چهارمین کنفرانس سراسری
دانش و فناوری
مهندسی مکانیک و برق ایران
www.dmeconf.ir

معرفی یک بستر نرم‌افزاری متن‌باز بهینه‌سازی و کاربرد آن برای بهبود ضریب پسای یک ایرفویل با الگوریتم شبه مدل–محور کریجینگ

سعید حسنی[1]، آرمان محسنی[2]*

۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۵۳۵۷۱-۱۶۵۸۹، ar_mohseni@sbu.ac.ir

چکیده

کاربرد روزافزون روش‌های بهینه‌سازی در مسائل مهندسی نیاز به توسعه نرم‌افزارهای تخصصی در این زمینه را به همراه داشته است. تنوع روش‌های بهینه‌سازی و ابزار محاسباتی مورد استفاده در آنها باعث شده نرم‌افزارهای متن‌باز، که امکان دسترسی کاربر به همه مراحل محاسبه را فراهم می‌آورد، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار شوند. نرم‌افزارهای متن‌باز به سادگی با یکدیگر قابل ترکیب بوده و امکان کنترل روند محاسبات به منظور پردازش موازی را فراهم می‌آورند. در این پژوهش به معرفی یک بستر نرم‌افزاری یکپارچه به منظور بهینه‌سازی مسائل مهندسی پرداخته می‌شود. این بستر، که تحت محیط متن‌باز لینوکس و زبان برنامه‌نویسی شِل کار می‌کند، دارای قالبی است که تمامی مولفه‌های یک حلقه بهینه‌سازی خودکار را به صورت منسجم در بر دارد. این بستر حاوی نرم‌افزارهای متن‌بازی همچون «داکوتا» که جعبه‌ابزاری کامل شامل الگوریتم‌های بهینه‌سازی، آنالیز حساسیت و غیره است، «اُپن‌فوم» برای شبکه‌بندی و شبیه‌سازی عددی و «اُپن‌اِسکد» به منظور طراحی هندسی و مدل‌سازی می‌باشد. این بستر کاربر را محدود به استفاده از نرم‌افزار خاصی نمی‌کند و از هرگونه نرم‌افزار یا برنامه نوشته‌شده به زبان‌های برنامه‌نویسی مختلف همچون C یا C++، فُرترن، پایتون و مَتلب حمایت می‌کند. کاربرد این بستر برای بهینه‌سازی یک مقطع بال ناکا ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی

بهینه‌سازی، نرم‌افزار متن‌باز، داکوتا، اُپن‌فوم، اُپن‌اِسکد، شبیه‌سازی عددی

۱- مقدمه

شبیه‌سازی از دیرباز یکی از روش‌های موثر در تحلیل سیستم‌های پیچیده و با متغیرهای زیاد بوده است. از دهه ۳۰ هجری شمسی با در دسترس قرار گرفتن کامپیوتر و ارتقای قابلیت‌های آن، استفاده از شبیه‌سازی تقریبا در همه زمینه‌های تخصصی شامل فنی و مهندسی، پزشکی، اقتصادی، اجتماعی و غیره وارد شده است. در حوزه مهندسی مکانیک، دینامیک سیالات محاسباتی[1] در کنار روش‌های تئوری و تجربی در تجزیه و تحلیل مسائل دینامیک سیالات و انتقال حرارت، پیشرفتهای بسیار زیادی را در سی سال اخیر داشته است، به نحوی که حلگرهای معادله‌های حاکم بر جریان، به سطح بالا و با ارزشی از توانمندی و قابلیت اطمینان دست یافته‌اند. به طور مشابه

[1] Computational Fluid Dynamics (CFD)

روش المان محدود[1] برای تحلیل مقاومت سازه توسعه یافته است. این روش‌ها اطلاعات دقیقی درباره‌ی جریان‌های سه‌بعدی سیال ارائه می‌دهند و یک جایگزین مناسب برای اندازه‌گیری دقیق جریان محسوب می‌شوند. امروزه پدیده‌های پیچیده جریان سیال در بستری که آزمایشگاه عددی[2] نامیده می‌شود مورد مطالعه قرار می‌گیرد. گرچه این روند مزایای بسیاری همچون کاهش قابل توجه تعداد آزمون‌های تجربی یا آزمایشگاهی دارد، ولی دارای محدودیت‌هایی است که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به وابستگی دقت محاسبات به عوامل مختلف و زمان‌بر بودن مدلسازی اشاره کرد. خروجی حل معادلات عددی و معادلات حاکم، شامل تمامی اطلاعات مورد نظر برای بهبود عملکرد سیستم‌هاست. اما این محاسبات معمولا به صورت صریح مشخص نمی‌کند که چه نوع تغییرات و راهکارهایی لازم است تا بتوان به طرح بهینه دست یافت [۱].

از ترکیب دو رویکرد *بهینه‌سازی* به‌منظور بدست آوردن عملکرد بهینه سیستم و *شبیه‌سازی* به منظور تحلیل اثر تغییر در ورودی‌های سیستم، روش‌هایی تحت عنوان روش‌های بهینه‌سازی شبیه‌سازی [۳،۲] ارائه شده‌اند که با بهره‌گیری از مزایای هر دو رویکرد، روشی جدید و کارا در حل مسائل واقعی را ارائه می‌دهند.

با مروری در پیشینه پژوهش روش‌های بهینه‌سازی [۴-۶] می‌توان گفت که تمامی این الگوریتم‌ها شامل مرحله جستجو هستند تا بدین طریق تشخیص دهند که آیا به نقطه بهینه نزدیک یا از آن دور می‌شوند و بر طبق این اطلاعات، مسیری را طی کنند که منجر به تعیین نقطه بهینه شود. این الگوریتم‌ها برمبنای روش جستجو و نحوه‌ی میل کردن به جواب بهینه، قابل تقسیم بندی به دو دسته گرادیانی و غیر گرادیانی می‌باشند.

۲- بهینه‌سازی شبیه‌سازی در محیط متن‌باز

اگرچه در دهه اخیر استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در حل مسائل شبیه‌سازی با استقبال روزافزون مواجه بوده است، اما باید به خاطر داشت که همانند هر روش دیگری، این رویکرد نیز با محدودیتهایی روبروست که در زیر به برخی از این موارد اشاره می‌شود [۹]:

۱) شبیه‌سازی کامپیوتری اغلب به لحاظ زمانی و محاسباتی پرهزینه است.
۲) ترکیب و برقراری ارتباط میان نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی اغلب با مشکلاتی همراه است.
۳) نرم‌افزارهای شبیه‌سازی اغلب نسبت به نرم‌افزارهای بهینه‌سازی، بسیار گران‌تر هستند.

در خصوص مورد نخست، روش‌های متعددی توسط پژوهشگران حوزه بهینه‌سازی و شبیه‌سازی ارائه شده که مهمترین آن‌ها استفاده از الگوریتم‌های شبه‌مدل محور یا فرامدل[3] ست [۶-۸]. این‌گونه روش‌ها که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند، تلاش می‌کنند تا با جایگزینی اجرای شبیه‌سازی واقعی با توابع جایگزین از میزان محاسبات مورد نیاز در حل مسائل بکاهند. ایده دیگر برای کاهش هزینه و زمان محاسباتی، استفاده از روش‌های نوین در پردازش موازی است. نمونه‌ای از این الگوریتم‌ها در غالب پردازش موازی درکار پیرت و همکارانش [۹] به چشم می‌خورد که به بهینه‌سازی هندسه ایرفویل پرداخته‌اند.

[1] Finite Element Analysis (FEA)
[2] Numerical Laboratories
[3] Meta Model

در خصوص مورد دوم، امروزه اغلب نرم افزارهای تخصصی شبیه‌سازی با ابزارهای بهینه‌سازی مجهز شده‌اند که یکی از معروفترین آن‌ها اَنسیس[1] می‌باشد.

در این میان هنوز مورد سوم یعنی گران بودن نرم‌افزارهای شبیه‌سازی همچنان به عنوان یکی از موانع مهم بهینه سازی شبیه سازی محسوب می شود. در حال حاضر بسیاری از الگوریتم‌های شبه مدل محور و برنامه‌های توسعه‌یافته توسط کاربران با زبان‌های برنامه‌نویسی مختلف توسط نرم‌افزارهای شبیه سازی موجود پوشش داده نمی‌شوند. بنابراین استفاده از نرم‌افزارهای موجود در محیط متن باز که امکان دسترسی به همه جزییات محاسبات را فراهم می‌آورد، می‌تواند به عنوان یک گزینه بسیار خوب برای بهینه‌سازی شبیه‌سازی تلقی شود.

۳- معرفی نرم‌افزارهای متن باز

۳-۱ -نرم افزار داکوتا

داکوتا[2] یک بسته نرم‌افزاری همه منظوره می‌باشد که در آن الگوریتم‌های بسیاری همچون بررسی پارامترها،[3] طراحی آزمایش،[4] ارزیابی عدم قطعیت،[5] بهینه‌سازی و کالیبراسیون[6] پوشش داده شده است. این نرم‌افزار توسط آزمایشگاه ملی سَندیا[7] منتشر شده و حمایت می‌شود [۱۰]. مزیت اصلی داکوتا در فراهم آوردن یک ارتباط نسبتا ساده میان داکوتا و برنامه شبیه‌ساز در یک حلقه محاسباتی با قابلیت تکرار حلقه به شکل‌های مختلف می‌باشد. درواقع با اعمال تغییرات جزئی در تنظیمات ورودی داکوتا، روش‌ها و استراتژی‌های مختلف با ماهیت تکرارشوندگی قابل پیاده‌سازی و اجرا هستند. همچنین داکوتا تنظیمات بسیار گسترده‌ای را جهت پردازش موازی و اجرای همزمان شبیه‌سازی در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

۳-۲ -نرم افزار اُپن‌فوم

اُپن‌فوم[8] کامل‌ترین نرم‌افزار متن باز موجود در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی محسوب می‌شود. این نرم‌افزار امکان حل گستره‌ی وسیعی از پدیده‌های فیزیکی همچون جریانهای تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر، جریان دوفاز، جریان در محیط متخلخل و همچنین مسائل دینامیک گاز، توربوماشین و غیره را داراست. توانمندی اپن‌فوم در استفاده‌ی هوشمندانه از توانایی‌های زبان برنامه نویسی شی‌گرای[9] C++ نهفته است. این برنامه متن باز با بهره‌گیری از قابلیت شی‌گرایی زبان برنامه نویسی C++ ، ساختار منظمی از کلاس‌ها، کتابخانه‌ها و به طور کلی اشیا را فراهم نموده است که استفاده و اختصاصی سازی آن را برای حل هر مساله خاص امکان‌پذیر می‌سازد. به خصوص در مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده‌ی جریان سیال که نیاز به حجم زیاد برنامه‌نویسی دارد، اپن‌فوم با ارائه امکان دسترسی

[1] ANSYS, http://www.ansys.com
[2] Dakota (Design and Analysis Toolkit for Optimization and Terascale Applications), https://dakota.sandia.gov
[3] Parameter Study
[4] Design of Experiment
[5] Uncertainly Quantification
[6] Calibration
[7] Sandia National Labs., U.S.A., http://www.sandia.gov
[8] OpenFOAM, https://openfoam.org
[9] Object-Oriented

به برنامه‌های خود، سبب شده تا کاربری این نرم‌افزار به ویژه در بین محققین گسترش یابد و نسخه‌های جدید آن با سرعت بیشتری منتشر شوند [۱۲،۱۱].

از مزیت‌های دیگر این برنامه، پیوند نزدیک و قابلیت آن در مرتبط شـــدن با ســـایر برنامه‌های پیش‌پردازش و پس‌پردازش ا ست. این ویژگی که یکی از قابلیت‌های نرم‌افزارهای متن باز محسوب می شود در بهینه سازی مقطع بال ناکا سری چهار[1]که در انتهای کار حاضر بررسی گردیده است، مشاهده می‌شود.

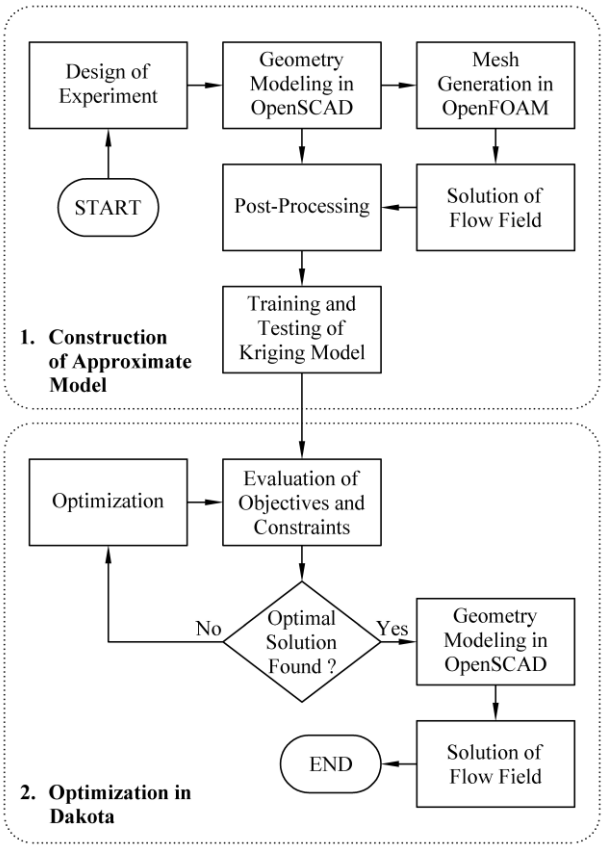
۳-۳ -نرم‌افزار اپن اُسکد

نرم‌افزار متن‌باز اُپن‌اسکد[2] نرم‌افزاری رایگان است که برای ایجاد اشکال سه‌بعدی به کار می‌رود. این نرم‌افزار یک تفاوت اساسی با نرم‌افزارهای موجود در طراحی به کمک کامپیوتر[3]که به صورت تجاری ارائه می‌شوند، دارد. این تفاوت در این است که اپن‌اسکد شبیه به یک نرم‌افزار مترجم برای اشکال هندسی سه‌بعدی عمل می‌کند، به صورتی که دستورهای رسم شکل هندسی مورد نظر در یک پرونده متنی که قالب بسیار ساده‌ای دارد را به صورت مدل سه بُعدی و گرافیکی ارائه می‌دهد. با این روش اپن‌اسکد به کاربر این اجازه را می‌دهد تا کنترل کاملی روی فرآیندهای طراحی داشته باشد و به آسانی با تغییرات ساده در فایل متنی، هندسه مورد نظر را که به صورت پارامتری تعریف شده تغییر دهد. علاوه بر اُپن‌اسکد، نرم‌افزار بلاک‌مش[4](جزیی از اُپن‌فوم) و نرم‌افزارهای سالومه[5] و جی‌مش[6] برای طراحی و شبکه‌بندی دامنه حل موجود هستند، که به آسانی در داخل زنجیره‌ی بهینه‌سازی قرار می‌گیرند.

۴- پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی با داکوتا، اُپن‌فوم و اُپن اسکد

پس از معرفی ساختار کلی و نرم‌افزارهای مورد استفاده در محیط متن باز، به بهینه‌سازی هندسه مقطع بال ناکا سری چهار پرداخته می‌شود. ایرفویل اولیه برای بهینه‌سازی، ناکا ۸۴۱۲ می‌باشد. سه پارامتر اصلی در دسته ایرفویل‌های چهار رقمی ناکا به صورت NACAabcd مقادیر بیشترین ضریب انحنا، a، محل بیشترین ضریب انحنا، b، و مقدار ضخامت حداکثر ایرفویل، cd، است. با فرض ثابت نگه داشتن مقدار زاویه حمله و ضخامت حداکثر ایرفویل، دو پارامتر انحنا و محل بیشترین مقدار انحنای ایرفویل به عنوان متغیرهای طراحی در این بهینه‌سازی درنظر گرفته شده‌اند. معادله بهینه‌سازی یافتن ترکیبی از این دو متغیر است که مقدار ضریب پسا را حداقل کند. طرح‌واره کلی روند بهینه‌سازی در شکل ۱ ترسیم شده است.

[1] NACA 4digit, http://www.airfoiltools.com/airfoil/naca4digit
[2] OpenSCAD, http://www.openscad.org
[3] Computer-Aided Design (CAD)
[4] blockMesh
[5] Salome, http://www.salome-platform.org/
[6] Gmesh, http://www.geuz.org/gmsh/



شکل ۱ طرح‌واره کلی الگوریتم شبه مدل محور کریجینگ

در مرحله اول مجموعه‌ای از هندسه‌های مختلف بر اساس روش طراحی آزمایش[1] که بر اساس الگوریتم ریاضی جفت شده با روش کریجینگ[2] عمل می‌کند، تولید می‌شود. سپس برای تمامی هندسه‌های ایجاد شده تولید شبکه محاسباتی و شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی انجام می شود تا پایگاه داده‌ای متشکل از متغیرها و توابع هدف بوجود آید. در مرحله دوم به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، از روش درونیابی کریجینگ برای افزایش تعداد داده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی واقعی، استفاده می‌شود. سرانجام داده‌های تولید شده با استفاده از این الگوریتم در یک حلقه‌ی محاسباتی با الگوریتم ژنتیک، جهت بهینه‌سازی هندسه ایرفویل ناکا به کار می‌رود. در تحقیق حاضر نوع حلگر مورد نظر در شبیه‌سازی عددی سیمپل‌فوم[3] و نوع جریان تراکم ناپذیر و پایا در نظر گرفته شده است.

۵- نتایج بهینه‌سازی ایرفویل

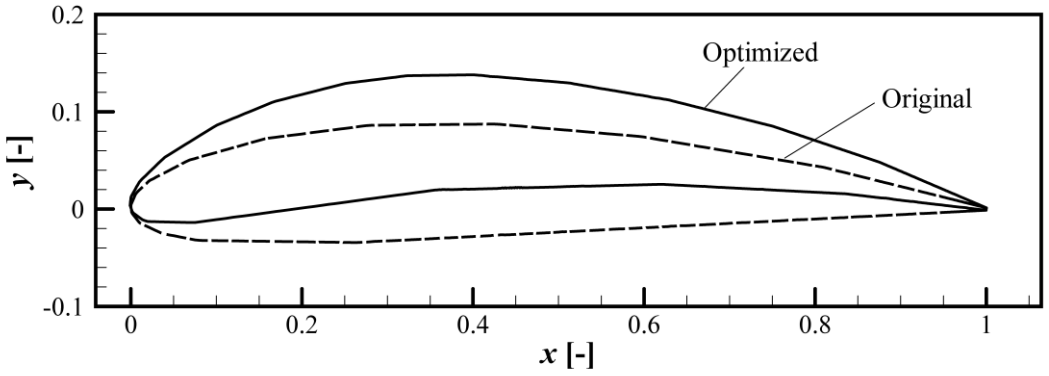
تابع هدف مساله حاضر یعنی مقدار ضریب پسای ایرفویل، در جدول ۱ برای ایرفویل اصلی و ایرفویل بهینه شده مشخص شده است. مقایسه دو ایرفویل که در شکل ۲ ترسیم شده، نشان می‌دهد که ایرفویل اصلی برای کاهش

[1] Design of Experiment
[2] Kriging Method
[3] SimpleFOAM

مقدار نیروی پسا، به سمت تقارن بیشتر تغییر یافته است. توزیع فشار اطراف هندسه بهینه شده در شکل ۳ نشان می‌دهد که فشار در جلوی ایرفویل کاهش یافته و این امر موجب بازیافت بهتر انرژی در عبور از ایرفویل شده است. در واقع افزایش اندازه حرکت و انرژی جنبشی سیال در بالای ایرفویل، موجب غلبه بر گرادیان فشار معکوس و تاخیر در جدایش جریان گردیده است. در نتیجه میزان ضریب پسای ایرفویل که مقادیر آن در جدول ۱ مشخص است به میزان ۴۳٪ کاهش یافته است.

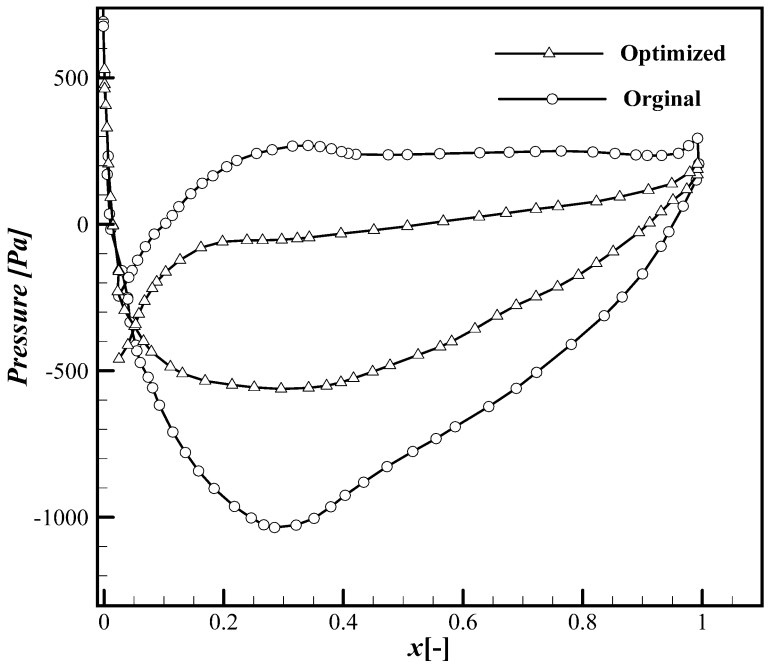
جدول ۱ مقایسه مقادیر ضریب پسای هندسه اصلی و بهینه شده

نوع ایرفویل	ضریب پسا
اصلی	۰,۰۰۷۲۶
بهینه شده	۰,۰۰۴۱۳
درصد بهینه سازی	٪ ۴۳,۰۱

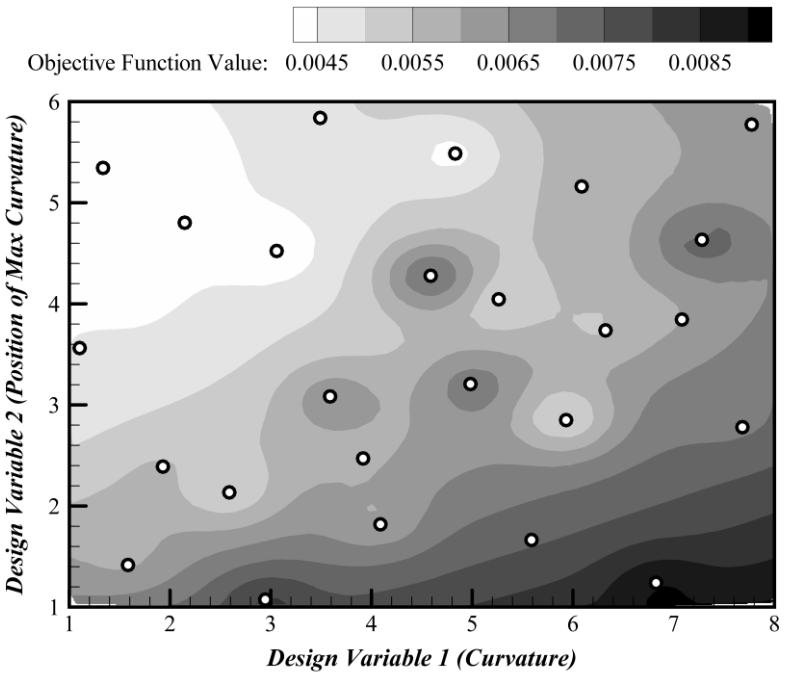


شکل ۲ مقایسه ایرفویل‌های اصلی و بهینه شده

شکل ۴ نحوه توزیع متغیرهای ورودی تو سط روش طراحی آزمایش را با توزیع نقاط ن شان می‌دهد. این نحوه پراکندگی که بر اساس روش ریاضی ابرمکعب لاتین شکل گرفته به گونه‌ای است که تمام فضای طراحی به صورت نسبی پر شود و هماهنگی منا سبی با روش درونیاب کریجینگ دا شته با شد. پس از تولید این داده‌های ورودی و توابع حاصل از شبیه‌سازی، الگوریتم کریجینگ معادلات همبستگی بین آن‌ها را تخمین زده و با چندبار اصلاح و پالایش، معادلات برازش شده را استخراج می‌کند.



شکل ۳ مقایسه توزیع فشار حول ایرفویل‌های اصلی و بهینه شده



شکل ۴ ساختار شبیه مدل محور (درونیاب کریجینگ) بر اساس مقادیر متغیرها و تابع هدف ضریب پسا

مراجع

[1] D. Thevenin and G. Janiga, Optimization and Computational Fluid Dynamics, Springer, ISBN: 9783540721536, 2008.
[2] F. Azadivar, A Tutorial on Simulation Optimization, Proceedings of the 24th Conference on Winter Simulation, New York, USA, doi:10.1145/167293.167332, pp. 198–204, 1992.
[3] S. Amaran, V. N. Sahinidis, B. Sharda, and S. Bury, Simulation Optimization: A Review of Algorithms and Applications, Annals of Operations Research, Vol. 12, No. 4, pp. 301–333, doi: 10.1007/s10288-014-0275-2, 2014.
[4] S. Obayashi and T. Tsukahara, Comparison of Optimization Algorithms for Aerodynamic Shape Design, AIAA, Vol. 35, No. 8, pp. 1413–1415, 1997.
[5] D. Sasaki, S. Obayashi, and H. J. Kim, Evolutionary Algorithm vs. Adjoint Method Applied to SST Shape Optimization. In Proceedings of the Annual Conference of CFD Society of Canada. Computational Fluid Dynamics Society of Canada, 2001.
[6] R. R. Barton, Simulation Optimization Using Metamodels, IEEE, doi: 10.1109/WSC.2009.5429328, pp. 230–238, 2004.
[7] T. Mengistu and W. Ghaly, Aerodynamic Optimization of Turbomachinery Blades Using Evolutionary Methods and ANN-Based Surrogate Models, Optimization and Engineering, doi:10.1007/s11081-007-9031-1, 2008.
[8] D. Pasquale, G. Persico, and S. Rebay, Optimization of Turbomachinery Flow Surfaces Applying a CFD-Based Throughflow Method, ASME, Vol. 136, No. 3, doi:10.1115/ 1.4024694, 2013.
[9] S. Pierret, R. Coelho, and H. Kato, Multidisciplinary and Multiple Operating Points Shape Optimization of Three-Dimensional Compressor Blades, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 33, No. 1, pp. 61–70, doi:10.1007/s00158-006-0033-y, 2006.
[10] B. M. Adams, L. E. Bauman, W. J. Bohnhoff et al., DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis, User's Manual, Version 5.4, Sandia Technical Report SAND2013-2183, 2013.
[11] OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox, User Guide, http://www.openfoam.org/docs, 2015.
[12] OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox, Programmer's Guide, http://www.openfoam.org/docs, 2015.