

بهینه سازی شکل بالواره در نزدیکی سطح با استفاده از الگوریتم کوچ پرندگان

محمدحسن جوارشکیان^۱، احمد پارسانیا، علی اسماعیلی

^۱ دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، javarehshkian@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، بهینه سازی بالواره نزدیک سطح براساس الگوریتم PSO^۱ مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا جریان حول بالواره هایی با ضخامت و انحنایی مختلف به ازای زوایای حمله و فواصل متفاوت از سطح زمین حل شده است که از یک روش عددی بر اساس الگوریتم فشار مینا و تکنیک SIMPLE برای حل معادلات ناپرواستوکس بهره گرفته شده و از مدل توربولانسی SA و اسکیم NVD برای طرح های تفاضلی استفاده شده است. برای نشان دادن صحت روند حل عددی، قسمتی از نتایج عددی حاضر با نتایج تجربی منتشر شده مقایسه گردیده، که تطابق خوبی را نشان داده و روند شبیه سازی را تایید می نماید. سپس براساس الگوریتم PSO بهینه سازی انجام گرفته و مقطع بهینه برای بالواره ها ارائه شده است. این مقطع به گونه ای است که در تمام شرایط محیطی دارای ماکزیمم بازده است.

واژه های کلیدی

بالواره، الگوریتم PSO، بهینه سازی، عملکرد آیرودینامیکی.

مقدمه

طراحی مقاطع بالواره های آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی از اهمیت زیادی در صنعت برخوردار می باشند. پره های توربین گاز، بخار و باد، پروانه کشتی، بال هواپیما، وسایل پرنده دریایی و ... نمونه هایی از کاربرد بالواره ها می باشند. بالواره های که در صنعت حمل و نقل بکار می روند، مانند وسایل پرنده اثر سطحی از اهمیت خاصی برخوردارند. وسایل پرنده اثر سطحی که به عنوان چشم انداز حمل و نقل در آینده محسوب می شود، از نیروهای آیرودینامیکی که در اثر نزدیکی بالواره به سطح زمین به وجود می آید، استفاده می کنند. افزایش کارایی آیرودینامیکی، کاهش مصرف انرژی و در نهایت هزینه حمل و نقل از جمله مزایای اصلی این وسایل پرنده است. از این رو بهینه سازی این وسایل پرنده موجب افزایش هرچه بیشتر کارایی و صرفه اقتصادی در این سیستمها خواهد شد. انتخاب یک شکل بهینه برای مقطع آیرودینامیکی این وسایل می تواند باعث افزایش کارایی و بازدهی سیستم، کاهش مصرف انرژی و در نهایت صرفه اقتصادی شود. کارهایی تحقیقاتی مختلفی در زمینه بهینه سازی مقاطع بال در حال انجام است. واگوییز^[۱] بر روی بهینه

سازی مقطع بالواره در سرعت های کم تحقیق کرد. لیفسون و همکاران [۲] و [۳] در سال ۲۰۱۰ بر روی طراحی بالواره جریان گذر صوتی تحقیق کردند. از جمله کارهای دیگر انجام شده در این زمینه می توان به کارهای ژانگ [۴]، کونگیدو [۵] و نامگونگ [۶] اشاره نمود. بررسی شکل بهینه پرنده اثر سطحی توسط کیم و همکاران [۷] انجام شد. کیونگ هو پارک و همکاران [۸] به صورت عددی و دو بعدی به بهینه سازی شکل یک بالواره در نزدیکی سطح زمین پرداختند. آنها با در نظر گرفتن ایرفویل NACA0015 به بهینه سازی شکل آن در نزدیکی سطح زمین پرداختند. همچنین بهینه سازی شکل آن را در حالت سه بعدی در سال ۲۰۱۰ انجام دادند [۹].

در این تحقیق در ابتدا شبیه سازی جریان حول بالواره متقارن در نزدیکی سطح انجام شده و نتایج با داده های تجربی مقایسه شده و سازگاری خوبی را نشان داده است. در ادامه به بررسی اثر خمیدگی و ضخامت بالواره پرداخته شده و از نتایج به دست آمده برای بهینه سازی شکل بالواره و به دست آوردن بهترین خمیدگی، بهترین ضخامت، بهترین زاویه حمله و بهترین ارتفاع از سطح استفاده شده است. بهینه سازی به روش الگوریتم کوچ پرندگان بوده و مبنای بهینه سازی به دست آوردن بیشینه نسبت برآ به پسا می باشد.

معادلات اساسی

به منظور شبیه سازی جریان اطراف بالواره در نزدیکی سطح باید معادلات اساسی حاکم بر میدان جریان حل شود، که شامل معادلات بقا، ممنتوم و انرژی می باشد.

$$\text{div}(r\vec{V}) = S_m \quad (1)$$

$$\text{div}(r\vec{V}\vec{V} - \vec{T}) = \vec{S}_v \quad (2)$$

$$\text{div}(r\vec{V}j - \vec{q}) = \vec{S}_\phi \quad (3)$$

به طوریکه ρ چگالی، \vec{V} سرعت، ϕ متغیر بدون بعد، \vec{T} تنسور تنش و \vec{q} بردار شار پخشی می باشند. تانسور تنش برای سیال نیوتنی تراکم ناپذیر به صورت زیر است:

$$\vec{T} = -PI \quad (4)$$

بر اساس قانون فوریه بردار شار پخشی برابر عبارت زیر می باشد:

$$\vec{q} = \Gamma_\phi \text{grad } \Phi \quad (5)$$

با بکار گیری روش حجم کنترل و انتگرال گیری از معادله (۳) و با تغییر انتگرال حجمی به انتگرال سطحی و استفاده از قضیه دیورژانس، فرم نهایی معادله گسسته شده به صورت زیر در می آید:

$$J_e - J_w + J_n - J_s = S_p \quad (۶)$$

که در آن J شار عبوری از سطوح سلول می باشد که شامل شار جابه جایی و پخشی است. شار پخشی با استفاده از طرح تفاضلی مرکزی گسسته سازی شده است. بدست آوردن شار جابه جایی توجه خاصی را می طلبد و موضوع طرح های تفاضلی مختلف توسعه داده شده است. در این تحقیق برای بدست آوردن شار جابه جایی از اسکیم NVD^2 که یک اسکیم مرتبه بالا است، استفاده شده است. طبق اسکیم NVD برای محاسبه یک متغیر در سطح f یک حجم کنترل و با فرض معلوم بودن مقادیر گره بالادست (U)، پایین دست (D) و مرکزی (C)، (ϕ_C, ϕ_D, ϕ_U) متغیر بی بعد شده با رابطه زیر تعریف می شود:

$$\tilde{\phi}_e = \frac{\phi - \phi_U}{\phi_D - \phi_U} \quad (۷)$$

روشی بر اساس فرمولاسیون متغیر های بی بعد شده تحت عنوان اسبیک (SBIC) [۱۱] ارائه شده است که ترکیبی از درون یابی مرکزی و آمیختن درون یابی مرتبه اول و دوم می باشد. این روش با استفاده از میانه یابی از نقاط P, E و مقدار W مقدار ϕ_e را به صورت زیر تعیین می کند:

$$\phi_e = \phi_W + (\phi_E - \phi_W) \tilde{\phi}_e \quad (۸)$$

$\tilde{\phi}$ بر اساس رابطه ای بدست می آید که با تغییر ضریب آن از صفر تا یک طرح تفاضلی از تفاضل مرکزی به بالادست تغییر می کند.

الگوریتم PSO

الگوریتم PSO یکی از الگوریتم های بسیار پر کاربرد در زمینه بهینه سازی می باشد. در ابتدا این الگوریتم به منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز همزمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر و تغییر شکل بهینه ی دسته آنها به کار گرفته شد. این روش سراسری کمینه سازی است که از آن می توان با مسائلی که جواب آنها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی می باشد، برخورد نمود. در PSO، ذره هایی در فضای جستجو جاری می شوند. تغییر مکان ذره ها در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و ذرات مجاور آنها است. به طوری که موقعیت هر ذره از توده ذرات بر روی چگونگی جستجوی دیگر ذرات اثر می گذارد. در ابتدا یک سرعت ابتدایی به ذرات اختصاص داده شده و ذرات بر اساس این سرعت در فضای پاسخ تغییر مکان می دهند. در هر سیکل حرکتی، هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته، تنظیم می کند. سرعت و مکان جدید هر ذره بر اساس رابطه ۹ و ۱۰ بدست می آید. به طوری که w ضریب وزنی، V سرعت، x مکان، C_1, C_2 ضرایب ثابت، Pb بهترین مکان هر ذره از ابتدای حرکت تا تکرار t ، Gb بهترین مکان در میان کل ذرات و \hat{i} نیز بیانگر هر ذره است.

$$V_{t+1}^i = wV_t^i + C_1(Gb^i - x_t^i) \quad (۹)$$

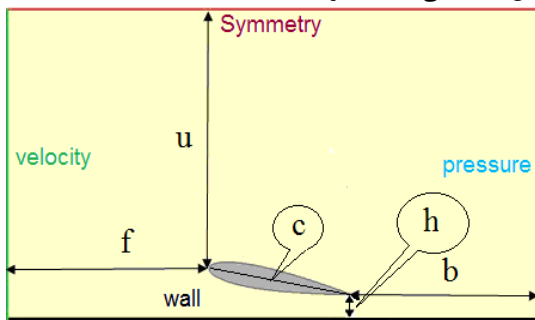
$$+ C_2(Pb^i - x_t^i)$$

$$x_{t+1}^i = V_{t+1}^i + x_t^i \quad (۱۰)$$

بهترین مکان بر مبنای یک ملاک شایستگی تعریف می شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می گیرند. نتیجه ی مدل سازی این رفتار اجتماعی فرایند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی مطلوب میل می کنند.

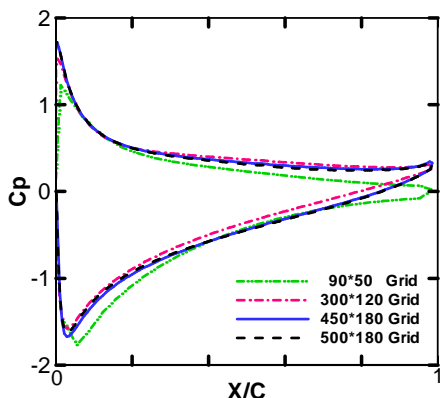
بررسی و تحلیل نتایج

شبکه مورد استفاده در این تحقیق از نوع شبکه جبری H می باشد. شرایط مرزی در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱ میدان محاسباتی به ازای $u=4c, f=2c, b=2c$ و $c, f=4c, b=4c$ و $u=6c$ و $u=8c, f=6c, b=6c$ بر حسب توزیع ضریب فشار حول بالواره بررسی شد و در نهایت حالت دوم به عنوان ابعاد بهینه برای میدان محاسباتی انتخاب گردید.



شکل ۱: میدان حل عددی

به منظور بررسی استقلال از شبکه، به ازای تعداد سلول های مختلف حول بالواره NACA0015 شبیه سازی انجام شده که اثر آن بر توزیع فشار در شکل ۲ نشان داده شده است. در نهایت شبکه با تعداد سلول 450×180 به عنوان یک شبکه مناسب تعیین شده و در حل عددی مورد استفاده قرار گرفت.

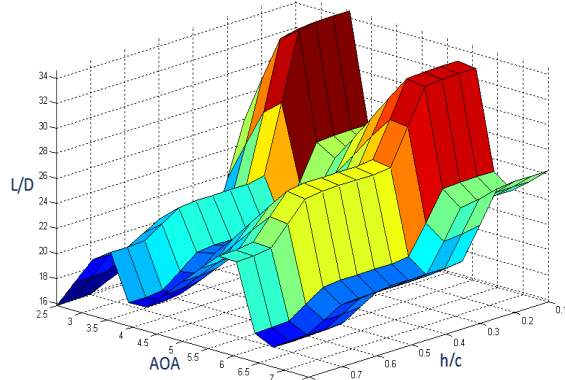


شکل ۲: توزیع فشار روی بالواره NACA0015 در زاویه حمله ۱۰ درجه و $h/C=0.2$ به ازای سلولهای مختلف.

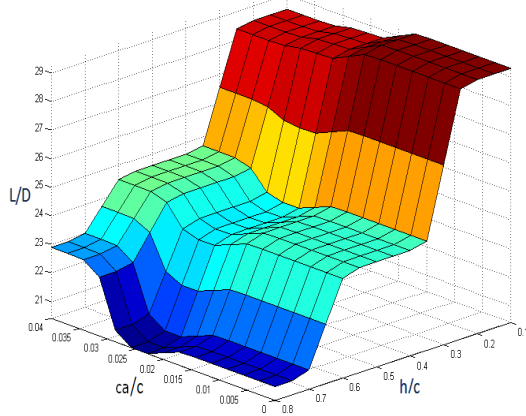
جدول ۱ شرایط شبیه سازی را نشان می‌دهد. خواص فیزیکی جریان با توجه به آزمایش مرجع [۱۲] در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ توزیع ضریب فشار بر روی بالواره NACA0015 برای زاویه حمله ۱۰ درجه و $h/c=0.2$ با داده های تجربی [۱۲] مقایسه شده و سازگاری خوبی را نشان می‌دهد. همچنین ضرایب برا و پسا نتایج حاصله از این حل عددی با نتایج تجربی مقایسه شده که تطابق خوبی را نشان داده است.

جدول ۱: شرایط حل جریان

عدد رینولدز Re	$2/4 \times 10^5$
فشار کارکرد	۱ اتمسفر
شدت آشفتگی جریان آزاد	0.8%
نوع جریان	پایا، دوبعدی T تراکم ناپذیر
مدل آشفتگی	$k - \epsilon$
الگوریتم حل	SIMPLE

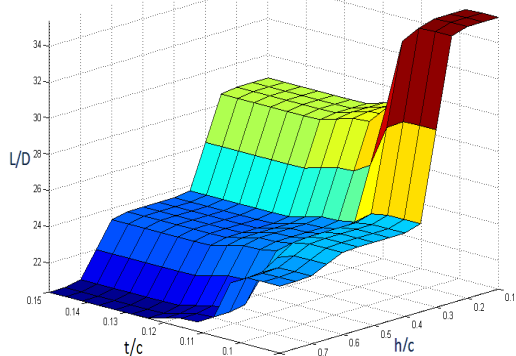


شکل ۴: میانگین نسبت برآ به پسای به دست آمده از شبکه عصبی- فازی بر حسب تغییرات زاویه حمله و فاصله از سطح

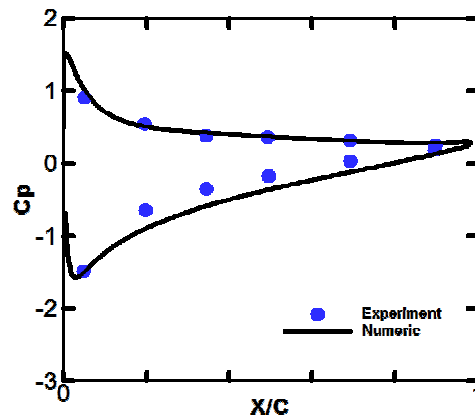


شکل ۵: نسبت برآ به پسای به دست آمده از شبکه عصبی- فازی بر حسب تغییرات خمیدگی و فاصله از سطح

شکل ۶ منحنی تغییرات کلی نسبت برآ به پسای به دست آمده از شبکه عصبی- فازی بر حسب ضخامت و فاصله از سطح را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دید افزایش ضخامت سبب کاهش L/D می‌شود و این رفتار در نزدیکی سطح شدیدتر است.



شکل ۶: نسبت برآ به پسای به دست آمده از شبکه عصبی- فازی بر حسب تغییرات خمیدگی و فاصله از سطح



شکل ۳: توزیع فشار روی بالواره NACA0015 در زاویه حمله ۱۰ درجه و $h/c=0.2$

پس از اطمینان از صحت حل عددی تأثیر خمیدگی و ضخامت بالواره در نزدیکی سطح زمین به ازای زوایای حمله مختلف و فواصل مختلف از سطح مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در قسمتهای قبل ذکر شد، به منظور بررسی تأثیر ضخامت (t/c)، بالواره های NACA0009، NACA0012، NACA0015 در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی اثر خمیدگی (Ca/c) نیز بالواره های NACA4415، NACA2415، NACA0015 انتخاب شده است. یکی از پارامترهای مؤثر بر روند طراحی وسایل پرنده نسبت برآ به پسا است. افزایش این نسبت باعث افزایش کارایی وسیله پرنده می‌گردد. زیرا در این حالت به ازای یک مقدار ثابت نیروی برآ، نیروی رانش کاهش یافته و در نتیجه مصرف سوخت کاهش پیدا می‌کند که موجب بهره اقتصادی بیشتری می‌شود. از این رو در این تحقیق به عنوان معیار بهینه سازی در نظر گرفته شده است. به منظور بهینه سازی از روش الگوریتم کوچ پرندهگان استفاده شده است. شکل ۴ منحنی تغییرات کلی نسبت برآ به پسا بر حسب زاویه حمله (AOA) و فاصله از سطح (h/c) را نشان می‌دهد. روند کلی به صورت افزایش ضریب برآ به پسا با افزایش زاویه حمله و

مقطع برای بالواره های اثر سطحی می باشد و بیشترین نسبت برا به پسا را تولید می کند.

مراجع

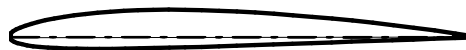
- [1] Wauquier, C., 2000. "Shape Optimization of Low Speed Airfoils using Matlab and Automatic Differentiation". *Licentiate's Thesis in Department of Numerical Analysis and Computing Science*, Stockholm.
- [2] Leifsson, L., and Koziel, S., 2010. "Multi-Fidelity Design Optimization of Transonic Airfoils Using Shape-Preserving Response Prediction". *Procedia Computer Science*, Vol. 1, pp. 1311–1320.
- [3] Leifsson, L., and Koziel, S., 2010. "Multi-fidelity design optimization of transonic airfoils using physics-based surrogate modeling and shape-preserving response prediction". *Journal of Computational Science*, Vol. 1, pp. 98–106.
- [4] Zhang, Y., Huang, D. J., SUN, X., and WU, G., 2010. "Exploration in Optimal Design of an Airfoil with a Leading Edge Rotating Cylinder". *Journal of Thermal Science*. Vol. 19, No. 4.
- [5] Congedo, P. M., Corre, C., and Martinez, J. M., 2010. "Shape Optimization of an Airfoil in a BZT Flow with Multiple-Source Uncertainties". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Doi:10.1016/j.cma.2010.08.006.
- [6] Namgoong, H., 2005. "Airfoil Optimization for Morphing Aircraft". *Phd thesis in Purdu university*, Indiana.
- [7] Kim, H. J., Chun, H. H., and Jung, K. H., 2008. "Aeronumeric optimal design of a wing-in-ground-effect craft". *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 14, n. 1, pp. 39-50.
- [8] Lee, J., Hong, C. H., Kim, B. S., Park, K., and Jong, K. A., 2010. "Optimization of Wings in Ground Effect Using Multi- Objective Genetic Algorithm". *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Florida.
- [9] Park K., Kim, B. S., Lee, J., and Kim K. S., 2009. "Aerodynamics and Optimization of Airfoil Under Ground Effect". *Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology*, Vol. 40, ISSN: 2070-3740.
- [10] Guskell, P. H., and Lau, A. K., 1988. "Curvature-Compensated Convective Transport: Smart, A New Boundedness-Preserving Transport Algorithm". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 8, n. 6, pp. 617–641.
- [11] Djavarehshkian, M. H., 2004. "Pressure-Based Compressible Calculation Method Utilizing Normalized Variable Diagram Scheme". *Iranian Journal of Science & Technology*, Vol. 28, n. B4.
- [12] Ahmed, M. R., Ali, S. H., Imran, G. M., and Sharma, S. D., 2003. "Experimental Investigation of the Flow Field of a Symmetrical Airfoil in Ground Effect". *In 21st Applied Aerodynamics Conference*, Orlando, Florida.

با توجه به نتایج ارائه شده، بهینه سازی انجام شده است. در ابتدا به ازای هر مقطع بالواره، نسبت L/D به صورت یک تابع بر حسب زاویه حمله (AOA) و فاصله از سطح زمین (h/c) به روش شبکه عصبی- فازی به دست آمده و در نهایت بهینه سازی بر حسب $L/D=f(t,ca,h/c,AOA)$ صورت گرفته است. با توجه به داده‌های موجود در جدول حالت بهینه به صورت زیر به دست آمده است.

جدول ۲: حالت بهینه بالواره

نسبت L/D	خمیدگی (t/c)	ضخامت (Ca/c)	فاصله از سطح h/c	زاویه حمله AOA (درجه)
40.6	0.02	0.09	0.2	5.5

شکل مربوط به این بالواره دارای سطح مقطع NACA2409 بوده و به ازای زاویه حمله 5.5° و $h/c=0.2$ ماکزیمم نسبت برا به پسا را تولید می کند و به عنوان بهینه ترین حالت پیشنهاد می شود. روش PSO مقدار بیشینه نسبت برا به پسا را در این حالت برابر 40.6 پیش بینی نموده است.



NACA 2409

شکل ۷: مقطع بهینه بالواره نزدیک سطح

به منظور بررسی صحت پیش بینی انجام شده توسط الگوریتم PSO، شبیه سازی جریان حول بالواره مذکور در زاویه حمله و فاصله به دست آمده انجام شد و نسبت $L/D=46$ به دست آمد که خطای حاصل برابر مقدار زیر است.

$$Error = \left| \frac{L/D(CFD) - L/D(PSO)}{L/D(CFD)} \right| = 1.1\%$$

این مقدار خطا قابل قبول بوده و می توان بیان کرد که روش مورد استفاده برای بهینه سازی مناسب و نتایج آن مورد اعتماد است. خطای به دست آمده ناشی از عواملی نظیر میانه یابی شبکه عصبی- فازی و نوع معادله حاکم بر آن، متغیرهای الگوریتم PSO و خطاهای عددی می باشد. لذا در پایان برای وسایل پرنده اثر سطحی مقطع NACA2409 پیشنهاد می شود که در صورت استفاده ماکزیمم بازده را فراهم می کند.

نتیجه گیری و جمع بندی

با توجه به نیاز روزافزون به استفاده از وسایلی که در تمامی شرایط ماکزیمم بازدهی را داشته باشد، لازم است که بهینه ترین حالت مشخص شود. با توجه به اهمیت وسایل پرنده اثر سطحی و تاثیر عملکرد بر نحوه کاربرد آنها، بهینه ترین مقطع ارائه شده است. در پایان نیز نشان داده شده که مقطع NACA 2409 بهینه ترین