

ياحق

1.17914

۸۷/۱/۱۰۲۳۰۱

۸۷/۱/۲۸



دانشگاه شهید بهشتی

پژوهشکده لیزر و پلاسما

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فوتونیک

عنوان:

حل عددی معادلات پایستگی

جهت توصیف دینامیک گازی پلاسمای حاصل از کندگی لیزری

دانشجو:

مریم آقایی

استاد راهنما:

دکتر سید حسن توسلی

استاد مشاور:

دکتر بابک شکری

مرداد ۱۳۸۷

۱۳۸۷ / ۱۰ / ۰۵

۱۰۷۹۱۷



تاریخ
شماره
پوسته

بسمه تعالی

« صورتجلسه دفاع از پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد »

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۷۲۰۰۲۱۰۱ مورخ ۸۷/۵/۲۲ جلسه هیأت داوران ارزیابی پایان نامه خانم مریم آقائی به شناسنامه شماره ۱۲۹۴ صادره از اصفهان متولد ۱۳۶۱ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته فوتونیک

با عنوان: " حل عددی معادلات پایستگی جهت توصیف دینامیک گازی پلاسمای حاصل از کندگی لیزری "

به راهنمایی: دکتر سیدحسن توسلی

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۷/۳/۲۲ تشکیل گردید و براساس رأی هیأت داوران و با عنایت به ماده ۲۰ آئین نامه کارشناسی ارشد مورخ ۷۵/۱۰/۲۵ پایان نامه مزبور با نمره ۱۹/۶ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

۱- استاد راهنما: دکتر توسلی

۲- استاد مشاور: دکتر شکری

۳- استاد داور داخلی: دکتر نیکنام

۴- استاد داور خارجی: دکتر اشراقی

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی پژوهشکده: دکتر قمی



تقدیم به

زهرا نیکبخت، علی آقایی و سعید پوربابک

یارانی گرانمایه که همیشه، بهترین را برایم خواسته‌اند..

◆ سپاس فراوان از خدای بزرگ و حکیم که همیشه ثابت می‌کند، قدرت رویارویی با حتی سختترین‌ها را هم، به آدمی داده‌است و همیشه امیدوارم می‌دارد.

◆ تشکری صمیمانه از آقای دکتر سید حسن توسلی که به من آموختند چگونه فکر کنم و چگونه بیاموزم، سرمایه‌هایی که تا ابد باقی‌اند.

◆ با تشکر از آقای دکتر بابک شکری، که در یافتن پاسخ سؤالاتم، همیشه، راهنمای مؤثری بوده‌اند.

◆ با سپاس از آقای دکتر همایون اشراقی، که بی‌دریغ، مفاهیم دینامیک سیالات را به من آموختند و نیز، داوری این پژوهش را پذیرفتند.

◆ با تشکر از آقای دکتر علیرضا نیکنام، که مسئولیت داوری این پژوهش را قبول کردند.

◆ سپاسی دوستانه از خانم سمیه مهراییان، که با تواضعی باورنکردنی، خالصانه همراهیم کرد.

◆ با تشکر از Bengt Eliasson (Ruhr University, Bochum) که در سفر کوتاه خود به تهران، با در اختیار گذاشتن کتاب خود، مرا در یادگیری روش گودونوو راهنمایی کردند.

◆ تشکری ویژه از آقای سعید پوربابک، که به من آموخت هر کاری را، هرچند کوچک، کامل انجام دهم و خود صبورانه در دوستیش کامل بود.

◆ با تشکر از زهرا پوربابک و همه‌ی دوستانم در پژوهشکده‌ی لیزر و پلاسما بویژه همکارانم در آزمایشگاه بیناب سنجی لیزری.

◆ با سپاس از همه‌ی اساتید محترم پژوهشکده‌ی لیزر و پلاسما، بویژه آقای دکتر مهاجرانی که احترام ایشان به دانشجویان، همیشه برایم ارزشمند بوده‌است.

چکیده

در این پژوهش، یک مدل گرمایی یک بعدی، برای بررسی کندگی لیزری مس و بسط بخار مس در گاز زمینه‌ی یک اتمسفری (هلیوم)، ارائه شده است.

در این مدل، معادلات رسانش گرمایی در سطح مس و معادلات دینامیک گازی در توده‌ی ذرات بخار حاصل از کندگی یک لیزر پالسی نانو ثانیه، حل شده‌اند که این معادلات، به کمک روابط توازن جرم و انرژی در مرز بین فلز مس و بخار و بعلاوه، شرایط لایه‌ی نادسن، به هم جفت شده‌اند. با در نظر گرفتن یونش مس و هلیوم و فرض وجود تعادل گرمایی موضعی، به کمک معادلات ساها، تشکیل پلاسما بررسی شده است. پدیده‌ی پوشاندگی پلاسمایی و برهمکنش لیزر و پلاسما، طی دو فرایند جذب برمشترلانگ معکوس و یونش فوتونی در مدل اعمال شده است که نتایج عددی بدست آمده، نشان می‌دهد که جذب انرژی لیزر توسط پلاسما، با کاهش انرژی رسیده به سطح مس، تاثیر عمده‌ای روی ادامه‌ی فرایند کندگی دارد.

نتایج این پژوهش، توزیع فضایی و زمانی دمای فلز مس را در طول تابش لیزر و بعد از آن بدست می‌دهد. بعلاوه با ارائه‌ی توزیع فضایی ذرات مس و هلیوم، تشکیل موج ضربه در جلوی سطح مس بخوبی نشان داده شده است. همچنین، به کمک توزیع فضایی دما و فشار توده‌ی ذرات بخار، می‌توان تحلیل کامل‌تری از فرایند بسط دینامیکی گاز ارائه کرد. این پژوهش، به سبب در نظر گرفتن گاز زمینه (به جای خلأ) در فرایند کندگی لیزری، بررسی تشکیل پلاسما و اثر پوشاندگی پلاسمایی و در نظر گرفتن جملات مربوط به رسانش گرمایی، چشمه و چاه در معادله‌ی توازن انرژی، از دیگر پژوهش‌های کندگی لیزری، متمایز می‌شود.

کلید واژه‌ها:

کندگی لیزری، دینامیک گازی، بسط و گسترش گاز، پوشاندگی پلاسمایی، موج ضربه

فهرست جداول

جدول ۱-۳: مقادیر عددی استفاده شده در مدل. (۴۳)

جدول ۲-۳: مقادیر عددی α و I_0 (نسبت فشار معکوس بیشینه در چگالش صوتی) به صورت توابعی از

$$\text{لگاریتم نسبت } \frac{T}{T_s}. \quad (۵۲)$$

جدول ۱-۴: میانگین فضایی چگالی عددی الکترون‌ها و دمای پلاسما در زمان‌های مختلف. (۵۹)

فهرست شکلها

- شکل ۱-۲: طرح‌واره‌ی هندسی اختلال با سرعت مادون صوت. (۱۴)
- شکل ۲-۲: طرح‌واره‌ی هندسی اختلال با سرعت فراصوت. (۱۵)
- شکل ۳-۲: طرح‌واره‌ی موج ترقیق. (۲۰)
- شکل ۴-۲: طرح‌واره‌ی خروج شتابدار پیستون از داخل لوله و ایجاد موج ترقیق. (۲۱)
- شکل ۵-۲: طرح‌واره‌ی ورود شتابدار پیستون به داخل لوله و ایجاد موج ضربه. (۲۲)
- شکل ۶-۲: طرح‌واره‌ی حالات مختلف مشخصه‌ها در دو طرف دو منحنی معلوم در سیال. (۲۴)
- شکل ۷-۲: مدل‌سازی سلول‌های فرض شده در مسئله و مرزهای آنها. (۲۸)
- شکل ۸-۲: مدل‌سازی انتقال پرش اطلاعات توسط ۳ موج در هر مرز. (۲۹)
- شکل ۹-۲: مدل‌سازی نواحی مختلف فضای مکان-زمان با توجه به متغیرهای معلوم و مجهول در مسئله. (۳۰)
- شکل ۱۰-۲: معادلات پایستگی حاکم در عبور از ناپیوستگی‌ها. (۳۴)
- شکل ۱۱-۲: حالات مختلف پیکربندی مسئله‌ی ریمان با توجه به حضور و مکان دو موج ضربه و ترقیق. (۳۵)
- شکل ۱-۴: پروفایل زمانی پالس لیزر اولیه (منحنی توپر) و تابش لیزر رسیده به مس پس از عبور از پلازما (منحنی نقطه‌چین). (۵۴)
- شکل ۲-۴: توزیع زمانی دمای سطح هدف (منحنی توپر، محور سمت چپ) و پروفایل زمانی پالس لیزر پوشیده شده با پلازما (منحنی نقطه‌چین، محور سمت راست). (۵۶)
- شکل ۳-۴: توزیع فضایی دمای هدف در زمان‌های ۵۰ (منحنی خط‌چین)، ۱۰۰ (منحنی خط-نقطه‌چین)، ۱۵۰ (منحنی نقطه‌چین) و ۲۰۰ نانوثانیه (منحنی توپر). (۵۸)
- شکل ۴-۴: توزیع فضایی چگالی عددی مس در زمان‌های ۵۰ (منحنی خط‌چین)، ۱۰۰ (منحنی خط-نقطه-چین)، ۱۵۰ (منحنی نقطه‌چین) و ۲۰۰ نانوثانیه (منحنی توپر). (۶۰)
- شکل ۵-۴: توزیع فضایی چگالی عددی هلیوم در زمان‌های ۵۰ (منحنی خط‌چین)، ۱۰۰ (منحنی خط-نقطه-چین)، ۱۵۰ (منحنی نقطه‌چین) و ۲۰۰ نانوثانیه (منحنی توپر). (۶۲)

شکل ۴-۶: توزیع فضایی دمای توده‌ی ذرات در زمان‌های ۵۰ (منحنی خط‌چین)، ۱۰۰ (منحنی خط-نقطه-چین)، ۱۵۰ (منحنی نقطه‌چین) و ۲۰۰ نانوثانیه (منحنی توپر). (۶۴)

شکل ۴-۷: توزیع فضایی فشار توده‌ی ذرات در زمان‌های ۵۰ (منحنی خط‌چین)، ۱۰۰ (منحنی خط-نقطه-چین)، ۱۵۰ (منحنی نقطه‌چین) و ۲۰۰ نانوثانیه (منحنی توپر). (۶۵)

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۱

فصل دوم: مفاهیم و معادلات پایه ۷

۱-۲ معادله‌ی بقای جرم، معادله‌ی حرکت و پایستگی انرژی ۸

۱-۱-۲ معادله‌ی بقای جرم ۸

۲-۱-۲ معادله‌ی حرکت ۹

۳-۱-۲ معادله‌ی پایستگی انرژی ۱۱

۲-۲ معادلات ناویر-استوکس و معادلات اویلر ۱۳

۳-۲ انتقال اختلال در یک گاز متحرک ۱۴

۴-۲ صفحات ناپیوستگی ۱۷

۱-۴-۲ ناپیوستگی موازی ۱۸

۲-۴-۲ موج ضربه ۱۸

۳-۴-۲ صفحات ناپیوستگی ضعیف ۱۹

۵-۲ مشخصه‌ها ۲۰

۶-۲ ناوردهای ریمان ۲۲

۷-۲ مسئله‌ی ریمان و مثال ترافیک ۲۵

۸-۲ روش گودونو و حل مسئله‌ی ریمان برای معادله‌ی اویلر ۲۷

فصل سوم: معادلات حاکم و مدل ریاضی ۳۹

۱-۳ برهمکنش لیزر - ماده ۴۱

۲-۳ دینامیک بسط توده‌ی ذرات بخار ۴۴

۳-۳	تشکیل پلاسما.....	۴۶
۴-۳	پوشاندگی حاصل از پلاسما.....	۴۷
۵-۳	جفت شدگی بخش‌های مختلف و شرایط مرزی.....	۴۹
فصل چهارم: نتایج و تحلیل.....		
۵۳		
۱-۴	پوشاندگی حاصل از پلاسما.....	۵۳
۲-۴	برهمکنش لیزر - ماده.....	۵۵
۳-۴	بسط توده‌ی ذرات بخار و تشکیل پلاسما.....	۵۸
نتیجه‌گیری و پیشنهاد.....		
۶۷		
مراجع.....		
۶۹		
چکیده به انگلیسی.....		
۷۴		

فصل اول: مقدمه

علوم مختلف را عموماً به سه روش می‌توان مورد بررسی و مطالعه قرار داد. این روش‌ها عبارتند از:

(۱) روش نظری^۱

(۲) روش میانه (که می‌تواند بصورت شبیه سازی^۲ یا حل عددی^۳ باشد)

(۳) روش تجربی^۴

در روش نظری روابط حاکم بر مسئله نوشته شده و با حل آنها و سپس تجزیه و تحلیل نمودن نتایج می‌توان پدیده‌های مختلف را شناسایی و مورد مطالعه قرار داد. در شبیه سازی یک پدیده، حل مسئله را با نوشتن ابتدایی ترین معادلاتی که در یک سیستم فیزیکی می‌تواند وجود داشته باشد (مثلاً معادله نیوتن)، شروع می‌کنند و برهمکنش‌های مختلف درون سیستم، مرحله به مرحله شبیه سازی می‌شود. روش حل عددی نیز ابزاری مناسب برای بررسی پدیده هاست. یکی از مزایای استفاده از این روش قابل دسترس بودن

¹ Theoretical Method

² Simulation

³ Numerical solution

⁴ Experimental method

آن و عدم نیاز به امکانات و تجهیزات وسیع است. داشتن یک کامپیوتر با تواناییهای لازم می تواند برای حل عددی یک مسئله کافی باشد. علاوه بر این با روش حل عددی می توان در زمان و هزینه به طور قابل ملاحظه ای صرفه جویی کرد، با استفاده از نتایج عددی این روش، پژوهشگر می تواند کمیت های مورد نظر را در محدوده ای آنچه روش عددی پیشنهاد می دهد تنظیم کند و به انجام آزمایش خود سرعت بخشد. در نهایت، روش تجربی بعنوان روشی برای بررسی پدیده های فیزیکی، از اعتبار بالایی برای نزدیک شدن به مسائل برخوردار است. برای انجام یک آزمایش تجربی موفق لازم است ابتدا به روش حل عددی، بهینه پارامترهای آزمایش مورد نظر بدست آید. در این پژوهش به حل عددی پدیده کندگی لیزری به منظور بهینه سازی کمیتهای آزمایشگاهی پرداخته شده است. امروزه مطالعه ی کندگی لیزری، به علت کاربردهای فراوانی که پیدا کرده است از اهمیت زیادی برخوردار است. از جمله ی این کاربردها می توان به تحلیل عنصری مواد^۵ [۱-۴]، لایه نشانی لیزر پالسی^۶ (PLD) [۵-۷]، تولید نانو ذرات^۷ [۸-۱۰]، تولید کلاستر^۸ [۱۱]، سنتز مواد^۹ [۱۲-۱۴]، ماشین کاری دقیق^{۱۰} [۱۵-۱۶]، جراحی^{۱۱} [۱۷]، طیف سنجی تخلیه القائیده لیزری^{۱۲} (LIBS) [۱۸]، طیف سنجی جرمی ریزکاوهای لیزری^{۱۳} (LMMS) [۱۹،۲۰] و طیف سنجی پلاسما جفت شده القایی^{۱۴} (ICP) [۲۱] اشاره کرد. مطالعه بسط ماده ی کنده شده و گسترش آن در خلأ یا در یک گاز زمینه، موضوع مهمی در دینامیک گازی و کندگی لیزری است. بعنوان مثال، پالس لیزری که عمدتاً در PLD استفاده می شود، دارای پهنای زمانی چند ده نانوثانیه و شار انرژی چند ژول بر سانتیمتر مربع است. کیفیت فیلم لایه نشانی شده به شدت به محدوده و توزیع انرژی جنبشی ذرات بخار کنده شده بستگی دارد. در نتیجه دانستن دینامیک ذرات بخار کنده شده از ماده در یک زمینه ی گازی برای بهینه کردن پارامترهای تجربی در یک فرایند تولید فیلم بسیار حیاتی است.

⁵ Analysis of materials

⁶ Pulsed laser deposition

⁷ Nanoparticle manufacturing

⁸ Cluster production

⁹ Synthesizing materials

¹⁰ Precision machining

¹¹ Surgery

¹² Laser induced breakdown spectrometry

¹³ Laser microprob mass spectrometry

¹⁴ Inductively coupled plasma spectroscopy

برای ارائه توصیف خلاصه‌ای از فرایندهای فیزیکی که در یک کندگی لیزری سهم‌اند می‌توان اینطور توضیح داد که تمرکز یک باریکه‌ی پرنرژی لیزر روی یک سطح (که می‌تواند جامد یا مایع باشد و از این پس آن را سطح هدف یا هدف نیز می‌نامیم)، موجب افزایش دما، ذوب و تبخیر لایه‌ی نازکی از ماده‌ی تحت تابش لیزر می‌شود. جذب انرژی لیزر توسط توده ذرات بخار شده^{۱۵} منجر به یونیزه شدن این ذرات می‌شود و در نتیجه جلوی هدف، پلاسما تشکیل می‌شود. بعلت تشکیل پلاسما در جلوی هدف، دیگر لیزر مثل قبل به سطح نمی‌رسد بلکه بخشی از آن پیش از رسیدن به هدف توسط پلاسمای تشکیل شده جذب می‌شوند که اصطلاحاً به آن پوشاندگی پلاسمایی^{۱۶} می‌گوییم [۲۲]. جذب پالس لیزر عمدتاً با دو روش برمشرلانگ معکوس^{۱۷} و یونش فوتونی^{۱۸} اتمهای برانگیخته صورت می‌گیرد.

کندگی لیزری را می‌توان با روش‌ها و تحت شرایط متفاوتی مطالعه کرد. این مطالعات می‌تواند با مدل‌های هیدرودینامیکی^{۱۹} [۴۲-۸،۲۳]، شبیه‌سازی‌های مونت کارلو^{۲۰} [۴۷-۴۳] و یا ترکیبی از هر دو^{۲۱} [۴۸،۴۹] انجام شود. بیشتر مدل‌هایی که برهمکنش لیزر-جامد را بررسی کرده‌اند، بسط ذرات بخار را در خلأ و یا در گاز زمینه‌ی کم فشار (معمولاً تا ۱۰۰ پاسکال) مطالعه کرده‌اند و تنها برخی از آنها فشار گاز زمینه را تا ۱ اتمسفر در نظر گرفته‌اند. [۴۲، ۴۰-۴۳، ۳۵]

وقتی فشار گاز زمینه زیاد باشد، مطالعه‌ی بسط ذرات کنده شده با روش مونت کارلو یا روش ترکیبی بسیار وقت گیر و طولانی خواهد بود. بنابراین دراین پژوهش، برای مطالعه‌ی بسط مواد در گاز یک اتمسفری از مدل هیدرودینامیکی استفاده کرده‌ایم.

اثر کلی گاز زمینه محصور کردن فضایی ذرات و کاهش سرعت بسط آنهاست. بعلاوه، یک پسرروی به سمت عقب (به سمت هدفی که ذرات از آن کنده می‌شوند) نیز رخ می‌دهد [۸،۲۶] علاوه بر حضور یا عدم حضور گاز زمینه، نکته‌ی بسیار مهم دیگر در اینگونه تحقیقات، شدت و طول پالس لیزر است. چراکه می‌توان مطالعات را در حضور یک گاز زمینه‌ی ۱ اتمسفری انجام داد، اما به خاطر بلند بودن پالس لیزر مثلاً در

¹⁵ Plume

¹⁶ Plasma sheilding

¹⁷ Inverse bremsstrahlung

¹⁸ Photoionization

¹⁹ Hydrodynamic model

²⁰ Monte Carlo simulation

²¹ Hybrid models

حدود میلی ثانیه و بسیار کم بودن شدت لیزر (در حدود $10^8 - 10^9 W/cm^2$)، ذرات کنده شده نتوانند یونیزه شوند و در نتیجه هیچ پلاسمایی در جلوی سطح تشکیل نشود [۸]. هرچند برخی از محققانی که از پالس لیزر کوتاه چند نانوثانیه و شدت بالا (در حدود $10^9 W/cm^2$) استفاده کرده‌اند نیز برای ساده‌سازی محاسبات خود، یونش گاز و تشکیل پلازما را در نظر نگرفته و از آن چشم پوشیده‌اند [۴۲]. لازم به ذکر است که در یک چنین شرایطی (بالا بودن شدت لیزر)، یونیزه شدن گاز زمینه و همینطور ذرات بخار کنده شده از سطح، موضوعی است که برای حفظ صحت و دقت نتایج حتماً باید در محاسبات وارد شود تا بتوانند اطلاعات صحیحی را در اختیار کاربران هریک از کاربردهای ذکر شده قرار دهد. یونش و تشکیل پلازما در شرایط خلأ نیز مطالعه شده است [۵۱،۵۰] اما نکته‌ی مهم این است که وقتی در مطالعات بجای خلأ، اطراف ماده یک گاز زمینه در نظر بگیریم، در برهمکنش ذرات بخار کنده شده با گاز زمینه، فرایندهای دینامیک گازی بسیار پیچیده‌تری اتفاق می‌افتد که ما را ناگزیر می‌کنند که پدیده‌های فیزیکی مختلفی چون بازترکیب^{۲۲} و یا تشکیل امواج ضربه^{۲۳} را مورد مطالعه قرار دهیم. با توجه به آنچه ما تا زمان انجام این تحقیق به دست آوردیم، تنها یک گروه تحقیقاتی روی بسط ذرات و تشکیل پلازما در حضور گاز زمینه‌ی پرفشار کار کرده‌اند [۳۹]. در این پژوهش، ما یک مدل یک بعدی از کندگی لیزری روی فلز مس را توصیف می‌کنیم که ذرات کنده شده در گاز زمینه‌ی ۱ اتمسفری بسط پیدا می‌کنند. علاوه بر گرم شدگی، ذوب و تبخیر مس و بسط بخار آن درون هلیوم یک اتمسفری، تشکیل پلازما و همینطور پوشاندگی پلاسمایی تابش لیزر و تأثیرات آن روی میزان تابش رسیده به سطح فلز در نظر گرفته شده‌اند. یونیزگی هلیوم تا یک مرتبه و مس تا دو مرتبه فرض شده است. به بیان دیگر، پلاسمای مورد نظر شامل ذرات مس ختشی، مس یک بار مثبت و دو بار مثبت، هلیوم ختشی و هلیوم یک بار مثبت است (پنج گونه ذره). پدیده‌های یونش فوتونی و برمشترلانگ معکوس برای برخوردهای الکترون-ختشی و الکترون-یون در جذب تابش لیزر توسط پلازما بررسی شده‌اند. در این مدل، ما از یک لیزر نانوثانیه با شدت $10^8 - 10^9 W/cm^2$ استفاده کرده‌ایم. دلیل انتخاب گاز هلیوم به عنوان گاز زمینه نیز عدم برهمکنش آن با بخار مس بوده است. شدت لیزری که در اینجا استفاده شده است، همان مقداری را دارد که در کندگی‌های لیزری برای تولید ذرات نمونه جهت طیف‌سنجی ICP و دیگر کاربردها لازم است. لازم به ذکر است که با گذشت زمان، ذرات بخار، انبساط

²² Recombination

²³ Shock wave

شعاعی پیدا خواهند کرد و در نتیجه شرط تعادل ترمودینامیکی محلی برقرار نخواهد بود. چرا که باز ترکیب سه ذره‌ای^{۲۴} اتفاق می‌افتد و این بدین معنی است که معادلات ساها^{۲۵} دیگر صحت نخواهند داشت. برای مطالعه‌ی زمان‌های طولانی‌تر، مدل باید بسط را به صورت شعاعی دنبال کند. بنابراین در این کار ما نتایج را تا زمان ۲۰۰ نانوثانیه پیگیری کرده‌ایم که در مقایسه با پژوهش‌های مشابه، زمان قابل ملاحظه‌ای است و اطلاعات کاملی از کل فرآیندهای اتفاق افتاده در کندگی لیزری در اختیار قرار می‌دهد.

هرچند بررسی برهمکنش لیزر- ماده و بدست آوردن اطلاعات دقیق از سطح کنده شده و توزیع دمایی نقاط مختلف سطح، موقعیت ذرات ذوب شده و یا بخار شده بر حسب زمان و غیره برای کاربردهای مختلف کندگی لیزری حایز اهمیت است، اما نکته‌ی قوت این پژوهش در بررسی مراحل بعدی کندگی لیزری و مطالعه‌ی بسط دینامیک گازی و همچنین تشکیل پلاسماست. البته مطالعه‌ی این مرحله بخاطر پیچیدگی‌های فیزیکی آن بسیار دشوار و زمانبر بود. لازم بود تا انتقال اختلال در یک گاز کاملاً مطالعه، بررسی و اعمال شود. در نتیجه مفاهیمی چون منحنی‌های مشخصه^{۲۶}، ناوردهای ریمان^{۲۷}، انتشار فراصوت^{۲۸} یا مادون صوت^{۲۹}، صفحات ناپیوستگی^{۳۰}، موج ضربه و موج ترقیق^{۳۱} و غیره مطالعه و در حل مسأله اعمال شد. از آنجا که با توجه به تشکیل موج ضربه مقدار برخی از کمیت‌ها بتدریج ناپیوسته می‌شود، لازم بود تا مسأله‌ی خود را با مسأله‌ی ریمان^{۳۲} تطبیق داده و از حل مسأله‌ی ریمان برای معادلات پایستگی استفاده کنیم که مطالعه و درک این مباحث و حل ناپیوستگی‌ها کاملاً سخت، لذت‌بخش و ارزشمند بود. از آنجا که بخش عمده‌ای از این پژوهش مربوط به مفاهیم پایه‌ی بسط دینامیک گازی، معادلات پایستگی و مسأله‌ی ریمان می‌شود، برای فهم بهتر موضوع، فصل دوم این پژوهشنامه به معرفی و توضیح این مفاهیم و معادلات حاکم بر مسئله اختصاص داده شده است. خوانندگانی که با مفاهیم پایه دینامیک سیالات آشنائی دارند می‌توانند از مطالعه این فصل صرف‌نظر نمایند. با این حال مطالعه بخش (۲-۷) که در آن به ارائه یک مثال از مسئله ریمان

²⁴ Three body recombination

²⁵ Saha equation

²⁶ Characteristic curves

²⁷ Riemann invariants

²⁸ Supersonic

²⁹ Subsonic

³⁰ Surface of discontinuity

³¹ Rarefaction wave

³² Riemann problem

پرداخته شده است پیشنهاد می شود. در فصل سوم محاسبات و مدل ریاضی مسأله مطرح می شود و فصل چهارم، نتایج بدست آمده را مطرح و تحلیل می کند. بطور کلی مسأله در چهار مرحله مطالعه می شود. این مراحل عبارتند از برهمکنش لیزر- ماده در سطح، بسط ذرات بخار (که این دو مرحله با شرایط مرزی با هم جفت می شود) تشکیل پلازما و پوشاندگی پلاسمایی که مباحث مربوط به هر یک جداگانه مطرح و بررسی می شود.

لازم به ذکر است که در این نوشتار، تنها معادلاتی که در نتایج بحث از آنها استفاده می شود، شماره گذاری شده اند. عبارتی، از شماره گذاری روابطی که از آنها برای رسیدن به معادلات اصلی استفاده شده است، خودداری کرده ایم.

در نهایت، خاطر نشان می شود که مطالعه این رساله، می تواند برای محققانی که در زمینه طیف سنجی تخلیه القایده لیزری، کندگی لیزری، دینامیک گازی یا امواج ضربه فعالیت می کنند، مفید باشد.

فصل دوم: مفاهیم و معادلات پایه

علم دینامیک سیالات¹ به مطالعه‌ی حرکت شاره‌ها (مایع یا گاز) می‌پردازد. از آنجا که پدیده‌های موردنظر در دینامیک شاره از نوع ماکروسکوپی هستند، یک شاره بصورت یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود. این بدین معناست که هر حجم کوچکی از شاره آنقدر بزرگ فرض می‌شود که تعداد بسیار زیادی از مولکول‌های شاره را در خود جای می‌دهد.

غالباً توصیف ریاضی حالت یک شاره‌ی متحرک به کمک معادلاتی صورت می‌گیرد که سرعت شاره $u = u(x, y, z, t)$ و دو تا از کمیت‌های ترمودینامیکی شاره مثل فشار، $P(x, y, z, t)$ و چگالی، $\rho(x, y, z, t)$ را بدست می‌دهند. همانطور که معلوم است، با داشتن مقدار دو تا از کمیت‌های ترمودینامیکی و همچنین معادله‌ی حالت سیستم، می‌توانیم مقدار همه‌ی کمیت‌های مربوط به شاره را بدست بیاوریم. تمام این کمیت‌ها، عموماً تابعی از مختصات x ، y ، z و زمان t هستند.

¹ Fluid dynamics

در این فصل، در ابتدا معادلات بقای جرم، انرژی و معادله حرکت معرفی شده و پس از آن، به توضیحی در مورد معادلات ناویر استوکس و اویلر می‌پردازیم. سپس انتقال اختلال در گاز، صفحات ناپیوستگی، منحنی‌های مشخصه، ناورداها و مسئله‌ی ریمان و در نهایت روش گودونوو مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۲) معادله بقای جرم^۲، معادله حرکت^۳ و پایستگی انرژی^۴ [۵۲، ۵۳]

به طور کلی، برای توصیف حرکت یک شاره لازم است معادلات پایستگی جرم، انرژی و معادله حرکت را برای آن بدست آوریم.

۱-۱-۲) معادله بقای جرم

$u(x, y, z, t)$ را در نظر می‌گیریم که سرعت شاره در نقطه‌ی مشخص (x, y, z) و زمان مشخص t است. منظور از نقطه‌ی مشخص، یک نقطه‌ی ثابت در فضاست و نه یک ذره‌ی ثابت از شاره، چراکه با گذشت زمان، ذرات شاره در فضا حرکت می‌کنند. برای فشار و چگالی هم همین تابعیت مکانی و زمانی را قائل می‌شویم.

برای بدست آوردن معادله پایستگی جرم، از توازن جرم در یک المان حجمی V_0 که شاره در آن جریان دارد، استفاده می‌کنیم:

$$\left\{ \text{نرخ جرم خروجی} \right\} - \left\{ \text{نرخ جرم ورودی} \right\} = \left\{ \text{نرخ تغییرات جرم} \right\}$$

مقدار جرم شاره در این حجم برابر با $\int \rho dV$ است که ρ چگالی شاره است و جمع، روی تمام حجم V_0 انجام می‌شود. مقدار شار گذرنده از یک المان سطح dA روی یکی از سطوح مرزی این حجم در واحد زمان برابر با $\rho u \cdot dA$ است. بزرگی dA برابر با مساحت المان سطحی است که شاره از آن می‌گذرد و جهت این بردار سطح در جهت بردار عمود بر آن است. اگر $\rho u \cdot dA$ مثبت باشد، شار گذرنده به سمت خارج این حجم است و اگر منفی باشد، شاره به درون حجم می‌آید. بنابراین جرم کل شاره که در واحد

² The equation of continuity

³ Equation of motion

⁴ Law of conservation of energy

زمان از حجم V_0 خارج می‌شود برابر با $\oint \rho u \cdot dA$ است که جمع روی تمام سطح بسته‌ای که حجم مذکور را می‌سازد انجام می‌شود.

بعلاوه، می‌توان کاهش جرم موجود در حجم V_0 را در واحد زمان بصورت $\partial/\partial t \int \rho dV$ - نشان داد. حال دو رابطه‌ی بدست آمده را بصورت زیر می‌توان در تساوی هم قرار داد:

$$\partial/\partial t \int \rho dV = -\oint \rho u \cdot dA \quad (1-2)$$

با توجه به رابطه‌ی گرین^۵ می‌توان انتگرال سطحی را به حجمی تبدیل کرد:

$$\oint \rho u \cdot dA = \int \text{div}(\rho u) dV$$

بنابراین:

$$\int [\partial \rho / \partial t + \text{div}(\rho u)] dV = 0 \quad (2-2)$$

چون این رابطه باید برای هر حجم دلخواهی از شاره برقرار باشد، نتیجه می‌گیریم که صفر شدن آن بایستی مستقل از محدوده‌ی انتگرال گیری باشد. در نتیجه مقدار انتگرال گیری شده باید برابر با صفر قرار گیرد. در نتیجه، رابطه‌ی زیر که به معادله‌ی پیوستگی معروف است بدست می‌آید.

$$\partial \rho / \partial t = -\text{div}(\rho u) \quad (3-2)$$

$$\left\{ \text{نرخ خالص افزایش جرم در واحد حجم با همرفت} \right\} = \left\{ \text{نرخ افزایش جرم در واحد حجم} \right\}$$

۲-۱-۲) معادله‌ی حرکت

برای بدست آوردن معادله‌ی حرکت برای یک سیال، توازن اندازه حرکت را برای یک المان حجمی به

صورت زیر می‌نویسیم:

$$\left\{ \text{نرخ تکانه خروجی از المان حجم} \right\} - \left\{ \text{نرخ تکانه ورودی به المان حجم} \right\} = \left\{ \text{نرخ افزایش تکانه} \right\} + \left\{ \text{نیروهای خارجی} \right\}$$

⁵ Green's formula