



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

بازگردانی از: محسن بهرامی (

mohsen\_bahrami@ae.sharif.edu)

جریان شماره به دلیل مقاومت نیروهای لزجت با سرعت بیشتری پراکنده می‌شوند و به سرعت میرا می‌شوند. برای حشرات بزرگتر که در  $Re$  بالاتری پرواز می‌کنند آشفتگی‌های کوچک در گذر زمان انباشته می‌شوند و در نهایت باعث ناپایی بیشتر جریان در اطراف حشره می‌گردند. حتی با اطلاعات دقیق از کوچکترین آشفتگی‌ها، پیش بینی تحلیلی این شرایط غیر ممکن است زیرا جوابهای مختلفی می‌تواند برای معادله‌ی جریان به دست آید. در این موارد شرایط اولیه و مرزی استاتیک و دینامیک باید به طور یکتا مشخص شوند تا از تعداد جوابهای با معنی برای معادله‌ی جریان کاسته شود.

### مدل‌های تحلیلی پرواز حشرات

چالش‌های آزمایشگاهی و نظری که در بخش‌های قبلی بیان شد، به مدل‌های پیشین پرواز حشرات که برای تحلیل از شوک‌های دور از میدان به جای پدیده‌های جریان در مجاورت بال بهره می‌برند محدود می‌شد. هم چنین این مدل‌های دور از میدان نمی‌توانند برای محاسبه‌ی نیروهای لحظه‌ی روی هوا بر به کار برده شوند، این مدل‌ها صرفاً برای دانستن نیرو و توان مورد نیاز متوسط، روش‌هایی را پیشنهاد می‌دهند. قابل توجه ترین مدل‌ها در میان آنان دو مدل گردابه ای هستند<sup>۲</sup> که در هر دو آنان از جایگزینی بالهای بالزن با تیغه‌های ملخ یا مدل دقیق تر اضافه کردن دیسک‌های ضربه زن در اطراف ملخ برای بهینه کردن مدل به دست آمده اند. این دیسک‌ها با ایجاد ضربه یک فشار یکسان به شاره‌ی محیط وارد می‌کنند تا یک تکانه‌ی رو به پایین به آن وارد شود. در این شیوه مقدار متوسط نیروی برآ که برای معلق ماندن نیاز است از قرار دادن سرعت تغییر شار تکانه در جهت پایین به جای وزن حشره و بنابراین محاسبه‌ی گردش مورد نیاز در شوک برای رسیدن به تعادل نیروها به دست می‌آید. توضیح همراه با جزئیات این مدل‌ها از حوصله‌ی این مقاله خارج است، به علاوه

در بخش اول مقاله، چالش‌های آزمایشگاهی، تشریح الگوها و واژگان تخصصی و پیش زمینه‌ی نظری پیرامون آیرودینامیک هوا برهای نازک مورد بحث قرار گرفت. در این بخش به چالش‌های نظری، مدل‌های تحلیلی پرواز حشرات، دینامیک شاره‌های عددی (CFD)، مدلسازی شبه‌پایا برای پرواز حشرات و سازوکارهای ناپایا در پرواز حشرات خواهیم پرداخت.

### چالش‌های نظری

چالش‌هایی که در تطبیق روشهای معمولی که در بخش قبل توضیح داده شد با پرواز حشرات پیش می‌آید در این بخش باز خواهند شد و به طور مختصر توضیح داده می‌شوند. با توجه به اندازه‌های گوناگون حشرات، پرواز آنها در بازه‌ی  $10^5$  تا  $10^8$   $Re$  قرار می‌گیرد. برای نمونه  $Re$  برای یک اسپرم شناور  $10^{-2}$ ، انسان در حال شنا  $10^6$  و جتهای تجاری در سرعت  $0.8$  ماخ  $10^7$  است. برای حشرات بزرگتر که در  $Re$  بالاتری پرواز می‌کنند، جمله‌ی لزجت در معادله‌ی (۲) قابل صرف نظر است و مانند هواپیما می‌توان با جریان‌ها و نیروها مانند حالت غیرلزج رفتار کرد (معادله‌ی اوپلر). این ساده-سازی را نمی‌توان برای بیشتر گونه‌ها انجام داد زیرا اندازه‌ی کوچکشان آنها را به سمت  $Re$  کوچک سوق می‌دهد. این بدان معنی نیست که نیروهای لزج در پرواز حشرات عامل غالب است برعکس، حتی در  $Re$   $10$  نیز نیروهای لختی نسبتاً به اندازه‌ی یک رتبه از نیروهای لزجت بزرگتر هستند. در کل، اثرات لزجت در ساختار جریان مهم هستند و قابل صرف نظر نیستند. بر اساس تاثیرات نیروهای لزجت، قوانین حاکم بر ایجاد نیروهای آیرودینامیک بر حسب اندازه حشرات متفاوت است. برای حشرات ریز آشفتگی‌های کوچک در

## دینامیک شاره‌های عددی (CFD)

با پیشرفت‌های اخیر در روش‌های عددی، پژوهشگران زیادی برای حل مسئله‌ی پرواز حشرات به بکارگیری این روش‌ها روی آورده‌اند.<sup>۱۵</sup> گرچه نهایتاً این روش‌ها موشکافانه‌تر و دقیق‌تر از مدل‌های تحلیلی ساده شده هستند، اما به منابع محاسباتی زیادی نیازمندند و کاربرد آن‌ها در مقایسه‌ی مجموعه داده‌های بزرگ به هیچ وجه ساده نیست. علاوه بر این شبیه‌سازی‌های CFD برای محاسبه نتایج صحیح به حرکت وارد شده و داده‌های آزمایشگاهی وابسته‌اند. علی‌رغم این چالش‌ها اخیراً با دقیق شدن وسایل آزمایشگاهی پژوهشگران به نتایج هیجان‌انگیزی از CFD در زمینه‌ی پرواز حشرات امیدوار شده‌اند.

چنین رویکردی برای مدل‌سازی پرواز یک گونه پروانه بید<sup>۱۶</sup> با استفاده از شیوه‌ی اتاق آیرودینامیک ناپایا<sup>۱۷</sup> به کار گرفته شده است. در این مدل‌سازی از روش جریان پتانسیل برای محاسبه‌ی سرعت‌ها و فشار روی هر یک از سطوح بال‌بخش بخش شده با شرایط مرزی متناظر استفاده شده است. اینان علاوه بر ابتکار در استفاده از این گونه بید به عنوان مدل، در تلاش برای شبیه‌سازی کامل معادله‌ی ناویر-استوکس با استفاده از روش المان حجمی محدود نیز نخستین پژوهشگران بودند.<sup>۱۸</sup>

علاوه بر تایید الگوهای جریان مشاهده شده در آزمایش مدل واقعی و مدل شبیه‌ساز دینامیکی<sup>۱۹</sup> این پژوهش به جزئیات دقیق‌تری از ساختمان جریان نیز دست یافت و حتی تغییر نیروهای آیرودینامیکی حاصل از این الگوهای جریان در طول دوره‌ی بال‌زدن نیز در این پژوهش به دست آمد. اخیراً نیز رویکردهای عددی برای مدل‌سازی پرواز در اسفیل<sup>۲۰</sup> به کمک داده‌های بدست آمده از نیروهای یک مدل شبیه‌ساز دینامیکی به کار گرفته شده است.<sup>۲۱</sup> علاوه بر امکان مطابقت با نتایج آزمایشگاهی، این روش گنجینه‌ی ارزشمندی از جزئیات را به نتایج روش‌های تجربی افزوده است.<sup>۲۲</sup> و حتی می‌تواند به عنوان یک توضیح متفاوت برای صحت داده‌های آزمایشگاهی استفاده شود.<sup>۲۳</sup> (هم‌چنین بخش اثرات متقابل بال و شوک را می‌بینید). با وجود اهمیت اثرات سه بعدی، اما

این مدل‌ها بر خلاف این مقاله که بر شیوه‌ی میدان جریان در نزدیکی بال متمرکز است به شیوه‌ی میدان جریان در نقاط دور از میدان می‌پردازند.

علی‌رغم نکاتی که در بخش قبل ارائه شد تعداد اندکی از پژوهشگران توانسته‌اند در به دست آوردن مدل‌های تحلیلی میدان جریان در نزدیکی بال برای آیرودینامیک پرواز حشرات به موفقیت‌هایی دست یابند. از مدل‌های قابل توجه در بین این مدل‌ها می‌توان به مدل لایت‌هیل<sup>۳</sup> (۱۹۷۳) برای سازوکار ویس-فاگ در تولید نیروی برآ (این روش کف‌زدن بال‌ها نیز نامیده می‌شود) که نخستین بار برای توضیح برآی قوی‌ای که زنبور اینکارسیا فورموسا<sup>۴</sup> تولید می‌کند ارائه شد و مدل سویج<sup>۵</sup> (۱۹۷۹)، که یک مدل دلخواه بر پایه‌ی اندازه-گیری‌های نوربرگ<sup>۶</sup> برای حرکت یک سنجاقک<sup>۷</sup> است، گرچه همه‌ی این مدل‌ها اساساً بر پایه‌ی فرضیات دو بعدی و غیر لزج (البته با برخی تغییرات که برای در نظر گرفتن اثرات لزجت اضافه شده‌اند) استوارند، اما قادرند برخی جنبه‌های مهم در سازوکارهای آیرودینامیکی پرواز حشرات را نشان دهند. خصوصاً مدل لایت‌هیل برای کف‌زدن بال‌ها که به طور برجسته‌ای به وسیله‌ی داده‌های آزمایشهای ماکس ورثی<sup>۸</sup> (۱۹۷۹) و اسپدینگ<sup>۹</sup> و ماکس ورثی (۱۹۸۶) تأیید شد. به طور مشابه مدل سویج قادر است پیش‌بینی‌های دقیقی از افزایش نیرو در زمان برخی از حرکات بال‌ها (برای مثال قله-های نیرو در زمان اندکی قبل از رسیدن به زمان تغییر حرکت بال از فروکش به فراکش مشاهده شد) بعدها این نتایج در آزمایشگاه تأیید شد.<sup>۱۰</sup> در مطالعات روی سنجاقک‌ها<sup>۱۱</sup> مدل گردش محلی با موفقیت نسبی استفاده شد.<sup>۱۲</sup> این مدل تغییرات فضایی (در طول دهانه‌ی بال) و گذرای سرعت القایی را نیز در نظر می‌گیرد و با این ترفند نسبت تصحیح‌های گردش در داخل شوک را تخمین می‌زند. مدل‌های تحلیلی تازه‌تر<sup>۱۳</sup> قادرند پدیده شناسی پایه‌ای برای دینامیک شاره‌ای در پدیده‌ی پرواز همراه با بالزنی را در یک دید موشکافانه تشکیل دهند و یک پایگاه داده‌ای مفید از نیروها و حرکات‌های این پدیده نیز به دست دهند.<sup>۱۴</sup>

شده در مدل شبه پایا نیز از برآی متوسط لازم برای معلق ایستادن حشره کمتر است و این مدل ناکارآمد است. از این گفته چنین برمی آید که اگر بیشترین نیروی محاسبه شده به وسیلهی این مدل از برآی متوسط لازم برای معلق ایستادن بیش تر باشد یا با آن مساوی باشد آن گاه این مدل نمی تواند نادیده گرفته شود. بر پایهی بررسی گسترده ای از داده های موجود در حال حاضر، او به طور قابل قبولی بحث کرده است که در بیش تر موارد، نظریه ی شبه پایای موجود در محاسبات برای نیروی برآی مورد نیاز معلق ایستادن با کاستی روبرو می شود و یک باز بینی اساسی در نظریه ی شبه پایا لازم به نظر می رسد<sup>۲۷</sup>. او سپس بیان می دارد که نظریه ی شبه پایا باید مورد بازبینی قرار گیرد تا علاوه بر حرکت انتقالی بالهای بالزن حرکت چرخشی بالها نیز مانند بسیاری از سازوکارهای ناپایا که ممکن است در پدیده حضور داشته باشند در آن گنجانده شود. پس از بیان این نکته به وسیلهی الینگتون، دانشمندان دیگری نیز داده های بیش تری برای نشان دادن ناکافی بودن مدل شبه پایا فراهم کرده اند<sup>۲۸</sup>. این پیشرفت ها جست و جو برای یافتن یک سازوکار ناپایای خاص برای توضیح نیروهای آیرودینامیک روی بالهای حشرات را به یک نبرد شبیه نموده است.

### مدل سازی فیزیکی پرواز حشرات

با توجه به سختی های بیان شده در مطالعه ی مستقیم حشرات یا انجام محاسبات تحلیلی از آیرودینامیک پرواز آنان، بسیاری از محققان به مدل های مکانیکی برای شبیه سازی دینامیکی و مطالعه ی پرواز حشرات روی آورده اند.

در هنگام ساخت این مدل ها عدد رینولدز و فرکانس کاهش یافته ی (نسبت سرعت تنه به سرعت بال) مدل های مکانیکی با عدد رینولدز و فرکانس کاهش یافته ی حشرات واقعی یکسان می شوند. به این شرایط شبیه سازی دینامیکی می گویند، که به پژوهشگر اطمینان می دهد که پدیده های دینامیک شاره ای در مدل شبیه ساز دینامیکی تغییر نمی کنند. به دلیل ساده تر بودن مشاهده و اندازه گیری جریان شاره و الگوهای آن در اطراف مدل های شبیه ساز دینامیکی نسبت به بال حشرات، این مدل ها در تحلیل و شناسایی سازوکارهای

مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی های دو بعدی نیز یک دید بسیار اثر بخش و مهم برای پژوهشگر فراهم می سازد.

برای نمونه شبیه سازی های همدانی و سان (۲۰۰۱) با ویژگی های پیچیده ی نتایج آزمایشگاهی که قبلاً برای بال های دو بعدی در Re پایین حاصل شده بود مطابقت داشت<sup>۲۴</sup>. مدل های CFD دو بعدی در مشخص کردن امکان وجود برخی پدیده های احتمالی نیز کاربرد دارند. برای مثال وانگ (۲۰۰۰) نشان داد که دینامیک نیروهای بال های دو بعدی هر چند با اثرات سه بعدی پایدار نشده است اما ممکن است هنوز برای توضیح افزایش ضریب نیروی برآ در اندازه گیری های انجام گرفته برای پرواز حشرات کافی باشد.

### مدلسازی شبه پایا برای پرواز حشرات

به امید یافتن جواب تحلیلی تقریبی برای مسئله ی پرواز حشرات، دانشمندان همچنین مدل های ساده شده ای را که بر پایه ی تقریب های شبه پایا استوار شده اند توسعه بخشیده اند. بر اساس فرض شبه پایا، نیروهای آیرودینامیکی لحظه ای روی یک بال در حال بالزنی با نیروهای آیرودینامیکی در یک حرکت پایا با سرعت و زاویه ی حمله ی یکسان روی همان بال برابرند<sup>۲۵</sup>. بنابراین فرض می توان هر حرکت دینامیکی با هر الگویی را به مجموعه ای از حالت های استاتیک و ثابت متوالی تقسیم کرد و با اندازه گیری یا محاسبه ی نیروهای هر حالت و پشت سر هم قرار دادن حالت ها به منحنی زمانی تولید نیرو دست یافت. با این شیوه، وابستگی نیروهای دینامیکی به زمان از وابستگی حرکت به زمان و نه وابستگی جریان شاره به تنهایی به دست می آید. اگر این مدل ها دقیق باشند امکان دست یافتن به مجموعه ای از معادلات ساده برای محاسبه ی نیروهای آیرودینامیکی روی بال حشرات، تنها به کمک شناخت حرکت بالهای آنان در پرواز فراهم می شود.

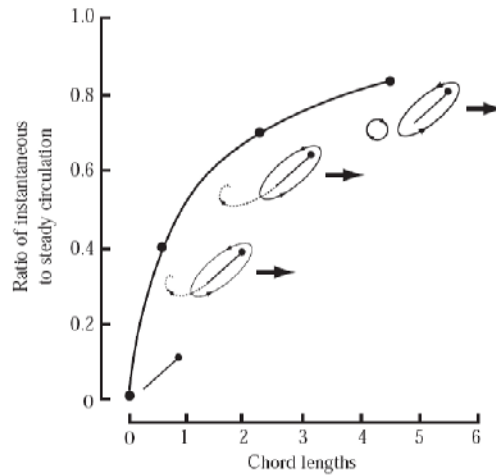
گرچه مدل های شبه پایا در گذشته با موفقیت محدود به کار برده شده اند<sup>۲۶</sup>، اما این مدل ها عموماً برای محاسبه ی نیروی برآی متوسط در مواردی که نیروی میانگین پرواز در دسترس است نا کافی به نظر می رسند. در یک مرور گسترده از ادبیات پرواز حشرات، الینگتون (۱۹۸۴a) از برهان خلف استفاده کرد تا بحث کند که حتی بیشترین برآی پیش بینی

بر رشد گردش در اطراف بال تاثیر می‌گذارد. پس از این که گردابه‌ی شروع حرکت به اندازه‌ی کافی از لبه‌ی فرار فاصله گرفت بال به بیش‌ترین گردش خود در حالت پایا دست می‌یابد (شکل ۳). این کندی در پیشرفت و تشکیل گردش نخستین بار به وسیله‌ی واگنر (۱۹۳۱) ارائه شد، واکر (۱۹۳۱) به طور آزمایشگاهی به مطالعه‌ی آن پرداخت و معمولاً از آن به عنوان اثر واگنر یاد می‌شود.

بر خلاف سازوکارهای ناپایای دیگر که در ادامه توصیف می‌شوند، اثر واگنر پدیده‌ی ای است که باعث کاستن از نیروها تا زیر حد پیش بینی شده به وسیله‌ی مدل‌های شبه پایا می‌شود. به هر حال مطالعات اخیر روی بال‌های دو بعدی<sup>۳۴</sup> نشان می‌دهد که ممکن نیست اثر واگنر در بازه‌ی عدد رینولدز برای بیشتر حشرات تاثیر بخصوصی داشته باشد. برای بال‌های نامحدود که در زاویه حمله‌ی کوچک (زیر ۱۰ درجه) حرکت می‌کنند، برآ رشد کمی دارد و اگر رشدی داشته باشد پس از پیمودن مسافتی به اندازه‌ی دو برابر طول وتر بال حاصل می‌شود. آزمایش‌های مشابه برای حرکت بالزنی در سه بعد نیز شواهدی از اثر واگنر نشان می‌دهند.<sup>۳۵</sup> در هر صورت، به دلیل ارتباط مستقیم این اثر با رشد چرخش در شروع حرکت، اندازه‌گیری و رفتار نظری آن در اثر تعامل با اثرات جرم افزوده که در بخش بعد توصیف خواهد شد، پیچیده می‌شوند. با این حال تازه‌ترین مدل‌های ارائه شده برای بال‌های حشرات در حال بالزنی اثر واگنر را نادیده گرفته‌اند (اما شما واکر و وستنیت (۲۰۰۰) و واکر (۲۰۰۲)<sup>۳۶</sup> را ببینید) و به جای آن روی سایر سازوکارها ناپایا متمرکز شده‌اند.

### سازوکار رسیدن بال‌ها به هم در هنگام گذر از فراکش به فروکش<sup>۱</sup>: کف‌زدن بالها<sup>۳۷</sup>

سازوکار رسیدن بال‌ها به هم در فراکش نخستین بار به وسیله‌ی ویس‌فاگ (۱۹۷۳) برای توضیح تولید برآی بالا در یک گونه زنبور<sup>۳۸</sup> ارائه شد و گاهی از آن به سازوکار ویس-فاگ یاد می‌شود. یک تحلیل نظری همراه با جزئیات از این سازوکار را می‌توان در لایت‌هیل<sup>۳۹</sup> (۱۹۷۳) و ساندررا<sup>۴۰</sup>



شکل ۳: اثر واگنر، نسبت گردش لحظه‌ای به گردش پایا (محور Y ها) با دور شدن گردابه‌ی لبه‌ی فرار از هوا بر افزایش می‌یابد و اثر آن بر گردش حول هوا بر با افزایش مسافت (محور X ها) کم می‌شود. مسافت با تقسیم کردن بر طول وتر بال بی بعد شده است. این شکل بر پایه شکل ۳۵ در مقاله واکر (۱۹۳۱) رسم شده است. شکل‌های موجود در کنار منحنی یک نمای شماتیک از اثر واگنر هستند و نقطه چین‌ها مسیر پراکنده شدن چرخش از لبه‌ی فرار را نشان می‌دهند که به آرامی بالا رفته و به یک گردابه شروع حرکت تبدیل می‌شود. با پراکنده شدن چرخش در شوک، گردش حول بال تشکیل می‌شود که با افزوده شدن قطر خط گردش حول بال نشان داده شده است.

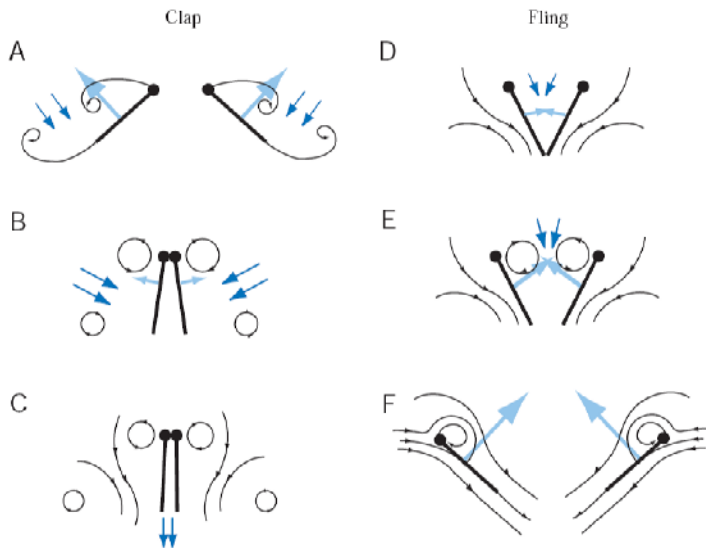
ناپایای گوناگون مانند سازوکار رسیدن بال‌ها به هم در هنگام گذر از فراکش به فروکش (کف‌زدن بالها)<sup>۲۹</sup>، واماندگی با تأخیر<sup>۳۰</sup>، نیروهای چرخشی<sup>۳۱</sup> و اثرات متقابل بال و شوک<sup>۳۲</sup> بسیار مفید هستند. این سازوکارهای گوناگون در بخش بعد مورد بحث قرار می‌گیرند.

## سازوکارهای ناپایا در پرواز حشرات

### اثر واگنر

زمانی که یک بال با زاویه‌ی حمله از حالت سکون ناگهان شروع به حرکت می‌نماید، گردش در اطراف آن به طور یکباره به مقدارش در حالت پایا نمی‌رسد<sup>۳۳</sup>، بلکه به آرامی به مقدار خود در حالت پایا نزدیک می‌شود (شکل ۳). این تأخیر در رسیدن به مقادیر حالت پایا از ترکیب دو پدیده نتیجه می‌شود. اول اینکه یک نهمگی و تاخیر ذاتی در عمل کردن لزجت روی نقطه‌ی سکون وجود دارد و بنابراین تا زمان برقرار شدن شرط کاتا زمان کوتاهی صرف می‌شود و دوم اینکه در این فرآیند چرخش ایجاد می‌شود و در لبه‌ی فرار بال پخش می‌شود و چرخش پراکنده شده کم کم به صورت یک گردابه‌ی شروع حرکت در می‌آید. همچنین میدان سرعتی که با پراکنده‌ی چرخش در لبه فرار در مجاورت بال القا می‌شود،

<sup>۱</sup> برای درک بهتر این پدیده بهتر است فیلم زیر را ببینید:



شکل ۴: برش شماتیک از نزدیک شدن بالها به هم در زمان گذر از فراکش به فروکش، رسیدن لبه ی حمله ی بالها به هم (A-C) و جدا شدن لبه ی حمله بالها از هم (D-E). خطوط سیاه خطوط جریان را نشان می‌دهند جهت نماهای روی بال نیروی برآیند را روی بال نشان می‌دهند و جهت نماهای دوتایی سرعت القایی به هوا را نشان می‌دهند.

(A-C) : در هنگام رسیدن بالها به هم (A) ، ابتدا لبه‌های حمله به هم می‌رسند و بال دور لبه‌های حمله می‌چرخد (B). در زمانی که لبه‌های فرار به هم می‌رسند چرخش به وجود آمده ، از لبه‌های فرار جدا شده و در شاره به عنوان یک چرخش بازدارنده رها می‌شود (C) و در آشفته‌گی شاره میرا می‌شود . همچنین در همین زمان از قدرت چرخش لبه ی حمله نیز کاسته می‌شود و فضای بسته شونده ی بین دو بال نیز با بیرون زدن شاره یک نیروی جلو برنده ی اضافه ایجاد می‌کند .

(D-F) : دور شدن بالها از هم ، بالها با چرخش دور لبه ی حمله از هم جدا می‌شوند (D) . لبه‌های حمله از هم جدا می‌شوند ، شاره وارد فاصله ی بین بالها می‌شود و به تولید نیروی محرکه اولیه برای تولید گردش در اطراف بالها منجر می‌شود (E) . دوباره یک گردابه ی لبه ی حمله ایجاد می‌شود اما چرخش های اولیه لبه ی فرار در اثر متضاد بودن جهتشان از بین می‌روند . همان گونه که به وسیله ی ویس فاگ (۱۹۷۳) بیان شده است . این نابودی ممکن است با سرکوب اثر واگنر به گردش اجازه دهد تا سریع تر ایجاد شود .

توسعه دهند (همچنین مقاله ی لایت هیل (۱۹۷۳) را ببینید) . علاوه بر اثرات بالا شاره ی جهیده شده از میان بالها می‌تواند یک نیروی جلوبرنده ی اضافه به حشره دهد<sup>۴۲</sup> (شکل ۴، قسمت C).

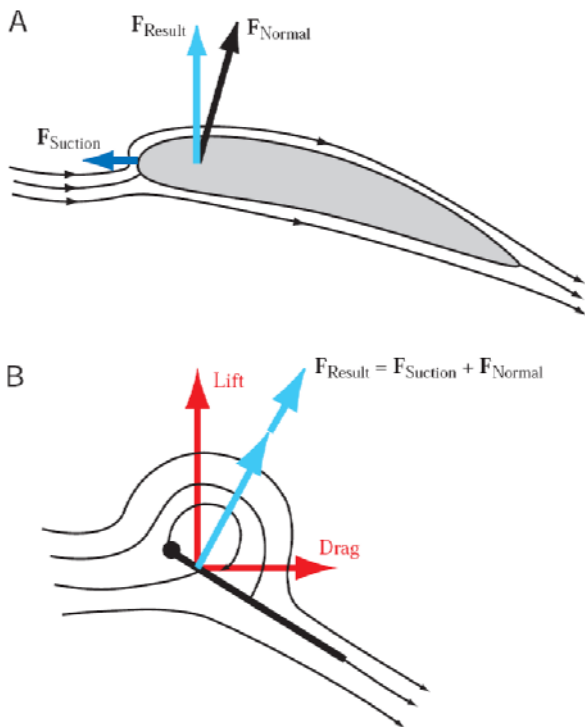
در انتهای کف زدن بالها هر بال به چرخش ادامه می‌دهد ، در این حالت لبه‌های فرار ساکن باقی می‌ماند و لبه‌های حمله از هم جدا می‌شوند ( شکل ۴ قسمت D ) . این فرآیند یک ناحیه ی کم فشار در میان بالها ایجاد می‌کند و شاره ی اطراف برای پر کردن این ناحیه به سمت بالها هجوم می‌آورد و یک نیروی محرکه اولیه برای ایجاد گردش یا چرخش چسبیده برای بال فراهم می‌سازد ( شکل ۴ قسمت D و E ) سپس بالها از هم جدا شده و با گردش‌های با جهت مخالف از هم فاصله می‌گیرند . گرچه گردش اطراف هر بال به آن اجازه می‌دهد تا برآ تولید کند اما گردش مجموع دو بال صفر باقی می‌ماند و بدین ترتیب شرط صفر بودن مجموع گردش‌ها در قانون کلونین نیز ارضا می‌شود<sup>۴۳</sup> ( شکل ۴ قسمت F ) . همان گونه که به وسیله ی لایت هیل (۱۹۷۳) اشاره شده است ، این پدیده می‌تواند برای عمل کف زدن در شاره‌های کاملاً غیرلزج نیز کاربرد داشته باشد . روی هم رفته کف زدن بالها موجب یک افزایش هر چند کوچک اما ارزشمند در تولید برآ می‌شود. با وجود مزیت بالقوه ی آن بسیاری از حشرات هیچ گاه از این سازوکار (کف زدن بالها) استفاده نمی‌کنند و دیگر حشرات نیز مانند دراسفیلا ملانوگستر<sup>۴۴</sup> سازوکار کف زدن بالها را در شرایط بسته شده با طناب استفاده می‌کنند و در پرواز آزاد به ندرت از این سازوکار سود می‌برند ، چون سازوکار کف زدن

(۱۹۹۳) و عملیات آزمایشگاهی را می‌توان در مقالات بنت<sup>۴۱</sup> (۱۹۷۷) ، ماکس ورثی (۱۹۷۹) و اسپدینگ و ماکس ورثی (۱۹۸۶) یافت .

دیگر اشکال این سازوکار پایه مانند clap-and-peel یا near-clap-and-fling در بخش ادبیات مقاله ی الینگتون (۱۹۸۴C) آمده است . سازوکار رسیدن بالها به هم در فراکش در حقیقت از ترکیب شدن دو سازوکار جداگانه ی آیرودینامیکی تشکیل شده است که باید به طور غیر وابسته با آن‌ها رفتار کرد . در برخی حشرات بالها پیش از شروع فروکش در پشت حشره هم دیگر را لمس می‌کنند . این حالت از حرکت بال را کف زدن بالها می‌گویند . یک تحلیل جزئی در بررسی حرکت این گونه زنبور نشان داده است که در هنگام کف زدن بالها لبه‌های حمله ی بالها قبل از لبه‌های فرار هم دیگر را لمس می‌کنند و به ترتیب بعد از آن شکاف بالها بسته می‌شود (شکل ۴ ، قسمت A و B) . در هنگام بسته شدن فضای بین بالها گردش‌های با جهت مخالف بالها هم دیگر را خنثی می‌کنند (شکل ۴ ، قسمت C) . این عمل موجب می‌شود که در هنگام بال زدن بعدی از قدرت چرخش‌های لبه‌های فرار کاسته شود یا این چرخش‌ها به کلی محو شوند.

به علت پراکنده شدن چرخش لبه ی فرار رشد گردش به وسیله اثر واگنر به تاخیر می‌افتد ، ویس فاگ (۱۹۷۳) بحث کرده است که عدم حضور یا تضعیف چرخش‌های لبه ی فرار به بالها اجازه می‌دهد تا گردش را با سرعت بیشتری ایجاد کنند و در بال زدن بعدی اثر نیروی برآ را در طول زمان





شکل ۵

تشبیه پولهام از مکش لبه ی حمله

A. جریان اطراف یک بال ساده ، واگرایی سریع جریان در لبه ی حمله یک نیروی مکش ایجاد می کند ( جهت نمای خاکستری ) و این نیرو جهت نیروی برآیند را به سمت جلو منحرف می کند تا این نیرو عمود بر جهت جریان آزاد قرار گیرد .  
B. جریان اطراف یک بال نازک ، حضور گردابه ی لبه ی حمله موجب واگرایی جریان مانند قسمت A می شود در حالی که در بال نازک نیروی مکش عمود بر سطح بال است . و این نیرو موجب افزایش نیروی عمود بر صفحه ی بال می شود .

گذشته مشخص کرده است که مهمترین ویژگی جریان های ایجاد شده در پرواز حشرات و در نهایت نیروهای تولیدی آنها گردابه ی لبه ی حمله است .

پولهام (۱۹۷۱) روشی ساده را برای به شمار آوردن گردابه ی لبه ی حمله در افزایش برآ توصیف کرده است که به ما اجازه می دهد تا تحلیل عددی ساده ای از این پدیده داشته باشیم. برای هواپرها ی ساده، هوا با شدت در اطراف لبه ی حمله می چرخد و منحرف می شود و موجب یک مکش در لبه ی حمله موازی با وتر بال می شود این نیروی اضافه به مؤلفه ی پتانسیل نیرو ( مؤلفه ی عمود بر صفحه ی بال ) می پیوندد و موجب عمود شدن جهت نیروی برآیند بر جهت جریان آزاد شاره می شود و نیروی برآیند را در جهت برآ قرار می دهد ( شکل ۵ قسمت A ) . در زاویه حمله ی پایین این انحراف برآیند به جلو در اثر گردابه ی لبه ی حمله موجب دستیابی به تقریب بهتری از پیش بینی پسای صفر در نظریه ی جریان پتانسیل<sup>۴۷</sup> می شود . برای هواپرها ی با لبه ی حمله ی تیزتر

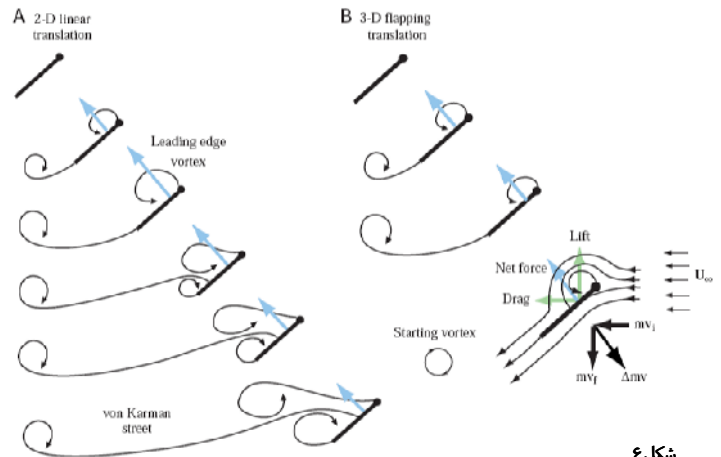
بالها در میان حشرات فراگیر نیست ، احتمال این که یک توضیح عمومی برای ضریب برآی بالا در پرواز حشرات باشد ضعیف است . علاوه بر این با دانستن این نکته که حشرات می توانند به سادگی با بیشینه کردن دامنه حرکت بال هایشان به یک برآی اضافه ی برجسته دست یابند، می توان به اهمیت مشاهده سازوکار کف زدن بالها پی برد .

مطالعات گوناگونی روی قله ی عملکرد پرواز پرنده گان<sup>۴۵</sup> و حشرات<sup>۴۶</sup> نشان داده است که این قله تقریباً در هنگامی بدست می آید که دامنه حرکت بالها و باز و بسته شدن آنها به ۱۸۰ درجه برسد یعنی نهایت دامنه ای که بالها می توانند با توجه به شکل بدن حشرات و پرنده گان در آن به حرکت درآیند . این گونه به نظر می رسد که حیوانات با افزایش زاویه ی بال زنی تا هنگام رسیدن بالها به هم یا هنگامی که استخوان بندی یا فیزیک جسم آنها دیگر اجازه بیشتر باز شدن بالها را ندهد ، به تدریج نیروی برآ را افزایش می دهند . بنابراین مشاهده ی یک حشره در حال نمایش سازوکار کف-زدن بالها می تواند نشان دهنده ی تلاش آن حشره برای افزایش برآ باشد . علاوه بر این اگر اثر واگنر حقیقتاً تأثیر کمی بر نیروهای آیرودینامیکی روی بال حشره داشته باشد مزایای توصیف شده از سازوکار کف زدن بالها ممکن است کمتر از آنچه قبلاً تصور می شد معلوم شده باشد . تحلیل این نظرات چشم به راه مطالعات دقیق تری از جریان ها و نیروها در سازوکار کف زدن بالها است.

### واماندگی با تأخیر و گردابه ی لبه ی حمله

با افزایش زاویه ی حمله ی بال ، جریان شاره ی گذرنده از روی بال از بال جدا می شود اما با عبور از روی بال پیش از رسیدن به لبه ی فرار دوباره به بال می چسبد . در چنین حالتی ناحیه ی جدایش در بالای لبه ی حمله به وسیله گردابه ی لبه ی حمله پر می شود . به دلیل چسبیدن مجدد جریان روی بال ، جریان ها در لبه ی فرار به صورت هموار به هم می پیوندند و شرط کاتا نیز بدست می آید . در این حالت به علت حرکت در زاویه حمله ی بالا تکانه ی بیشتری به سمت پایین به شاره ی گذرنده از روی بال داده می شود و در نتیجه برآی قابل توجهی بدست می آید . شواهد تجربی و مطالعات CFD در ۱۰ سال

یابد تازمانی که چسبیدن مجدد جریان به بال در اثر افزایش بیش از آن ممکن نباشد. شرط کاتا با تشکیل گردابه‌ی لبه‌ی فرار در اثر تولید چرخش در این لبه‌ی از بین می‌رود و گردابه‌ی لبه‌ی حمله در شوک، پخش می‌شود. در این حالت بال قدرت موثر برای دادن یک تکانه‌ی پایا به شاره را ندارد. در نتیجه یک افت برآ ایجاد می‌شود و بال دچار واماندگی می‌شود. برای مسافتی معادل چند طول وتر پیش از واماندگی حضور گردابه‌ی لبه‌ی حمله، ضریب برآی بسیار بالایی به وجود می‌آورد، این پدیده واماندگی با تأخیر نامیده می‌شود (شکل ۶ قسمت A). اولین مدرک برای واماندگی با تأخیر در پرواز حشرات به وسیله‌ی ماکس ورثی (۱۹۷۹) ارائه شد، او گردابه‌ی لبه‌ی حمله‌ی بال را در یک مدل بالزن رسم کرد. اما در هر صورت واماندگی با تأخیر برای اولین بار در آزمایش بال یک هواپیمای مدل با افزایش برآ در شروع حرکت با زاویه‌ی حمله‌ای بیش از زاویه حمله‌ی واماندگی در حالت پایا شناسایی شد<sup>۴۸</sup>. برای اعداد رینولدز پایین که مناسب بیشتر حشرات باشد، از بین رفتن شرط کاتا با رشد یک گردابه‌ی لبه‌ی فرار آشکار می‌شود، تا زمانی که این گردابه به حدی بزرگ می‌شود که دیگر نمی‌تواند چسبیده به بال باقی بماند<sup>۴۹</sup>. با پراکنده شدن و از بین رفتن گردابه‌ی لبه‌ی فرار در شوک یک گردابه‌ی لبه‌ی حمله‌ی جدید تشکیل می‌شود. این فرآیند به صورت دینامیک تکرار می‌شود، در نهایت یک شوک از چرخش‌های خلاف جهت منظم ایجاد می‌شود که به نام سری گردابه‌ی ون کارمن<sup>۵۰</sup> شناخته می‌شود (شکل ۶ قسمت A). نیروهای تولید شده در این حالت به نیروهای وارد به یک صفحه‌ی نوسانگر که با الگوی خلاف الگوی پراکنده شدن گردابه‌ها نوسان می‌کند شباهت دارند. گرچه هر دو برآ و پسا در حضور گردابه‌ی لبه‌ی حمله بیشترین مقدار خود را دارند اما در چرخه‌های بعدی هیچگاه نیروها به مقدار خود در چرخه‌ی اول نمی‌رسند. ممکن است گردابه‌ی لبه‌ی حمله در پرواز حشرات اهمیت بخصوصی داشته باشد زیرا حشرات بال‌های خود را در زاویه حمله‌ی بالا به حرکت در می‌آورند. یک تحلیل آزمایشگاهی از واماندگی با تأخیر دو بعدی نشان داد که جریان در زاویه‌ی حمله‌ی بالا تر از ۹ درجه برای تشکیل گردابه‌ی لبه‌ی حمله از بال جدا می‌شود، که این زاویه آستانه-ای است که به خوبی پایین تر از زاویه‌ی حمله‌ی مورد استفاده



شکل ۶

مقایسه حرکت انتقالی دو بعدی با حرکت بالزنی سه بعدی

(A) حرکت انتقالی دوبعدی

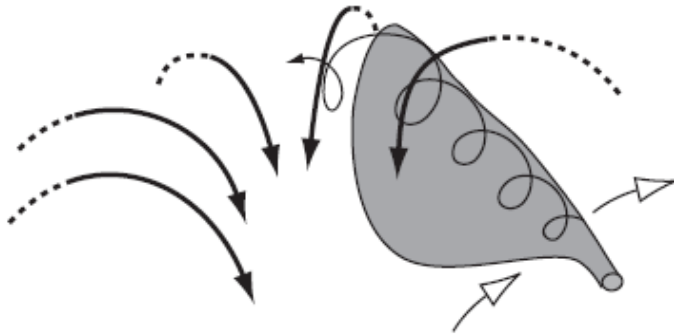
هنگامی که یک هواپر از حالت سکون شروع به حرکت می‌کند، دو گردابه‌ی لبه‌ی فرار و حمله تولید می‌کند. در حین انتقال، گردابه‌ی لبه‌ی فرار پراکنده و محو می‌شود و این محو شدن، موجب رشد گردابه‌ی لبه‌ی حمله می‌شود که این گردابه هم در ادامه حرکت در محیط پراکنده و محو می‌شود. این حرکت ما را به یک الگوی رها شدن گردابه‌ها از لبه‌ی فرار و حمله هدایت می‌کند که سری گردابه‌های ون کارمن نامیده می‌شود. این سری یک وابستگی میان نیروهای آیرودینامیکی اندازه گیری شده روی هواپر (جهت نمای خاکستری) با زمان را نشان می‌دهد.

(B) حرکت بال زنی سه بعدی

مانند (A) زمانی که یک هواپر حرکت بالزنی را از سکون آغاز می‌کند گردابه‌های لبه‌ی حمله و فرار تولید می‌کند. با گذشت زمان گردابه‌ی لبه‌ی حمله رشد کرده و به یک اندازه ثابت می‌رسد و دیگر بزرگتر نمی‌شود. به دلیل عدم تولید چرخش جدید در لبه‌ی حمله دیگر چرخشی در لبه‌ی فرار نیز تولید نمی‌شود و هواپر به شرط کاتا می‌رسد. با برقراری شرط کاتا یک تغییر کلی در جهت تکانه موجب یک نیروی آیرودینامیک راکتیو روی هواپر می‌شود. جهت نمای  $mv_i$  تکانه‌ی اولیه را نشان می‌دهد و جهت نمای  $mv_f$  تکانه‌ی نهایی را نشان می‌دهد و  $\Delta mv$  تغییر تکانه را نشان می‌دهد. پس از برقراری شرط کاتا، نیروی آیرودینامیک اندازه گیری شده (جهت نمای خاکستری) در یک بازه‌ی زمانی گذرا حین حرکت، پایدار باقی می‌ماند و وابستگی به زمان ندارد. برای اعداد رینولدز  $100 \leq$ ، این نیرو عمود بر بال عمل می‌کند و به دو مؤلفه‌ی تقریباً عمود بر هم برآ و پسا تجزیه می‌شود. در نهایت تکانه‌ی کلی رو به پایین که به وسیله‌ی لبه‌ی فرار به شاره داده می‌شود، یک فروزش در شاره ایجاد می‌کند که به آرامی از مقدار ثابت نیروی آیرودینامیک روی بال متحرک در حالت پایا می‌کاهد.

جریان جدا شده در لبه‌ی حمله، تشکیل گردابه‌ی لبه‌ی حمله را آسانتر می‌کند. در این حالت نیروی مکش در جهت عمود بر صفحه‌ی بال قرار می‌گیرد، نه موازی با بال و این نیرو با نیروی پتانسیل جمع شده و موجب افزایش برآ می‌شود. به یاد داشته باشید که در این حالت نیروی برآیند در جهت عمود بر صفحه بال قرار دارد و نه در جهت عمود بر جهت جریان شاره و بنابراین نیروی پسا نیز افزایش می‌یابد (شکل ۵ قسمت B).

برای حرکت دو بعدی اگر بال به حرکت در زاویه‌ی حمله بالا ادامه دهد اندازه‌ی گردابه‌ی لبه‌ی حمله‌ی بال افزایش می‌-



شکل ۷: اتصال پایدار گردابه‌ی لبه‌ی حمله. در هنگام حرکت بال در حال بالزنی، یک میدان سرعت در جهت دهانه بال با گردابه‌ی لبه‌ی حمله‌ی بال در حال تعامل است و موجب ماریجی شدن یک جریان محوری به سمت نوک بال می‌شود. جریان محوری تکانه را از گردابه خارج می‌کند و بنابراین گردابه به صورت پایدار متصل به بال باقی می‌ماند. در فاصله‌ی سه چهارم درازای یک بال (از ریشه تا نوک بال) گردابه از بال جدا شده و در شوک محو می‌شود. جهت نماهای سیاه بزرگ فروزش ناشی از سامانه‌ی گردابه‌ی تولید شده به وسیله بال در شاره‌ی اطراف را نشان می‌دهد. این شکل از سوی وان دن برگ و الینگتون انتشار یافته است.

جدایش به آن می‌چسبد را زمان بیشتری نگه دارد. همان گونه که الینگتون اشاره کرده است برای بالهای دلتا شکل در هواپیمایی مانند کنکورد نیز، تولید یک جریان محوری به علت زاویه‌ی رو به عقب بال، به گونه‌ای مشابه موجب پایدار شدن گردابه‌ی لبه‌ی حمله می‌گردد. این مطلب یکی از شباهت‌های برجسته‌ی میان طبیعت و دنیای ماشینی است.

اخیراً با استفاده از فناوری DPIV برای ثبت ساختار جریان در یک مدل از بال پروانه‌ی میوه (Re=۱۱۵)، بیرج و دیکینسون<sup>۵۶</sup> (۲۰۰۱) اتصال پایدار گردابه‌ی لبه‌ی حمله را در نبود یک گردابه‌ی ماریجی قابل توجه گزارش کرده‌اند. در حالی که جریان محوری در هسته‌ی گردابه، تقریباً از لحاظ اندازه یک مرتبه‌ی کمتر از مدل مندوسا با بازه‌ی  $Re=۱۰^۳$  بوده است، آنان در پشت سر گردابه‌ی لبه‌ی حمله، یک جریان محوری قابل توجه در یک صفحه گسترده از شاره‌ی روی بال مشاهده نمودند که به سمت یک گردابه‌ی نوک بال مهم در حرکت بود. این نتایج از مدل‌های هاوک موس و پروانه‌ی میوه نشان داد که مدل‌های سه بعدی می‌توانند در اعداد رینولدز بالا و پایین رفتار متفاوتی از خود نشان دهند. خوشبختانه، چنین به نظر می‌رسد که تفاوت‌های موجود در ساختار جریان‌های سه بعدی در نیروهای اندازه‌گیری شده روی بالها تأثیر نداشته است. شبیه‌سازی‌های انجام شده با CFD

در پرواز حشرات قرار دارد<sup>۵۱</sup>. در این مطالعه مستقیماً ضریب متغیر با زمان نیرو اندازه گرفته شد و نشان داد که مقدار نیروی تولید شده در اثر حضور گردابه‌ی لبه‌ی حمله حداقل برای جبران نیروی مورد نیاز برای صحیح دانستن مدل شبه پایا کافی است. البته مدرک مستقیم برای حضور گردابه‌ی لبه‌ی حمله روی بال حشرات واقعی، از آزمایش‌های الینگتون (۱۹۹۶) بدست آمد. او برای مشاهده‌ی جریان در پرواز حشره‌ی مندوسا سکستا<sup>۵۲</sup> و مدل سه بعدی‌اش، در عدد رینولدز از مرتبه‌ی  $۱۰^۳$ ، از دود استفاده کرد. در این مشاهدات برخلاف مدل دو بعدی ارائه شده برای گردابه‌ی لبه‌ی حمله، حتی پس از طی مسافتی به اندازه‌ی چند وتر بال نیز گردابه از بال جدا نشد و الگوی شبیه سری ون کارمن نیز هیچگاه ایجاد نشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این شرایط بال هیچ گاه دچار واماندگی نمی‌شود (شکل ۶ قسمت B). این مشاهدات بعداً در اعداد رینولدز پایین با آزمایش روی مدلی از بالهای پروانه‌ی میوه<sup>۵۳</sup> تایید شد، این آزمایش همچنین نشان داد که نیروها نیز همانند جریان‌ها در طول بالزنی یکتواخت به صورت قابل توجهی پایدار باقی می‌مانند<sup>۵۴</sup>. به راستی چه چیز باعث باقی ماندن گردابه‌ی لبه‌ی حمله روی بال در مدل سه بعدی در مقایسه با مدل دو بعدی می‌گردد؟

در مدلی به نام هاوک موس<sup>۵۵</sup>، الینگتون و همکارانش یک جریان پایا در جهت دهانه بال مشاهده کردند که از ریشه‌ی بال آغاز می‌شد و تا فاصله‌ی سه چهارم از درازای یک بال (از ریشه تا نوک بال) ادامه می‌یافت که در این نقطه گردابه‌ی لبه‌ی حمله از سطح بال جدا می‌شود. این جریان در جهت دهانه بال در اثر گردابه‌ی لبه‌ی حمله روی بال سوار می‌شود و موجب تولید یک ماریجی جریان به سمت نوک بال می‌شود (شکل ۷) در آزمایشات پیشین به وسیله ماکس ورثی (۱۹۷۹) روی سازوکار کف‌زدن برای بالهای سه بعدی نیز یک جریان مشابه مشاهده شده بود. به دلیل انتقال تکانه در جهت دهانه بال به وسیله‌ی این جریان، باید انتقال تکانه در جهت وتر بال به گونه‌ای متناظر کاهش یابد که این کاهش انتقال تکانه در جهت وتر بال موجب کوچک شدن گردابه‌ی لبه‌ی حمله می‌شود. گردابه‌ی لبه‌ی حمله‌ی کوچکتر به جریان شاره اجازه می‌دهد تا راحت‌تر به بال بچسبد و بال جریانی که پس از



### اثر کرامر (نیروهای چرخشی)

در انتهای هر ضربه‌ی بال، بالها تحت یک چرخش ساعتگرد یا پادساعتگرد گذرا حول جهت دهانه‌ی بال قرار می‌گیرند، این چرخش برای آنها این امکان را فراهم می‌آورد که همواره زاویه‌ی حمله‌ی مثبت داشته باشند و در حرکت به جلو و عقب برآ تولید کنند. علاوه بر این شواهدی از هر دو پرواز در حالت بسته شده<sup>۶۱</sup> و پرواز آزاد<sup>۶۲</sup> در دست است که نشان می‌دهد حشرات در زمان مانور دادن زمانبندی چرخش بالها را تغییر می‌دهند. نکات برجسته‌ی آیرودینامیکی این چرخش‌ها برای بالهای در حال بالزنی به وسیله‌ی بنت (۱۹۷۰) و سین و دیکینسون (۲۰۰۲) مطالعه شده است، همچنین این نوع پرواز در بخش ادبیات آیرودینامیک و زیر بخش هواپیماهای بالزن، در کارهای نظری تعدادی از پژوهشگران<sup>۶۳</sup> و مدارک آزمایشگاهی سایرین<sup>۶۴</sup> به گونه‌ای گسترده بررسی شده است.

زمانی که یک بال در هنگام بالزنی حول جهت دهانه‌ی بال می‌چرخد و در حین بالزنی در حال حرکت نیز هست، جریان در اطراف بال با انحراف نقطه‌ی سکون از نوک لبه‌ی حمله از شرط کاتا منحرف می‌شود. این پدیده یک میدان دینامیک و تیز در لبه‌ی فرار به وجود می‌آورد که موجب تولید برش روی بال می‌شود. به دلیل مقاومت شاره در اثر لزجت در مقابل برش، گردشهای اضافی در اطراف بال ایجاد می‌شود تا شرط کاتا مجدداً در لبه‌ی فرار برقرار شود. به عبارت دیگر بال با تولید گردش در شاره اثرات چرخیدن خود را خنثی می‌کند. با اینکه برقراری مجدد شرط کاتا لحظه‌ای نیست اما به زمان محدودی نیازمند است، اگر بال به طور سریع و پیوسته به بالزنی ادامه دهد آنگاه در هر بازه از زمان بالزنی، شرط کاتا به طور واقعی هیچ‌گاه مشاهده نمی‌شود، اما با وجود این تمایل شاره به برقراری شرط کاتا باعث تولید گردش می‌شود. بنابراین به نسبت سرعت زاویه‌ی چرخش بال، گردش اضافه تولید می‌شود تا زمانی که جریان به صورت هموار و مماس روی لبه‌ی فرار قرار گیرد. بسته به جهت چرخش این گردش اضافه در حین حرکت از نیروی برآیند می‌کاهد یا به آن می‌افزاید. این اثر معمولاً پس از توصیف برای اولین بار به وسیله-

روی هوابرهای دو بعدی<sup>۵۷</sup> و سه بعدی<sup>۵۸</sup>، یک شباهت قابل توجه در نیروهای محاسبه شده در عدد رینولدز ۱۰۰ و نیروهای محاسبه شده با معادله‌ی اوپلر در شاره‌ی غیر لزج یا عدد رینولدز نامحدود ( $Re=100000$ ) در مطالعات همدانی و سان (۲۰۰۰) نشان می‌دهد.

این نتایج نشان می‌دهد، اگر چه حضور لزجت برای تولید چرخش لازم و ضروری است، اما اثر آن در نیروی برآیند برای اعداد رینولدز خیلی کوچک ( $Re < 100$ ) بسیار کوچک است و نیروها بیشتر تحت تأثیر میدان فشار دینامیکی روی بال هستند. نتیجه‌ی بالا از مدل‌های CFD به وسیله‌ی داده‌های تجربی نیز تایید شده است<sup>۵۹</sup>. این نتایج در صورتی که با هم در نظر گرفته شوند یک نتیجه‌ی گیری تقریباً متضاد را به دست می‌دهند که نیروها حتی با تغییر گذرای ساختار جریان، با افزایش عدد رینولدز به اندازه‌ی ۱۰۰ نیز بدون تغییر باقی می‌مانند. گرچه یک توضیح دقیق از نتایج بالا در انتظار یک تحلیل کمی موشکافانه از داده‌های جریانها و نیروهای شبیه‌سازی شده است، اما این تفاوتها نباید موجب نادیده گرفته شدن ویژگی‌های عمومی برجسته تر جریان جدا شده از بال در زاویه‌ی حمله‌ی بالا شود. به طور خاص، عدم حضور پراکندگی دوره‌ای چرخش در آزمایشهای اخیر نشان داده است که جریان سه بعدی اطراف یک بال در زمان بالزنی، ممکن است به نحو برجسته‌ای در بازه‌ی اعداد رینولدز  $100 \leq$  خود پایدار-کننده باشند. برای وجود چنین پایداری ای، ایجاد چرخش در لبه‌ی حمله کاملاً با پخش شدن پشت سر هم چرخش در شوک مطابقت دارد تا موجب یک تعادل پایدار شود. این حالت ممکن است به اتصال پیوسته‌ی چرخش‌ها در پس اجسام توپبی شکل، در اعداد رینولدز پایین‌تر از آستانه‌ی تشکیل سری ون کارمن شباهت داشته باشد (برای مثال آپسون<sup>۶۰</sup> ۱۹۹۰ را ببینید). به راستی چه چیزی با تولید و انتقال چرخش به توازن می‌رسد و چگونه این کمیت با تغییر عدد رینولدز تغییر می‌کند؟ به طور مشابه چه چیز اندازه‌ی گردابه‌ی لبه‌ی حمله را در یک بال در حال بالزنی که در تعادل است تعیین می‌کند؟ با توجه به اهمیت گردابه‌ی لبه‌ی حمله پاسخ به این سوالات در تعیین محدوده‌ی عملکرد آیرودینامیکی در پرواز حشرات نقش اساسی دارد.

هیچ توضیحی برای نیروهای چرخشی در هنگام چرخش همراه با تغییر جهت حرکت بالها در حین بالزنی ارائه نمی‌کند<sup>۶۸</sup> بلکه حتی بدون در نظر گرفتن فرضیات متعدد نمی‌تواند برای محاسبه‌ی نیروها و گردشهای روی یک هواپر نازک بالزن به کار برده شود<sup>۶۹</sup>.

در بخش بعدی مقاله به مباحث جرم افزوده، اثرات متقابل بال و شوک و وضعیت کنونی مدل‌سازی شبه پایا خواهیم پرداخت.

ی.م.کرامر (۱۹۳۲) اثر کرامر نامیده شد، اما نام دیگر این پدیده نیروهای چرخشی<sup>۶۵</sup> است.

با استفاده از چارچوب مفهومی که در بالا به آن اشاره شد، سین و دیکینسون (۲۰۰۲) ضرایب چرخشی (اثر کرامر) را اندازه‌گیری کردند و با دنبال کردن پیشنهاد الینگتون (۱۹۸۴d,f) آنها را نیز در کنار ضرایب حرکت انتقالی در مدل شبه پایای فعلی گنجانند. مدل شبه پایای بازبینی شده قادر بود تا علاوه بر نیروی متوسط بالزنی، دوره‌ی زمانی متناظر با اثرات نیرو را نیز به گونه‌ای دقیق‌تر از مدل شبه پایای فقط انتقالی نشان دهد. قله‌های مشابهی برای نیروی چرخشی در شبیه‌سازی‌های CFD به وسیله‌ی سان و تانگ (۲۰۰۲) مشاهده شده است که این مشاهدات قله‌ها را در نقطه‌ی پیچیدن سریع در زمان نزدیک به چرخش انتهای یک ضربه توصیف می‌کنند که می‌تواند اصولاً مکملی لازم برای اثر کرامر در نظر گرفته شود. هم مدل شبه پایای بازبینی شده و هم مدل‌های CFD شباهت نزدیکی به اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی دارند.

به خاطر داشته باشید که اثر کرامر یا نیروهای چرخشی اساساً با نیروی مگنوس متفاوت است. در مقاله‌های بنت (۱۹۷۰) و دیکینسون (۱۹۹۹) یک شباهت با دلایل ناکافی میان این دو نیرو ترسیم شده است که موجب ابهام می‌شود. نیروی مگنوس از گردش تولیدی یک جسم ساده مانند یک استوانه‌ی چرخنده یا یک پوسته‌ی کروی در حال حرکت انتقالی در شاره‌ی حقیقی حاصل می‌شود<sup>۶۶</sup>. گرچه نیروی مگنوس می‌تواند از نظریه‌ی کاتا-جاکوسکی (همانند هواپر) با استفاده از این گردش محاسبه شود، اما این محاسبه شامل کاربردی مستقیم و غیر مستقیم از شرط کاتاست، زیرا با توجه به تعریف، برای نگه داشتن شرط کاتا اجسام ساده باید فاقد نقطه‌ی تکین باشند. از طرف دیگر شرط کاتا برای تمام محاسبات نیروی آیرودینامیک روی هواپرهای نازک، پایه‌ای و ضروری است. در کل در نظر گرفتن کاربرد برای سازوکار اثر مگنوس تنها برای اجسامی مانند استوانه و پوسته‌ی کروی است و توسعه دادن کاربرد این اثر به سطوح پیچیده‌ای مانند هواپرهای نازک یا سایر صفحه‌های دارای لبه‌های تیز حداقل بحث برانگیز است<sup>۶۷</sup>. بنابراین گفته‌های بالا اثر مگنوس نه تنها

- <sup>۱</sup> The aerodynamics of insect flight, Sanjay P. Sane, Department of Biology, University of Washington, Seattle
- <sup>۲</sup> Ellington, ۱۹۷۸, ۱۹۸۰, ۱۹۸۴e; Rayner, ۱۹۷۹a,b
- <sup>۳</sup> Lighthill
- <sup>۴</sup> Encarsia formosa
- <sup>۵</sup> Savage et al
- <sup>۶</sup> Norberg, ۱۹۷۵
- <sup>۷</sup> Aeschna juncea
- <sup>۸</sup> Maxworthy
- <sup>۹</sup> Spedding
- <sup>۱۰</sup> Dickinson et al., ۱۹۹۹; Sane and Dickinson, ۲۰۰۲
- <sup>۱۱</sup> Dragonfly & Damselfly
- <sup>۱۲</sup> Azuma et al., ۱۹۸۵; Azuma and Watanabe, ۱۹۸۸; Sato and Azuma, ۱۹۹۷
- <sup>۱۳</sup> Zbikowski, ۲۰۰۲; Minotti, ۲۰۰۲
- <sup>۱۴</sup> Sane and Dickinson, ۲۰۰۱
- <sup>۱۵</sup> Smith et al., ۱۹۹۶; Liu et al., ۱۹۹۸; Liu and Kawachi, ۱۹۹۸; Wang, ۲۰۰۰; Ramamurti and Sandberg, ۲۰۰۲; Sun and Tang, ۲۰۰۲
- <sup>۱۶</sup> Manduca sexta
- <sup>۱۷</sup> Unsteady aerodynamic panel method (Smith et al., ۱۹۹۶)
- <sup>۱۸</sup> Liu et al., ۱۹۹۸; Liu and Kawachi, ۱۹۹۸
- <sup>۱۹</sup> Ellington et al., ۱۹۹۶
- <sup>۲۰</sup> Drosophila
- <sup>۲۱</sup> Dickinson et al., ۱۹۹۹
- <sup>۲۲</sup> Ramamurti and Sandberg, ۲۰۰۲
- <sup>۲۳</sup> Sun and Tang, ۲۰۰۲
- <sup>۲۴</sup> Dickinson and Götz, ۱۹۹۳
- <sup>۲۵</sup> Ellington, ۱۹۸۴a
- <sup>۲۶</sup> Osborne, ۱۹۵۰; Jensen, ۱۹۵۶
- <sup>۲۷</sup> Ellington, ۱۹۸۴a
- <sup>۲۸</sup> Ennos, ۱۹۸۹a; Zanker and Gotz, ۱۹۹۰; Dudley, ۱۹۹۱
- <sup>۲۹</sup> Bennett, ۱۹۷۷; Maxworthy, ۱۹۷۹; Spedding and Maxworthy, ۱۹۸۶
- <sup>۳۰</sup> Dickinson and Götz, ۱۹۹۳; Ellington et al., ۱۹۹۶
- <sup>۳۱</sup> Bennett, ۱۹۷۰; Ellington, ۱۹۸۴d; Dickinson et al., ۱۹۹۹; Sane and Dickinson, ۲۰۰۲
- <sup>۳۲</sup> Dickinson, ۱۹۹۴; Dickinson et al., ۱۹۹۹
- <sup>۳۳</sup> Walker, ۱۹۳۱
- <sup>۳۴</sup> Dickinson and Götz, ۱۹۹۳
- <sup>۳۵</sup> Dickinson et al., ۱۹۹۹
- <sup>۳۶</sup> Walker and Westneat, ۲۰۰۰; Walker, ۲۰۰۲
- <sup>۳۷</sup> (Clap and Fling)

- 
- <sup>۳۸</sup> Chalcid wasp *Encarsia formosa*  
<sup>۳۹</sup> Lighthill  
<sup>۴۰</sup> Sunada et al  
<sup>۴۱</sup> Bennett  
<sup>۴۲</sup> Ellington, ۱۹۸۴d; Ellington et al., ۱۹۹۶  
<sup>۴۳</sup> Spedding and Maxworthy, ۱۹۸۶  
<sup>۴۴</sup> *Drosophila melanogaster*  
<sup>۴۵</sup> Chai and Dudley, ۱۹۹۵  
<sup>۴۶</sup> Lehmann and Dickinson, ۱۹۹۷  
<sup>۴۷</sup> Kuethe and Chow, ۱۹۹۸  
<sup>۴۸</sup> Walker, ۱۹۳۱  
<sup>۴۹</sup> Dickinson and Götz, ۱۹۹۳  
<sup>۵۰</sup> Karman vortex street  
<sup>۵۱</sup> Dickinson and Götz, ۱۹۹۳  
<sup>۵۲</sup> *Manduca sexta*  
<sup>۵۳</sup> Fruit fly  
<sup>۵۴</sup> Dickinson et al., ۱۹۹۹  
<sup>۵۵</sup> hawkmoth  
<sup>۵۶</sup> Birch and Dickinson  
<sup>۵۷</sup> Wang, ۲۰۰۰; Hamdani and Sun, ۲۰۰۰  
<sup>۵۸</sup> Ramamurti and Sandberg, ۲۰۰۲  
<sup>۵۹</sup> Usherwood and Ellington, ۲۰۰۲b  
<sup>۶۰</sup> Acheson  
<sup>۶۱</sup> Dickinson et al., ۱۹۹۳  
<sup>۶۲</sup> Srygley and Thomas, ۲۰۰۲  
<sup>۶۳</sup> Munk (۱۹۲۵b), Glauert (۱۹۲۹), Theodorsen (۱۹۳۵),  
Fung (۱۹۶۹)  
<sup>۶۴</sup> Kramer (۱۹۳۲), Reid (۱۹۲۷), Farren (۱۹۳۵), Garrick  
(۱۹۳۷), Silverstein and Joyner (۱۹۳۹) and Halfman  
(۱۹۵۱)  
<sup>۶۵</sup> Sane and Dickinson, ۲۰۰۲  
<sup>۶۶</sup> Prandtl and Tietjens, ۱۹۵۷a : برای نمونه این مقاله را ببینید  
<sup>۶۷</sup> Schlichting, ۱۹۷۹  
<sup>۶۸</sup> Sun and Tang, ۲۰۰۲  
<sup>۶۹</sup> Walker, ۲۰۰۲