



# گذری بر آیرودینامیک پرواز حشرات<sup>۱</sup> (بخش اول)

بازگردانی از: محسن بهرامی  
mohsen\_bahrami@ae.sharif.edu

## چکیده مقاله:

بیش از یک قرن است که پرواز حشرات مورد توجه فیزیکدانان و زیست‌شناسان قرار گرفته است، با این حال تا چندی پیش محققان قادر نبودند حرکت پیچیده بال حشرات و نیروها و جریان‌های اطراف آن را به دقت اندازه‌گیری و مدل‌سازی نمایند. با وجود این اخیراً پیشرفت فناوری تصویربرداری با سرعت بالا و ابزارهای محاسبه و مدل‌سازی مکانیکی برای محققان این امکان را فراهم آورده است تا سرعت پیشرفت انسان در فهم پدیده پرواز حشرات را افزایش دهند. این مدل‌های محاسباتی و مکانیکی همراه با ترفندهای پیشرفته‌ی مصورسازی<sup>۲</sup> جریان شاره نشان داد، پدیده‌های دینامیک شاره‌ای که در پرواز همراه با بال زدن<sup>۳</sup> وجود دارد، با مدل‌های قبلی که براساس بال‌های دو بعدی و بدون در نظر گرفتن عمل بال زدن شکل گرفته بود، متفاوت است. به طور خاص حتی در زاویه حمله<sup>۴</sup> بالا یک گردابه‌ی<sup>۵</sup> جریان قوی در کنار لبه‌ی حمله بال به طور پایدار باقی می‌ماند و نظیر مدل بال‌های دو بعدی ثابت، به صورت موج ناپایا از بال جدا نمی‌شود. حضور این گردابه تا حد زیادی نیروهای حاصل از بال را افزایش می‌دهد، در نتیجه حشره را قادر می‌سازد به راحتی معلق بایستد یا مانور انجام دهد، علاوه بر این نیروی وارد بر بالها در هنگام پرواز با سازوکارهایی که در زمان تغییر در زاویه حمله عمل می‌کنند، افزایش می‌یابد، به خصوص در هنگام معکوس شدن جهت حرکت بالها تأثیرات متقابل دو بال و برهم کنش بالها با موج شاره‌ای که به دنبال آنها قرار دارد، موجب افزایش نیرو می‌گردد.

این فرایند موجب توسعه‌ی مدل‌های نظری و عملی جدیدی شده است که محاسبه‌ی لحظه‌ای نیروها روی بال حشرات در حال پرواز را با دقتی بیش از گذشته ممکن می‌سازد. همچنین این نظریه به زودی به کمک یک همکاری چند جانبه تخصصی جدید و هیجان‌انگیز میان فیزیکدانانی که در پی کشف قوانین این پدیده هستند، زیست‌شناسانی که در پی ارتباط این پدیده با ساختار بدن حشرات یا تکامل آنها هستند و مهندسانی که در پی ساخت میکرو ربات‌های حشره گونه با استفاده از این قوانین هستند خواهد رفت.

این مقاله شامل قوانین پایه فیزیکی در پدیده بال زدن حشرات، نتایج تحقیقات اخیر پیرامون آیرودینامیک پرواز حشرات و ایده‌های متفاوت برای مدل‌سازی این پدیده است.

## واژگان کلیدی:

پرواز حشرات، آیرودینامیک، اثر کرامر<sup>۶</sup>، واماندگی با تاخیر<sup>۷</sup>، مدل‌سازی شبه پایا<sup>۸</sup>، پرواز به همراه بال زدن، حرکت شناسی<sup>۹</sup>، نیرو، جریان شاره‌ها، گردابه‌ی لبه‌ی حمله بال<sup>۱۰</sup>.

## مقدمه:

بهبتر تجهیز شده‌اند. بقا و تکامل این مخلوقات به نحو بسیار چشمگیری به عملکرد پروازشان بستگی دارد، با این گفته‌ها عجیب نیست که ویژگی‌های حشرات برای پرواز مانند حواس، ساختار بدن، رفتار و بیومکانیک آنان، از جالبترین نمونه‌های تطبیق باشد که در طبیعت یافت می‌شود. در نتیجه حشرات به

بی‌شک حشرات پروازشان را مدیون موفقیت شگفت‌آورشان در تکامل هستند. حشرات امروزی که می‌توانند پرواز کنند، در مقایسه با اجدادشان که فاقد چنین قدرتی بودند، برای گریز از چنگ شکارچیان، جستجوی منابع غذا و اختیار زیست بوم جدید،

پروژکتورهای تک عکس با سرعت بالا بود. این تصاویر گرچه دارای حجم قابل قبولی از اطلاعات بود و وضوح مناسبی بودند، اما چون از یک زاویه ثابت تهیه می شدند، نمی توانستند زاویه حمله را در یک بازه زمانی به طور دقیق ارائه دهند. در روش‌های جدیدتر از فیلمبرداری پرسرعت استفاده شده است<sup>۱۴</sup>، مزیت این روش‌ها حساسیت بیشتر به نور و آسان بودن استفاده و وضوح بالاتر تصویر است.

مطلب دیگری که بعداً فهمیده شد و باید در نظر گرفته می شد، این بود که حشرات به طور شگفت آوری به بازخورد دیداری از محیط وابسته‌اند و به همین علت دقت لازم باید مورد توجه قرار گیرد، تا اطمینان حاصل گردد که شرایط نوری بر رفتار حشرات تاثیر محسوسی را تحمیل نکرده است.

نبرد سنگین‌تر از ثبت سه بعدی حرکت بال‌ها، اندازه‌گیری نیروهای آیرودینامیکی روی بال‌ها در زمان بال زدن بود. در بهترین حالت نیروهای پروازی به جای روی بال‌ها بر روی جسم حشره اندازه‌گیری می شود<sup>۱۵</sup>، که با این کار جدا کردن نیروهای لختی و آیرودینامیکی حاصل از هر بال بسیار کار دشواری است. به علاوه گره زدن به طناب می تواند موجب تغییر حرکت بال‌ها شود و در نتیجه در مقایسه با حالت پروازی آزادانه نیروی اضافه ایجاد می کند. محققان با دو ترفند هوشمندانه بر این محدودیت‌ها غلبه کرده‌اند، شیوه اول ساخت یک مدل دینامیکی بزرگتر است<sup>۱۶</sup>، که در آن اندازه‌گیری مستقیم نیروهای آیرودینامیکی و پویانمایی جریان روی آن ساده تر است. شیوه ی دیگر، شبیه سازی پدیده بال زدن حشرات با نرم افزارهای محاسبه‌ی جریان در حرکت شاره است<sup>۱۷</sup>، البته توانایی هر دو روش کاملاً وابسته به اطلاعات دقیق از حرکت بال‌هاست.

### تشریح الگوها و واژگان تخصصی مقاله :

از این جهت که واژگان مورد استفاده در پرواز همراه با بال زدن تا حد زیادی از ادبیات و واژگان تخصصی پرواز با بال ثابت گرفته شده است و این دو شاخه تطبیق نسبتاً خوبی در واژگان تخصصی با هم دارند، لازم است ابتدا به معرفی تعدادی واژه تخصصی بپردازیم، تا بتوانیم به سادگی این دو پرواز را از هم تشخیص دهیم.

همانند آیرودینامیک پرواز با بال ثابت به فاصله ی نوک بال-ها از هم زمانی که در عرض کشیده شده‌اند، دهانه‌ی بال<sup>۱۸</sup> می گویند (شکل ۱A)، همچنین به فاصله لبه ی جلو و عقب بال در قسمت اتصال به تنه (ریشه بال) طول بال می گویند. در صورتی

زیست شناسان یک بازه مفید از نمونه‌ها را برای توضیح و تشریح ارتباط ساختار با عملکرد و محدودیت‌های تکاملی در الگوهای موجودات زنده را ارائه می دهند.

حشرات همچنین یک تعامل جذاب و وسیع میان فیزیکدانان و مهندسان را پایه‌ریزی کرده‌اند، زیرا در نظر اول پرواز آنها با قوانین استاندارد آیرودینامیک غیرممکن به نظر می رسد. اندازه کوچک، فرکانس بال زدن بالا و حرکت عجیب رفت و برگشتی بال‌ها در هنگام بال زدن با هم ترکیب شده‌اند تا ارائه ی راه حل-ها و توضیحات تحلیلی پیرامون آیرودینامیک این گونه از پرواز را کاری مشکل سازند.

مانند بسیاری از پدیده‌های زیست شناسی، یک درک عمیق از پرواز حشرات بستگی به دقت ویژه به نکاتی جزئی دارد که ممکن است بسادگی به نظر نیایند، به عبارت دیگر این نکات تنها از طریق تحلیل نظری، عملی پدیده نمایان می شوند.

در سال‌های اخیر، جستجوگران از امکان تصویر برداری پرسرعت در ضبط حرکت بال‌ها کمک‌های فراوانی گرفته‌اند، از دیگر روش‌های جدید می توان به سرعت سنجی اجزا در فیلم-های دیجیتالی<sup>۱۱</sup> برای اندازه‌گیری جریان شاره‌ها و رایانه‌های قدرتمند برای شبیه سازی و تحلیل اشاره کرد. استفاده از این روش و روش‌های جدید دیگر، این قابلیت را برای محققان به ارمغان آورده است که از فرضیات ساده سازی کمتری در مدل-هایی دقیق تر برای تحلیل پرواز حشرات استفاده کنند. این مدل-ها با دید دقیق تری که نسبت به حرکت‌ها، نیروها و جریانهای حاضر در پرواز حشرات به ما می دهند، ما را در فهم آیرودینامیک این پدیده راهنمایی می کنند.

### چالش‌های آزمایشگاهی:

به دلیل اندازه کوچک و فرکانس بال زنی بالا عموماً اندازه‌گیری حرکت بال حشره در پرواز آزاد کار بسیار مشکلی است. برای مثال حشره ای با اندازه متوسط، مانند حشره معمولی میوه<sup>۱۲</sup> حدود دو تا سه میلیمتر طول و دویست بال در ثانیه سرعت بال زنی دارد. تلاش‌های مستمر فناوری برای اندازه‌گیری حرکت یک چنین بال کوچک و سریعی از گذشته تا امروز موجب نبردی طولانی و برجسته شده است.

از جمله تلاش‌های پیشین برای ثبت تصویر از بال متحرک آزاد می توان به کوشش کامل و موثر الینگتون<sup>۱۳</sup> برای ثبت شکل این بال اشاره کرد که به طور عمده بر اساس نتایج

شکل ۱: واژگان تخصصی

A: ترسیم کلی یک حشره: صفحه بال به همراه خطی که بر خط وصل کننده دو نوک بال‌ها عمود است. این خط وتر نامیده می‌شود و لبه ی هدایت گر بال (دایره توپر) را به لبه ی پشتی بال وصل می‌کند.

B: نمای بال از کنار: سرعت جریان آزاد با  $U_\infty$  و سرعت جریان فروزش با  $U'$  نشان داده شده است (برای نشان دادن ماهیت برداری، سرعت‌ها با جهت نمای توپر مشخص شده‌اند) و زاویه ی حمله آیرودینامیکی بین صفحه بال و جهت سرعت جریان آزاد منحرف شده بوسیله فروزش نیز در شکل نشان داده شده است.

C: مسیر حرکت بال حشره: چرخش بال و رو به بالا شدن صفحه پایینی بال در هنگام تغییر حرکت بال از فروکش به فراکش در نقطه جلو مسیر حرکت نوک بال و چرخش بال و رو به پایین شدن صفحه‌ی بالین بال در هنگام تغییر حرکت بال از فراکش به فروکش.

D, E: جابجایی خطی بال و تغییر زاویه بال در حالت بالزنی:

D: نوک و ریشه بال هر دو با یک سرعت جابجا می‌شوند.

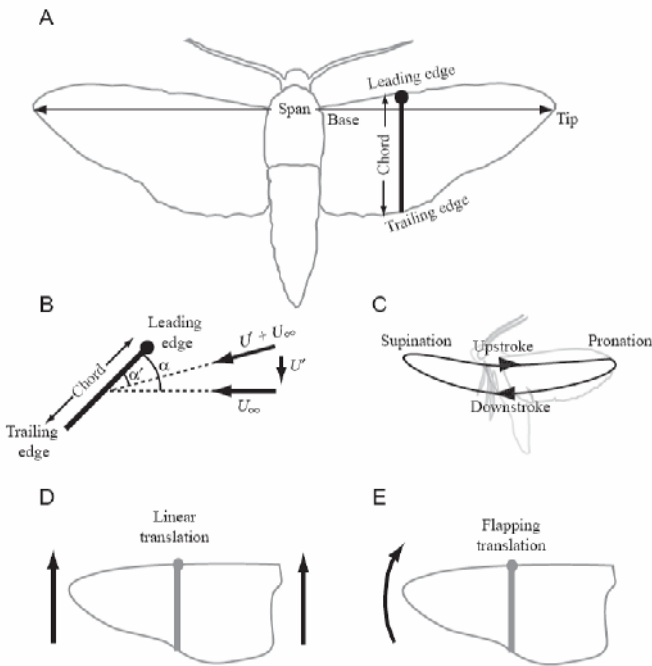
E: نوک بال به دور محوری که روی ریشه ی بال ثابت است می‌چرخد.

که تنه ی حشره را در نظر نگیریم، معمولا پهنای بال دو برابر طول بال است، و وتر بال<sup>۱۹</sup> به فاصله ی لبه ی حمله و لبه ی فرار<sup>۲۰</sup> در هر قسمت از عرض بال گفته می‌شود (شکل ۱A).

نسبت پهنای بال به وتر متوسط یک کمیت بدون بعد ساختاری مهم است که نسبت منظری<sup>۲۱</sup> نامیده می‌شود. زاویه ی حمله به زاویه‌ای گفته می‌شود، که وتر بال با بردار سرعت جریان که از روی بال می‌گذرد، در قسمتی که جهت سرعت جریان هنوز در اثر بال منحرف نشده است<sup>۲۲</sup> می‌سازد (شکل ۱B). در این تعریف فرض فاصله دور از بال برای در نظر گرفتن بردار سرعت جریان به دلیل اثر بلا فاصله بال بر جریان یک فرض لازم است. در تمام بال‌های با هوابر واقعی، فرآیند تولید نیروی برآ یک فروزش<sup>۲۳</sup> القایی در اطراف بال ایجاد می‌کند. گرچه اندازه سرعت این فروزش ( $U'$ ) در مقایسه با سرعت جریان آزاد ( $U_\infty$ ) کوچک است، اما می‌تواند بطور برجسته ای جهت سرعت حاصل را تغییر دهد و البته به همین دلیل است که با کاهش زاویه حمله عملکرد بال کاهش می‌یابد<sup>۲۴</sup> (شکل ۱B).

به همین دلیل، بسیار مهم است که مشخص شود که آیا زاویه حمله نسبت به جریان کل در بلافاصله اطراف بال در نظر گرفته شده است یا در فاصله دور نسبت به بال. به زاویه حمله نسبت به جهت جریان زاویه حمله هندسی ( $\alpha$ ) گفته می‌شود، در حالی که به زاویه حمله نسبت به جهت جریان منحرف شده در محل بال زاویه حمله آیرودینامیکی یا موثر ( $\alpha'$ ) گفته می‌شود. همچنین داریم:

$$\alpha - \alpha' = \tan(U'/U_\infty) \quad (1)$$



از آنجا که اندازه گیری تجربی برای محاسبه ی انحراف از جریان آزاد در فروزش کار دشواری است در بیشتر مطالعات پرواز حشرات بجای زاویه حمله آیرودینامیکی زاویه حمله هندسی گزارش می‌شود.

از زمان یک تغییر جهت در حرکت بال‌ها تا تغییر جهت بعدی، حشرات، به سرعت شاخص‌های حرکت بال‌هایشان را که در تعیین نیروهای پروازی در یک دوره زمانی نقش دارند، تغییر می‌دهند، این شاخص‌ها شامل دامنه حرکت بال، زاویه حمله، انحراف متوسط از صفحه حرکت بال‌ها، منحنی طی شده بوسیله نوک بال و قرکانس بالزنی هستند<sup>۲۵</sup>.

همچنین مدت زمان چرخش بال در هنگام معکوس شدن جهت حرکت بال نیز از دیگر شاخص‌های حرکت بال‌ها هستند. علاوه بر این در حرکت مانور، این شاخص‌ها در هر بال به صورت مجزا برای انجام مانور موردنظر حشره متفاوت هستند، بنابراین خلاصه کردن الگوهای مختلف پرواز حشرات در یک الگوی ساده یک عمل گمراه کننده است.

با در نظر گرفتن این تعداد از شاخص‌های متنوع حرکت در الگوهای پرواز حشرات، می‌توان حرکت بال‌ها را به دو گونه بالزنی تقسیم کرد. بیشتر محققان مطالعات خود را به پرواز معلق حشرات در یک مکان ثابت معطوف ساخته‌اند، زیرا متعادل ساختن وزن حشره با نیروی برآ در این حرکت، از نظر ریاضی آنرا ساده تر می‌کند.

بیشتر حشرات در حالت پرواز معلق در یک مکان بال‌های خود را تقریباً در یک صفحه افقی به سمت جلو و عقب حرکت می‌کنند.

حیوانات خصوصا در مواردی که نسبت منظری بالا است بسیار مفید هستند.

در مورد مفهوم نیرو و دینامیک جریان شاره‌ها، واژه‌ی پایا به عدم وابستگی به زمان اشاره دارد و واژه‌ی ناپایا به پیشرفت زمانی پدیده‌ای اشاره دارد که به طور ذاتی به زمان بستگی داشته باشد. در پرواز به همراه بال زدن، پایا بودن لزوماً استقلال از زمان را بیان نمی‌کند. نیروهای روی بال ممکن است بدون اینکه به زمان وابستگی ذاتی داشته باشند در یک دوره از حرکت بال-هانغیر کنند، به طور ساده می‌توان گفت که تغییر نیروها به دلیل تغییر جهت و موقعیت بال‌ها است. اگر نیروها در هر لحظه با فرض پایا بودن سازوکارهای دینامیکی شاره‌ها مدلسازی شوند به چنین مدلی یک مدل شبه پایا گفته می‌شود. یعنی مدلی که در هر لحظه برای تحلیل پایا در نظر گرفته می‌شود ولی در طول زمان حالت جریان تغییر می‌کند.

### پیش زمینه‌ی نظری پیرامون آیرودینامیک هوابرهای نازک

پیش از معرفی چالش‌های نظری که به وسیله آیرودینامیک پرواز حشرات به وجود آمده است، لازم است ابتدا به معرفی معادلات کلی و قوانین فیزیکی حاکم بر نیروها و جریان‌هایی که به وسیله یک جسم غوطه‌ور در شاره ایجاد می‌شود بپردازیم، این فرمولبندی‌ها به طور کلی از روش‌هایی گرفته شده‌اند که نزدیک به صد سال است به وسیله‌ی فیزیکدانان و مهندسين، برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر یک بال نازک در یک زاویه حمله بسیار کوچک استفاده می‌شود.<sup>۲۹</sup>

در صورتی که به طور خاص بیان نشود، در این بخش نظریه-ی هوابرهای دو بعدی در یک جریان تراکم پذیر به کار گرفته شده است همچنین در تحلیل‌هایی که می‌آید، بیشتر کمیت‌های کلیدی فیزیکی به صورت بدون بعد هستند. شکل بدون بعد معادلات، مستقل از اندازه است به همین جهت می‌توان در بازه-ای وسیع از اندازه جریان‌ها را باهم مقایسه کرد. گرچه برای اهداف این مقاله هر کمیت بدون بعد منطقی که استفاده شود خواسته‌ها را برآورده می‌سازد، اما کمیتی که به طور مرسوم برای آیرودینامیک پرواز حشرات استفاده می‌شود کمیتی است که برای اولین بار به وسیله الینگتون به دست آمد. برای بررسی جزئی‌تر مفاهیم فیزیکی، خواننده را به مطالعه‌ی کتاب‌های

دهند حال آنکه دیگر حشرات از الگوی حرکت بال با شیب بیشتر در هنگام فرود آوردن استفاده می‌کنند.<sup>۲۶</sup>

برای حشراتی که از الگوی جلو-عقب سود می‌برند، واژگان فروکش<sup>۲۷</sup> و فراکش<sup>۲۸</sup> به ترتیب برای حرکت بال به سمت جلو و عقب به کار می‌روند، به خاطر داشتن این مطلب که در هنگام حرکت رو به جلو، صفحه‌ای که بال‌ها در آن حرکت می‌کنند به سمت جلو شیب پیدا می‌کند نیز دارای اهمیت است. واژه‌ی چرخش بال نیز عموماً به تغییر زاویه حمله نسبت به محور منطبق بر وتر بال گفته می‌شود.

در هنگام تغییر حرکت بال از فروکش به فراکش صفحه‌ی بال به سرعت می‌چرخد که پس از این چرخش صفحه پایین بال به سرعت در موقعیت رو به بالا قرار می‌گیرد. در پایان حرکت فراکش نیز بال بسرعت می‌چرخد به طوری که سطح پایین بال دوباره رو به پایین قرار می‌گیرد (شکل ۱C). در مرور حاضر جابجایی خطی، به حرکت خطی بال گفته می‌شود (شکل ۱D) و جابجایی بالزنی به چرخش بال حول یک محور مرکزی اشاره دارد (شکل ۱E). از آنجا که بیشتر تحلیل‌های انجام شده عملکرد آیرودینامیکی را روی یک برش ایده آل از بال بررسی می‌کند، لازم است که تفاوت بین مدل بالهای محدود و نامحدود روشن شود.

بال محدود به یک بال سه بعدی واقعی گفته می‌شود، که دارای یک پهنای بال محدود است. از دیدگاه مکانیک شاره‌ها، اهمیت نوک بال در این است که برای سرعت شاره در روی بال، مولفه‌ای در جهت محور عرضی بال ایجاد می‌کند و این مولفه بر جهت سرعت جریان آزاد در زمان حرکت خطی بال عمود است. برخلاف این نوع بال، بال نامحدود به یک سازه دو بعدی گفته می‌شود (از آن جهت واژه‌ی دو بعدی به کار برده شده است که هوابر در تمام عرض بال ثابت است) گفته می‌شود که تنها می‌تواند در جهت صفحه‌ی عمود بر محور عرضی بال و مماس بر وتر جریان را منحرف کند، این گونه‌ی بال‌ها در تجربه آزمایشی به وسیله اتصال نوک بال به دیوار واقعی سازی می‌شوند، که با این ترنند جریان روی بال به یک جریان دو بعدی محدود می‌شود.

همچنین باید این مطلب را نیز در نظر داشت، که یک بال دو بعدی نمی‌تواند عمل بالزنی را انجام دهد زیرا عمل بالزنی در فضای سه بعدی رخ می‌دهد. با وجود این فرمولبندی‌هایی که بر اساس فرضیات بال دو بعدی انجام شده‌اند در مطالعه پرواز

آخرین جمله‌ی معادله می‌تواند حذف شود تا معادله به شکل غیر لزج درآید که این معادله معمولاً معادله‌ی اویلر نامیده می‌شود. معادله‌ی (۲) همچنین امکان محاسبه‌ی ریاضی در استفاده از مدل‌های فیزیکی که به صورت دینامیکی با مدل اصلی مشابه‌اند را فراهم می‌کند. نیروها و جریان‌های بی‌بعدسازی شده که مدل‌های با مقیاس طولی مشخص تولید می‌کنند، برای عددهای رینولدز برابر یکسان هستند.

معادله‌ی ناویر-استوکس پایه‌های نظری مورد نیاز برای شبیه‌سازی نیروها و جریانهای یک حرکت دلخواه یا اندازه‌گیری شده فراهم می‌سازد. با این حال استفاده از این معادله در شرایط تجربی کار ساده‌ای نیست، زیرا اندازه‌گیری میدان فشار در فضای اطراف بال کاری کاملاً دشوار است. شکل دیگر و گاهی مناسبتر معادله‌ی ناویر-استوکس می‌تواند با کرل گرفتن از طرفین معادله‌ی (۲) به دست آید. این عمل جمله‌ی فشار را از معادله حذف می‌کند، زیرا کرل یک میدان گرادیان صفر است و معادله به شکل زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{t}} = \hat{\nabla} \times (\hat{u} \times \hat{\omega}) + \frac{1}{\text{Re}} \hat{\nabla}^2 \hat{\omega} \quad (4)$$

کمیت  $\hat{\omega} = \hat{\nabla} \times \hat{u}$  چرخش شماره معرفی می‌شود و در نشان دادن مفهوم‌ها و مشخص کردن ویژگی‌ها در جریان‌های اطراف هواپر بسیار مفید است. برای حالت جریان پایای غیر لزج داریم:  $\hat{\omega} = 0$  و جریان غیر چرخشی نامیده می‌شود. زمانی که جریان در همه جا غیر چرخشی باشد معمولاً مناسب تر است که میدان سرعت را به صورت گرادیان یک تابع پتانسیل اسکالر  $(\Phi)$  نشان دهیم. این شیوه نظریه‌ی پتانسیل نامیده می‌شود و مفید بودن آن در توضیح بسیاری از نظریه‌های آیرودینامیک پایه ثابت شده است. این روش اصولاً درگیر ساختن شکلی خاص برای تابع پتانسیل است که دینامیک یک پدیده را برای یک شماره با شرایط اولیه و مرزی مشخص توصیف کند. چرخش ترکیبی از مشتقات فضایی دو به دو عمود بر هم سرعت در یک نقطه‌ی خاص است. به همین دلیل مقدار آن در هر نقطه تصویر خوبی از نیروهای آیرودینامیکی در آن نقطه ارائه نمی‌دهد برای محاسبه‌ی نیروهای آیرودینامیکی باید از چرخش روی یک سطح بسته اطراف هواپر انتگرال گرفت. با استفاده از نظریه‌ی استوکس که بین انتگرال مؤلفه‌ی عمود بر سطح چرخش روی یک سطح بسته و انتگرال روی خم سرعت در مرز این سطح رابطه برقرار می‌کند، داریم:

دینامیک شماره‌های کلاسیک<sup>۳۰</sup> و دیگر کتاب‌هایی که بر نظریه هواپرهای نازک متمرکز می‌شوند<sup>۳۱</sup>، راهنمایی می‌کنیم.

حرکت شماره در اطراف بال حشره، مانند هر جسم غوطه‌ور دیگر به طور کلی به وسیله‌ی معادله‌ی ناویر-استوکس نشان داده می‌شود که شکل بدون بعدی از این معادله در زیر آمده است:

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} + (\hat{u} \cdot \hat{\nabla}) \hat{u} = -\hat{\nabla} \hat{P} + \frac{1}{\text{Re}} \hat{\nabla}^2 \hat{u} \quad (2)$$

در این معادله  $\hat{u}, \hat{t}, \hat{P}$  به ترتیب سرعت بال در هنگام بال زنی نسبت به سرعت متوسط شماره، زمان و فشار هستند. همه‌ی این کمیتها در این معادله به وسیله‌ی شاخص‌های اندازه‌گیری متناظر بی‌بعد شده‌اند. انتخاب یک شاخص اندازه‌گیری یک انتخاب دلخواه است و معمولاً به تجربه‌ی فیزیکدان در تشخیص ثابت‌های فیزیکی با معنی سامانه<sup>۳۲</sup> باز می‌گردد. برای نمونه در هنگام مدلسازی جریان بر روی یک بال با نسبت منطری بالا اغلب طول وتر به عنوان شاخص اندازه‌گیری طولی استفاده می‌شود. عملگر:

$$\hat{\nabla} = \frac{\partial}{\partial \hat{x}} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial \hat{y}} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial \hat{z}} \hat{k} \quad (3)$$

یک شکل بی‌بعد از عملگر گرادیان است و  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  بردارهای یکه در دستگاه کارترین هستند. سمت چپ معادله‌ی (۲) بیانگر مشتق لاگرانژی (مادی) سرعت است که نشان‌دهنده‌ی وابستگی به زمان است. در بیان اویلری، مشتق لاگرانژی همان مشتق زمانی حرکت یک ذره از شماره، از دید ناظری است که با شماره حرکت می‌کند. مخرج کسر جمله‌ی آخر نیز عدد رینولدز (Re) نامیده می‌شود. Re کمیتی بدون بعد است که بیانگر نسبت لختی جرم یک شماره‌ی در حال حرکت، به پخش شدن لزجت در حرکت آن است. عدد رینولدز می‌تواند از رابطه‌ی  $\text{Re} = (\rho U_{\infty} L) / \eta$  به دست آید که در این معادله  $\rho$  چگالی متوسط شماره،  $U_{\infty}$  سرعت شماره نسبت به جسم غوطه‌ور،  $L$  شاخص اندازه‌گیری طولی و  $\eta$  لزجت دینامیکی شماره است. این کمیت تقریباً اوضاع و احوال دینامیکی شماره‌ای که حشره در آن پرواز می‌کند را مشخص می‌کند، که در آن جریان شماره از حالت آرام (برای مقادیر پایین عدد رینولدز) تا آشفته (برای مقادیر بالای عدد رینولدز) تغییر می‌کند. در حالتی که لزجت زیاد باشد عدد رینولدز کوچک است و جمله‌ی آخر معادله‌ی (۲) به مراتب از جمله‌ی فشار اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. اما در حالتی که لزجت ناچیز و در نتیجه عدد رینولدز بزرگ است،



شرط کاتا از جمع جریانهای غیر لزج در اطراف بال بوجود می‌آید. (A) گردش‌های اضافه که در اثر حضور لزجت بوجود می‌آیند. (B) گردش جریان برای رسیدن به یک جریان هموار و مماس بر لبه‌ی فرار بال. (C) در حالتی که شرایط برقرار باشند شرط کاتا به ما می‌گوید که چرخش در اطراف لبه‌ی فرار بال صفر است. برای حالت غیرلزج نیروی کلی وارد بر بال (جهت نمای خاکستری) عمود بر بردار سرعت برای جریان آزاد شاره است.

جاگوسکی برای هوا بره‌های نازک گویند<sup>۳۳</sup>. برای شاره‌های ایده‌آل، نیروی نهایی عمود بر جهت حرکت وارد می‌شود و مولفه‌ای در جهت عمود بر صفحه‌ی حرکت ندارد. بنابراین این نظریه برای حرکت بال در زاویه‌ی حمله‌ی کوچک نیروی مقاومت در خلاف جهت حرکت (پسا) را صفر پیش بینی می‌کند (تناقض دالامبر). اما به هر حال با حضور حتی کمترین مقدار نیروی برشی جهت نیروی نهایی به سمت انتهای بال یا عمود بر صفحه‌ی بال منحرف می‌شود. در اعداد رینولدز بالا نیز جهت نیرو به جای عمود بودن بر جهت حرکت بر سطح بال عمود است. به مولفه‌ای از نیروی نهایی که بر جهت حرکت شاره عمود است نیروی برآ و به مولفه‌ی موازی با جهت آن نیروی پسا می‌گویند. همچنین جزیی از نیروی پسا که در اثر لزجت سطح بال به وجود می‌آید نیز پسای لزجت گفته می‌شود.

در نواحی دور از بال رفتار شاره شبیه نتایجی است که نظریه‌ی جریان پتانسیل به ما می‌دهد. به همین دلیل گرچه در واقع جریان شاره یک جریان غیرچرخشی نیست، اما با فرض شرایط کاتا، می‌توان برای کاستن از سختی مسئله از جریان پتانسیل استفاده کرد. برای جریان پایای غیرلزج نظریه‌ی کاتا-جاگوسکی چرخش در اطراف هوا بر را از طریق رابطه زیر به نیروهای روی بال ارتباط می‌دهد:

$$\hat{L}' = \oint_{\Sigma} \hat{u} \cdot d\hat{l} \quad (۶)$$

در نظر داشته باشید که نیروی برآ نیز می‌تواند از طریق رابطه‌ی (۵) با چرخش ارتباط داده شود. در رابطه‌ی (۶)  $L'$  نیروی برآ بر واحد دهانه‌ی بال است که پس از تقسیم شدن بر حاصلضرب چگالی شاره ( $\rho$ )، مقدار متوسط وتر بال و مربع سرعت جریان آزاد شاره ( $U_{\infty}$ ) بی بعد شده است. این کمیت ضریب نیروی برآ نامیده می‌شود و عموماً با  $C_L$  نمایش داده می‌شود. به همین ترتیب مقدار بی‌بعد شده‌ی نیروی پسا نیز ضریب نیروی پسا نامیده می‌شود و عموماً با  $C_D$  نشان داده می‌شود. برای هر شاره‌ی غیر لزج در جریانهای پایا (بدون شتاب) داریم:

$$\oint_{\Sigma} \hat{u} \cdot d\hat{l} = \text{constant} \quad (۷)$$

$$\oint_{\Sigma} \hat{u} \cdot d\hat{l} = \iint \hat{\omega} \cdot \hat{n} dS \quad (۵)$$

مقدار سمت چپ معادله‌ی بالا را گردش تعریف می‌کنند (Γ). برای جریانهای پتانسیل مقدار گردش روی هر خم بسته که هوا بر را در بر نگرفته باشد صفر است، زیرا مقدار چرخش با توجه به فرض غیر چرخشی بودن جریان پتانسیل در همه‌ی نقاط صفحه برابر صفر است. در صورتی که خم هوا بر را در برگیرد، با حضور کمترین مقدار لزجت در شاره، در اثر تماس جریان شاره با بال مقداری چرخش بوجود می‌آید و در نتیجه گردش مخالف صفر خواهد شد. در شرایط کاملاً غیرلزج انتظار می‌رود که حضور هوا بر در جریان آزاد شاره باعث یک انحراف کوچک در جریان شود و در نتیجه میدان جریانی مانند شکل (۲A) در اطراف بال بوجود آید، در چنین شرایطی نقطه‌ی سکون (نقطه‌ی صفر شدن سرعت شاره) روی سطح بال و بالای لبه‌ی فرار بال حضور خواهد داشت نه در نوک لبه‌ی فرار بال. برای بدست آوردن چنین شکلی از جریان باید در اطراف لبه‌ی فرار بال یک چرخش سریع داشته باشیم، که این چرخش موجب ایجاد یک نقطه‌ی تکین در لبه‌ی فرار بال می‌شود. وقوع این مطلب نیاز به یک میدان سرعت بالا در لبه‌ی فرار بال دارد که این میدان نیز باعث بالا رفتن نیروهای لزجت در این محل می‌شود و با حضور نیروهای لزجت در این نقطه به مرور اثر تکین بودن آن خنثی می‌شود. بنابراین حتی کوچکترین میزان لزجت در جریان باعث هموار شدن نقاط تیز در میدان جریان می‌شود. علاوه بر این پدیده را می‌توان با اضافه کردن یک گردش به جریان شاره در اطراف بال به صورت غیر لزج بازسازی کرد (شکل ۲B). برای یک مقدار معین از گردش اضافه شده نقطه‌ی سکون دقیقاً به نوک لبه‌ی فرار بال جابجا می‌شود. در این حالت جریان شاره در بالا و پایین بال به صورت هموار و مماس به هم می‌پیوندند (شکل ۲C). این حالت را شرط کاتا می‌گویند که با وجود آن می‌دانیم شیب جریان شاره در بالا و پایین بال در محل لبه‌ی فرار برابر است و بنابراین چرخش در لبه‌ی فرار بال صفر است. به علاوه شرط کاتا به ما می‌گوید که سطح شیبدار انتهای بال یک تکانه‌ی رو به پایین به شاره می‌دهد. این نظریه را نظریه‌ی کلاسیک کاتا-

شامل معکوس مربع یک کمیت است. این انتگرال باید در کل حجم شاره (V) محاسبه شود. رابطه‌ی (۹) برای بیشتر تحلیل‌های دینامیک شاره‌ای که برپایه‌ی چرخش بنا نهاده شده‌اند رابطه‌ای مفید است. مثالی از این تحلیل‌ها مدلسازی اثرات یک گردابه‌ی دوقطبی بر محیط اطراف آن است.

طبیعت مارپیچی بودن (واگرایی برابر صفر) یک میدان چرخشی در روشهای بر مبنای چرخش این امکان را فراهم آورده است که کمیت‌های بسیار مفیدی در حرکت شناسی به نام تکانه‌های چرخش تعریف شوند. دلیل مفید بودن این کمیت‌ها عدم وابستگی مقدار آنها به شرایط داخل یک مرز محاط بر ناحیه‌ی مورد مطالعه است، زیرا نیروهای پایستار توانایی تولید چرخش جدید در یک شاره را ندارند. همچنین عموماً چرخش در مرز جسم و شاره بوجود می‌آید و در شاره پخش می‌شود.<sup>۳۶</sup> برای کاربرد خاص در محاسبه‌ی نیروهای آیرودینامیک از تکانه‌ی اول چرخش استفاده می‌شود، که بوسیله رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \int_R r \times \omega dr \quad (10)$$

در این رابطه  $r$  فاصله از مبدأ، در یک دستگاه مختصات دلخواه است که به همراه جریان آزاد در حال حرکت است  $\omega$  چرخش و  $R$  سطح ناحیه‌ای است که تمام چرخش‌های بخش مورد مطالعه‌ی شاره را در بر می‌گیرد. برای حالت شاره‌ی لزج تراکم‌پذیر دوبعدی، نیروی آیرودینامیک به‌وسیله‌ی رابطه‌ی زیر از تکانه‌ی اول چرخش بدست می‌آید:

$$F = -\rho \frac{d\gamma}{dt} + \rho \frac{d}{dt} \int_S v dA \quad (11)$$

$\rho$  چگالی شاره  $A$  مساحت هوابر و  $v$  سرعت یک نقطه درون هوابر است.<sup>۳۷</sup> جمله‌ی اول در سمت راست این رابطه بیانگر مشتق زمانی تکانه‌ی اول چرخش است که برابر با نیروی حاصل از چرخش ایجاد شده در اثر حرکت هوابر است. جمله‌ی دوم نیز مقدار نیروی لختی شاره‌ای که توسط بال جابجا شده است را بیان می‌کند. برای یک بال نازک بسیار کوچک مساحت هوابر قابل صرفنظر کردن است. نیرو فقط به تکانه‌ی چرخش وابسته است. برای حالت ساده‌ای از گردش حول هر خم بسته، یک توزیع پایدار چرخش به همراه بال حرکت می‌کند و یک افزایش ثابت در تکانه‌ی چرخش به تنهایی از حرکت بال نتیجه می‌شود. بنابر نظریه‌ی کاتا- جاکوسکی نیرو برای هوابر برابر است با

$$\frac{d}{dt} \oint_{\Sigma} \hat{u} \cdot d\hat{l} = 0 \quad (8)$$

زمانی که یک بال از حالت ساکن شروع به حرکت می‌کند پیش از شروع حرکت گردش کلی اطراف بال صفر است. بنابراین معادله‌ی (۸) به یک بیان ساده‌ی ریاضی از قانون کلون تبدیل می‌شود، این قانون بیان می‌کند که گردش نهایی (و چرخش نهایی) در یک شاره‌ی ایده‌آل در طول زمان صفر باقی می‌ماند. به عبارت دیگر اگر یک چرخش (یا گردش) جدید برای شاره‌ی غیرلزج تعریف شود (برای کاربرد شرط کاتا) باید همراه با چرخش (یا گردش) برابر و در جهت مخالف باشد.

به دلیل وجود لزجت و در نتیجه برای پرهیز از یک تنش برشی نامحدود سرعت شاره‌ی در تماس با بال صفر در نظر گرفته می‌شود، این شرط را شرط عدم لغزش گویند که از مهمترین شرایط مرزی برای بحث تحلیلی روی بال است. با توجه به شرط عدم لغزش، در اطراف سطح بال یک لایه از شاره تشکیل می‌شود که در این لایه سرعت از صفر تا بیشترین مقدار خود نسبت به سرعت جریان آزاد تغییر می‌کند، به این ناحیه لایه مرزی گفته می‌شود و عمق آن به عدد رینولدز وابسته است.<sup>۳۴</sup> شرط مرزی دیگری که بوجود می‌آید صفر بودن مولفه‌ی عمود بر سطح سرعت شاره در محل تماس با سطح بال است که معمولاً به آن شرط عدم نفوذ گفته می‌شود. این شرایط مرزی عموماً برای تماس جامد و مایع در نظر گرفته می‌شود. برای تماس شاره‌های آزاد ممکن است شرایطی پیش آید که مولفه مماس بر سطح سرعت برای دو لایه‌ی بسیار نزدیک به‌صورت غیر پیوسته تغییر کند. بین این لایه‌ها ناحیه‌ای با چرخش بالا بوجود می‌آید که در آن صفحات گردابه برای بال دوبعدی ناحیه خطوط گردابه و تشکیل می‌شود.

زمانی که یک ذره حجم  $dV$  دارای چرخش  $\omega$  غیر صفر باشد یک سرعت  $v$  در فاصله‌ی  $r$  از ناحیه‌ی اطرافش القا می‌کند. رابطه‌ای که برای محاسبه‌ی این سرعت استفاده می‌شود به صورت زیر است:

که در این رابطه  $r$  بردار جابجایی است. این رابطه قانون بیو-سوارت<sup>۳۵</sup> نامیده می‌شود که مانند معادل آن در الکترومغناطیس

$$v = \frac{1}{4\pi} \int_V \omega \times \frac{r}{r^3} dV \quad (9)$$

حاصلضرب گردش ایجاد شده به وسیله بال و سرعت جابجایی بال<sup>۳۸</sup>.

به هر حال رابطه‌ی (۱۱) یک رابطه‌ی عمومی‌تر است و می‌تواند در مواردی که قدرت و توزیع چرخش در اطراف بال در حال تغییر است مانند حالت شروع پرواز، در حین تغییرات سریع حرکت یا زمانی که بال با چرخش حاصل از موج خود یا بال دیگر مواجه می‌شود بکار برده شود.

در بخش بعدی مقاله به چالشهای نظری، مدل‌های تحلیلی، دینامیک شارهای عددی، مدلسازی شبه پایا، مدلسازی عملی و سازوکارهای ناپایا در پرواز حشرات خواهیم پرداخت.

<sup>۱</sup> The aerodynamics of insect flight, Sanjay P. Sane, Department of Biology, University of Washington, Seattle, WA ۹۸۱۹۵, USA

<sup>۲</sup> visualization

<sup>۳</sup> flapping flight

<sup>۴</sup> angle of attack

<sup>۵</sup> vortex

<sup>۶</sup> Kramer effect

<sup>۷</sup> delayed stall

<sup>۸</sup> quasi-steady modeling

<sup>۹</sup> kinematics

<sup>۱۰</sup> leading edge vortex

<sup>۱۱</sup> digital particle image velocimetry DPIV

<sup>۱۲</sup> Drosophilamelanogaster

<sup>۱۳</sup> Ellington ۱۹۸۴c

<sup>۱۴</sup> Villmot & Ellington ۱۹۹۷b

<sup>۱۵</sup> Cloupeau et al., ۱۹۷۹; Buckholz, ۱۹۸۱; Soms and Luttgés, ۱۹۸۵; Zanker and Gotz, ۱۹۹۰; Wilkin and Williams, ۱۹۹۳

<sup>۱۶</sup> Bennett, ۱۹۷۰; Maxworthy, ۱۹۷۹; Spedding and Maxworthy, ۱۹۸۶; Dickinson and Götz, ۱۹۹۳; Sunada et al., ۱۹۹۳; Ellington et al., ۱۹۹۶; Dickinson et al., ۱۹۹۹

<sup>۱۷</sup> Liu et al., ۱۹۹۸; Liu and Kawachi, ۱۹۹۸; Wang, ۲۰۰۰; Ramamurti and Sandberg, ۲۰۰۲; Sun and Tang, ۲۰۰۲

<sup>۱۸</sup> wing span

<sup>۱۹</sup> chord

<sup>۲۰</sup> Trailing edge

<sup>۲۱</sup> aspect ratio

<sup>۲۲</sup> free-stream velocity (بردار سرعت جریان آزاد یا بردار سرعت در ناحیه دور از بال)

<sup>۲۳</sup> downwash

<sup>۲۴</sup> Munk, ۱۹۲۵a; Kuethe and Chow, ۱۹۹۸

<sup>۲۵</sup> Ennos, ۱۹۸۹b; Ruppell, ۱۹۸۹

<sup>۲۶</sup> Ellington, ۱۹۸۴c; Dudley, ۲۰۰۰

<sup>۲۷</sup> downstroke

<sup>۲۸</sup> upstroke

<sup>۲۹</sup> Prandtl and Tietjens, ۱۹۵۷b; Milne-Thomson, ۱۹۶۶

<sup>۳۰</sup> Lamb (۱۹۴۵), Landau and Lifshitz (۱۹۵۹), Milne-Thomson (۱۹۶۶) and Batchelor (۱۹۷۳)

<sup>۳۱</sup> Glauert (۱۹۴۷) and Prandtl and Tietjens (۱۹۵۷b)

<sup>۳۲</sup> System

<sup>۳۳</sup> Kuethe and Chow, ۱۹۹۸

<sup>۳۴</sup> Schlichting, ۱۹۷۹

<sup>۳۵</sup> Milne-Thomson, ۱۹۶۶

<sup>۳۶</sup> Truesdell, ۱۹۵۴

<sup>۳۷</sup> Wu, ۱۹۸۱

<sup>۳۸</sup> Wu, ۱۹۸۱