



بهینه‌سازی ایرفویل ضخیم برای قسمت میانی پره توربین باد

محمدحسن جوارشکیان^۱، امیر لطیفی^۲

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

در این تحقیق جریان حول یک مقطع آیرودینامیکی از پره توربین باد توسط یک روش عددی آنالیز و شکل بهینه مقطع بالواره توسط الگوریتم ژنتیک با استفاده از بهینه‌سازی تکاملی استخراج شده است. در این روند شبیه‌سازی از روش حجم محدود، الگوریتم فشارمینا و حل‌کننده ضمنی برای حل دستگاه معادلات گسسته شده استفاده شده است. برای مدل‌سازی جریان لزج آشفته از مدل کی-اِپسیلون ریلایزابل (Realizable k-epsilon) بهره گرفته شده است. عدد رینولدز در این شبیه‌سازی $Re = 3 \times 10^6$ در نظر گرفته شده و محاسبات در زاویه حمله صفر انجام گردیده است. بالواره مینا برای بهینه‌سازی FX77-W-343 است. شکل بالواره توسط توابع هیکز-هن (Hicks-Henne) تولید شده تا سطحی صاف و هموار برای بالواره بدست بیاید. پس از بهینه‌سازی نتایج شبیه‌سازی عددی بهبود ضرایب آیرودینامیکی را تایید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: بالواره ضخیم-بهینه‌سازی تکاملی-توربین باد

۱- دانشیار گروه مکانیک

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا ۰۹۳۹۷۲۰۲۳۲۴ a.latifi.b@gmail.com

بهینه‌سازی ایرفویل ضخیم برای قسمت میانی پره توربین باد

محمدحسن جوارشکیان¹ امیر لطیفی²

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

چکیده

بیشتری نسبت به بخش بیرونی آن دارند. به منظور تضمین استحکام و سختی ساختاری مورد نیاز، بالواره‌ها در پایه پره توربین باد، مقاومت، ضخامت و سطح مقطع بسیار زیادی دارند. در این دیدگاه بالواره‌های پشت صاف برای بهبود خواص سازه‌ای مفیدند.

از نظر آیرودینامیکی مهم‌ترین پارامتر برای طراحی بالواره در ناحیه خارجی پره توربین باد راندمان آیرودینامیکی (L/D) است [5]. برای بدست آوردن راندمان بالای توربین باد، بایستی راندمان آیرودینامیکی تا جای ممکن زیاد باشد، اما هم زمان ملاحظات دیگر هم باید در نظر گرفته شوند.

برای مقطع پره ضریب برآ به خودی خود مهم است بعلاوه رفتار استال (stall) بسیار حائز اهمیت است. دلیل این امر این است که در شرایط کاری عادی، زاویه حمله محلی می‌تواند کاملاً بالا باشد. مقادیر خوب ضریب لیفت بیشینه $C_{l,max}$ و مشخصات استال می‌توانند به حفظ کارایی آیرودینامیکی بالا کمک کرده و از مشکلات سازه‌ای پره جلوگیری کنند.

از ملاحظات دیگر می‌توان به وجود باد های شدید و ناگهانی اشاره کرد. زاویه حمله محلی می‌تواند به مقدار زیادی افزایش یابد، بنا بر این، به منظور جلوگیری از شرایطی که بالواره در شرایط استال و یا خارج از ناحیه استال کار کند و موجب مشکلات خستگی شود، باید یک حاشیه ایمن، بین زاویه حمله و زاویه استال ایجاد کرد.

همچنین توربین‌ها باید در شرایط آلوده نیز به خوبی کارآمد باشند. این بدین معناست که بالواره نیاز دارد که نسبت به زبری غیر حساس باشد.

برای بخش خارجی پره ارتباط میان کارایی آیرودینامیکی و پاسخ ساختاری پره به عنوان مثال پیچش یک عنصر حیاتی حین طراحی است. برای بخش داخلی این رابطه با اولویت کمتر اما بایستی همچنان در نظر گرفته شود. بحث کامل راجع به شرایط مورد نیاز برای بالواره‌های توربین‌های بادی در مرجع [5] آورده شده است.

با توجه به اینکه بهینه‌سازی مقطع آیرودینامیکی نقش مهمی در بالا بردن راندمان توربین‌های بادی دارد، هدف از این تحقیق بهینه‌سازی بالواره FX77-W-343 به منظور استفاده در ناحیه میانی و داخلی پره توربین باد است بنابراین از FX77-W-343 به عنوان بالواره مبنا استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد کارایی آیرودینامیکی یک پارامتر مهم در طراحی است و به همین دلیل در این تحقیق کارایی آیرودینامیکی به عنوان تابع هدف فرض گردیده است.

فرمول‌ها و روابط

در این تحقیق جریان حول یک مقطع آیرودینامیکی از پره توربین باد توسط یک روش عددی آنالیز و شکل بهینه مقطع بالواره توسط الگوریتم ژنتیک با استفاده از بهینه‌سازی تکاملی استخراج شده است. در این روند شبیه‌سازی از روش حجم محدود، الگوریتم فشارمبنا و حل‌کننده ضمنی برای حل دستگاه معادلات گسسته شده استفاده شده است. برای مدل سازی جریان لزج آشفته از مدل کی-پسیلون ریلایزابل ($k-\epsilon$ Realizable) epsilon بهره گرفته شده است. عدد رینولدز در این شبیه‌سازی $Re = 3 \times 10^6$ در نظر گرفته شده و محاسبات در زاویه حمله صفر انجام گردیده است. بالواره مبنا برای بهینه‌سازی FX77-W-343 است. شکل بالواره توسط توابع هیکز-هن (Hicks-Henne) تولید شده تا سطحی صاف و هموار برای بالواره بدست بیاید. پس از بهینه‌سازی نتایج شبیه‌سازی عددی بهبود ضرایب آیرودینامیکی را تایید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: بالواره ضخیم بهینه‌سازی تکاملی-توربین باد

مقدمه

طراحی بالواره‌های مناسب به طور خاص برای کاربردهای توربین بادی و توسعه این صنعت از اهمیت زیادی برخوردار است. به خاطر نیازهای آیرودینامیکی خاص در نقطه طرح، توانایی به کار در خارج از نقطه طرح و ویژگی‌های سازه‌ای، توسعه بالواره‌های جدیدی که به توربین‌های بادی اختصاص داده می‌شوند رو به افزایش است [1]، [2]، [3] و [4]. با این حال، بسیاری از این بالواره‌ها برای بخش خارجی تیغه توربین باد که در آن الزامات آیرودینامیکی اولویت بیشتری نسبت به الزامات سازه‌ای دارند طراحی شده‌اند.

تیمر (Timmer)، هورنر (Hoerner)، ون دام (van Dam)، مایدا (Mayda) و چاوو (Chao) تحقیقات قابل توجهی بر روی بالواره‌های ضخیم انجام داده‌اند. هورنر و ون دام به طور خاص به بررسی پتانسیل‌های خاص داشتن ضخامت لبه انتهایی نسبتاً بزرگ به اصطلاح بدون نوک (blunt) یا پشت تخت (flat-back) به منظور بهبود عملکرد بالواره در شرایط تولید برآ پرداخته‌اند. هر دو نویسنده نیز راهی برای تولید بالواره‌های ضخیم نشان دادند، با برش بخشی از لبه انتهایی بر اساس روش هورنر یا با افزایش یکنواخت ضخامت انتهایی بالواره بر اساس روش بالواره‌های جدیدی را ایجاد نمودند به عنوان مثال هندسه بالواره خانواده FX77-W-XXX با استفاده از روش هورنر طراحی شده است. از نظر عددی این نوع هندسه‌ها به خاطر ویژگی‌های ذاتی خود و نبود داده‌های تجربی که حل‌های عددی را تایید کند چالش برانگیز هستند.

ویژگی‌های این بالواره‌ها به گونه ایست که قادر به تأمین نیازهای آیرودینامیکی و سازه‌ای باشند. نیازهای سازه‌ای بخش میانی پره اولویت

1- دانشیار گروه مکانیک

2- دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا 09397202324 a.latifi.b@gmail.com

α_1	-0.017	0.027
α_2	-0.017	0.027
α_3	-0.017	0.027
α_4	-0.017	0.027
α_5	-0.017	0.027
α_6	-0.017	0.027
α_7	-0.0085	0.027
α_8	-0.00017	0.027

فرآیند طراحی

مراحل انجام عملیات بهینه‌سازی بدین صورت است که در هر بار تکرار ابتدا، پارامترهای طراحی جدید توسط الگوریتم ژنتیک تولید می‌شوند، این پارامترهای طراحی که همان ضرایب شکل در تابع هیگز-هن هستند توسط این توابع مورد استفاده قرار می‌گیرند تا شکل بدیعی را ایجاد نمایند سپس شبکه مناسب بر روی این هندسه ایجاد شده و در نرم افزارهای تحلیل آیرودینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد و ضرایب آیرودینامیکی مربوطه بدست می‌آیند، این کار بارها تکرار می‌شود تا بهترین شکل که هدف خواسته شده را تأمین می‌کند پیدا شود. فلوجارت مراحل بهینه سازی در شکل 2 آمده است.

همان طور که در مقدمه ذکر شد، هورنر و ون دام راهی را برای تولید بالواره های ضخیم به اصطلاح بدون لبه پیشنهاد دادند. اگر چه که در هر دو روش نمی‌توان آن را به عنوان روش طراحی مورد استفاده قرار داد، به این معنا که مشخصات بالواره نهایی را نمی‌توان به طور کامل کنترل کرد و این مشخصات کاملاً مستقل از شکل اولیه آن هستند. روش کار هورنر به این صورت بود که پس از طراحی بالواره‌ای که ضرایب آیرودینامیکی مناسبی داشت قسمتی از انتهای آن را قطع می‌کرد و به این ترتیب دیگر ایرفویل نهایی خصوصیات ایرفویل طراحی شده را نداشت [6]. روش ون دام به این صورت بود که پس از طراحی بالواره که خواسته‌های مورد نظر را تأمین می‌کرد، با افزایش یکنواخت ضخامت در لبه انتهایی، بالواره با لبه فرار ضخیم ایجاد می‌کرد که در این روش نیز دیگر بالواره نهایی خصوصیات بالواره طراحی شده را ندارد [6].

در روش‌های تکاملی، ضرایب آیرودینامیکی بالواره طراحی شده در هر مرحله از فرآیند بهینه‌سازی بدست می‌آید و در نتیجه خصوصیات آیرودینامیکی بالواره‌ای که در نهایت به عنوان بالواره بهینه معرفی می‌شود کاملاً قابل کنترل است و دقیقاً همان ضرایب آیرودینامیکی مورد نظر را از خود نشان می‌دهد. در کار حاضر طراحی بالواره بر مبنای بهینه سازی تکاملی برای داشتن بیشترین نسبت ضریب برآ به ضریب پسا انجام شده است. عدد رینولدز جریان 3000000 است و محاسبات برای زاویه حمله صفر انجام شده است. در این مطالعه، جریان لزج فرض شده شبیه سازی جریان با استفاده از مدل توربولانسی کی- ϵ پسیلون ریلایزابل انجام شده است.

برای انجام محاسبات از شبکه سازمان یافته استفاده شده است. این شبکه به همراه شرایط مرزی آن در شکل 3 آورده شده است. جزییات شبکه در نزدیک بالواره در شکل 4 قابل مشاهده است. به علت شکل خاص بالواره شبکه مناسب در همگرایی جریان اهمیت بالایی دارد. با بررسی شبکه های مختلف و مقایسه نتایج حل جریان با نتایج تجربی شبکه مناسب تعیین شده است. استقلال از شبکه و بررسی اثر اندازه‌های مختلف شبکه در همگرایی و مقایسه ضریب فشار بالواره مینا برای شبکه های مختلف

معادلات حاکم بر جریان که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند معادلات شامل پیوستگی و ممنتوم می‌باشند که در روابط (1) و (2) آورده شده‌اند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

این معادلات پس از گسسته سازی توسط الگوریتم سیمپل حل شده و توزیع متغیرهای جریان روی مقطع آیرودینامیکی بدست آمده است. برای اینکه بتوان یک شکل هموار برای سطح بالواره بدست آورد روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از این روش‌ها استفاده از توابع اصلاح شده هیگز-هن است که در این تحقیق نیز از این توابع استفاده شده است. برای استفاده از توابع هیگز-هن احتیاج به محاسبه ضریب شکل است که از روابط (3) تا (5) بدست می‌آید.

$$f_k(x) = \sin(\pi(1-x)^{e(k)}), \quad k=1,2 \quad (3)$$

$$f_k(x) = \sin^3(\pi x^{e(k)}), \quad k=3,4,5 \quad (4)$$

$$f_k(x) = \sin(\pi x^{e(k)}), \quad k=6,7,8 \quad (5)$$

در روابط فوق f ضریب شکل است. k شماره نقطه کنترل است و e از روابط (6) و (7) بدست می‌آید.

$$e(k) = \ln 0.5 / \ln(1 - x_k), \quad k=1,2 \quad (6)$$

$$e(k) = \ln 0.5 / \ln(x_k), \quad k=3,4,5,6,7,8 \quad (7)$$

که x_k طول نقاط کنترلند. x_k های استفاده شده در این تحقیق در جدول 1 آورده شده است. لازم به توضیح است که در کل به 16 نقطه کنترلی نیاز است که 8 نقطه کنترلی مربوط به سطح بالا و 8 نقطه کنترلی در سطح پایین است. که در اینجا نقاط کنترلی روی سطوح بالا و پایین یکسان در نظر گرفته شده است. در این تحقیق از 16 متغیر طراحی استفاده شده است که 8 متغیر در سطح بالا و 8 متغیر دیگر در سطح پایین شکل بالواره را ایجاد می‌کنند.

جدول 1- طول نقاط کنترل

x_1/c	x_2/c	x_3/c	x_4/c	x_5/c	x_6/c	x_7/c	x_8/c
0.08	0.15	0.20	0.30	0.45	0.60	0.75	0.92

نمودار هشت تابع هیگز-هن در شکل 1 آمده است که ضخامت پرتوربیشنی همگی آن‌ها 1 است و x متناظر با بیشترین مقدار y مرکز پرتوربیشن می‌باشد این مراکز پرتوربیشنی در واقع همان نقاط کنترلی می‌باشند.

در نهایت برای ایجاد شکل جدید از رابطه (8) استفاده می‌شود.

$$y_{new} = y_{base} + \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i \quad (8)$$

در این رابطه α_i متغیرهای طراحی هستند که توسط الگوریتم ژنتیک تولید می‌شوند. y_{base} مختصات بالواره مینا است و y_{new} مختصات بالواره جدید می‌باشد.

نکته دیگری که در اینجا لازم به ذکر است این که برای متغیرهای طراحی حد بالا و پایین در نظر گرفته شده است. این حدود نیز برای 8 متغیر بالا و 8 متغیر پایین یکسان در نظر گرفته شده است که اطلاعات آن در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2- کران بالا و پایین متغیرهای طراحی

کران بالا	کران پایین	پارامتر طراحی
-----------	------------	---------------

α_5	0.011747143	α_{13}	-0.00288019
α_6	0.026746468	α_{14}	-0.01235929
α_7	0.014614936	α_{15}	-0.00733865
α_8	0.025900634	α_{16}	0.002932182

شکل بالواره بهینه شده و بالواره مبنا برای مقایسه در شکل 6 آورده شد و قابل مشاهده است.

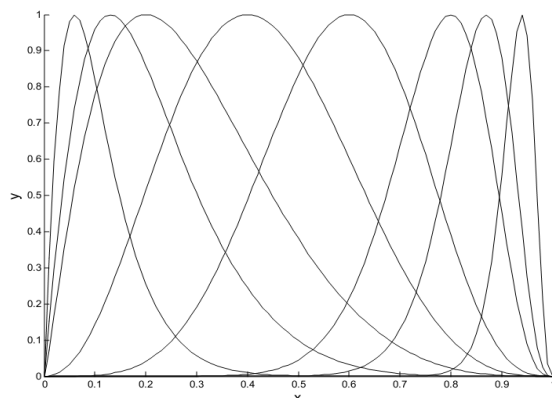
نتیجه‌گیری

نتیجه مدل سازی عددی بالواره مبنا در جدول 3 آورده شده و با مقادیر تجربی مقایسه شده است که با توجه به ضخیم بودن بالواره در لبه فرار، تطابق قابل قبولی از خود نشان می‌دهد. همچنین با توجه به جدول 4 که در آن ضرایب آیرودینامیکی بالواره مبنا و بالواره بهینه، آورده و مقایسه شده است نتیجه می‌شود که بازده آیرودینامیکی بالواره بهینه نسبت به بالواره مبنا 40 درصد بهبود داشته است.

پیشنهاد برای کارهای آینده

این تحقیق کاربردی بودن استفاده از بهینه‌سازی تکاملی در مسایل مهندسی و به خصوص آیرودینامیک را نشان می‌دهد و می‌توان از آن در رژیم‌های جریان‌های دیگر و جریان‌های سه بعدی استفاده کرد.

شکل‌ها و نمودارها



شکل ۱- نمودار هشت ضریب شکل تابع هیکز-هن

صورت گرفته است که در نهایت بهترین شبکه تعیین شده است. نتیجه این بررسی در شکل 5 نشان داده شده است. مقایسه نتایج این شبیه سازی با داده های تجربی [6] تطابق خوبی را نشان می‌دهد و مبین صحت

انجام شبیه سازی‌های عددی انجام شده می‌باشد. نتایج مقایسه شبیه سازی عددی و تجربی در جدول 3 آورده شده است.

جدول 3- مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با داده تجربی برای بالواره FX77-W-343

	cl	cd
داده تجربی	0.5	0.014
نتایج عددی	0.457	0.028

طرح بهینه سازی

در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است. استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، وقت گیر بوده ولی با توجه به غیر خطی بودن مسایل آیرودینامیکی کاملاً به روش‌های مشتق پایه ارجحیت دارند چرا که بر خلاف روش‌های مشتق مبنا به مینیمم‌های محلی حساس نیستند.

نتایج

با انجام بهینه‌سازی در نهایت به الوارهای بدست آمده است که بازده آیرودینامیکی آن نسبت به بالواره مبنا بیشتر است. مقادیر ضرایب آیرودینامیکی بالواره مبنا و بالواره بهینه شده در جدول 4 آورده شده است.

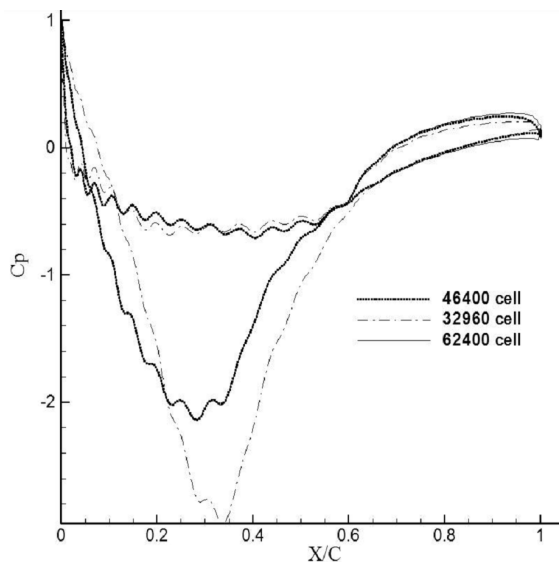
جدول 4- مقایسه نتایج شبیه سازی عددی بالواره FX77-W-343 و بالواره بهینه

	cl	cd	cl/cd
بالواره مبنا (عددی)	0.457	0.028	16.32
بالواره بهینه	0.676	0.0294	22.97

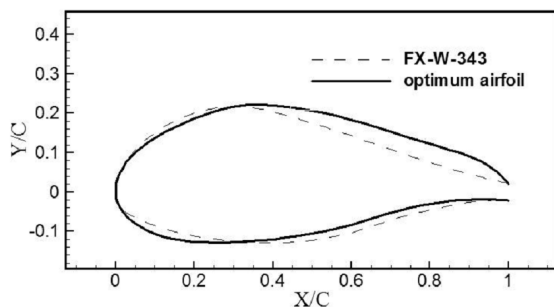
مقادیر پارامترهای طراحی که توسط الگوریتم ژنتیک پیدا شده و شکل بالواره بهینه را ایجاد می‌کند در جدول 5 آمده است.

جدول 5- مقادیر پارامترهای طراحی بدست آمده مربوط به بالواره بهینه

α_1	0.003417877	α_9	0.00341431
α_2	-0.00804819	α_{10}	0.017519054
α_3	-0.01248228	α_{11}	0.006020508
α_4	-0.01203912	α_{12}	-0.00446978



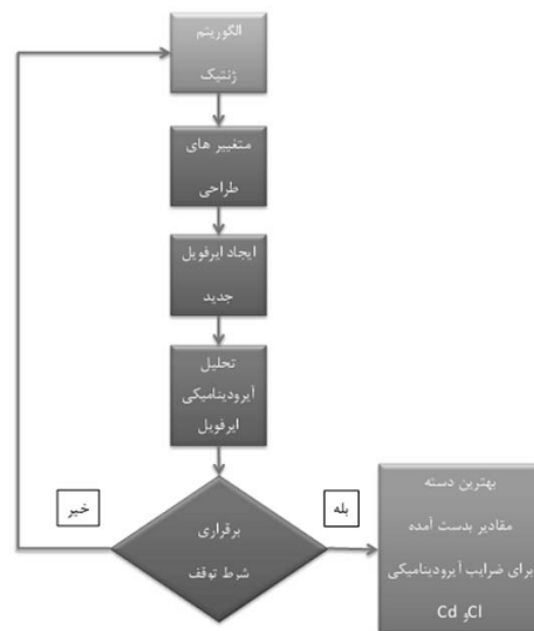
شکل 5- مقایسه ضریب فشار بالواره FX77-W-343 با شبکه های با اندازه های مختلف



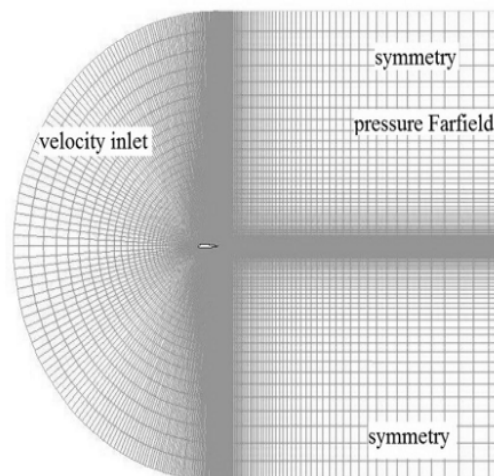
شکل 6- شکل ایرفویل بهینه و ایرفویل مبنا

مراجع

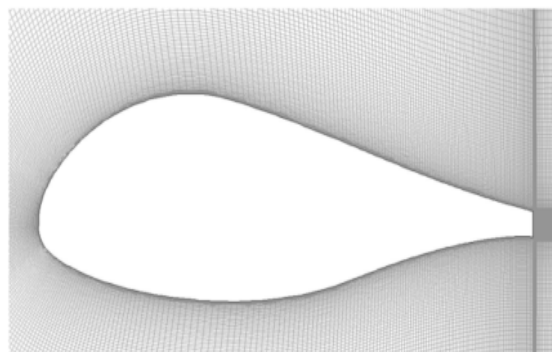
1. Tangler, J.L. and D.M. Somers. *NREL airfoil families for HAWT's*. in *Proc. WINDPOWER'95*. 1995.
2. Bjork, A. *Coordinates and Calculations for the FFA-W1-xxx, FFA-W2-xxx and FFA-W3-xxx Series of Airfoils for Horizontal Axis Wind Turbines*. 1990. stockholm, Sweden.
3. Fuglsang, P. and C. Bak, *Design and Verification of the new Risø-A1 Airfoil Family for Wind Turbines*. AIAA-2001-0028.
4. W Timmer and R. Rooij, *Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils*. AIAA Paper -0352, 2003.
5. Grasso, F., *Usage of Numerical Optimization in Wind Turbine Airfoil Design*. JOURNAL OF AIRCRAFT, 2011. VOL. 48.
6. Grasso, F., *Hybrid Optimization for Wind Turbine Thick Airfoils*. AIAA Journal, 2012.



شکل 2-فلوچارت مراحل انجام فرآیند بهینه سازی



شکل 3- شبکه، شرایط مرزی و دامنه حل استفاده شده در فرآیند شبیه سازی عددی



شکل 4- جزئیات شبکه نزدیک بالواره FX77-W-343