

دانشگاه فردوسی شهر

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مکانیک و هوافضا

گزارش دوره فرصت مطالعاتی در صنعت

استخراج ضرایب پایداری یک وسیله متحرک

نگارش

جواد سپاهی یونسی

خردادماه ۱۴۰۴

استخراج ضرایب پایداری یک وسیله متحرک

چکیده

این گزارش حرکت‌های نوسانی مختلف یک وسیله متحرک تحت مانورهای مختلف نوسانی از جمله پیچش (Pitch) سینوسی، یاو (Yaw) سینوسی، پلانج (Plunge) سینوسی و رول (Roll) بررسی می‌کند. همچنین تحلیل دینامیکی جهت استخراج مشتقات پایداری و پیش‌بینی بارهای هیدرودینامیکی انجام می‌شود. تخمین مشتقات پایداری هیدرودینامیکی جهت ارزیابی ویژگی‌های دینامیکی وسیله متحرک حیاتی است. برای شبیه‌سازی جریان ناپایای تراکم‌ناپذیر حول وسیله متحرک از روش عددی و نرم‌افزار فلوئنت به همراه شبکه محاسباتی ترکیبی موزاییکی تولیدشده در نرم‌افزار فلوئنت مشینگ استفاده شده است. بررسی استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی روش عددی در حالت استاتیکی با استفاده از داده‌های تجربی وسیله و در حالت دینامیکی به کمک داده‌های تجربی حول یک ایرفویل انجام شده است. نوسانات به روش مش لغزان (Sliding Mesh) شبیه‌سازی و ضرایب نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی استخراج شده است. در نهایت مشتقات پایداری به روش سری فوریه برای تمامی بارهای هیدرودینامیکی در هر سه جهت اصلی محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی:

حرکت ناپایا، پیچش سینوسی، پلانج سینوسی، رول نرخ ثابت، یاو سینوسی، مشتقات پایداری

صفحه	فهرست مطالب
۱	۱ مقدمه.....
۸	نتیجه‌گیری.....
۹	منابع و مراجع.....

صفحه

فهرست اشکال

- شکل ۱.۱ (a) حرکت پیچش خالص، (b) حرکت پلانج خالص، (c) حرکت توأمان پیچش و پلانج [3]..... ۳
- شکل ۱.۲ شماتیک حرکت پیچش و پلانج..... ۴
- شکل ۱.۳ نقشه راه پیشنهادشده برای استخراج مشتقات پایداری توسط می و همکاران [۱۲]..... ۶

۱ مقدمه

برای بررسی کنترل و پایداری وسیله متحرک لازم است معادلات حرکت وسیله متحرک حین مانورهای مشخصی حل شوند. در این معادلات نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی وسیله متحرک برحسب ویژگی‌های سینتیکی وسیله متحرک و یک سری از ثوابت که مشتق‌های هیدرودینامیکی نامیده می‌شوند، با استفاده از بسط تیلور بیان می‌شوند. این ثوابت به دو دسته مشتق‌های حاصل از سرعت وسیله متحرک و مشتق‌های حاصل از شتاب وسیله متحرک تقسیم می‌شوند. در حقیقت این مشتق‌ها نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی وسیله متحرک را به سرعت و شتاب آن مرتبط می‌کنند [2]. این ضرایب همچنین به ضرایب استاتیکی و دینامیکی دسته‌بندی می‌شوند. به‌عنوان مثالی از این ضرایب می‌توان به C_{mp} و C_{xp} اشاره کرد که به ترتیب ضریب تغییرات نیرو در جهت محور x برحسب نرخ زاویه roll و ضریب تغییرات ممان پیچشی برحسب نرخ زاویه roll هستند.

مشتق‌های هیدرودینامیکی را به چهار روش تحلیلی، نیمه‌تجربی^۱، عددی و تجربی می‌توان به دست آورد. روش عددی به دلیل اعمال فرضیات زیاد مثلاً صرف نظر کردن از لزجت جریان و روش نیمه‌تجربی به دلیل عدم دقت در هندسه‌های واقعی پیچیده کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان روش تجربی دقیق‌ترین و قابل اعتمادترین روش است. در این روش با انجام آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی Captive Model در تونل آب، ضرایب مورد نظر را محاسبه می‌کنند. این آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های

¹ Semi-empirical

جواد سپاهی یونسی، «استخراج ضرایب پایداری یک وسیله متحرک»، گزارش دوره فرصت مطالعاتی در صنعت، دانشگاه فردوسی مشهد، خردادماه ۱۴۰۴.

خط مستقیم^۱، بازوی چرخان^۲ و مکانیزم حرکت صفحه‌ای^۳ می‌شوند. باوجود دقت بالا، استفاده از روش تجربی به دلیل نبود زیرساخت لازم و یا هزینه زیاد محدود است. بنابراین استفاده از روش عددی (CFD) می‌تواند در کنار دقت بالا، به‌عنوان یک روش مقرون‌به‌صرفه مورد استفاده قرار گیرد. در این روش آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی Captive Model شبیه‌سازی و ضرایب پایداری محاسبه می‌شوند [2]. در آزمایش خط مستقیم از شبیه‌سازی پایای^۴ جریان برای محاسبه ضرایب خطی و غیرخطی برآمده از سرعت خطی استفاده می‌کنند. در بین آزمایش‌های دینامیکی، آزمون‌های PMM جهت محاسبه مشتق‌های سرعت و شتاب از اقبال بیش‌تری برخوردار هستند و در آن‌ها از حل ناپایای جریان استفاده می‌شود. آزمون‌های PMM شامل حرکت پیچش خالص^۵ و حرکت پلانچ خالص^۶ می‌شود که در شکل ۱.۱ نشان داده شده‌اند [2].

¹ Stright Line

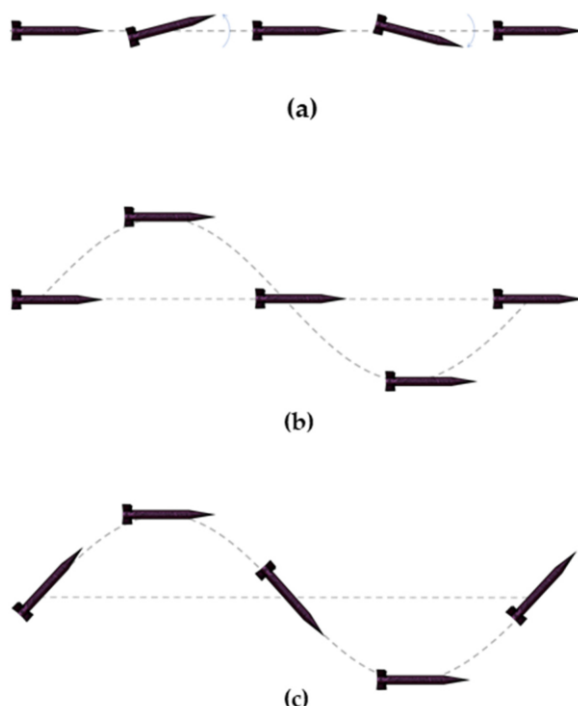
² Rotating Arm

³ Planar Motion Mechanism (PMM)

⁴ Steady

⁵ Pure Pitch

⁶ Pure Plunge



شکل ۱.۱ (a) حرکت پیچش خالص، (b) حرکت پلانچ خالص، (c) حرکت توأمان پیچش و پلانچ [3]

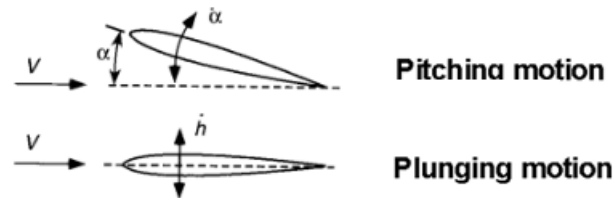
هدف از پژوهش حاضر محاسبه ضرایب استاتیکی و دینامیکی یک وسیله متحرک است. برای محاسبه این ضرایب از شبیه‌سازی‌های CFD پایا و ناپایا استفاده خواهد شد. ابزار مورد استفاده در این پژوهش مجموعه نرم‌افزارهای Ansys و از جمله نرم‌افزار Fluent است.

آئرو دینامیک و هیدرو دینامیک ناپایا در بررسی حرکت‌های مختلف اجسام استفاده می‌شود. جریان ناپایا در بسیاری از کاربردهای مهندسی وجود دارد و پیش‌بینی نیروهای وابسته به زمان نقشی حیاتی در طراحی اجسام متحرک ایفا می‌کند. از انواع حرکت‌های نوسانی می‌توان به حرکت‌های یاو، رول، پیچش و پلانچ^۱ و ترکیب آن‌ها یعنی حرکت فلیپینگ^۲ (ترکیب پیچش و پلانچ) اشاره کرد [۱]. منظور از حرکت پیچش دوران نوسانی حول محور طولی جسم و در حقیقت تغییر زاویه حمله جسم است. حرکت پلانچ نیز حرکت

^۱ Yaw, Roll, Pitch and Plunge

^۲ Flapping

نوسانی بالا و پایین رفتن جسم است که به آن می‌توان حرکت پیستونی یا فرازوفروود نیز گفت. در شکل ۱.۲ این حرکات برای یک ایرفویل نشان داده شده است.



شکل ۱.۲ شماتیک حرکت پیچش و پلانچ

پیدا کردن نیروهای آئرو دینامیکی برای ایرفویل نوسانی نخستین بار توسط گلوره مطرح شد. ولی در نهایت تئودورسن [۲] روابطی را برای نیروها و گشتاورها در حرکت فلیپینگ ایرفویل برای یک جریان ناپایا و تراکم‌ناپذیر ارائه کرد که به تئوری تئودورسن^۱ مشهور شد.

یکی از اعداد بی‌بعد مهم در توصیف یک حرکت ناپایا، فرکانس کاهش یافته^۲ است:

$$k = \frac{\omega b}{U} = \frac{\omega c}{2U} = \frac{\pi f c}{U}$$

که در آن ω فرکانس دورانی و برابر با $2\pi f$ ، f فرکانس نوسانات، U سرعت جریان آزاد، c وتر ایرفویل و b برابر با نصف وتر است. هنگامی که k برابر صفر باشد، نشان‌دهنده جریان پایا است.

بررسی حرکت نوسانی یک جسم شناور یا غوطه‌ور در آب جهت درک اثر شناور بودن آن، تأثیر حرکت امواج دریا بر آن و همچنین جهت درک تأثیر حرکت نوسانی جسم بر عملکرد هیدرودینامیکی و پایداری آن اهمیت دارد. در برخی مطالعات حرکات نوسانی هیدروفویل‌ها یا اجسام غوطه‌ور در آب مطالعه شده است. برای نمونه دانگ و همکاران به بررسی سه‌بعدی یک فویل هیدرودینامیکی بیضوی شکل تحت حرکت

¹ Theodorsen's Theory

² Reduced Frequency

فلپینگ پرداختند و اثر نسبت منظری هندسه را بررسی کردند. همچنین آن‌ها اطلاعات جامعی نسبت به تحقیقات گذشته ارائه کرده‌اند [۳]. در مطالعه پان و همکاران یک زیردریایی تحت مانورهای پیچش، یاو و پلانج بررسی و از روش مش لغزان برای شبیه‌سازی حرکت‌های نوسانی استفاده شده است. آن‌ها نشان دادند که روش عددی استفاده‌شده دقت مناسبی دارد و می‌توان با استفاده از پردازش موازی در زمانی کوتاه، پاسخ‌های دقیقی به دست آورد [۴]. در این پژوهش نیز از روش مش لغزان استفاده خواهد شد.

نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی رابطه‌ای غیرخطی با پارامترهای جریانی مانند سرعت، زاویه حمله^۱، زاویه جانبی^۲، نرخ‌های چرخش جسم حول محورهای مختلف^۳ (p, q, r) و مشخصات سطوح کنترلی^۴ دارند. با این حال می‌توان برای یک حرکت پایا با تغییراتی جزئی، رابطه‌ای خطی برای آن‌ها فرض کرد. این موضوع کمک می‌کند تا بتوان نیروها و گشتاورها را با مجموعه‌ای از مشتقات هیدرودینامیکی که به مشتقات پایداری^۵ معروف هستند، تعیین کرد و در بررسی کنترل و پایداری وسیله مورد استفاده قرار داد [۵].

مفهوم مشتقات پایداری آئرودینامیکی توسط برایان [۶] در سال ۱۹۱۱ به‌عنوان مدلی ساده برای نمایش بارهای آئرودینامیکی معرفی شد. در این مدل‌سازی نیروها و گشتاورهای آئرودینامیکی تابعی از مقادیر لحظه‌ای سرعت، زوایای کنترل و نرخ آن‌ها فرض می‌شوند. وابستگی نیروها و گشتاورها به این متغیرها با استفاده از سری تیلور به دست می‌آید که در آن از جملات مراتب بالاتر صرف نظر می‌شود [۷]. برای حرکات با سرعت کم و در زوایای حمله کم، مشتقات استاتیکی برای مدل‌سازی بارهای آئرودینامیکی کافی

¹ angle of attack, α

² side slip angle, β

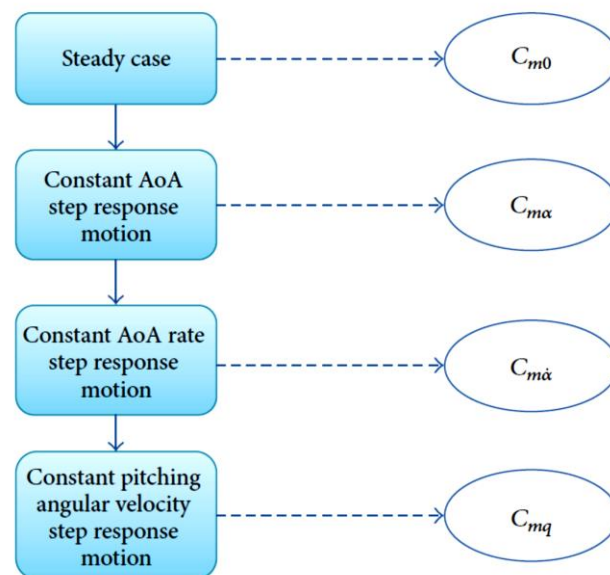
³ body rotational rates

⁴ control surface settings, δ

⁵ stability derivatives

هستند [۸]. در زوایای حمله و سرعت‌های بالاتر، گنجاندن مشتقات دینامیکی در مدل آئرو دینامیکی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های پایداری وسیله داشته باشد [۹]. افزودن اصلاحات غیرخطی برای در نظر گرفتن تغییرات مشتقات پایداری با زاویه حمله، دامنه شرایط حرکتی را به زوایای حمله بالا یا مانورهای با دامنه بالا گسترش می‌دهد [۱۰]. بنابراین پیش‌بینی مشتقات پایداری آئرو دینامیکی برای ارزیابی ویژگی‌های دینامیکی حرکت، حیاتی است. در کنار روش‌های تجربی، روش‌های عددی هم جهت محاسبه مشتقات پایداری استفاده می‌شوند که از لحاظ هزینه و سرعت بسیار مقرون به صرفه هستند.

می و همکاران [۱۱] یک روش دیفرانسیلی برای تعیین مشتقات پایداری با تمرکز بر پایداری دینامیکی طولی ارائه کردند و تأکید داشتند که این روش کارایی و دقت بالاتری نسبت به روش‌های سنتی دارد. همچنین آن‌ها [۱۲] یک روش سیستماتیک مبتنی بر حرکت گام پاسخ بر روی یک وسیله هوایی معرفی کردند، شکل ۱.۳.



شکل ۱.۳ نقشه راه پیشنهاد شده برای استخراج مشتقات پایداری توسط می و همکاران [۱۲]

در این گزارش مشتقات پایداری یک وسیله متحرک در حرکت پلانج سینوسی، پیچش سینوسی، یاو سینوسی و رول ثابت با استفاده از روش عددی محاسبه می‌شوند. استخراج مشتقات پایداری با استفاده

از روش سری فوریه و انتگرال گیری عددی دوزنقه‌ای انجام و جهت شبیه‌سازی مانورهای مختلف از روش مش لغزان مشابه پژوهش‌های پان و همکاران [۴] و یایلا [۵] استفاده خواهد شد. در این گزارش جهت اعتبارسنجی حرکت ترکیبی پیچش و پلانج، مشابه پژوهش‌های مادیر و مارتین [۱۳]، وانگ و همکاران [۱۴] و یوان و همکاران [۱۵] از هندسه ایرفویل استفاده خواهد شد. همچنین جهت مقایسه نتایج حاصل از حرکت پیچش از مرجع [۱۶] و حرکت پلانج از پژوهش هیثکت و همکاران [۱۷] استفاده خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این گزارش بعد از معرفی اهمیت استخراج ضرایب پایداری در روند بررسی پایداری و کنترل وسیله متحرک، روابط لازم جهت محاسبه این ضرایب معرفی شدند. تنظیمات حل عددی شامل شبکه محاسباتی، شرایط مرزی، گام زمانی و ... معرفی و اعتبارسنجی شدند.

منابع و مراجع

- [۱] S. J. Lighthill, Mathematical biofluidodynamics. SIAM, 1975.
- [۲] T. Theodorsen, "General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter," 1949.
- [۳] H. Dong, R. Mittal, and F. Najjar, "Wake topology and hydrodynamic performance of low-aspect-ratio flapping foils," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 566, pp. 309-343, 2006.
- [۴] Y.-c. Pan, H.-x. Zhang, and Q.-d. Zhou, "Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 24, no. 6, pp. 840-847, 2012.
- [۵] K. Yayla, "Numerical prediction of aerodynamic stability derivatives of a projectile," Middle East Technical University, 2021.
- [۶] G. H. Bryan, *Stability in aviation: an introduction to dynamical stability as applied to the motions of aeroplanes*. Macmillan and Company, limited, 1911.
- [۷] D. I. Greenwell, "Frequency effects on dynamic stability derivatives obtained from small-amplitude oscillatory testing," *Journal of aircraft*, vol. 35, no. 5, pp. 776-783, 1998.
- [۸] J. E. Williams, S. R. Vukelich, and M. D. A. C. S. L. MO, "The USAF Stability and Control Digital DATCOM. Volume III. Plot Module," AFFDL-TR-79-3032, vol. 3, 1979.
- [۹] L. T. Nguyen, "Evaluation of importance of lateral acceleration derivatives in extraction of lateral-directional derivatives at high angles of attack," 1974.
- [۱۰] E. A. Morelli and V. Klein, *Aircraft system identification: theory and practice*. Sunflyte Enterprises Williamsburg, VA, 2016.

- [۱۱] B. Mi, H. Zhan, and B. Chen, "Calculating dynamic derivatives of flight vehicle with new engineering strategies," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 18, no. 2, pp. 175-185, 2017.
- [۱۲] B.-g. Mi, H. Zhan, and B.-b. Chen, "New systematic CFD methods to calculate static and single dynamic stability derivatives of aircraft," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, 2017.
- [۱۳] C. A. Mader and J. R. Martins, "Computing stability derivatives and their gradients for aerodynamic shape optimization," *AIAA journal*, vol. 52, no. 11, pp. 2533-2546, 2014.
- [۱۴] X.-L. Wang, "Computational fluid dynamics predictions of stability derivatives for airship," *Journal of Aircraft*, vol. 49, no. 3, pp. 933-940, 2012.
- [۱۵] W. Yuan, A. Wall, and R. Lee, "Simulations of unsteady airwakes behind ships in motion," in *31st congress of the international council of the aeronautical sciences*, 2018.
- [۱۶] J. Olsen, "Compendium of unsteady aerodynamic measurements," *AGARD-R-702*, 1982.
- [۱۷] S. Heathcote, Z. Wang, and I. Gursul, "Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 24, no. 2, pp. 183-199, 2008.
- [۱۸] Fitzpatrick, Anna, Molly Folino, and Andrea Arnold. "Fourier Series-Based Approximation of Time-Varying Parameters in Ordinary Differential Equations." *arXiv preprint arXiv:2101.08872* (2021).
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.08872>
- [۱۹] A. Da Ronch, D. Vallespin, M. Ghoreyshi, and K. J. Badcock, "Evaluation of Dynamic Derivatives Using Computational Fluid Dynamics", *AIAA Journal*, 50:2, 470-484, 2012.