



ساخت دستگاه مولد پلاسمای DBD استوانه‌ای برای حذف آلاینده SO_2

ابوالفضل مازندران^۱، شیوا شه‌شناس^{۲*}، شروین گودرزی^۱

۱. پژوهشکده پلاسما و گداخت‌هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران - ایران

۲. گروه علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، شبستر، آذربایجان شرقی، ایران

چکیده:

در این مقاله، طراحی، شبیه‌سازی و ساخت دستگاه DBD برای از بین بردن آلاینده SO_2 تشریح شده است. پس از ساخت دستگاه، درصد دی‌اکسید سولفور در ورودی و خروجی دستگاه، با استفاده از تشخیص‌گر گاز Testo 350 اندازه‌گیری شده است. نتایج تجربی نشان داده‌اند که غلظت گاز SO_2 پس از عبور در طول ۱۵ سانتی‌متر دستگاه DBD بیش از ۶۰ درصد کاهش یافته است. نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته در نرم‌افزار کامسول با نتایج تجربی سازگار است. شبیه‌سازی برای طول ۳۰ سانتی‌متری انجام شده است تا تاثیر افزایش مسیر گاز در پلاسما بر میزان تجمع گاز بررسی شود. سیستم طراحی شده علاوه بر SO_2 امکان از بین بردن NO_x و سایر آلاینده‌ها را نیز دارد.

کلمات کلیدی: آلاینده، دی‌اکسید گوگرد، پلاسما، DBD، پلاسما سرد اتمسفری

SO_2 Pollutant Removal by Cylindrical DBD Plasma

Abolfazl Mazandarani¹, Shiva Shahshenas², Shervin Goudarzi¹

¹ Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

² Physics faculty, Islamic Azad University Shabestar branch, Shabestar, East Azerbaijan, Iran

Abstract

A SO_2 pollutant removal DBD plasma device is described here, including simulation, design and construction. After construction of device, the sulfur dioxide concentration was measured in the air at the inlet and outlet of the designed system by Testo 350 gas analyzer which represented over 60 percent SO_2 removal by passing through 15cm plasma tunnel. Simulation results from COMSOL software are in good agreement with experimental results. In simulation, a 30cm plasma channel was studied to analyze the effect of plasma exposure length on SO_2 removal. The introduced system is not only for SO_2 removal, but for NO_x and some other toxic air pollutant.

Keywords: Pollutant, Sulfur Dioxide, Plasma, DBD, Cold Atmospheric Plasma

مقدمه:

از میان آلاینده‌های ساخت بشر در اتمسفر، دی‌اکسید گوگرد بیش‌ترین سطح مطالعات را به خود اختصاص داده است [۱]. از جمله مضرات اکسیدهای گوگرد بر بدن انسان می‌توان به تنگ شدن مجاری تنفس، اسپاسم برونش، سوزش چشم و مجاری تنفسی، کاهش کارایی تنفسی و تنگی نفس، کم شدن عمق تنفس، کاهش سیستم دفاعی ریه و در نهایت تشدید عوارض قلبی و عروقی و تنفسی اشاره کرد. بیش از ۸۰ درصد دی‌اکسید گوگرد تولید شده به وسیله بشر مربوط به مصرف



سوخت‌های فسیلی است که از این مقدار سهم نیروگاه‌های برق حدود ۸۵ درصد و سهم خودروها حدود ۲ درصد است. این گاز بی‌رنگ بوده و غیر قابل انفجار است و در صورت برخورد با سطوح بسیاری از جامدات با آن‌ها برهمکنش می‌کند؛ بویی خفه کننده دارد و در آب و قطرات باران حل شده و به تری‌اکسید گوگرد و نهایتاً اسید سولفوریک تبدیل شده و ایجاد باران اسیدی می‌کند [۱، ۲، ۳].

استفاده از شیوه‌های نوین برای حذف انواع آلاینده از جمله دی‌اکسید گوگرد، می‌تواند تاثیر بسزایی در این زمینه داشته باشد. یکی از این روش‌های نوین استفاده از پلاسما است. پلاسما را می‌توان به دو دسته کلی حرارتی و غیرحرارتی تقسیم کرد. در پلاسمای غیرحرارتی یا سرد، دمای الکترون‌ها و سرعت‌شان بسیار بیشتر از سایر ذرات پلاسما مانند یون‌ها و رادیکال‌ها هستند. دمای ماکروسکوپی این نوع پلاسما در محدوده دمای اتاق است از جمله مولدهای پلاسمای سرد، پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک^۱ است که اختصاراً DBD نامیده می‌شود. به طور کل بازدهی دستگاه‌های DBD بالاست و مصرف انرژی بسیار پایینی دارد و در فشار اتمسفر عمل می‌کند [۴، ۵].

در دستگاه DBD حداقل به وجود یک مانع دی‌الکتریک بین صفحات رسانای متصل به ولتاژ از مرتبه‌ی کیلو ولت و متناوب نیاز است زیرا دی‌الکتریک به عنوان یک عایق نمی‌تواند جریان DC را از خود عبور دهد. برای انتقال جریان در فاصله تخلیه و ایجاد شکست در گاز، میدان الکتریکی بین دو صفحه DBD باید به اندازه کافی بالا باشد [۶].

فاصله فضای تخلیه DBD های مختلف بر اساس کاربردهای آن‌ها از $100 \mu m$ تا چند سانتی‌متر تغییر می‌کند. در فشار اتمسفر فاصله فضای تخلیه از ابعاد میلی‌متر است که برای ایجاد آن نیاز به منبع تغذیه ولتاژ بالا (چند ده کیلو ولت) داریم. تخلیه‌ها در DBD از تعداد زیادی رشته‌های جریان کوتاه عمر تشکیل می‌شوند [۶-۹].

از لحاظ شکل ساختاری DBD ها به دو دسته کلی مسطح و استوانه‌ای قابل تقسیم هستند. در DBD مسطح الکترودها به صورت دو صفحه تخت به موازات یکدیگر در مقابل هم قرار می‌گیرند؛ اما در DBD استوانه‌ای الکترودها استوانه‌های تودرتوی هم‌محور با شعاع‌های متفاوت هستند، بنابراین چگالی پلاسما برخلاف حالت مسطح در نزدیکی دو الکترودها متفاوت خواهد بود. ساخت DBD مسطح به مراتب ساده‌تر است و پیچیدگی‌های ساختاری کم‌تری دارد اما گاهی این نوع DBD از لحاظ شکل ساختاری برای کاربرد مورد نظر مناسب نمی‌باشد [۶-۹]. از آن‌جا که در فرآیند حذف آلاینده‌ها، گاز باید به طور کامل از بین دو الکترودها عبور کند و هیچ‌گونه نشی از بین صفحات الکترودها نداشته باشد استفاده از ساختار استوانه‌ای موجه‌تر و قابل اطمینان‌تر است. تمرکز این مقاله بر روی طراحی این نوع DBD و پیچیدگی‌های ساختاری آن بوده و سپس نتایج حاصل از تست گاز دی‌اکسید گوگرد با سیستم طراحی و ساخته شده ارائه شده است.

طراحی دستگاه و اساس عملکرد آن:

شکل (۱) شماتیک دستگاه مولد پلاسمای سددی الکتریک و تصویری از سیستم آزمایشگاهی ساخته شده (نمای بیرونی و داخلی دستگاه) در این تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق شکل یک میله استیل که در داخل یک استوانه پیرکس قرار گرفته است الکترود مرکزی را تشکیل می‌دهد. الکترود دوم یک فویل آلومینیومی است که حول استوانه پیرکس پیچیده شده است. الکترود مرکزی باید کاملاً به صورت متقارن در مرکز عایق پیرکس واقع شود. هرگونه عدم تقارن در قرارگیری الکترود مرکزی منجر به تشکیل پلازما تنها در یک سمت لوله شده و در نتیجه بخشی از گاز عبوری تحت تاثیر پلازما قرار نمی‌گیرد. هوا و گاز دی‌اکسید گوگرد از یک سمت استوانه وارد شده و بین الکترود مرکزی و عایق پیرکس شارش می‌کند و از انتهای لوله خارج می‌شود. طول مسافتی که گاز از بدو ورود تا لحظه خروج از فضای DBD طی می‌کند ۱۵ سانتی‌متر، فاصله شعاعی بین الکترود مرکزی و قسمت داخلی لوله پیرکس ۳ میلی‌متر و ولتاژ اعمالی به الکترودها ۱۵ کیلوولت با فرکانس ۳۰ کیلوهرتز است.



شکل (۱) (راست بالا) شماتیک سیستم تخلیه سددی الکتریک (DBD) (چپ بالا) تصویر نمای کلی دستگاه (پایین چپ و راست) تصاویری از تشکیل پلازما در کانال



در بخش ورودی گاز، هوا از یک سمت و دی‌اکسیدگوگرد از سمت دیگر وارد لوله شده و پیش از ورود به محفظه با یکدیگر مخلوط می‌شوند. دستگاه تشخیص‌گر گاز در ورودی و خروجی محفظه DBD میزان گاز SO_2 را اندازه‌گیری می‌کند. با تشکیل پلاسما به دلیل وجود ذرات پر انرژی در فضای تخلیه، علاوه بر الکترون‌ها و یون‌ها گونه‌های مختلفی از رادیکال‌های آزاد نیز تولید می‌شوند. از جمله این رادیکال‌ها می‌توان به O^* ، OH^* و N^* اشاره کرد. وجود انواع رادیکال‌ها و درصد مولی آن‌ها وابسته به نوع گاز و ترکیبات هوای ورودی است. به طور مثال با افزایش رطوبت هوا میزان رادیکال OH در فضای DBD افزایش می‌یابد. این رادیکال‌های تولید شده با اکسیدهای گوگرد به صورت زیر واکنش داده و اسید سولفوریک تولید می‌کنند.

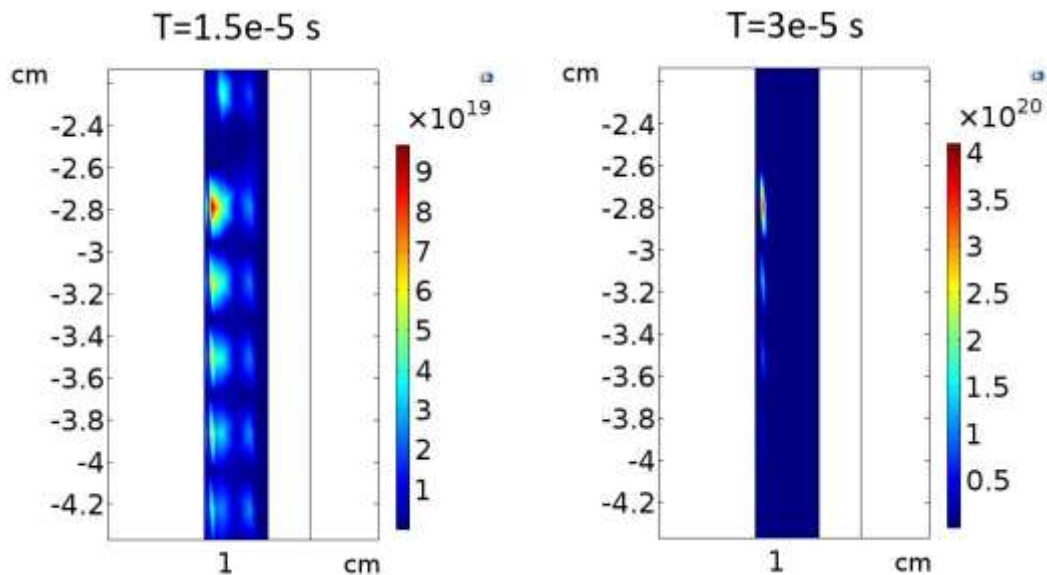


اسید سولفوریک تولید شده را می‌توان به روش‌های مختلف از گاز خروجی از محفظه تخلیه سد دی‌الکتریک حذف کرد. یکی از روش‌ها این است که گاز خروجی پیش از رها سازی به محیط از داخل یک چگالنده عبور کرده و اسید میعان یافته با ترکیب با یک قلیا به نمک تبدیل شده و قابل آزاد سازی در محیط باشد.

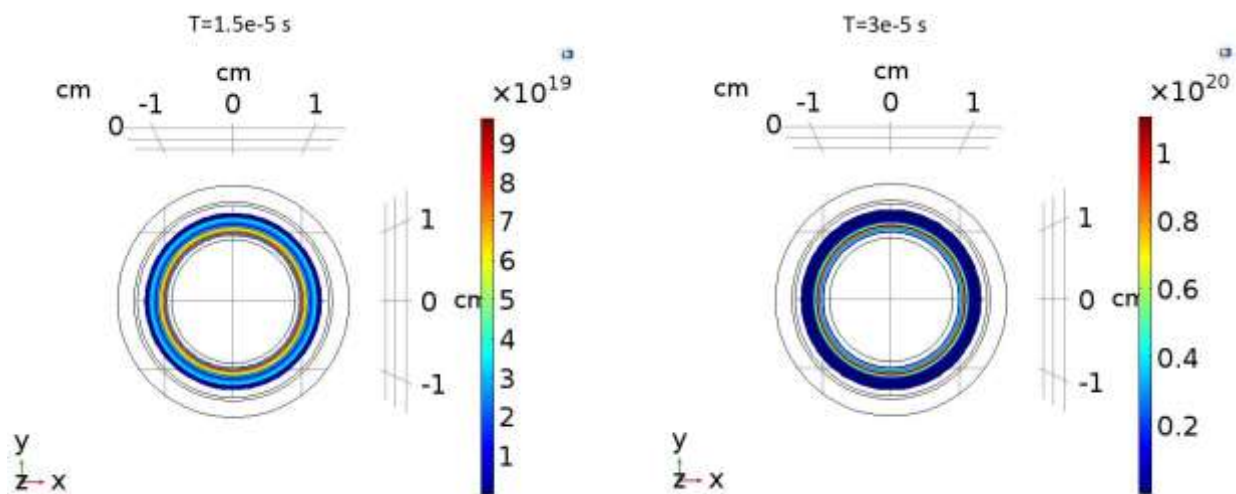
نتایج و مباحث:

نتایج شبیه‌سازی:

یکی از نرم‌افزارهایی که سیستم‌های پلاسمایی را به طور کامل شبیه‌سازی می‌کند نرم‌افزار Comsol Multiphysics است. با استفاده از این نرم‌افزار سیستم تخلیه دی‌الکتریک را به همراه شارش هوا و گاز دی‌اکسیدگوگرد به داخل آن شبیه‌سازی نموده و میزان تجمع گاز SO_2 را در قسمت‌های مختلف محاسبه نموده‌ایم. برای شبیه‌سازی دو ماژول پلاسما و دینامیک سیالات با حالت شارش لمینار را انتخاب و با یکدیگر تلفیق نموده‌ایم. برای شبیه‌سازی طول استوانه تخلیه را ۳۰ سانتی‌متر فرض کرده‌ایم تا طول بهینه برای حذف دی‌اکسیدگوگرد را بیابیم. میزان تجمع گاز را در طول ۱۵ سانتی‌متر که طول دستگاه آزمایشی است اندازه گرفته و میزان آن را با مقدار تجربی مقایسه نموده‌ایم. هوا با در صد ترکیب ۷۸/۱ درصد نیتروژن، ۲۱ درصد اکسیژن و ۰/۹ درصد آرگون فرض شده است. واکنش‌های در نظر گرفته شده شامل پراکندگی کشسان با الکترون برای هر گاز، برانگیختگی (مرتب ی اول)، یونیزاسیون و اندرکنش‌های شیمیایی می‌باشد.



شکل (۲) چگالی پلاسما در بخشی از طول کانال در دو زمان مختلف



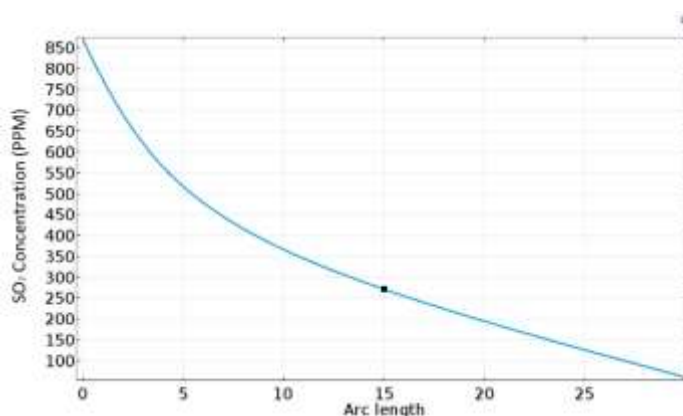
شکل (۳) چگالی پلاسما در یک برش عرضی از کانال تخلیه در دو زمان مختلف

شکل (۲) چگالی پلاسما در بخشی از طول استوانه تخلیه در دو زمان متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نیز قابل مشاهده است چگالی الکترونی با تناوب ولتاژ در بین دو الکتروود نوسان می‌کند اما به دلیل عدم برابر سطح دو الکتروود



در ساختار DBD استوانه‌ای همواره چگالی در مجاورت الکتروود مرکزی بیشتر می‌باشد. دلیل دیگر تجمع چگالی الکترونی در نزدیکی الکتروود مرکزی این است که پلاسما مستقیماً با سطح فلزی الکترون مرکزی در تماس است؛ اما در لایه بیرونی پلاسما با سطح دی‌الکتریک در تماس است و ضریب گسیل الکترون ثانویه از سطح فلز بیشتر از سطح پیرکس می‌باشد. شکل (۳) همین مقادیر را در یک برش عرضی از پلاسما نشان می‌دهد.

شکل (۴) میزان تجمع گاز SO_2 را از ابتدای ورود گاز به محفظه تا لحظه خروج نشان می‌دهد. همان طور که پیشتر اشاره شد شبیه‌سازی برای طول استوانه ۳۰ سانتی‌متری انجام شده است. مطابق این شکل تجمع گاز از 870 ppm در ابتدای لوله تا 60 PPM در انتهای لوله افت کرده است. برای مقایسه مقدار حاصل از شبیه‌سازی با مقدار تجربی، میزان تجمع گاز در طول ۱۵ سانتی‌متری را در نظر می‌گیریم (طول مسیر گاز در داخل پلاسما در آزمایش تجربی ۱۵ سانتی‌متر بوده است) که در شبیه‌سازی پس از طی ۱۵ سانتی‌متر تجمع گاز به میزان 270 PPM رسیده است.



شکل (۴) تغییرات میزان تجمع گاز دی‌اکسید گوگرد در طول استوانه

نتایج تجربی:

در این آزمایش ترکیبی از هوا و گاز دی‌اکسید گوگرد (SO_2) را با تجمع 868 PPM با دبی حدود $95 \text{ mm}^3/\text{s}$ وارد دستگاه DBD کرده و خروجی آن را توسط دستگاه آنالایزر Testo ۳۵۰ اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار داده‌ایم. دبی گاز به گونه

Mg/m^3



ای تنظیم شده است که گاز ورودی در کمتر از ۵ ثانیه تمام طول لوله را بپیماید. میزان تجمع گاز مورد نظر در ورودی (پیش از اعمال پلاسما) و خروجی (پس از اعمال تخلیه پلاسما) در سه مرتبه آزمایش و سپس به طور میانگین در جدول (۱) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول میزان تجمع گاز SO_2 از میزان ۸۶۸ PPM به میزان ۳۰۳ PPM تقلیل یافته است که نشان دهنده حذف ۶۵٪ از میزان اولیه می‌باشد. نتیجه حاصله با شبیه‌سازی انجام شده سازگاری بسیار خوبی داشته که در شبیه‌سازی در خروجی لوله (در طول ۱۵ سانتی‌متری که بر روی نمودار شکل ۴ علامت گذاری شده است) حدود ۲۷۵ ppm گاز دی‌اکسید گوگرد داریم. بر اساس تحقیق هانگبین و همکارانش در سال ۲۰۰۲ نشان داده شده است که می‌توان میزان تضعیف را با افزودن رطوبت فضای بین دو الکترود افزایش داد. افزودن رطوبت هوا باعث افزایش رادیکال $OH^\bullet$ در پلاسما می‌شود. [5]

جدول (۱) میزان تجمع گاز دی‌اکسید گوگرد پیش از ورود به دستگاه تخلیه سد خازنی و پس از آن (PPM)

محل نمونه برداری	شماره آزمایش			میانگین
	۱	۲	۳	
قبل از ورود به دستگاه	۸۷۰	۸۶۳	۸۶۸	۸۶۷
خروجی دستگاه	۳۱۰	۳۰۵	۲۹۵	۳۰۳

همین روش را می‌توان برای از بین بردن سایر آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسید نیتروژن نیز به کار برد که در مجموعه تحقیقات آتی بدان پرداخته خواهد شد. تنها چالش موجود چگونگی حذف مواد ترکیبی تولید شده می‌باشد که برای آلاینده‌های مختلف متفاوت است اما سیستم تخلیه پلاسمایی برای همه آنها مشترک بوده و وجود یک دستگاه برای حذف تمامی آلاینده‌های کافی است.

نتیجه گیری:



بر اساس نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام شده با توجه به این که آزمایش در شرایط بهینه انجام نشده است، میزان ۶۵ درصد در آلاینده دی‌اکسید گوگرد کاهش مشاهده شده که بسیار قابل توجه است. با استناد به شبیه‌سازی انجام شده و مطابقت آن با نتایج آزمایش پیش بینی می‌شود با افزایش طول کانال تخلیه می‌توان تا بیش از ۹۰ درصد تجمع گاز را کاهش داد. چنانچه یک سیستم چگالنده در خروجی نصب شود اسید تولید شده را نیز می‌توان به طور کامل از چرخه خارج کرد. بر اساس تحقیقات انجام شده با افزایش رطوبت فضای دستگاه می‌توان میزان تضعیف را افزایش داد که در این صورت می‌توان در طول کوتاه‌تر نیز تجمع گاز را تا حد دلخواه کاهش داد که نیازمند بررسی‌های بیشتر جهت یافتن طول بهینه و درصد رطوبت مورد نیاز است. به راحتی می‌توان از این دستگاه در تمامی کارخانه‌ها و مراکز صنعتی که مولد آلاینده‌ها هستند استفاده کرد. برای استفاده از این دستگاه در خودروها باید قسمت‌های مکانیکی و الکترونیکی به شکلی طراحی شوند که دستگاه قابل نصب بر روی خروجی اگزوز اتوموبیل باشد. علاوه بر حذف آلاینده دی‌اکسید گوگرد، حذف سایر ترکیبات گوگرددار و نیتروژن‌دار نیز با این روش میسر است.

منابع:

1. S. Geravandi et al, "Sulfur dioxide pollutant and its effects on disease incidence and death among the citizens of Bushehr city" Iran South Med J 2016; 19(4): 598-607.
2. WHO. Health aspect of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Bonn, Germany: World Health Organization; 2003 Jan.
3. Anttila P, Tuovinen J. Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994-2007. Atmospheric Environment 2010; 44(1):30-41
4. Heejoon Kim et al, "Simultaneous Removal of NO_x and SO₂ by a Nonthermal Plasma Hybrid Reactor" Energy Fuels, 2007, 21 (1), pp 141–144, DOI: 10.1021/ef060067t, November 24, 2006
5. Hongbin Ma et al, "Study of SO₂ Removal Using Non-thermal Plasma Induced by Dielectric Barrier Discharge (DBD)" Plasma Chemistry and Plasma Processing June 2002, Volume 22, Issue 2, pp 239–254
6. Ulrich Kogelschatz, "Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications" Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1, March 2003 (□ 2003)
7. Bormashenko. B et al, "Processing seeds by cold plasma treatment to reduce an apparent contact angle of seeds coat surface", WO 2013168038 A1.
8. 3. Jiafeng J. et al, "Effect of Cold Plasma Treatment on Seed Germination and Growth of Wheat" Plasma Science and Technology, 16 (1).



بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۲۱ اسفندماه ۱۳۹۲ - دانشگاه آزاد اسلامی (واحد بوشهر)



9. Syed Zaid Ali, (2016), “Computational modeling of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Aerospace Flow control applications”, Master of Science Thesis, Faculty of Aerospace Engineering (LR): DELFT University of Technology.