



## حذف مونوکسید کربن به روش پلاسمای سرد

مریم برهانی جلی<sup>۱</sup>، فریده گلبابایی<sup>۲</sup>، عطا ملک قربان زاده<sup>۳</sup>، رسول یاراحمدی<sup>۴</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۶

تاریخ ویرایش: ۹۴/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۲۹

### چکیده

**زمینه و هدف:** امروزه پلاسمای سرد به عنوان یک فناوری نوظهور موفق و امیدبخش در زمینه کنترل آلودگی هوا با راندمان انرژی بالا مورد توجه قرار گرفته است. آلودگی‌های اتمسفری در شکل‌های مختلف بر سلامت انسان و محیط‌زیست در سطح منطقه‌ای و جهانی اثرگذار است. مونوکسید کربن نیز به عنوان یکی از آلاینده‌های شاخص مؤثر بر سلامت انسان و محیط‌زیست معرفی شده است. نگرانی‌های فزاینده چگونگی اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان از سویی و ملاحظات و سخت‌گیری بیشتر استانداردهای کیفیت هوا از سوی دیگر سبب شده تا در سال‌های اخیر، تکنیک‌های کنترل آلودگی هوا به‌ویژه تکنیک‌های پلاسمای سرد به‌منظور کنترل انواع آلاینده‌های گازی مورد توجه و مطالعه بیشتری قرار گیرد. به همین منظور فرایند حذف این آلاینده جهت شناخت پارامترهای مؤثر در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون هدف این مطالعه قرار گرفته است.

**روش بررسی:** از این‌رو در این آزمایش‌های بررسی اثرات ناشی از متغیرهای دما، غلظت گاز مونوکسید کربن (CO)، ولتاژ و زمان ماند آلاینده CO به‌صورت هم‌زمان در دو سیستم، راکتور پلاسمای منفی (گاز رقیق‌کننده هوای خشک) و سیستم راکتور پلاسمای مثبت (گاز رقیق‌کننده آرگون) با استفاده از روش ASTM ۵۸۳۵D مورد سنجش و مطالعه قرار گرفته است.

**یافته‌ها:** نتایج حاصل نشان می‌دهد متغیر دما و زمان ماند بر حذف آلاینده مونوکسید کربن به ترتیب در سیستم هوای خشک و گاز آرگون، در محدوده آزمایشی چندان اثر قابل توجهی ندارد. در صورتی که مهم‌ترین عامل اثرگذار بر میزان حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون متغیر ولتاژ مصرفی راکتور پلاسمای در محدوده ۸ کیلوولت با  $p < 0.05$  در هر دو سیستم و میانگین اثر ۳۷ در سیستم هوای خشک و میانگین اثر ۱۳/۲ در سیستم گاز آرگون می‌باشد. **نتیجه‌گیری:** نتایج حاصل از حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم نشان می‌دهد سیستم هوای خشک به علت حضور یون‌های فعال اکسیژن بسیار مؤثرتر از سیستم گاز آرگون عمل می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** حذف مونوکسید کربن، پلاسمای سرد، پلاسمای مثبت، پلاسمای منفی.

### مقدمه

از محیط‌زیست آمریکا (Environmental Protection Agency (EPA)، مونوکسید کربن به همراه ازن، دی‌اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، ذرات معلق با قطر ۱۰ میکرومتر، و سرب؛ به‌عنوان آلاینده‌های "شاخص" مؤثر بر سلامت انسان و محیط‌زیست معرفی شده‌اند. نگرانی فزاینده چگونگی اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان از سویی و ملاحظات و سخت‌گیری بیشتر استانداردهای کیفیت هوا از سوی دیگر سبب شده تا در سال‌های اخیر، تکنیک‌های کنترل آلودگی هوا به‌ویژه تکنیک‌های پلاسمای سرد به‌منظور کنترل انواع آلاینده‌های گازی مورد توجه و مطالعه بیشتری قرار گیرد (۱-۱۰).

سرعت مرگ‌ومیر ناشی از آلودگی محیطی بیش از سرعت صنعتی شدن است. به‌گونه‌ای که امروزه آلودگی هوای محیط‌های بسته و باز ششمین علت مرگ‌ومیر در جهان شناخته شده است. امروزه مسئله آلودگی هوا و به‌ویژه سهم انتشارات وسایط نقلیه در این آلودگی توجه بالایی را به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر رشد توقف‌ناپذیر ناوگان حمل‌ونقل جهانی آلودگی ناشی از این وسایط را افزایش داده و بیشتر مورد توجه قرار می‌دهد. در آخرین اصلاحیه استانداردهای کیفیت هوا (National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) منتشر شده توسط انجمن حفاظت

۱- کارشناس ارشد بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی ایران.

۲- استاد گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران.

۳- دانشیار گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران

۴- (نویسنده مسئول) دانشیار گروه بهداشت حرفه‌ای، عضو مرکز تحقیقات بهداشت کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران. yarahmadi.r@iums.ac.ir

پلازما- شیمیایی به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته اند. در حالی دی اکسید کربن، مونوکسید کربن هیدروژن و آب همگی به شکل ترکیبی از جریان خروجی منابع مولد آلودگی های اکسید کربنی در کنار یکدیگر وجود دارند (۲۰-۲۳). بررسی منابع منتشر شده نشان می دهد تعداد محدودی از مطالعات در زمینه چگونگی کاهش و تبدیل آلاینده مونوکسید کربن در حضور پلاسمای سرد انجام شده است، وجود نتایج مختلف گزارش شده از سوی محققان مبنی بر حذف آلاینده مونوکسید کربن در محیط پلازما و عدم وجود راندمان حذف قابل توجه و مناسب در حذف آلاینده مونوکسید کربن سبب شد به منظور شناخت مبانی و کلیات فنی و اجرایی، واکنش های تبدیل و حذف آلاینده مونوکسید کربن در شرایط پلازما مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد تا زیربنای محکم، اصولی و قابل اعتماد برای ادامه مسیر های بعدی باشد. از این رو هدف این تحقیق حذف آلاینده CO با استفاده از روش پلاسمای سرد به طور تجربی و آزمایشگاهی انتخاب شده است.

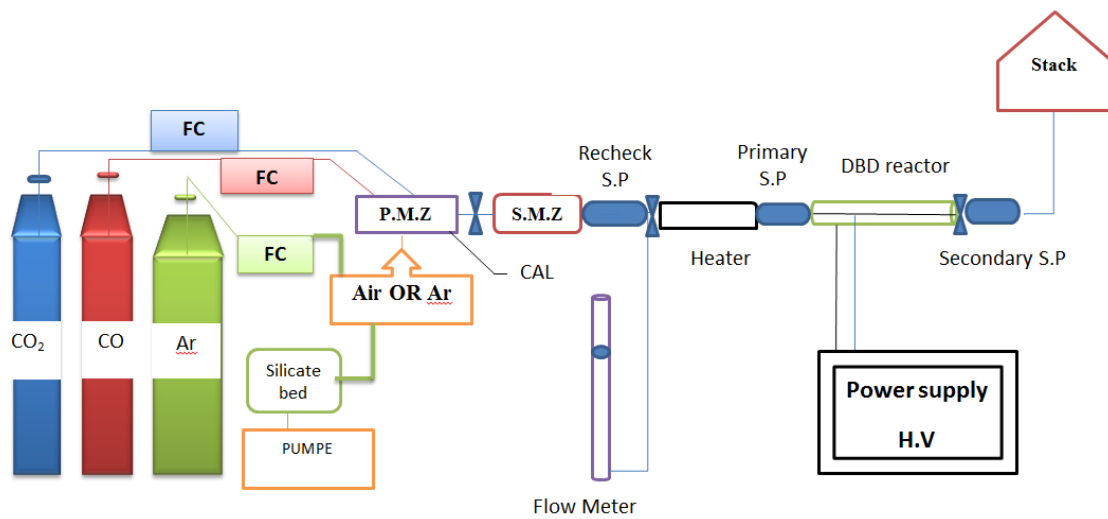
### روش کار

استوانه ای به طول ۱۶۲ میلی متر طول، ۱۳۲ میلی متر قطر و ۱/۱ میلی متر ضخامت از جنس پیرکس به منظور طراحی و ساخت راکتور مورد استفاده قرار گرفت. الکتروود داخلی در نقش کاتد از جنس سیم تنگستن با قطر خارجی ۱/۳۸ میلی متر و ۱۸۰ میلی متر طول با درجه خلوص ۹۸/۵٪ بکار برده شد. لایه ای از فویل مسی نیز در نقش آند سیلندر راکتور را احاطه نموده است (۲۴). سیستم تغذیه این آزمایش با استفاده از کپسول های مونوکسید کربن و دی اکسید کربن با درصد خلوص ۹۹/۹۹٪ صورت گرفته است. تنظیم جریان خروجی از کپسول با ثابت نگه داشتن دما و با استفاده از فلومتر انجام شد. استفاده از بسترهای سیلیکازلی مناسب به منظور کنترل رطوبت جریان ورودی در مسیر مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اختلاط کامل جریان ورودی متناسب با نسبت های مورد نظر در هر مرحله،

مونوکسید کربن یک گاز بدون بو، بدون رنگ و بدون طعم و سمی است. این گاز مهم ترین آلاینده ناشی از احتراق سوخت های فسیلی و بایومس بوده و در فرایند اکسیداسیون فتوشیمیایی هیدروکربن ها به عنوان آلاینده ثانویه تولید می شود. میزان تمایل هموگلوبین در بدن انسان به واکنش با مونوکسید کربن ۲۵۰ بار بیشتر از میزان تمایل آن به واکنش با اکسیژن گزارش شده است. این مطالعات ارتباط مستقیمی را میان مواجهه با مونوکسید کربن و بیماری های قلبی و تنفسی در افراد نشان می دهند. غلظت زمینه ی مونوکسید کربن در اتمسفر در گزارش دو سازمان سازمان جهانی بهداشت و انجمن حفاظت از محیط زیست آمریکا بین محدوده CO ۰/۱۲-۰/۰۵ ppm برآورد شده است. این در حالی است که انتشارات جهانی این گاز بر اساس ارزیابی های این دو سازمان در حدود  $10^9 \times 2/4$  تن در سال گزارش شده است (۲، ۹-۱۱، ۱۴).

گازی که به طور نسبی یا کامل یونیزه شده و حاوی الکترون ها، یون ها و اتم ها و مولکول های آزاد می باشد پلازما نامیده می شود. در محیط پلاسمای غیر حرارتی، درجه حرارت الکترون ها معمولاً بالا و در حدود چند ده هزار درجه کلوین است، در حالی که درجه حرارت اتم ها و مولکول های خنثی می تواند نزدیک به دمای اتاق باشد. به همین دلیل، واکنش های شیمیایی با ایجاد رادیکال های فعال و توسط این الکترون های پرانرژی شروع می شود. این روش به دلیل سادگی در فرایند تصفیه، پایین بودن هزینه های طراحی، ساخت و نگهداری، عدم نیاز به متعلقات پیچیده مکانیکی و شیمیایی در راکتور پلازما و از طرفی نو بودن فن آوری به یکی از تکنیک های امیدبخش کنترل آلودگی هوا با راندمان بالا تبدیل شده است (۱۵-۱۹).

بررسی مطالعات انجام شده باهدف حذف مونوکسید کربن با استفاده از روش پلازما و پلاسمای تلفیقی نشان می دهد، اکسیداسیون مونوکسید کربن و دی اکسید کربن به صورت جداگانه و در جریان های غنی از هیدروژن، متان و یا اکسیژن در راکتورهای



شکل ۱ - شماتیک چیدمان آزمایش

سنسورهای حرارتی تعبیه شده در دهانه ورودی راکتور پلاسما کنترل می‌گردد. دمای ورودی راکتور پلاسما توسط سنسورهایی با دقت  $0.1^{\circ}\text{C}$  اندازه گیری و کنترل می‌گردید. محدوده دمایی در این آزمایش‌های  $250 - 100$  درجه سانتیگراد انتخاب شد و تمامی آزمایش‌های در این محدوده دمایی انجام گردید (۲۶). از آنجایی که جریان هوای حاوی آلاینده‌ها با مشخصات فیزیکی و شیمیایی مشخص وارد محیط پلاسما می‌شود، عمل یونیزاسیون و تحریک مولکول‌ها، اتم‌ها و ذرات تحت تاثیر میدان و انرژی الکتریکی انجام می‌گردد. منبع تغذیه راکتور پلاسما یک مولد ۱۳ کیلو ولتی با حداکثر شدت ۲۰ میلی آمپر و حد تشخیص  $0.1$  میلی آمپر است. میزان ولتاژ مورد استفاده در این آزمایش در محدوده  $13 - 1$  Kv متغیر بود. در این مطالعه به منظور شناخت نقش عامل مؤثر بر راندمان تبدیل آلاینده گازی مونوکسید کربن برهم کنش چهار عامل اصلی دما، ولتاژ، زمان ماند و غلظت ورودی جریان حاوی آلاینده به راکتور به طور هم‌زمان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. هدف از این روش به دست آوردن اطلاعات و نتایج منطقی و دقیق به منظور شناخت عوامل مؤثر بر راندمان حذف این آلاینده با جریان حاوی ترکیباتی واقعی در دو سیستم

از دو محفظه اختلاط قبل از ورود جریان به راکتور استفاده شده است. شماتیک ساده ای از چیدمان آزمایش در شکل ۱ قرار داده شده است. جریان ورودی به سیستم با دو نوع گاز رقیق کننده هوای خشک و گاز آرگون مورد آزمایش قرار گرفت تا در نهایت نتایج حاصل مورد سنجش و مقایسه قرار گیرد. رطوبت نسبی جریان در محدوده  $7\%$  توسط بسترهای سیلیکاژل کنترل گردید. نسبت گاز  $\text{CO}/\text{CO}_2 = 1/1000$  در محدوده غلظت  $\text{CO}$  ppm  $150 - 20$  غلظت سازی شد. میزان حجم هوای ورودی پس از کنترل غلظت توسط روتامترهای کالیبره شده شرکت AIRFLOW تنظیم و سپس به واحد حرارتی هدایت می‌شد (۲۳، ۲۵). پس از عمل اختلاط در دو قسمت اختلاط اولیه ۱ و اختلاط ثانویه ۲ جریان حاوی آلاینده  $\text{CO}$  با حفظ میزان نسبت ورودی گاز  $\text{CO}/\text{CO}_2$  به داخل کوره حرارتی جهت تعادل حرارتی با زمان ماند مشخص تا  $250^{\circ}\text{C}$  گرم و سپس روی راکتور تزریق می‌گردید. نرخ حرارتی کوره توسط سیستم ترموکوپل ۳ و

1. Primary Mixing Zone (P.M.Z).
2. Primary Mixing Zone (P.M.Z).
3. Thermocouple (TC-1)

جدول ۱. نتایج آماری آنالیز چهار پایه

P value	سیستم گاز آرگون		p-value	سیستم هوای خشک		Df	متغیر پایه
	انحراف معیار	میانگین اثر		انحراف معیار	میانگین اثر		
۰/۰۲۴	۲۵/۱	۲/۶۹	۰/۱۶۶	۲۹/۲	۳۲/۳	۳	۱۰۰
	۲۱/۳	۲/۲۶		۲۶/۴	۳۲/۹		۱۳۰
	۱۵/۹	۶/۱۷		۲۴/۸	۳۱/۱		۱۶۰
	۱۳/۶	۱۰/۷۳		۲۵/۶	۲۴/۷		۲۰۰
۰/۰۰۰۱	۹/۷	-۷/۳۹	۰/۰۰۰۱	۱۶/۲	۲۸/۹	۳	۳
	۲۲/۷	۱۰/۴		۲۶/۲	۳۷/۹		۵
	۱۷/۹	۱۳/۲		۳۰/۲	۳۰/۲		۸
	۱۹/۷	۵/۴۸		۲۹/۹	۲۳/۸		۱۰
۰/۰۰۱	۱۷/۵	۹/۶۵	۰/۰۰۰۱	۲۵/۶	۱۹/۴	۳	۲۰
	۱۵/۶	۹/۵		۲۵/۸	۳۴/۴		۶۰
	۱۷/۵	۳/۷		۲۳/۱	۲۹		۱۰۰
	۲۵/۲	-۱		۲۸/۴	۲۸/۲		۱۴۰
۰/۶۳	۲۴/۵	۴/۱۷	۰/۰۰۰۱	۲۷/۵	۳۵/۶	۳	۰/۲
	۱۷/۹	۷/۴		۲۳/۳	۴۰		۰/۲۵
	۱۶/۶	۶/۴		۲۳/۸	۲۷/۵		۰/۳
	۱۹/۱	۳/۸		۲۶/۶	۱۷/۸		۰/۵

طرح آزمایش چهار پایه به صورت یکسان انجام شد. لازم به ذکر است که در مرحله تعیین محدوده فاکتورهای تحقیق در دو پایه، چهار فاکتور با تکرار سه بار، قبل و بعد از راکتور پلاسما و در مجموع دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون برابر ۱۹۲ تست اولیه انجام شده است. در این مرحله ضمن تایید تأثیر هر چهار فاکتور بر تبدیل تصفیه CO، سطوح متغیرها نیز ضمن بازنگری مجدد تثبیت و جهت آزمایشهای نهایی در چهار پایه آماده شد (جدول ۱).

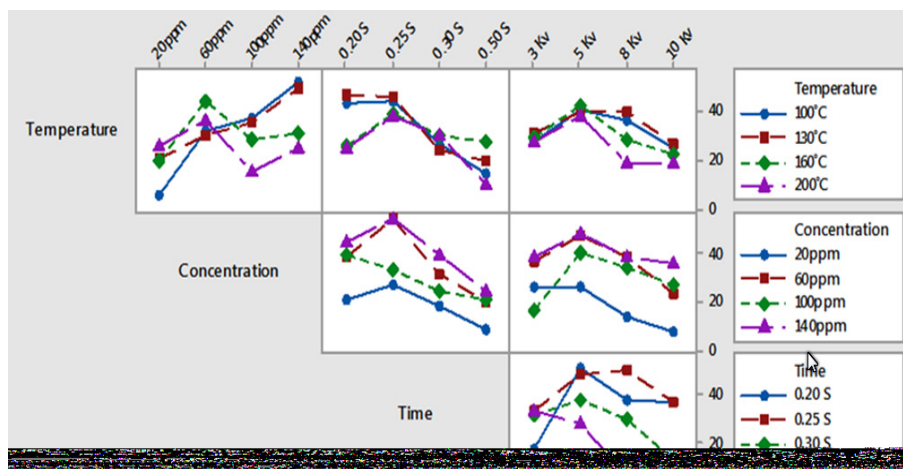
پس از انجام نمونه برداری ها راندمان حذف گاز مونوکسید کربن، اکسیدهای کربنی و انتخاب پذیری گاز اکسیژن و هیدروکربن ها به ترتیب با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید (۲۸-۳۱).

$$\eta_{CO} = \frac{CO_{in} - CO_{out}}{CO_{in}} \times 100 \quad (\text{معادله ۱})$$

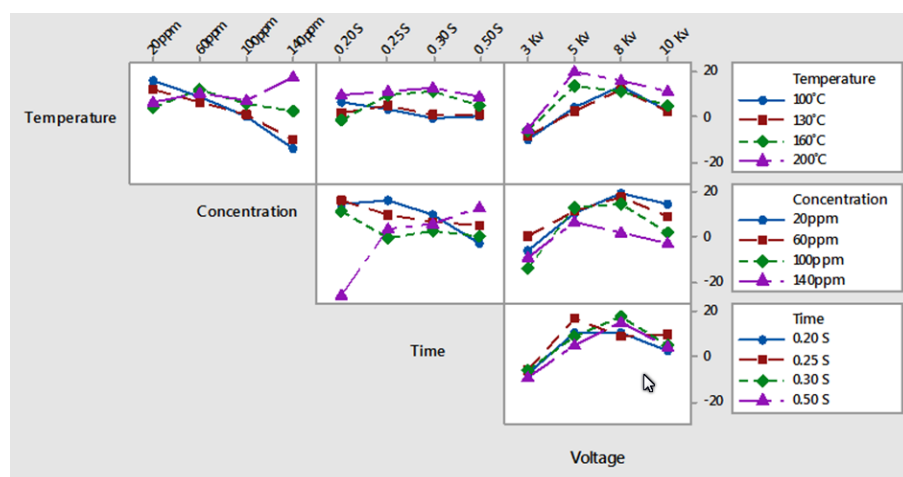
جایی که  $CO_{in}$  و  $CO_{out}$  به ترتیب میزان غلظت گاز مونوکسید کربن در ورودی و خروجی راکتور می باشد. در نهایت نتایج بدست آمده با استفاده از نرم افزارهای Minitab و با استفاده از آزمون های

گاز آرگون و هوای خشک با کمک یک طرح آزمایش کامل می باشد. لذا به منظور دستیابی به سطوح و محدوده مؤثر هر عامل طرح آزمایش در دو پایه انجام و سپس آنالیزهای (General linear) GLM (Model) انجام شد. بررسی نتایج این مطالعه با اندازه گیری میزان غلظت هر یک از گازهای مونوکسید کربن، دی اکسید کربن، اکسیژن و هیدروکربن ها در نقاط قبل و بعد از راکتور باهدف ارزیابی میزان حذف آلاینده مونوکسید کربن توسط دستگاه آنالیزکننده گاز قرائت مستقیم، Testo 360 مطابق با روش استاندارد ASTM D 5835 انجام شد (۲۷).

محدوده فاکتورهای مؤثر بر فرایند تبدیل گاز CO، به ویژه در تعیین سطح متغیرهای دما، ولتاژ، زمان ماند و غلظت ورودی گاز CO در برهمکنش مؤثر واکنش های تبدیل و تصفیه آلودگی مهم هستند و لذا به منظور تعیین محدوده مؤثر آزمایش های ابتدا باهدف تعیین رنج (Range finding) در دو سطح انجام و پس از آن آنالیزهای لازم در محدوده اختصاصی هر متغیر انتخاب و هدف تحقیق در دو سیستم بر اساس



شکل ۲. اثرات متقابل متغیرهای مورد مطالعه در سیستم هوای خشک



شکل ۳. اثرات متقابل متغیرها در سیستم گاز آرگون

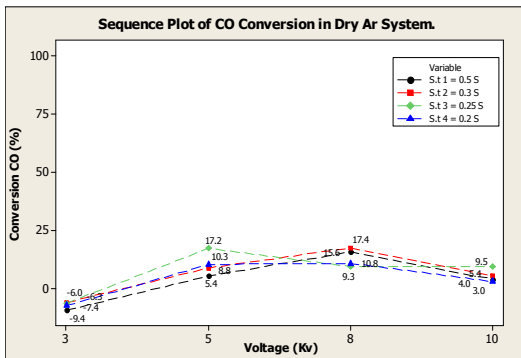
همچنین تأثیر متغیر زمان ماند بر راندمان تبدیل مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. تأثیر متغیر دما بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون در شکل‌های ۸ الی ۱۱ نشان داده شده است.

### بحث و نتیجه گیری

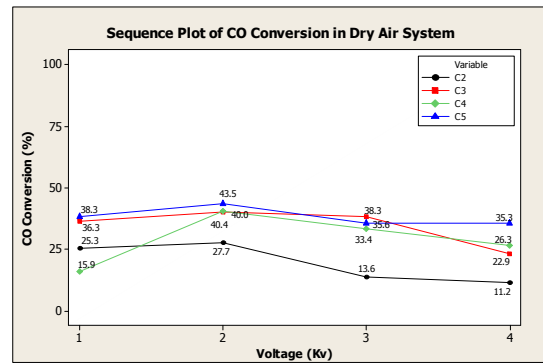
مدلهای آزمون فاکتوریل و آنالیز واریانس مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. در ادامه به تفسیر و بحث نتایج بدست آمده پرداخته شده است.

### یافته‌ها

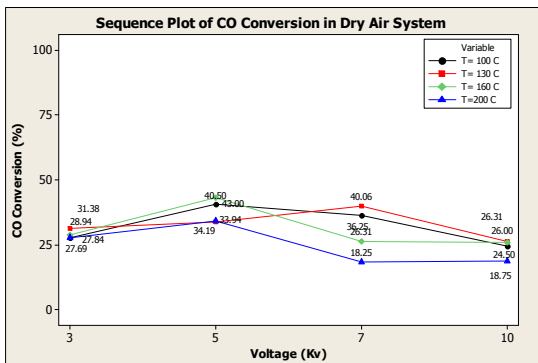
اثرات متقابل متغیرها بر راندمان حذف مونوکسید کربن در دو سیستم توسط آنالیزهای آماری GLM تعیین گردید؛ که در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است. تأثیر متغیر غلظت مونوکسید کربن بر تبدیل مونوکسید کربن در دو سیستم گاز آرگون و هوای خشک در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



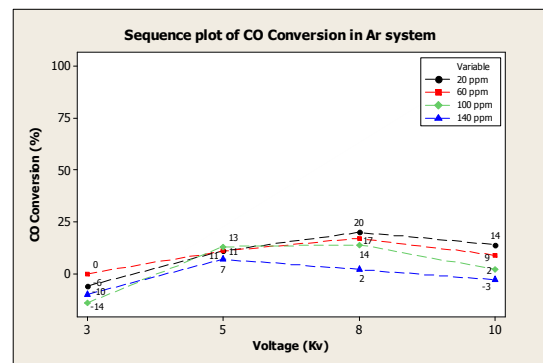
شکل ۷. تاثیر برهمکنش زمان ماند بر ولتاژ تخلیه در راکتور پلاسما سرد بر راندمان حذف CO در سیستم گاز آرگون



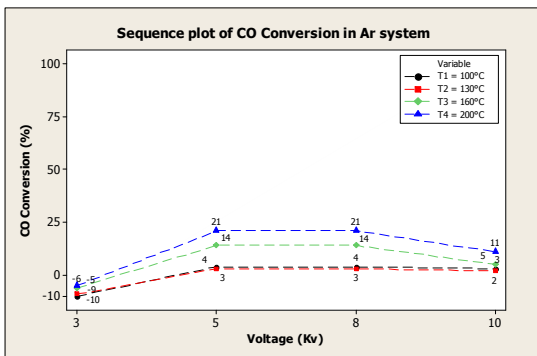
شکل ۴. تاثیر افزایش غلظت ورودی گاز CO برحسب تابعی از ولتاژ بر راندمان حذف CO در سیستم هوای خشک



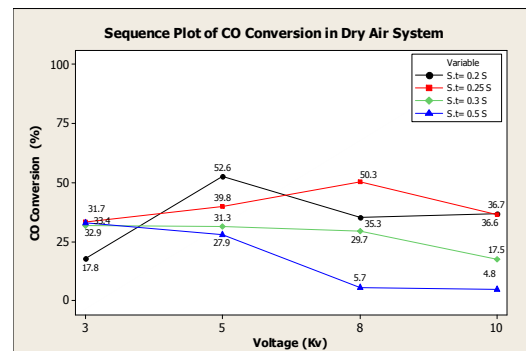
شکل ۸. تاثیر برهمکنش دما، ولتاژ مصرفی در راکتور پلاسما در سیستم هوای خشک بر راندمان تصفیه و تبدیل گاز CO



شکل ۵. تاثیر افزایش غلظت ورودی گاز CO برحسب تابعی از ولتاژ بر راندمان حذف CO در سیستم گاز آرگون



شکل ۹. تاثیر برهمکنش دما و ولتاژ مصرفی در راکتور پلاسما در سیستم گاز آرگون بر راندمان تصفیه و تبدیل گاز CO



شکل ۶. تاثیر برهمکنش زمان ماند بر ولتاژ تخلیه در راکتور پلاسما سرد بر راندمان حذف CO در سیستم هوای خشک

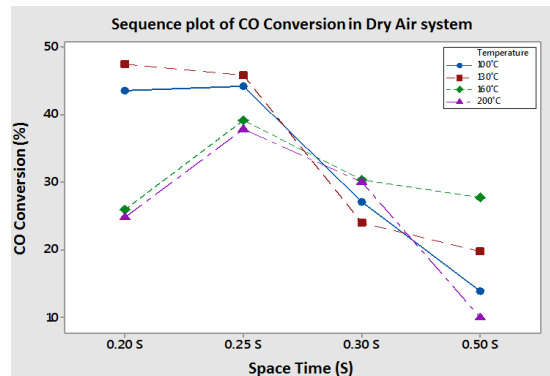
۱ مشخص شد مهم‌ترین عامل اثرگذار بر میزان حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون متغیر ولتاژ مصرفی راکتور پلاسما در محدوده ۸ کیلوولت و  $p < 0.05$  در هر دو سیستم و میانگین اثر

آنالیز نتایج آزمایش‌های حذف مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون در چهارپایه، با کمک نرم‌افزار Minitab و با آزمون‌های GLM تعیین شد (جدول ۱). با توجه به داده‌های ارائه‌شده در جدول

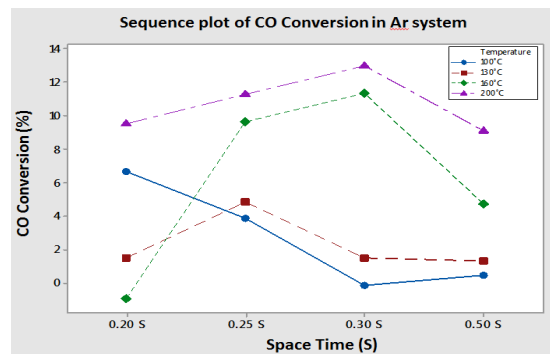
بیشتر مثبت گزارش داده‌اند. از این رو می‌توان عدم افزایش راندمان حذف مونوکسید کربن در حضور گاز آرگون را ناشی از عدم حضور گازهای اکسیدکننده‌ای همچون اکسیژن دانست (۲۰، ۲۳، ۳۲). برعکس، در سیستم هوای خشک، به دلیل تولید اتم‌ها و مولکول‌های اکسیژن تحریک‌شده، بخصوص حضور اکسیژن یکتا (singlet)، نرخ واکنش‌های شیمیایی بسیار سریع‌تر خواهد بود. چنین اثری در حضور اتم‌های آرگون امکان‌پذیر نیست (۳۰). آزمایش‌های انجام‌شده انتخاب‌پذیری هیدروکربن‌های تولیدشده را بسیار ناچیز نشان می‌دهد، به علت عدم حضور مولکول‌ها و ذرات آب در فرایند پلاسما ذرات مونوکسید کربن و ادار به واکنش با ذرات برانگیخته اکسیژن می‌گردند که این امر خود عاملی در تولید بیشتر گاز دی‌اکسید کربن می‌باشد. بررسی مطالعات انجام‌شده و نتایج حاصل از مطالعه Zheng و همکارانش تأیید کننده نتایج حاصل از مطالعه حاضر می‌باشد (۲۳).

اثر متغیر زمان ماند بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اثر کاهش زمان ماند در سیال رقیق‌کننده گاز آرگون قابل چشم‌پوشی است راندمان ۲۵٪ حذف گاز مونوکسید کربن متأثر از کاهش زمان ماند سیال به ۵۴٪ در سیستم هوای خشک می‌رسد. سبب افزایش قابل توجه ای در راندمان حذف مونوکسید کربن می‌گردد (شکل ۶ و ۷).

میانگین اثرات سطوح مختلف زمان ماند آلاینده در حذف گاز CO در سیستم هوای خشک نشان می‌دهد کاهش مدت‌زمان حضور گاز CO در راکتور بر میزان حذف آن مؤثر می‌باشد. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد همواره در بررسی حذف مونوکسید کربن در سیستم پلاسما یا پلاسما-کاتالیستی میزان هواگذر جریان سیستم (عامل مؤثر بر زمان ماند آلاینده درون راکتور) همواره ثابت فرض شده است. مطالعه Manasilp و همکارش در سال ۲۰۰۲ به‌عنوان تنها مطالعه‌ای که به بررسی اثر هواگذر جریان بر راندمان حذف گاز CO با استفاده از روش پلاسما و کاتالیست



شکل ۱۰. تاثیر برهمکنش دما، و زمان ماند در راکتور پلاسما در سیستم هوای خشک بر راندمان تصفیه و تبدیل گاز CO



شکل ۱۱. تاثیر برهمکنش دما، و زمان ماند در راکتور پلاسما در سیستم گاز آرگون بر راندمان تصفیه و تبدیل گاز CO

آماری ۳۷ در سیستم هوای خشک و با میانگین اثر آماری ۱۳/۲ در سیستم گاز آرگون می‌باشد. اثر غلظت ورودی واکنش‌دهنده‌ها بر عملکرد راکتور DBD، در دو سیستم با جریان گاز رقیق‌کننده هوای خشک و آرگون با غلظت ورودی گاز مونوکسید کربن (0.001-0.013 Vol%) و دی‌اکسید کربن (10-130 Vol%) در حذف گاز مونوکسید کربن نشان می‌دهد؛ در رقیق‌سازی با هوای خشک افزایش غلظت مونوکسید کربن اثر مثبتی را بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن و انتخاب‌پذیری گاز اکسیژن دارد (شکل ۴ و ۵). در تحقیقات مشابه توسط Manasilp وابستگی بالای راندمان حذف مونوکسید کربن به حضور گاز اکسیژن و همچنین Lundie و همکاران نیز اثر غلظت اکسیژن بیشتر را در تولید دی‌اکسید کربن

سرعت دادن به الکترون‌ها مصرف می‌شود و برای گرم کردن کل جریان گاز استفاده نمی‌گردد و در نتیجه دما در محدوده نزدیک به دمای اتاق باقی می‌ماند. بنابراین انتظار این است که یک محیط واکنشی فعال در دمای پایین ایجاد شود و مصرف انرژی به حداقل برسد (۳۳). در واقع کارایی و مؤثر بودن این روش را در مصرف انرژی پایین و جلوگیری از تشکیل محصولات فرعی غیر دلخواه در طی تجزیه و تبدیل آلاینده‌ها می‌دانند (۳۴).

نتایج حاصل از حذف گاز مونوکسید کربن در راکتور پلاسمای مثبت و منفی نشان می‌دهد حذف مونوکسید کربن در راکتور منفی راندمان بالاتری را نسبت به راکتور پلاسمای مثبت به ارمغان می‌آورد که این تفاوت بسیار قابل توجه است. بررسی مطالعات و نتایج حاصل نشان می‌دهد که حضور ذرات یونی و تحریک شده اکسیژن تولید شده در محیط پلازما نقش بسیار قابل توجهی را در اکسیداسیون گاز مونوکسید کربن داشته و عدم حضور این ذرات در سیستم پلاسمای آرگون منجر به راندمان پایین‌تر حذف گاز مونوکسید کربن می‌گردد.

از طرفی، در پلاسمای منفی که سیم (آند) راکتور به موج ولتاژ عمدتاً منفی متصل می‌شود، اثر بارفضایی که در اثر تحرک پذیری بالای الکترون‌ها به وجود می‌آید کمتر است و در نتیجه میدان الکتریکی در درون پلازما تضعیف نمی‌شود؛ اما اثر بارفضایی و تضعیف میدان در پلاسمای با موج مثبت شدیدتر و در نتیجه پلازما ضعیف‌تر بوده که متناظر با آن نرخ واکنش‌های شیمیایی نیز کاهش می‌یابند.

## منابع

1. Leray A., Khacef A., Makarov M., Cormier J.M. Diesel Oxidation Catalyst Combined to Non-Thermal Plasma: Effect on Activation Catalyst Temperature and by-products formation. 2011.
2. EPA. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) | Air and Radiation |

Pt/alumina پرداخته است، نشان می‌دهد کاهش زمان ماند آلاینده، کاهش راندمان را در پی دارد؛ که این امر می‌تواند ناشی از تفاوت بالایی که در محدوده انتخابی متغیر و حضور مؤثر کاتالیست در حذف گاز CO ناشی می‌شود، باشد. تأثیر زمان ماند آلاینده مونوکسید کربن در سیستم گاز آرگون نشان می‌دهد برخلاف سیستم هوای خشک و در مقایسه با سه فاکتور دیگر مورد مطالعه زمان ماند (تحت تأثیر حجم تخلیه) با  $p\text{-value} > 0.05$  در حذف گاز CO نقش قابل توجهی را به عهده ندارد (۲۰). اما دستیابی به نقطه تعادل در واکنش‌های دوطرفه گاز مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن نیازمند انجام مطالعات بیشتر است تا بتوان چگونگی روند تغییرات هر متغیر را بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن شناخت.

تغییرات دمایی مورد مطالعه بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم گاز آرگون و هوای خشک در شکل‌های ۱۱ - ۸ نشان می‌دهد، افزایش دما در دو سیستم آرگون و هوای خشک نتایج متفاوتی را ارائه می‌کند. استفاده از سیستم هوای خشک و افزایش دمای جریان درون سیستم، تغییرات و شیب کاهش کوچکی را در راندمان حذف گاز مونوکسید کربن نشان می‌دهد. در حالی که دیگر مطالعات انجام شده در حذف گاز مونوکسید کربن با استفاده از فرایندهای تلفیقی (کاتالیست - پلازما)، باهدف تعیین نقش دما در آزمایش‌های خود نقش مؤثر و بسیار قابل توجهی را نشان داده‌اند که از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه Mok و همکارش Kang اشاره کرد؛ که می‌تواند ناشی از وابستگی و ارتباط مستقیم دما در انجام هرچه بهتر واکنش‌های کاتالیستی از سویی و انتخاب پذیری بالای گاز هیدروژن در حضور گاز مونوکسید کربن باهدف متان سازی این گاز باشد؛ اما در مطالعات و مستندات منتشر شده یکی از مزیت‌های روش‌های پلازما عدم نیاز به دمای محیطی بالا برای برخوردهای غیر الاستیکی منتهی به واکنش‌های شیمیایی است. در واقع مهم‌ترین مزیت روش پلاسمای سرد این است که در آن انرژی برای





Akiyama H. Non-Thermal Plasma Technic for Air Pollution Control, Chapter 9. INTECH Open Access Publisher;2012.

17. Tendero C., Tixier Ch., Tristant P., Desmaison J., Leprince P. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B* 2006;61(4):2 - 30.

18. Podlinski J, Kocik M, Dekowski J, Mizeraczyk J. Velocity field measurements by PIV in a non-thermal plasma wire-to-plate reactor. In Proc. XIVth Symp. Appl. Plasma Process (pp. 13-18).

19. Yarahmadi R, Mortazavi SB, Omidkhah MR, Asilyan H., Moridi P. Examination of the Optimized Conditions for the Conversion of NOX Pollution in DBD Plasma Reactor. *Iran J Chem Chem Eng.* 2010; 29(1):23-32.

20. Manasilp A., E. G. Selective CO oxidation over Pt/alumina catalysts for fuel cell applications. *Applied Catalysis B. Environmental.* 2002; 37(2):17-25.

21. Mok. Y. S. KH-C, Lee. H.-J., Koh. D. J., and Shin D. N. Effect of Nonthermal Plasma on the Methanation of Carbon Monoxide over Nickel Catalyst. *Plasma Chem Plasma Process.* 2010;30:437-47.

22. Mok YS, Kang HC, Koh DJ, Shin DN, Baik JH. Nonthermal plasma-enhanced catalytic methanation of CO over Ru/TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *J Korean Physical Soc.* 2010;57(3):451-7.

23. Zheng G., Jiang J., Wu. Y., Zhang R., Hou. H. The Mutual Conversion of CO<sub>2</sub> and CO in Dielectric Barrier Discharge (DBD). *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2003;23(1):43-49.

24. Jwa E., Lee S.B., Lee H.W., Mok Y.S. Plasma-assisted catalytic methanation of CO and CO<sub>2</sub> over Ni-zeolite catalysts. *Fuel Processing Technology* 108 2013;108:89 - 93.

25. Sarayi A.T., Mansouri N. Determining of emission factors in automobile 405, the fifth Conference of Environmental Engineering, Tehran, Tehran University, Faculty of Environment, 1390.

26. Gonzales R. H., Engineer M. Diesel Exhaust Emission System Temperature Test. National Technology & Development Program. 2008.

27. Fornes TD, Hunter DL, Paul DR. Nylon-6 nanocomposites from alkylammonium-modified clay: the role of alkyl tails on exfoliation. *Macromolecules.* 2004 Mar 9;37(5):1793-8.

28. Chang. C. L. Elimination of Carbon

US EPA , <http://www.epa.gov/air/criteriahtml>, Last updated on 13/7/2014.

3. Kašpar J., Fornasiero P., Hickey N. Automotive catalytic converters: current status and some perspectives. *Catalysis Today.* 2003;77:419-49.

4. Hickey N., Boscarato I., J. K. Air Pollution from Mobile Sources: Formation and Effects and Abatement Strategies. G Cao and R Orru` (eds), *Current Environmental Issues and Challenges*, Springer Science+Business Media Dordrecht 2014. 2014.

5. Federal Register. Environmental protection Agency, Air quality Designation and Classifications, Final Rule. 1991; 56( 215).

6. EPA. An Introduction to Indoor Air Quality (IAQ), Carbon Monoxide (CO). Carbon Monoxide (CO) | Indoor Air | US Environmental Protection Agency (EPA), <http://www.epa.gov/iaq/co/html>, Accessed:14/11/2013.

7. WHO. Carbon monoxide. WHO Regional Office for Europe Copenhagen Denmark, *Air Quality Guidelines - Second Ed.* Chapter 55. 2000.

8. Goudarzia Gh., Mohammadib M. J., Angalic K. A., Neisia A. K., Babaeia A. A., Mohammadid B., et al. Estimation of Health Effects Attributed to NO<sub>2</sub> Exposure Using AirQ Model. *Arch Hyg Sci.* 2012;1(2):59-66.

9. Jacobson M. Z. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy Environ Sci.* 2009; 2:148-73.

10. Pstnote (parliamentary Office of Science and Technology), *Air Quality in the UK*, Number 188, November 2002.

11. EPA. Air Quality Criteria for Carbon Monoxide. 600/P-99/001F.2000. Accessed 20/07/2014.

12. EPA. Carbon Monoxide Emissions. EPA - ROE - A-Z Indicators List - Carbon Monoxide Emissions. Accessed 24/7/2014.

13. Burtis C. A., Ashwood E. R., Bruns D. E. *Tietz Textbook of Clinical Chemistry and Molecular Diagnostics.*, Fifth Ed. chapter 35, *Clinical Toxicology, Carbon Monoxide.* NY. Saunders Elsevier. 2012.

14. Industrial Accident Prevention Association (IAPA), *Carbon Monoxide in the workplace.* WHO; Fact Sheet No. 3132008.

15. Yarahmadi R., Mortazavi. SB., et al. Review of effective Factors in the treatment of nitrogen oxides in a cold plasma reactor, *Environ Sci and Tech J.* 2008.11:26-39. (Persian)

16. Matsumoto T., Wang D., Namihira T.,



Monoxide in the Gas Streams by Dielectric Barrier Discharge Systems with Mn Catalyst. *Plasma Chem Plasma Process.* 2005; 25(4):123-9.

29. Hwang. B. B. YYK, Na. B. K. Conversion of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> to Syngas and Higher Hydrocarbons Using Dielectric Barrier Discharge. *Korean J Chem Eng.* 2003;20(4):631 - 4.

30. Mahammadunnisa Sk., Manoj Kumar Reddy P., Linga Reddy E., Subrahmanyam. C. Catalytic DBD plasma reactor for CO oxidation by in situ N<sub>2</sub>O decomposition. *Catal Today* 2013;211(2): 53-7.

31. Subrahmanyam Ch., Renken A., Kiwi-Minsker L. Novel Catalytic Dielectric Barrier Discharge Reactor for Gas-Phase Abatement of Isopropanol. *Plasma Chem Plasma Process.* 2007; 27:13 - 22.

32. Eliasson B, Hirth M, Kogelschatz U. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 1987 Nov 14;20(11):1421.

33. Magureanua M. PD, Mandachea N. B., Pârvulescub V. I., Pârvulescuc V., and Cojocarub B. In situ study of ozone and hybrid plasma Ag-Al catalysts for the oxidation of toluene: Evidence of the nature of the active sites. *Appl Catal B: Environmental.* 2011;104:84-90.

34. Subrahmanyam Ch., Renken A., Kiwi-Minsker L. Novel catalytic non-thermal plasma reactor for the abatement of VOCs. *Chem Eng J.* 2007;134:78-83.

## Elimination of carbon monoxide using non-thermal plasma technique

Maryam Borhani Jebeli<sup>1</sup>, Farideh Golbabaei<sup>2</sup>, Atamalek Ghorbanzadeh<sup>3</sup>, Rasoul Yarahmadi<sup>4</sup>

Received: 2015/08/20

Revised: 2015/12/01

Accepted: 2016/03/06

### Abstract

**Background and aims:** Non-thermal plasma is considered as a successful new technology with high efficiency in the air pollution control. Various types of atmospheric pollutants adversely influence on the human health and the environment regionally and globally. Carbon monoxide has been introduced as a critical pollutant which can cause the environmental and health effects. The growing concerns about effects of air pollution on human health, and also more stringent strategies of choosing the air quality standards, have motivated the development of air pollution control techniques, particularly the non-thermal plasmas techniques. Therefore, the aim of this study is the removal of the carbon monoxide (CO) contaminants in the dry air and argon atmospheres in order to determine of the effective parameters.

**Methods:** The current study has determined the effects of temperature, the CO concentration, the voltage and the residence time on the CO elimination efficiency by ASTM D 5835 method in the system of negative plasma reactor (diluted by dry air) and the system of positive plasma reactor (diluted by argon gas), simultaneously.

**Results:** The results indicated that the temperature and the residence time did not have a significant effect on the CO removal in the both dry air and argon gas systems. However, the most important variable in the both systems was the voltage in the vicinity of 8 kilovolts with the  $p < 0.05$  and the mean effect of 37 and 13.2 in the dry air and argon gas systems, respectively.

**Conclusion:** The results of CO elimination in the dry air and argon atmosphere indicate that the dry air system, due to present of the oxygen active ions, has better performance compared to the argon gas system.

**Keywords:** Elimination, Carbon monoxide, Non-thermal plasma, Positive plasma, Negative plasma

1. MSc of Occupational Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

2. Professor, Department of Occupational Health, Faculty of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

3. Associate Professor in Physics, Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran.

4. (**Corresponding author**) Associate Professor, Department of Occupational Health, Member of Occupational Health Research Center, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. yarahmadi.r@iums.ac.ir