



بهینه‌سازی نسبت سرعت جریان القایی به توان الکتریکی مصرفی در محرک پلاسمایی DBD به کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک

محمد صادق دالوند¹، غلامحسین پوریوسفی²، مسعود ابراهیمی^{3*}

1- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانش‌آموخته‌ی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 16765-3381، ebrahimikm@modares.ac.ir، تهران

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 شهریور 1396

پذیرش: 02 آبان 1396

ارائه در سایت: 27 آبان 1396

کلید واژگان:

محرک پلاسمایی DBD

سرعت جریان القایی

توان الکتریکی مصرفی

شبکه‌ی عصبی مصنوعی

الگوریتم ژنتیک

چکیده

محرک‌های پلاسمایی DBD، یکی از ابزارهای نوین کنترل فعال جریان هستند که در دهه‌ی گذشته توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. عملکرد این محرک زمانی بهینه است که بیشترین سرعت ممکن را به ازای واحد توان مصرفی، القا کند. از آنجا که سرعت جریان القایی و همچنین توان مصرفی تابع متغیرهای گوناگونی هستند، یافتن ترکیبی که منجر به بهترین عملکرد محرک می‌شود، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی عملکرد محرک‌های پلاسمایی DBD، ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایش رویکرد عاملی کامل، اثر متغیرهای الکتریکی (ولتاژ و فرکانس حامل) و متغیرهای هندسی (فاصله‌ی بین الکترودها، ضخامت دی‌الکتریک و پهنای الکترود پوشیده) بر سرعت جریان القایی و توان الکتریکی مصرفی در حالت تحریک پایا به طور جامع مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، یک مدل برای نسبت سرعت جریان القایی به توان مصرفی ارائه شده و اعتبار این مدل به صورت آماری و تجربی صحت‌گذاری شده است. نتایج حاکی از ضریب تشخیص بالای 95 درصد برای داده‌های آموزش و داده‌های آزمایش‌ها است. در پایان، مدل جایگزین ایجاد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده و مقدار بهینه‌ی متغیرهای الکتریکی و هندسی تعیین شده است. برای سنجش اعتبار، جواب بدست آمده، محرکی بر مبنای متغیرهای بهینه ساخته شده و نسبت سرعت به توان مصرفی آن برابر شده است. 29.71 m/s/kW/m اندازه‌گیری شده است. اختلاف حدود 3 درصدی این مقدار با مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل، بیانگر دقت بالای مدل و درستی روش ارائه شده است.

Optimization of the ratio of induced flow velocity to electrical power consumption in the DBD plasma actuator using artificial neural network and genetic algorithm

Mohammad Sadegh Dalvand¹, Gholam Hosein Pouryoussefi², Masoud Ebrahimi^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Aerospace Engineering, Kaje Nasiraldin Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16765-3381 Tehran, Iran, ebrahimikm@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 06 September 2017

Accepted 24 October 2017

Available Online 18 November 2017

Keywords:

DBD Plasma Actuator

Induced Flow Velocity

Electric Power Consumption

Artificial Neural Network

Genetic Algorithm

ABSTRACT

Dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators are one of the new devices for active flow control, which has received substantial attention during the last decade. The performance of the actuator is optimum when it induces the highest velocity per unit of power consumption. Since the induced velocity and the power consumption of the actuator depend on many different variables, finding the optimal set, which results in the best performance, is of immense importance. In this paper, in order to optimize the performance of these actuators, at first, by using full factorial design of experiments the effect of electrical variables (including voltage and frequency) and geometrical variables (including the gap between electrodes, dielectric thickness, and covered electrode width) on induced flow velocity and power consumption in steady actuation is experimentally investigated. Then, by using the multi-layer perceptron neural network, a model is created for the ratio of induced velocity to power consumption. The model is validated both statistically and experimentally. The results indicate that the coefficient of determination for training and test data is higher than 95 percent. Finally, the surrogate model is optimized by genetic algorithm and the optimal value of electrical and geometrical variables is determined. In order to validate the result, an actuator is designed based on the optimal set of variables and its ratio of velocity to power is measured to be 29.71 m/s/kW/m . The difference of 3 percent between the measured and the predicted value demonstrates high accuracy and correctness of the proposed model and method.

Please cite this article using:

M. S. Dalvand, Gh. H. Pouryoussefi, M. Ebrahimi, Optimization of the ratio of induced flow velocity to electrical power consumption in the DBD plasma actuator using artificial neural network and genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 323-332, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

توانایی کنترل و ایجاد تغییر دلخواه در یک میدان جریان، در صنایعی که با جریان‌های داخلی و خارجی سروکار دارند از نظر تکنولوژی اهمیت بسزایی دارد و بدون شک بیش از هر موضوع دیگری در مکانیک سیالات دنبال می‌شود. استفاده از سیستم‌های کنترل جریان کارآمد می‌تواند سالیانه هزینه‌ی سوخت وسایل نقلیه‌ی زمینی، هوایی و دریایی را میلیاردها دلار کاهش دهد. اهداف کنترل جریان عبارتند از جلوگیری یا تشدید جدایش جریان، به تأخیر یا جلو انداختن گذار جریان آرام به آشسته، و تضعیف یا تقویت آشفتگی. روش‌های کنترل جریان براساس مصرف انرژی به دو دسته‌ی غیرفعال و فعال تقسیم می‌شوند. روش‌های غیرفعال نیازمند مصرف انرژی نیستند اما کاربرد این روش‌ها منحصر به شرایط به خصوصی است و برای مثال با تغییر عدد رینولدز یا زاویه‌ی حمله کارایی خود را از دست می‌دهند. از طرف دیگر، روش‌های فعال اگر چه نیازمند مصرف انرژی هستند اما قابل کنترل بوده و می‌توان به طور دلخواه آن‌ها را خاموش و یا روشن کرد. قابل کنترل بودن روش‌های فعال باعث انعطاف بیشتر آنها نسبت به روش‌های غیرفعال می‌شود. این ویژگی باعث توجه هرچه بیشتر پژوهشگران به روش‌های فعال شده است [1].

یکی از پرکاربردترین روش‌های کنترل فعال جریان استفاده از محرک‌های پلاسمایی DBD است. این محرک‌ها از دو الکترود و یک لایه‌ی عایق دی‌الکتریک که بین آن دو الکترود قرار می‌گیرد، تشکیل شده‌اند. با اعمال اختلاف پتانسیل قوی بین دو الکترود، ابتدا هوای بالای الکترود پوشیده یونیزه و در ادامه یک باد یونی در راستای الکترود پوشیده تشکیل می‌شود. ذرات باردار و شتابدار این باد یونی به ذرات خنثای هوای اطراف برخورد کرده و به آنها مومنتم منتقل می‌کنند و در نهایت باعث کشیده شدن هوا به سمت الکترود پوشیده می‌شوند. به عبارت دیگر، با روشن شدن محرک یک نیروی جمعی به هوای اطراف وارد می‌شود و هوا را موازی با الکترود پوشیده و در طول آن شتابدار می‌کند. این نیرو مکانیزم مورد استفاده در کنترل فعال جریان است [2,3]. در شکل 1 طرح‌واره‌ی این محرک‌ها نشان داده شده است.

در سال‌های گذشته پژوهش‌های فراوانی بر روی محرک‌های پلاسمایی صورت گرفته است. این پژوهش‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. در پژوهش‌های دسته‌ی اول، کارایی محرک‌های پلاسمایی به عنوان یک ابزار کنترل جریان در کاربردهای مختلف آیرودینامیکی بررسی می‌شود. اکثر پژوهش‌های انجام شده مربوط به این دسته است. جولیبوس و همکاران [4] در سال 2008 با قرار دادن چند محرک پلاسمایی بر روی ایرفویل NACA 0015 نشان دادند در هر زاویه‌ی حمله، با روشن کردن نزدیک‌ترین محرک به نقطه‌ی جدایش جریان، می‌توان از وقوع آن جلوگیری کرد. ژانگ و همکاران [5] در سال 2009 با جایگزین کردن برآفزی گرنی¹ ایرفویل NACA 0012 با محرک پلاسمایی، برآفزی گرنی پلاسمایی را ابداع کردند و نشان دادند این نوع برآفزا علاوه بر اینکه مانند برآفزی گرنی مکانیکی باعث افزایش نیروی برآ می‌شود، مشکل افزایش نیروی پسای آن را نیز برطرف می‌کند. جیوکسو همکاران [6] در سال 2012 نشان دادند که با قرار دادن متوالی دسته‌ای از محرک‌های پلاسمایی به صورت متقارن و غیرمتقارن، به ترتیب می‌توان گردابه‌هایی ناهمسوگرد و همسوگرد ایجاد کرد. همچنین نشان دادند با نصب این مولدهای گردابه‌ی پلاسمایی² بر روی ایرفویل

NACA 4418 نسبت نیروی برآ به پسا به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. گرینبلات و همکاران [7] در سال 2014 به بررسی کنترل واماندگی دینامیکی در توربین‌های باد محور عمودی پرداختند و نشان دادند با نصب محرک پلاسمایی در لبه‌ی حمله‌ی پره‌ها می‌توان توان تولیدی را تا 38 درصد افزایش داد. پوریوسفی و همکاران [8] در سال 2016 به بررسی کنترل جریان هوای اطراف ایرفویل یخ‌زده NACA 23012 پرداختند و نشان دادند که با نصب یک محرک پلاسمایی در بالادست توده‌ی یخ، زاویه‌ی استال به تأخیر می‌افتد و نسبت نیروی برآ به پسا افزایش می‌یابد.

در پژوهش‌های دسته‌ی دوم، تأثیر شاخص‌های هندسی و الکتریکی بر رفتار محرک‌های پلاسمایی در هوای ساکن بررسی می‌شود. هدف از انجام این پژوهش‌ها بهبود عملکرد محرک‌های پلاسمایی از طریق بهینه کردن سرعت جریان القایی و کمینه کردن توان الکتریکی مصرفی است. برای افزایش سرعت، آرایش خطوط میدان الکتریکی و گردادیان آن باید به گونه‌ای تغییر یابد که یون‌ها با بالاترین سرعت ممکن شتابدار شوند و در نتیجه بیشترین مومنتم ممکن را به هوای اطراف انتقال دهند [9]. برای کاهش توان مصرفی می‌بایست با کمینه کردن اتلافاتی مانند گرمایش دی‌الکتریک و جلوگیری از ورود به رژیم رگه‌ای³ تخلیه‌ی پلاسمای، توان الکتریکی ورودی را تا آنجا که ممکن است به توان مکانیکی جریان القایی تبدیل کرد. همان‌طور که در مراجع [9,10] نشان داده شده است، با افزایش شارژ الکتریکی محرک بیش از یک مقدار مشخص، تخلیه‌ی پلاسمای از حالت یکنواخت به حالت رگه‌ای تبدیل می‌شود. در رژیم رگه‌ای تخلیه‌ی پلاسمای بر خلاف رژیم یکنواخت، افزایش توان مصرفی منجر به کاهش سرعت جریان القایی می‌شود و کارایی محرک به شدت کاهش می‌یابد.

متغیرهای مختلفی بر عملکرد محرک‌های پلاسمایی مؤثر هستند از جمله متغیرهای الکتریکی (مانند ولتاژ، فرکانس و شکل موج)، متغیرهای هندسی (همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است مانند پهنای الکترودها، ضخامت دی‌الکتریک و فاصله‌ی بین الکترودها)، متغیرهای ساختاری (مانند جنس دی‌الکتریک) و متغیرهای محیطی (مانند فشار، دما و رطوبت نسبی محیط). پژوهش‌های مختلفی برای شناسایی اثر این متغیرها بر رفتار محرک‌های پلاسمایی انجام شده است. انول و همکاران [11] در سال 2004 به بررسی اثر ولتاژ و پهنای الکترود پوشیده بر روی سرعت جریان القایی پرداختند. در این پژوهش رژیم رگه‌ای تخلیه‌ی پلاسمای و اثر متغیرها بر توان مصرفی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین از روش طراحی آزمایش⁴ مشخصی استفاده نشده است. طراحی آزمایش، روشی اصولی برای بررسی همزمان اثر متغیرهای مؤثر بر یک فرایند است و بنابر آن در هر آزمایش متغیرها با توجه به یک قاعده‌ی مشخص تغییر داده می‌شوند [12].

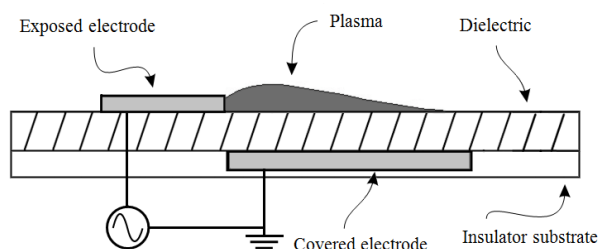


Fig. 1 Schematic side-view of DBD plasma actuator

شکل 1 طرح‌واره‌ی نمای جانبی محرک پلاسمایی DBD

³ Filamentary

⁴ Design of experiments

¹ Gurney flap

² Plasma vortex generators

انگشت‌شمار است و از این بین، اکثر پژوهش‌ها به بررسی و بهینه‌سازی محرک در یک کاربرد خاص کنترل جریان (پژوهش‌های دسته‌ی اول) پرداخته‌اند نه عملکرد خود محرک به تنهایی. ماتسوانو و همکاران [15] در سال 2013 به بررسی کنترل جریان اطراف یک نیم‌استوانه به کمک محرک پلاسمایی پرداختند. هدف آن‌ها از این پژوهش کمینه کردن ضریب پسی نیم‌استوانه بود. آن‌ها با قرار دادن دو محرک در پایین دست نیم‌استوانه، با یک رویکرد عاملی، اثر فرکانس تحریک و سیکل کاری را بر ضریب درگ بررسی کردند و سایر متغیرها را ثابت در نظر گرفتند. در ادامه از روش کرایگینگ⁵ برای مدل‌سازی نتایج و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مدل استفاده کردند. بنا بر نتایج این پژوهش، بیشترین کاهش ضریب پسا در مقادیر بالای فرکانس تحریک و سیکل کاری اتفاق می‌افتد. همین گروه [16] در سال 2015 به بررسی کنترل جریان اطراف یک استوانه‌ی دایره‌ای به کمک محرک پلاسمایی پرداختند. هدف آن‌ها از این پژوهش بیشینه کردن ضریب برای استوانه بود. برای این منظور با قرار دادن دو محرک به صورت متقارن در بالادست استوانه، با یک رویکرد عاملی، اثر متغیرهای فرکانس تحریک، سیکل کاری محرک اول، سیکل کاری محرک دوم و اختلاف فاز بین دو محرک را بر ضریب برا بررسی کردند و سایر متغیرها را ثابت در نظر گرفتند. روش‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی مورد استفاده، مانند پژوهش قبل بود. نتایج مختلفی از این پژوهش بدست آمده است، برای نمونه نشان داده شده است که با کاهش فرکانس تحریک و افزایش سیکل کاری محرک بالا، ضریب برا افزایش می‌یابد. سولیمان و همکاران [17] در سال 2013 به بررسی کنترل جریان اطراف یک ایرفویل NACA 0015 به کمک محرک پلاسمایی پرداختند. هدف این پژوهش بیشینه کردن ضریب برای ایرفویل و کمینه کردن توان مصرفی محرک بود. آن‌ها محرک را در لبه‌ی حمله‌ی ایرفویل قرار دادند و با یک رویکرد عاملی، اثر ولتاژ، فرکانس حامل، فرکانس تحریک و سیکل کاری را بر ضریب برا و توان مصرفی بررسی کردند. در ادامه به کمک الگوریتم ژنتیک چند هدفه، جبهه‌ی پرتوی⁶ ضریب برا بر حسب توان مصرفی بدست آمده است. در این پژوهش از هیچ مدل جانشینی استفاده نشده است و برای ارزیابی جمعیت حاصل از هر مرحله‌ی الگوریتم ژنتیک، اعضای جدید جمعیت دوباره در تونل باد بررسی شده‌اند. وانتایل و همکاران [18] در سال 2014 پژوهش قبل را با جایگزین کردن دو متغیر و افزودن سه تابع هدف جدید تکرار کردند. در این پژوهش آن‌ها اثر متغیرهای فرکانس تحریک، سیکل کاری، مکان قرار دادن محرک و پارامتر مقیاس پلاسمای⁷ (عددی بدون بعد که برابر است با نسبت نیروی الکتریکی به نیروی اینرسی سیال) را بر ضریب برا، ضریب پسا، توان مصرفی، انحراف معیار ضریب برا و انحراف معیار ضریب پسا بررسی کردند. بنارد و همکاران [19] در سال 2016 به بررسی کنترل جریان پشت یک پله‌ی وارون به کمک محرک پلاسمایی پرداختند. هدف آن‌ها از این پژوهش کاهش طول ناحیه‌ی جدایش و افزایش ضریب نوسانات فشار دیواره بود. آن‌ها محرک را در لبه‌ی پله قرار دادند و اثر ولتاژ، فرکانس تحریک و سیکل کاری را بر طول ناحیه‌ی جدایش و ضریب نوسانات فشار دیواره بررسی کردند. در این پژوهش برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک چند هدفه استفاده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی پژوهش‌های بالا (که همگی مربوط به پژوهش‌های دسته‌ی اول هستند) متغیرهای هندسی محرک و در اکثر موارد متغیرهای الکتریکی تحریک پایا، ثابت در نظر گرفته شده است. در

راث [9] در سال 2006 اثر ولتاژ، فرکانس، پهنای الکتروود پوشیده، فاصله‌ی بین دو الکتروود و جنس دی‌الکتریک را بر سرعت جریان القایی و توان مصرفی مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش تنها در موارد محدودی رژیم رگه‌ای تخلیه‌ی پلاسمای بررسی شده است و از روش طراحی آزمایش مشخصی استفاده نشده است. فورت و همکاران [13] در سال 2007 اثر ولتاژ و فرکانس را بر سرعت جریان القایی و توان مصرفی و اثر پهنای الکتروود پوشیده، فاصله‌ی بین دو الکتروود و ضخامت دی‌الکتریک را بر سرعت جریان القایی بررسی کردند.

در این پژوهش رژیم رگه‌ای تخلیه‌ی پلاسمای و اثر همه‌ی متغیرها بر توان مصرفی مورد بررسی قرار نگرفته است. ویژگی این پژوهش استفاده از روش یک عامل در هر زمان¹ است. ورسایلس و همکاران [14] در سال 2010 به بررسی اثر دما و فشار محیط بر سرعت جریان القایی پرداختند. در این پژوهش نیز از روش طراحی آزمایش مشخصی استفاده نشده است. همچنین رژیم رگه‌ای تخلیه‌ی پلاسمای و اثر این دو متغیر بر توان مصرفی بررسی نشده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این پژوهش‌ها یا اصلاً از یک روش طراحی آزمایش مشخص استفاده نشده و یا در بهترین حالت از رویکرد یک عامل در هر زمان استفاده شده است که به عنوان یک روش طراحی آزمایش شناخته نمی‌شود. عدم استفاده از یک روش طراحی آزمایش مناسب باعث می‌شود که اولاً، نتوان برای بررسی بهتر اثر متغیرهای مختلف از مدل‌های جانشین² استفاده کرد. ثانیاً، اثر متقابل³ بین متغیرها در نظر گرفته نشود. به عبارت دیگر، لزومی ندارد اثری که یک متغیر روی سرعت جریان القایی و یا توان مصرفی دارد به ازای مقادیر مختلف یک متغیر دیگر، یکسان باشد [12]. به علاوه در این پژوهش‌ها به جز چند مورد خاص، اثر متغیرهای مختلف بر توان مصرفی بررسی نشده و فقط به رفتار سرعت جریان القایی پرداخته شده است. همچنین اکثر این پژوهش‌ها تنها به رژیم یکنواخت تخلیه‌ی پلاسمای پرداخته‌اند و رژیم رگه‌ای تخلیه‌ی پلاسمای را مورد بررسی قرار نداده‌اند. بنابراین در این پژوهش‌ها امکان تعیین وضعیت بهینه‌ی عملکرد محرک که در آن بیشترین سرعت ممکن به ازای واحد توان الکتریکی مصرفی القا می‌شود، فراهم نشده است.

شیوه‌ی صحیح برخورد با مسائل چند متغیره، استفاده از یک روش طراحی آزمایش مناسب بر مبنای رویکرد عاملی⁴ است. از داده‌های حاصل از چنین آزمایشی که بر اساس اصول صحیح طراحی شده است، می‌توان برای مدل‌سازی سیستم استفاده کرد. مدل حاصل امکان بررسی بهتر رفتار سیستم را فراهم می‌کند و از آن می‌توان برای بهینه‌سازی سیستم و تعیین چیدمانی که به بهترین پاسخ منجر می‌شود، استفاده کرد. تعداد پژوهش‌هایی که با استفاده از اصول صحیح به بررسی عملکرد محرک پلاسمایی پرداخته‌اند،

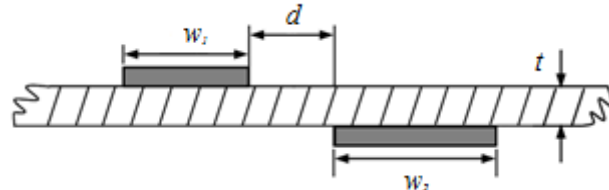


Fig. 2 The geometrical variables of a DBD plasma actuator [9]

شکل 2 متغیرهای هندسی یک محرک پلاسمایی DBD [9]

⁵ Kriging method

⁶ Pareto front

⁷ Plasma scale parameter

¹ One-factor-at-a-time approach

² Surrogate models

³ Interaction

⁴ Factorial approach

از این روش، برای هر متغیر سطوح مشخصی در نظر گرفته می‌شود. سطوح متغیرهای الکتریکی در جدول 1 و سطوح متغیرهای هندسی در جدول 2 آورده شده است. از آنجا که شروع تخلیه‌ی پلاسما و آغاز رگه‌ای شدن تخلیه‌ی پلاسما به عوامل مختلفی بستگی دارد، سطوح ابتدایی و انتهایی در نظر گرفته شده برای ولتاژ، لزوماً مطابق جدول 1 نیست.

در تمام آزمایش‌ها از صفحه‌ی دی‌الکتریک پلکسی‌گلاس⁵ با ولتاژ شکست⁶ 25 kV/mm و ثابت دی‌الکتریک 2.6 (در فرکانس 1MHz) به عنوان مانع دی‌الکتریک استفاده شده است. الکترودهای مورد بررسی از جنس مس و به ضخامت 50 μm و طول 25 cm انتخاب شده است. سایر متغیرهای الکتریکی و هندسی در تمامی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. از جمله شکل موج ولتاژ به صورت سینوسی و پهنای الکتروود در معرض هوا 1 cm در نظر گرفته شده است [21].

2-2- تجهیزات آزمایشگاهی

در شکل 3 طرح‌واره‌ی مدار الکترونیکی منبع تغذیه‌ی پلاسمای مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. این دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

- نوسان‌ساز⁷ برای تولید سیگنال که از نوع موج سینوسی است،
- تقویت‌کننده⁸ توان متغیر برای تنظیم توان الکتریکی خروجی،
- ترانسفورماتور ولتاژ بالای فرکانس بالا برای تنظیم ولتاژ اعمالی مورد نیاز.

این منبع تغذیه به گونه‌ای طراحی شده است که تمامی تنظیمات سیگنال الکتریکی خروجی، شامل بزرگی دامنه‌ی ولتاژ اعمالی، فرکانس حامل، فرکانس تحریک و سیکل کاری، به طور مستقل از هم و بدون هیچ اثری بر روی یکدیگر، قابل تغییر و تنظیم هستند.

در طول آزمایش‌ها، برای اندازه‌گیری دامنه‌ی ولتاژ اعمالی، سیگنال خروجی تقویت‌کننده به یک دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتال⁹ متصل گردیده است برای اندازه‌گیری فرکانس حامل، یک مولتی‌متر دیجیتال¹⁰ به صورت فرکانس‌سنج تنظیم و به سیگنال خروجی نوسان‌ساز وصل شده است. برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی میانگین (متوسط)، یک مولتی‌متر دیجیتال از نوع مجذور میانگین مربعات¹¹ به صورت سری بین الکتروود پوشیده شده و کابل اتصال به زمین قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری سرعت جریان القایی از یک دستگاه میکرومانومتر دیجیتال با تفکیک‌پذیری بالا و یک میکرولوله‌ی سیلیکونی به عنوان لوله‌ی پیتوت استفاده شده است. در مرجع [21] در باره‌ی تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه‌ی اندازه‌گیری متغیرهای مختلف بیشتر توضیح داده شده است.

2-3- نتایج تجربی

در جدول 3 مقادیر سرعت جریان القایی، توان الکتریکی مصرفی واحد طول

جدول 1 سطوح متغیرهای الکتریکی [21]

Table 1 The levels of electrical variables [21]	
ولتاژ پیک تا پیک (kV)	فرکانس حامل (kHz)
[6-24]	{10, 12, 14, 16}

⁵ Plexiglass

⁶ Breakdown voltage

⁷ Oscillator

⁸ Amplifier

⁹ Digital oscilloscope (GW INSTEK GDS-1072-U)

¹⁰ Digital multimeter (VICTOR VC97)

¹¹ RMS digital multimeter (MS8226T)

هیچ کدام از این پژوهش‌ها علت انتخاب چیدمان مورد بررسی توضیح داده نشده است. به عبارت دیگر لزومی ندارد چیدمان انتخابی این پژوهش‌ها، بیشترین سرعت و یا در حالت چندهدفه بیشترین سرعت واحد توان مصرفی را القا کند. رویکرد صحیح این است که ابتدا محرک به صورت تک هدفه و یا چندهدفه بهینه گردد و سپس از این محرک بهینه برای بهینه‌سازی کاربردهای مختلف کنترل جریان استفاده شود. تاکنون تنها یک پژوهش بر اساس اصول صحیح، بهینه‌سازی عملکرد یک محرک پلاسمایی را بررسی کرده است. عرفانی [20] در سال 2013 به بهینه‌سازی عملکرد نوع خاصی از محرک‌های پلاسمایی DBD، که در آن از سه الکتروود پوشیده استفاده شده بود، پرداخت. در این پژوهش با هدف افزایش سرعت جریان القایی، ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایش دی‌اوپتیمال¹، اثر متغیرهای ولتاژ، فرکانس، ضخامت دی‌الکتریک بالای هر کدام از الکتروودهای پوشیده و پهنای الکتروودهای پوشیده بررسی شده است. در ادامه از روش سطح پاسخ² برای مدل‌سازی نتایج و از روش برنامه‌ریزی مرتبه دوم متوالی³ برای بهینه‌سازی مدل استفاده شده است. متداول نبودن محرک مورد بررسی، نپرداختن به رژیم رگه‌ای تخلیه‌ی پلاسما و عدم بررسی اثر متغیرها بر توان مصرفی از جمله کاستی‌های این پژوهش است.

دالوند و همکاران [21] در سال 2017 با استفاده از رویکرد عاملی کامل⁴ اثر متغیرهای ولتاژ، فرکانس، فاصله‌ی بین الکتروودها، ضخامت دی‌الکتریک و پهنای الکتروود پوشیده را بر سرعت جریان القایی و توان الکتریکی مصرفی در رژیم‌های یکنواخت و رگه‌ای مورد بررسی قرار دادند. برای ادامه و تکمیل این پژوهش، در مقاله‌ی حاضر با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، یک مدل برای نسبت سرعت جریان القایی به توان مصرفی ارائه شده و اعتبار این مدل به صورت آماری و تجربی بررسی شده است. در آخر با استفاده از این مدل و الگوریتم ژنتیک، ترکیب بهینه‌ی متغیرها، که در آن محرک بیشترین سرعت ممکن را به ازای واحد توان مصرفی القا می‌کند، تعیین شده است. مقاله حاضر نخستین پژوهشی است که با برطرف کردن کاستی‌های پژوهش‌های پیشین، که عبارتند از استفاده نکردن از یک روش طراحی آزمایش مشخص، در نظر نگرفتن رژیم رگه‌ای تخلیه‌ی پلاسما، و عدم بررسی توانام اثر متغیرها بر سرعت جریان القایی و توان مصرفی، بر اساس اصول صحیح به بهینه‌سازی عملکرد محرک پلاسمایی DBD می‌پردازد.

2- جزئیات آزمایشگاهی

2-1- روش طراحی آزمایش، متغیرها و پارامترها

در این پژوهش اثر متغیرهای ولتاژ، فرکانس، فاصله‌ی بین الکتروودها، ضخامت دی‌الکتریک و پهنای الکتروود پوشیده در حالت تحریک پایا بررسی شده است. همان‌طور که در مرجع [21] توضیح داده شده، آزمایش‌ها بر مبنای روش طراحی آزمایش رویکرد عاملی کامل انجام شده است. برای مثال، اگر عامل A دارای a سطح و عامل B دارای b سطح باشد، آنگاه آزمایش شامل ab ترکیب خواهد بود. ویژگی منحصر به فرد این روش در این است که باعث می‌شود اثر متقابل بین متغیرها شناسایی و از نتیجه‌گیری‌های گمراه‌کننده جلوگیری شود. همچنین با استفاده از این روش می‌توان اثرات یک عامل را به ازای سطوح مختلف عامل‌های دیگر بررسی کرد و این امر باعث می‌شود نتایج حاصل به ازای محدوده‌ی وسیعی از متغیرها معتبر باشد [12]. برای استفاده

¹ D-optimal

² Response surface methodology (RSM)

³ Sequential quadratic programming (SQP)

⁴ Full factorial approach

آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها، در بیشتر موارد گران و زمان‌بر است. در نتیجه انجام اموری مثل بهینه‌سازی، جستجوی فضای طراحی و آنالیز حساسیت که در آن‌ها تابع هدف هزاران و حتی میلیون‌ها بار بازخوانی می‌شود، غیر ممکن به نظر می‌رسد. یکی از راه‌های برطرف کردن این مشکل، استفاده از مدل‌های تقریبی موسوم به مدل‌های جانشین است. این مدل‌ها که بر اساس تعداد محدودی آزمایش و یا شبیه‌سازی ساخته شده‌اند، تا آنجا که ممکن است از رفتار سیستم پیروی می‌کنند. بعضی از معروف‌ترین مدل‌های جانشین عبارتند از روش سطح پاسخ، کرایگینگ، ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی [23].

در سال‌های اخیر، شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان مدل‌های جانشین کارایی فوق‌العاده‌ای را از خود نشان داده‌اند، به ویژه در کاربردهایی همچون شناسایی الگو و تقریب توابع. این شبکه‌ها قادرند روابط پیچیده غیرخطی بین متغیرهای ورودی و خروجی یک سیستم را بدون داشتن دانش قبلی نسبت به آن پدیده یا سیستم، فراگیرند. شبکه‌ی عصبی مصنوعی که با الهام از شبکه‌ی عصبی زیستی ساخته شده، مجموعه‌ای است که از به هم پیوستن واحدهای محاسباتی پایه‌ای به نام نورون مصنوعی تشکیل شده است. در شکل 4 طرح‌واره‌ی یک نورون مصنوعی نشان داده شده است. در نورون مصنوعی ابتدا هر کدام از ورودی‌ها در یک وزن به خصوص ضرب می‌شود. سپس با عبور مجموع ورودی‌های وزن‌دار و بایاس از یک تابع غیرخطی موسوم به تابع فعال‌سازی، خروجی نورون تولید می‌شود [25,24]. عملکرد نورون k ام یک شبکه‌ی عصبی را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (2) به زبان ریاضی بیان کرد:

$$y_k = \varphi\left(\sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k\right) \quad (2)$$

که در آن x_j ورودی‌ها، w_{kj} وزن‌های مربوط به نورون k ، b_k بایاس مربوط به نورون k ، φ تابع فعال‌سازی و y_k خروجی نورون است [25]. معروفترین شبکه‌ی عصبی برای انجام نگاشت غیرخطی، شبکه‌ی عصبی

جدول 2 سطوح متغیرهای هندسی [21]

Table 2 The levels of geometrical variables [21]

فاصله‌ی بین الکترودها	ضخامت دی‌الکتریک	پهنای الکترود پوشیده
(mm)	(mm)	(cm)
{0, 2.5, 5}	{2, 4, 6}	{0.5, 1.5, 2.5}

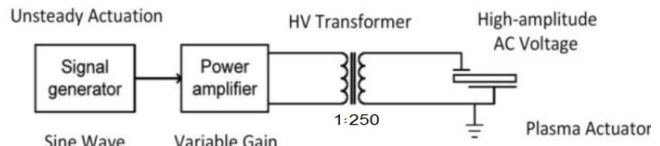


Fig. 3 Diagram of electronic circuit power supply [22]

شکل 3 طرح‌واره‌ی مدار الکترونیکی منبع تغذیه [22]

الکترود و نسبت این دو به ازای چند ترکیب مختلف از متغیرها آورده شده است. برای محاسبه‌ی توان الکتریکی مصرفی از رابطه‌ی (1) استفاده شده است:

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \phi = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}} I_{rms} \cos \phi \quad (1)$$

که در آن I_{rms} جریان الکتریکی متوسط، V_{rms} ولتاژ متوسط، و ϕ اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ است که مقدار آن 6° اندازه‌گیری شده است. در بخش بعدی استفاده از تمامی داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده در این قسمت و به کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی مدل برای نسبت سرعت به توان مصرفی ایجاد خواهد شد.

3- مدل‌سازی

3-1- مدل‌سازی به کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی

در اکثر مسائل طراحی مهندسی رابطه‌ی بین تابع هدف و متغیرهای طراحی به صورت تحلیلی موجود نیست، و برای شناسایی و تعیین این رابطه، آزمایش‌ها و یا شبیه‌سازی‌های فراوانی باید انجام بگیرد. انجام هر کدام از این

جدول 3 نمونه‌ای از داده‌های تجربی

Table 3 Sample experimental data

نسبت سرعت به توان	توان الکتریکی مصرفی	سرعت جریان القایی	ولتاژ پیک تا پیک	فرکانس حامل	فاصله‌ی بین الکترودها	پهنای الکترود پوشیده	ضخامت دی‌الکتریک
(m/s/kW/m)	(W/cm)	(m/s)	(kV)	(kHz)	(mm)	(cm)	(mm)
14.29	0.42	0.6	7	14	2.5	2.5	2
16.67	0.48	0.8	6	16	0	2.5	4
16.67	0.54	0.9	7	12	0	1.5	2
17.54	0.57	1.0	6	16	0	1.5	2
16.18	0.68	1.1	9	16	5	2.5	6
21.54	0.65	1.4	8	10	0	2.5	2
25.37	0.67	1.7	9	14	2.5	1.5	4
23.91	0.92	2.2	8	14	0	1.5	2
25.00	0.96	2.4	10	12	2.5	1.5	2
22.31	1.21	2.7	13	14	5	0.5	4
26.85	1.08	2.9	12	14	5	2.5	4
24.32	1.11	2.7	14	10	5	1.5	4
25.81	1.24	3.2	15	10	5	1.5	4
23.74	1.39	3.3	15	12	5	2.5	6
19.88	1.71	3.4	19	10	5	0.5	6
22.70	1.63	3.7	17	10	5	0.5	4
9.89	4.35	4.3	24	10	2.5	0.5	6
22.68	1.94	4.4	10	16	0	1.5	2
7.68	5.73	4.4	23	12	2.5	0.5	6
16.91	2.72	4.6	16	14	0	0.5	6
9.85	4.77	4.7	22	12	2.5	0.5	6
12.53	3.99	5.0	21	12	2.5	0.5	6
20.48	2.49	5.1	13	16	2.5	2.5	4
15.38	3.51	5.4	11	16	0	2.5	2

تعداد نورون موجود در هر لایه از 1 تا 15 تغییر داده شده است. در تمامی شبکه‌ها از تابع فعال‌سازی تانژانت هایپربولیک⁶ برای نورون‌های لایه‌ی پنهان و از تابع خطی⁷ برای لایه‌ی خروجی استفاده شده است. کل داده‌های تجربی به صورت تصادفی به دو دسته‌ی داده‌های آموزش (70 درصد) و داده‌های آزمایش (30 درصد) تقسیم شده است. از آنجا که انتخاب داده‌های آموزش به صورت تصادفی می‌تواند روی کیفیت شبکه اثرگذار باشد، برای هر معماری، فرایند انتخاب داده‌ها و آموزش شبکه، 10 بار تکرار شده است. در پایان، تمامی مدل‌ها به صورت آماری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته و بهترین مدل برای انجام بهینه‌سازی انتخاب شده است. مدل نهایی یک شبکه‌ی دو لایه است که لایه‌ی پنهان آن 10 نورون دارد. در قسمت‌های بعد اعتبارسنجی آماری و تجربی این مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2-3- اعتبارسنجی آماری

برای بررسی دقت مدل‌های بدست آمده، از آنالیز نیکویی برازش⁸ استفاده شده است. برای این منظور مدل‌ها با استفاده از روش‌های سنجش آماری مختلفی مانند ضریب تشخیص⁹، جذر میانگین مربعات خطا¹⁰، میانگین خطای نسبی¹¹ و ماکزیمم خطای مطلق¹²، ارزیابی شده‌اند. ضریب تشخیص، بیانگر میزان احتمال همبستگی میان نتایج واقعی (تجربی) و نتایج حاصل از مدل، در آینده است. بنابراین در صورتی که مقدار ضریب تشخیص بیشتر از 90 درصد باشد، دقت مدل مناسب خواهد بود. جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای نسبی، معیارهایی از خطا در نقاط نمونه هستند و هر چه مقدار آن‌ها کمتر باشد، مدل مناسب‌تر خواهد بود. نتایج نیکویی برازش مدل نهایی در جدول 4 آمده است. این نتایج بیانگر دقت بالای مدل نهایی است.

3-3- اعتبارسنجی تجربی

اعتبارسنجی آماری لازم است اما کافی نیست. به عبارت دیگر برای ارزیابی قدرت تعمیم‌دهی شبکه‌ی عصبی لازم است تا مدل بدست آمده با داده‌های تجربی جدیدی که در فرایند آموزش شبکه از آن‌ها استفاده نشده است، سنجیده شوند. برای این منظور، در فرایند آموزش شبکه‌ی عصبی تنها از 70 درصد داده‌ها برای آموزش شبکه استفاده شده است (داده‌های آموزش) و از 30 درصد باقی مانده برای بررسی قدرت تعمیم‌دهی شبکه استفاده شده است (داده‌های آزمایش). نتایج نیکویی برازش برای داده‌های آموزش در

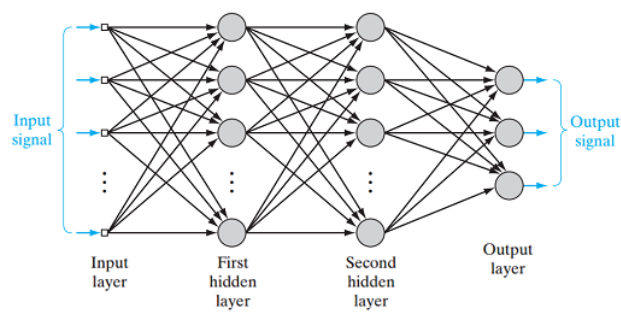


Fig. 5 Schematic of a multilayer perceptron neural network [25]

شکل 5 طرح‌واره‌ی یک شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه [25]

پرسپترون چند لایه¹ است. این شبکه ساختاری لایه‌ای دارد و در آن نورون‌ها در چند لایه‌ی متوالی (یک لایه‌ی ورودی، چند لایه‌ی پنهان و یک لایه‌ی خروجی) قرار می‌گیرند. در این شبکه، هر نورون به تمامی نورون‌های موجود در لایه‌ی پیشین متصل است اما با نورون‌های خود اتصالی ندارد. برای انتقال اطلاعات در این شبکه یک‌طرفه و از لایه‌ی ورودی به طرف لایه‌ی خروجی و به صورت لایه به لایه است. در شکل 5 طرح‌واره‌ی یک شبکه‌ی پرسپترون سه لایه با دو لایه‌ی پنهان نشان داده شده است [25,24].

برای طراحی یک شبکه‌ی عصبی پرسپترون، ابتدا یک معماری مشخص (تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نورون‌های موجود در هر لایه) برای شبکه در نظر گرفته می‌شود و سپس وزن‌ها و بایاس‌های هر نورون با استفاده از زیر مجموعه‌ای از کل داده‌ها تعیین می‌شود. به این فرایند، آموزش² شبکه‌ی عصبی گفته می‌شود، زیرا شبکه‌ی حاصل به گونه‌ای طراحی می‌شود که رفتار مناسب و مطلوب را از خود نشان بدهد.

تعیین معماری شبکه عموماً به کمک سعی و خطا انجام می‌شود و روش به خصوصی برای این کار وجود ندارد. فرایند آموزش شبکه‌ی عصبی را می‌توان به صورت یک مسأله‌ی بهینه‌سازی بیان و با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی حل کرد. هدف از حل این مسأله تعیین وزن‌ها و بایاس‌های شبکه به گونه‌ای است که میانگین مربعات خطای شبکه‌ی عصبی، کمینه شود [25,24].

روش‌های مختلفی برای حل آموزش شبکه‌ی عصبی وجود دارد از جمله قانون دلتا، الگوریتم بولتزمن، الگوریتم پس‌انتشار³ و الگوریتم لونبرگ-مارکارد⁴ از بین این روش‌ها، الگوریتم لونبرگ-مارکارد به خاطر سرعت و قطعیت بالا، پرکاربردتر است. این الگوریتم روشی استاندارد برای حل مسائل حداقل مربعات غیرخطی است و از ترکیب دو روش بهینه‌سازی تشکیل شده است: روش گرادیان کاهشی⁵ و روش گاو-نیوتون. روش گرادیان کاهشی خیل کند همگرا می‌شود اما همگرا شدنش قطعی است. از سوی دیگر روش گاو-نیوتون خیلی تند همگرا می‌شود اما ممکن است استواگرا نیز شود. ترکیب ویژگی‌های این دو روش در الگوریتم لونبرگ-مارکارد باعث افزایش سرعت بهینه‌سازی و در نتیجه آموزش شبکه شده است [25,24].

در این پژوهش برای مدل‌سازی نسبت سرعت جریان القایی به توان مصرفی باشکله‌ی عصبی پرسپترون، از کد نویسی در متلب استفاده شده است. برای تعیین معماری شبکه‌ی بهینه، تعداد لایه‌های پنهان از 1 تا 2 و

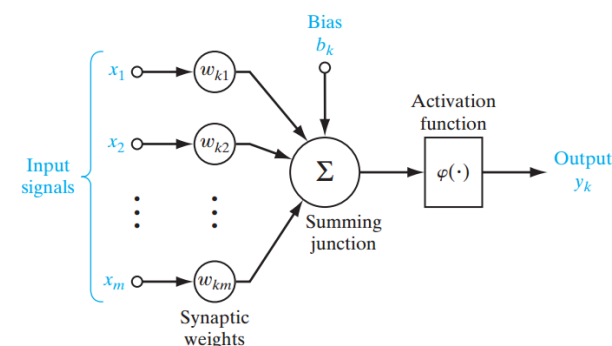


Fig. 4 Schematic of an artificial neuron [25]

شکل 4 طرح‌واره‌ی یک نورون مصنوعی [25]

⁶ Tan-sigmoid

⁷ Pure linear

⁸ Goodness of fit

⁹ Coefficient of determination (R^2)

¹⁰ Root mean square error (RMSE)

¹¹ Average relative error (ARE)

¹² Maximum absolute error (MAE)

¹ Multilayer perceptron (MLP)

² Training

³ Backpropagation

⁴ Levenberg-Marquardt

⁵ Gradient descent method

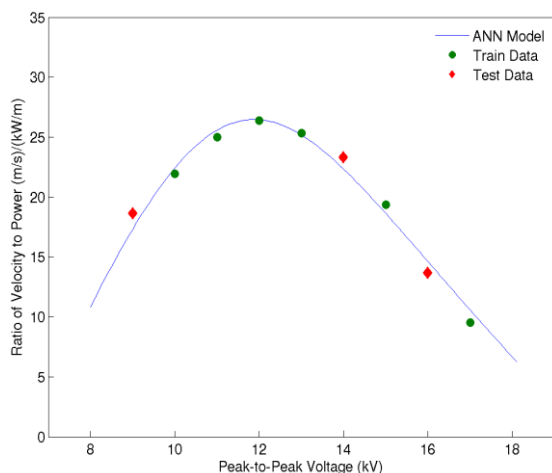


Fig. 6 Comparison of the experimental data and ANN model for $t = 4$ mm, $w_2 = 1.5$ cm, $d = 5.0$ mm and $f_{AC} = 16$ kHz

شکل 6 مقایسه‌ی داده‌های آموزش و آزمایش با مدل شبکه‌ی عصبی برای $t = 4$ mm، $f_{AC} = 16$ kHz و $d = 5.0$ mm، $w_2 = 1.5$ cm

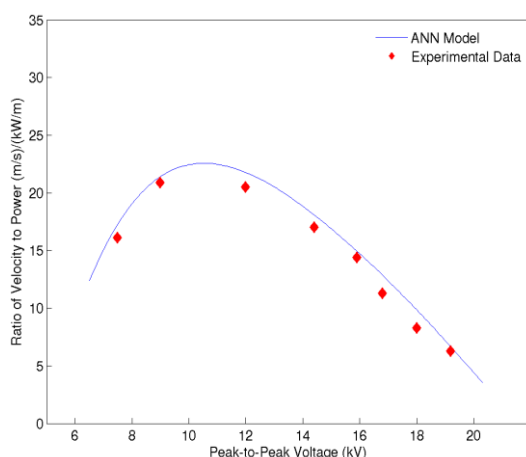


Fig. 7 Comparison of the new experimental data and ANN model for $t = 5$ mm, $w_2 = 2.5$ cm, $d = 0$ mm and $f_{AC} = 10$ kHz

شکل 7 مقایسه‌ی داده‌های تجربی جدید با مدل شبکه‌ی عصبی برای $t = 5$ mm، $f_{AC} = 10$ kHz و $d = 0$ mm، $w_2 = 2.5$ cm

گرادیانی آن ندارند. بنابراین روشی مناسب برای مسائلی با تابع هدف پیچیده، مشتق‌ناپذیر و یا به شدت غیرخطی است. به طور کلی الگوریتم ژنتیک از سه عملیات انتخاب، ترکیب و جهش برای تقلید از فرایند تکامل طبیعی استفاده می‌کند. در شکل 8 فلوچارت یک الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ابتدا تعدادی جواب به صورت تصادفی تولید و با استفاده از تابع هدف مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این جواب‌ها، اعضای جمعیت اصلی اولیه را تشکیل می‌دهند. در مرحله‌ی بعد، بخشی از اعضای جمعیت اصلی به عنوان والد انتخاب می‌شوند و با استفاده از آنها و به کمک عملگر ترکیب، جمعیت فرزندان تشکیل می‌شود. در مرحله‌ی بعد، تعدادی از اعضای جمعیت اصلی برای اعمال جهش انتخاب می‌شوند و با استفاده از آنها و به کمک عملگر جهش، جمعیت جهش‌یافتگان تشکیل می‌شود.

در انتها جمعیت اصلی فعلی، جمعیت فرزندان و جمعیت جهش‌یافتگان با هم ترکیب و بر اساس شایستگی مرتب می‌شوند و زیرمجموعه‌ای از آنها به عنوان جمعیت اصلی جدید انتخاب می‌شود. این مراحل تا یافتن جوابی که شرط توقف را برآورده کند، تکرار می‌شود [26].

جدول 5 آمده است. اگر چه دقت نیکویی برازش این داده‌ها کمتر از دقت نیکویی برازش تمامی داده است، اما همگی دارای مقادیر مناسبی هستند. در شکل 6 داده‌های آموزش و آزمایش با مدل شبکه‌ی عصبی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد. برای بررسی بیشتر قابلیت تعمیم‌دهی مدل بدست آمده، مقدار سرعت جریان القایی و توان مصرفی به ازای سطوح جدیدی از متغیرهای هندسی و الکتریکی به صورت تجربی اندازه‌گیری و نسبت آنها با نتایج حاصل از شبکه‌ی عصبی مقایسه شد. برای مثال در محرک شکل 7، ضخامت دی‌الکتریک 5 mm است که جزء سطوح در نظر گرفته شده برای ضخامت دی‌الکتریک نیست. بنابراین تمامی داده‌های نشان داده شده در این شکل برای شبکه‌ی عصبی جدید بوده و از هیچکدام از آنها برای آموزش شبکه‌ی عصبی استفاده نشده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اگرچه در بعضی نقاط خطا زیاد است اما به طور کلی الگوی رفتار نسبت سرعت به توان به‌درستی پیش‌بینی شده است. در بخش بعد با استفاده از مدل بدست آمده در این قسمت و به کمک الگوریتم ژنتیک، ترکیب بهینه‌ی متغیرها که منجر به بیشترین نسبت سرعت به توان مصرفی می‌شود، تعیین خواهد شد.

4- بهینه‌سازی

4-1- تعریف مساله

همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، منظور از بهینه‌سازی عملکرد محرک پلاسمایی، یافتن ترکیبی از متغیرها است که منجر به بیشترین سرعت جریان القایی به ازای واحد توان مصرفی می‌شود. این مساله را می‌توان به صورت زیر فرمولبندی کرد:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } V/P \\ & \text{subject to:} \\ & 2 \leq t \leq 6 \text{ mm,} \\ & 0.5 \leq w_2 \leq 2.5 \text{ cm,} \\ & 0 \leq d \leq 5 \text{ mm,} \\ & 10 \leq f_{AC} \leq 16 \text{ kHz,} \\ & 6 \leq V_{pp} \leq 24 \text{ kV} \end{aligned} \quad (3)$$

برای حل این مساله می‌توان از روش‌های هوشمند بهینه‌سازی مثل روش الگوریتم ژنتیک¹، الگوریتم تجمع ذرات²، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده³، ویا الگوریتم کلونی مورچگان⁴ استفاده کرد. در پژوهش حاضر، این مساله با استفاده از الگوریتم ژنتیک و به کمک کدنویسی در متلب، حل شده است.

4-2- حل مساله به کمک الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی پیشرفته است که از اصول ژنتیک و تکامل طبیعی تقلید می‌کند. برخلاف روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک فقط از فراخوانی تابع استفاده می‌کند و نیازی به اطلاعات

جدول 4 آنالیز نیکویی برازش مدل

Table 4 Goodness of fit analysis of the model			
R^2	RMSE	ARE	MAE
96.33 %	0.71	4.46 %	1.08

جدول 5 آنالیز نیکویی برازش مدل برای داده‌های آزمایش

Table 5 Goodness of fit analysis of the model for test data			
R^2	RMSE	ARE	MAE
95.69 %	0.93	4.83 %	1.08

¹ Genetic algorithm (GA)

² Particle swarm optimization (PSO)

³ Simulated annealing (SA)

⁴ Ant colony optimization (ACO)

جدول 7 مقادیر متغیرهای طراحی بهینه

t (mm)	w_2 (cm)	d (mm)	f_{AC} (kHz)	V_{pp} (kV)	R (m/s/kW/m)
2.27	2.13	4.68	15.48	10.72	30.67

پلازما از رژیم یکنواخت به رژیم رگه‌ای تبدیل می‌شود) به ازای چیدمان بهینه‌ی متغیرها برابر با 13.7 kV است. بنابراین در نقطه‌ی بهینه، تخلیه‌ی پلازما به صورت یکنواخت است و فاصله‌ی زیاد تا شروع رژیم رگه‌ای دارد. این موضوع با توجه به عملکرد نامناسب محرک با ورود به رژیم رگه‌ای (کاهش سرعت جریان القایی و افزایش توان مصرفی) قابل انتظار بود.

در شکل 9 کانتورهای نسبت سرعت به توان مصرفی، برحسب متغیرهای مختلف رسم شده است. برای رسم کانتورهای این شکل، سایر متغیرها در مقدار بهینه‌شان، ثابت در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که در مرجع [21] توضیح داده شده است، با افزایش ولتاژ، ابتدا در رژیم یکنواخت تخلیه‌ی پلازما سرعت جریان القایی و توان مصرفی افزایش پیدا می‌کند، اما پس از رگه‌ای شدن تخلیه‌ی پلازما سرعت کاهش شروع به کاهش می‌کند، در حالی که توان مصرفی همچنان افزایش می‌یابد. بنابراین در شروع تخلیه‌ی پلازما که سرعت جریان القایی و توان مصرفی کمترین مقدار را دارند، تابع هدف سرعت، که قصد بیشینه کردن آن را داریم، بدترین وضعیت و تابع هدف مصرفی، که قصد کمینه کردن آن را داریم، بهترین وضعیت را دارند. به طور مشابه در شروع رگه‌ای شدن تخلیه‌ی پلازما که سرعت جریان القایی بیشینه است و توان مصرفی نیز بیشترین مقدار خود را در رژیم یکنواخت دارد، تابع هدف سرعت، بهترین وضعیت و تابع هدف مصرفی، بدترین وضعیت را دارند. در نتیجه همان‌طور که در هر چهار قسمت شکل 9 مشاهده می‌شود، کاملاً قابل انتظار است که نقطه‌ی بهینه‌ی نسبت سرعت به توان، بین نقطه‌ی شروع تخلیه‌ی یکنواخت پلازما و نقطه آغاز رگه‌ای شدن تخلیه پلازما (در اینجا ولتاژ 13.7 kV) قرار داشته باشد. در نتیجه همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش ولتاژ، نسبت سرعت به توان ابتدا افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به نقطه‌ی بیشینه، کاهش می‌یابد.

برای چهار متغیر دیگر نیز می‌توان تحلیل مشابه‌ای را ارائه داد. توجیه فیزیکی نحوه‌ی تغییرات سرعت و توان مصرفی با تغییر هر کدام از متغیرها، در مرجع [21] به طور کامل توضیح داده شده است و در اینجا از ذکر آن صرف نظر می‌شود. در رژیم یکنواخت تخلیه‌ی پلازما، با افزایش ضخامت دی‌الکتریک، سرعت جریان القایی و توان مصرفی پیوسته کاهش می‌یابند. بنابراین، همان‌طور که در شکل 9-a مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت دی‌الکتریک، نسبت سرعت به توان، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این رویه در حوالی ولتاژ بهینه (10.72 kV) بهتر قابل تشخیص است. رفتار فاصله‌ی بین دو الکترود کاملاً شبیه رفتار ضخامت دی‌الکتریک است (شکل 9-c). همچنین در رژیم یکنواخت تخلیه‌ی پلازما، با افزایش فرکانس، سرعت جریان القایی و توان مصرفی پیوسته افزایش می‌یابند. بنابراین، همان‌طور که در شکل 9-d مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس، نسبت سرعت به توان، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این رویه در حوالی ولتاژ بهینه (10.72 kV) بهتر قابل تشخیص است. رفتار پهنای الکترود پوشیده کاملاً شبیه رفتار فرکانس است (شکل 9-b).

6- جمع‌بندی و پیشنهادها

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از رویکرد عاملی کامل، رفتار محرک

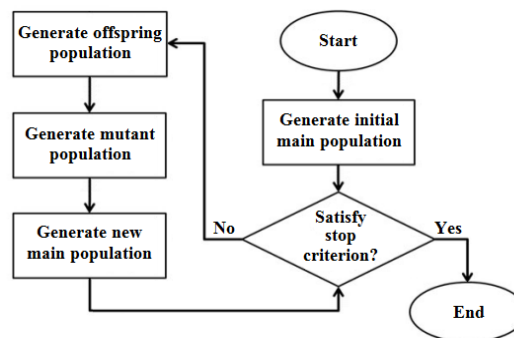


Fig. 8 Flowchart of a genetic algorithm

شکل 8 فلوچارت یک الگوریتم ژنتیک

در این پژوهش، انتخاب والدین با استفاده از روش چرخ رولت، انتخاب اعضای که مورد جهش قرار می‌گیرند به صورت تصادفی و انتخاب اعضای جمعیت اصلی جدید بر مبنای شایستگی صورت گرفته است. در روش چرخ رولت، هرچه یک عضو شایسته‌تر باشد احتمال انتخاب شدنش بیشتر است. در انتخاب بر مبنای شایستگی، تمامی اعضا بر اساس شایستگی مرتب می‌شوند و به تعداد اعضای جمعیت اصلی، شایسته‌ترین اعضا انتخاب می‌شوند. همچنین برای ترکیب والدین از روش ترکیب محاسباتی¹ استفاده شده است. در این روش فرزندان (y_1 و y_2) با استفاده از روابط (4) از والدین (x_1 و x_2) تولید می‌شوند:

$$\begin{aligned} y_1 &= \alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2 \\ y_2 &= \alpha x_2 + (1 - \alpha) x_1 \end{aligned} \quad (4)$$

در این روابط α یک عدد تصادفی بین $-\gamma$ و $1 + \gamma$ است. به گاما ضریب افزایش طول بازه می‌گویند و عددی مثبت و کوچکتر از یک است. شرط توقف الگوریتم، بدون تغییر ماندن تابع هدف پس از 50 تکرار در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم در جدول 6 آمده است. در قسمت بعد جواب به دست آمده و اعتبار آن بررسی خواهد شد.

5- بررسی نتایج

ترکیب بهینه‌ی متغیرها و نسبت سرعت به توان مصرفی بهینه‌ی ناشی از آن‌ها، در جدول 7 آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعیین این ترکیب، بدون مدل‌سازی و استفاده از یک روش بهینه‌سازی امکان‌پذیر نیست. برای سنجش اعتبار جواب بدست آمده، محرکی بر مبنای متغیرهای بهینه ساخته و سرعت بیشینه‌ی جریان القایی و توان مصرفی آن به ترتیب 4.1 m/s و 1.38 W/cm اندازه‌گیری شد. بنابر این مقادیر، نسبت سرعت به توان مصرفی در محرک بهینه برابر 29.71 m/s/kW/ml است که با در نظر گرفتن خطای مدل (جدول 4)، اختلاف اندکی با مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه‌ی عصبی دارد.

همچنین مشاهده شد، ولتاژ بحرانی (ولتاژی که در آن فرایند تخلیه‌ی

جدول 6 پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک

تعداد	نرخ	درصد	ضریب افزایش	تعداد اعضای
تکرار مجاز	جهش	جهش	طول بازه	ترکیب
300	40 %	30 %	0.1	80 %
				جمعیت
				100

¹ Arithmetic crossover

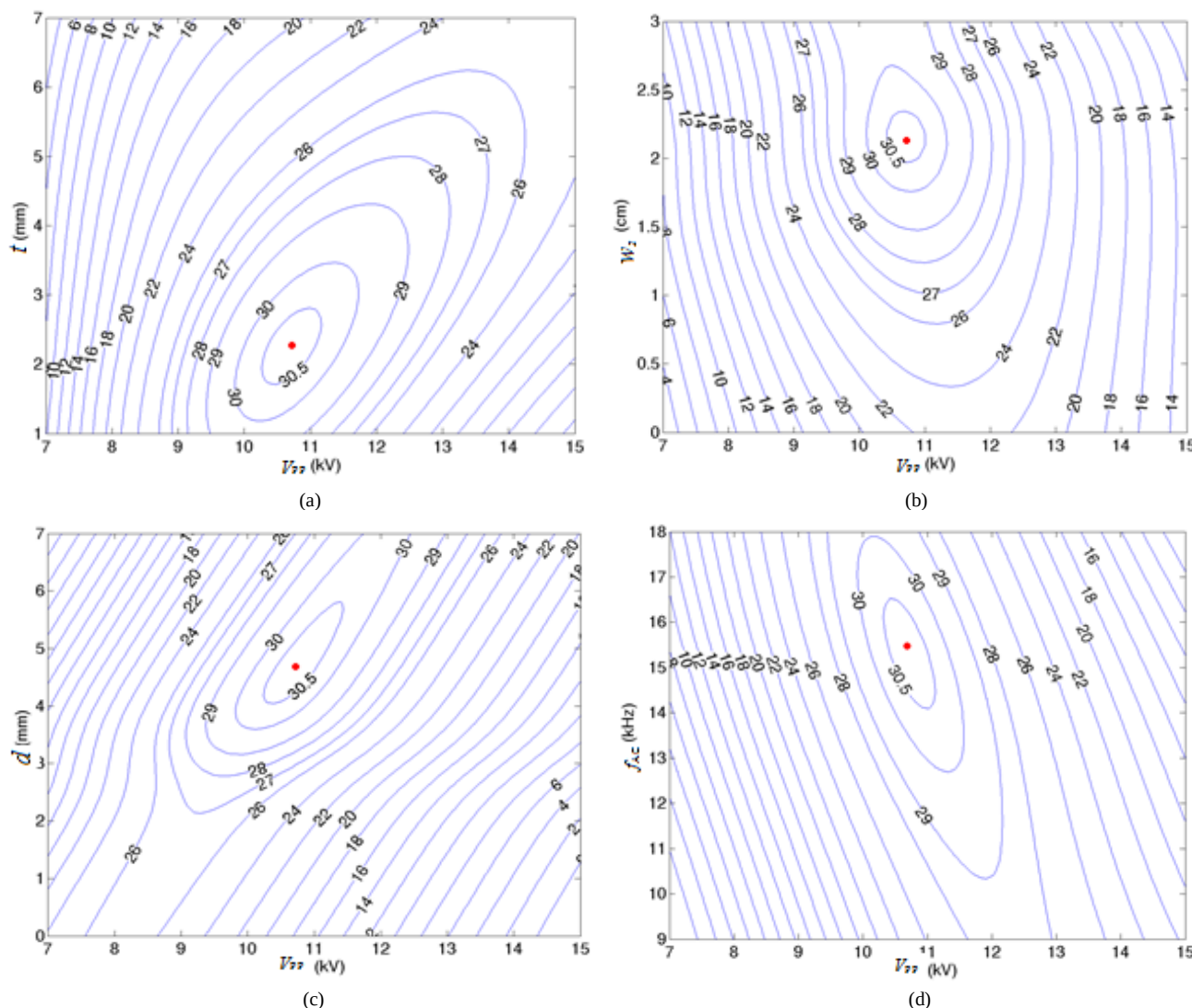


Fig. 9 Contour plots of induced velocity (m/s) per power consumption (kW/m) with respect to the variables (the circle indicates the optimum point)

شکل 9 کانتور نسبت سرعت جریان القایی به توان مصرفی برحسب متغیرها (دایره‌ی توپر نشان دهنده‌ی نقطه‌ی بهینه است)

- سرعت جریان القایی با استفاده از روش‌های سرعت‌سنجی دقیق‌تر مانند PIV اندازه‌گیری شود و با تعیین پروفیل سرعت، بازدهی محرک (که از تقسیم توان مکانیکی جریان بر توان الکتریکی مصرفی بدست می‌آید) تعیین و بهینه گردد. بدون داشتن پروفایل سرعت جریان القایی، تعیین توان مکانیکی جریان امکان‌پذیر نیست.
- با مدل‌سازی سرعت جریان القایی و توان مصرفی، عملکرد محرک به صورت چندهدفه بهینه و جبهه‌ی پرتوی سرعت جریان القایی بر حسب توان مصرفی رسم شود. به کمک این نمودار و داده‌های مربوط به جبهه‌ی پرتو می‌توان به ازای هر توان مصرفی، بیشترین سرعت القایی ممکن و به ازای هر سرعت القایی، کمترین توان مصرفی ممکن را تعیین نمود.

7- فهرست علائم

d	فاصله‌ی بین دو الکترود (mm)
f_{AC}	فرکانس حامل (kHz)
I_{rms}	جریان متوسط (mA)
P	توان مصرفی واحد طول الکترود (W/cm)

پلاسمایی DBD به عنوان تابعی از متغیرهای الکتریکی و هندسی به صورت تجربی مطالعه شد. در ادامه نسبت سرعت جریان القایی به توان مصرفی به کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون دو لایه مدل گردید. اعتبار این مدل از نظر آماری و تجربی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که از دقت 96 درصد و قابلیت تعمیم‌دهی بالایی برخوردار است. در آخر با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نسبت سرعت به توان مصرفی بهینه و چیدمانی که به ازای آن محرک بیشترین سرعت جریان القایی واحد توان مصرفی را تولید می‌کند، مشخص شد. تعیین این چیدمان بدون مدل‌سازی عملکرد محرک و استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی امکان‌پذیر نبود. مقایسه‌ی جواب پیش‌بینی شده توسط مدل و جواب حاصل از محرک طراحی شده بر مبنای متغیرهای بهینه، نشان دهنده‌ی دقت بالای مدل شبکه‌ی عصبی و درستی روش بهینه‌سازی ارائه شده است. همچنین مشاهده شد در نقطه‌ی بهینه، رژیم تخلیه‌ی پلازما یکنواخت است و فاصله‌ی زیاد با شروع رگه‌ای شدن تخلیه‌ی پلازما دارد. برای پژوهش‌های بیشتر و گسترش هرچه بیشتر این مبحث، پیشنهاد می‌شود:

- اثر دیگر متغیرهای مؤثر بر سرعت و توان مصرفی، برای مثال جنس دی‌الکتریک، مورد بررسی قرار بگیرد.

- T. C. Corke, M. Post, O. Haddad, Mechanisms and responses of a dielectric barrier plasma actuator: Geometric effects, *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 3, pp. 595-604, 2004.
- [12] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, pp. 264-273, Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- [13] M. Forte, J. Jolibois, J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, M. Cazalens, Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control, *Experiments in Fluids*, Vol. 43, No. 6, pp. 917-928, 2007.
- [14] P. Versailles, V. Gingras-Gosselin, H. D. Vo, Impact of pressure and temperature on the performance of plasma actuators, *AIAA Journal*, Vol. 48, No. 4, pp. 859-863, 2010.
- [15] T. Matsuno, K. Maeda, G. Yamada, H. Kawazoe, M. Kanazaki, Improvement of flow control performance of plasma actuator using wind-tunnel test based efficient global optimization, *31st AIAA Applied Aerodynamics Conference*, San Diego, California, June 24-27, 2013.
- [16] M. Kanazaki, T. Matsuno, K. Maeda, H. Kawazoe, Efficient global optimization applied to wind tunnel evaluation-based optimization for improvement of flow control by plasma actuators, *Engineering Optimization*, Vol. 47, No. 9, pp. 1226-1242, 2015.
- [17] T. Sulaiman, S. Sekimoto, T. Tatsukawa, T. Nonomura, A. Oyama, K. Fujii, DBD plasma actuator multi-objective design optimization at Reynolds number 63,000: baseline case, *ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Incline Village, Nevada, July 7-11, 2013.
- [18] T. Watanabe, T. Tatsukawa, A. L. Jaimes, H. Aono, T. Nonomura, A. Oyama, K. Fujii, Many-objective evolutionary computation for optimization of separated-flow control using a DBD plasma actuator, *proceeding of 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Beijing, China, July 6-11, 2014.
- [19] N. Benard, J. Pons-Prats, J. Periaux, G. B. Castellort, P. Braud, J. Bonnet, E. Moreau, Turbulent separated shear flow control by surface plasma actuator: Experimental optimization by genetic algorithm approach, *Experiments in Fluids*, Vol. 57, No. 2, pp. 22, 2016.
- [20] R. Erfani, T. Erfani, S. V. Utyuzhnikova, K. Kontis, Optimisation of multiple encapsulated electrode plasma actuator, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 120-127, 2013.
- [21] M. S. Dalvand, M. Ebrahimi, G. Pouryoussefi, Experimental investigation of the effect of geometrical and electrical variables on the performance of the DBD plasma actuators in uniform and filamentary regimes, *Journal of Mechanical Engineering of the University of Tabriz*, Vol. 47, No. 1, pp. 95-104, 2017. (in Persian فارسی)
- [22] S. G. Pouryoussefi, M. Mirzaei, Experimental investigation of the effect of steady and unsteady actuation on performance of plasma actuators for active flow control in boundary layer, *Journal of Fluid and Aerodynamic Mechanics*, Vol. 3, No. 2, pp. 51-62, 2014. (in Persian فارسی)
- [23] S. Koziel, L. Leifsson, *Surrogate-Based Modeling and Optimization: Applications in Engineering*, pp. 51-80, New York: Springer, 2013.
- [24] Z. Waszczyszyn, *Neural Networks in the Analysis and Design of Structures*, pp. 35-52, New York: Springer, 1999.
- [25] S. Haykin, *Neural Network: A Comprehensive Foundation*, pp. 1-40, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008.
- [26] S. N. Sivanandam, S. N. Deepa, *Introduction to Genetic Algorithms*, pp. 17-25, New York: Springer, 2008.

R	نسب سرعت به توان مصرفی ($m/s/kW/m$)
t	ضخامت دی الکتریک (mm)
V	سرعت جریان القایی (m/s)
V_{pp}	ولتاژ پیک تا پیک (kV)
V_{rms}	ولتاژ متوسط (kV)
w_1	پهنای الکتروود در معرض هوا (cm)
w_2	پهنای الکتروود پوشیده (cm)
علایم یونانی	
α	یک عدد تصافی
γ	ضریب افزایش طول بازه

8- مراجع

- [1] M. Gad-el-Hak, *Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management*, pp. 25-33, New York: Cambridge University Press, 2000.
- [2] E. Moreau, Airflow control by non-thermal plasma actuators, *Journal of Physics part D: Applied Physics*, Vol. 40, No. 3, pp. 605-636, 2007.
- [3] T. C. Corke, M. L. Post, D. M. Orlov, Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications, *Experiments in Fluids*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-26, 2009.
- [4] J. Jolibois, M. Forte, E. Moreau, Application of an AC barrier discharge actuator to control airflow separation above a NACA 0015 airfoil: Optimization of the actuation location along the chord, *Journal of Electrostatics*, Vol. 66, No. 9, pp. 496-503, 2008.
- [5] P. F. Zhang, A. B. Liu, J. J. Wang, Aerodynamic modification of a NACA 0012 airfoil by trailing-edge plasma Gurney flap, *AIAA Journal*, Vol. 47, No. 10, pp. 2467-2474, 2009.
- [6] T. Jukes, T. Segawa, H. Furutani, Active flow separation control on a NACA 4418 using DBD vortex generators and FBG sensors, *150th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, Tennessee, January 9-12, 2012.
- [7] D. Greenblatt, A. Ben-Harav, H. Mueller-Vahl, Dynamic stall control on a vertical-axis wind turbine using plasma actuators, *AIAA Journal*, Vol. 52, No. 2, pp. 456-462, 2014.
- [8] S. G. Pouryoussefi, M. Mirzaei, F. Alinejad, S. M. Pouryoussefi, Experimental investigation of separation bubble control on an iced airfoil using plasma actuator, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 100, No. 1, pp. 1334-1341, 2016.
- [9] J. R. Roth, Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, January 9-12, 2006.
- [10] S. G. Pouryoussefi, M. Mirzaei, Experimental study of the unsteady actuation effect on induced flow characteristics in DBD plasma actuators, *Plasma Science and Technology*, Vol. 17, No. 5, pp. 415-424, 2015.
- [11] C. L. Enloe, T. E. McLaughlin, R. D. V. Dyken, K. D. Kachner, E. J. Jumper,