

به نام خدا

۹۷.۴۹



دانشگاه مازندران  
دانشکده علوم پایه  
گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فیزیک  
(گرایش اتمی و مولکولی)

موضوع:

**شبیه‌سازی شکل‌گیری شبکه‌های بلوری کولنی در پلاسمای غباری**

کتابخانه  
موسسه تحقیقاتی  
مازندران

استاد راهنما:

**دکتر سعید میرزا نژاد**

استاد مشاور:

**دکتر فرشاد صحبت‌زاده**

۱۳۸۷ / ۲ / ۲۱

نگارش:

**سید طه رسولی**

بهمن ۱۳۸۶

۹۷۰۴۹

تقدیم به:

کسانی که شاید روزی این پایان نامه را باز کنند و  
از آن استفاده کنند.

## چکیده

به یک سیستم پلاسما که شامل ذرات غبار نانو یا میکرومتری است، «پلاسمای غباری» می‌گویند. این غبارها در پلاسما، طی فرآیندهای مختلفی باردار می‌شوند و با توجه به خصوصیات‌شان، حالت شبکه‌ای به خود می‌گیرند. در سال‌های اخیر، با بیشتر شدن کاربرد پلاسما در صنعت، پلاسماهای غباری اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. به این دلیل که وجود ذرات مختلف غبار (به دلایل مختلف از جمله ناخالصی) در پلاسما، می‌تواند باعث به وجود آمدن پدیده‌های مختلف بشود. یکی از این پدیده‌ها به وجود آمدن شبکه‌های بلوری از ذرات غبار است. با این‌که تشکیل شبکه‌های بلوری غبار کاملاً دیده شده است، اما هنوز نظریه کاملی برای تعریف نحوه شکل‌گیری شبکه‌های بلوری ارائه نشده و شبیه‌سازی‌ها هم‌چنان با شرایط مختلف و فرضیه‌های جدید ادامه دارند. در این پروژه قصد داریم با اعمال شرایط مختلف پلاسما و استفاده از نتایج کارهای قبلی در این زمینه، تشکیل شبکه‌های غبار را شبیه‌سازی و با نتایج آزمایش‌های عملی مقایسه کنیم. شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های روش دینامیک مولکولی انجام شده است. ابتدا شبیه‌سازی را در دو بعد انجام و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده‌ایم و سپس برنامه را به سه بعد تعمیم داده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی ما نشان می‌دهند که با نیروی اندرکنشی یوکاوا بین ذرات و یک نیروی همسانگرد کشسانی معادل در راستای عمودی، می‌توان تشکیل شبکه‌های بلوری و چند لایه شدن ذرات را مشاهده کرد.

## فهرست مطالب

### فصل اول: پلاسماهای غباری

۲	۱-۱ مقدمه .....
۵	۲-۱ ذرات غبار .....
۵	۱-۲-۱ انواع غبارها .....
۷	۲-۲-۱ باردار شدن غبارها .....
۱۰	۳-۲-۱ نیروهای وارد بر ذرات غبار .....
۱۳	۴-۲-۱ جفت‌شدگی قوی و ضعیف .....
۱۵	۳-۱ پلاسماهای غباری در آزمایشگاه و صنعت .....
۱۵	۱-۳-۱ به‌وجود آمدن ذرات غبار .....
۱۶	۲-۳-۱ غبارها در پلاسماهای آزمایشگاهی .....
۱۸	۱-۲-۳-۱ پلاسماهای جذبی .....
۲۳	۲-۲-۳-۱ پلاسماهای گسلی .....
۲۴	۳-۳-۱ پلاسماهای غباری در صنعت .....

### فصل دوم: شبیه‌سازی دینامیک مولکولی

۲۸	۱-۲ مقدمه .....
۲۹	۲-۲ رفتار یک سیستم کلاسیک .....
۳۱	۳-۲ روش‌های پایه برای سیستم‌های چند جسمی .....
۳۵	۴-۲ الگوریتم ورت .....

### فصل سوم: شبیه‌سازی دویعدی

۳۹	۱-۳ مقدمه .....
----	-----------------

۳۹	..... ۲-۳ پتانسیل اندرکنشی
۴۰	..... ۳-۳ پتانسیل محصور کننده
۴۳	..... ۴-۳ مقدمات شبیه‌سازی
۴۳	..... ۱-۴-۳ مکان‌های اولیه
۴۵	..... ۲-۴-۳ سرعت‌های اولیه
۴۵	..... ۳-۴-۳ سرد کردن
۴۶	..... ۴-۴-۳ مقدار عددی دیگر پارامترها
۴۷	..... ۵-۴-۳ نرمالیزه کردن
۴۸	..... ۶-۴-۳ تقریب همسایه‌های نزدیک
۴۹	..... ۵-۳ الگوریتم ورلت برای پلاسمای غباری
۵۴	..... ۶-۳ بررسی نتایج
۵۵	..... ۱-۶-۳ مقایسه با مشاهدات آزمایشگاهی

### فصل چهارم: شبیه‌سازی سه‌بعدی

۵۹	..... ۱-۴ مقدمه
۶۰	..... ۲-۴ چند لایه شدن شبکه‌ها
۶۱	..... ۳-۴ شبیه‌سازی سیستم سه‌بعدی
۷۱	..... ۴-۴ جمع‌بندی نتایج
۷۱	..... ۱-۴-۴ تعداد لایه‌ها
۷۳	..... ۲-۴-۴ ساختار شبکه‌های بلور غبارها
۷۴	..... ۳-۴-۴ نتیجه‌گیری و پیشنهاد
۷۶	..... فهرست مراجع
۸۰	..... چکیده انگلیسی

فصل اول:

پلاسماهای غباری

---

## ۱-۱ مقدمه

آیا می‌دانید وجه اشتراک حلقه‌های سیاره زحل با سیستم‌های فعال کننده صنعتی برای لایه‌نشانی روی قطعات نیمه‌هادی چیست؟ هر دوی این مثال‌ها، سیستمی از ذرات را تشکیل می‌دهند که باردار هستند و نیروهای الکترواستاتیکی یا گرانشی بر دینامیک آن‌ها حکم فرماست. اگر بخواهیم دقیق‌تر بگوییم، هر دوی این سیستم‌ها، یک نمونه از «پلاسمای غباری» هستند.

به یک سیستم پلازما که شامل ذرات غبار نانو یا میکرومتری است، پلاسمای غباری می‌گویند. در سال‌های اخیر استفاده از پلازما در بخش‌های مختلفی از صنعت و علوم مختلف رایج شده است. وجود ذرات مختلف غبار در پلازما (به دلایل مختلف از جمله ناخالصی)، می‌تواند باعث به وجود آمدن پدیده‌های مختلف بشود. پلاسمای غباری، هم‌چنین در پدیده‌های گوناگونی در اخترفیزیک مانند محیط‌های میان ستاره‌ای، دم دنباله‌دارها یا حلقه‌های سیاره‌ای ظاهر می‌شوند.

اولین بار لانگمور<sup>۱</sup> در سال ۱۹۲۴ در سخنرانی خود به اثر جالب پخش شدن بخار تنگستن در پلازما اشاره و اولین مشاهده آزمایشگاهی از ذرات غبار را ثبت کرد. در سال ۱۹۴۱، اسپیتزر<sup>۲</sup> فرآیندی را برای باردار شدن ذرات غبار در محیط‌های میان ستاره‌ای ارائه کرد. طبق نظریه او، علاوه بر باردار شدن فوتوالکتریک بر اثر تابش‌های فرابنفش، ذرات غبار به خاطر برخورد با ذرات گاز یونیده در محیط‌های میان ستاره‌ای بار منفی کسب می‌کنند. آلفن<sup>۳</sup>

---

<sup>۱</sup>- Langmuir

<sup>۲</sup>- Spitzer

<sup>۳</sup>- Alfvén



نیز در سال ۱۹۵۴ شکل گرفتن پیش سیاره‌ها و سپس سیاره‌ها و دنباله دارها را به فرآیند به هم پیوستن ذرات غبار در محیط‌های میان ستاره‌ای مرتبط کرد.

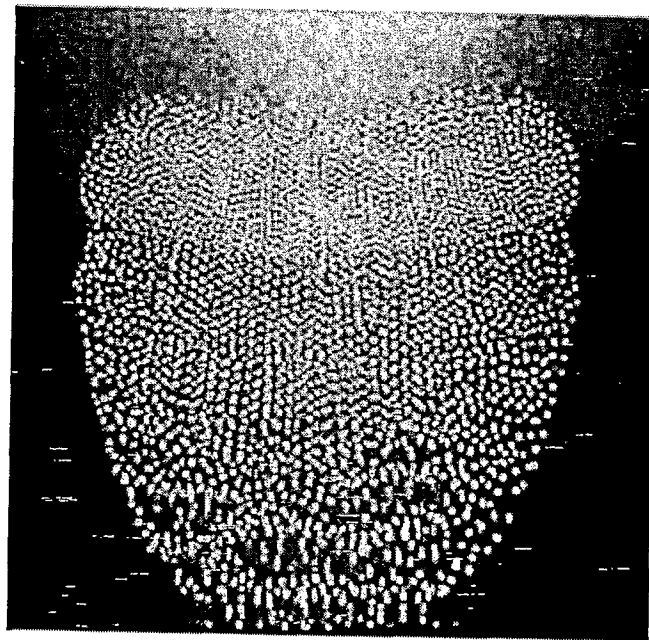
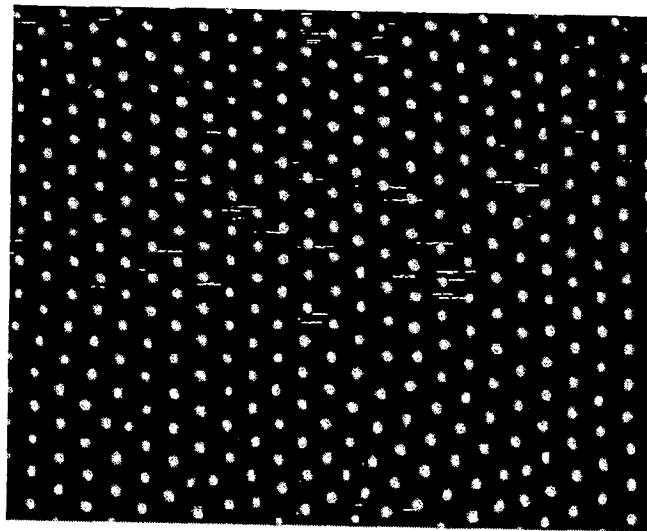
در ۲۵ سال گذشته، مطالعه درباره پلاسماهای غباری و مقاله‌هایی که هر سال درباره این موضوع منتشر می‌شوند به صورت نمایی رشد کرده‌اند. آغاز این حرکت مشاهده دو پدیده غیرقابل توجه یکی در حلقه‌های زحل و دیگری در آزمایشگاه‌های IBM بود. در اوایل دهه ۸۰، هنگامی که فضایی‌های وویجر ۲<sup>۱</sup> از کنار حلقه‌های زحل عبور می‌کرد، دانشمندان در تصاویر ارسال شده از حلقه‌ها، برای اولین بار پدیده عجیبی را مشاهده کردند. در حلقه میانی، رشته‌های شعاعی از ذرات غبار دیده می‌شد که به صورت منظم نور را پراکنده می‌کردند و تغییر سریع آرایش آن‌ها، خبر از اثر میدان‌های الکترومغناطیسی می‌داد. گورتز<sup>۲</sup> و مورفیل<sup>۳</sup> در سال ۱۹۸۳، طی مقاله‌ای نشان دادند که ذرات غبار در فاصله ۸۰ کیلومتری از سطح زحل، به حالت معلق در آمده‌اند و تغییر آرایش آن‌ها به دلیل وجود میدان‌های سطح سیاره زحل است [۱].

دومین پدیده‌ای که دانشمندان را به مطالعه پلاسماهای غباری هدایت کرد، به سال‌های انتهای دهه ۸۰ باز می‌گردد. این بار به جای اخترفیزیک‌دان‌ها، دانشمندان فعال در صنعت ساخت نیمه‌هادی‌ها بودند که به اهمیت پلاسماهای غباری پی بردند. در آن زمان، تکنیسین‌های آزمایشگاه برای حفظ محیط لایه نشانی سیلیکون از آلودگی در دسر زیادی داشتند. اما تا پیش از این که یکی از تکنیسین‌ها به طور اتفاقی پرتور لیزر به محیط لایه نشانی نتابانده بود، کسی نمی‌دانست که دلیل آلودگی و ناپایدار بودن محیط، چیزی نیست جز ذرات غبار در پلاسما که تا وقتی منبع RF خاموش می‌شد در محیط پلاسما غوطه‌ور می‌شدند [۲].

تا پیش از این، فیزیک‌دان‌های پلاسمای معدودی که قصد بررسی خواص پلاسماهای غباری در گزارش‌های اخترفیزیک را داشتند، با این مشکل روبرو بودند که ذرات غبار به خاطر نیروی گرانش زمین، پس از ورود به پلاسما به سرعت ته نشین می‌شدند. اما هنگامی که کشف شد ذرات غبار در پلاسماهایی که با منبع تغذیه RF کار می‌کنند، می‌توانند در محیط معلق بمانند، بسیاری از دانشمندان فیزیک شروع به بررسی این پدیده کردند.

1- Voyager 2  
2- Goertz  
3- Morfill

البته امروزه با روش‌های مختلف می‌توان پلاسماهای غباری را هم با منابع DC و هم RF در آزمایشگاه تولید کرد. در شرایط مختلف پلاسما، ذرات غبار پدیده‌های مختلف و جالب توجهی مانند تشکیل شبکه‌های بلور کولنی از خود نشان می‌دهند. ذرات غبار باردار، معمولاً در اطراف الکترودها که میدان قوی‌تر است جمع می‌شوند. در شکل (۱-۱) دو تصویر گرفته شده از غبارها در محیط یک پلاسما RF در آزمایشگاه را می‌بینید.



شکل ۱-۱: بالا: مقطع افقی یک ساختار شش‌وجهی از غبارها در یک پلاسما RF؛ پایین: مقطع عمودی از ذرات در یک پلاسما DC  
[Morfill & Thomas (1996)]

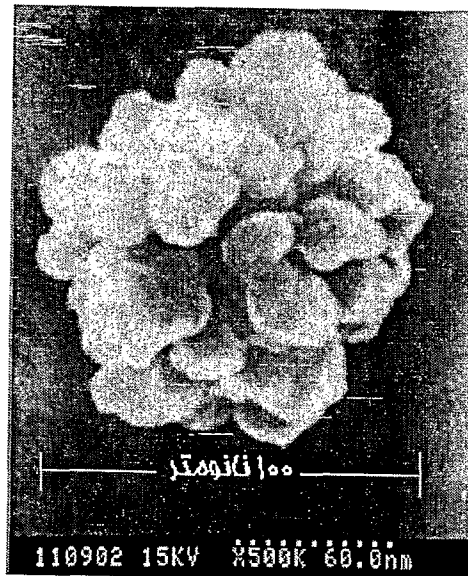
## ۱-۲ ذرات غبار

ذرات غبار انواع مختلفی دارند و حضور آن‌ها در پلاسما باعث ایجاد پدیده‌های متفاوتی نیز می‌شود. تقریباً هر ماده‌ای که به عنوان ناخالصی در محیط پلاسما باشد، می‌تواند به عنوان غبار در نظر گرفته بشود. غبارها در کنار تفاوت از لحاظ اندازه، در شکل‌گیری شبکه‌های کریستالی، خواص شیمیایی (خالص یا مرکب)، شکل (کروی، میله‌ای یا فرکتالی) و خواص فیزیکی (دی الکتریک، رسانا یا نیمه رسانا) نیز با هم تفاوت دارند.

### ۱-۲-۱ انواع غبارها

به طور کلی ذرات غبار را بر اساس اندازه به چهار گروه تقسیم می‌کنند.

- ۱- *نانوذرات*: تولید غبارها در پلاسما معمولاً با به وجود آمدن نانوذرات آغاز می‌شود. این ذرات معمولاً محصول فرآیندهای Nucleation در میان اتم‌های موجود پلاسما هستند. از نظر شکل معمولاً نانوذرات بسیار نامنظم هستند و در صورت غیرخنتی بودن، بار بسیار کوچکی (در حد چند بار واحد الکترون) حمل می‌کنند. چگالی نانوذرات معمولاً در حدود  $10^8 \text{ cm}^{-3}$  است و به خاطر جرم بسیار کمی که دارند، اثر نیروی گرانش در برابر نیروی لورنتسی  $q(\vec{E} + \vec{V} \cdot \vec{B})$  قابل نظر کردن است.
- ۲- *ذرات متوسط*: نانوذرها معمولاً در محیط پایدار نیستند و با برخورد به هم، تشکیل دسته‌ها و خوشه‌هایی را می‌دهند که آن‌ها را به عنوان ذرات متوسط می‌شناسیم. ابعاد این دسته‌ها می‌تواند تا حدود ۱۰۰ نانومتر هم باشد و به خاطر سطح مقطع برخورد بیشتری که با الکترون‌های پلاسما دارند، می‌توانند باری در حدود ده تا چند صد e داشته باشند. چگالی ذرات متوسط در محیط معمولاً در حدود  $10^6 \text{ cm}^{-3}$  است. در شکل (۱-۲) یک ذره متوسط را می‌بینید که نانوذرات تشکیل دهنده آن به وضوح قابل دیدن هستند.



شکل ۱-۲: یک ذره متوسط که از تعدادی نانوذره تشکیل شده است [Shiratani et al. (1994)]

۳- ذرات بزرگ: بیشتر پدیده‌هایی که در آزمایشگاه‌ها مشاهده شده‌اند به خاطر حضور این ذرات در پلاسما هستند که ابعادی در حد چند میکرون دارند و معمولاً از بیرون به محیط پلاسما وارد می‌شوند. این ذرات می‌توانند بار زیادی (ده تا صد هزار  $e$ ) حمل کنند و به همین خاطر، نیروها و برهمکنش‌های کولنی در تعریف دینامیک این ذرات نقش بسیار پررنگی دارند. پدیده‌هایی نظیر شکل گرفتن شبکه‌های پایدار بلوری که به آن کریستال‌های کولن هم گفته می‌شود [۳]، در ذرات بزرگ دیده شده است. ما نیز در این پایان‌نامه بیشتر روی این ذرات بحث می‌کنیم و از حالا به بعد هر جا صحبت از ذرات غبار شد، اشاره‌مان به ذرات بزرگ است.

۴- ذرات بسیار بزرگ: در توصیف پدیده‌های کیهان‌شناسی، اجسامی در ابعاد متر و کیلومتر هم به صورت ذرات غبار در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال در دیسک‌های برافزایشی، اجسام آسمانی مانند

سیارات می‌توانند همانند ذرات غبار در پلاسما باشند. در این سیستم‌ها، وشکسانی پارامتر تعیین کننده دینامیک ذرات است و اثر نیروهای گرانشی به نیروهای الکتروستاتیکی می‌چربد.

### ۱-۲-۲ بار دار شدن غبارها

مهم‌ترین مساله در توصیف فرآیندهایی که به شکل‌گیری آرایش‌های مختلف ذرات غبار در پلاسما می‌انجامند، اندرکنش ذرات غبار با دیگر ذرات و محیط پلاسماست. از آن‌جا که بیشتر این اندرکنش‌ها، الکتروستاتیکی است پس بار ذرات نقش بسیار مهمی را در توصیف دینامیک آن‌ها ایفا می‌کند. ذرات غبار به خاطر برخورد مداوم با مولفه‌های مثبت و منفی پلاسما، می‌توانند هم بار مثبت و هم بار منفی کسب کنند. بار نهایی ذرات در حالت تعادل، برآیند جریان‌هایی است که به ذرات وارد و از آن‌ها خارج می‌شوند. این جریان‌ها شامل جریان‌های الکترونی، یونی، گسیل نوری<sup>۱</sup>، گسیل گرمایونی<sup>۲</sup> و ... هستند. به طور کلی تغییرات بار هر ذره توسط معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{dQ}{dt} = \sum_i I_i + \sum_j I_j \quad (1-1)$$

که در آن  $Q$  بار غبار،  $I_i$  جریان‌های وارد شده به ذره و  $I_j$  جریان‌های خارج شده از آن هستند. در حالت شبه پایداری که  $dQ/dt = 0$  باشد، می‌توان میزان بار الکتریکی تعادلی را محاسبه کرد. در بیشتر فرآیندهای آزمایشگاهی که به پلاسماهای غباری تخلیه الکتریکی محیط گازی مربوط هستند، ذرات غبار بار منفی دارند؛ به این علت که در هر لحظه تعداد الکترون بیشتری به آن‌ها برخورد می‌کند. اما در بعضی از موارد ذرات غبار می‌توانند بار مثبت داشته باشند. اگر الکترون‌ها به نحوی از ذرات غبار خارج شوند، بار غبار مثبت خواهد بود. پدیده‌هایی مانند تابش فوتو الکتریک که با تاباندن پرتوهای UV به غبار حاصل می‌شود، گسیل گرمایونی و گسیل میدانی<sup>۳</sup>؛ می‌توانند باعث گسیل الکترون و مثبت شدن بار غبار بشوند.

لازم به توضیح است که به طور کلی ذرات غبار معمولاً یک بار ثابت ندارند و به این دلیل که همواره در حال اندرکنش با پلاسما محیط هستند، می‌توان بار آن‌ها را تابعی از شرایط پلاسما دانست. در واقع اندرکنش غبارها با

1- Photoemission  
2- Thermionic emission  
3- Field Emission

ذرات پلاسماست که خصوصیات منحصر به فرد آن‌ها را رقم می‌زنند. به عنوان مثال در یک پلاسمای تخلیه الکتریکی محیط گازی آزمایشگاهی، اندرکنش غبارها با شار یونی در نزدیکی الکترودها باعث می‌شود غبارها در دام عقبه ناشی از یکدیگر افتاده و دو غبار با بار هم‌نام یکدیگر را جذب کنند؛ چیزی که از دیدگاه الکترودینامیکی استاندارد در خلا به هیچ‌وجه امکان‌پذیر نیست.

توصیف دقیق جریان‌های ورودی ( $I_i$ ) و خروجی ( $I_j$ ) به عوامل مختلفی مانند منشا و نوع جریان، جنس ذرات غبار، محیط پلاسما و اندرکنش‌های بین مولفه‌های پلاسما مربوط می‌شود. به طور خاص توصیف رفتار ذرات پلاسما در اطراف یک ذره غبار و نحوه اندرکنش آن‌ها با یکدیگر یک مساله کلیدی در مدل‌سازی بار دار شدن غبارهاست. معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل باردار شدن غبارها در سال ۱۹۸۱ توسط ویپل<sup>۱</sup> [۴] مطرح شد. این مدل به حرکت محدود مدارری یا OML<sup>۲</sup> مشهور است و در آن حرکت گونه‌های پلاسما در اطراف یک ذره غبار به صورت مدارهایی در نظر گرفته شده که خصوصیات این مدارها با توجه به قوانین پایستگی انرژی، تکانه خطی و تکانه زاویه‌ای تعریف می‌شود. البته این مدل از سال‌ها قبل برای مدل‌سازی برخورد گونه‌های پلاسما با probe‌های الکتروستاتیکی مورد استفاده قرار می‌گرفت [۵].

با این‌که برای توصیف‌های معمولی مدل OML می‌تواند با دقت خوبی جواب‌گو باشد، اما بررسی‌های کامل‌تری در مورد عوامل دیگر موثر در بار غبار انجام شده‌اند. پدیده‌هایی مانند یون‌های محبوس شده<sup>۳</sup> [۶]، شکل و اندازه غبار [۷]، افت و خیزهای اتفاقی بار [۸ و ۹]، اثرهای کوانتومی در جذب ذرات پلاسما توسط غبار [۱۰] و اثرات جمعی در مجموعه‌ای از تعداد زیادی غبار [۱۱ و ۱۲] به عنوان پدیده‌های موثر در باردار شدن ذرات غبار شناخته شده‌اند. یکی از ویژگی‌های مدل OML این است که بدون توجه به اثرهای پیچیده و غیرخطی پتانسیل پلاسما در حوالی ذره غبار، می‌توان سطح مقطع برخورد ذرات پلاسما به غبار را به راحتی با استفاده از قوانین پایستگی انرژی و تکانه محاسبه کرد [۱۳]. برای جذب الکترون‌ها و یون‌هایی که به صورت عادی در پلاسما برحسب دما توزیع ماکسولی دارند، جریان‌های OML برای یک تک ذره غبار کروی با روابط زیر داده می‌شوند [۴]:

<sup>۱</sup>- Whipple

<sup>۲</sup>- Orbit Motion Limited

<sup>۳</sup>- یون‌هایی با انرژی منفی که در اطراف غبار گرفتار شده‌اند.

$$I_e = I_{.e} e^{\left(\frac{e\phi_s}{T_e}\right)}, \quad \phi_s < 0 \quad (2-1)$$

$$I_e = I_{.e} \left(1 + e^{\left(\frac{e\phi_s}{T_e}\right)}\right), \quad \phi_s > 0 \quad (3-1)$$

$$I_i = I_{.i} e^{\left(\frac{-Z_i e\phi_s}{T_i}\right)}, \quad \phi_s > 0 \quad (4-1)$$

$$I_i = I_{.i} \left(1 - Z_i e\phi_s / T_i\right), \quad \phi_s < 0 \quad (5-1)$$

که  $T_e$  و  $T_i$  به ترتیب دمای الکترون‌ها و یون‌ها،  $\phi_s$  پتانسیل سطحی ذره غبار نسبت به پتانسیل محلی پلاسما و  $Z_i$  بار الکترونی یون‌هاست. ثابت‌های  $I_{.e}$  و  $I_{.i}$  که جریان جذب شده در  $\phi_s = 0$  هستند از رابطه

$$I_{.\alpha} = n_{\alpha} q_{\alpha} \left(\frac{T_{\alpha}}{m_{\alpha}}\right)^{1/2} \pi a^2 f_{\alpha}(w, V_{T_{\alpha}}) \quad (6-1)$$

محاسبه می‌شوند که در آن چگالی تعداد گونه  $\alpha$  از پلاسما و  $f_{\alpha}(w, V_{T_{\alpha}})$  تابعی پیچیده برحسب سرعت گرمایی  $V_{T_{\alpha}} = (T_{\alpha} / m_{\alpha})^{1/2}$  و سرعت سوق  $w$  بین ذرات غبار و پلاسماست. به دست آوردن شکل صریحی از تابع  $f_{\alpha}(w, V_{T_{\alpha}})$  کار آسانی نیست به همین دلیل با در نظر گرفتن حالت‌های حدی، آن را به شکل ساده‌تری درمی‌آوریم.

تابع  $f_{\alpha}(w, V_{T_{\alpha}})$  با در نظر گرفتن دو حالت حدی سرعت سوق بسیار کم ( $w / V_{T_{\alpha}} \ll 1$ ) و بسیار زیاد ( $w / V_{T_{\alpha}} \gg 1$ ) به صورت‌های ساده‌تر نوشته می‌شود. در حالت سرعت سوق بسیار کم، در واقع می‌توان غبارها را در میان جریان‌های پلاسما ثابت در نظر گرفت به طوری که از همه طرف جریان‌ها با تقارن کروی به آن وارد می‌شوند. به این ترتیب سطح مقطع برخورد گونه‌های پلاسما و ذره غبار به شکل  $4\pi a^2$  در می‌آید و عبارت (6-1) به این شکل ساده می‌شود:

$$I_{.\alpha} = 4\pi a^2 n_{\alpha} q_{\alpha} \left(\frac{T_{\alpha}}{2\pi m_{\alpha}}\right)^{1/2} \quad (7-1)$$

در این وضعیت بار غبارها با رابطه  $Q = C\phi_s$  به پتانسیل سطحی غبار ارتباط پیدا می‌کند که  $C$  ظرفیت خازن غبار و پلاسماست.

در حالتی که سرعت سوق بسیار بیشتر از سرعت گرمایی باشد، می‌توان عبارت دیگری را جایگزین رابطه مربوط به محاسبه جریان‌ها کرد [۱۴]:

$$I_{\alpha} = \pi a^2 n_{\alpha} q_{\alpha} w \left( 1 - \frac{2 q_{\alpha} \phi_s}{w^2 m_{\alpha}} \right) \quad (۸-۱)$$

هر چند که به خاطر تقریب‌هایی که در به دست آوردن آن استفاده شده، این رابطه برای مسائلی که احتیاج به دقت بالا دارند کاربرد ندارد.

لازم به یاد آوری است که مدل OML که در این جا به صورت مختصر به آن اشاره شد، برای محاسبه بار ذرات غبار بزرگ (ابعاد چند میکرون) استفاده می‌شود. هنوز مشکلات زیادی در راه فرمول‌بندی صحیح فرآیندهای باردار شدن در مورد ذرات کوچک وجود دارد. به علت کوچک بودن بار نانوغبارها که در حد چند بار واحد الکترون است، تقریباً هیچ توصیف خوبی از نحوه بار دار شدن آن‌ها انجام نشده و پدیده‌های کوانتومی (نظیر رد شدن جریان‌های پلاسما از داخل غبار به خاطر اثر تونل‌زنی) محاسبات را بسیار پیچیده می‌کند.

### ۳-۲-۱ نیروهای وارد بر ذرات غبار

چهار نیروی اصلی روی دینامیک ذرات غبار در پلاسما تاثیر می‌گذارد:

۱- نیروی گرانش: به وضوح نیروی گرانش اولین نیروی وارد بر ذرات غبار است که به صورت

$$F_g = m_d g \text{ روی آن اثر می‌کند. } m_d \text{ جرم غبار و } g \text{ شتاب گرانشی است.}$$

۲- نیروی الکتروستاتیک: این نیرو که شکل  $F_E = QE$  دارد، توسط میدان الکتریکی بین الکترودها در

پلاسما به وجود می‌آید. بد نیست که یادآوری کنیم میدان الکتریکی علاوه بر نیرویی که به غبار وارد می‌کند، به طور مستقیم در مقدار بار آن هم موثر است. زیرا تحرک یون‌ها و در نتیجه سطح مقطع برخورد آن‌ها با غبار تابعی از شدت میدان الکتریکی در پلاسماست.

۳- نیروی اصطکاک: این نیرو در نتیجه برخورد غبارها با ذرات خنثی در محیط پلاسما به آن‌ها وارد می‌شود.

به عنوان مثال در یک پلاسمای آزمایشگاهی تخلیه گاز، نیرو اصطکاک تابعی از فشار گاز داخل محفظه



است. اگر اندرکنش بین ذرات غبار و اتمها و مولکولهای خنثی در محیط را به صورت برخورد کشسان کره‌های سخت در نظر بگیریم، نیروی اصطکاک با تقریب به این شکل در می‌آید [۱۴]:

$$F_{fr} = n_n v_R^2 m_n \sigma_{n-d} \quad (9-1)$$

که در آن چگالی ذرات خنثی،  $v_R$  سرعت نسبی غبار-خنثی و  $\sigma_{n-d}$  سطح مقطع برخورد غبارها با ذرات خنثی است و به خاطر فرض کروی بودن، می‌توان آن را به شکل  $\pi a^2$  نوشت. بسته به حرکت نسبی غبار و ذرات خنثی، این نیرو می‌تواند در جهت یا خلاف جهت حرکت غبار به آن وارد شود.

۴- نیروی کشش یونی<sup>۱</sup>: شار یونی بین دو الکتروود در پلاسما، منشا نیروی دیگری است که به آن کشش یونی می‌گویند. نیروی کشش یونی به خاطر برخورد یون‌ها با غبار و انتقال تکانه به آن، همواره در جهت حرکت شار یونی به غبار وارد می‌شود. شار یونی خود به خاطر میدان الکتروستاتیکی حاضر در پلاسما به وجود می‌آید و نیروی کشش یونی به نوعی تابعی از میدان الکتریکی محلی پلاسما هم هست. نیروی کشش یونی را به دو مولفه جذبی و مداری تجزیه می‌کنند [۱۴].

مولفه جذبی، نیروی حاصل از برخورد مستقیم یون‌ها به غبار است. هر یون با برخورد به غبار، تکانه  $m_i v_i$  به آن منتقل می‌کند؛ در نتیجه برای مولفه جذبی نیروی کشش یونی می‌توان نوشت:

$$F_{dr}^c = n_i v_s m_i v_i \pi b_c^2 \quad (10-1)$$

در این معادله  $n_i$  و  $m_i$  به ترتیب چگالی و جرم یون‌ها و  $v_s = \sqrt{v_i^2 + v_{T_i}^2}$  سرعت میانگین یونی شامل دو مولفه جهت دار ( $v_i$ ) و گرمایی ( $v_{T_i} = \sqrt{\lambda T_i / \pi m_i}$ ) هستند. پارامتر برخورد جذبی است که به این صورت محاسبه می‌شود:

$$b_c = a \left[ 1 - \frac{2e(\varphi_p - \varphi_s)}{m_i v_s^2} \right] \quad (11-1)$$

در این رابطه  $\varphi_p - \varphi_s$  تفاضل بین پتانسیل محلی پلاسما ( $\varphi_p$ ) و پتانسیل سطح غبار ( $\varphi_s$ ) است. لازم به ذکر است که روابط (۱۰-۱) و (۱۱-۱) با استفاده از مدل OML به دست آمده‌اند.

مولفه مداری نیروی کشش یونی به این صورت محاسبه شده است:

<sup>۱</sup>- Ion Drag Force

$$F_{dr}^o = 4\pi n_i v_s m_i v_i b_{\pi/2}^r \Lambda \quad (12-1)$$

که  $b_{\pi/2} = eQ / m_i v_s^2$  پارامتر برخورد با زاویه مجانبی مداری  $\frac{\pi}{2}$  و

$$\Lambda = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{\lambda_{Di}^2 + b_{\pi/2}^r}{b_c^r + b_{\pi/2}^r} \right) \quad (13-1)$$

لگاریتم کولن است که در بازه بین  $b_c$  تا  $\lambda_{Di}$  از آن انتگرال گرفته شده [۱۴]. وقتی پارامتر برخورد جذبی از طول دبای یون بیشتر باشد، از مولفه مداری نیروی کشش یونی صرف نظر می‌شود.

تمام نیروهای نام برده شده، به سه پارامتر سرعت یونی، اندازه ذرات غبار و مکان آن‌ها نسبت به الکترودها بستگی دارند. اما به طور خاص هر کدام از این نیروها، به نوعی وابستگی توانی به شعاع ذرات دارند و در نتیجه اندازه غبارها تاثیر زیادی روی نیروی وارد بر آن‌ها می‌گذارد. بار غبارها رابطه خطی با شعاع ذرات دارد پس نیروی الکتروستاتیکی هم با شعاع ذرات متناسب است. نیروی‌های اصطکاک و کشش یونی هر کدام به سطح مقطع برخورد و در نتیجه شعاع ذرات بستگی مستقیم دارند. نهایتاً نیروی گرانشی هم با شعاع ذرات متناسب است زیرا رابطه بین جرم و شعاع ذره به صورت  $a^3$  است.

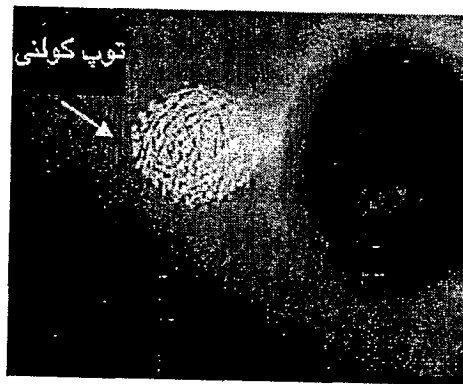
بارنز<sup>۱</sup> و هم‌کارانش در سال ۹۲ در مورد نیروهای وارد بر غبارها آزمایش‌هایی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند در یک پلاسمای تخلیه گازی آرگون با فشار  $100 \text{ mTorr}$ ، چگالی پلاسمای  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ،  $T_e = 2 \text{ eV}$  و برای غبارهای  $100$  نانومتری با چگالی دو برابر چگالی آب، نیروی کشش یونی تا زمانی که میدان الکتریکی در حدود  $14 \text{ V/cm}$  را حس کند، ذرات را به طرف الکترودها می‌راند. در این میدان الکتریکی، نیروهای الکتروستاتیکی و کشش یونی اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند. برای غبارهای  $1$  میکرومتری، این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که میدان الکتروستاتیکی در اطراف ذرات به مقدار  $35 \text{ V/cm}$  رسیده باشد. اما برای غبارهای  $10$  میکرومتری نیروی گرانش غالب است و تا زمانی که غبارها نیروی الکتروستاتیکی ناشی از میدان حدود  $1 \text{ V/cm}$  را حس نکنند، آن‌ها را به طرف الکتروود پایینی می‌راند. در پلاسماهایی که چگالی کم دارند، اثر نیروی کشش یونی ذرات از مقیاس  $10$  میکرومتر و بزرگ‌تر، در برابر نیروی گرانشی قابل صرف نظر کردن است [۱۴].

<sup>۱</sup> - Barnes

مشاهدات آزمایشگاهی در سال‌های اخیر نشان داده‌اند که علاوه بر پارامترهای ذکر شده، گرادیان دمای ذرات خنثی در محیط پلاسما هم می‌تواند منشا نیروی دیگری باشد که آن را نیروی ترموفورتیک<sup>۱</sup> می‌نامند. جهت نیروی ترموفورتیک به طرف داخل پلاسماست و ذرات را از نزدیکی الکترودها به طرف مرکز پلاسما می‌راند. نیروی ترموفورتیک موثر روی یک غبار کروی در یک گاز تک اتمی در فشار پایین به این صورت محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$F_T = -3/33 \left( \frac{a^2}{\sigma_{at}} \right) \nabla T_n \quad (13-1)$$

در این رابطه فرض شده که فاصله آزاد میانگین از شعاع ذرات بسیار بزرگ‌تر باشد. هم‌چنین در این رابطه  $\sigma_{at}$  سطح مقطع جنبشی پراکندگی اتمی گاز است. نیروی ترموفورتیک را منشا پدیده‌هایی از قبیل تشکیل توپ‌های کولنی<sup>۲</sup> می‌دانند [۱۶].



شکل ۱-۳: تشکیل یک توپ کولنی در اطراف آند [Arp. et.al. (2005)]

#### ۱-۲-۴ جفت‌شدگی قوی و ضعیف

وقتی ذرات ابعادی بیشتر از چند صد نانومتر دارند، بار نسبتاً زیادی را جذب می‌کنند و این باردار شدن، باعث برهم‌کنش‌های الکتروستاتیکی بین آن‌ها می‌شود. به‌طور کلی اگر انرژی پتانسیل الکتروستاتیکی بین ذرات، از انرژی گرمایی آن‌ها بیشتر باشد، جفت‌شدگی رخ می‌دهد؛ جفت‌شدگی‌های قوی، باعث ایجاد شبکه‌های بلور می‌شوند.

<sup>۱</sup> - Thermophoretic  
<sup>۲</sup> - Coulomb Balls

پارامتری که برای تعریف میزان جفت‌شدگی ذرات غبار تعریف می‌شود، پارامتر جفت‌شدگی کولن<sup>۱</sup> نام دارد که نسبت انرژی پتانسیل کولنی به انرژی جنبشی حرکت گرمایی ذرات است:

$$\Gamma = \frac{(eZ)^2}{dT_d} \quad (1-14)$$

که در این فرمول پارامتر  $d$  فاصله میانگین بین ذرات است که با چگالی تعداد آن‌ها نسبت  $d \sim n_d^{-1/3}$  دارد.  $T_d$  دمای جنبشی ذرات و  $Z$  بار آن‌هاست.

آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های مختلف نشان داده‌اند سیستمی از ذرات که تحت پتانسیل یوکاوا برهم‌کنش می‌کنند و پارامتر جفت‌شدگی در حدود ۱۰۰ دارند، یک جفت‌شدگی قوی تشکیل می‌دهند. پلاسماهای غباری با پارامتر جفت‌شدگی حدود ۱ و کمتر از آن، ذرات غباری با جفت‌شدگی ضعیف دارد که این نوع پلاسماهای غباری را با تقریب‌هایی می‌توان به صورت یک پلاسمای چند مولفه‌ای ایده‌آل در نظر گرفت.

<sup>۱</sup> - Coulomb Coupling Parameter