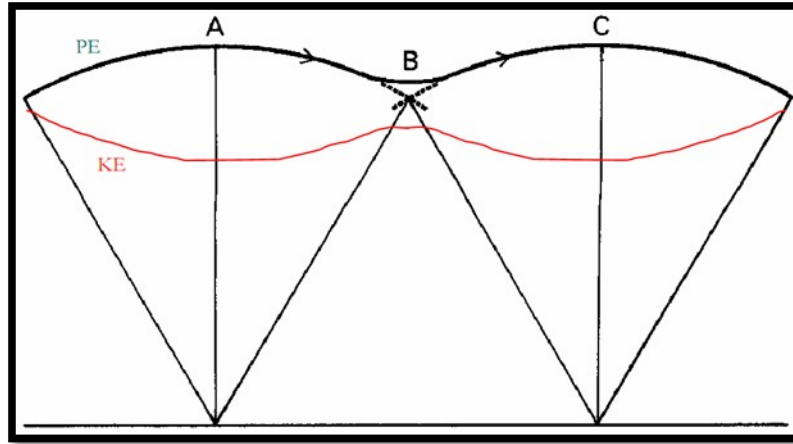
شکل ۵۱ انواع حرکت بی با

### حرکت زمینی و تاثیرات هزینه جابه جایی:

هوا از آب ویسکوزیته کمتری دارد، در نتیجه نیروی پسای کمتری ایجاد می کند. از سوی دیگر هوا پشستیانی کمتری از جسم درون آن می کند، در نتیجه تاثیر کمتری بر گرانش دارد. طبق رویکرد لاگرانژ، قدم زدن و دویدن در سطح هموار بایستی به کارخالص صفر نیاز داشته باشد، چرا که تغییر خالصی در انرژی پتانسیل و جنبشی مرکز جرم جانور رخ نداده است. اما در واقع اعضای متحرک به مانند آونگ معکوس در طول فاز ایستایش از فرایند پیمودن (پیمایش) عمل می کنند.<sup>۴۳</sup>

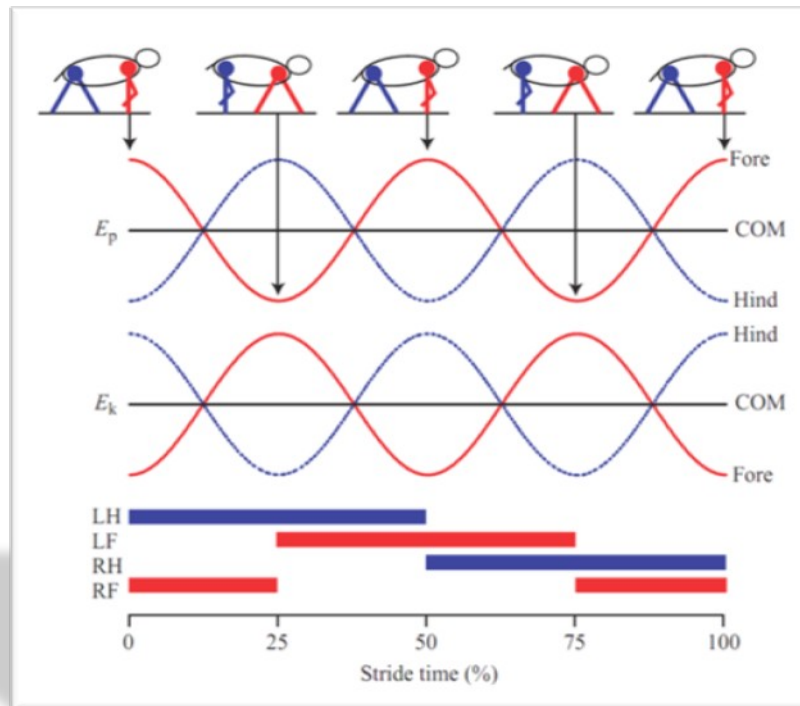
<sup>I</sup> Side Winding

<sup>II</sup> Reticular (Rectilinear)



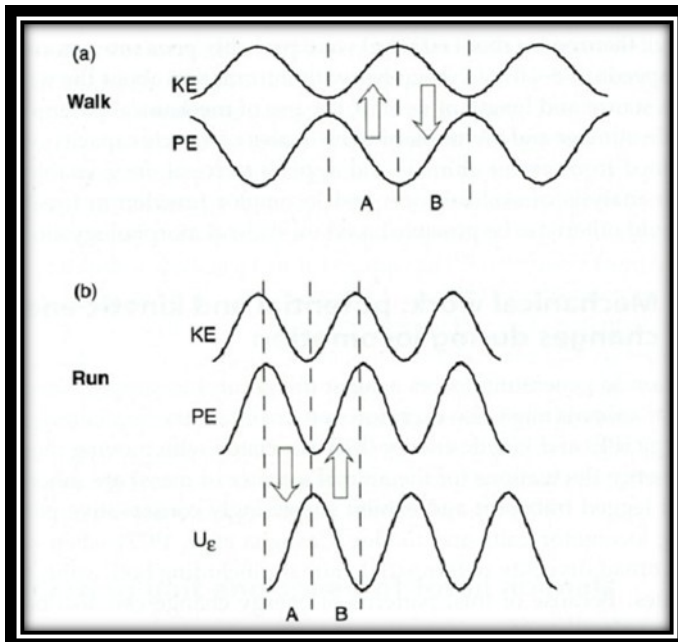
شکل ۵۲ مدل حرکتی آونگ معکوس ساده شده

مشخصه مدل حرکتی آونگ معکوس، تغییر چرخشی بین انرژی پتانسیل گرانشی و انرژی جنبشی است. در شکل ۵۳ که این مفهوم را تشریح می کند، چارک های ابتدایی و انتهایی بدن جانور به عنوان آونگ های معکوس به نمایش درآمده است. اگر توزیع جرم بین این دو یکسان بوده و اعضای متحرک حرکت تکراری در بازه های زمانی با فاصله یکسان داشته باشند، حرکت آونگی چارک جلو و عقب یکدیگر را خنثی می نمایند. وقتی چارک های جلویی در بالاترین قسمت قرار دارند (یعنی انرژی پتانسیل گرانشی بیشینه است) چارک های عقبی در پایین ترین قسمت هستند. به صورت مشابه، اگر چارک های جلو در سریعترین حالت خود باشند (انرژی جنبشی بیشینه) چارک های عقبی کندترین هستند. نمودار ستونی آبی و سرخ پایین شکل هم زمان تماس پاها با زمین را نشان می دهند. ترتیب برخورد پاها با زمین پای چپ عقب (LH)، چپ جلو (LF)، راست عقب (RH)، راست جلو (RF) است. خط COM نشان دهنده مکان مرکز جرم و Fore نشان دهنده مکان چارک جلو و Hind نشان دهنده مکان چارک عقب است. ۴۴.

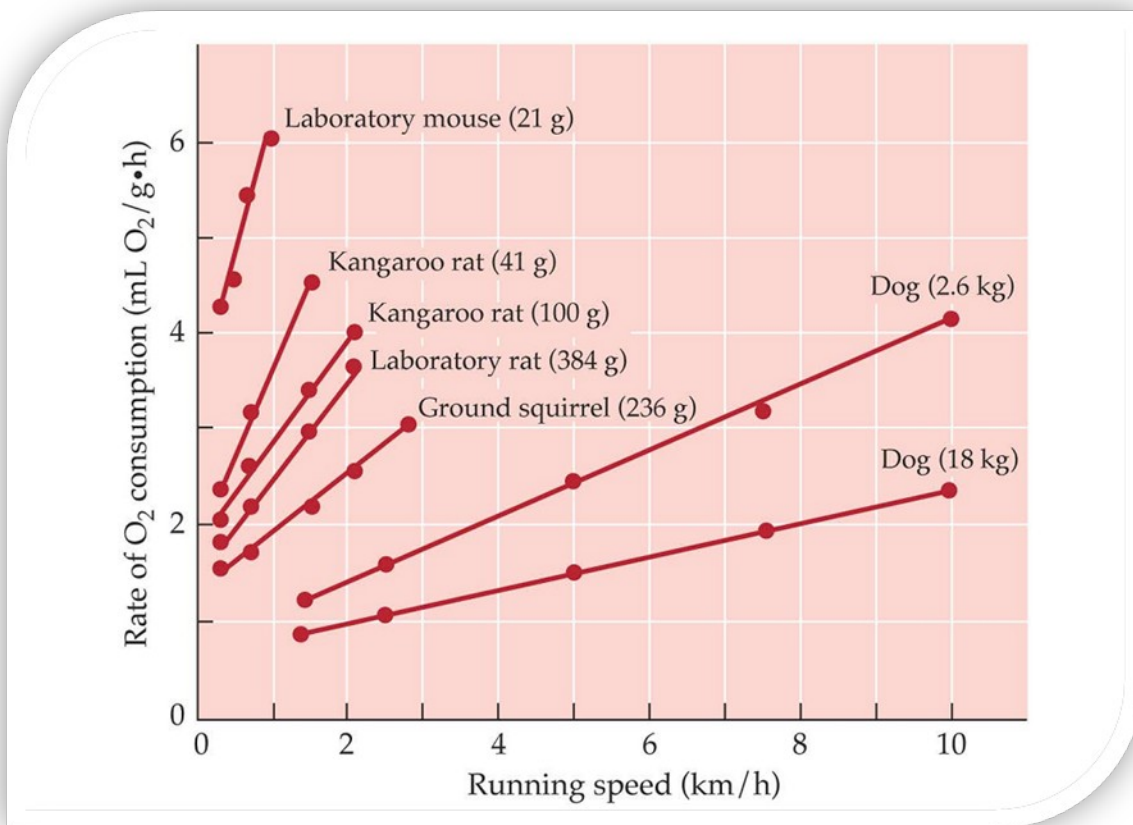


شکل ۵۳ یک دیاگرام فرضی اثبات شده برای حرکت چهارپا

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که همان‌گونه که انتظار می‌رود، الگوهای حرکتی اعضا هزینه‌ها را کمینه می‌کنند؛



شکل ۵۴ مدل تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل حین قدم‌زدن و دویدن؛ هزینه جابه‌جایی الگوهای حرکتی تمایل به کمینه‌شدن دارد.

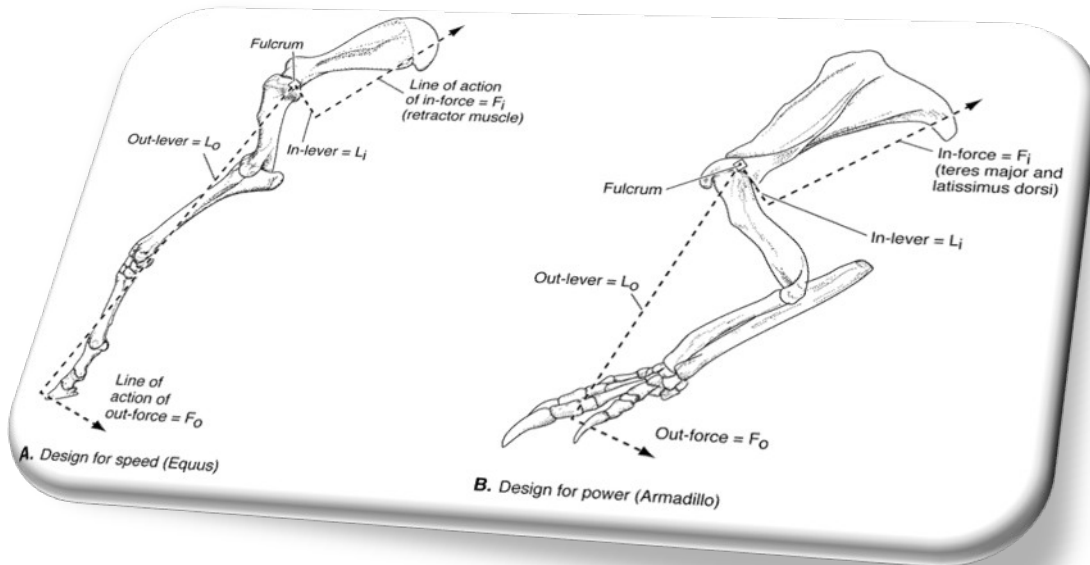


شکل ۵۵ مصرف اکسیژن به عنوان معیار متابولیسم ماهیچه‌ای و مصرف انرژی در جانور تابعی از سرعت دویدن برای گونه‌های مختلف جانوران

## طراحی ساختار پا با توجه به مأموریت

در یک جمع بندی: دوندگان خوب دارای شرایط زیرند:

- پاهای باریک و متناسب
  - جرمشان نسبتا در نزدیکی مرکز جرم توزیع شده است
  - پاها زیر بدن قرار گرفته اند
  - چرخش کتفی دارند
  - ستون فقرات قابل انحنای دارند
  - بالاتنه ای با فشردگی عرضی دارند
  - روی نوک انگشتان راه می روند
  - فیبرهای قابل انعطاف در بدن تاندون ها و رباط ها دارند.
- در مقابل طراحی بر مبنای سرعت، رویکرد طراحی ساختار پا بر اساس قدرت در شکل ۵۶ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۵۶ رویکرد طراحی ساختار پا بر اساس قدرت (گونه گورکن آرمادیلو) (B) در مقابل طراحی بر مبنای سرعت (گونه نسل مادر اسب، اکیوس) (A)

نیروی اهرم درونی<sup>I</sup> ( $F_i$ ) با نیروی اهرم برونی<sup>II</sup> ( $F_o$ ) و سرعت برونی ( $V_o$ ) با سرعت درونی ( $V_i$ ) طبق روابط زیر به نسبت<sup>III</sup> نسبت دنده<sup>III</sup> متناسباند. این روابط همان گونه که از شکل برمی آید، تابع هندسه اعضا (جای تکیه گاه<sup>IV</sup> و ...) و نیروها هستند.

$$GR = \text{Gear Ratio} = L_o / L_i, F_o = (F_i \cdot L_i) / L_o = F_i / GR, V_o = (V_i \cdot L_o) / L_i = V_i \cdot GR$$

<sup>I</sup> In-lever

<sup>II</sup> Out-lever

<sup>III</sup> Gear Ratio

<sup>IV</sup> Fulcrum

## حرکت زیرسطحی

به طور عمده شامل کندن زمین است و در گونه‌های چون موش کور، گورکن و ... مشاهده می‌گردد.

## حرکت آویزان

این حرکت که به نوعی یکی از دشوارترین انواع حرکت از رویکردهای گوناگونی چون کنترل و مصرف انرژی محسوب می‌گردد، در عین حال، بیش از بقیه انواع حرکت بنا به ماهیت نیروها و جهت آن‌ها، به حرکت فضاپیماها خصوصا در مانورهای کنارگذر<sup>۱</sup> یا کنترل گرایش<sup>۲</sup> و چرخش و ... با اتکا به یک نیروی مرکزی نزدیک است. نمونه‌ی این رفتار در گیبون‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۵۷ حرکت گیبون‌ها به عنوان نمونه‌ای از حرکت آویزه‌ای

---

<sup>۱</sup> Flyby

<sup>۲</sup> Attitude Control & Rotation

## بخش ۴. زی‌روبری<sup>۱</sup>

حال که به درک و تحلیلی مناسبی از آن چه در طبیعت می‌گذرد، رسیده ایم، گام در وادی نوی می‌نهیم که طبیعت و مهندسی (و طبعا علوم طبیعی و علوم مهندسی) را پیوند می‌دهد. این بخش را همان گونه که الهامگاه آن، پلی است بین زی<sup>II</sup> و مهندسی، به عنوان پلی برای پیوند پایه‌های دوگانه طبیعی و مهندسی، بنیادی و کاربردی، الهام و محصول و ... معرفی می‌نماییم. زی بن مضارع و ریشه و تداعی کننده معنای زیست و زندگی و طبیعت است. بنا به لغت‌نامه برخط دهخدا داریم؛

**روبر**. [بُ] (ا مرکب) (از: رو + بُر، مخفف بُریده) الگو. مدل. و رجوع به روبر کردن شود.  
**روبر کردن**. [بُ ک دَ] (مص مرکب) (اصطلاح خیاطی) بریدن از روی جامه ای یا الگویی و غیره. بریدن جامه ای از قطعات جدا کرده<sup>۴</sup> جامه ای دیگر. (یادداشت مولف). و رجوع به روبر شود.  
مهندسی زی‌روبری یعنی الگوبرداری و کپی برداری از زیست و طبیعت؛ چونان خیاطی چیره‌دست از الگوهای زیستی و طبیعی رو بریدن و روبر کردن.

به بیان دقیق‌تر، زی‌روبری آزمون طبیعت و مدل‌ها، سامانه‌ها، فرایندها، و اجزای آن برای کپی برداری همپا یا الهام گرفتن از آن برای حل مشکلات بشریت است. کلمات Biomimicry و Biomimetics از کلمات یونانی βίος، bíos با تلفظ بی‌آس به معنی زندگی و mimesis با تلفظ میم‌سیس به معنی تقلید کردن، کپی برداری و پیروی است. کلمات دیگر جایگزین، Bionics ، Bio-inspiration ، Biognosis هستند. اغلب مطالعه زی‌روبری بر پیاده‌سازی عملکردی که در طبیعت یافته شده تأکید می‌کند تا این که صرفاً ساختارهای زیستی تقلید شوند. به عنوان مثال، در علوم کامپیوتر، سایبرنتیک تلاش در مدل کردن مکانیزم‌های پس‌خور و کنترل که ذاتی رفتار هوشمندند می‌کند، در حالی که هوش مصنوعی تنها تلاش در مدل کردن عملکرد هوشمند می‌کند، فارغ از راه خاصی که بتوان به آن عملکرد دست یافت.

روبری یا الگوبرداری هشیارانه از نمونه‌ها و مکانیزم‌های ارگانیزم‌های طبیعی و زیست‌بوم، شکلی از استدلال مبتنی بر مورد کاربردی است، که با طبیعت به منزله پایگاه داده‌ای از راه‌حلهایی برخوردار می‌کند که همین حالا هم جواب می‌دهند. حامیان این نظریه مدعی‌اند که فشار انتخابی و آگاهانه بر همه‌گونه‌های زندگی طبیعی شکست‌ها را کمینه کرده و حذف می‌کند. هر چند همه مهندسی می‌تواند به نوعی یک شکل زی‌روبری اطلاق شود، ریشه‌های مدرن این زمینه عموماً به باکمینستر فولر نسبت داده شده و تدوین پس از آن به صورت یک رشته مطالعه و زمینه پژوهش به جنین نیوس<sup>۴۵</sup> منسوب م‌گردد. به طور تقریبی، می‌توانیم سه سطح زیست‌شناسی در زیا و گیا (جانداران و گیاهان)<sup>III</sup> برشمریم که فناوری قابلیت مدل کردن دارد؛

- روبری از روش‌های ساخت و تولید طبیعی (مانند تولید انرژی از زیست‌گاز و زیست‌جرم، الهام از فرایند فتوسنتز و ...)
- روبری مکانیزم‌های یافت شده در طبیعت (مانند ولکرو که معروف‌ترین مثال زی‌روبری است و در سال ۱۹۴۸ مهندس سویسی جرج دومسترال حین تمیز کردن سگش از خار و تیغ‌های جمع شده روی پوستین آن هنگام قدمزنی در بیرون، متوجه شد که چگونه قلاب‌های ریز خارها به خزهای پوستین سگ می‌چسبند. همین ایده باعث

<sup>I</sup> معادل Biomimetics

<sup>II</sup> زیست، زندگی، طبیعت و حیات

<sup>III</sup> Fauna and Flora

اختراع چسب های بسیار رایج ولکرو ملقب به چسب اسکاچی شد که در بسیاری از لباس ها، کیف، کفش و کتانی و ... کاربرد یافت.)



شکل ۵۸ راست: چسب های ولکرو به کار رفته در کفش های ورزشی چپ: ریزساختار مکانیزم چسبیدن قلاب های دو لایه چسب ولکرو به هم

• روبروی اصول سازمانی از رفتار اجتماعی ارگانیزم ها (مانند رفتار دسته ای پرندگان، بهینه سازی کاوش و به دنبال غذا گشتن مورچه ها و زنبورهای عسل، هد یا هوشمندی دسته جمعی یا دسته ماهی، و ...) جالب توجه است که علاوه بر زمینه های مختلف مهندسی، این رویکرد می تواند کاربرد های متعددی در علوم پزشکی، سیاسی و حتی علوم تجاری و کسب و کار و اقتصادی نیز داشته باشد!<sup>۴۶</sup> برای تفهیم بیشتر مفهوم، خواننده به مراجع<sup>۴۷</sup> و<sup>۴۸</sup> ارجاع داده می شود. در این جا برای تشریح رویکردها به ذکر یک نمونه الهام گرفته از پرندگان و یک نمونه الهام گرفته از حشرات و یک نمونه الهام گرفته از شنای بهینه ماهیان، و یک نمونه نیز الهام گرفته از حرکت زمینی می پردازیم.

## پرواز حشرات، منبع الهام

به عنوان نمونه ای از ریزپرنده های الهام گرفته از حشرات می توان از انتوموپتر<sup>I</sup> ربات شبه حشره با چند مود حرکتی (پرواز/خزیدن) کار مایکلسون و همکاران<sup>۴۹</sup> یاد کرد. پرواز در مریخ به دلیل جو رقیق آن بسیار دشوارتر از پرواز در زمین است نیاز به یک رسانگر هوایی<sup>II</sup> با قابلیت پرواز در رژیم پرواز با رینولدز بسیار پایین و عدد ماخ بسیار بالا دارد. این مشکلات با محدودیت های اندازه برای جا دادن و مستقرشدن از یک کپسول هوایی محافظ دشوارتر و پیچیده تر نیز می گردد. پروژه انتوموپتر با هدف مأموریت های اکتشافی پروازی جوی مریخ در آینده انجام گردیده است. یک انتوموپتر از تکنیک های زی روبروی و پیشرفته کنترل گردش جریان<sup>III</sup> یاری می جوید تا به نیروی برای بسیار بیشتر از مقدار ممکن از طراحی سنتی<sup>IV</sup> برسد. بنا به ایرویدینامیک سنتی، بعضی از حشرات نمی توانستند نیروی برای کافی تولید کنند تا حالت پروازی خود را حفظ کنند. هرچند، در سال ۱۹۹۴، چارلز الینگتون<sup>۵۰</sup> از دانشگاه کمبریج تعیین کرد که یک گردابه در ابعاد میکرو، در لبه حمله بال، منبع نیروی برای گم شده بوده است. هر چه ابعاد پرنده و عدد رینولدز پرواز افزایش یابد، این اثر کاهش می یابد. یک هواپیما در مریخ به پهنه بال ۱ متر، در همان عدد رینولدزی پرواز خواهد کرد که حشرات در زمین!

<sup>I</sup> Entomopter=Entom (Latin for Insect) + opter (Lating for flyer) , e.g. Ornithopter=Ornith(Latin for Bird)+opter(Latin for flyer)

<sup>II</sup> Aerial Vehicle

<sup>III</sup> Circulation

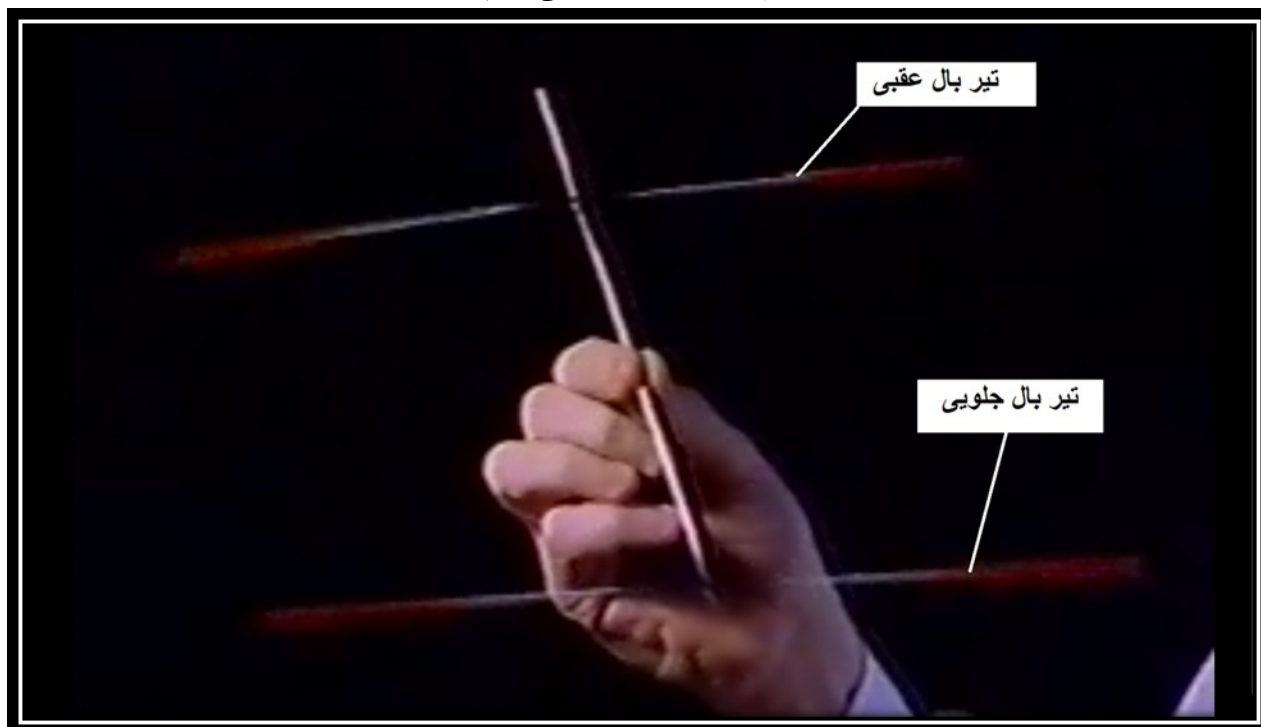
<sup>IV</sup> Conventional Design



خواننده برای بسط بیشتر موضوع، به مطالعه مراجع <sup>۵۱</sup> و <sup>۵۲</sup> و <sup>۵۳</sup> مراجعه نماید.

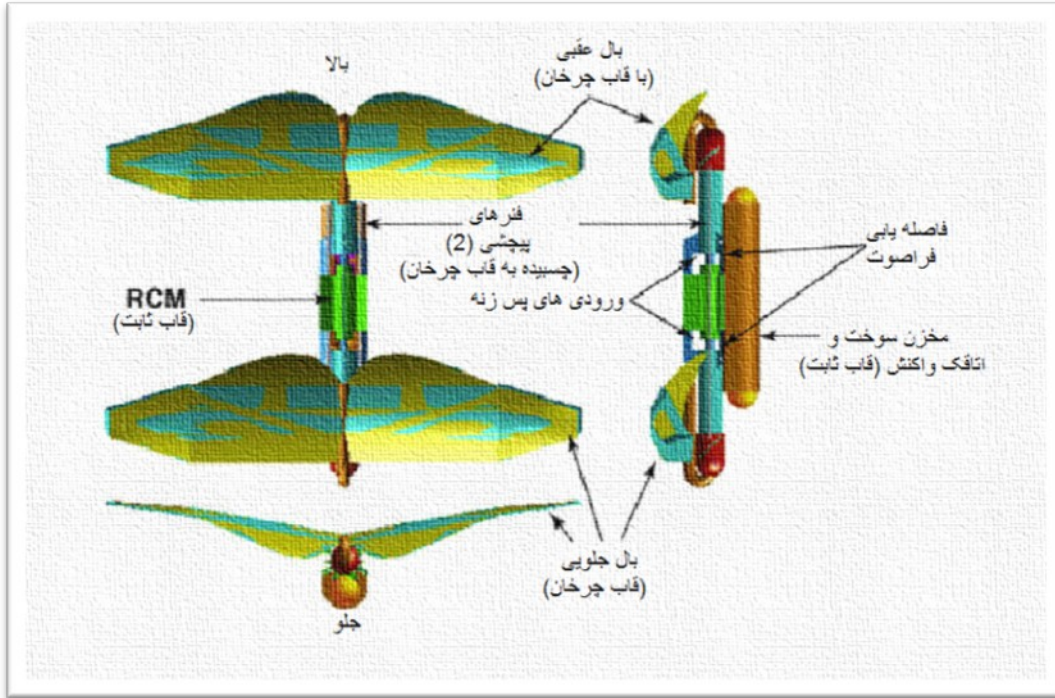
به کارگیری مکانیزم عظیم برازای انتوموپتر می تواند راهی مؤثر برای طراحی رسانگرهایی باشد که قادر به پرواز در جو مریخ هستند. مزیت دیگر، نیروی گرانش کاهش یافته مریخ ساختارهای بسیار سبک تر را ممکن می کند.

بنا به توضیحات مایکلسون مدیر این پروژه، برای موفق شدن در حفظ شرایط پروازی مطلوب نیازمند به کارگیری تکنیکی که مورد استفاده حشرات است، هستیم و آن فرایند تشدید یا رزونانس است. یک حشره در هر بالضرب انرژی را در سازه بدنش و در ساختار ماهیچه ای اش ذخیره می کند و سپس آن انرژی را به این سامانه باز آزاد می گرداند، تا فرایند بالزنش را بسیار بهینه تر کند؛ درست مانند انتوموپتر که به گونه ای الهام گرفته از همین پدیده طراحی و ساخته شده که با حرکت تیر بال جلویی کل ساختار تحریک شده، به طوری که تیر بال عقبی شروع به حرکت و نوسان می کند. به عبارتی می توانیم با ورودی ضربه های انرژی هم فرکانس (با فرکانس نوسان ساختار) مقدار زیادی بالزنش با صرف انرژی بسیار کمتر در سامانه تولید نماییم. این گونه سوخت پرنده در بهینه ترین حالت ممکن مصرف شده، به مداومت پروازی بهتری دست می یابیم.

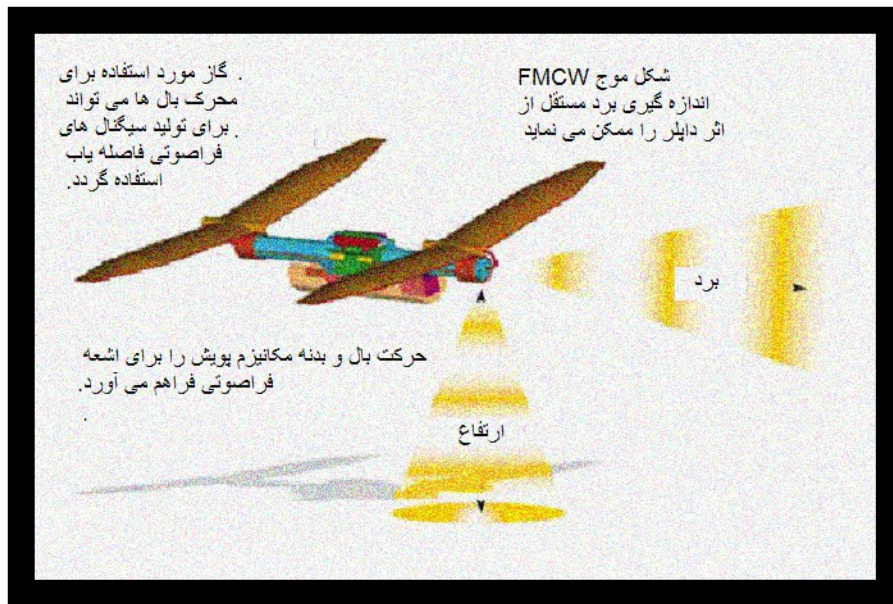


شکل ۵۹ سازه انتوموپتر با الهام از سازه بدن حشرات به گونه ای طراحی و ساخته شده که با سوداستفاده از پدیده تشدید مصرف انرژی و لذا هزینه جابه-جایی را به شدت کاهش می دهد.

مکانیزم های دیگر به کار گرفته شده نیز در شکل ۶۰ و شکل ۶۱ به تصویر کشیده شده اند.



شکل ۶۰ سه نمای ساختار انتوموپتر طراحی و ساخته شده



شکل ۶۱ چند مکانیزم راهبری به کار رفته در ریزربات پرنده انتوموپتر

برای ساخت سازه بال ها، از روش کشت استریولیتوگرافی<sup>۱</sup> استفاده شده و ساختارهای سخت کننده بال با استفاده از روش های شبیه سازی رسوب گذاری ترکیبی تولید شده اند. برای جزئیات بیشتر خواننده به مرجع<sup>۵۴</sup> ارجاع داده می شود.

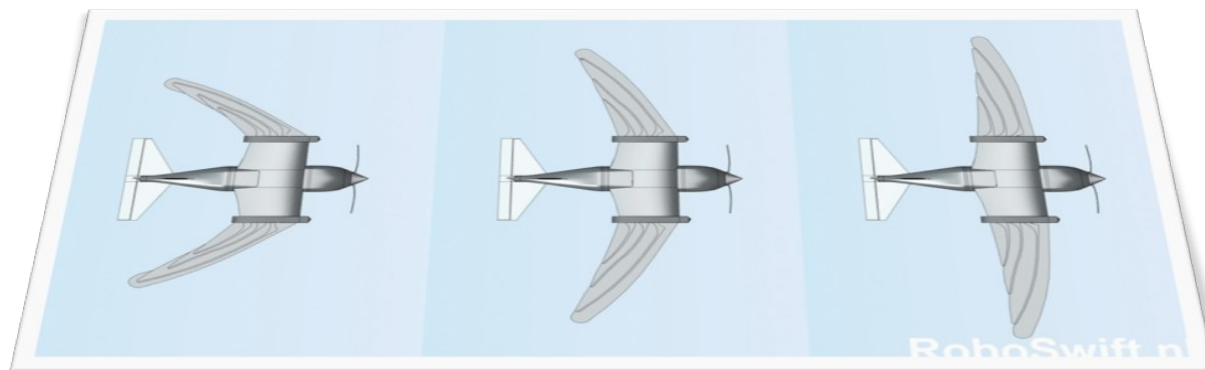
<sup>۱</sup> Stereolithography Growth

## پرواز پرندگان، منبع الهام

پروژه روبوسویفت<sup>۵۵</sup> (ریزربات الهام یافته از گونه ای پرستوی مهاجر به نام سویفت قادر به تغییر شکل بال) توسط تیمی از دانشگاه TU Delft هلند و دانشگاه واجنینگن هلند در اولین نمایشگاه آمریکا- آسیایی و ارزیابی فناوری رسانگر هوایی میکرو و زمینی بی سرنشین سال ۲۰۰۸ در هندوستان حضور پیدا کردند. هواپیمای میکروی طراحی و ساخته شده به مانند یک سویفت پرواز کرده و اطراف خود را مشاهده و بازرسی می کند و دارای دو بال قابل حرکت است. این ربات پرنده که از سویفت ها یکی از بهینه پرواز-ترین پرندگان طبیعت الهام یافته است، خصوصیات بال بی نظیری دارد؛ به طوری که هندسه بال و مساحت سطح بال می تواند به طور پیوسته تنظیم گردند؛ در نتیجه روبوسویفت مانورپذیرتر و بهینه تر می شود. در کاربرد، روبوسویفت می تواند مانند یک سویفت واقعی بدون آن که شناسایی شود به عملیاتی دیده بانی برود، در حالی که سه دوربینش را برای دیده بانی وسایل نقلیه و انسان ها به کار می گیرد. همچنین می تواند برای مشاهده دیگر سویفت های واقعی در بین آن ها رفته، و پژوهش های زیست شناسی جدیدی را ممکن نماید.

### تغییر شکل<sup>۱</sup>

روبوسویفت پهنه بال ۵۰ سانتی متر و وزن ۸۰ گرم داشته، می تواند گروهی از سویفت ها را به مدت ۲۰ دقیقه دنبال کرده، و دیده بانی زمینی تا مدت یک ساعت را به کمک باتری های لیتیوم پلیمر خود انجام دهد. ملخ گردان پیشران در حین هواسرش به عقب تا می شود تا پسای هوا را کمینه کند. ویژگی های یکتای طراحی بال تغییر شکل دهنده، از سویفت الهام گرفته شده اند. تغییر شکل در سویفت ها به معنای این است که بال ها حین پرواز می توانند با تا کردن پرها به روی هم به عقب جمع گردند و لذا شکل بال و مساحت سطح آن تغییر یابد. این پدیده در روبوسویفت هم امکان دارد و روبوسویفت با تغییر شکل بال هایش هدایت می کند. با این کار این ریزپرنده می تواند عملکرد بهینه داشته و با بازده بالا پرواز کند، و به شدت در سرعت های خیلی بالا و خیلی پایین مانورپذیر باشد، درست مثل یک سویفت!



شکل ۶۲ روبوسویفت با جمع کردن پرهای هر بال روی هم قادر به تغییر شکل بال ها در وضعیت های مختلف است و از این راه به پرواز فوق بهینه ای دست می یابد. (عکس از <http://www.roboswift.nl>)

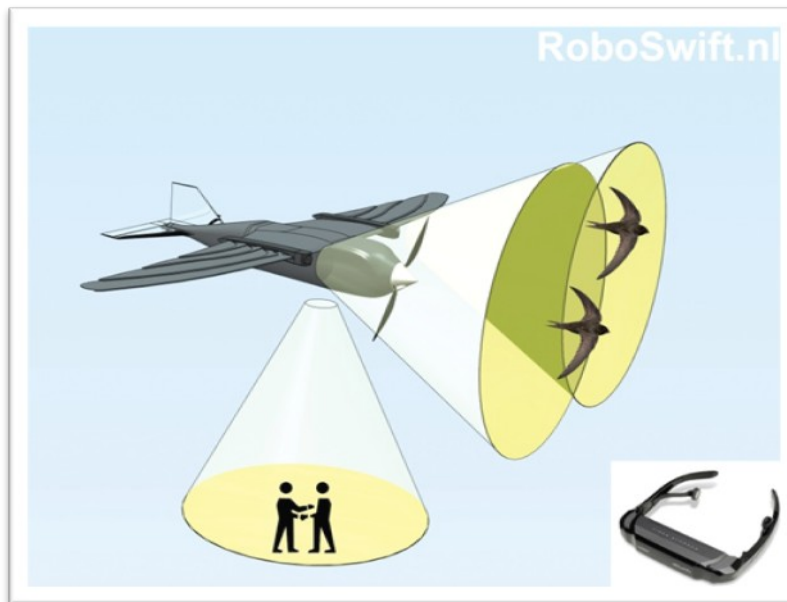
روبوسویفت با جمع کردن بال هایش به عقب و باز کردنشان، شکل و مساحت سطح بال ها را تغییر داده، بهینه تر و چابک تر از رقبای بال ثابت خود پرواز می نماید. همچنین ریزپرنده با ملخی خاص به پیش رانده می شود که در حین هواسرش تا شده و پساً را کمینه می نماید.

<sup>۱</sup> Morphing



شکل ۶۳ تصویر دو نمونه پرستوی مهاجر سویفت واقعی

تیم روبوسویفت یافته است که تنها با استفاده از چهار پر، بسیار کمتر از تعدادی که پرنده استفاده می کند، به اندازه کافی به بال ظرفیت تغییرشکل می دهد؛ این ویژگی تولید واقعی طراحی را از لحاظ امکان سنجی ممکن می نماید. هدایت روبوسویفت با تغییرشکل غیر متقارن بال ها رخ می دهد. با جمع کردن یک بال بیشتر از بال دیگر (سوئیپ بیشتر) میزان نیروی برای تولید شده در بال بیشتر جمع شده را کمتر نموده لذا امکان تغییر جهت را فراهم می آورد و به آن قابلیت دورهای بسیار تند و تیز را می دهد.



شکل ۶۴ رובوسویفت سه دوربین حمل می کند؛ دو تا روی بال ها برای نگاه به جلو نصب شده و یکی زیر شکم آن برای نگاه به پایین است زاویه دید آن ها با مخروط ها نشان داده شده است. با استفاده از یک صفحه نمایش قابل نصب در جلو چشمان خلبان به صورت عینک، او می تواند از نگاه دوربین های روبوسویفت تصاویر را ببیند. (عکس از <http://www.roboswift.nl>)

## بهینگی پرواز

یک سویفت معمولی در طول زندگی اش، مسافتی را پرواز می کند که طول آن به پنج برابر مسافت رفتن به ماه و برگشتن از آن می رسد. لنتینک و همکارانش (۲۰۰۷)<sup>۵۶</sup> دریافتند که سویفت چنین پرنده قابلی است، چرا که به طور پیوسته بال هایش را متناسب با شرایط پروازی حاکم تنظیم می کند (تغییر شکل می دهد) تا با بازده و مانورپذیری بالاتری پرواز کند. در یک هواپیمای مسافربری استاندارد، بال ها در طول پرواز ثابت اند که این نابهینه است؛ چرا که شرایط پروازی در فازهای مختلف پرواز در حال تغییرند. پرندهگان با بال های متغیرشان می توانند به تناسب با شرایط مختلف پروازی که با آن روبه رو می شوند عمل کرده و توان مصرفی پرواز را به شدت کاهش دهند. در مورد چند نمونه هواپیمای جنگنده از جمله اف ۱۴ تامکت و جنگنده انگلیسی آلمانی تورنادو، که به فناوری سوئیپ بال مجهزند باید گفت با این وجود، همچنان هیچ کدام از این هواپیماها قادر با کاهش مساحت سطح روی بال خود به مقدار قابل ملاحظه ای نیست و لذا از بسیاری از مزایای تغییر شکل (مورفینگ) محروم می مانند. به علاوه، این جنگنده ها با کمک بال شکل متغیر هدایت نمی شوند.

در حیطه پرواز هوایی نمونه های متعددی وجود دارد که برای بسط موضوع آن ها را در بخش ربات های پرنده الهام گرفته از طبیعت به تفصیل خواهیم دید.

## شناگران طبیعت، منبع الهام

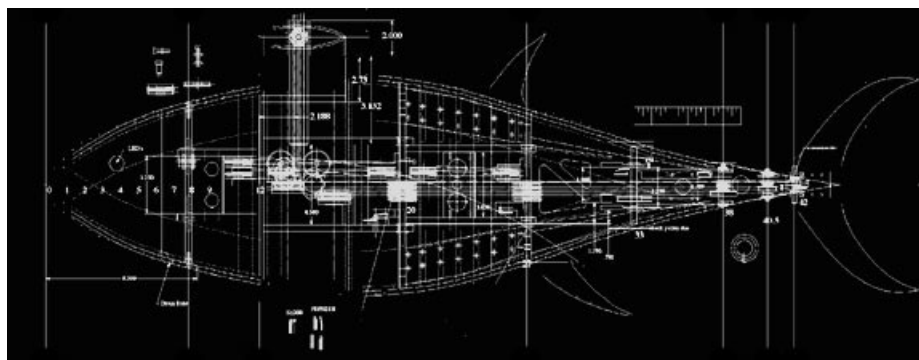
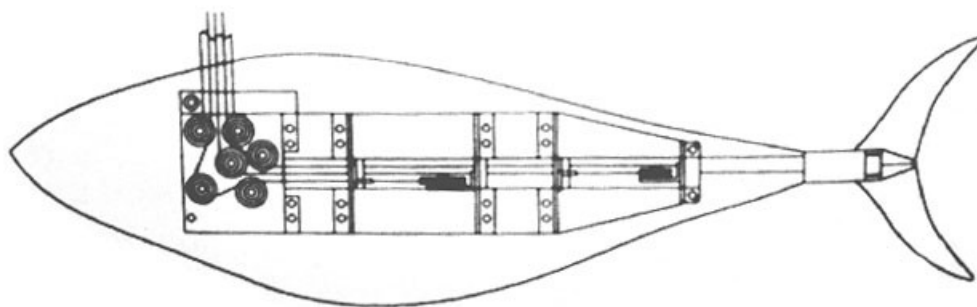
اما در پرواز آبی، شایسته است اشاره ای به شاهکار برادران تراپنتافیلو، مایکل و جرج، در دانشگاه MIT داشته باشیم. به گفته خود این دانشمندان<sup>۵۷</sup> کنترل غریزی گردابه ها به ماهی ها اجازه می دهد آن طوری که شنا می کنند، بتوانند شنا کنند؛ این برادران توانسته اند کاری کنند که یک تن ماهی ربات نیز بتواند چنین کند! اما چگونه؟!

این برادران تحت پروژه ای دست به ساخت یک ماهی ربات نمودند؛ اما تجربه سابق شان نشان می داد که آزمایشات انجام شده با دم های مشابه ماهیان به بازده ناامیدکننده ای می رسیدند. از مطالعات پیشین می دانستند که یک پارامتر دینامیک سیالاتی به نام

عدد اشتروهال<sup>I</sup> وجود دارد که برابر حاصلضرب فرکانس شکل گرفتن گردابه ها پشت یک جسمی داخل یک جریان در پهنای دنباله تقسیم بر سرعت جریان است. به طرز جالبی این عدد برای تعداد متنوعی از شرایط جریان و شکل اجسام روی ۰.۲ ثابت می ماند. آن ها با توجه به خواص مشابه جت<sup>II</sup> های جریان با دنباله<sup>III</sup> ها تصمیم به استفاده این عدد برای جت ها نموده و آن را این گونه تعریف نمودند؛ حاصلضرب فرکانس جاروب کردن دم در پهنای جت، تقسیم بر سرعت شنای ماهی. با آنالیز داده های فویل های بالزن، دریافتند که گردابه های تولید کننده نیروی پیشران تنها زمانی به طور بهینه شکل می گیرند، که عدد اشتروهال بین ۰.۲۵ و ۰.۳۵ قرار بگیرد و طبیعتا پیش بنی نمودند که بازده در این مقادیر بیشینه گردد.



شکل ۶۵ روباتونای ماهی زی روبر دانشگاه MIT



شکل ۶۶ ساختار داخلی طراحی (بالا) و نقشه جانب (پایین) روباتونای

<sup>I</sup> Strouhal Number

<sup>II</sup> Jet

<sup>III</sup> Wake

آن‌ها پس از آزمایشات متعدد و گردآوری و آنالیز مقادیر زیادی داده از ماهیان شناگر در یک همکاری با گروزنباف<sup>I</sup> دریافتند که: "ماهیان در تمامی اندازه‌ها از ماهی طلایی تنگ تا کوسه‌های اقیانوس دمه‌پشان را در بازه عدد اشتروهل تعیین شده به صورت تئوری یعنی بین ۰.۲۵ تا ۰.۳۵ تاب می‌دهند." نکته جالب این جاست که هیچ کدام از دم‌های مشابه ماهیان که در گذشته از آن‌ها برای آزمایش استفاده می‌کردند نزدیک به این بازه اشتروهل هم نبودند. با این ایده فویل‌ها را برای عمل کردن در این بازه تنظیم نموده و مقادیر بازه بالاتر از ۸۶ درصد مشاهده نمودند؛ در مقابل ملخ‌های کوچک که معمولاً برای پیشرانس وسایل نقلیه درون آب به کار می‌روند بازدهی پایین‌تر از ۴۰ درصد دارند!!! بنا به همین یافته‌ها اقدام به طراحی و ساخت ماهی خود برای کارکردن در این بازه اشتروهل نمودند و به نتایج خیره‌کننده دست یافتند.

## حرکت زمینی، منبع الهام

همانطور که می‌دانیم طراحی و ساخت ربات‌های الهام‌گرفته از طبیعت به ربات‌های پروازی ختم نمی‌شود. نمونه‌ای معروف از این دست می‌تواند محصولی تحت عنوان سگ بزرگ<sup>II</sup> تولید شرکت باستن داینامیکس<sup>III</sup> باشد که در نوع خود یکی از پیشرفته‌ترین ربات‌های چهارپای الهام‌گرفته از طبیعت است.

به عنوان نمونه‌ای الهام‌بخش زمینی، دنیس هانگ در دانشگاه ویرجینیاتک در آزمایشگاه تحقیقاتی خود روملا<sup>IV</sup> دست به بررسی مفهومی به نام جابه‌جایی دینامیک منفعل<sup>V</sup> الهام‌گرفته از جابه‌جایی زمینی در طبیعت<sup>۵۸</sup> و مکانیزم‌های حرکتی طبیعت زده و اقدام به طراحی و ساخت ربات‌های زمینی خود مبتنی بر این مفهوم نموده است. بنا به دنیس هانگ برای به حرکت انداختن طبیعی یک سه‌پایه آن‌گونه که بسیاری از موجودات طبیعی راه می‌روند، باید از دینامیک درون جسم و کنترل منفعل مرکز جرم آن برای راه رفتن استفاده نمود. به گونه‌ای که ابتدا یک پا را جلو گذاشته و وزن را روی آن می‌اندازیم و به همین طریق پای بعدی ...؛ درست مشابه راه رفتن انسان که به گفته هانگ ما یک ماهیچه خاص را برای راه رفتن به کار نمی‌گیریم بلکه از جریانی از ماهیچه‌ها به صورت منفعل استفاده نموده، و به لفظی به ماهیچه‌ها اجازه می‌دهیم آزادانه شنا کنند!

به عنوان پشتوانه‌ای برای این مطلب هانگ به بسیاری از حیوانات اشاره می‌کند که اصولاً مغزی به آن بزرگی ندارند که بتوانند چنان محاسبات پیچیده حرکتی را برای کنترل فعال مکانیزم‌ها به دست گیرد. او واژه جدیدی را به نام هوش مکانیکی<sup>VI</sup> در مقابل هوش رایانه‌ای ابداع کرده، اشاره به هوشی که در ذات مکانیزم هنگام ساخت گذاشته شده است (مانند پایداری طولی هواپیمای بال ثابت مسافری). ربات سه‌پایه آن‌ها در حال حاضر تحت عنوان استرایدر<sup>VII</sup> در مراحل تاتی تاتی کردن‌های آموزش خود برای توسعه این مفهوم است. برای مطالعه بیشتر از این دست خواننده به مرجع<sup>۵۹</sup> ارجاع داده می‌شود.

<sup>I</sup> Grosenbaugh

<sup>II</sup> Big Dog

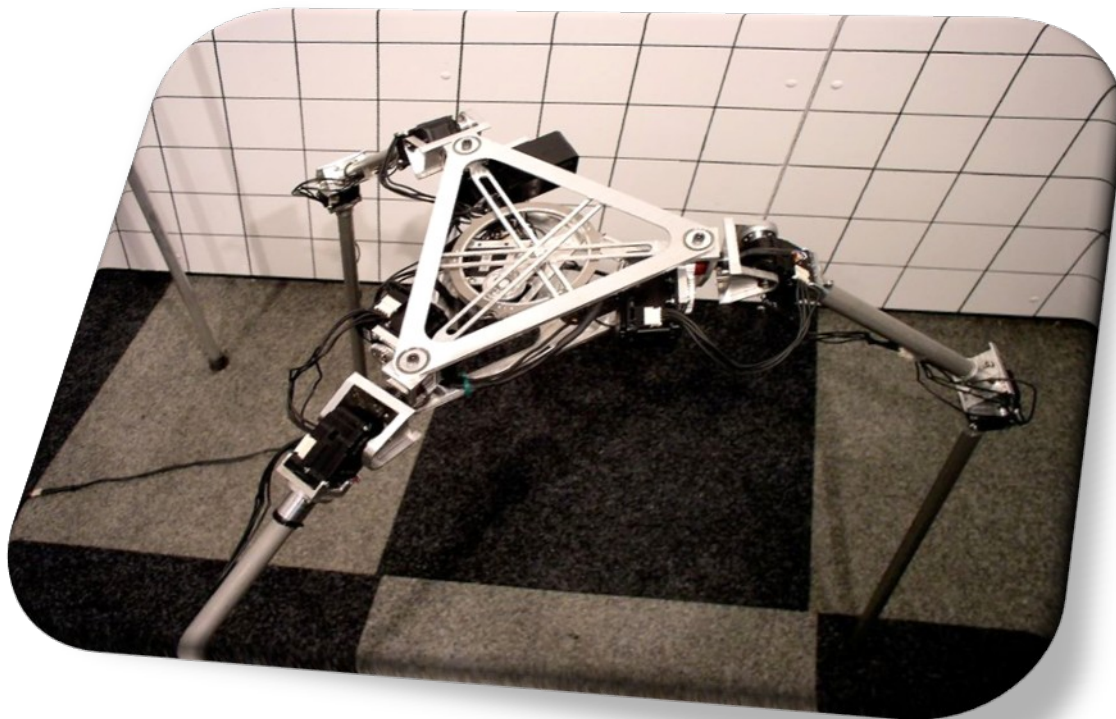
<sup>III</sup> Boston Dynamics

<sup>IV</sup> ROMELA (RObotics and MEchanisms LABoratory)

<sup>V</sup> Passive Dyanamics Locomotion

<sup>VI</sup> Mechanical Intelligence

<sup>VII</sup> STriDER (Self-excited Tripedal Dynamic Experimental Robot)



شکل ۶۷ ربات سه پایه استرایدر آزمایشگاه روملا نماینده فناوری مبتنی بر مفهوم جابه جایی دینامیک منفعل



## بخش ۵. رباتیک زی‌روبُر

در مطالعاتمان رباتیک الهام‌یافته از طبیعت را چون گذشته، به طور کلی به سه دسته زیر تقسیم نموده‌ایم.

۱. رباتیک (زمینی)<sup>I</sup>

۲. آکواباتیک (آبی)<sup>II</sup>

۳. ایرباتیک (هوایی)<sup>III</sup>

همانگونه که پیش از این اشاره شد، بار دیگر به دلیل خارج بودن بحث از حوصله این مقال، با وجود انجام مطالعه روی تمامی زمینه‌ها، در حیطه رباتیک تنها به رباتیک هوایی و از آن هم تنها به مقدماتی به همراه رباتیک هوایی سائز کوچک (ریزپرنده‌های) الهام‌گرفته از طبیعت می‌پردازیم؛ برای بررسی مفصلی روی این ربات‌های ریزپرنده بدون تمرکز خاص روی الهام از طبیعت به مرجع<sup>۶۰</sup> که به نگارش گروهی شامل نگارنده این پژوهش و دیگران می‌باشد، و نیز مرجع<sup>۶۱</sup> مراجعه نمایید

### ره‌ریزها (رسانگر هوایی ریز)<sup>IV</sup>

بنا بر تعریف ابعاد یک ریز پرنده (در سه بعد) نبایستی از ۱۵ سانتی‌متر (۶ اینچ) بیشتر بوده (یعنی بتوان آن را در کره‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر جای داد) و باید قابلیت حمل محموله‌ای سبک (تا ۲۰ گرم) برای تصویر برداری را داشته باشد، مداومت پروازی آن بین ۲۰ تا ۶۰ دقیقه بوده و برد مطرح شده برای آن حدود ۱۰ کیلومتر می‌باشد.

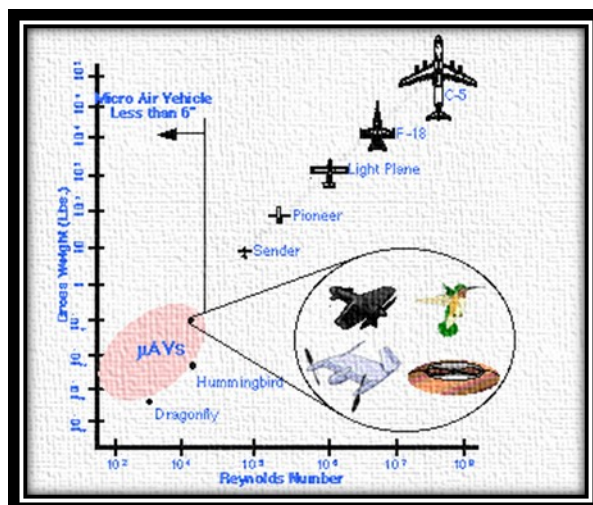
مواردی که ریز پرنده‌ها را از کلاس‌های متعارف پرنده‌ها جدا می‌کند بسیار مشابه مواردی است گونه‌های پروازی کوچک چون حشرات را از سایر گونه‌ها جدا می‌نماید. تعدادی از این موارد عبارتند از: نیاز به اجزای سبک، کم مصرف و با بازده بالا و قابلیت اطمینان بالا، قرار گرفتن در محدوده‌ها و لبه‌های فناوری، ایرودینامیک سرعت و رینولدز پایین، بزرگ نشان دادن اثر کمیت‌های کوچک مثلاً در اغتشاشات و ... امکان برخاست و فرود از و به روی تقریباً هر سطحی، عدم سوار بودن خلبان (بی‌سرنشین بودن خلبان)، محدودیت در الکترونیک و مخابرات دوربرد و کم حجم و کم وزن و کم مصرف و کم تداخل، و ...<sup>۶۲</sup>

<sup>I</sup> Rovotics

<sup>II</sup> Aquabotics

<sup>III</sup> Airbotics (UMNAV)

<sup>IV</sup> ریزپرنده‌ها، ریزپهپادها، و میکروپرنده‌ها دیگر واژگان جایگزین‌اند.



شکل ۶۸ تفکیک بندی کلاس‌های گونه‌گون پرنده‌گان با توجه به رینولدز جریان و وزن کل

نام‌گذاری‌های گوناگونی در طول سال‌ها برای کلاس‌های مشابه وسایل پرنده خصوصاً رسته بدون سرنشین آن‌ها رخ داده است، که از آن دست می‌توان به این موارد اشاره نمود؛ دور خودکار<sup>I</sup> در دهه ۹۰ قرن نوزدهم (1890s) عموماً به همت نیکلا تسلا، اژدر هوایی<sup>II</sup> در دهه ۱۰ قرن بیستم، هواپیمای بی‌خلبان<sup>III</sup> در دهه بیست قرن بیستم، زنبور هدف<sup>IV</sup> در دهه ۳۰ خصوصاً در انگلستان، زنبور<sup>V</sup> در دهه ۴۰، هدف هوایی کنترل‌شونده از راه دور<sup>VI</sup> در دهه پنجاه، زنبور دیده‌بانی<sup>VII</sup> در دهه پنجاه، هواپیمای با هدف خاص<sup>VIII</sup> در دهه شصت، رسانگر هدایت‌پذیر از دور یا رهپاد<sup>IX</sup> (اصلاح شده پرنده هدایت‌پذیر از دور یا پهپاد مورد استفاده فعلی) در دهه شصت، رسانگر هدایت‌پذیر خودکار یا رهپخ<sup>X</sup> در دهه هشتاد، هواپیمای بی‌انسان<sup>XI</sup> در دهه هشتاد، رسانگر هوایی بی‌سرنشین یا ره‌بس<sup>XII</sup> در دهه نود، هواپیمای تاکتیکی بی‌سرنشین یا هتیس<sup>XIII</sup> در دهه نود، هواپیمای کارشونده از دور یا هکاد<sup>XIV</sup> در سال ۱۹۹۹ که توسط سازمان هوانوردی فدرال آمریکا به کار گرفته شد. در ابعاد و اندازه ریزپرنده‌ها هم می‌توان به سه ترکیب رسانگر هوایی ریز یا ره‌ریز<sup>XV</sup> مورد استفاده دارپا، ره‌بس مینیاتور<sup>XVI</sup> مورد استفاده فرانسوی‌ها، رسانگر هوایی آلی یا ره‌ها<sup>XVII</sup> مورد استفاده دارپا اشاره نمود.

- 
- <sup>I</sup> Telautomaton
  - <sup>II</sup> Aerial Torpedo
  - <sup>III</sup> Pilotless Airplane
  - <sup>IV</sup> Target Drone
  - <sup>V</sup> Drone
  - <sup>VI</sup> Radio Controlled Aerial Target = RCAT
  - <sup>VII</sup> Surveillance Drone
  - <sup>VIII</sup> Special Purpose Aircraft = SPA
  - <sup>IX</sup> Remotely Piloted Vehicle=RPV
  - <sup>X</sup> Automatically Piloted Vehicle= APV
  - <sup>XI</sup> Unmanned Aircraft= UMA
  - <sup>XII</sup> Unmanned Aerial Vehicle= UAV
  - <sup>XIII</sup> Unmanned Tactical Aircraft= UTA
  - <sup>XIV</sup> Remotely Operated Aircraft= ROA
  - <sup>XV</sup> Micro Air Vehicle= MAV
  - <sup>XVI</sup> Miniature UAV= MUAV
  - <sup>XVII</sup> Organic Air Vehicle

از این بین در واژه شناسی رایج این مبحث واژگان پهپاد یا پرنده هدایت پذیر از دور<sup>I</sup> و ره بس یا رسانگر هوایی بی سرنشین<sup>II</sup> و در ابعاد ریزپرنده ها هم به طور خاص ره ریز یا رسانگر هوایی ریز<sup>III</sup> و به صورت عام همان ریزپرنده بیش از دیگران مورد استفاده قرار گرفته اند.<sup>۶۳</sup>

---

<sup>I</sup> Remotely Piloted Vehicle = RPV

<sup>II</sup> Unmanned Aerial Vehicle= UAV

<sup>III</sup> Micro Air Vehicle= MAV

## روش شناسی طراحی

به طور کلی دو روش امتحان شده و تجربه شده در طراحی هواپیما وجود دارد:

۱. رویکرد از بن به بالا:

تمامی پایه ها را آموخته و فراهم آوریم، سپس رسانگر هوایی خود را پیرامون نیازهای ماموریت‌مان طراحی نماییم

مثلاً: ایرودینامیک ← پیشرانش ← سازه ← عملکرد ←

غیره (و دوره‌های چک کردن و اصلاح بین این قسمت ها)

۲. رویکرد تجربی:

از داده های اساسی بدست آمده از طراحی و ساخت پرنده های دیگر در دسته هواپیمای خود و همچنین پرنده خودمان (به صورت امتحان و خطا) برای یافتن خط پایه لازم برای پروازی کردن پرنده کمک گرفته، سپس نگران جزئیات حول آن خط پایه می گردیم.

مثلاً: وزن ← ابعاد بال ← ابعاد موتور ← غیره

در این کلاس از پرنده ها به دلیل کمبود دانش پایه قابل اتکا و کافی، رویکرد مورد توجه در همه کارهای انجام شده تاکنون رویکرد دوم بوده است.

شرایط خاص طراحی و خواص ذاتی رژیم پروازی ریزپرنده ها

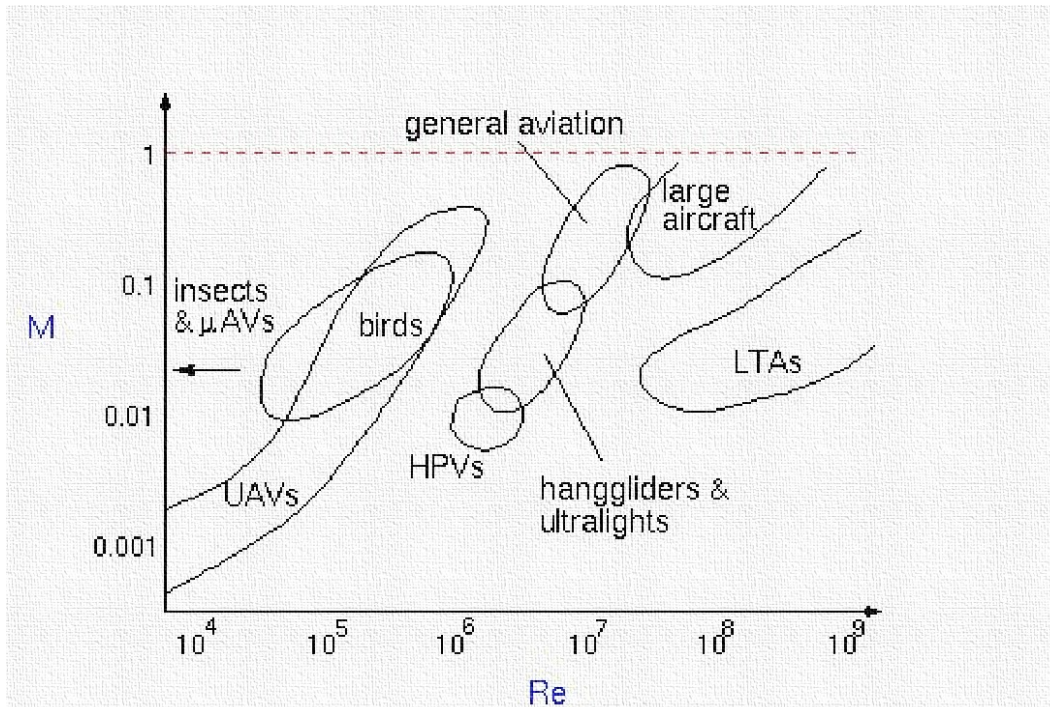
• سرعت پایین، رینولدز پایین (معمولاً بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰)

• قابل ملاحظه بودن نیروی های لزج، حضور تقریباً همیشگی جدایش و خطر آن

• برآ و پسا↑: نسبت برآ به پسا↓

• خارج الگوهای طراحی کلاسیک ایرودینامیک

برای یک نمونه نسبتاً مبسوط از مدل توسعه داده برای ایرودینامیک جریان حول یک ملخ در ابعاد ریزپرنده به مرجع<sup>۶۴</sup> مراجعه نمایید.

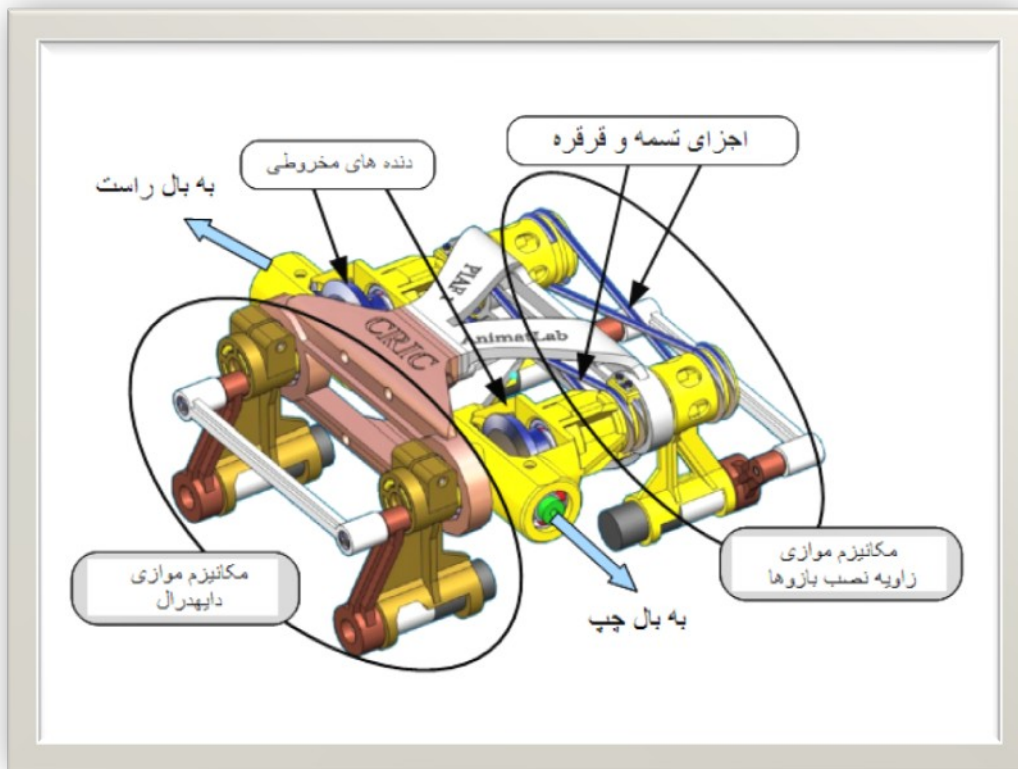


شکل ۶۹ نموداری مقایسه ای از اعداد رینولدز (Re) و ماخ (M) برای کلاس های مختلف هواپیما<sup>۶۵</sup>

به طور کلی هدف نهایی طراحی در این کلاس از پرنده ها ساخت یک ریزپرنده تا حد ممکن خودکار (هوشمند) قادر به انجام مأموریت تعریف شده در یک محیط از پیش آماده نشده (حتی الامکان بدون دخالت انسان) خواهد بود. هدف بلندمدت با توجه به الگوها و مکانیزم های پروازی حاضر و بررسی امکان سنجی آن ها، یکپارچه سازی محصول نهایی مبتنی بر یک ساختار پایه بالزن است. هرچند بسیاری از فناوری های توسعه داده شده در مسیر قابل استفاده بر بسترهای هلی کوپتر، هواپیمای بال ثابت، و بالون هم قابل به کارگیری خواهد بود. به طور طبیعی با توجه به توضیحات پیشین، دقت کافی در مصرف انرژی بالزنش باید مبذول گردد. بدیهی است چه در راستای بهینه سازی مصرف انرژی، چه در راستای بهبود مانورپذیری، کنترل، راهبری و مسیریابی، هوشمندی و تصمیم گیری الهام گیری از طبیعت در قالب روش های بهینه سازی الهام گرفته از طبیعت عموماً تحت عنوان متاهوریستیکس<sup>۱</sup> که مشابه الهامگاشان طبیعت از نوع روش های بهینه سازی تکاملی<sup>۱۱</sup> هستند، می توان یاری جست. به عنوان نمونه ای که در طراحی از چنین رویکردی بهره جسته می توان به کار دانسیو و همکاران (۲۰۰۷) اشاره نمود که با الهام گرفتن از بال زدن پرندگان و اختراع مکانیزم نوآورانه بالزن زیر، شبیه سازی و بهینه سازی طراحی یک ریزپرنده بالزن نوعی را انجام داده اند.

<sup>۱</sup> Metaheuristics

<sup>۱۱</sup> Evolutionary Methods



شکل ۷۰ مکانیزم بالزن اختراعی دانسیو و همکاران (۲۰۰۷) (عکس از مرجع ۷۷)

برای جزئیات بیشتر و مشاهده مقادیر بهینه بدست آمده خواننده به مرجع<sup>۶۶</sup> ارجاع داده می شود. از نمونه های پیشگام و قدیمی تر در بین ریزپرنده های الهام گرفته از طبیعت می توان به کار ریزپرنده بالزن در موسسه فناوری کالیفرنیا، کلتک<sup>۱</sup> سپرده شده از طرف شرکت ایرووایرنمنت تحت عنوان ریزخفاش<sup>۱۱</sup> اشاره کرد که مانورپذیری مناسب و توان مصرفی پایینی داشته، در مقابل دچار مکانیک های پیچیده و کنترل پیچیده است.<sup>۶۷</sup>

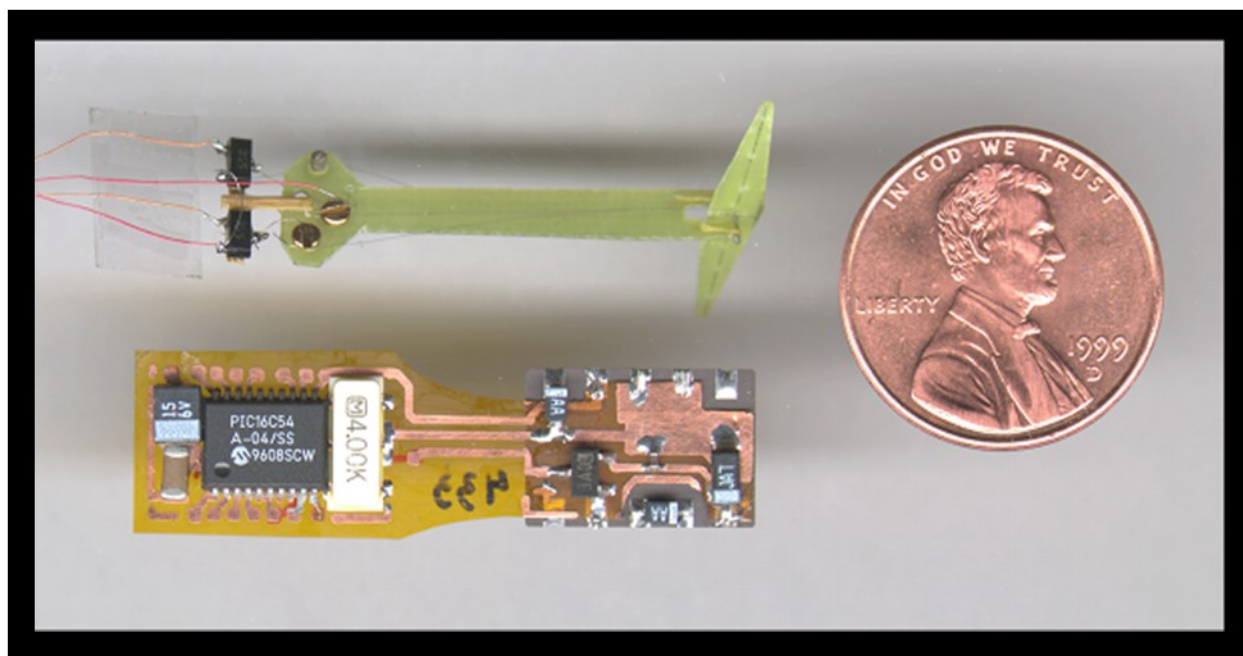


شکل ۷۱ عکس ربات بالزن کلتک به نام ریزخفاش

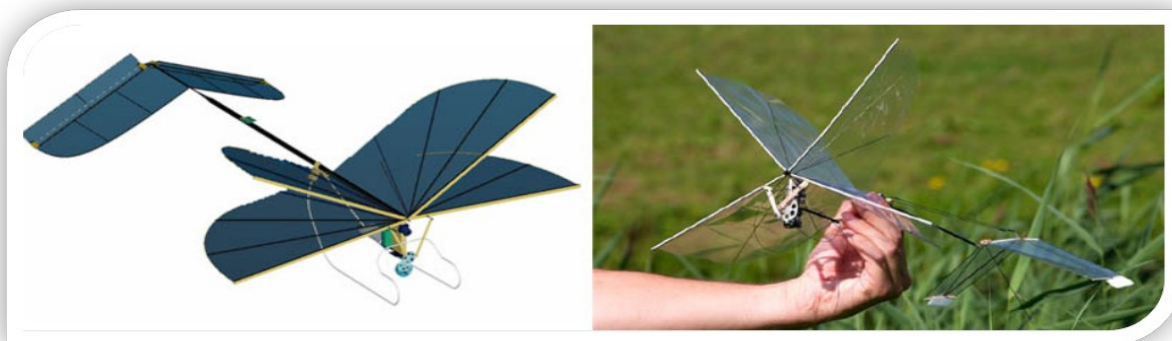
<sup>۱</sup> California Institute of Technology (Caltech)

<sup>۱۱</sup> Microbat

این پرنده که پهنه بال برابر ۶ اینچ داشته و از موتور الکتریکی و باتری نیکل کادمیوم استفاده می کرد، جرم کلی برابر ۱۲ گرم داشت که از این مقدار که از این مقدار یک گرم آن به سیستم کنترل از دور و سیم ها اختصاص داشت. مداومت پرواز بیشینه آن هم برابر ۲ دقیقه و ۶ ثانیه بود.<sup>۶۸</sup>

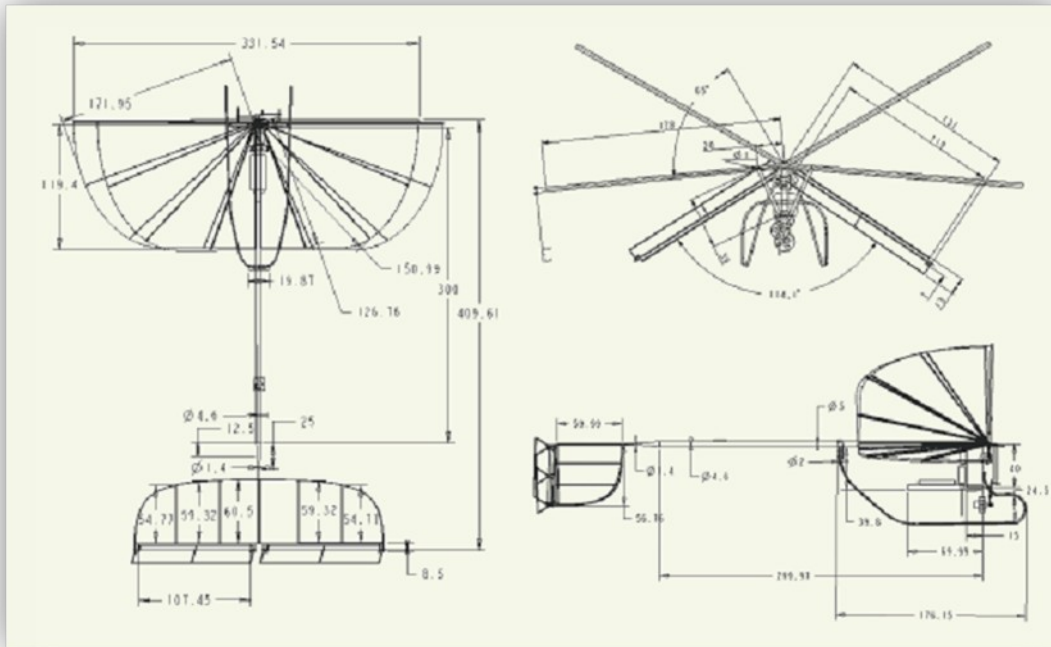


شکل ۷۲ تصویری از ابعاد بسیار کوچک قطعات و مدار SMD طراحی شده و کنترل از دور و سیم ها



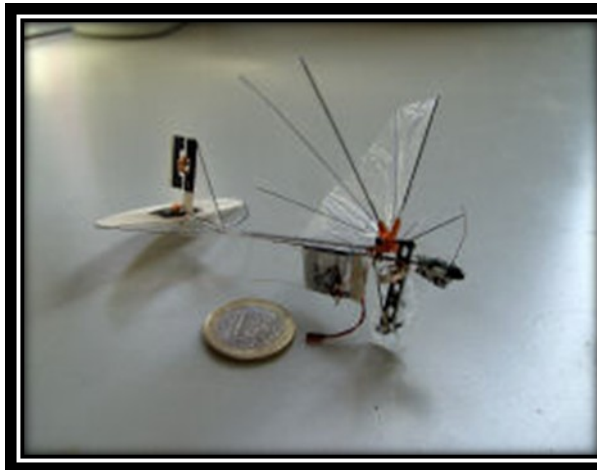
شکل ۷۳ تصاویری از Delfly محصول زی‌روب‌کردن پرواز سنجاقک و تاخیر و تقدمات فاز بالزنش دو جفت بال نسبت به هم (فاز مخالف پرواز ایستا، موافق پرواز رو به جلو و...)

نمونه ای از ریزپرنده ها با طراحی الهام گرفته از سنجاقک تحت عنوان Delfly، محصول دانشگاه TU Delft هلند است و با یک مجموعه چهارتایی بال بالزن برای لازم برای شناور بودن را فراهم نموده و با تاخیر فاز (مشابه سنجاقک) بین بالزنش جفت بال های عقبی نسبت به جلویی مود پروازی را بین حالت های پرواز ایستا و پرواز روبه جلو تغییر می دهد. رویکرد تیم سازنده در این ریزپرنده از ابتدای نسل اول آن یعنی Delfly I بوده که ابتدا پرنده خود را ساخته و پروازی نماید و سپس آن را لحاظ اندازه کوچک و کوچکتر نماید. این تضمین عملیاتی شدن و پروازی شدن پرنده حتی با ابعاد بزرگ و حتی با چشم پوشی از بعضی قابلیت ها تا حدی است که نسل اول تنها قابلیت پرواز رو به جلو را داشته است.

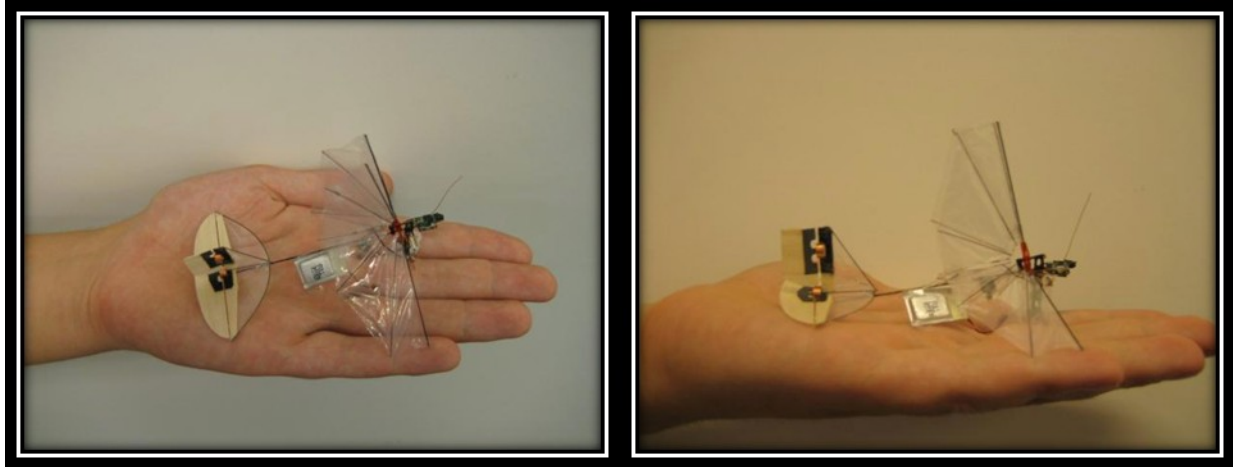


شکل ۷۴ سه‌نمای Delfly<sup>۶۹</sup>.

در عوض، Delfly II کوچکتر و از لحاظ کنترلی مقاوم تر بوده، مداومت پروازی بیشتری داشته، قابلیت پرواز ایستا و نشست و برخاست عمودی دارد و حتی قادر به پرواز رو به عقب است. همچنین می‌تواند در مقابل سقف و دیوارها بدون سانحه پرواز کند و یک دوربین را نیز حمل می‌کند. نسل دیگر Delfly micro است که حتی از این هم کوچکتر شده و پهنه بال ۱۰ سانتی متری دارد. و نهایتاً نسل آخر که Delfly nano نام خواهد داشت که قرار است ۵ سانتی متری باشد. بادهای برون ساختمانی اثر خود را همانند حشرات در صورت بیشتر بودن سرعت باد از سرعت رو به جلوی پرنده، به شکل شناور کردن پرنده به جهات نشان می‌دهند. از آن جایی که طراحی این پرنده ذاتاً پایدار است، تندباد های بیرونی مشکلی بوجود نخواهند آورد به طوری که در حالت عادی بدون باد، اگر دست از هدایت و فرامین پرنده بکشید موقعیت پایداری را به خود می‌گیرد.







شکل ۷۵ تصاویر مقایسه ای از نسخه ۱ و ۲ Delfly. تفاوت در ابعاد چشمگیر است. (عکس‌ها برگرفته از <http://delfly.nl>)

کنترل مقاوم پرنده به آن قابلیت دوام هنگام برخورد های با موانع را می دهد. Delfly II سرعت بیشینه ۱۵ متر بر ثانیه و مداومت پروازی ای برابر حداقل ۱۵ دقیقه را داراست. از نمونه های دیگر می توان از پروژه رمانتا<sup>I</sup> در دفتر ملی دانشجویان و پژوهشگران هوافضای فرانسه<sup>II</sup> یاد کرد که الهام گرفته از مطالعات بر روی پرواز سنجاقک های بزرگ است. برای مطالعه بیشتر خواننده به مرجع<sup>۷۰</sup> ارجاع داده می شود. در عین حال می توان از پروژه دانشگاه بریگام یانگ<sup>III</sup> نیز یاد کرد که به نوعی در پرواز چهاربال روبر از سنجاقک به پروژه Delfly شبیه است.



شکل ۷۶ ربات بالزن محصول دانشگاه بریگام یانگ زی روبر سنجاقک

<sup>I</sup> REMANTA for REsearch programme on Microvehicle And New Technologies Application

<sup>II</sup> ONERA

<sup>III</sup> Brigham Young

## دانشگاه صنعتی شریف<sup>I</sup>

این پروژه با نام ارنیوپتر<sup>II</sup> در اواخر سال ۱۳۸۱ توسط تعدادی از دانشجویان کارشناسی دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی شریف با سرپرستی دکتر کریم مظاهری عضو هیئت علمی و استاد این دانشکده آغاز و تا اواسط سال ۱۳۸۳ ساخت آن با موفقیت به پایان رسید.

این میکروپرنده از توانایی اجرای مانورهای پرواز هموار<sup>III</sup>، مانورهای برخاست و نشست کوتاه<sup>IV</sup>، مانور دور تیز<sup>V</sup>، مانور لمس و رو<sup>VI</sup>، مانور تک حلقه<sup>VII</sup>، مانور حلقه های عمودی-افقی<sup>VIII</sup> برخوردار می باشد. شرح مختصری از مشخصات هر یک از این مانورها عبارت است از؛

مانور برخاست و نشست کوتاه (برخاست):

سرعت باد = ۰ متر بر ثانیه

فرکانس بال زدن = ۸-۱۳ هرتز

سرعت استال = ۰.۳ متر بر ثانیه

مکانیزم برخاست: استفاده از اثر برگشتی برخورد نوک بال ها به زمین

مانور برخاست و نشست کوتاه (نشست):

سرعت باد = ۰.۱ متر بر ثانیه

فرکانس بال زدن = ۴-۱۳ هرتز

سرعت استال = ۰.۳ متر بر ثانیه

مانوردور تیز:

سرعت باد = ۰ متر بر ثانیه

فرکانس بال زدن = ۱۰-۱۴ هرتز

شعاع دور = کمتر از یک متر

مانور برخاست و نشست کوتاه (برخاست):

سرعت باد = ۰ متر بر ثانیه

فرکانس بال زدن = ۸-۱۳ هرتز

سرعت استال = ۰.۳ متر بر ثانیه

مانور لمس و رو:

سرعت باد = ۰.۱ متر بر ثانیه

فرکانس بال زدن = ۷-۱۵ هرتز

مانور تک حلقه:

سرعت باد = ۰ متر بر ثانیه

فرکانس بال زدن = ۱۱-۱۵ هرتز

---

<sup>I</sup> ر.ک. مرجع ۷۷

<sup>II</sup> Ornithopter

<sup>III</sup> Level Flight

<sup>IV</sup> STOL (Short Take-Off and Landing)

<sup>V</sup> Sharp Turning

<sup>VI</sup> Touch and Go

<sup>VII</sup> Single Loop

<sup>VIII</sup> V-H Loop

مانور حلقه های عمودی و افقی (حلقه نخست در صفحه عمودی، سپس با یک دور لحظه ای انجام دور دوم در صفحه افقی):  
سرعت باد = ۰ متر بر ثانیه  
فرکانس بال زدن = ۱۰-۱۴ هرتز



شکل ۷۷ وزن ریزپرنده ساخته شده توسط دانشگاه صنعتی شریف؛ میزان سبکی اجزای ریزپرنده ساخته شده چشمگیر است.

### دانشگاه تهران<sup>۱</sup>

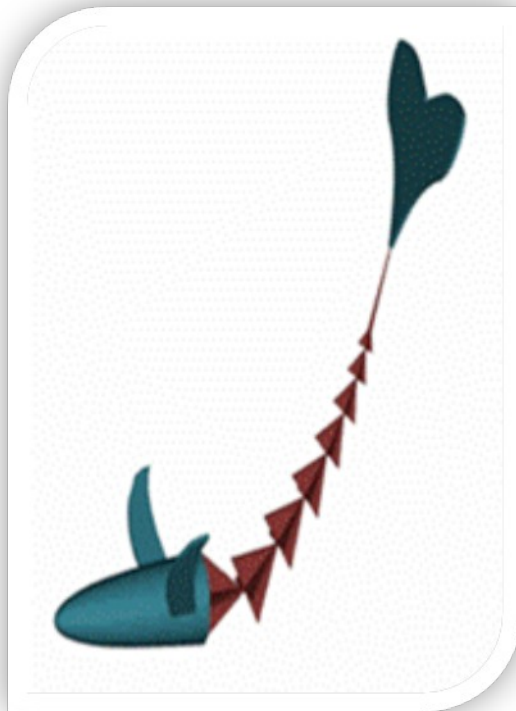
این پروژه یا مجموعه پروژه‌ها، به جرأت می‌توان گفت که منسجم‌ترین مجموعه در نوع خود در کشور هستند که با سرپرستی دکتر عقیل یوسفی‌کما عضو هیئت علمی دانشکده مکانیک دانشگاه تهران و با شکل‌گیری آزمایشگاه میکروپرنده در مکان پارک علم و فن آوری این دانشگاه آغاز به کار کرده و همچنان ادامه دارد. کاربرد این دست میکروپرنده‌ها به اذعان خود ایشان بیشتر در کارهای تجسسی و شناسایی و فیلمبرداری در فضای بسته مورد هدف قرار گرفته است. شکل ۷۸ چند نمونه از ربات‌های ساخته شده توسط دانشگاه تهران را نشان می‌دهد. میکروپرنده ساخته شده توسط این گروه که در پرواز موفق هم بود، در ابتدا در سایز نسبتاً بزرگی طراحی و ساخته شده بود که البته پس از آن بهبود مکانیزم، کاهش وزن داده شده و بهینه‌سازی گردید.

---

<sup>۱</sup> ر.ک. مرجع ۷۷



شکل ۷۸ آزمایشگاه میکروپرنده دانشگاه تهران و تعدادی از محصولات نخستینش



شکل ۷۹ شمایل مفهومی ماهی ربات ساخته شده در آزمایشگاه میکروپرنده دانشگاه تهران (عکس ها از آزمایشگاه میکروپرنده)

در تحقیق فوق تیمی در زمینه آیرودینامیک و آنالیز سیالاتی و تیمی هم برای تحلیل مکانیکی بال زن فعال بوده اند. این گروه همچنین ریز پرنده‌هایی با بال دوار<sup>I</sup> و بال ثابت<sup>II</sup> ساخته‌اند. استفاده از مواد و سازه‌های هوشمند آلیاژهای حافظه‌دار و پیزوالمنت-ها<sup>III</sup> نیز مورد توجه قرار گرفته است.

دانشگاه تهران جهت تامین ریز موتور ابتدا کوچکترین موتورهای مورد استفاده در ویبراتور موبایل‌ها را که در بازار ایران هم موجود است را مورد استفاده قرار داد. اما بررسی بیشتر حاکی از پایین بودن راندمان پایین این دسته از موتورها داشت. لذا به سراغ موتورهای بی‌جاروبک<sup>IV</sup> موجود در بازار خارج از کشور رفته‌اند که فوق العاده موتورهای ظریفی هستند. گروه مقداری هم به بحث نانوباتری‌ها و نانوموتورها، باتری‌های بیولوژیک، موتورهای بیولوژیک و بیوشیمیایی پرداخته است که منجر به پیشنهاد پژوهشی قابل ملاحظه‌ای در صنایع نوین و صنایع دریایی برای نانوباتری‌ها شد.

این آزمایشگاه به سرپرستی دکتر یوسفی کما، طی سه سال گذشته پا را از این نیز فراتر نهاده اقدام به ساخت ربات های انسان نما با الهام گرفتن از حرکات انسان تحت عنوان سورنا نموده است که اکنون نسخه ۲ آن توسعه یافته است. نسخه نخستین سورنا چرخدار بوده و با کنترل از راه دور حرکت می کرد.

<sup>I</sup> Rotorcraft  
<sup>II</sup> Fixed Wing  
<sup>III</sup> Piezoelement  
<sup>IV</sup> Brushless



شکل ۸۰ سورنا ۲؛ نسخه دوم ربات انسان‌نمای ملی محصول آزمایشگاه دکتر یوسفی کما (عکس از نارنجی)

سورنا دو هم تابستان امسال رونمایی شد. این ربات که نام یکی از سرداران قدیمی ایران را بر خود دارد، ۱۴۳ سانتی متر قد و حدود ۴۵ کیلوگرم وزن دارد. سورنا II به آهستگی حرکت می‌کند و می‌تواند تعادل خود را حفظ کند. گزارش‌ها حاکی از آن است که نسخه‌های بعدی این ربات قرار است توانایی تشخیص تصاویر و صداها را هم داشته باشند.

### نانوپرنده‌ها (فراریزپرنده‌ها)

نمونه‌ای عملیاتی از نانوپرنده‌ها می‌تواند پروژه هامینگبات<sup>I</sup> یا ربات الهام گرفته از مرغ مگس‌خوار باشد که به ازای تمدید قرارداد به فاز دوم آن، دراپا (آژانس پروژه‌های پژوهشی پیشرفته دفاعی آمریکا) مبلغ ۲۰۱ میلیون دلار پرداخته است. این مسأله اهمیت راهبردی این ربات‌های پرنده را بیش از پیش اثبات می‌کند؛ خصوصاً زمانی که مسیر این گسترش فناوری‌ها را از سال ۱۹۹۳ که موسسه تحقیقاتی رند<sup>II</sup> به طور خاص وجود چنین ربات‌های ریزپرنده‌ای را برای ناوگان دفاعی آمریکا راهبردی قلمداد کرد، تا اکنون که تمایل و تعاریف همگی علاوه بر ریزپرنده‌های متعارف به فراریزپرنده‌ها یا نانوپرنده‌ها سیر نموده، می‌توان به وضوح مشاهده نمود.<sup>۷۲</sup>

شواهد دیگر از انتشارات اخیر هم مؤید این نگاه راهبردی است. به طوری که نیروی هوایی آمریکا طی گزارشی از سوی آزمایشگاه پژوهشی اش تحت عنوان برنامه پرواز سامانه‌های هواپیمای بدون سرنشین ۲۰۰۹-۲۰۴۷<sup>III</sup> اعلام نموده است که تا سال ۲۰۱۵ ره‌ریز<sup>IV</sup>هایی به اندازه یک پرستو آماده پرواز می‌خواهد و تا سال ۲۰۳۰ نانوپرنده‌هایی حتی کوچکتر به اندازه سنجاقک و آماده پرواز را در برنامه دارد.<sup>۷۳</sup>

طبق تعریف دراپا، یک نانوپرنده هواپیمایی با کمتر از ۱۰ گرم وزن است که قادر به پرواز ایستا برای مدت طولانی، و قادر به پرواز رو به جلو با بیشینه سرعت ۱۰ متر بر ثانیه باشد و در عین حال قادر به تحمل تندبادهای با سرعت ۲.۵ متر بر ثانیه و قادر به

<sup>I</sup> Hummingbot

<sup>II</sup> RAND

<sup>III</sup> Unmanned Aircraft Systems Flight Plan 2009-2047

<sup>IV</sup> MAV

انجام عملیات داخل ساختمان‌ها بوده و از فاصله بیشینه یک کیلومتر دورتر (برد عملیاتی) قابل کنترل باشد. بدینوسیله داریا با تعریف برنامه نانوپرنده، محدودیت‌های ایرودینامیک و بازده تبدیل قدرت، مداومت پروازی و مانورپذیری را برای وسایل پرنده بالزن بسیار کوچک به عقب می‌راند. چرا که نانوپرنده‌ها تحول بزرگی را در توانایی مهار فیزیک جریان بالزنش کم رینولدز، راهبری در محیط‌های پیچیده، مخابرات بین فواصل قابل ملاحظه به وجود می‌آورد. فناوری‌های ممکن کننده پرواز سامانه نانوپرنده که در این برنامه توسعه می‌یابند عبارتند از؛

- ابزارهای طراحی ایرودینامیک برای دستیابی به هوابرهای با نسبت برا به پسای بالا
- زیرسامانه‌های قدرت و پیشرانس سبک و با بازده بهینه
- روش‌های ساخت پیشرفته و بسته بندی زیرسامانه و چینش پیکربندی نوآورانه

به طور کلی این پرنده از یک سو، از آن جا که قادر به انجام ماموریت‌ها با چهار ویژگی مبهم، کثیف، خطرناک، طولانی<sup>I</sup> هستند، مورد توجه هستند؛ و از سوی دیگر، به دلیل قابلیت‌هایی چون تحرک و جاسوسی و تعدد آن‌ها توانمندی‌های خارق‌العاده و مورد توجهی می‌یابند. به طوری که از یک سو هوشمندی و جاسوسی در ابعاد کوچک هم امکان شبکه‌سازی برای مخابرات و جاسوسی مشترک را فراهم می‌کند، هم امکان تحرک برای خودکار بودن و حفظ مردم از خطرات را ایجاد می‌کند. تحرک در چنین ابعاد ریزی هم مزایایی چون تخلخل بالا در محیط (متناسب با معکوس سایز)، تعدد با قابلیت به چشم نیامدن، و قابلیت جابه‌جاشدن بالا و ... را در اختیار می‌گذارد.

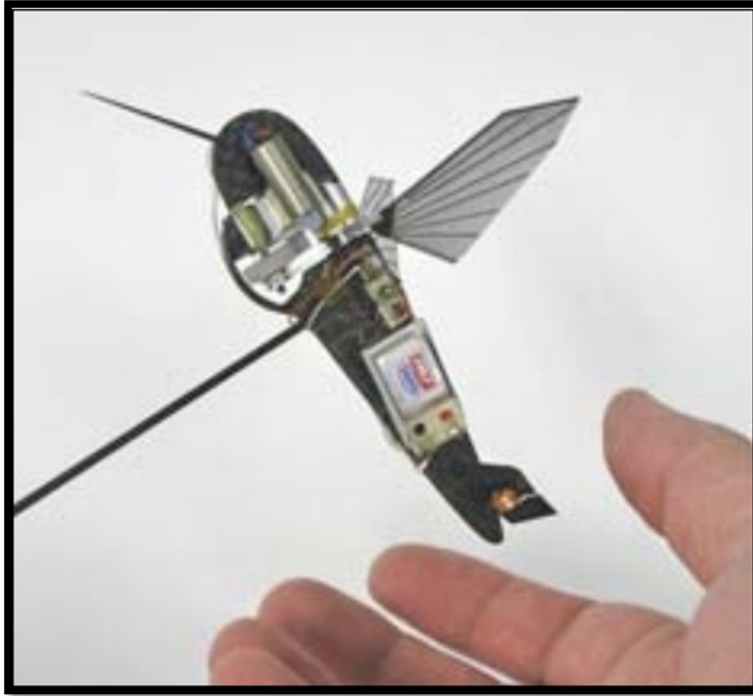
در این فاز موفقیت آمیز که شرکت ایروایرنمنت<sup>II</sup> توانست مرحله برجسته فنی<sup>III</sup> تعریف شده تحت عنوان پرواز کنترل شونده ایستای سامانه بدون سرنشین نانوپرنده با دو بال بالزن را توسط نمونه ساخته شده تستی به نام مرکوری با موفقیت تکمیل نماید، پرنده قادر به پرواز ایستا با مکانیزم بالزنش (عین آن چیزی که در بالزنش مرغ مگس خوار رخ می‌دهد) برای مدت ۲۰ ثانیه همراه با حمل منبع قدرت خود (باتری) و با کنترل از راه دور است. هر چند هدف نهایی مداومت پروازی در این پروژه، ۱۰ تا ۲۰ دقیقه است و این در حالی است که نمونه حاضر هنوز دوربین و فرستنده‌ای هم که خود مصرف کننده توان هستند ندارد، این نمونه نشان داد که نانوپرنده می‌تواند با استفاده از تنها یک جفت بال هم پیشرانس و هم کنترل پرواز لازم را حین تمامی حالات پرواز (اوج گرفتن، کاهش ارتفاع، پرواز به جلو، به عقب و به جهت از حالت پرواز ایستا) تامین نماید. دستیابی به این توانایی‌ها تنها با دو بال بالزن برای پیشرانس و کنترل توأمان تاکنون نظیر نداشته است.

---

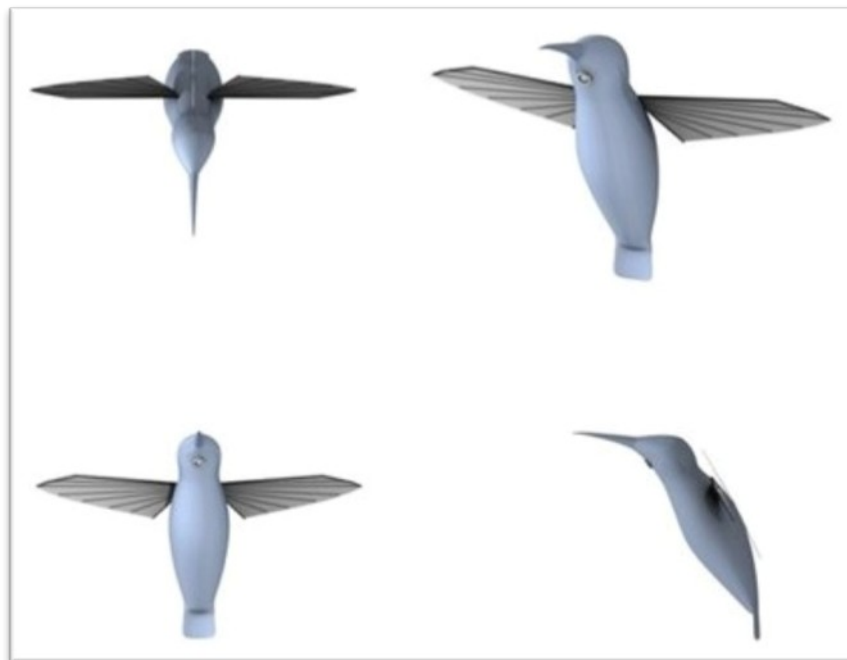
<sup>I</sup> D<sup>4</sup>: (Dull, Dirty, Dangerous, Duration)

<sup>II</sup> Aerovironment Inc.

<sup>III</sup> Technical Milestone



شکل ۸۱ عکس نمونه واقعی اثبات کننده فناوری (که فعلا در تعریف ریزپرنده و نه نانوپرنده یعنی کمتر از ۱۵ سانتی متر جای می گیرد) محصول نهایی پایان فاز اول (این نمونه با بلندکردن تمامی وزن خودش و منبع انرژی اش، کارکرد سامانه پیشرانش را به اثبات رساند. آن به یک میله که از سر دیگر لولا شده، مقید گردیده بود).



شکل ۸۲ شمایل مفهومی محصول نهایی پایان فاز دوم (فاز کنونی)

فاز دوم، با بهینه سازی برای افزایش مداومت پروازی، اجرای گزار از پرواز عمودی به پرواز رو به جلو و بر عکس و کاهش ابعاد و وزن پرنده و اثر صوتی (آکوستیک) آن تعریف شده است که مسأله را بسیار دشوار می نماید. پرنده هدف این فاز باید به اندازه کافی



کوچک باشد که بتواند در کف دست خلبانش قرار بگیرد و از لحاظ ظاهر هم بسیار شبیه به منبع الهامش یعنی مرغ مگس خوار خواهد بود.

برنامه به توسعه سخت افزار سازه ای چندکاره و همدیس و سطوح برازای ایرودینامیک ستبر و سبک و محکم برای پرواز با بازده بالا در رینولدزهای پایین (کمتر از ۱۵۰۰۰) ادامه می دهد. به علاوه، پژوهشگران همچنان بر روی توسعه فناوری های پیشرفته ممکن کننده جلوگیری از تصادف و سامانه های راهبری برای استفاده در محیط های بدون امکان جی پی اس داخل و خارج ساختمانی و نیز بهبود بازده و پایداری در پرواز ایستا و در حین قرارگیری یا تعیین محل حسگرها متمرکز خواهند بود. تاکنون ایرواینمنت بیش از ۹۰ طراحی مختلف بال، تعداد زیادی از مکانیزم های بالزنش و تعداد زیادی از پیکربندی های کنترل را آزمایش کرده است که غالب آن ها با دستکاری هایی در دینامیک بال برای یک طراحی بدون دم همراه بوده اند. این پیکربندی ذاتا ناپایدار است و به محض شروع به پرواز، تمایل به خروج از کنترل داشته و امکان هدایت آن بوسیله یک خلبان انسان به تنهایی و بدون کمک یک سامانه خودکار کنترل را غیرممکن می کند. روش توسعه بدین گونه بوده که در نمونه های ساخته شده (پروتوتایپ های) ابتدایی، از دم ها و پیشران های ملخی برای مطالعه الگوریتم های گوناگون کنترل یاری می جستند. اما با پایه گذاری الگوریتم های کنترلی اساسی، ساختارهای کنترلی اضافی برداشته شدند (درست مثل جداکردن چرخ های آموزشی کوچک دوچرخه) و تمامی کنترل به بال ها واگذار گردید که تنها اجزای ایرودینامیک فعال پرنده هستند.



شکل ۸۳ پیکربندی های متفاوت مشابه موارد استفاده شده طی فاز اول برای شروع بررسی اثرگذاری سامانه کنترل پیش از طراحی بدون دم

طبق گزارش های پروژه، بزرگترین چالش آن گسترش سامانه پیشرانش امکان پذیر و قابل دوام در ابتدا و سپس خلق سامانه کنترلی برای چنین عملیات پیچیده ای در چنین ابعاد کوچکی می باشد.

طبق برنامه، در حال حاضر ایرواینمنت مشغول انجام و به اتمام رساندن تست های پروازی ای است که در آن ها مودهای پروازی ترکیبی پرواز ایستا و پرواز سریع رو به جلو هر دو در یک پرواز با یک وسیله پرنده یکپارچه، توسط یک سامانه کنترل زمینی با نمایشگر ویدیو به تصویر کشیده می شود. حین این پرواز ها، مداومت پروازی پرواز ایستای تنها، مداومت پروازی پرواز رو به جلوی تنها، و مداومت پروازی پرواز ایستا به ازای افزایش وزن محموله اندازه گیری می شود و سامانه نهایی برای بررسی کاربری عملیاتی اش هم در مأموریت های داخل ساختمانی و هم خارج ساختمانی تست می گردد.



شکل ۸۴ شمایل مفهومی محصول نهایی پایان فاز سوم (عکس ها از ایرواینمنت)

همچنین می توان از پروژه پرنده حشره ریزمکانیکی<sup>I</sup> در دانشگاه کالیفرنیا در برکلی<sup>II</sup> یاد کرد که در عین مانورپذیری خوب و البته فشردگی و جمع و جور بودن، همچنان مکانیک های پیچیده و کنترل پیچیده (به نسبت سایر کلاس های ریز پرنده ها) گریبان گیر آن بوده اند.



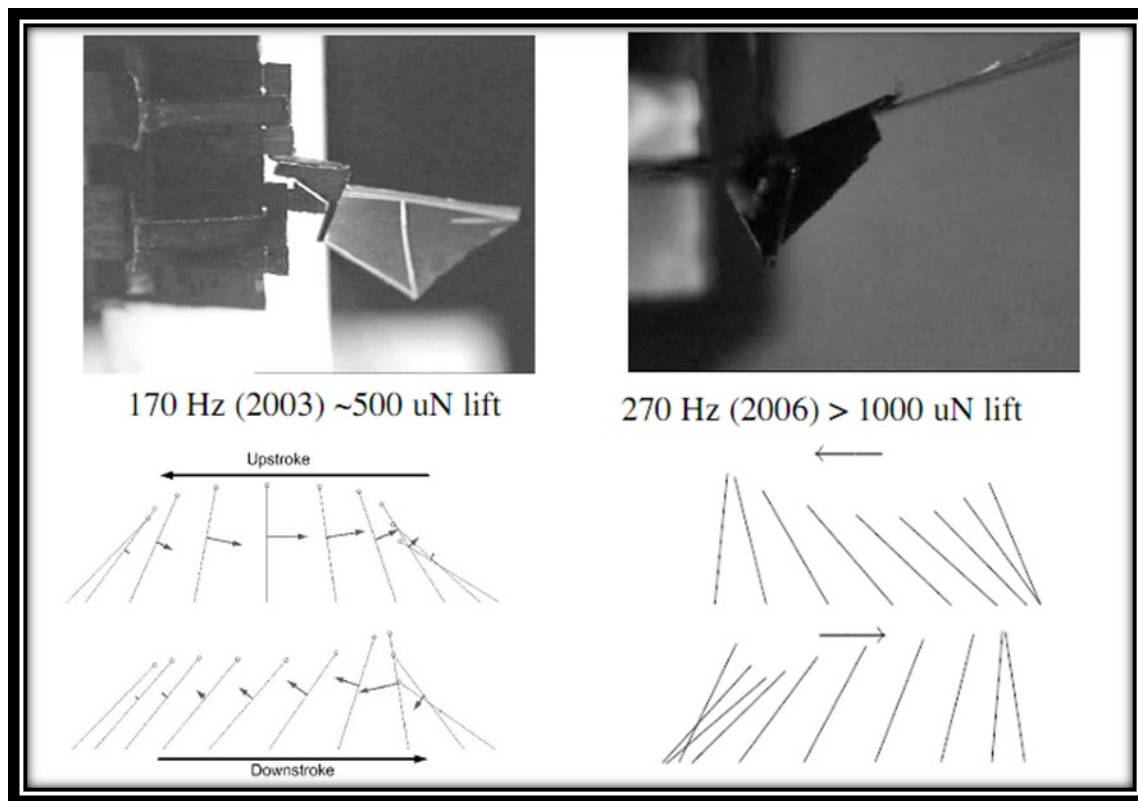
شکل ۸۵ پروتوتایپ حشره ریزمکانیکی در دانشگاه کالیفرنیا در برکلی

مشخصات هدف این پروژه، برد ۳ کیلومتر، سرعت کروز ۳ متر بر ثانیه، شعاع دور ۰.۱ متر در سرعت ۳ متر بر ثانیه، و جرم ۱۳۵ میلی گرم می باشد. بار این ریزسامانه نیز ۱ سانتی متر مربع یا به عبارتی ۲۰ میلی گرم سیلیکون و مدارات سیلیکونی خواهد بود. در نتیجه نسبت پلتفرم به بار برابر ۱۵ به ۱ خواهیم داشت. توزیع جرم برای اجزای مختلف به صورت ۴۰ میلی گرم برای بدنه و محرک ها، ۵ میلی گرم برای CPU، ۱۰ میلی گرم برای باتری، ۱۰ میلی گرم برای برق مستقیم و درایور آن، ۱۵ میلی گرم برای رادیو و 20 RFID، میلی گرم برای جریان نوری (کنترل و راهبری) در نظر گرفته شده که سر جمع معادل ۱۳۵ میلی گرم جرم کل پرنده خواهد بود.

از اهداف آن نیز توانایی پرواز ایستا، در ابعاد یک مگس بزرگ ۱۰۰ میلی گرمی در نظر گرفته شده است که با فرکانس ۱۵۰ هرتز و با زاویه بالزنش  $+60/-$  درجه و چرخش محوری بال  $+45/-$  درجه با یک مکانیزم محرک بال دو درجه آزادی (دو زاویه بالزنش و چرخش محوری) بالزنش انجام می دهد.

<sup>I</sup> Micromechanical Flying Insect

<sup>II</sup> UC Berkeley



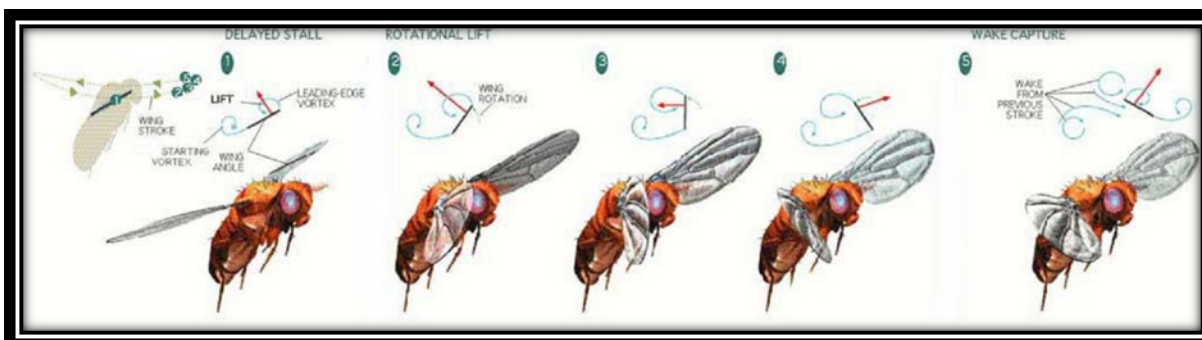
شکل ۸۶ شکل مکانیزم بالزنش در دو فاز بالا ضرب و پایین ضرب و تکامل آن طی دو فاز از پروژه در سال های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶ که نهایتاً موفق به تولید 0.1mN برا شده اند.

در این بین با الهام گرفتن از مکانیزم قفسه سینه مگس و فناوری لولای بال ها در محدوده جرم ۲۰ میلی گرم و انتخاب ریزموتوری با نسبت توان به جرم ۴۰۰ وات بر کیلوگرم با جرم ۲۵ میلی گرم موفق ظاهر شده اند. حال آن که نقاط گلوگاه تکنولوژی دو نقطه طراحی الگوی کنترلی در فرکانس ۱۵۰ تا ۲۵۰ هرتز و منبع انرژی یا باتری خاصی با جرم هدف هستند. برای بسط بیش تر خصوصاً مدلسازی سیستم و طراحی سامانه کنترل در پرواز بالزنش برای حشره ربات های زی رو بر خواننده را به مطالعه مراجع <sup>۷۵</sup> و <sup>۷۶</sup> و <sup>۷۷</sup> تشویق می نمایم.

مسئله مطرح شده خصوصاً برای وود و همکاران در دانشگاه هاروارد که در پروژه دیگری <sup>۷۸</sup> در همین سبک و سیاق مشغول ساخت نانوپرنده ای با فناوری پیزوالکتریک به عنوان محرک بال ها هستند، نیز مطرح است. آن ها به خصوص در مطالعه نحوه پرواز حشرات یافته اند که این موجودات خارق العاده برای کنترل فرکانس و دامنه و زاویه چرخش در بالزنش های خود به جای محاسبات پیچیده برای پاسخ های فعال به ورودی های کنترلی از الگوهای کنترل منفعل<sup>۱</sup> استفاده می کنند، به گونه ای که طراحی ماهیچه های محرک سینه ای به گونه ای است که متناسب با میزان بار وارد شده به بال این پارامترها تنظیم می گردند و بدینوسیله مثلاً به مانند دیفرانسیل در مقابل جریان باد جانب حرکت دوار روان خود را حفظ می نمایند.

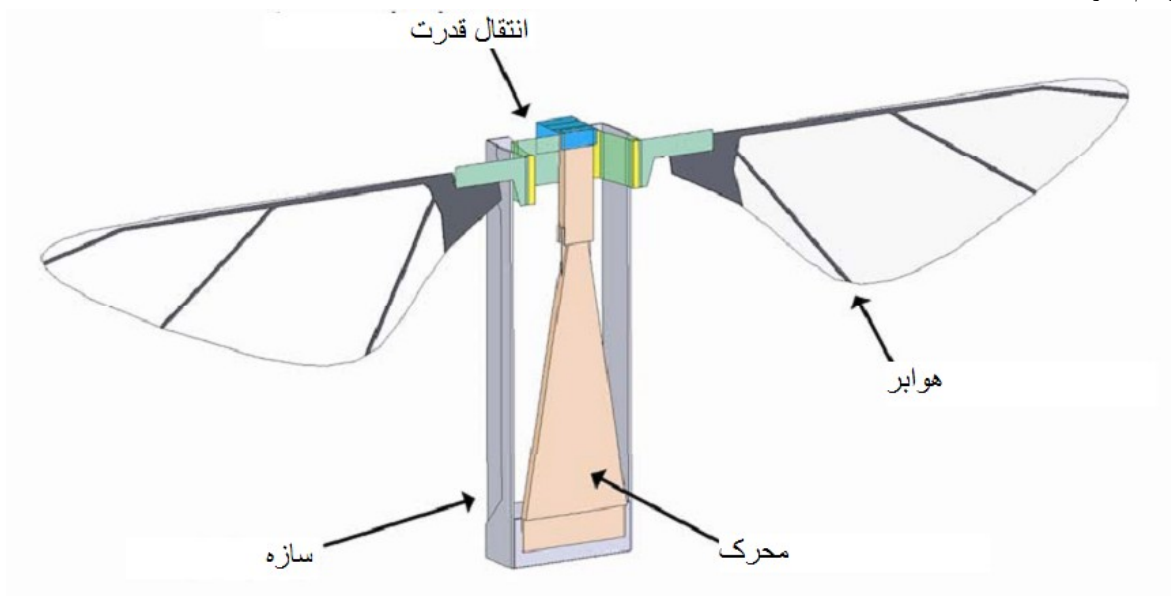
این پروژه که مدعی است سعی در پیاده سازی مکانیزم بالزنش مگس را دارد، نتیجه پژوهش دیکینسون و همکاران<sup>۷۹</sup> را در آشکار سازی جزئیات مکانیزم بالزنش مگس، الگوی خود قرار داده است. بنا به پژوهش دیکینسون که به خاطر برجسته بودن آن جایزه نابه مک آرتور را برنده شد، گونه رایج دیپترا از مگس ها در هنگام پرواز ایستا یک مسیربال تقریباً افقی و متقارن شامل یک بال ضرب بزرگ، چرخش حول محور طولی بال و یک انحراف صفحه بال ضرب می باشد. مکانیزم های برآزا که به طور عمده تحت تأثیر مکانیزم های ایرو دینامیک ناپایا هستند، در شکل زیر تشریح گردیده اند؛

<sup>۱</sup> Passive Control Paradigms



شکل ۸۷ مکانیزم های برآزی مگس دیپترا تحت تأثیر ایرودینامیک ناپایا و متناسب با آن

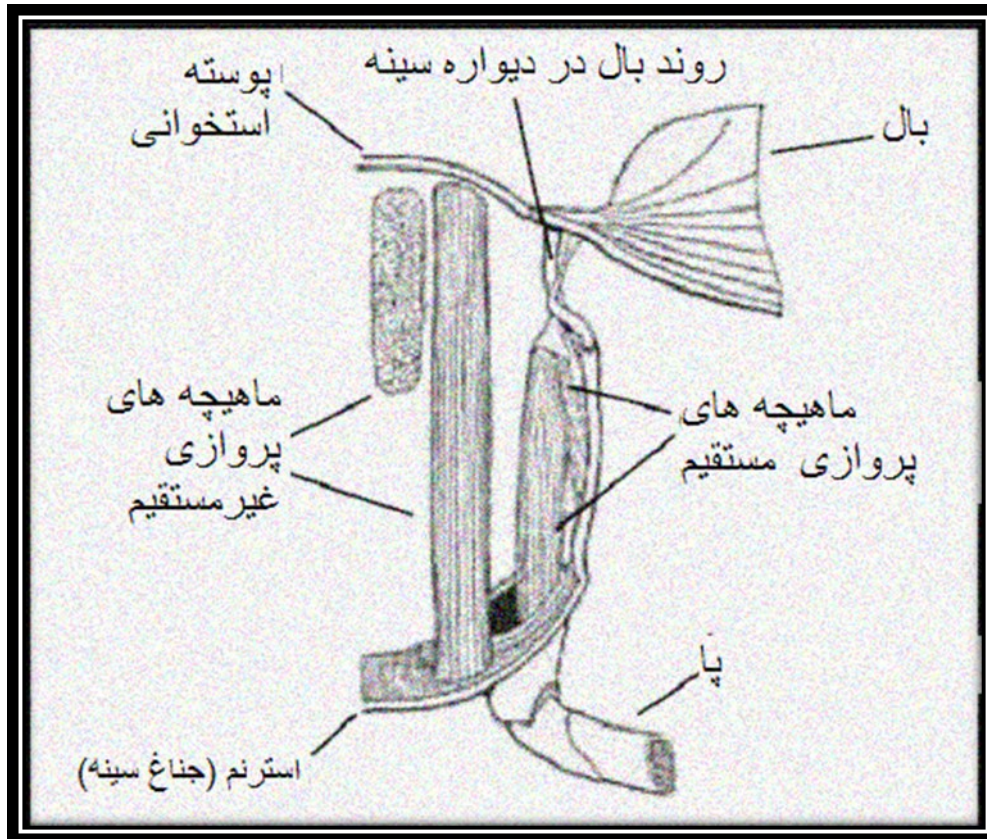
تمرکز اساسی پیرامون تولید پیشران کافی برای حفظ پرواز ایستا است. لذا در طراحی مکانیزم ها سادگی اساسی است و برای دستیابی به آن از بالزنش فعال همراه با چرخش منفعل استفاده شده است که منجر به دستگاهی فشرده و بهینه می گردد که البته بسیار کم محرک<sup>۱</sup> است.



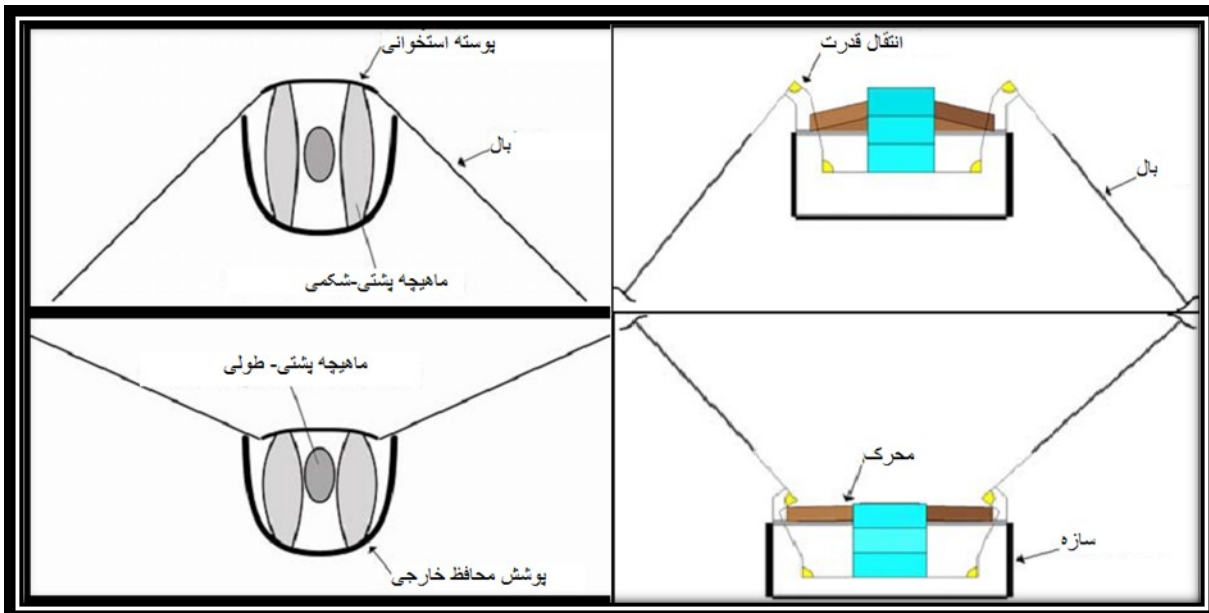
شکل ۸۸ شماتیک ساده شده ساختار نانوپرنده هاروارد

حال نگاهی به ساختار ماهیچه ای منبع الهام در شکل ۸۹ انداخته و به مقایسه این دو مکانیزم در شکل ۹۰ می پردازیم.

<sup>۱</sup> Underactuated



شکل ۸۹ جزئیات ماهیچه های پروازی مگس دیپترا



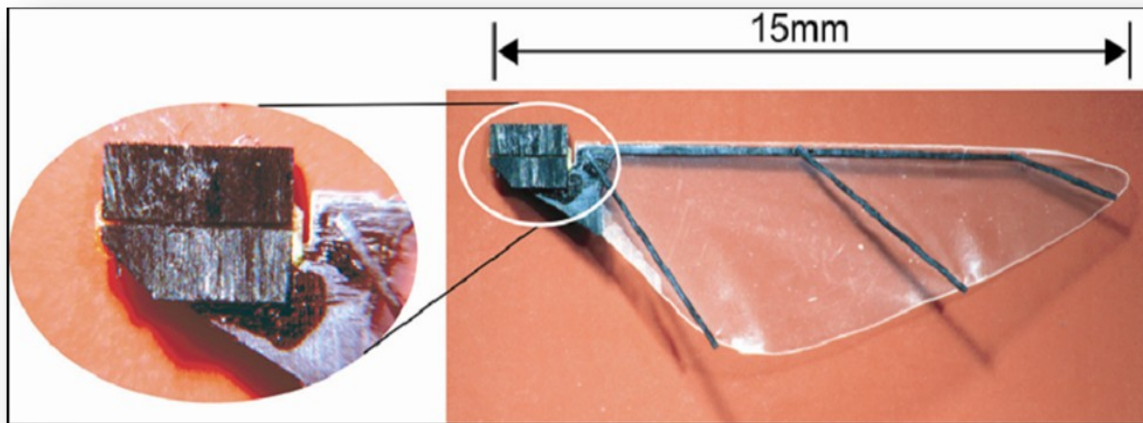
شکل ۹۰ مکانیزم ساده سازی شده از قفسه سینه مگس در مقایسه با مکانیزم ریاتیک قفسه سینه پیاده سازه شده

درست مشابه ماهیچه های پروازی غیرمستقیم یک مگس دیپترا، محرک ها یک قفسه سینه مکانیکی در حال افزایش دامنه را به حالت تشدید (رزونانس) می رسانند.

مکانیزم نشان داده شده، طراحی معادل آنالوگ ترکیب میل لنگ و جعبه دنده است. سامانه انتقال قدرت به خوبی امپدانسی معادل بارگذاری بال را به محرک منتقل می کند.

بسیاری از قطعات در این ابعاد ریز از روش ریزساختارهای ترکیبی هوشمند<sup>I</sup> ساخته شده اند که این روش در همان آزمایشگاه میلی سامانه های الهام گرفته از طبیعت<sup>II</sup> در دانشگاه کالیفرنیا در برکلی که پیش از این از آن ها یاد کردیم توسعه داده شده است. این روش، برای ساخت پروتوتایپ های کامپوزیت تاشده، چقرمه، و ارزان (مقوا، فیبر کربن، فایبرگلاس) با لولاهای پلیمری بسیار کاربردی است.

برای بسطی روی روش های ساخت قطعات در این ابعاد به مرجع<sup>۸۰</sup> مراجعه نمایید. در این ربات، بال ضرب به فرمان سینماتیک قفسه سینه می باشد، در حالی که چرخش بال به صورت منفعل رخ می دهد. در واقع یک لولای خمشی مناسب در پایه بال اجازه چرخش منفعل را می دهد. بارهای اینرسی و ایرودینامیکی تمایل به کاهش زاویه حمله دارند. گیرهای مفصل در پایه بال تضمین می کنند که انتهای بال بیش از حد نچرخند. مادامی که مود تشدید چرخشی به اندازه کافی بالاتر از فرکانس بالزنش است، چرخش به صورت شبه ایستا<sup>III</sup> رخ می دهد.

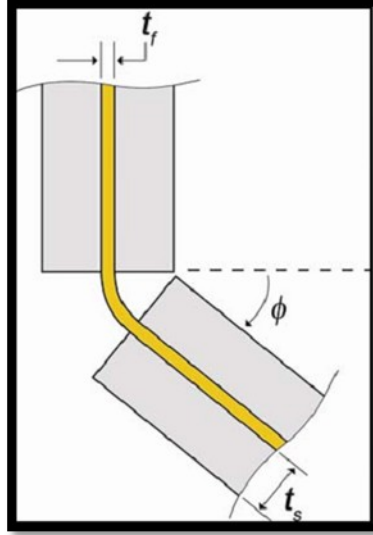


شکل ۹۱ بررسی طراحی ساختار بال و مکانیزم های لولایی خمشی در کنار گیرهای به کاررفته در پایه آن

<sup>I</sup> Smart Composite Microstructures= SCM

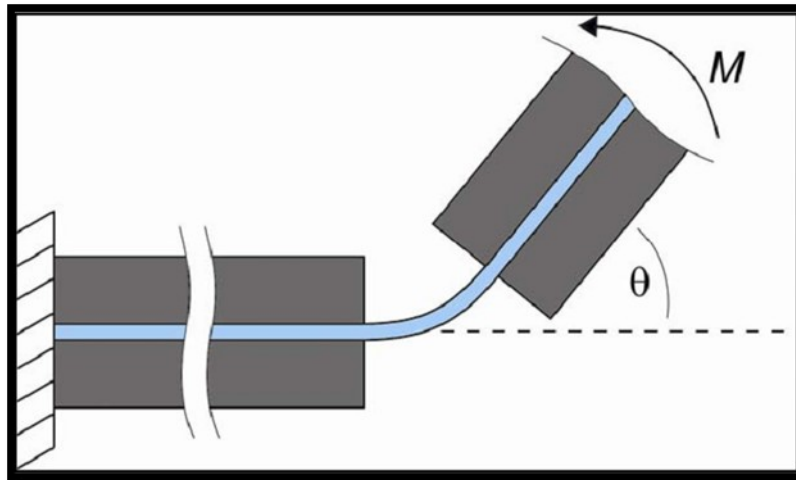
<sup>II</sup> Biomimetic Millisystems Lab

<sup>III</sup> Quasi-Static



شکل ۹۲ مفصل لولایی خمشی که با تعداد گیر مفصل محدود شده است.

$$\phi_{max} = \frac{\pi}{2} - \frac{L_f}{t_s}$$

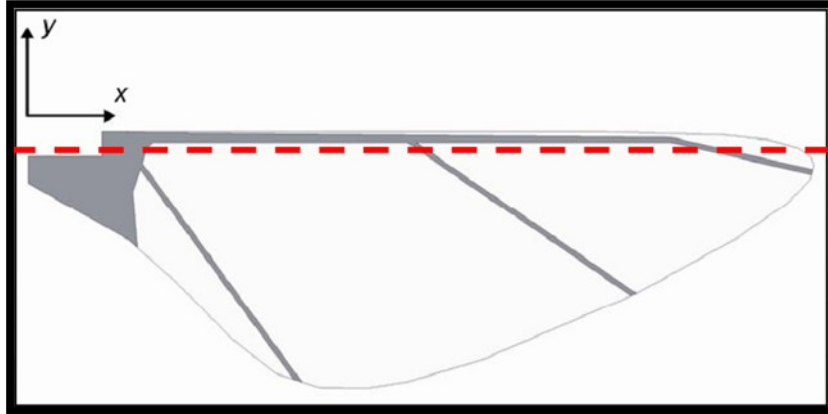


شکل ۹۳ مدل ساده خمشی برای اعمال شده به لولای بال مدل خوبی است.

از آن جایی که می خواهیم چرخش به صورت شبه ایستا رخ دهد؛ یعنی مود چرخش باید بسیار بزرگتر از مود بالزنش باشد. انرژی پتانسیل برای این شکل بال و فیزیک مسأله به طور عمده تابع سختی خمشی است (با صرفه نظر از مؤلفه گرانشی):

$$k_w = \frac{EI}{L} = \frac{Et_f^3 w_f}{12L}$$

به عنوان مثال برای یک لولای پلیمید به به عرض ۲ میلی متر، به طول ۱۰۰ میکرومتر، و ضخامت ۷.۵ میکرومتر سختی  $3.5 \mu\text{Nm/rad}$  تخمین زده می شود.



اینرسی دورانی،  $J_{xx}$ ، وابسته به شکل بال و محور چرخش است، که معمولاً بدست آوردن تحلیلی مقدار واقعی آن دشوار است. حال آن که به کمک مدل کد (CAD) آن این مقدار  $0.95 \text{ mg} \cdot \text{mm}^2$  تقریب زده می شود. از آن جایی که داریم؛

$$\omega_r = \sqrt{k_W / J_{xx}}$$

این منجر به یک فرکانس طبیعی چرخشی ۳۰۰ هرتز می گردد که در مقایسه با فرکانس (واداشته) بالزنش یعنی ۱۱۰ هرتز بزرگ است.

در نتیجه اثبات می گردد که چرخش می تواند به صورت شبه ایستا رخ دهد. همچنین نشان داده شد که هندسه خمش می تواند بازه حرکت را محدود نماید. حال می خواهیم بدانیم آیا بارهای کافی برای خم کردن لولای بال در اختیار خواهد بود؟ این با بررسی تناسب لولا و محدودیت های مفصل قابل تخمین است؛

$$M_{min} = k_N \phi_{max}$$

بر اساس پارامترهای خمشی داده شده، و زاویه چرخش مطلوب، ما به تقریباً  $3 \mu\text{Nm}$  گشتاور روی لولا نیازمندیم. برای این سامانه با فرض قرار گرفتن مرکز فشار در نصف وتر، هر دوی نیروی اینرسی و نیروی (پایای) سیال از این مقدار حین بالزنش بیشتر می شوند.

از آن جایی که لولای بال یک عضو خمشی است، نیروی پتانسیل حین بالضرب ذخیره شده و در انتهای هر نیم ضرب آزاد می گردد. لذا برای چرخش های سریع، می توانیم بنویسیم؛

$$U_r = \frac{1}{2} k_W \theta_r^2$$

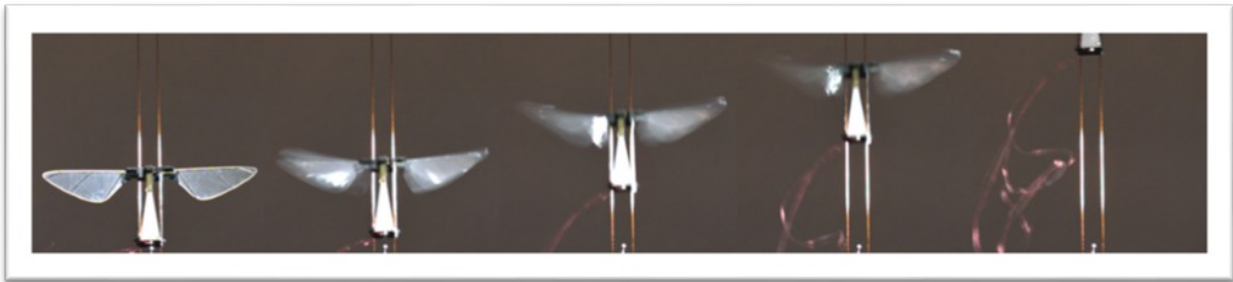
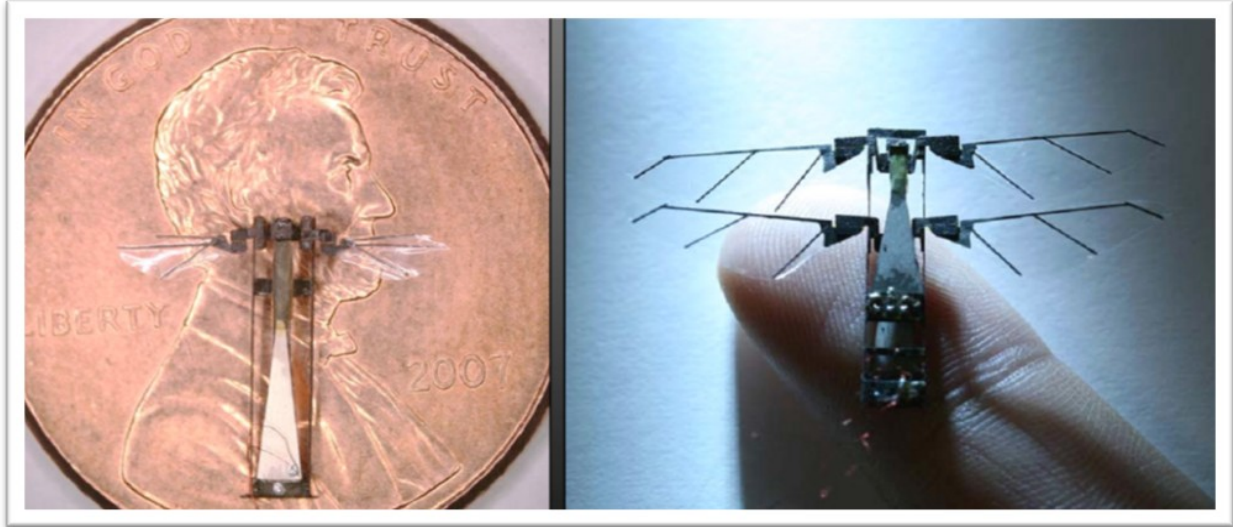
که در واقع پتانسیل برای افزایش یافته دارد. هر چه سختی خمشی بیشتر باشد، انرژی بیشتری به چرخش باز می گردد. هر چند اگر عضو خمشی زیادی سخت باشد، ممکن است اصلاً چرخش رخ ندهد.

بنا به کار استلتز و همکاران (۲۰۰۷)<sup>۱</sup> مسیرهای سینوسی برای بالزنش و چرخش از لحاظ پیشرانشی بهینه ترین<sup>۱</sup> مسیرها هستند. خاصیت خمشی در این مدل به صورت محلی داده شده در حالی که بال های حشرات در واقع خاصیت ارتجاعی گسترده دارند که موجب پیچش محوری در طول بال شده، زاویه حمله به طور مؤثری به سمت انتهای بال کاهش می دهد (مشابه پیچش در یک ملخ هواپیما).

نتیجه آزمایش در برانگیختگی فرکانس پایین محرک، بارهای ایرودینامیک یا اینرسی کافی برای ایجاد چرخش بال فراهم نمی کند. اما در مود تشدید بالزنش، بارهای ایرودینامیک و اینرسی بال را به یک زاویه حمله بهینه (که البته محدود به گیرهای مفاصل است) می برند.

<sup>۱</sup> Propulsively Efficient

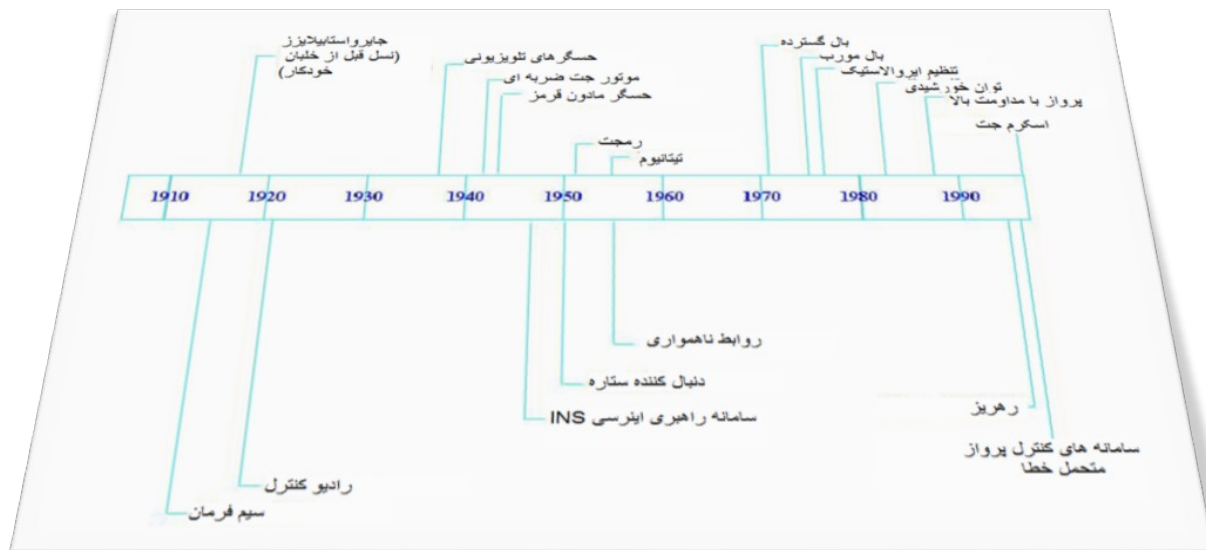




شکل ۹۴ (بالا) پروتوتایپ ساخته شده در سایز فوق العاده کوچک (پایین) انجام تست مقید روی پروتوتایپ با ایجاد انگیزش محرک پیزوالکتریک و مشاهده حرکت صعودی موفقیت آمیز نانو پرنده

## بخش ۶. آینده ها

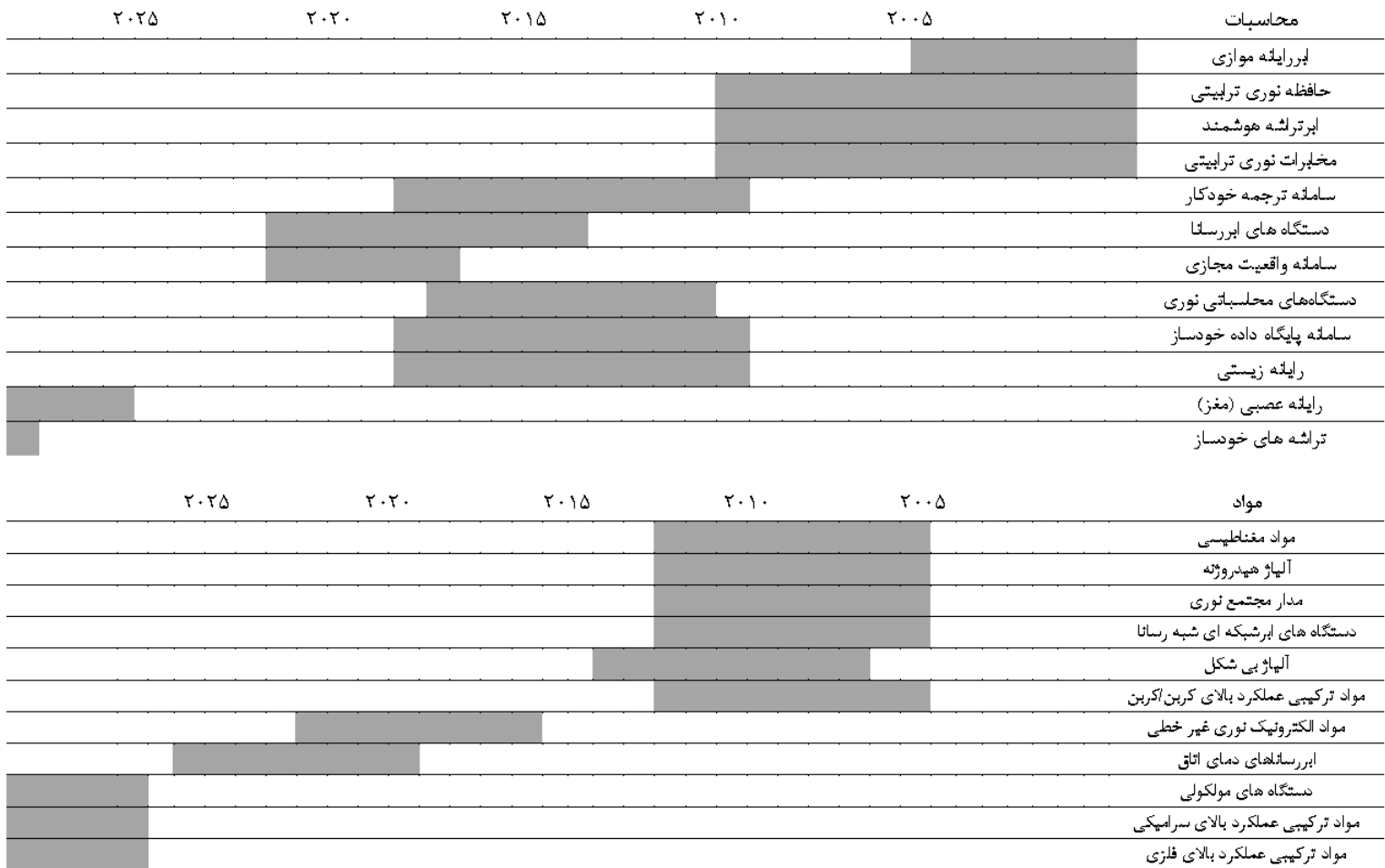
همانگونه که مطرح شده تطور شگرفی در فناوری (چه فناوری های پایه و چه فناوری های نهایی و رباتیک الهام گرفته از طبیعت) طی سالیان اخیر رخ داده است. در یک نگاه سیر تعدادی از فناوری های تعیین کننده پروازی و رباتیک را در زیر آورده ایم؛



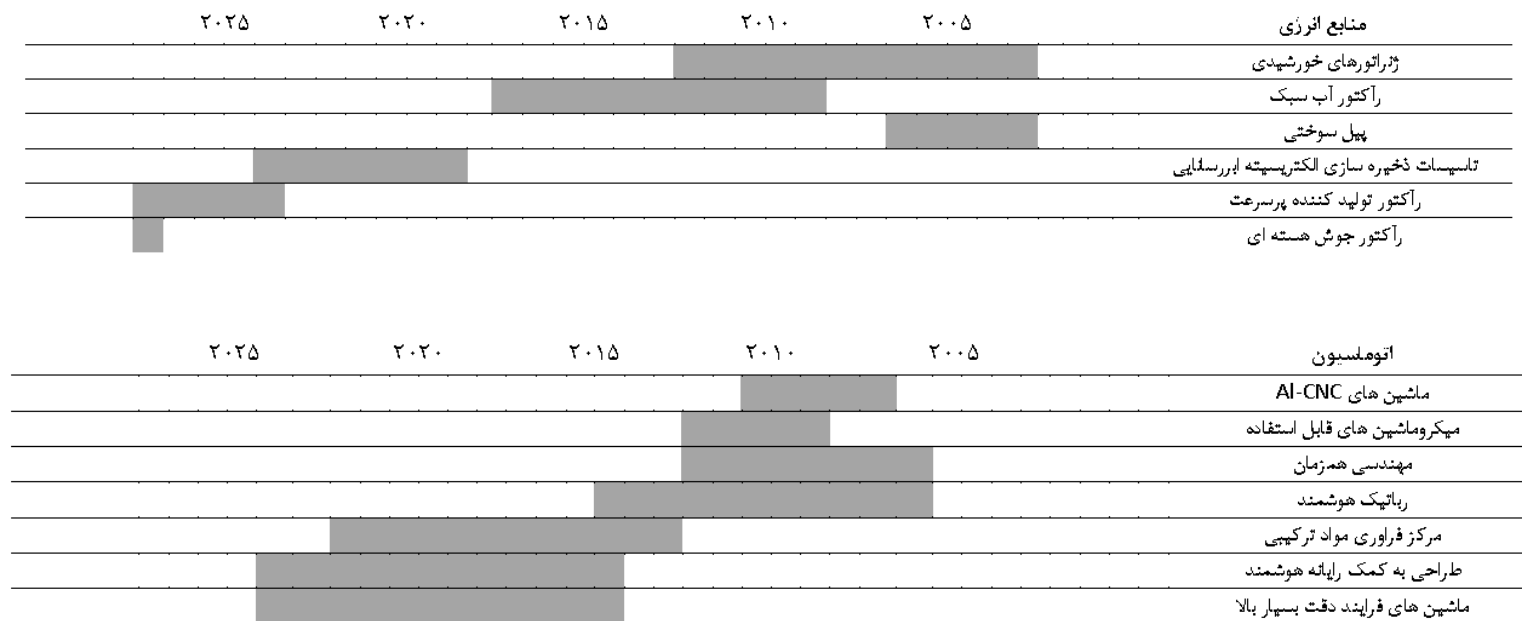
شکل ۹۵ نگاهی به گذشته؛ سیر ظهور فناوری های کلیدی طی قرن بیستم

با مطالعه داده های آژانس برنامه ریزی اقتصادی ژاپن رفتار زیر برای ظهور و رشد فناوری های کلیدی در حیطه های محاسبات، مواد، منابع انرژی و اتوماسیون قابل پیش بینی است؛

جدول ۳ پیش‌بینی زمان‌بندی ظهور و رشد فناوری های کلیدی رباتیک زی‌روبر در حیطه های فناوری های محاسبات و مواد پیشرفته (برگرفته از داده- های آژانس برنامه ریزی اقتصادی ژاپن)



جدول ۴ پیش‌بینی زمان‌بندی ظهور و رشد فناوری های کلیدی رباتیک زی‌روبر در حیطه های فناوری های منابع انرژی و اتوماسیون (برگرفته از داده- های آژانس برنامه ریزی اقتصادی ژاپن)



عملکرد ربات های پرنده در آینده (دهه ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵)

آن ها تنها هواپیماهای بدون سرنشین نخواهند بود بلکه ربات های هوایی خواهند بود. بسیاری از رهاپاد ها ماشین هایی کاملاً خودکار با اراده ای محدود و توانایی تولید نقشه های مأموریت خواهند بود. رهاپاد های آینده ترکیبی از بار و رسانگر هوایی خواهند بود که یک ارگانیزم به شدت یکپارچه را تشکیل می دهند.

در این بین هشت فناوری قادرکننده که تأثیر قابل ملاحظه ای بر عملکرد و رفتار رهاپاد های آینده خواهند گذاشت، عبارتند از؛

۱. پیل سوختی و انرژی خورشیدی: بازده تا ۷۰ درصد برای پیل سوختی مشاهده شده است. فناوری پیل سوختی حاضر گران است، و به دنبال فناوری های باتری های لیتیم پلیمری از لحاظ چگالی انرژی می باشد. پیش بینی می گردد با توجه به آهنگ رشد این فناوری ها، پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) شروع به نشان دادن عملکرد بهتر از باتری ها در آینده داشته باشد. فناوری های تغییر شکل دهنده بهبود یافته امکان استفاده سهل تر از سوخت های شیمیایی و هیدروکربنی معمول را خواهد داد. با تولید مواد فوتولتائیک پیشرفته تر از سیلیکون و پلیمرهای جدید بازده سلول های خورشیدی روز به روز در حال افزایش بوده کم کم دارد میزان انرژی تولیدی در واحد سطح آن ها به صرفه اقتصادی می رسد.

۲. دانش و مهندسی نور: در آینده دستگاه ها و سامانه های یکپارچه نوری اساساً در بسیاری از کاربرد ها فوتون ها را جایگزین الکترون ها خواهند کرد؛ از جمله در حسگرهای نوری، اتصالات مخابراتی، پردازش اطلاعات، سلاح های انرژی متمرکز هدایت شده؛ البته طبعاً رهاپاد ها وظایف بیشتری را به طور خودکار انجام خواهند داد تا اصولاً نیازی به اتصالات داده نباشد و درعین حال نیاز خواهد بود که پردازش داده به صورت همزمان و روی دستگاه انجام گردد. محاسبات نوری پهنای باند لازم برای محاسبات موازی عظیم را در سامانه های رهاپاد خودکار فراهم خواهد آورد. اجزای محاسبات پرسرعت و حافظه های ترابایتی و پتابایتی نیز از فناوری نوری بهره خواهند برد.

۳. کنترل جریان فعال: رهاپاد ها بدون نیاز به سطوح کنترلی قادر به پرواز خواهند بود و بسیار مانورپذیرتر از حالتی که به صورت تئوری از طریق ایرفویل سنتی ممکن است، خواهند بود. تکنیک های کنترل جریان هوا پیرامون سازه های ایرودینامیک از رویکردهای اکوستیک، الکتروستاتیک، نوماتیک، و شکل و ساختار ذاتی به نتیجه خواهند رسید.

۴. حسگرهای با تفکیک پذیری خارق العاده و طیف ماورایی: مأموریت های بسیاری از رهاپادها وابسته به رادارهای پهنای باند بالا، ژرفاسنج های لیزری، حسگر های مادون قرمز، و عکس برداری های ماورای بنفش است. حسگرهای با طیف ماورایی و تفکیک پذیری خارق العاده دیده بانی از فاصله های ایستگاهی دورتر، تفکیک پذیری عکس برداری بالاتر، و امکان گردآوری اطلاعات بیشتر را ممکن می کنند.

۵. محاسبات ظرفیت بالا و سامانه های آگاهی بنا<sup>I</sup>: در حال حاضر چین با سامانه تیان هه ۱۱ مستقر در مرکز ملی ابررایانه در شهر تیان جین با دستیابی سطح عملکرد ۲.۵۷ پتافلاپ در ثانیه (کوادرلیون محاسبه در ثانیه) در جایگاه نخست قرار دارد. شایان ذکر است این فناوری HPC<sup>II</sup> در این سطح را چینی ها مدیون موازی سازی تعداد زیادی GPU<sup>III</sup> (واحد پردازش گرافیکی) و نه مدل سنتی موازی سازی CPU<sup>IV</sup> ها است. این فناوری بدیهی است که بسیار عظیم است که بتواند با رهاپادها به پرواز درآید بلکه نرم افزارهای عظیم توسعه داده شده برای این ماشین ها پایه ای برای آن هایی خواهند بود که رایانه های مولکولی و نوری آینده به کار خواهند رفت. از سویی، فناوری های ذخیره سازی و مخابرات داخلی پرسرعت متمایل به سمت ابعاد نانو شده اند که فناوری های کاندید رهاپادهای آینده

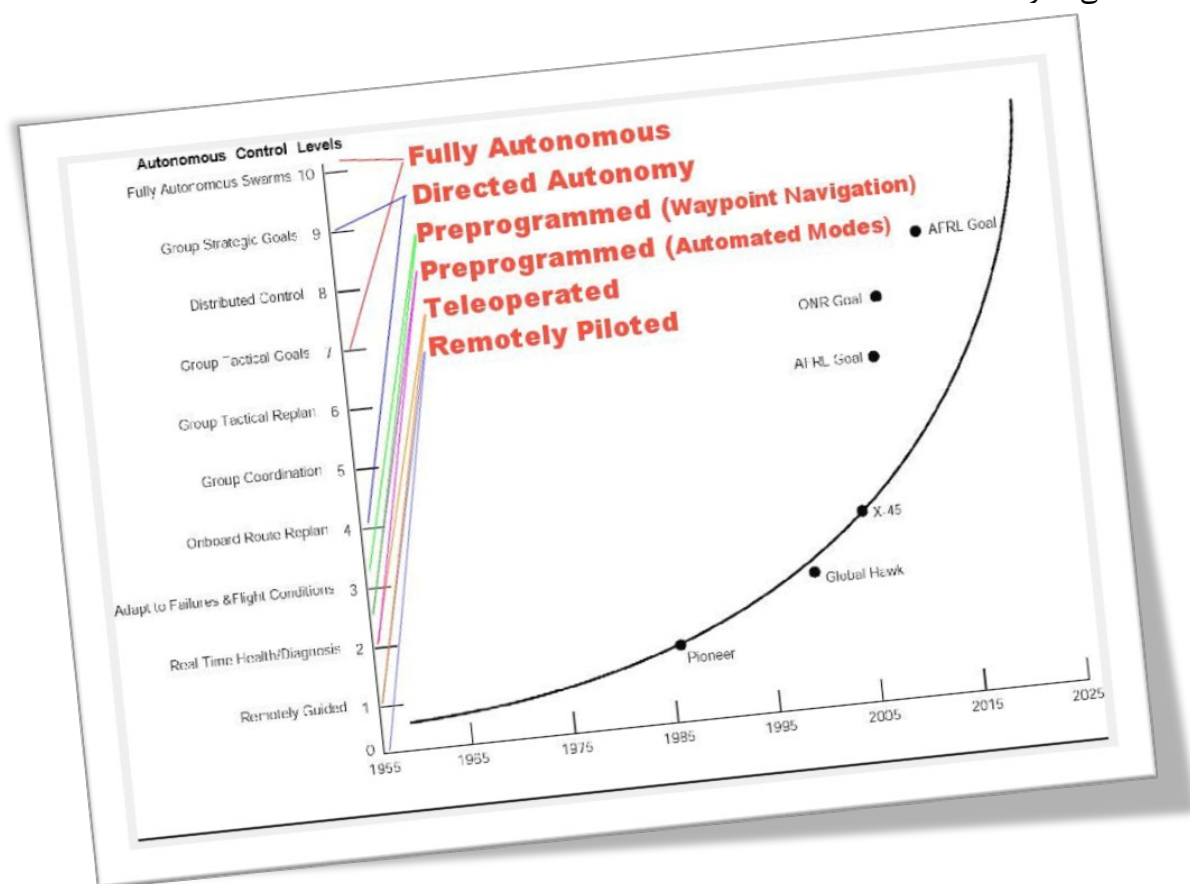
<sup>I</sup> Knowledge-based Systems

<sup>II</sup> High Performance Computing

<sup>III</sup> Graphical Processing Unit

<sup>IV</sup> Central Processing Unit

خواهند شد. نمونه فناوری دیگر می تواند حافظه هولوگرافیک باشد، که منجر به افزایش ظرفیت یک رهیاد برای ثبت دیده ها و کاهش نیاز به اتصال به ایستگاه زمینی یا حذف کامل اتصالات به دلیل افزایش توانایی پردازش های درمحل می گردد. به عنوان نمونه عملکرد مورد انتظار می تواند معادل ذخیره سازی ۶ ترابایت در یک سانتی متر مربع، سرعت انتقال داده ۱۰۰ برابر دی وی دی های رایج، و ظرفیت ۱۰۰ برابر آن ها باشد. از سوی دیگر، رهیادهای آینده هوشمندی لازم برای فکرکردن (در سطحی) و عکس العمل نشان دادن را به طرز الگوبردارنده از فرایند تصمیم گیری انسان، خواهند داشت. سامانه آگاهی بنا رهیاد های آینده را قادر می کند، به دستور کلامی انسان پاسخ داده، یاد بگیرند، عملیات تغییر مسیر در پرواز، تغییر نقشه و تغییر اولویت در اهداف مأموریت، عملیات تشخیص خطای داخلی در خود و اجرای سطوح خاصی از خودترمیم، تشخیص و تعامل با محیط را انجام دهند. شکل زیر نقشه راه پیش بینی شده برای سال ۲۰۲۵ رهیادهای آمریکایی را توسط وزارت دفاع این کشور به نمایش می گذارد.



شکل ۹۶ نقشه راه رهیاد های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ توسط وزارت دفاع آمریکا<sup>۸۲</sup>

۶. یکپارچه سازی فناوری های نامشابه در سطح یک لایه: هدف ترکیب تولید سیگنال، کنترل سیگنال، پردازش اطلاعات، حس کردن شیمیایی و فیزیکی، عملگرها و تحریک های سیالاتی و مکانیکی، به همراه تولید تشعشع و توابع ردیابی بر روی یک تک لایه است که در نهایت قابلیت اتکای بالا، ابعاد و وزن کوچک، زمان بیشتر در حال استقرار و هزینه کمتر را به همراه دارد.

۷. پوست های هوشمند و سامانه های خود بهبودزا: پوست های هوشمند بافت یکپارچه سازه ای هستند که ایرودینامیک، حسگر، پایش سلامت، توزیع انرژی، و هوشمندی را در یک تک ماده خلاصه نموده که سطحی ایرودینامیک و قابل پیکربندی مجدد با حسگرها و آنتن های همدیس جاسازی شده و یک سامانه عصبی برای

ارزیابی آسیب و منفذهای رادیو، مادون قرمز، ماورای بنفش قابل تنظیم در سازه های ایرودینامیکیشان دارد. از سوی دیگر ساختارهای هوشمند با توانایی خودترمیم می توانند از سه مکانیزم بهره گیرند: فیزیکی (سازه ای) که می تواند پیشگیرانه همچون جلوگیری از رشد ترک یا بازتولیدکننده همچون رشد ساختارهای جایگزین نو باشد، عملکردی (الگوریتمی) که شامل بازتخصیص منابع محاسباتی هنگام درماندن اجزای محاسباتی می باشد، و اصلاحی (از طریق افزودنی و موارد زاید) که مربوط به خطاهای گذرا مانند خطاهای عددی است. به طور کلی رهیادی با توانایی دوام آوردن با وجود آسیب و ادامه مأموریت ارزش خاصی دارد؛ خصوصا اگر خودکار باشد.

۸. نانوفناوری: قابلیت ساخت نانو ساختارها را با پتانسیل خودترمیم می دهد که به طور تکان دهنده ای می تواند ابعاد و وزن رهیادها را کاهش داده و اجازه ساخت ربات های هوایی پیچیده در ابعاد پرندگان و حتی حشرات را می دهد. به طور کلی سه مسیر در تولید ماشین های مولکولی وجود دارد: طراحی پروتئین ها (زیست فناوری)، شیمی زی رو، و جاگذاری اتمی

نمونه بارز این مبحث می تواند زیست تولید تار عنکبوت از شیر بز (زیست فولاد) باشد که مقاومت کششی ۲ تا ۵ برابر فولاد<sup>۱</sup> داشته و ۲۵ درصد از مواد ترکیبی (کامپوزیت ها) سبک تر است! قابلیت انعطاف خیره کننده داشته (تا ۳۰ برابر طولش می تواند کش بیاید). در عین حال هر بز ۴ تا ۲۲ گرم در روز پروتئین تار تولید می کند. نکسیا بایوتکنالوجیز به سرپرستی دکتر ترنر تاکنون بیش از ۱۵۰ نژاد اصلاح ژنتیکی بز تولید نموده اند.

## دنیای پیش رو؛ آینده های فرا رو:

فناوری های کلیدی یاد شده شامل سامانه های آگاهی بنا، یکپارچگی سطح تک لایه، حسگرهای طیف ماورایی، کنترل جریان فعال، نانوفناوری و پوست های هوشمند، مهندسی نور، پیل سوختی در چهار رسته مواد و ساخت، تولید انرژی، تشخیص و رفتار قابل طبقه بندی هستند. در واقع فناوری های مواد و ساخت اجازه تقویت تشخیص را داده، که آن نیز به نوبه خود منجر به رفتار خیره و ماهرتری خواهد شد که رهیادها برای عملیات خودکار خود جدای از کمک های راهبری جی پی اس نیازمندند. از سوی دیگر، تولید انرژی نیز رفتار را تقویت می نماید.

با این توضیحات خلاصه گرایشات عمومی عبارتند از:

۱. با دور شدن از هواپیماهای سرنشین دار و با استفاده از جدیدترین فناوری؛ حرکت به سمت رهیادهای که نقش جایگزین آن ها را به عهده می گیرند، خواهد بود.
۲. با دور شدن از هیدرولیک و احتراق؛ حرکت به سوی الکتریکی کردن همه چیز خواهد بود.
۳. با دور شدن از فناوری های با پایه غیر اصلیل؛ حرکت به سوی اجزای زیست مهندسی شده خواهد بود.
۴. با دور شدن از آرایه هایی از اجزای سوار شده؛ حرکت به سوی مواد خودترمیم چندمنظوره خواهد بود.
۵. با دور شدن از اجزای متحرک؛ حرکت به سوی قطعات تغییرشکل دهنده یا با تاثیرمیدان نیرو خواهد بود.
۶. با دور شدن از هدایت از دور و پیش برنامه نویسی؛ حرکت به سوی عملیات تماما خودکار خواهد بود.
۷. با دور شدن از اتکا به کمک های راهبری خارجی؛ حرکت به سوی تشخیص محیطی و خودراهبری خواهد بود.
۸. با دور شدن از اکتساب داده ها و رله (فشار روی اتصالات داده)؛ حرکت به سوی داده و سپس اطلاعات و سپس و آگاهی و سپس عمل (فشار روی پردازشگر) خواهد بود. این برکه به عمد خالی گذاشته شده است.

<sup>۱</sup> 300000psi

## پیوست ۱

نمونه‌ای از یک کد AVR را که برای راه اندازی یک موتور Brushless DC توسط نرم‌افزار CodevisionAVR به زبان C نوشته‌ایم. برنامه کامل نوشته شده قصد دارد دور چهار موتور برشلس کالیبره شده در یک ربات پرنده را به طور هوشمند با سیگنال های ارسالی اش به دور دلخواه رسانده و در آن دور حفظ نماید.

```
/******
```

```
This program was produced by the  
CodeWizardAVR V1.24.3b Professional  
Automatic Program Generator  
© Copyright 1998-2004 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.  
http://www.hpinfotech.com  
e-mail:office@hpinfotech.com
```

```
Project :  
Version :  
Date : 2000/10/15  
Author : F4CG  
Company : F4CG  
Comments:
```

```
Chip type : ATmega16  
Program type : Application  
Clock frequency : 16.000000 MHz  
Memory model : Small  
External SRAM size : 0  
Data Stack size : 256
```

```
*****/
```

```
#include <mega16.h>
```

```
// Alphanumeric LCD Module functions
```

```
#asm
```

```
.equ __lcd_port=0x15 ;PORTC
```

```
#endasm
```

```
#include <lcd.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <delay.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
// External Interrupt 0 service routine
```

```
int edge1=0;
```

```
int
```

```
ch1up,ch2up,ch3up,ch4up,ch1down,ch2down,ch3down,ch4down,r1,r2,r3,r4,adxup,adxdown,adyup,  
adydown;
```

```
int radx,rady,bradx,brady,br1,br2,br3,br4,mabna,shomarande,addad,labu;
```

```
float ms,d12,d34,dkol,m1,m2,m3,m4;
```

```

bit shoru=0;
char i=0;
char str[15];
interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)
{
    if(edge1==0)
    {
        ch1up=TCNT1;
        MCUCR=0x02;
        edge1=1;
        if(PORTA.5==0)
            PORTA.5=1;
        else
            PORTA.5=0;
    }else
    {
        ch1down=TCNT1;
        MCUCR=0x03;
        r1=ch1down-ch1up;
        if(r1<0)
            r1=r1+0xFFFF+0x0001;
        edge1=0;
    }
}

// External Interrupt 1 service routine
interrupt [EXT_INT1] void ext_int1_isr(void)
{
}

// Declare your global variables here

void main(void)
{
// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization
// Port A initialization
// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=Out Func2=Out Func1=Out Func0=Out
// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=0 State2=0 State1=0 State0=0
PORTA=0x00;
DDRA=0xFF;

// Port B initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTB=0x00;
DDRB=0x00;

// Port C initialization

```



```

// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTC=0x00;
DDRC=0xFF;

// Port D initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTD=0x00;
DDRD=0x00;

// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 0 Stopped
// Mode: Normal top=FFh
// OCO output: Disconnected
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;
OCR0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 16000.000 kHz
// Mode: Normal top=FFFFh
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x01;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 2 Stopped
// Mode: Normal top=FFh
// OC2 output: Disconnected
ASSR=0x00;
TCCR2=0x00;
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;

```

```

// External Interrupt(s) initialization
// INTO: On
// INTO Mode: Rising Edge
// INT1: On
// INT1 Mode: Rising Edge
// INT2: Off
GICR|=0xC0;
MCUCR=0x03;
MCUCSR=0x00;
GIFR=0xC0;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x00;

// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;

// LCD module initialization
lcd_init(16);

// Global enable interrupts
#asm("sei")

while (1)
{
    if(shoru==0)
    {
        while(i<31)
        {
            delay_ms(1000);
            i++;
        }
        if(PINB.0==1)
        {
            while(PINB.0==1)
            {};
        }
        while(PINB.0==0)
        {};

        ch3up=TCNT1;
        while(PINB.0==1)
        {};
        ch3down=TCNT1;
        r3=ch3down-ch3up;
        if(r3<0)

```

```

r3=r3+0xFFFF+0x0001;
while(PINB.1==0)
    {};
ch2up=TCNT1;
while(PINB.1==1)
    {};
ch2down=TCNT1;
r2=ch2down-ch2up;
if(r2<0)
    r2=r2+0xFFFF+0x0001;
while(PINB.2==0)
    {};
ch4up=TCNT1;
while(PINB.2==1)
    {};
ch4down=TCNT1;
r4=ch4down-ch4up;
if(r4<0)
    r4=r4+0xFFFF+0x0001;
/*    if(PINB.3==1)
    {
        while(PINB.3==1)
            {};
    }
while(PINB.3==0)
    {};
adxup=TCNT1;
while(PINB.3==1)
    {};
adxdown=TCNT1;
radx=adxdown-adxup;
if(radx<0)
    radx=radx+0xFFFF+0x0001;
if(PINB.4==1)
    {
        while(PINB.4==1)
            {};
    }
while(PINB.4==0)
    {};
adyup=TCNT1;
while(PINB.4==1)
    {};
adtdown=TCNT1;
rady=adtdown-adyup;
if(rady<0)
    rady=rady+0xFFFF+0x0001; */
br1=r1;
br2=r2;

```

```

        br3=r3;
        br4=r4;
        // bradx=radx;
        //brady=rady;
        shoru=1;
}else
{
    //if(PINB.0==1)
    //{
    //    while(PINB.0==1)
    //        {};
    //}

    if(PINB.0==1)
    {
        while(PINB.0==1)
            {};
    }
    while(PINB.0==0)
        {};

    ch3up=TCNT1;
    while(PINB.0==1)
        {};
    ch3down=TCNT1;
    r3=ch3down-ch3up;
    if(r3<0)
        r3=r3+0xFFFF+0x0001;
    while(PINB.1==0)
        {};
    ch2up=TCNT1;
    while(PINB.1==1)
        {};
    ch2down=TCNT1;
    r2=ch2down-ch2up;
    if(r2<0)
        r2=r2+0xFFFF+0x0001;
    while(PINB.2==0)
        {};
    ch4up=TCNT1;
    while(PINB.2==1)
        {};
    ch4down=TCNT1;
    r4=ch4down-ch4up;
    if(r4<0)
        r4=r4+0xFFFF+0x0001;
    /* if(PINB.2==1)
    {
        while(PINB.2==1)
            {};
    }

```

```

    }
    while(PINB.3==0)
        {};
    adxup=TCNT1;
    while(PINB.3==1)
        {};
    adxdown=TCNT1;
    radx=adxdown-adxup;
    if(radx<0)
    radx=radx+0xFFFF+0x0001;
    if(PINB.4==1)
    {
        while(PINB.4==1)
            {};
    }
    while(PINB.4==0)
        {};
    adyup=TCNT1;
    while(PINB.4==1)
        {};
    adydown=TCNT1;
    rady=adydown-adyup;
    if(rady<0)
    rady=rady+0xFFFF+0x0001;
*/}
r1=r1-br1;
r2=r2-br2;
r3=r3-br3;
r4=r4-br4;
// radx=radx-bradx;
// rady=rady-brady;
//////////farmane be motorha darzir miyayad

```

```

if(r3<3000)
ms=(.74+(0.66/3000)*r3);
//else
//ms=(1.4+((float)(r3-3000)/9000)*.15);
if (r1>0)
d12=((float)r1/6000);
else
d12=((float)r1/3600);
if (r2>0)
d34=((float)r2/6000);
else
d34=((float)r2/3600);
if (r4>0)
dkol=((float)r4/6000);

```

```

else
d34=((float)r4/3600);

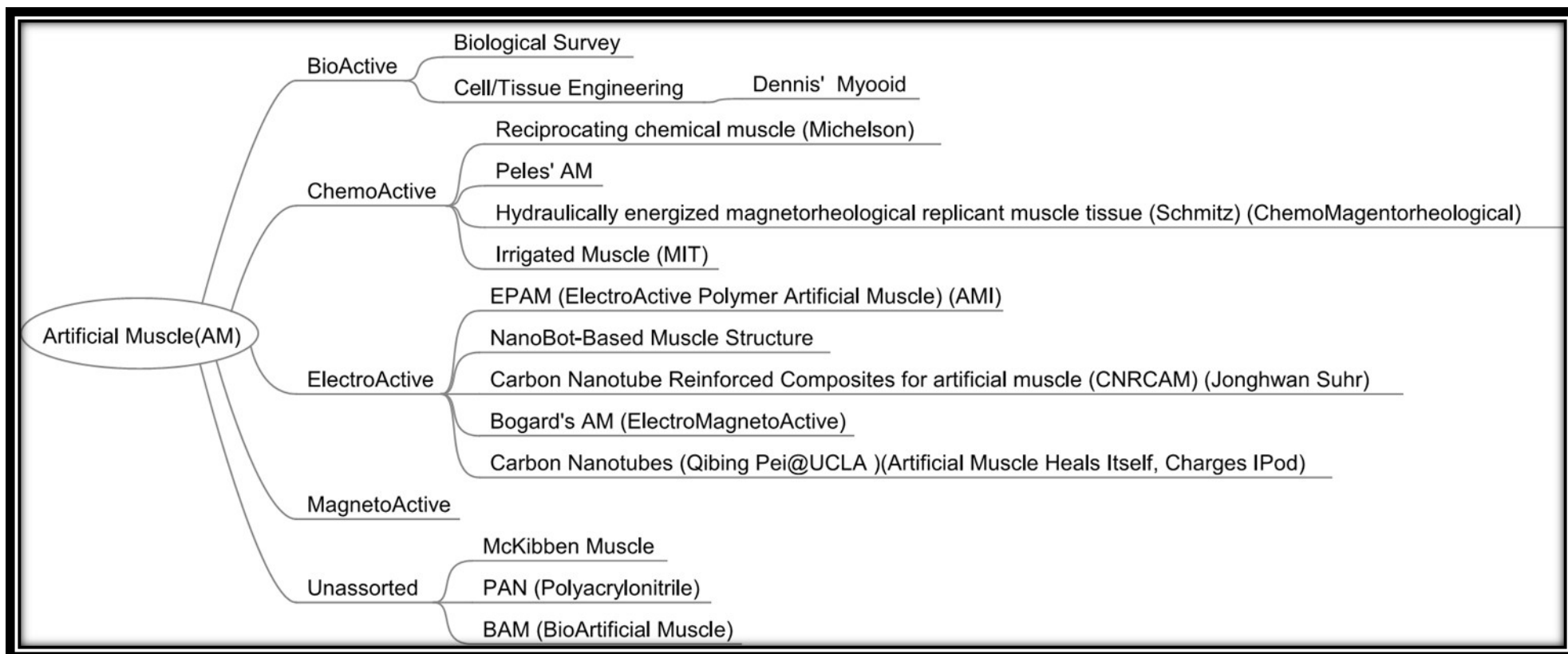
m1=((10.0/100)*.15*d12+(10.0/100)*.15*dkol+ms)*16000);
m2=(-(10.0/100)*.15*d12+(10.0/100)*.15*dkol+ms)*16000);
m3=((100.0/100)*.15*d34-(10.0/100)*.15*dkol+ms)*16000);
m4=(-(10.0/100)*.15*d34-(10.0/100)*.15*dkol+ms)*16000);
mabna=TCNT1;
/*if(i==41)
{lcd_clear();
lcd_gotoxy(0,0);
labu=m3;
sprintf(str,"m3:%u",labu);
lcd_puts(str);
i=0;
}
i++;*/
PORTA.1=1;
PORTA.2=1;
PORTA.3=1;
PORTA.4=1;
shomarande=0;
while(shomarande<4)
{
    addad=TCNT1-mabna;
    if(addad<0)
        addad=addad+0xFFFF+0x0001;
    if(m1<addad)
    {
        PORTA.1=0;
        shomarande++;
    }
    if(m2<addad)
    {
        PORTA.2=0;
        shomarande++;
    }

    if(m3<addad)
    {
        PORTA.3=0;
        shomarande++;
    }

    if(m4<addad)
    {
        PORTA.4=0;
        shomarande++;
    }
}

```

}  
};  
}



شکل ۹۷ پایگاه داده فناوری های توسعه یافته در زمینه ماهیچه های مصنوعی نتیجه مطالعات روی گستره وسیعی از این فناوری ها



مراجع



- <sup>24</sup> Jeffrey A. Walker\* and Mark W. Westneat, "Labriform Propulsion in Fishes: Kinematics of Flapping Aquatic Flight in the Bird Wrasse *Gomphosus Varius* (Labridae)", *The Journal of Experimental Biology* 200, 1549–1569, The Company of Biologists Limited 1997, JEB0850
- <sup>25</sup> Ravi Ramamurti, William C. Sandberg, Rainald Löhner, Jeffrey A. Walker and Mark W. Westneat, "Fluid dynamics of flapping aquatic flight in the bird wrasse: three-dimensional unsteady computations with fin deformation", *The Journal of Experimental Biology* 205, 2997–3008 © The Company of Biologists Limited, 2002, JEB4509
- <sup>26</sup> James C. Liao, David N. Beal, George V. Lauder, Michael S. Triantafyllou, "Fish exploiting vortices decrease muscle activity", *Science Magazine*, 2 September 2003
- <sup>27</sup> Proctor, N.S. and P.J. Lynch. 1993. *Manual of ornithology: avian structure and function*. Yale Univ. Press, New Haven, CN.
- <sup>28</sup> Frank B. Gill, "Ornithology", 3rd edition, Freeman & Company, W. H., 2006, ISBN: 0716749831 (0-7167-4983-1) , ISBN 13: 9780716749837 (978-0-7167-4983-7), <http://people.eku.edu/ritchisong/ornitholsyl.htm>
- <sup>29</sup> <http://www.transitionig.com/bird.htm>
- <sup>30</sup> <http://www.jason.org>
- <sup>31</sup> <http://www.earthlife.net/birds/flight.html>
- <sup>32</sup> [www.paulnoll.com/oregon/birds/feather-flight.html](http://www.paulnoll.com/oregon/birds/feather-flight.html)
- <sup>33</sup> Stéphane Doncieux, Jean-Baptiste Mouret, Emmanuel de Margerie, Jean-Arcady Meyer, "From flapping wings to soaring: evolutionary robotics and flying robots", *IROS'07 MAVWS*, 2007
- <sup>34</sup> Dial, K.P., Kaplan, S.R., and Goslow Jr, G.E. (1988) A functional analysis of the primary upstroke and downstroke muscles in the domestic pigeon (*Columba livia*) during flight. *Journal of experimental Biology*, 134, 1-16.
- <sup>35</sup> Poore, S.O., Sanchez-Haiman, A., and Goslow Jr, G.E. (1997) Wing upstroke and the evolution of flapping flight. *Nature*, 387, 799-802.
- <sup>36</sup> Ali R. Ahmadi, Alexander Krynytzky , S. E. Widnall, "The Aerodynamics of Bird Flight", MIT, 1975
- <sup>37</sup> Thomas J Mueller, "Fixed And Flapping Wing Aerodynamics For Micro Air Vehicles", AIAA, Progress In Astronautics And Aeronautics, AIAA, 2001
- <sup>38</sup> R Liebe, "Flow Phenomena In Nature", Vol. 1&2, WIT Press, 2007.
- <sup>39</sup> Robert Burton, "Bird Flight: An Illustrated Study of Birds' Aerial Mastery", Facts On File, October 1990, ISBN-10: 0816024103, ISBN-13: 978-0816024100
- <sup>40</sup> Alan Vo, Satinderjit Singh, Aisha Choudhry, Nick Hawley, "Flight and Endothermy", *Biology* 452, Summer 2006
- <sup>41</sup> Jia-chi Wu, Zoran Popovic', "Realistic Modeling of Bird Flight Animations", *ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH* 2003
- <sup>42</sup> Chaojiang ZHU, Kazunobu MURAOKA, Takeyuki KAWABATA, Can CAO, Tadahiro FUJIMOTO, Norishige CHIBA, "Real-time Animation of Bird Flight Based on Aerodynamics", *The Journal of the Society for Art and Science, Japan*, 2006, Vol.5 No.1 pp.1–10
- <sup>43</sup> Cavagna G. A., Thys H. and Zamboni A., "The sources of external work in level walking and running", *J. Physiol. Lond.* 262, 639-657, 1976
- <sup>44</sup> Timothy M. Griffin, Russell P. Main, and Claire T. Farley, "Biomechanics of quadrupedal walking: how do four-legged animals achieve inverted pendulum-like movements?" *J. Exp. Biol.* 207: 3545-3558, 2004
- <sup>45</sup> [http://www.ted.com/talks/janine\\_benyus\\_biomimicry\\_in\\_action.html](http://www.ted.com/talks/janine_benyus_biomimicry_in_action.html) , <http://www.ted.com/index.php/talks/view/id/18>
- <sup>46</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Biomimicry> , <http://en.wikipedia.org/wiki/Bionics>
- <sup>47</sup> [http://www.ted.com/talks/lang/eng/robert\\_full\\_learning\\_from\\_the\\_gecko\\_s\\_tail.html](http://www.ted.com/talks/lang/eng/robert_full_learning_from_the_gecko_s_tail.html)
- <sup>48</sup> [http://www.ted.com/talks/robert\\_full\\_on\\_engineering\\_and\\_evolution.html](http://www.ted.com/talks/robert_full_on_engineering_and_evolution.html)
- <sup>49</sup> Anthony Colozza , "Planetary Exploration using Biomimetics, An Entomopter for Flight on Mars", OAI, Phase II Project NAS5-98051, Final Report, NASA Institute for Advanced Concepts, 2002
- <sup>50</sup> Ellington CP., "Unsteady aerodynamics of insect flight.", *Symp Soc Exp Biol.* 1995;49:109-29.
- <sup>51</sup> Ellington, C., "The Aerodynamics of Flapping Animal Flight," *American Zoology*, vol. 24, 1984, pp. 95 - 105
- <sup>52</sup> C. P. ELLINGTON, "The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Applications to Micro-Air Vehicles", *The Journal of Experimental Biology* 202, 3439–3448 (1999), JEB2214
- <sup>53</sup> Sanjay P. Sane, "The aerodynamics of insect flight", *The Journal of Experimental Biology* 206, 4191-4208, 2003 The Company of Biologists Ltd, doi:10.1242/jeb.00663
- <sup>54</sup> <http://www.angel-strike.com/entomopter/EntomopterProject.html>
- <sup>55</sup> <http://www.roboswift.nl/index.php?page=home&lang=en>
- <sup>56</sup> D. Lentink, U. K. Müller, E. J. Stamhuis, R. de Kat, W. van Gestel, L. L. M. Veldhuis, P. Henningsson, A. Hedenström, J. J. Videler & J. L. van Leeuwen, "How swifts control their glide performance with morphing wings" , *Nature* **446**, 1082-1085 (26 April 2007) | doi:10.1038/nature05733; <http://www.nature.com/nature/journal/v446/n7139/abs/nature05733.html>
- <sup>57</sup> MS Triantafyllou and GS Triantafyllou, "An Efficient Swimming Machine", *Sci. Am.* 3 (1995), p. 1.
- <sup>58</sup> [http://www.romela.org/main/Robotics\\_and\\_Mechanisms\\_Laboratory](http://www.romela.org/main/Robotics_and_Mechanisms_Laboratory)

<sup>59</sup> Paulson, L.D., "Biomimetic robots", Computer, Sept. 2004, Issue:9, 48 - 53, 0018-9162, IEEE Computer Society

گروه پژوهشی MAV. "امکان سنجی طراحی و ساخت پرنده کوچک"، پژوهشگاه هوافضا، دیماه ۱۳۸۶

<sup>61</sup> Thomas J. Mueller, James C. Kellogg, Peter G. Ifju, Sergey V. Shkarayev, "Introduction to the Design of Fixed-Wing Micro Air Vehicles Including Three Case Studies", AIAA, 2007 ISBN-10: 1-56347-849-8 ISBN-13: 978-1-56347-849-9.

<sup>62</sup> Davis, W.R., "Micro UAV," Presentation to 23rd Annual AUVSI Symposium, 15-19 July, 1996.

<sup>63</sup> R.C. Michelson, L. Newcome, "21st Century Aerial Robotics", NIAC (NASA Institute for Advanced Concepts) Fellows Meeting, 2002

<sup>64</sup> Kunz Peter J., "Aerodynamics and Design for Ultra-Low Reynolds Number Flight," Ph.D. Dissertation, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, California, USA, 2003.

<sup>65</sup> Lissaman, P.B.S. (1983). Low-Reynolds-Number Airfoils. Annual Review of Fluid Mechanics. 15:223-239.

<sup>66</sup> Stéphane Doncieux, Jean-Baptiste Mouret, Emmanuel de Margerie, Jean-Arcady Meyer, "From flapping wings to soaring: evolutionary robotics and flying robots", IROS'07 MAVWS, 2007

<sup>67</sup> S. Bouabdallah, R. Siegwart, Chapter 6 of Valavanis Kimon P.(ed.), "Advances in Unmanned Aerial Vehicles, State of the Art and the Road to Autonomy", Springer, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands., 2007, ISBN 978-1-4020-6114-1 (e-book).

<sup>68</sup> Joel Grasmeyer, "Micro Air Vehicle Development at AeroVironment", Nasa Langley, 2001,

<sup>69</sup> "Flapping micro plane watches where it goes", Delft Outlook, April, 2005

<sup>70</sup> Agnès Luc-Bouhali, Philippe Choy, "Progress of the REMANTA project on MAV with flapping wings and of the International Universities mini UAV Competition", EMAV 2004, Braunschweig, Germany

<sup>71</sup> Press Release by AeroVironment, June 30, 2009, "DARPA Awards AeroVironment Phase II Contract Extension for Nano Air Vehicle Development Program", <http://www.avinc.com>

<sup>72</sup> Hundley, Richard O. and Gritton, C, Eugene. "Future Technology-Driven Revolutions in Military Operations," RAND Corporation, Document No. DB-110-ARPA, 1994

<sup>73</sup> United States Air Force, "Unmanned Aircraft Systems Flight Plan 2009-2047", Headquarters, United States Air Force, Washington DC., 18 May, 2009

<sup>74</sup> Ron Fearing, "Challenges for 100 Milligram Flapping Flight", Intelligent Robots and Systems Conference, MAV Workshop, 2007.

<sup>75</sup> Luca Schenato, "Analysis and Control of Flapping Flight: from Biological to Robotic Insects", Phd. Dissertation, Graduate Division of the UNIVERSITY of CALIFORNIA at BERKELEY, Fall 2003.

<sup>76</sup> Xinyan Deng; Schenato, L.; Wei Chung Wu; Sastry, S.S., "Flapping flight for biomimetic robotic insects: part I- system modeling", IEEE Transactions on Robotics, IEEE Robotics and Automation Society, Aug. 2006, Volume: 22 Issue:4, 776 – 788, ISSN: 1552-3098, INSPEC Accession Number: 9031340.

<sup>77</sup> Xinyan Deng; Schenato, L.; Sastry, S.S., "Flapping flight for biomimetic robotic insects: part II-flight control design", IEEE Transactions on Robotics, IEEE Robotics and Automation Society, Aug. 2006, Volume: 22 Issue:4, 789 – 803, ISSN: 1552-3098, INSPEC Accession Number: 9031341

<sup>78</sup> Robert Wood, "Passive rotation for insect-scale MAVs", Intelligent Robots and Systems Conference, MAV Workshop, 2007

<sup>79</sup> Michael H. Dickinson, Fritz-Olaf Lehmann and Sanjay P. Sane, "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight", Science 18 June 1999: Vol. 284 no. 5422 pp. 1954-1960, DOI: 10.1126/science.284.5422.1954

<sup>80</sup> <http://www.hizook.com/blog/2009/11/30/building-miniature-robots-using-low-cost-techniques>

<sup>81</sup> Steltz, E.; Avadhanula, S.; Fearing, R.S.; "High lift force with 275 Hz wing beat in MFI", Intelligent Robots and Systems, 2007.

<sup>82</sup> "Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2000-2025", April 2001, Office of the Secretary of Defense 1000 Defense Pentagon, Washington, DC 20301-1000, <http://www.globalsecurity.org/intell/library/reports/2001/uav0401.htm>