



دانشگاه محقق اردبیلی  
دانشکده‌ی علوم  
گروه آموزشی فیزیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد  
در رشته‌ی فیزیک گرایش اتمی و مولکولی زمینه پلاسما

### عنوان:

**ساخت پروب پلاسمای سرد جهت استفاده در پلاسمای پزشکی**

استاد (اساتید) راهنما:  
دکتر ناصر سپهری جوان  
دکتر حمیدرضا قمی

استاد (اساتید) مشاور:  
دکتر اسد الله اسدی  
دکتر عزت نوری

پژوهشگر:  
حسام عبدالحسین نیا

زمستان ۹۵

نام خانوادگی دانشجو: عبدالحسین نیا	نام: حسام
عنوان پایان نامه: ساخت پروب پلاسمای سرد جهت استفاده در پلاسمای پزشکی	
استاد (اساتید) راهنما: دکتر ناصر سپهری جوان و دکتر حمیدرضا قمی استاد (اساتید) مشاور: اسدالله اسدی و دکتر عزت نوری	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: فیزیک
گرایش: اتمی و مولکولی زمینه پلاسما	دانشگاه: محقق اردبیلی
دانشکده: علوم	تاریخ دفاع: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰
تعداد صفحات: ۸۲	
چکیده:	
<p>با توجه به اهمیت بحث باکتری زدایی در دنیای امروز و از طرفی شیوع سریع عفونت‌ها و مقاوم شدن باکتری‌ها به درمان‌های متداول، یافتن روشی نوین که کارآمد و سریع‌تر از روش‌های سنتی گذشته باشد بسیار با اهمیت است. حدود دو دهه است که استفاده از پلاسما در باکتری زدایی به عنوان روشی اثر گذار معرفی شده است و تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در حال انجام است. هر چند هنوز از ابزاری کارآمد برای باکتری زدایی فاصله‌ی زیادی است و لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. در این پایان نامه به طراحی و ساخت پروب پلاسمای سرد به روش تخلیه سد دی الکتریک و بررسی اثر آن بر روی باکتری‌ها پرداخته شده است. برای این منظور منبع تولید پلاسما تخلیه سد دی الکتریک ( DBD ) طراحی و ساخته شد. برای تولید پلاسما از منبع تغذیه ولتاژ بالا متناوب پالسی استفاده گردید. برای مطالعه اثر پلاسما بر باکتری‌ها، اشرشیا کولای انتخاب شد. این باکتری از حیث اهمیت در عفونت‌های بیمارستانی، صنایع غذایی و بیماری‌های زایی جایگاه ویژه‌ای دارد. لذا موفقیت در غیر فعال کردن این باکتری می‌تواند نتایج امیدوار کننده‌ای درباره‌ی سایر باکتری‌ها بدهد. همچنین آزمایش‌هایی به منظور مطالعه مکانیسم غیر فعال کردن باکتری‌ها با روش پلاسما سرد طراحی و انجام شد، که بحث و نتایج آن نیز درج گردیده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که استفاده از پلاسما سرد ابزاری موثر در غیر فعال کردن باکتری‌ها می‌باشد. ذرات باردار در پلاسما، رادیکال‌های آزاد و عوامل فعال شده را نیز می‌توان به عنوان پارامترهای اصلی و اثر گذار در باکتری زدایی به شمار آورد.</p>	
کلمات کلیدی: استرلیزاسیون، اشرشیا کولای، پلاسمای اتمسفری، پلاسمای سرد، تخلیه سد دی الکتریک، تخلیه کرونا	

## فهرست مطالب

شماره و عنوان مطالب	صفحه
فصل اول: .....	۱
تدریس و کمیته پژوهش .....	۱
۱-۱ پیشگفتار .....	۲
۲-۱: منابع و مفاهیم .....	۴
۱-۲-۱ پلاسمای گرم .....	۴
۲-۲-۱ پلاسمای سرد .....	۴
۳-۱- تقسیم بندی پلاسمای اتمسفری سرد .....	۵
۴-۱ تخلیه‌ی الکتریکی .....	۶
۱-۴-۱ تخلیه‌ی الکتریکی در پلاسما .....	۸
۱-۴-۱-۱ مکانیسم تاونزند در شکست الکتریکی و منحنی پاشن .....	۸
۱-۴-۱-۲ مکانیزم شکست اسپارک: مفهوم استریمر .....	۹
۱-۴-۱ استریم‌های مثبت و منفی .....	۱۱
۵-۱ قانون پاشن .....	۱۳
۶-۱ کمینه ولتاژ تخلیه الکتریکی .....	۱۵
۷-۱ مکانیزم‌های از بین رفتن الکترون .....	۱۶
۱-۷-۱ باز ترکیب .....	۱۶
۲-۷-۱ جذب .....	۱۸
۸-۱ تخلیه الکتریکی در آب .....	۱۸
۱-۸-۱ مکانیزم‌ها و مشخصات تخلیه‌های پلاسما در آب .....	۱۸
۹-۱ فرآیندهای برخوردی داخل پلاسما .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
۱-۹-۱ برخوردهای الاستیک .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
۲-۹-۱ برخوردهای منجر به یونیزاسیون یا برانگیخته شدن اتم‌ها .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
۱-۲-۹-۱ برخوردهای الکترونی .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
۲-۲-۹-۱ یونیزاسیون و برانگیختگی توسط برخورد یونها و اتمهای سریع گاز .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۳-۲-۹-۱ برخوردهای اتم شبه برانگیخته
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۴-۲-۹-۱ انتقال متقارن بار
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۵-۲-۹-۱ یونیزاسیونها و برانگیختگی های گرمایی و فوتونی
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۳-۹-۱ باز ترکیب یون مثبت-الکترون
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۱-۳-۹-۱ باز ترکیب سه ذره ای
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۲-۳-۹-۱ بازترکیب تابشی
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۳-۳-۹-۱ باز ترکیب دو مرحله ای
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	De-excitation ۴-۹-۱
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۱۰-۱ مکانیزم تخلیه ی سد دی الکترون
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۱۱-۱ کاربردهای پلاسمای سرد
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۱-۱۱-۱ کاربردهای صنعتی پلاسمای سرد
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۲-۱۱-۱ کاربردهای پزشکی پلاسمای سرد
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۱-۲-۱۱-۱ ایجاد مرگ برنامه ریزی شده در سلول سرطان پوست
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۲-۲-۱۱-۱ انعقاد خون
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۳-۲-۱۱-۱ انتقال دارو
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۴-۲-۱۱-۱ باکتری زدایی مواد غیر زنده
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۵-۲-۱۱-۱ باکتری زدایی بافت زنده
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۶-۲-۱۱-۱ درمان زخم و بیماری های پوستی
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۷-۲-۱۱-۱ پلاسمای دندان پزشکی
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	فصل دوم:
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	باکتری شناسی
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۱-۲ تقسیم بندی سلول ها
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۲-۲ مشخصات سلول باکتری
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۱-۲-۲ قسمت های ثابت
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۱-۱-۲-۲ غشاء باکتری:
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۲-۱-۲-۲ پروتوپلاسم (سیتوپلاسم و محتویات آن)
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۳-۱-۲-۲ هسته
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	۲-۲-۲ قسمت های غیر ثابت

Error! Bookmark not defined.	۱-۲-۲-۲ کپسول
Error! Bookmark not defined.	۲-۲-۲-۲ منطقه مخاطی اطراف باکتری
Error! Bookmark not defined.	۳-۲-۲-۲ تاژک
Error! Bookmark not defined.	۴-۲-۲-۲ مزک
Error! Bookmark not defined.	۵-۲-۲-۲ اسپور
Error! Bookmark not defined.	۳-۲ طبقه بندی باکتری‌ها
Error! Bookmark not defined.	۱-۳-۲ نوع غشاء
Error! Bookmark not defined.	۱-۱-۳-۲ باکتری‌های گرم مثبت :
Error! Bookmark not defined.	۲-۱-۳-۲ باکتری‌های گرم منفی :
Error! Bookmark not defined.	۲-۳-۲ بیماری زایی
Error! Bookmark not defined.	۱-۲-۳-۲ غیر بیماری زا :
Error! Bookmark not defined.	۲-۲-۳-۲ بیماری زای فرصت طلب :
Error! Bookmark not defined.	۳-۲-۳-۲ بیماری زا :
Error! Bookmark not defined.	۳-۳-۲ شکل و اندازه
Error! Bookmark not defined.	۱-۳-۳-۲ کوکسی‌ها:
Error! Bookmark not defined.	۲-۳-۳-۲ باسیل‌ها :
Error! Bookmark not defined.	۳-۳-۳-۲ اسپریل‌ها:
Error! Bookmark not defined.	۴-۳-۲ مکانیسم تنفسی
Error! Bookmark not defined.	۴-۲ نامگذاری باکتری‌ها
Error! Bookmark not defined.	۵-۲ متابولیسم باکتری‌ها
Error! Bookmark not defined.	۱-۵-۲ تغذیه‌ی باکتری‌ها
Error! Bookmark not defined.	۲-۵-۲ تامین انرژی در باکتری‌ها
Error! Bookmark not defined.	۶-۲ رشد و تکثیر باکتری‌ها
Error! Bookmark not defined.	۱-۶-۲ شرایط رشد و تکثیر باکتری‌ها
Error! Bookmark not defined.	۲-۶-۲ رشد تصاعدی تقسیم
Error! Bookmark not defined.	۷-۲ باکتری زدایی
Error! Bookmark not defined.	۱-۷-۲ استرلیزاسیون
Error! Bookmark not defined.	۸-۲ اثر عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی روی باکتری‌ها

**Error! Bookmark not defined.**..... ۱-۸-۲ عوامل فیزیکی  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۱-۱-۸-۲ حرارت  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۲-۱-۸-۲ تابش  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۳-۱-۸-۲ اشعه‌ی یونیزان X :  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۴-۱-۸-۲ اشعه‌ی یونیزان گاما:  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۵-۱-۸-۲ امواج صوت و فرصوت:  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۲-۸-۲ عوامل شیمیایی  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۹-۲ اشیشیاکولی، باکتری مورد بررسی  
**Error! Bookmark not defined.**..... فصل سوم:  
**Error! Bookmark not defined.**..... روش‌های تجربی  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۱-۳ منبع تغذیه تولید پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۳-۳ مراحل تهیه و آماده سازی باکتری:  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۱-۳-۳ تهیه محیط کشت جامد  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۲-۳-۳ تهیه محلول باکتری  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۴-۳ مکانیسم تابش پلاسمای روی باکتری‌های کشت شده  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۱-۴-۳ مکانیسم تابش پلاسمای هیبرید توری  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۲-۴-۳ مکانیسم تابش جت پلاسمایی  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۵-۳ محاسبه مساحت و تعداد کولنی‌های درمان شده:  
**Error! Bookmark not defined.**..... فصل چهارم:  
**Error! Bookmark not defined.**..... نتایج بحث  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۱-۴ بررسی اثر پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک بر غیر فعال سازی باکتری  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۱-۱-۴ بررسی اثر پروب با الکتروود ثانویه توری بر غیر فعال سازی باکتری  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۲-۱-۴ بررسی تفاوت اثر مکانیسم تابش مستمر پالسی پلاسمای، در پروب با الکتروود ثانویه توری بر غیر فعال سازی باکتری  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۳-۱-۴ بررسی اثر پروب جت پلاسمایی بر غیر فعال سازی باکتری :  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۴-۱-۴ بررسی تفاوت اثر مکانیسم تابش مستمر پالسی پلاسمای، در پروب جت پلاسمایی بر غیر فعال سازی باکتری :  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۲-۴ مکانیسم موثر در باکتری زدایی به روش پلاسمای سرد  
**Error! Bookmark not defined.**..... ۱-۲-۴ حرارت

<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۲-۲-۴ تابش فرابنفش
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۳-۲-۴ ذرات باردار
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۴-۲-۴ عوامل فعال شده و رادیکال‌های آزاد
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۳-۴ بررسی مکانسیم باکتری زدایی
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۱-۳-۴ بررسی اثر حرارت
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۲-۳-۴ بررسی اثر میدان الکتریکی
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۳-۳-۴ بررسی اثر تابش فرابنفش
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۴-۴ طیف سنجی از پلاسما
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۱-۴-۴ طیف سنجی از پلاسمای تشکیل شده در پروب الکتروود ثانویه توری
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۲-۴-۴ طیف سنجی از پلاسمای تشکیل شده در پروب الکتروود جت پلاسمایی
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۵-۴ بررسی نتایج مکانسیم اثر پلاسمای سد دی الکتریک
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۴-۶ نتیجه گیری
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	۵-۶ پیشنهادات:
<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....	مراجع

## فهرست شکل‌ها

شماره و عنوان شکل	صفحه
شکل ۱-۱: شماتیکی از نحوه‌ی ایجاد تخلیه‌ی الکتریکی	۶
شکل ۲-۱: نمودار منحنی تغییرات جریان بر حسب ولتاژ	۷
شکل ۳-۱: شکست تاونزند در یک گاف	۹
شکل ۴-۱: شکل گیری بهمن در فاصله بین‌اند و کاتد	۱۰
شکل ۵-۱: تغییرات میدان الکتریکی در یک بهمن، (الف) میدان الکتریکی خارجی و میدان ناشی از بارها به صورت جداگانه نمایش داده شده‌اند، (ب) ترکیب دو میدان خارجی و بارها	۱۱
شکل ۶-۱: تغییرات میدان الکتریکی هنگامی که بهمن به‌اند می‌رسد، (الف) میدان الکتریکی خارجی و میدان ناشی از بارها به صورت جداگانه نمایش داده شده‌اند، (ب) ترکیب دو میدان خارجی و بارها	۱۱
شکل ۷-۱: نمایشی از استریم مثبت، (الف) میدان الکتریکی سر استریم، (ب) انتشار استریم مثبت	۱۲
شکل ۸-۱: نمایشی از استریم منفی، (الف) انتشار استریم منفی، (ب) میدان الکتریکی سر استریم	۱۳
شکل ۹-۱: وابستگی ولتاژ شکست به $pd$	۱۵
شکل ۱۰-۱: ساختار تخلیه‌ی سد دی الکتریکی با اشکال مختلف (Raizer, 1991)	.....
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	
شکل ۱۱-۱: نمایشی از روش تولید صنعتی اوزون	.....
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	
شکل ۱۲-۱: تاثیر پلاسما روی سلول‌های سرطانی پوست. عکس سمت چپ سلول‌های درمان نشده تحت پلاسما و سمت راست سلول‌های تحت تاثیر قرار گرفته هستند. سلول‌های سالم آبی رنگ و سلول‌های آپوپتوسیس شده به رنگ سبز هستند. (Chirokov et ol, 2008)	.....
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	
شکل ۱۳-۱: تاثیر تخلیه سد دی الکتریک روی انعقاد خون (Fridman et ol, 2007)	.....
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	
شکل ۱۴-۱: پردازش سطح به منظورافزایش چسبندگی وانتقال دارو	.....
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	
شکل ۱۵-۱: درمان عفونت در ریشه و عصب دندان توسط پلاسمای سد دی الکتریک	.....
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	
شکل ۱-۲: ساختمان سلولی باکتری	.....
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	



شکل ۲-۲ ساختمان اسپور تشکیل شده توسط یک باکتری.....

**Error! Bookmark not defined.**

شکل ۱-۲ مقایسه باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۴-۲ اشکال مختلف باکتری

**Error! Bookmark not** .....

**defined.**

شکل ۵-۲ ساختمان داخلی باکتری ایشرشیاکولی

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۱-۳ طرح شماتیکی از منبع تغذیه و چیدمان آزمایشگاهی

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۶-۳ تصویر پلاسمای تولید شده از پروب پلاسمای هیبرید توری

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۷-۳ تصویری از پروب پلاسمای سرد هیبرید ساخته شده به همراه منبع تغذیه آن

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۸-۳ تخلیه سد کرونا ناشی از پروب توری

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۹-۳. نمایشی از ساختار داخلی جت پلاسمای

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۱۰-۳. سیم پیچ در شیشه کوارتز و پلاسمای تشکیل شده در آن

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۱۱-۳ پروب جت پلاسمایی ساخته شده

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۱-۴ نمودار درصد مساحت غیر فعال شده باکتری E. coli بر حسب زمان تابش پلاسمای (ثانیه) در ولتاژ ۹ کیلو

ولت برای الکتروود پروب الکتروود ثانویه توری

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۲-۴ نمودار تعداد کولنی‌های زنده مانده باکتری E. coli بر حسب زمان (ثانیه) در ولتاژ ۹ کیلو ولت برای پروب

الکتروود ثانویه توری

**Error!** .....

**Bookmark not defined.**

شکل ۳-۴ باکتری‌های درمان شده تحت پلاسمای پروب توری با مکانیسم تابش پالسی برای زمان‌های ۵ و ۱۰ و ۱۵

و ۳۰ ثانیه در ولتاژ ۹ کیلو ولت و فرکانس ۰.۶ کیلو هرتز

**Error! Bookmark not defined.**.....

شکل ۴-۴ مقایسه اثر ولتاژ بر غیر فعال کردن باکتری E. coli در پروب الکتروود توری

**Error! Bookmark not defined.....**

شکل ۵-۴ مقایسه تاثیر تابش مستمر و پالسی پلاسمای ناشی از پروب با الکتروود ثانویه توری در ۵ ثانیه در ولتاژ ۹ کیلو ولت پتری دیش سمت چپ تحت تابش مستمر و سمت راست تحت تابش پالسی درمان شده است

**Error! Bookmark not defined.....**

شکل ۷-۴ باکتری‌های درمان شده تحت پلاسمای پروب جت با مکانیسم تابش مستمر برای زمان‌های ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۳۰ ثانیه در ولتاژ ۹ کیلو ولت و فرکانس ۰.۶ کیلو هرتز

**Error! Bookmark not defined.....**

شکل ۸-۴ مقایسه اثر ولتاژ بر غیر فعال کردن باکتری E. coli در پروب جت پلاسمای

**Error! Bookmark not defined.....**

شکل ۹-۴ مقایسه تاثیر تابش مستمر و پالسی پلاسمای ناشی از پروب جت پلاسمایی در ۳۰ ثانیه در ولتاژ ۹ کیلو ولت سمت چپ تحت تابش مستمر و سمت راست تحت تابش پالسی قرار گرفته‌اند.

**Error! Bookmark not defined.....**

شکل ۱۰-۴ پروب پلاسمای سرد با الکتروود شناور

**Error! Bookmark not defined.....**

شکل ۱۱-۴ ظرف حاوی باکتری E. coli که توسط (الف) اعمال مستقیم پلاسمای سرد به مدت ۴۵ ثانیه با ولتاژ ۹ کیلو ولت. (ب) اعمال پلاسمای همراه با فیلتر کوارتز به مدت ۴۵ ثانیه با ولتاژ ۹ کیلو ولت

**Error! Bookmark not defined.....**

شکل ۱۲-۴ چیدمان آزمایش شامل؛ (۱) سیم ولتاژ بالا، (۲) تیغه کوارتز الکتروود، (۳) الکتروود مسی، (۴) دی الکتریک (۵) عایق، (۶) توری زمین شده، (۷) مبدل ولتاژ بالا، (۸) نمونه باکتری، (۹) فیبر طیف سنجی.

**Error! Bookmark not defined.....**

شکل ۱۳-۴ طیف OES - ثبت شده از پروب پلاسمای الکتروود ثانویه توری

**Error! Bookmark not defined.....**

شکل ۱۴-۴ طیف OES - ثبت شده از پروب جت پلاسمایی

**Error! Bookmark not defined.....**

# فصل اول:

## مقدمه و کلیات پژوهش

## ۱-۱ پیشگفتار

تخلیه الکتریکی معمولی و همچنین تخلیه الکتریکی با حضور سد دی الکتریک<sup>۱</sup> در حدود ۱ قرن است که شناخته شده است. نخستین تحقیقات توسط زیمنس<sup>۲</sup> در حدود سال‌های ۱۸۵۷ انجام شد که عمده تمرکز آن در جهت تولید اوزون (O<sub>3</sub>) بوده است در این فرآیند با قرار دادن گاز اکسیژن یا هوا در بین دو تیوب شیشه‌ای هم محور و با استفاده از یک میدان متناوب گاز اوزون تولید می‌شد.

در حدود سال‌های ۱۸۶۰ اندرو<sup>۳</sup> و تایت<sup>۴</sup> نام تخلیه الکتریکی صامت<sup>۵</sup> را برای آن انتخاب کردند که با گذر زمان به نامی فراگیر تبدیل شد. در واقع می‌توان گفت برای دهه‌های متمادی تولید اوزن یکی از مهمترین اهداف این نوع تخلیه بوده است.

در اوایل قرن بیستم تحقیقات آزمایشگاهی گسترده‌ای توسط امیل واربرگ<sup>۶</sup> و گروهی از مهندسين الکترونیک بروی تخلیه سد دی الکتریک انجام شد. بکر<sup>۷</sup> از آلمان و اوتو<sup>۸</sup> در فرانسه تغییرات گسترده‌ای را در بهینه سازی تولید اوزن با استفاده از تخلیه سد دی الکتریک انجام دادند. گام مهمی نیز در زمینه مشخصه یابی پلاسما توسط باس<sup>۹</sup> انجام گرفت او دریافت که تخلیه الکتریکی هوا در فشار اتمسفری بین دو الکترود مسطح که روی آن‌ها را دی الکتریک پوشانده است، همیشه با حضور تعداد زیادی جریان‌های فیلمانی کوچک و گذرا رخ می‌دهد کهها گذر زمان برای هدف‌های مختلف به کار برده شد (Kogelschatz U. et al 1999)

با پیشرفت آزمایشات انجام شده بر روی این فیلامان‌ها، کاربردهای مختلفی بدست آمد. دو ویژگی اصلی تخلیه سد دی الکتریک و بعضاً تخلیه‌ی کرونا، تولید پلاسمای سرد و غیر تعادلی در فشار اتمسفری و دیگری اثر شدید میدان الکتریکی ناشی از بارهای سطحی می‌باشد.

ماحصل این تحقیقات، علاوه بر شناخت بهتر فیزیک پلاسما و اصلاح روش‌های تولید اوزن، موجب ابداع کاربردهای بسیاری برای پلاسما تخلیه دی الکتریک در رشته‌هایی چون مواد و متالوژی، محیط زیست، لیزر، شیمی و پزشکی شد (Kogelschatz U. et al 2002)

---

<sup>1</sup> Dielectric Barrier Discharge

<sup>2</sup> Siemens

<sup>3</sup> Andrews

<sup>4</sup> Tait

<sup>5</sup> silent discharge

<sup>6</sup> Warburg

<sup>7</sup> Becker

<sup>8</sup> Otto

<sup>9</sup> K. Buss

یکی از ویژگی‌های جذاب پلاسمای غیر تعادلی این است که حاوی الکترون و گونه‌های فعال است بدون آنکه دمای گاز پس زمینه زیاد بشود. زیرا در این نوع پلاسما الکترون‌های پر انرژی وارد فرآیند برخورد با گاز پس زمینه می‌شوند و یونیزاسیون و برانگیختگی را افزایش می‌دهند که منجر به بالا رفتن نرخ واکنش‌های پاک سازی در پلاسما می‌شوند. کاربردهای تخلیه سد دی الکتریک در پزشکی از جمله مباحثی است که در دو دهه‌ی اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. از جمله کاربردهای پلاسما در پزشکی می‌توان به باکتری زدایی سطوح از میکرواورگانیسم‌ها، دندان پزشکی و درمان ریشه‌ی دندان، درمان زخم و درمان سلول‌های سرطانی اشاره کرد. و جواب دادن به این سوال که آیا تکنولوژی پلاسما سرد می‌تواند در پزشکی کاربرد داشته باشد؟ به یکی از مباحث مهم و جذاب تبدیل شود. این سوالی است که امروزه محققان زیادی سخت تلاش می‌کنند تا به آن جواب مثبت بدهند. حدود دو دهه‌ی پیش، تنی چند از فیزیکدان‌های کنجاو، مهندسان برق و زیست شناسان جسور سوال‌های ابتدایی خود را مطرح کردند: چه اتفاق‌های برای دیواره‌ی یک سلول که در معرض پلاسما قرار گرفته خواهد افتاد؟ آیا می‌میرد؟ آیا زنده باقی می‌ماند؟ اگر زنده بماند آیا آسیبی هم می‌بیند؟ اگر آسیبی ببیند آیا می‌تواند دوباره ترمیم و احیا شود؟ چه آسیبی می‌بیند و چه عواملی از پلاسما سبب بروز آسیب به سلول می‌شوند؟ تا به امروز بعضی از این پرسشها به طور کامل یا جزئی به جواب رسیده‌اند، اما هنوز نیاز به تهیه‌ی یک تصویر کامل است. این وضعیت هم خوب است و هم بد. این که پاسخ اکثر این ابهامات را بدانیم خوب است ولی این که هنوز از یک ابزار قابل کاربری در پزشکی فاصله‌ی زیادی داریم خوب نیست. در این میان اثر باکتری زدایی سطوح با پلاسما، با توجه به اهمیت همیشگی بحث استرلیزاسیون در بیمارستان‌ها و مکان‌های عمومی، سبب شد که تحقیقات گسترده‌ای از ده سال گذشته تا کنون در این زمینه انجام بشود. علت این اهمیت می‌تواند گسترش عفونت‌های بیمارستانی، مقاوم شدن باکتری‌ها به داروهای آنتی بیوتیک و انتقال سریع‌تر عفونت‌ها در حال حاضر باشد. از طرفی روش‌های متداول در باکتری زدایی مانند استفاده از حرارت، مواد شیمیایی و اشعه، محدودیت‌های استفاده و عوارض جانبی بسیاری دارد. از جمله اثر تخریبی در مواد حساس به حرارت، باقی ماندن مواد سمی و تاثیر گذار بر محیط زیست، خطر استفاده برای کاربر، گران بودن و زمان گیر بودن اشاره کرد.

## ۱-۲: منابع و مفاهیم

به طور کلی پلاسما، به عنوان حالت چهارم ماده شناخته می‌شود. هنگامی که دما افزایش می‌یابد، انرژی مولکول‌ها زیاد می‌شود و حالت ماده را تغییر می‌دهد. انرژی زیاد مولکول‌ها منجر به جداسازی اتم‌های گازی و در نهایت آزاد سازی ذرات باردار، الکترون‌ها و یون‌های باردار مثبت می‌شود. ناحیه‌ای که شامل الکترون و یون‌های مثبت در حال تعادل است پلاسما گفته می‌شود (Fridman, et al, 2011). اما در واقع پلاسما شامل ذرات باردار (الکترون - یون‌ها)، اتم‌ها و مولکول‌های برانگیخته، رادیکال‌های آزاد، اتم‌های فعال و فوتون‌های UV است که وجود این عوامل در فضای پلاسما می‌تواند خواص متفاوتی را برای آن تعریف کند. بر حسب دمایی که پلاسما دارد، می‌توان آن را به دو دسته‌ی پلاسما سرد<sup>۱۰</sup> و گرم<sup>۱۱</sup> تقسیم بندی کرد. در اینجا به طور خلاصه هر یک از ویژگی‌های آن بررسی می‌شود (Fridman, 2008)

### ۱-۲-۱ پلاسما گرم

در تخلیه‌های گازی با فشار بالا، برخورد بین الکترون‌ها و مولکول‌های گاز بیشتر، این پلاسما گرم که معمولاً توسط تخلیه‌ی قوسی یا فرکانس رادیویی، که فشار بالا است و برخورد بین الکترون‌ها و مولکول‌های گاز بیشتر است، اتفاق می‌افتد. (Becker et al, 2005)

در این حالت شرط تعادل ترمودینامیکی جایگزیده (*LTE*) بر آن حاکم و رابطه زیر برقرار است:

$$T_e \approx T_g \quad (1-1)$$

که در اینجا  $T_e$ ،  $T_g$  و  $T_i$  به ترتیب دمای الکترون، یون و اتم‌های گازی موجود در پلاسما هستند. این نوع پلاسما را، پلاسما گرم می‌نامند که گستره‌ی دمایی آن از ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ کلوین تغییر می‌کند. (Fridman, 2008)

### ۱-۲-۲ پلاسما سرد

در تخلیه‌های گازی با فشار پایین، آهنگ برخورد بین الکترون‌ها و مولکول‌های گاز به اندازه‌ی کافی نیست، بنابراین یک تعادل غیر دمایی بین الکترون‌ها و مولکول‌های گاز وجود دارد. چنان که ذرات پر انرژی را بیشتر،

---

<sup>10</sup>Cold Plasma

<sup>11</sup> Hot Plasma

الکترون‌ها تشکیل می‌دهند و در نتیجه دمای الکترون‌ها به شدت بالاتر از ذرات سنگین پلاسما خواهد بود، در این حالت رابطه‌ی دمایی بین ذات توسط رابطه‌ی زیر بیان می‌شود

$$T_e \gg T_i > T_g \quad (2-1)$$

که در اینجا  $T_e$ ،  $T_i$  و  $T_g$ ، به ترتیب دمای الکترون، یون و اتم‌های گازی موجود در پلاسما هستند. در این نوع پلاسما، دمای الکترون برای مثال می‌تواند تا ۲۰۰۰۰ کلوین برسد اما دمای گاز نزدیک به دمای اتاق باقی می‌ماند. این نوع پلاسما را پلاسما سرد می‌نامند که گستره‌ی دمایی آن بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ کلوین است (Fridman A, 2008).

### ۱-۳- تقسیم بندی پلاسماي اتمسفری سرد

پلاسماي اتمسفری سرد را می‌توان به سه نوع تقسیم بندی کرد:

#### ۱. پلاسماي مستقیم<sup>۱۲</sup>:

در آن پوست یا هر بافت دیگر به عنوان الکتروود ثانویه به کار می‌رود. بنابراین جریان الکتریکی باید از بدن عبور کند. بیشترین استفاده از این پلاسما در منابع تخلیه‌ی سد دی الکتریک است. در این نوع تابش از پلاسما تمام عوامل موجود در پلاسما اعم از ذرات باردار، عوامل فعال شده و رادیکال‌های آزاد وجود دارند.

#### ۲. پلاسماي غیر مستقیم<sup>۱۳</sup>:

بین دو الکتروود تولید می‌شود و سپس با یک فشار گازی به محیط مورد نظر منتقل می‌شود و ابزارهای متفاوتی از سوزن پلاسماي<sup>۱۴</sup>، مشعل‌های پلاسماي<sup>۱۵</sup> را شامل می‌شو. در این نوع پلاسما تابش و حرارت ناچیز است زیرا شدت آنها تا رسیدن به سطح نمونه به مقدار زیادی افت می‌کند. هم چنین اثر ذرات باردار را نیز چنین می‌توان ناچیز در نظر گرفت زیرا طول عمر آنها کوتاه است و به سرعت بازترکیب می‌شوند. لذا رادیکال‌های آنها با طول عمر زیاد است که مستقیماً با سطح در تماس‌اند.

#### ۳. پلاسماي هیبرید<sup>۱۶</sup>:

<sup>12</sup> Direct Plasma

<sup>13</sup> Indirect Plasma

<sup>14</sup> Plasma Needle

<sup>15</sup> Plasma Torches

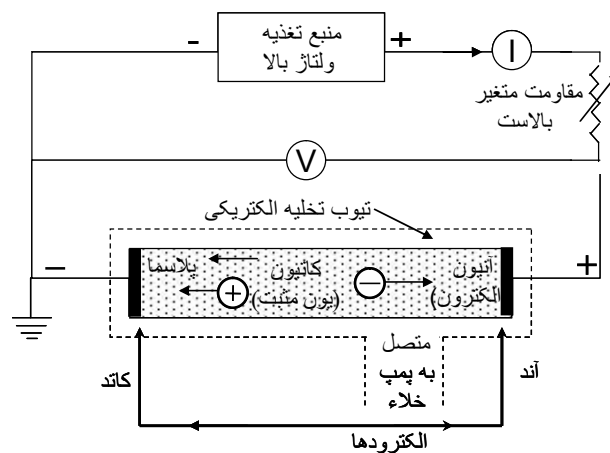
<sup>16</sup>Hybrid Plasma

تلفیقی از تکنیک تولید پلاسما نوع (۱) با ویژگی‌های نوع (۲) است. این نوع از پلاسما با به کار گیری الکتروود توری زمین شده به دست می‌آید که مقاومت الکتریکی بسیار کمتری نسبت به پوست دارد بنابراین عملاً تمام جریان از سیم‌های فلزی عبور می‌کند (Kong et al, 2009).

#### ۴-۱ تخلیه الکتریکی

تخلیه‌های الکتریکی در گازهای با فشار کم را از زمان پیدایش روش‌های تخلیه هوای یک محفظه، توسط پمپ‌های خلا، می‌شناختند. فرانسیس هوکسبی اولین کسی بود که در حدود دهه‌ی ۱۷۵۰، با باردار کردن الکتروستاتیکی یک حباب شیشه‌ای که هوای درون آن به وسیله‌ی پمپ‌های خلا آن روزگار مکیده شده بود، تخلیه‌ی الکتریکی را به طور مصنوعی ایجاد کرد (Kong et al, 2009).

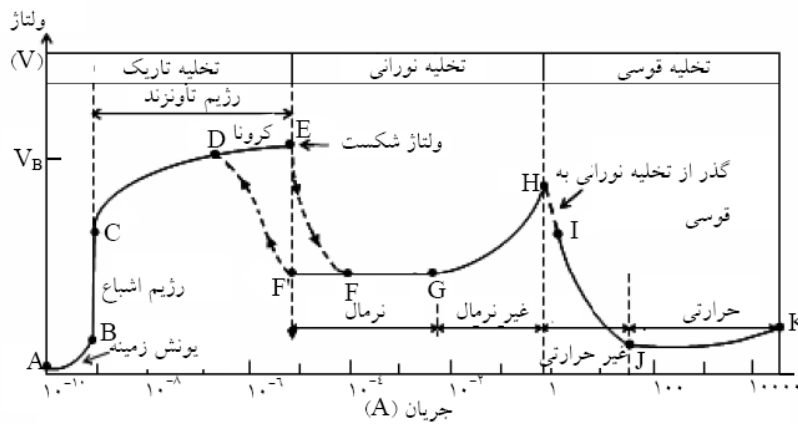
تخلیه‌ی الکتریکی گاز، زمانی اتفاق می‌افتد که جریان الکتریکی در داخل ماده‌ی گازی به وجود بیاید. یکی از روش‌هایی که در تقسیم بندی تخلیه‌های الکتریکی به کار می‌رود، بررسی منحنی تغییرات ولتاژ نسبت به شدت جریان تخلیه است. برای یک تخلیه الکتریکی با دو الکتروود تخت موازی، همانند شکل ۱-۱، منحنی تغییرات ولتاژ - جریان در شکل ۱-۲، نشان داده شده است و انواع مختلف تخلیه‌ها روی آن منحنی نیز مشخص شده‌اند. ناحیه‌ی تخلیه را می‌توان به سه منطقه‌ی کلی تقسیم کرد :



شکل ۱-۱: شماتیکی از نحوه‌ی ایجاد تخلیه‌ی الکتریکی



(۱). تخلیه‌ی تاریک<sup>۱۷</sup>: برای اختلاف پتانسیل‌های بسیار ناچیز، گاز همانند یک عایق نسبتاً خوب رفتار می‌کند. اما با این وجود، بین دو الکتروود لوله‌ی تخلیه در غیاب گسیل فوتوالکتریکی و گسیل گرمایونی از کاتدهای داغ، جریان بسیار مختصری ایجاد می‌شود که ناشی از یونیده شدن اتم‌ها و یا مولکول‌های گاز و یا بخار موجود در لوله‌ی تخلیه توسط عوامل خارجی است. لذا زمانی که اختلاف پتانسیل‌های عادی و کم اعمال شود، در لوله هیچ اتفاق قابل توجهی روی نمی‌دهد و جریانی بین الکتروودها رد نمی‌شود این ناحیه را " ناحیه‌ی اشباع " می‌گویند، تا اینکه ولتاژ بالاتری اعمال شود، شدت جریان به طور ناگهانی افزایش می‌یابد در حالی که اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود لوله‌ی تخلیه تقریباً ثابت می‌ماند. این ولتاژ خاص معروف به ولتاژ شکست ( $V_b$ ) است. در این گونه تخلیه‌ها الکترون‌های تولید شده برای ایجاد یونش به اندازه‌ی کافی انرژی دارند، و چون بر اثر یونش الکترون‌های ثانویه دایماً در حال تولیدند، جریان تخلیه به تدریج افزایش می‌یابد. شدت جریان در این محدوده چیزی در حدود  $10^{-8} - 10^{-6}$  آمپر است و ولتاژ تقریباً ثابت می‌ماند و هیچ گونه نوری از لوله‌ی تخلیه در این شرایط گسیل نمی‌شوند. به همین دلیل گاهی اوقات این گونه تخلیه‌ها را "تخلیه‌ی تاریک " یا " تخلیه‌ی تاونزند"<sup>۱۸</sup> می‌نامند. (Becker. ( et ol, 2005)



شکل ۱-۲: نمودار منحنی تغییرات جریان بر حسب ولتاژ

(۲) **تخلیه‌ی نورانی<sup>۱۹</sup>**: اگر شدت جریان تخلیه را افزایش دهیم، اختلاف پتانسیل مورد نیاز برای نگهداری تخلیه شروع به کاهش می‌کند. با این افت ولتاژ، شدت جریان تخلیه شروع به افزایش می‌کند تا اینکه ولتاژ به مقدار ثابتی می‌رسد. این نوع تخلیه را زیر هنجار می‌گویند. جریان تخلیه در این شرایط، چیزی در

<sup>17</sup>Dark Discharge

<sup>18</sup> Townsend Discharge

<sup>19</sup> Glow Discharge

حدود چند دهم یا صدم میکرو آمپر است. سپس با افزایش مجدد جریان، برای مدت زمان نسبتاً کوتاهی ولتاژ ثابت باقی می‌ماند. در این حالت می‌توان گسیل نورهای مرئی را در لوله‌ی تخلیه مشاهده کرد، این ناحیه را " تخلیه‌ی نورانی نرمال"<sup>۲۰</sup> می‌گویند. در ادامه‌ی فرآیند، با افزایش شدت جریان تخلیه، اختلاف پتانسیل ضروری برای نگهداری نیز افزایش می‌یابد، این ناحیه به " تخلیه‌ی نورانی غیرنرمال"<sup>۲۱</sup> معروف است. شدت جریان در این نوع تخلیه‌ها چیزی در حدود چند میلی آمپر است.

(۳). **تخلیه‌ی قوسی**<sup>۲۲</sup>: با زیاد شدن مجدد جریان، به طور ناگهانی ولتاژ شروع به کاهش می‌کند، در این حالت شدت جریان لوله‌ی تخلیه بیش از یک آمپر می‌شود. این نوع تخلیه‌ها را "تخلیه‌ی قوسی غیر حرارتی"<sup>۲۳</sup> می‌نامند، چرا که در این حالت دمای الکترون و یون یکسان نیست، همچنین قابل ذکر است که در این ناحیه پتانسیل با معکوس شدت جریان رابطه‌ی مستقیم دارد. در ناحیه‌ی بعدی که به "تخلیه‌ی قوسی حرارتی"<sup>۲۴</sup> معروف است، دمای الکترون و یون تقریباً یکسان است و با افزایش ولتاژ، جریان نیز زیاد می‌شود، همچنین پلاسما نزدیک به تعادل ترمودینامیکی است (Roth, 1995).

گستره‌ی شدت جریان و ولتاژ برای هر یک از تخلیه‌های فوق الذکر بستگی به پارامترهای مختلف تخلیه و لوله‌هایی که به کار گرفته شده است دارد. برای مثال لوله‌های تخلیه الکتریکی بلندتر نیاز به ولتاژ شکست و اختلاف پتانسیل بیشتری نسبت به لوله‌های کوتاه‌تر دارند.

#### ۱-۴-۱ تخلیه‌ی الکتریکی در پلاسما

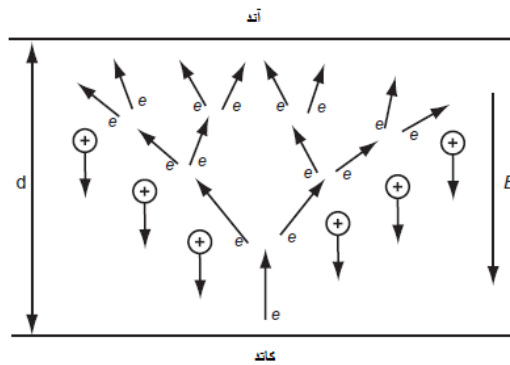
#### ۱-۴-۱-۱ مکانیسم تاونزند<sup>۲۵</sup> در شکست الکتریکی و منحنی پاشن<sup>۲۶</sup>

توضیح این پدیده توسط فردی بنام J. S Townsend در اوایل قرن نوزدهم بیان شد. مبنای تئوری تاونزند، یونیزاسیون به وسیله‌ی برخوردهای الکترون- یونی است.

---

<sup>20</sup> Normal Glow Discharge  
<sup>21</sup> Abnormal Glow Discharge  
<sup>22</sup> Arc Discharge  
<sup>23</sup> Non-thermal Arc  
<sup>24</sup> Thermal Arc  
<sup>25</sup> Townsend  
<sup>26</sup> Paschen Curve

در یک شکست الکتریکی بین دو صفحه با فاصله  $d$  و ولتاژ مستقیم  $V$ ، میدان الکتریکی بصورت  $E = V/d$  خواهد بود. مطابق شکل ۳-۱ الکترون‌های اولیه نزدیک کاتد جریان اولیه  $i_0$  تولید می‌کنند، به سمت آند سوق می‌کنند، گاز پس زمینه را یونیزه می‌کند و پدیده‌ی بهمنی را تولید می‌کند (Fridman, 2008)



شکل ۳-۱: شکست تاونزند در یک گاف

#### ۲-۱-۴-۱ مکانیزم شکست اسپارک<sup>۲۷</sup>: مفهوم استریم<sup>۲۸</sup>

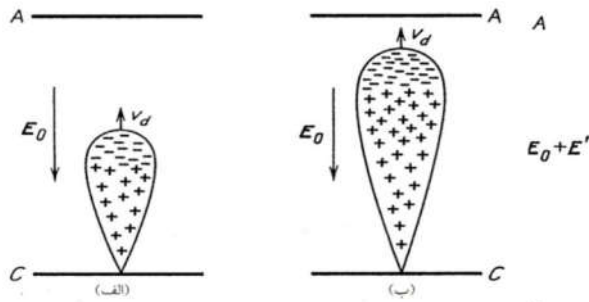
مکانیزم شکست شبه همگن تاونزند، فقط در فشار تقریباً پایین و فاصله‌ی الکترونی کوچک (فشار اتمسفری و  $d < 5$  سانتی متر) کاربردی می‌باشد. مکانیسم دیگری به نام اسپارک یا استریم وجود دارد، که در فاصله‌های الکترونی زیاد و فشارهای بالا اتفاق می‌افتد. اسپارک‌ها در مرحله‌ی اولیه با پدیده‌ی بهمنی شروع می‌شوند و شکست آنها توسط مسیرهای باریک اتفاق می‌افتد.

استریم یک کانال یونیزه شده‌ی بسیار نازک است که به سرعت در بین دو الکتروود منتشر شده و شامل یک دنباله‌ی باردار با بار مثبت می‌باشد که می‌توان گفت بقایای یک بهمن اولیه‌ی شدید است. این بهمن همچنین منجر به تولید فوتون‌هایی می‌شود که باعث تولید بهمن‌های ثانویه‌ای در مجاورت بهمن اولیه می‌گردد. الکترون‌های تولید شده در بهمن ثانویه توسط یک میدان الکتریکی قوی به داخل دنباله‌ی باردار مثبت اولیه کشیده می‌شود. نتیجه آنکه استریم‌های با سرعت، بین الکتروودها منتشر می‌شوند.

<sup>27</sup>Spark Breakdown

<sup>28</sup>Streamer Concept

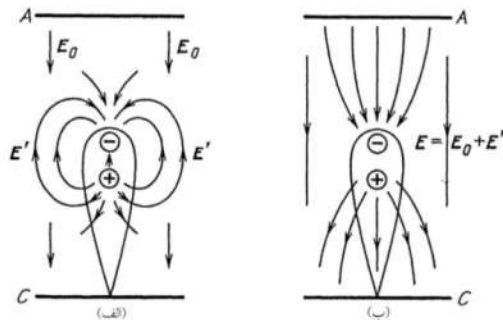
انتشار بهمنی در شکل ۱-۵ آورده شده است. هنگامی که بار تولید شده در پدیده‌ی بهمنی،  $\exp(\alpha x)$ ، بزرگ می‌شود میدان الکتریکی  $E'$ ، تولید می‌کند که با میدان خارجی اعمال شده  $E_0$  اضافه می‌شود، باعث تغییر میدان در نزدیکی پدیده‌ی بهمنی می‌شود.



شکل ۱-۴: شکل گیری بهمن در فاصله بین‌اند و کاتد

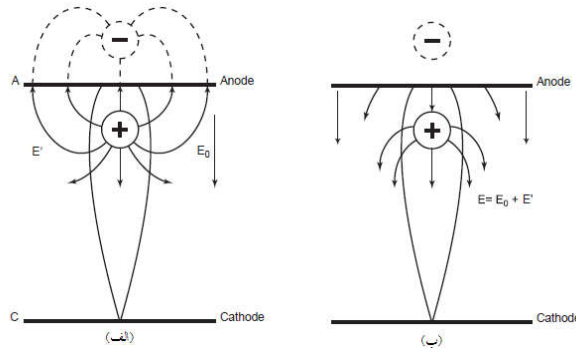
این اثر با تولید بارها قوی‌تر می‌شود و یونیزاسیون را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این بارها یک دوقطبی را تشکیل می‌دهند، الکترون‌ها در سر بهمن در حالی که یون‌های مثبت در انتهای بهمن حضور دارند. فاصله‌ای که در آن الکترون‌ها از یون‌ها جدا هستند را طول یونیزاسیون،  $\alpha^{-1}$ ، می‌گویند. تا زمانی که میدان الکتریکی خارجی به طور ضعیفی منحرف شده باشد، ضریب یونیزاسیون برابر خواهد بود با  $\alpha = \alpha(E_0)$ . اما هنگامی انحراف از میدان اولیه زیاد می‌شود، ضریب یونیزاسیون و توزیع بار فضایی بهمن به میدان الکتریکی وابسته می‌شود.

میدان الکتریکی  $E_0$  و  $E'$  که در سر بهمن هستند، با یکدیگر جمع می‌شوند و میدان قوی‌تر از  $E_0$  تولید می‌کند. در حالی که این دو میدان در ناحیه‌ی بین دو بار مخالف، هم جهت نیستند و نتیجه آن که میدان ضعیف‌تری از  $E_0$  تولید می‌کند. قابل ذکر است که این میدان‌ها یک مولفه‌ی شعاعی نیز تولید می‌کنند.



شکل ۱-۵: تغییرات میدان الکتریکی در یک بهمن، (الف) میدان الکتریکی خارجی و میدان ناشی از بارها به صورت جداگانه نمایش داده شده‌اند، (ب) ترکیب دو میدان خارجی و بارها

هنگامی که بهمن به آند می‌رسد، الکترون‌ها در داخل الکتروود آند از بین می‌روند و تنها بارهای مثبت هستند که در داخل گاف باقی می‌مانند، مطابق با شکل (۱-۶).



شکل ۱-۶: تغییرات میدان الکتریکی هنگامی که بهمن به آند می‌رسد، (الف) میدان الکتریکی خارجی و میدان ناشی از بارها به صورت جداگانه نمایش داده شده‌اند، (ب) ترکیب دو میدان خارجی و بارها

در این حین یک بهمن اولیه در میدان الکتریکی بسیار قوی می‌تواند استریمر، کانال‌های نازک با یونیزاسیون ضعیف، ایجاد کند. استریمر می‌تواند در یک یا دو جهت الکتروود تشکیل شود. در پدیده‌ی شکست، استریمر از آند به سمت کاتد رشد می‌کند. استریمر با رسانندگی خود، می‌تواند میدان الکتریکی که به الکتروود می‌رسد و همچنین درجه‌ی یونیزاسیون و جریان را تغییر دهد (Fridman et al, 2011).

#### ۱-۴-۱ استریمرهای مثبت<sup>۲۹</sup> و منفی<sup>۳۰</sup>

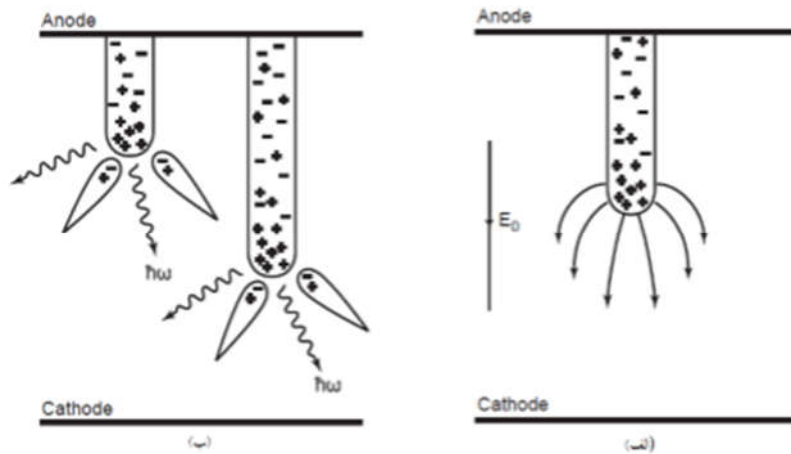
یک بهمن اولیه می‌تواند میدان الکتریکی خارجی را تقویت کند و یک کانال پلاسمایی بایونیزاسیون ضعیف تولید کند که این استریمر می‌تواند به سرعت بین دو الکتروود رشد کند. هنگامی که کانال استریمر به الکتروودها متصل می‌شود، جریان افزایش می‌یابد و اسپارک تشکیل می‌دهد. برای اینکه بهمن به استریمر گذار انجام دهد، باید میدان الکتریکی داخلی بهمن با میدان الکتریکی خارجی از یک مرتبه (قابل مقایسه) باشند،

<sup>29</sup> Positive streamer

<sup>30</sup> Negative streamer

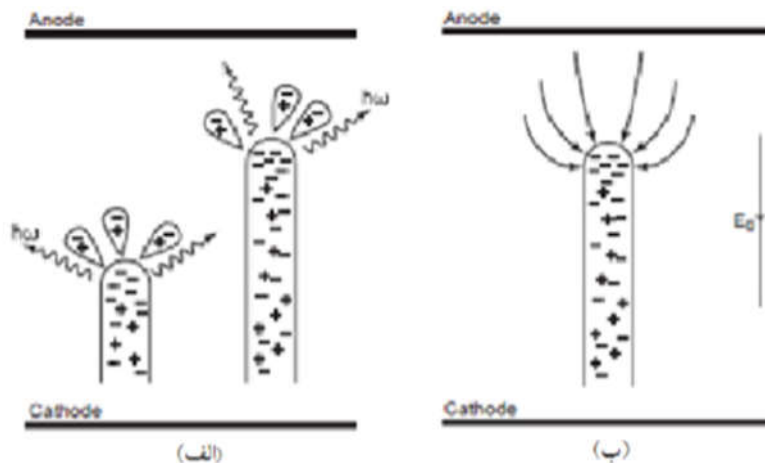
برای مثال باید  $\alpha d$  مقدار بزرگی باشد. هنگامی که گاف کوچک باشد، گذار زمانی اتفاق می‌افتد که بهمن به آند برسد. اگر فاصله‌ی بین دو گاف در تخلیه کوچک باشد، این استریمر که از آند به سمت کاتد رشد کرده است را "جهت یافته به کاتد" یا "استریمر مثبت" می‌گویند. اما اگر گاف و ولتاژ بزرگ باشند، گذار بهمن به استریمر می‌تواند در فاصله‌ی زیاد از آند اتفاق می‌افتد که به آن "جهت یافته به آند" یا "استریمر منفی" می‌گویند.

مکانیزم تشکیل استریمر مثبت به صورت زیر می‌توان بیان کرد. فوتون‌های پرنرژی که توسط بهمن اولیه تولید شده‌اند فوتوایونیزاسیون به وجود می‌آورند که منجر به ایجاد بهمن ثانویه می‌شوند. در این حالت الکترون‌های ناشی از بهمن ثانویه به داخل دنباله‌ی یونی بهمن اولیه کشیده می‌شود و یک کانال پلاسمایی شبه خنثی تولید می‌کنند. در نهایت، این مراحل تکرار می‌شود و باعث رشد استریمر می‌شود. استریمر مثبت در نزدیکی آند آغاز می‌شود، جایی که تعداد بارهای مثبت و میدان الکتریکی زیاد است. استریمر به صورت یک سوزن رسانا ظاهر می‌شود که از طرف آند در حال شکل‌گیری است. میدان الکتریکی سر سوزن آند بسیار بالاست که منجر به انتشار سریع استریمر در جهت کاتد می‌شود.



شکل ۱-۷ نمایشی از استریمر مثبت، (الف) میدان الکتریکی سر استریمر، (ب) انتشار استریمر مثبت

استریمر منفی زمانی بین الکترودها اتفاق می‌افتد که بهمن اولیه به اندازه‌ای قوی باشد که قبل از رسیدن به آند قوی شده باشد.



شکل ۸-۱ نمایشی از استریم منفی، (الف) انتشار استریم منفی، (ب) میدان الکتریکی سر استریم

استریم منفی در دو جهت رشد می‌کند، مکانیزم انتشار اگر در جهت کاتد باشد مانند استریم مثبت عمل می‌کند. مکانیزم رشد استریم در جهت آند نیز مشابه است. اما در این حالت الکترون‌های بهمن اولیه، دنباله‌ی یونی بهمن ثانویه را خنثی می‌کند. بهمن ثانویه در اینجا به تنهایی توسط فوتون‌ها تولید نمی‌شود بلکه الکترون‌هایی که در جلوی بهمن اولیه قرار دارند نیز در این زمینه کمک می‌کنند. (Fridman et al, 2011)

### ۵-۱ قانون پاشن<sup>۳۱</sup>

همان طور که در بخش قبل گفته شد ضریب  $\alpha$  به صورت میانگین تعداد برخوردهای یونیزان توسط یک الکترون در یک سانتی‌متر از سوق خود در جهت میدان الکتریکی تعریف می‌شود. پس  $\frac{1}{\alpha}$  میانگین فاصله طی شده توسط الکترون در بین دو برخورد یونیزان است. ولی همه برخوردهایی که توسط الکترون انجام می‌گیرد، لزوماً به یونیزاسیون منجر نمی‌شود. بنابراین در اینجا باید فاصله آزاد میانگین را تعریف کنیم که به صورت فاصله بین دو برخورد الکترون با اتم‌های خنثی، که لزوماً این برخوردهای یونیزان نمی‌باشد، بیان می‌شود (Massy et al, 1952). اگر فاصله آزاد میانگین را با  $\lambda$  نشان دهیم انرژی که الکترون در فاصله بین دو برخورد کسب می‌کند برابر با  $\lambda eE$  می‌شود. که در آن  $e$  بار الکترون و  $E$  میدان الکتریکی است. بنابراین  $\alpha$  بایستی به

<sup>31</sup> Paschen

این انرژی بستگی داشته باشد. هم چنین  $\alpha$  باید متناسب با تعداد برخوردهای الکترون (همیونیزان وهم غیریونیزان) با اتمها در یک واحد طول باشد. این بدان مفهوم است که در دمای ثابت  $\alpha$  متناسب با فشار گاز است. بنابراین می توان نوشت:

$$\alpha = pf(\lambda eE) \quad (3-1)$$

که در آن  $f$  یک تابع نامعلوم می باشد. هم چنین با افزایش فشار فاصله آزاد میانگین کم می شود و این یعنی این که  $\lambda$  متناسب با عکس فشار است. پس

$$\alpha = pf\left(\frac{eE}{p}\right) \quad (4-1)$$

چون  $e$  مقداری ثابت است، معادله بالا را می توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{\alpha}{p} = \Phi\left(\frac{E}{p}\right) \quad (5-1)$$

که دوباره  $\Phi$  یک تابع نامعلوم است. تاوزند به صورت تجربی شکل تابع  $\Phi$  را به صورت زیر به دست آورد که برای بازه وسیعی از فشار و میدان الکتریکی صادق بود.

$$\frac{\alpha}{p} = Ae^{-Bp/E} \quad (6-1)$$

که در معادله بالا  $A$  و  $B$  مقداری ثابت هستند که به گاز مورد استفاده بستگی دارند. پارامتر  $\gamma$  که بالاتر معرفی شد علاوه بر جنس الکتروود نوع گاز به میدان الکتریکی و فشار گاز نیز وابسته است. پس

$$\gamma = g\left(\frac{E}{p}\right) \quad (7-1)$$

قانون پاشن که یکی از مهمترین قوانین در مهندسی ولتاژ بالاست، ولتاژ شکست در یک میدان الکتریکیکنواخت را تابعی از فشار گاز و فاصله الکتروودی می داند.

با جای گذاری  $\alpha$  و  $\gamma$ ، که در روابط بالا بیان شد، در معادله  $N = \frac{N_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$  میتوان نوشت:

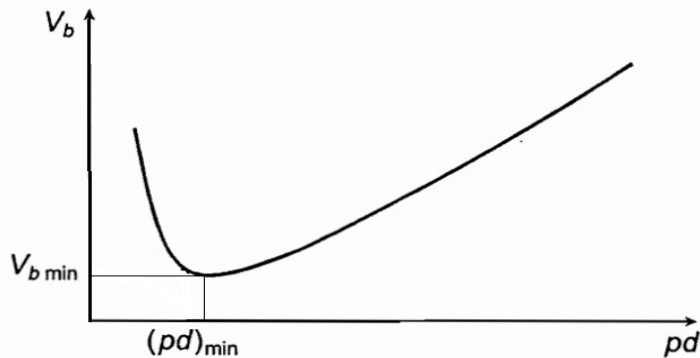
$$e^{pd\Phi(E_b/p)} = 1 + \frac{1}{g\left(\frac{E_b}{p}\right)} \quad (8-1)$$

چون برای یک میدان الکتریکی ثابت  $V_b = E_b \cdot d$  که در آن  $V_b$  ولتاژ شکست و  $E_b$  میدان شکست است، می توان معادله بالا را به شکل زیر نوشت.



$$e^{pd\phi(V_b/pd)} = 1 + \frac{1}{g(\frac{V_b}{pd})} \quad (9-1)$$

توجه کنید که برای یک  $pd$  ثابت معادله بالا هنگامی صادق است که  $V_b$  نیز ثابت باشد. این یعنی این که برای  $m$  میدان الکتریکی یکنواخت و جنس الکتروود خاص ولتاژ شکست تابع منحصر به فردی از حاصل ضرب فشار در فاصله الکتروودی می باشد که به عنوان قانون پاشن شناخته می شود. رابطه بین  $pd$  و  $V_b$  در شکل ۹-۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود برای یک مقدار  $pd$  ولتاژ شکست کمینه می باشد. برای مقادیر بزرگتر از  $(pd)_{min}$  تعداد برخوردهای الکترون با اتم های خنثی افزایش می یابد یا به تعبیری فاصله آزاد میانگین کاهش می یابد و در نتیجه انرژی را که الکترون در فاصله بین دو برخورد کسب می کند کم می شود. بنابراین ضریب  $\alpha$  و به دنبال آن احتمال یونیزاسیون کم می شود و برای ایجاد فروشکست باید ولتاژ اعمالی را افزایش داد. برای مقادیر کوچکتر از  $(pd)_{min}$  انرژی کسب شده توسط الکترون افزایش یافته و طول آزاد میانگین نیز افزایش پیدا می کند ولی چون تعداد برخوردها کم می شود همین مسئله غالب شده و باعث کاهش ضریب  $\alpha$  و در نتیجه افزایش ولتاژ شکست می شود.



شکل ۹-۱ وابستگی ولتاژ شکست به  $pd$

### ۶-۱ کمینه ولتاژ تخلیه الکتریکی

با قرار دادن  $\alpha$  از رابطه  $\alpha = pf(\frac{eE}{p})$  در عبارت معیار تاوزند برای تخلیه الکتریکی  $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$  و

جایگذاری  $V_b = E_b \cdot d$  خواهیم داشت:

$$Apde^{-b\frac{pd}{V_b}} = \ln(1 + \frac{1}{\gamma}) \quad (10-1)$$

و با بازنویسی معادله بالا داریم:

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{Apd}{\ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)}\right)} \quad (11-1)$$

برای به دست آوردن  $V_b \min$  از رابطه بالا نسبت به  $pd$  مشتق می‌گیریم و مساوی صفر قرار می‌دهیم.

$$\frac{B}{\ln\left(\frac{Apd}{\ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)}\right)} - \frac{B}{\ln\left(\frac{Apd}{\ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)}\right)^2} = 0 \quad (12-1)$$

که نتیجه می‌دهد:

$$\ln\left(\frac{Apd}{\ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)}\right) = 1 \quad (13-1)$$

و به سادگی می‌توان از عبارت بالا به دست آورد که

$$(pd)_{min} = \frac{e}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (14-1)$$

و با قرار دادن معادله بالا در رابطه ۹-۱ کمینه ولتاژ شکست به شکل زیر به دست می‌آید:

$$V_b \min = e \frac{B}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = 2.718 \frac{B}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (15-1)$$

## ۷-۱ مکانیزم‌های از بین رفتن الکترون

هم‌چنان که فرایند یونیزاسیون باعث فرو شکست محیط گازی می‌شود، از بین رفتن الکترون‌های موجود در فاصله الکترودها نیز باعث افزایش خاصیت عایقی گاز می‌شود. باز ترکیب و جذب دو پدیده موثر در فرآیند کاهش چگالی الکترونی هستند که در ادامه به بحث درباره آن‌ها می‌پردازیم.

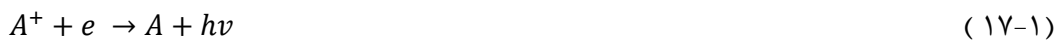
### ۷-۱-۱ باز ترکیب

در یک گاز یونیزه که شامل یون‌های مثبت و الکترون‌های منفی می‌باشد تمایل برای باز ترکیب این ذرات و تبدیل آن به ذرات خنثی وجود دارد. وقتی که یک الکترون توسط یون گیرانداخته می‌شود، انرژی جنبشی خود را از دست داده و حاصل آن‌ها ذره‌ی (ذرات) سومی خواهد بود که یا خنثی هستند و یا برانگیخته بوده و

فوتون ساطع می‌کنند. و این فرآیند باعث کاهش ضریب  $\alpha$  می‌شود. باز ترکیب خود می‌تواند باز ترکیب تجزیه‌ای که فرم کلی آن به صورت زیر است باشد.



و یا باز ترکیب تابشی که در آن اتم یونیزه شده با الکترون ترکیب شده و نتیجه آن اتم خنثی و فوتون تابشی می‌باشد.



فرآیند باز ترکیب تجزیه‌ای سریع‌ترین مکانیزم در از بین رفتن الکترون در یک پلاسمای ضعیف یونیزه شده است (Mc. Damel et al, 1993). پلاسمای ضعیف یونیزه شده پلاسمایی است که در آن کسر کوچکی از مولکول‌های گاز یونیزه شده‌اند و دمای پلاسمای نیز پایین می‌باشد. چون در این حالت دمای گاز پایین است و پلاسمای عموماً از یون‌های مولکولی تشکیل شده است. در این فرآیند الکترون با برخورد بایون‌های مولکولی سبب تجزیه مولکول آن‌ها شده و به یکی از اتم‌های آن می‌چسبند. انرژی آزاد شده عموماً صرف بر انگیزته کردن اتم می‌شود.

این فرآیند حتی در پلاسمای ضعیف یونیزه شده‌ی گازهای نجیب هم وجود دارد؛ و اتم‌های این گازها طی فرآیند برخورد سه تایی یون‌های شبه پایدار به وجود می‌آورند.



در گازهای دیگریون‌های پیچیده‌تری مثل  $O_{\text{p}}^+$  و  $N_{\text{p}}^+$  ممکن است به وجود بیاید. در گازهای نجیب مانند هلیوم فرآیند (16-1) تا 100 مرتبه نسبت به گازهای دیگر کندتر اتفاق می‌افتد.

مکانیسم باز ترکیب تابشی هم که در پلاسمای ضعیف یونیزه شده با احتمال پایینی اتفاق می‌افتد، و

سطح مقطع آن از مرتبه  $10^{21} \text{ cm}^{-2}$  است (Mc. Damel et al, 1993). ضریب باز ترکیب از

مرتبه  $10^{-12} \frac{\text{cm}^{-2}}{\text{s}}$  یعنی  $10^6$  مرتبه کندتر از مکانیسم تجزیه‌ای می‌باشد. الکترون معمولاً در حالت پایه اتم

گیر می‌افتد و فوتونی با انرژی از مرتبه  $10 \text{ eV}$  از خود ساطع می‌کند. ولی احتمال ترکیب در گذارهای بر

انگیزته هم وجود دارد و در این صورت طول موج‌های 400 تا 700 نانومتری یعنی طیف مرئی هم تابش می‌شود.

اگرچه این مکانیسم در از بین بردن الکترون نقش مهمی ایفا نمی‌کند اما توجیه کننده طیف تابشی پلاسمای

است.

### ۱-۷-۲ جذب

در فرآیند جذب اتم‌های (مولکول‌های) خنثی با جذب یک الکترون به یون‌های منفی تبدیل می‌شوند. گازهای هالوژن، اکسیژن و گوگرد گازهای هستند که جذب در آن‌ها بالاست. علت آن این حقیقت است که این گازها در بیرونی‌ترین مدار الکترونی خود فقط یک یا دو الکترون نیاز دارند تا که ساختار الکترونی مجاز را تکمیل کرده تا که شبیه گازهای نجیب شوند و به این ترتیب می‌توانند یون‌های منفی پایدار تولید کنند. یون‌های منفی تولید شده هم چون تحرک‌پذیری خیلی کمی نسبت به الکترون‌ها دارند بنابراین به موثری الکترون‌ها در تولید الکترون‌های ثانویه به وسیله برخورد نیستند. این پدیده هنگامی که در نزدیکی کاتد اتفاق می‌افتد اهمیت زیادی پیدا می‌کند چون فرصتی برای تولید الکترون‌های ثانویه پیدا نمی‌کند. با این توصیفات پدیده جذب باعث کاهش ضریب  $\alpha$  می‌شود. و باید در روابط مربوط به تئوری تاوژند و استریم به جای ضریب  $\alpha$  از ضریب  $\alpha - \eta$  استفاده کنیم که  $\eta$  ضریب از بین رفتن الکترون ناشی از همه پدیده‌های فوق‌الذکر می‌باشد.

### ۱-۸ تخلیه الکتریکی در آب

تخلیه الکتریکی معمولاً در گازها صورت می‌گیرد، تخلیه الکتریکی مایعات به علت چگالی بالای آنها و پوشش آزاد میانگین کوتاه الکترون‌ها محدود می‌باشد، و بنابراین به میدان الکتریکی خیلی قوی ای با این حال تخلیه الکتریکی در مایعات نیز می‌تواند بدون نیاز به میدان الکتریکی فوق‌العاده قوی، بلکه در میدانی کمی قوی‌تر از میدان شکست در گاز مولکولی در فشار اتمسفری، انجام گیرد. این پدیده می‌تواند به وسیله مکانیسم‌های القای الکتریکی مختلف در تشکیل میکرو حباب‌ها و شبه "ترک‌ها" در مایعات توضیح داده شود. تخلیه‌ها می‌توانند در آب به وسیله یک منبع تغذیه پالسی ولتاژ بالا پایدار شوند. الکترودها و با هندسه‌های مختلفی برای تولید پلاسما در آب برای پاکسازی آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### ۱-۸-۱ مکانیزم‌ها و مشخصات تخلیه‌های پلاسما در آب

مکانیزم‌های تخلیه و شکست پلاسما در مایعات (به ویژه در آب) می‌تواند به دو گروه طبقه‌بندی شوند: اولین گروه، تخلیه در آب به عنوان نتیجه‌ای از فرآیند حباب زدن و یک فرایند الکتریکی است و دومین مورد فرایند را به تخلیه جزئی و تخلیه کامل گسترش یافته مانند جرقه یا اسپارک است.

Family name: Abdolhoseinnia	Name: Hesam
Title of Thesis : Manufacturing of plasma probe applicable in plasma medicine	
Supervisor(s): Dr. Naser Sepehri- Javan, Dr. Hamid-Reza Gomi	
Advisor(s): Dr. Asadollah Asadi, Dr. Ezzat Noori	
Graduate Degree <b>M. Sc.</b>	
Major: Physics	Specialty: plasma
University: <b>Mohaghegh Ardabili</b>	Faculty: of Basic sciences
Graduation date:	Number of pages: 82
<p>Abstract: Surface decontamination is an important issue in different areas like medicine and food industry. Traditional methods of sterilization have disadvantages as thermal effect, producing toxic and chemical residues. In our research we have presented an applicable and outstanding device for surface sterilization. Cold atmospheric plasma method is suitable for the treatment of heat sensitive and the objects that are vulnerable to vacuum. The dielectric barrier discharge (DBD) is a low temperature and atmospheric pressure plasma source that is created between two conductive electrodes connected to an ac power supply. At least, one of the electrodes is covered by the dielectric layer. DBD due to its low temperature, atmospheric pressure and being non-equilibrium plasma has many applications in industry, chemistry and medicine. In order to study the effect of DBD plasma on bacteria, we study its inactivating influence on E. coli. These bacteria are important in the food industry, hospital infections and burning and chronic ulcer's infection. The effects of the exposure time and applied voltage are studied. The mechanism of sterilization is studied among some experiments. Also the tests of ATP assay, AFM and spectrometry are done and the results of the tests and experiments are presented. Consequently, the results demonstrate that this method is capable in surface sterilizations in a fast and safe situation. We also observed that UV radiation, heat and electric field are not the effective agents in sterilization mechanism and reactive species such as Ozone, free radicals and charged particles are the main agents</p>	
<p><b>Keywords</b> :Atmospheric plasma, ATP, AFM, Coronal barrier discharge, DBD, E. coli, Non-thermal plasma, Sterilization.</p>	



**University of Mohaghegh Ardabili**

**Faculty of sciences**

**Department of Physics**

**Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of M. Sc in Plasma  
Physics**

Title:

**Manufacturing of Plasma Probe Applicable in Plasma Medicine**

Supervisor:

**Dr. Naser Sepehri-Javan**

**Dr. Hamid-Reza Gomi**

Advisor:

**Dr. Asadollah Asadi**

**Dr. Ezzat Noori**

By:

**Hesam Abdolhoseinnia**

**February-2017**