

مروری بر روش‌های اندازه‌گیری مبتنی بر تغییر چگالی جریان سیال

سید مصطفی موسوی عبدالهی^۱، محمد زارع^۲، آرمان محسنی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

خلاصه

در طی سال‌های اخیر، مطالعه‌ی روش‌های اندازه‌گیری نوری و توسعه‌ی آنها همواره مورد توجه بسیاری از پژوهشگران فعال در زمینه‌های تحقیق و توسعه در مهندسی بوده است. اگرچه بیشتر این روش‌ها در دهه‌های گذشته توسعه داده شده‌اند، اما امروزه کاربردهای آنها در بررسی بسیاری از پدیده‌های مرتبط با جریان سیالات، بیش از پیش رایج شده است. با توجه به اهمیت این موضوع، در این مقاله به بررسی اصول هر یک از روش‌های اندازه‌گیری تغییرات چگالی پرداخته می‌شود و ویژگی‌ها و محدودیت‌های آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، روش‌های شلیرن زمینه‌ای (بی.ا.اس.) و شلیرن زمینه‌ای مقطعی که از تازه‌ترین روش‌های اندازه‌گیری چگالی به شمار می‌روند، مورد مطالعه قرار گرفته و معرفی می‌شوند.

کلمات کلیدی: روش‌های اندازه‌گیری نوری، روش شلیرن زمینه‌ای (بی.ا.اس.)، روش شلیرن زمینه‌ای مقطعی، تغییرات چگالی در جریان سیال

فهرست نمادها	
حروف لاتین	حروف یونانی
c	سرعت نور در محیط مورد بررسی
c_v	سرعت نور در خلأ
f	فاصله‌ی کانونی
I	شدت نور
K	ثابت گلدستون-دیل
n	ضریب شکست نور
x, y, z	محورهای مختصاتی عمود بر z
	زاویه‌ی پرتوها با محور z
	میزان جابجایی پرتو نور در جهت x
	میزان جابجایی پرتو نور در جهت y
	زاویه‌ی انحراف پرتو
	طول موج نور
	چگالی

* نویسنده‌ی مسئول: دکتر آرمان محسنی، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

ایمیل: Ar_Mohseni@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

در صورتی که در یک میدان جریان سیال، اختلاف چگالی و به ازای آن تغییرات ضریب شکست نور وجود داشته باشد راستای پرتوهای نور و فاز (حالت) آن پس از عبور از این میدان، دچار تغییر می‌شود. با استفاده از این ویژگی، اطلاعاتی بدست می‌آید که قابل نمایش بر روی یک صفحه می‌باشد و اغلب به آن، مرئی‌سازی جریان نوری^۱ می‌گویند چرا که در آن از روش‌های نوری در تعیین و اندازه‌گیری تغییرات ضریب شکست نور و چگالی سیال استفاده می‌گردد. با استفاده از اطلاعات بدست آمده در امتداد مسیر هریک از پرتوهای نور تابیده شده به درون سیال، می‌توان مقادیر محلی پارامترهایی همچون چگالی سیال را تعیین کرد.

روش‌های نوری اندازه‌گیری چگالی همچون سایه‌نگاری^۲، روش شلیرن^۳، روش ماره^۴، تداخل‌سنجی^۵، پرتونگاری مقطعی نوری^۶ و شلیرن زمینه‌ای (بی.ا.اس.)^۷ از جمله روش‌های شناخته شده‌ای هستند که از دهه‌های پیشین تاکنون مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌های نوری بر پایه‌ی تغییرات ضریب شکست بوده و تغییر چگالی جریان را نمایش می‌دهند. اگرچه هر یک از این روش‌ها در دهه‌های گذشته توسعه داده شده‌اند، اما امروزه کاربردهای آنان در بررسی پدیده‌های مختلف همچون جریان‌های تراکم‌پذیر، انتقال حرارت جابجایی، انتقال جرم، فرآیندهای اختلاطی، احتراق و غیره بیش از پیش رایج شده است [۲، ۱]. از این‌رو با توجه به اهمیت و کارایی هر یک از این روش‌ها در بسیاری از موضوعات مرتبط با جریان سیالات، در این مقاله اصول روش‌های تجربی فوق ارائه می‌شود و ویژگی‌ها و محدودیت‌های آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، روش شلیرن زمینه‌ای مقطعی^۸ که اخیراً مورد توجه بسیاری از پژوهشگران فعال در حوزه‌ی روش‌های اندازه‌گیری نوری قرار گرفته است و در حال تحقیق و توسعه می‌باشد، در اینجا معرفی می‌گردد. از آنجایی که اصول تمامی این روش‌ها بر اساس تغییرات ضریب شکست (که ناشی از تغییرات چگالی می‌باشد) بنا شده است، نخست چگالی، ضریب شکست و نحوه‌ی ارتباط این دو پارامتر با یکدیگر معرفی می‌شوند.

۲. چگالی، ضریب شکست و مرئی‌سازی جریان نوری

ضریب شکست یک محیط مادی در علم نورشناسی، مقیاسی است بدون بُعد برای نشان دادن آنکه سرعت نور در آن محیط تا چه میزان نسبت به خلأ کاهش می‌یابد و به صورت زیر تعریف می‌گردد [۳]:

$$n = \frac{c_v}{c} \quad (1)$$

که در آن، c_v سرعت نور در خلأ و c سرعت نور در محیط موردنظر می‌باشد. بر اساس رابطه‌ی کلازیوس-ماسوتی^۹، ضریب شکست با چگالی جریان ارتباط دارد [۴]. برای گازها، این رابطه به شکل ساده‌تری با نام رابطه‌ی گلدستون-دیل^{۱۰} تبدیل می‌شود [۲]:

¹ Optical Flow Visualisation

² Shadowgraphy

³ Schlieren

⁴ Moiré Technique

⁵ Interferometry

⁶ Optical Tomography

⁷ Background Oriented Schlieren (BOS)

⁸ Tomographic Background Oriented Schlieren (TomoBOS)

⁹ Clausius-Massotti

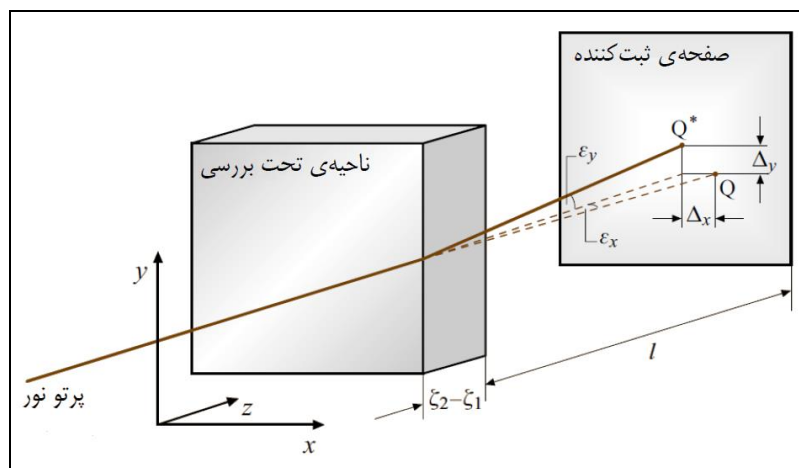
¹⁰ Gladstone-Dale

$$n-1 = K\rho \quad (2)$$

در این رابطه، ρ چگالی گاز و K ثابت گلدستون-دیل می‌باشد که دارای بُعد L^3/M بوده و مقدار آن برای گازهای مختلف، متفاوت می‌باشد و همچنین تا حد ناچیزی به طول موج نور، λ بستگی دارد [۷،۶]. در جریان تراکم‌پذیر یک گاز ایده‌آل، چگالی تابعی از عدد ماخ می‌باشد [۸]. از این‌رو، در این جریان‌ها با تعیین میزان چگالی از طریق روش‌های مورد مطالعه در این مقاله، عدد ماخ و سرعت سیال را نیز می‌توان اندازه‌گیری کرد.

از بررسی انتشار پرتوهای نور در یک میدان جریان شفاف با چگالی غیرهمگن می‌توان مشاهده کرد که در اثر اختلاف چگالی و در نتیجه تغییرات ضریب شکست، پرتوهای نور از مسیر آرام و اصلی خود منحرف می‌شود. این انحراف را می‌توان همانند شکل ۱ بر روی صفحه‌ای نمایش داد. همان‌طور که در این شکل آمده است، Δx و Δy میزان جابجایی و ϵ_x و ϵ_y زوایای انحراف پرتو نور می‌باشند. علاوه بر انحراف نور، فاز پرتو نور با پرتویی که در هنگام عدم وجود تغییرات چگالی بر روی صفحه نمایش داده می‌شود، متفاوت است. این اختلاف فاز نور را می‌توان به صورت علائم قابل رؤیت بر روی یک صفحه ثبت کرد. با استفاده از علائم و ارتباط آن‌ها با ضریب شکست و توزیع چگالی می‌توان به بررسی جریان و یا جسم مورد نظر پرداخت. هر یک از روش‌های مرئی‌سازی جریان نوری یک ویژگی خاص، مانند جابجایی، Δ ، زاویه‌ی انحراف، ϵ ، و اختلاف فاز نور را آشکارسازی یا اندازه‌گیری می‌کنند. به عنوان نمونه، در روش‌های شلیرن و ماره، زاویه‌ی انحراف پرتوها، ϵ ، به کار می‌رود و روش‌های سایه‌نگاری و تداخل‌سنجی نیز به ترتیب بر اساس میزان جابجایی پرتو نور، Δ ، و اختلاف فاز نور عمل می‌کنند.

علاوه بر تراکم‌پذیری، عوامل دیگری نیز سبب تغییر چگالی در یک جریان می‌شوند که از جمله آن‌ها، تغییرات دما است که می‌تواند در اثر فرآیند انتقال حرارت به وجود آید. یک عامل دیگر، اختلاف غلظت در سیالات غیرهمگن می‌باشد که در فرآیندهایی همچون اختلاط به وجود می‌آید. برای اندازه‌گیری کمی چگالی و تغییرات آن، بایستی ارتباط بین ضریب شکست و چگالی مشخص باشد. در خصوص گازهای ایده‌آل، از رابطه‌ی (۲) می‌توان ارتباط بین این دو پارامتر را تعیین کرد.

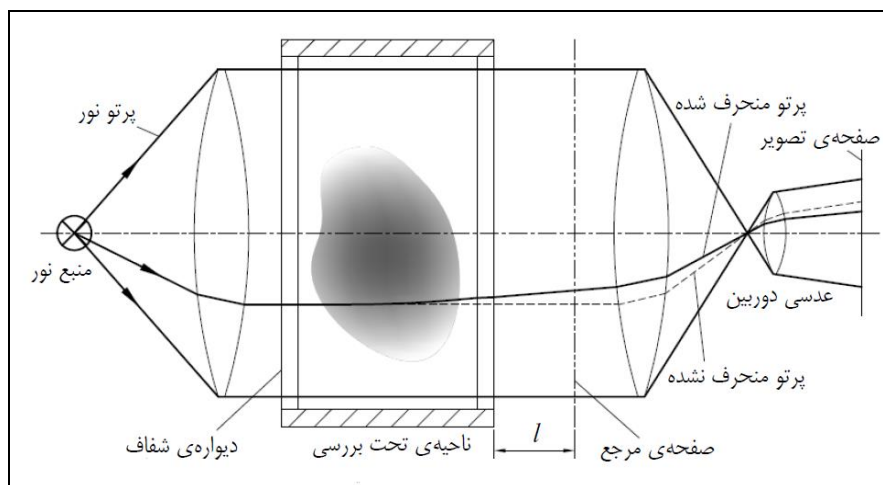


شکل ۱ - انحراف پرتو نور در یک میدان تحت بررسی با ضریب شکست متغیر [۲]

۳. سایه‌نگاری

^۱ در اکثر گازها از جمله هوا، n با تقریب برابر با یک است [۵،۳].

سایه‌نگاری، روشی ساده و دارای تنظیمات سریع و آسان می‌باشد که از منبع نور نقطه‌ای به عنوان اصلی‌ترین تجهیز مورد نیاز، بهره می‌برد [۹]. آثار این روش را می‌توان در پدیده‌های مختلفی که در خارج از محیط آزمایشگاهی و در پیرامون ما اتفاق می‌افتد، مشاهده کرد. به عنوان مثال، تصویر سایه‌ی دود برخاسته از یک شمع که در روشنایی محیط بر روی دیوار ایجاد می‌شود، مشابه آن چیزی است که در سایه‌نگاری انجام می‌گیرد. در این روش، نور از یک منبع به میان جریان تحت بررسی انتشار می‌یابد و سایه‌ی ایجاد شده به دلیل وجود میدان چگالی غیریکنواخت را می‌توان در صفحه‌ای عمودی و در فاصله‌ی l در پشت جسم مشاهده کرد، شکل ۲. برای تصویربرداری از سایه‌ی ایجاد شده، صفحه‌ی ثبت‌کننده^۱ (مانند فیلم عکاسی) با استفاده از عدسی دوربین بر روی صفحه‌ای که در فاصله‌ی l از جریان تحت آزمایش قرار دارد تنظیم می‌شود. اغلب در آزمایش‌ها از پرتوهای موازی استفاده می‌شود و جریان مورد نظر را با استفاده از دیوارهای شفاف، محدود می‌کنند.



شکل ۲ - روش سایه‌نگار با پرتوهای موازی عبورکننده از ناحیه‌ی تحت بررسی [۲]

هر یک از پرتوهای نور به هنگام عبور از میان میدان جریان، شکسته شده و همان‌طور که در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است، نسبت به مسیر اصلی خود منحرف می‌شود. از این‌رو، شدت نوری که بر روی صفحه، نمایش داده می‌شود نسبت به نور اولیه‌ی تابیده شده تغییر می‌کند. تصویری که از این روش بدست می‌آید، سایه‌نگار^۲ نامیده می‌شود. با بررسی انتشار نور از طریق ضریب شکست ناحیه‌ی تحت بررسی می‌توان تغییرات نسبی شدت نور، $\frac{\Delta I}{I}$ ، را بدست آورد [۲]:

$$\frac{\Delta I}{I(x, y)} = l \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \ln n \, dz \quad (3)$$

که در آن، $I(x, y)$ شدت نور، z محور مختصات در جهت انتشار نور (خط تقارن در شکل ۲)، x و y محورهای مختصاتی عمود بر z ، $n(x, y, z)$ ضریب شکست نور در سیال و ζ_1 و ζ_2 به ترتیب مختصات ورودی و خروجی پرتوهای نور گذرنده از ناحیه‌ی تحت بررسی می‌باشند. محل صفحه مرجع، l نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. طبق این رابطه، اطلاعات مربوط به مقادیر مورد نظر (در این‌جا چگالی) در طول مسیر هر یک از پرتوها انتگرال‌گیری می‌شوند. رابطه‌ی (۳) با این فرض بدست می‌آید که جابجایی پرتو نور Δx و Δy که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، نسبت به l کوچک باشد. به عبارت دیگر، این رابطه تنها برای انحراف‌های کوچک پرتو نور، صادق است. با در نظر گرفتن $n \approx 1$ برای گازها و استفاده از روابط

¹ Recording Plate

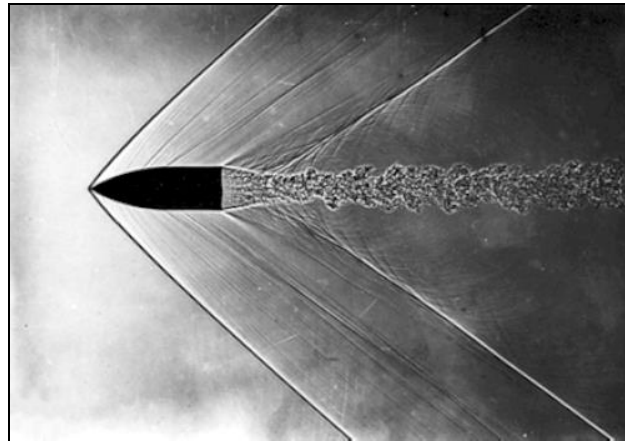
² Shadowgraph

(۲) و (۳)، مشخص می‌شود که سایه‌نگار به تغییرات مشتق دوم چگالی (گاز) حساس است:

$$\frac{\Delta I}{I(x, y)} = lK \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \left[\frac{\rho_{,xx} + \rho_{,yy}}{K\rho + 1} - \frac{K(\rho_{,x}^2 + \rho_{,y}^2)}{(K\rho + 1)^2} \right] dz$$

$$\approx lK \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} [\rho_{,xx} + \rho_{,yy} - K(\rho_{,x}^2 + \rho_{,y}^2)] dz \quad (4)$$

که در آن $\rho_{,x} \equiv \partial\rho/\partial x$ و $\rho_{,xx} \equiv \partial^2\rho/\partial x^2$ می‌باشد. یکی از پدیده‌هایی که با تغییرات شدید مشتق دوم چگالی یا ضریب شکست همراه است، موج شوک^۱ می‌باشد. از این‌رو، سایه‌نگاری روشی بسیار کارآمد در ترسیم هندسه‌ی آن‌ها می‌باشد، شکل ۳. این روش در مطالعات جریان آشفته نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. در جریان‌هایی که در آنها تغییرات چگالی بسیار کم است، سایه‌نگاری روش مناسبی نبوده و می‌توان از سایر روش‌های اندازه‌گیری استفاده کرد. با توجه به مطالب فوق، روش سایه‌نگاری برای محاسبه‌ی مستقیم چگالی مناسب نیست چرا که نیاز است دو بار از داده‌ها انتگرال گرفته شود^۲. با این حال، سایه‌نگاری روشی آسان برای بررسی سریع میدان جریان با چگالی متغیر می‌باشد.



شکل ۳ - سایه‌نگار حرکت یک گلوله با سرعت مافوق صوت [۲]

۴. روش شلیرن

واژه‌ی آلمانی شلیرن^۳ (به معنای رگه‌ها)، غیریکنواختی و اغتشاش در یک میدان شفاف را که اغلب به صفحات و پنجره‌های شیشه‌ای اطلاق می‌شود، مشخص می‌کند. در واقع، این واژه بیانگر نقاط و باریکه‌هایی است که در یک محیط شفاف و در اثر اختلاف چگالی و تغییر در مشخصه‌های نوری ایجاد می‌شود. این روش اندازه‌گیری کلاسیک در سال ۱۲۴۳ هجری شمسی (۱۸۶۴ میلادی) توسط تئوپلر^۴ ارائه شد و در پدیده‌هایی همچون انتقال حرارت، انتقال جرم، اختلاط و همین‌طور

^۱ Shock Wave

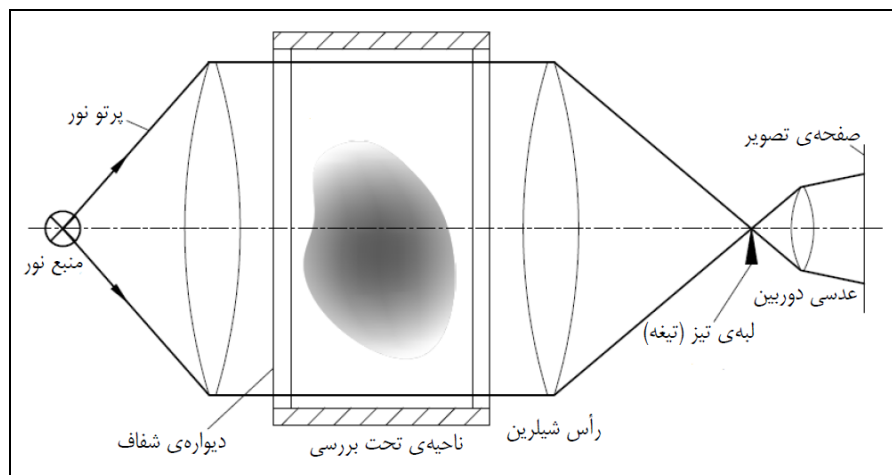
^۲ در مواردی که حل‌های عددی مربوط به میدان جریان موردنظر در دسترس باشد، می‌توان از این روش جهت تعیین توزیع چگالی استفاده کرد.

^۳ Schlieren

^۴ August Toepler

بررسی جریان‌های صوتی و مافوق صوت به کار می‌رفت [۱۱]. به منظور تفکیک این روش با سایر روش‌های اندازه‌گیری نوری که در آن‌ها از واژه‌ی شلیرن استفاده شده است، این روش را شلیرن تئوپلر^۱ نیز می‌نامند.

شکل ۴ سیستمی را نشان می‌دهد که پرتوهای موازی نور از میان ناحیه‌ی تحت بررسی (برای مثال یک جریان تراکم‌پذیر شفاف) عبور داده می‌شوند. تصویر مربوط به هر یک از این پرتوها توسط عدسی دوم که رأس شلیرن^۲ نامیده می‌شود بر روی صفحه‌ی کانونی که در محل تیغه (لبه‌ی تیز^۳) قرار گرفته است، تشکیل می‌شود. عدسی دوربین نیز تصویر موردنظر را بر روی صفحه‌ی ثبت‌کننده (فیلم عکاسی) ذخیره می‌کند.



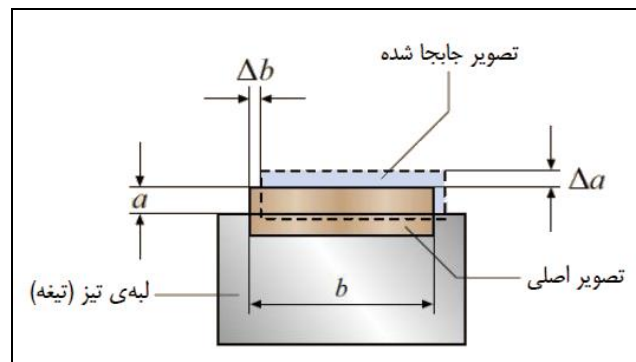
شکل ۴ - تنظیمات شلیرن به همراه پرتوهای نور گذرنده از ناحیه‌ی تحت بررسی [۲]

وجود تیغه برای ثبت تصاویر شلیرن ضروری است [۹]. بخشی از پرتوهای که از منبع نور منتشر شده‌اند به این تیغه برخورد کرده و در نتیجه، شدت نور صفحه‌ی ثبت‌کننده کاهش می‌یابد. شکل ۵، تصویر پرتو ساطع شده از منبع نور را نشان می‌دهد. با انحراف این پرتو در اثر عبور از ناحیه‌ی تحت بررسی، تصویر مربوط به آن نیز جابجا می‌شود. بسته به جهت جابجایی تصویر (به سمت بالا یا رو به پائین)، شدت نور صفحه‌ی ثبت‌کننده تغییر می‌کند (روشن‌تر یا تاریک‌تر می‌شود). فرض کنید $+E_y$ و $-E_y$ به ترتیب بیانگر زاویه‌ی انحراف پرتوهای نور در جهت‌های مثبت و منفی محور y باشند (که در شکل ۱ آمده است). پرتو انحرافی با زاویه‌ی $+E_y$ سبب عبور پرتوهای بیشتر از بالای تیغه و افزایش شدت نور در صفحه‌ی ثبت‌کننده و پرتو انحرافی با زاویه‌ی $-E_y$ باعث کاهش آن بر روی صفحه ثبت‌کننده می‌شود. در واقع، پرتوهای انحرافی در جهت‌های مثبت و منفی با ایجاد نقاط روشن‌تر یا تاریک‌تر در صفحه‌ی ثبت‌کننده، تصویر شلیرن را ایجاد می‌کنند، شکل ۶.

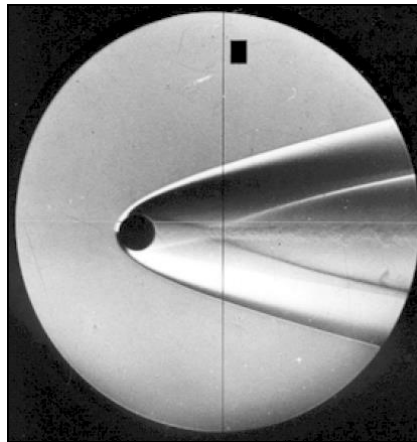
¹ Toepler Schlieren

² Schlieren Head

³ Knife Edge



شکل ۵ - تصویر پرتو ساطع شده از منبع نور که به میزان Δa و Δb جابجا شده است [۲].



شکل ۶ - تصویر مربوط به گوی در حال حرکت با سرعت مافوق صوت که با استفاده از روش شلیرن بدست آمده است [۲].

اگر در شکل ۵، a بیانگر ارتفاع بخش حذف شده از تصویر منبع نور باشد، آن‌گاه توزیع شدت نسبی نور در صفحه‌ی ثبت‌کننده به صورت زیر بیان می‌گردد [۲]:

$$\frac{\Delta I}{I(x, y)} = \frac{f_2}{a} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (5)$$

که در آن، $n(x, y, z)$ ضریب شکست جریان سیال، $I(x, y)$ شدت نور، f_2 فاصله‌ی کانونی عدسی دوم و z محور مختصاتی در راستای انتشار نور (محور نوری) می‌باشد. همچنین انتگرال‌گیری در امتداد خط سیر نور گذرنده از ناحیه‌ی تحت بررسی یعنی ζ_1 و ζ_2 صورت می‌گیرد. رابطه‌ی (۵) با فرض زوایای انحراف نور بسیار کوچک بدست آمده است. با توجه به اینکه در گازها، $n \approx 1$ می‌باشد با قرار دادن رابطه‌ی (۲) در رابطه‌ی (۵) خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta I}{I(x, y)} = \frac{K f_2}{a} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{1}{K\rho + 1} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \approx \frac{K f_2}{a} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \quad (6)$$

طبق این رابطه، روش شلیرن به تغییرات مشتق چگالی در راستای عمود بر تیغه یعنی $\partial \rho / \partial y$ حساس است. با چرخاندن تیغه به اندازه‌ی ۹۰ درجه حول محور اپتیکی (محور z در شکل ۱ یا محور عمود بر صفحه‌ی تصویر در شکل ۵) می‌توان $\partial \rho / \partial x$ را بدست آورد. بدین ترتیب می‌توان گفت که در روش شلیرن برای توصیف مناسب ناحیه‌ی تحت بررسی به دو تصویر نیاز می‌باشد که در یکی از آن‌ها، تیغه در حالت افقی و در دیگری به صورت عمودی قرار داشته باشد [۹]. همچنین در صورتی که شدت نور خروجی از منبع نور در تمامی نقاط زمینه‌ی صفحه‌ی ثبت‌کننده ثابت باشد آن‌گاه نقاط روشن یا

تاریک حاصل از پرتوهای انحرافی در روش شلیرن با وضوح بیشتری نمایش داده شده و تصاویری با کیفیت بهتر بدست می‌آید. چنین حالتی نیازمند استفاده از منبع نور نقطه‌ای و یا منبعی با روزنه‌ی کوچک و با ارتفاع a بسیار کم می‌باشد. علاوه بر این، اغلب در تنظیمات شلیرن، امکان تعویض عدسی دوم در حین آزمایش وجود ندارد و فاصله‌ی کانونی آن، ثابت در نظر گرفته می‌شود.

اصطلاح شلیرن برای سیستم‌هایی به کار می‌رود که در آن‌ها توزیع نور منبع با استفاده از یک تیغه تغییر یابد. این تغییر با تشریح روش شلیرن از طریق بررسی سیستم و آپتیک فوریه^۱ به صورت دقیق توصیف می‌شود. در این بررسی، تیغه همانند یک فیلتر فرکانس عمل کرده و بخشی از پرتوهای انتشار یافته را جدا می‌کند. قابل توجه است که اگرچه در برخی روش‌های دیگر نیز از واژه‌ی شلیرن استفاده شده است^۲، اما این روش‌ها دارای اصول متفاوتی بوده و با روش ذکر شده در این بخش فرق دارند [۲].

۵. انحراف سنجی ماره

در اثر انحراف پرتو نور به واسطه‌ی یک میدان چگالی متغیر، الگوی هندسی‌ای که از میان این میدان دیده می‌شود، تغییر شکل می‌دهد. انحرافات محلی به صورت کمی بر اساس جابجایی‌های Δx و Δy توصیف می‌شوند. از آنجایی که این جابجایی‌ها مربوط به زوایای انحراف ϵ_x و ϵ_y هستند، با دانستن میزان جابجایی می‌توان هر یک از زوایای انحراف محلی را محاسبه کرد. در نتیجه، مشتق‌های چگالی $\partial\rho/\partial x$ و $\partial\rho/\partial y$ نیز که از طریق روابط انتگرالی (مشابه رابطه‌ی (۶)) با زوایای انحراف در ارتباط هستند، بدست می‌آیند.

تغییر شکل جسم و یا یک الگوی معین، هنگامی که از میان یک میدان چگالی (مانند جریان سیال) دیده می‌شود، پدیده‌ای است که بارها مشاهده شده است. برای مثال، هوای گرم بالای جاده‌های داغ در تابستان سبب می‌شود که سطح جاده به صورت موج‌دار دیده شود. استفاده از این ویژگی در اندازه‌گیری‌های کمی، مدت زیادی است که شناخته شده است [۶]. الگوی هندسی‌ای که برای این هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند منظم و یا تصادفی باشد. هنگامی که از یک الگوی منظم یا یک شبکه استفاده شود، این تکنیک به عنوان روش ماره شناخته می‌شود و به نام‌های دیگری همچون نگاشت انحرافی^۳ یا روش رُنچی^۴ نیز معروف است. این شبکه می‌تواند در هر طرف از ناحیه‌ی تحت بررسی قرار بگیرد و دارای شکل و شمایل متفاوتی همچون خطوط هم‌فاصله و یا دایره‌ها و مربع‌های هم‌مرکز می‌باشد. با مشاهده‌ی این شبکه‌ی مرجع از میان جریان سیال، تغییر شکلی در شبکه‌ی مذکور مشاهده می‌شود. این تغییر شکل که به دلیل شکست پرتوهای نور در اثر تغییرات چگالی حاصل می‌شود، اطلاعات مفیدی را جهت اندازه‌گیری پارامترهایی همچون چگالی در اختیار ما قرار می‌دهد.

در روش‌های ماره یا رُنچی از الگوهای هندسی منظم و در مقیاس ماکرو استفاده می‌شود، به طوری که ابعاد شبکه در مقایسه با مقیاس میدان جریان تحت بررسی، خیلی کوچک نباشد. در طرف مقابل، روش‌هایی به نام تصویربرداری لگه‌ای با لیزر^۵ از الگوهای هندسی تصادفی و در مقیاس میکرو استفاده می‌کنند. این الگوها که از طریق اثرات لکه‌های نوری ایجاد می‌شوند به واسطه‌ی انحراف پرتوهای نور، تغییر می‌کنند. با استفاده از این تغییرات می‌توان اطلاعات مورد نیاز را بدست آورد.

¹ Fourier optics/Optics

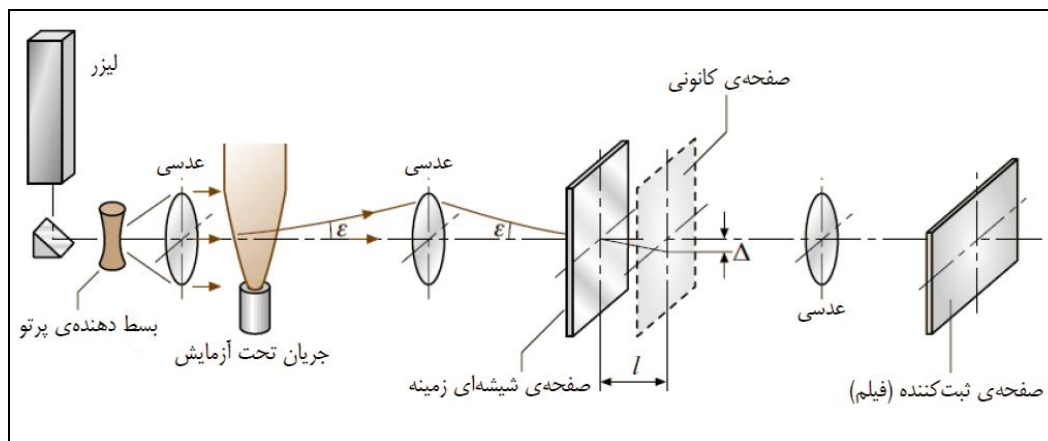
^۲ این روش‌ها عبارتند از: روش شلیرن مصنوعی (Synthetic Schlieren)، روش تداخل‌سنج شلیرن (Schlieren Interferometer) و روش شلیرن زمینه‌ای (Background Oriented Schlieren - BOS).

³ Deflection Mapping

⁴ Ronchi Method

⁵ Laser Speckle Photography

در تنظیمات مربوط به روش تصویربرداری لکه‌ای که توسط مرژیچ^۱ و ورنکینک^۲ ارائه شد [۱۲] یک صفحه‌ی شیشه‌ای به عنوان عنصر تولیدکننده‌ی لکه در معرض پرتوهای نور قرار گرفته است، شکل ۷. همچنین صفحه‌ی ثبت‌کننده (فیلم عکاسی) توسط عدسی دوربین بر روی صفحه‌ای که در فاصله‌ی l از صفحه‌ی شیشه‌ای قرار دارد، متمرکز شده است.



شکل ۷ - تنظیمات مربوط به نگاشت انحرافی از طریق تصویربرداری لکه‌ای [۲]

پرتوهای موازی نور لیزر از میان جریان تحت آزمایش عبور داده می‌شوند. این پرتوها بر اثر برخورد با صفحه‌ی شیشه‌ای، پخش شده و در اثر برخورد آنها با یکدیگر، لکه‌های نوری ایجاد می‌شوند. الگوی مربوط به این لکه‌ها که در صفحه‌ی کانونی قرار دارند بر روی صفحه‌ی رکورد (فیلم عکاسی) ثبت می‌شود. در صورتی که الگوهای مربوط به این لکه‌های نوری، یکبار در زمان حضور جریان و بار دیگر در غیاب جریان تحت آزمایش، ثبت شوند آن‌گاه با مقایسه‌ی این الگوها می‌توان میزان جابجایی دو لکه‌ی متناظر با یکدیگر را بدست آورد. با مشخص شدن میزان جابجایی (Δ)، زاویه‌ی انحراف (ϵ) نیز از طریق رابطه‌ی $\epsilon \approx \Delta/l$ تعیین شده و در نتیجه، مشتق‌های چگالی یعنی $\partial\rho/\partial x$ و $\partial\rho/\partial y$ قابل اندازه‌گیری خواهند بود. از آنجایی که الگوهای لکه‌ای به عنوان الگوی مرجع دارای ساختاری ظریف و با توزیع یکنواخت می‌باشند، می‌توان توزیع $\Delta(x,y)$ را در هر نقطه از صفحه‌ی ثبت‌کننده، اندازه‌گیری کرد. در روش‌هایی که از شبکه‌های منظم و در اندازه‌ی ماکرو استفاده می‌کنند به دلیل اینکه اطلاعات فقط در محل خطوط شبکه، قابل دسترس هستند چنین کاری امکان‌پذیر نیست.

در روش تصویربرداری لکه‌ای، ارزیابی دو تصویر ثبت شده از لکه‌ها با استفاده از پردازش تصویر صورت می‌پذیرد. چنین روندی در روش‌های دیگری همچون سرعت‌سنجی با تصویر ذرات^۳ (پی.آی.وی.) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما در حقیقت، این الگوریتم ارزیابی پیش از اینکه در روش پی.آی.وی. به کار رود، برای روش تصویربرداری لکه‌ای توسعه داده شده بود [۲].

بر خلاف روش کلاسیک شلیرن که در بخش ۴ ارائه شد، روش‌های ماره به دنبال فراهم کردن اطلاعات کمی میزان انحراف نور در جریان‌هایی با چگالی متغیر هستند. در مقایسه با روش شلیرن، تنظیمات مربوط به این روش‌ها از حساسیت کمتری نسبت به اغتشاشات برخوردارند، بنابراین کم‌هزینه‌تر بوده و برای بررسی اجسام با ابعاد بزرگ، آسان‌تر می‌باشند. با این حال، عکس‌های بدست آمده از روش شلیرن را بهتر می‌توان درک کرد.

¹ Merzkirch

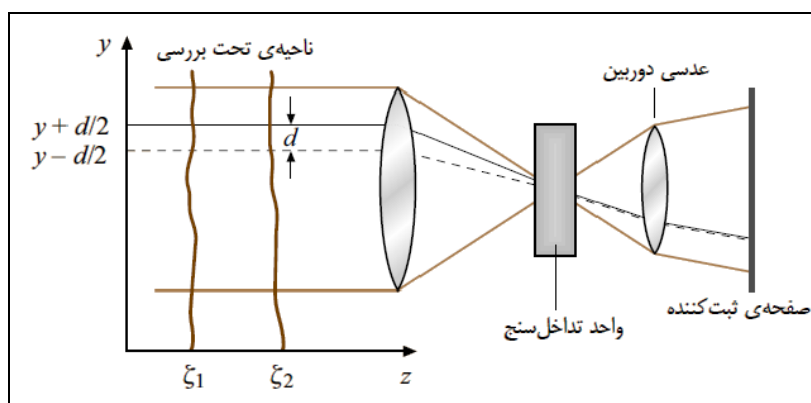
² Wernekinck

³ Particle Image Velocimetry (PIV)

۶. تداخل سنجی

اثرات ایجاد شده به واسطه‌ی انطباق دو یا چند موج، تداخل^۱ نامیده می‌شود که این ویژگی در روش‌هایی همچون تداخل‌سنجی به کار گرفته شده است. تداخل‌سنجی روشی است برای اندازه‌گیری تغییرات فاز یک موج نور که در محیطی شفاف، انتشار یافته است و این کار با استفاده از وسایلی به نام تداخل‌سنج صورت می‌گیرد. تداخل‌سنج‌هایی که برای مرئی‌سازی جریان نور و یا اندازه‌گیری چگالی سیال به کار می‌روند، منحصراً از دو پرتو استفاده می‌کنند و به تداخل‌سنج دو پرتویی^۲ مشهور هستند. با استفاده از این تجهیزات و در اثر تداخل دو موج نور که حداقل یکی از آن‌ها از میان جریان مورد بررسی عبور کرده باشد، الگوهای به نام اینترفروگرام^۳ ثبت می‌شود. روشی که در آن، موج نور گذرنده از ناحیه‌ی تحت بررسی با موج دوم، که اصطلاحاً دست نخورده باقی مانده است، برخورد کند، تداخل‌سنجی با پرتو مرجع^۴ نام دارد. در صورتی که هر دو موج از میان ناحیه‌ی تحت بررسی، عبور کرده و فاصله‌ی کمی نسبت به یکدیگر داشته باشند، آن‌گاه به این روش، تداخل‌سنجی برشی^۵ گویند که گاهی تداخل‌سنجی دیفرانسیلی^۶ و یا حتی تداخل‌سنجی شلیرن^۷ نیز نامیده می‌شود. دلیل این نامگذاری‌ها در ادامه بیان می‌گردد.

اصول تداخل‌سنجی دو پرتویی در شکل ۸ نشان داده شده است. پرتوهای موازی نور در جهت z حرکت کرده و از ناحیه‌ی تحت بررسی عبور می‌کنند. این دسته پرتو موازی به گونه‌ای در نظر گرفته شده که هر دو پرتویی که در فاصله‌ی d از یکدیگر قرار دارند، با هم تداخل می‌یابند. در کنار ناحیه‌ی تحت بررسی، از یک عدسی استفاده شده که پرتوهای نور را متمرکز می‌سازد. همچنین یک واحد تداخل‌سنج^۸ در کانون عدسی قرار دارد که سبب می‌شود پرتوهای کنار هم پس از عبور از این واحد، تداخل یابند. در نهایت، الگوهای تداخلی بر روی صفحه‌ی ثبت‌کننده (مانند فیلم عکاسی) ایجاد می‌شوند.



شکل ۸ – اصول تداخل‌سنجی دو پرتویی با دسته پرتوهای موازی گذرنده از ناحیه‌ی تحت بررسی [۲]

اختلاف طول مسیر نور بین دو پرتو تداخل‌یافته برابر است با [۲]:

$$\Delta l = \int_{z_1}^{z_2} n(x, y + \frac{d}{2}, z) dz - \int_{z_1}^{z_2} n(x, y - \frac{d}{2}, z) dz \quad (7)$$

¹ Interference

² Two-Beam Interferometer

² Interferogram

⁴ Reference Beam Interferometry

⁵ Shearing Interferometry

⁶ Differential Interferometry

⁷ Schlieren Interferometry

⁸ Interferometer Unit

اختلاف فاز نور نیز با تقسیم Δl بر طول موج، λ ، بدست می‌آید. محل نواحی تداخلی روشن^۱ بر روی صفحه‌ی ثبت‌کننده از رابطه‌ی زیر تعیین می‌گردد [۲]:

$$\frac{\Delta l(x, y)}{\lambda} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

به این ترتیب، مقدار $\frac{\Delta l(x, y)}{\lambda}$ مربوط به علائم ثبت شده بر صفحه‌ی ثبت‌کننده در تعیین کمیت مجهول n به کار می‌رود. اما مسأله‌ی به وجود آمده در این قسمت، دو بُعدی بودن علائم می‌باشد در صورتی که $n(x, y, z)$ یک توزیع سه بُعدی است. همچنین، مسأله‌ی دیگری که با آن مواجه هستیم، وجود دو مجهول n در موقعیت‌های مختلف $y + d/2$ و $y - d/2$ می‌باشد در حالی که تنها رابطه‌ی (۷) در اختیار است. راه حل مناسب برای کاهش تعداد مجهولات، طراحی مناسب واحد تداخل سنج می‌باشد. به همین منظور، دو حالت متفاوت از تداخل سنج‌ها تعریف شده است که بر اساس نسبت d/D مشخص می‌شوند. در این نسبت، D قطر میدان دید و یا قطر دسته پرتوهای موازی می‌باشد. طول d نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. دو حالت در نظر گرفته شده برای تداخل سنج‌ها عبارتند از:

- حالت اول: در صورتی که $d/D \geq 1$ ، آن‌گاه از هر دو پرتو کنار هم، یک پرتو از خارج ناحیه‌ی تحت بررسی عبور کرده و دست نخورده باقی می‌ماند. در این حالت که تداخل سنج با پرتو مرجع نامیده می‌شود یکی از انتگرال‌های رابطه‌ی (۷) که مربوط به پرتو مرجع می‌باشد، به عددی ثابت تبدیل می‌شود.

- حالت دوم: در صورتی که $d/D \ll 1$ هر دو پرتو که در فاصله‌ی d از یکدیگر قرار دارند از میان ناحیه‌ی تحت بررسی عبور خواهند کرد. به این حالت، تداخل سنج برشی گفته می‌شود. با استفاده از سری تیلور و حذف جملات مرتبه دوم (به دلیل کوچک بودن d)، رابطه‌ی (۸) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲]:

$$\frac{d}{\lambda} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial}{\partial y} n(x, y, z) dz = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9)$$

که معادله‌ی نواحی روشن در تداخل سنج برشی می‌باشد. همان‌طوری که مشاهده می‌گردد، الگوهای ریشه‌های تداخلی به مشتق اول ضریب شکست و یا چگالی گاز (طبق رابطه‌ی گلدستون-دیل، رابطه‌ی (۲))، حساس می‌باشد. از آن‌جا که مشابه چنین نتیجه‌ای در روش شلیرن، رابطه‌های (۵) و (۶)، بدست آمد، این حالت را تداخل سنج شلیرن نیز می‌نامند. همچنین به دلیل وجود مشتق در رابطه‌ی (۹)، اصطلاح تداخل سنج دیفرانسیلی را هم برای این حالت انتخاب کردند. مشتق $\partial n / \partial x$ را می‌توان با چرخش ۹۰ درجه‌ای سیستم حول محور z (محور نور) تعیین کرد.

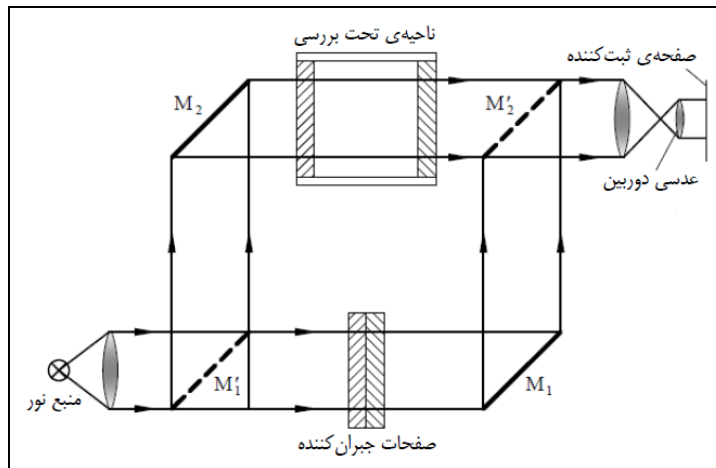
یکی از ابزار کلاسیک تداخل سنجی با پرتو مرجع که در اواخر قرن نوزدهم مورد استفاده قرار گرفت، تداخل سنج ماخ-زیندر^۲ (ام.زد.آی.) می‌باشد. این تداخل سنج که برای حالت $d/D > 1$ طراحی شده بود، در شکل ۹ آمده است. در این تنظیمات، پرتو اولیه توسط M_1 که جداکننده‌ی پرتو می‌باشد به دو قسمت تقسیم می‌شود. آینه‌ی M_2 پرتوها را به سمت ناحیه‌ی تحت بررسی هدایت کرده و آینه‌ی M_1 پرتوهای مرجع عبوری از صفحات جبران‌کننده^۳ را به سوی M_2 که جداکننده‌ی پرتو می‌باشد، ارسال می‌کند. در این‌جا، M_2 به عنوان واحد تداخل سنجی در نظر گرفته شده است. همچنین بایستی توجه داشت که صفحات جبران‌کننده باید مشابه پنجره‌های ورودی و خروجی به کار رفته در ناحیه‌ی تحت آزمایش باشند. سرانجام، تداخل هر یک از این پرتوها با یکدیگر سبب تهیه‌ی الگوهای تداخلی بر روی صفحه‌ی تصویر می‌شود.

¹ Bright Interface Fringes

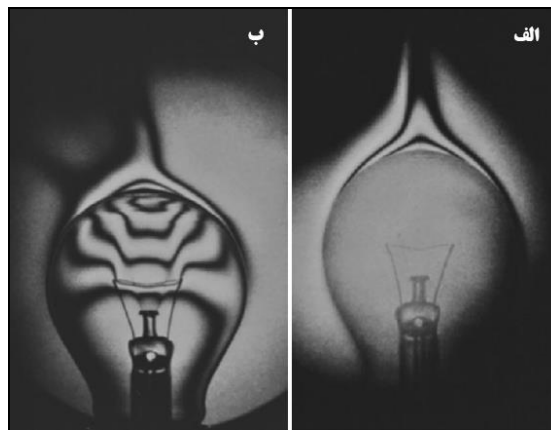
² Mach-Zehnder Interferometer (MZI)

³ Compensation Plates

اندازه‌گیری به روش تداخل‌سنجی، نیازمند تجهیزات نوری و مکانیکی بسیار دقیق می‌باشد. از این‌رو استفاده از آینه‌ها، جداکننده‌ها، پنجره‌های به کار رفته در ناحیه‌ی تحت بررسی و همین‌طور صفحات جبران‌کننده با دقت بسیار بالا، تداخل‌سنج ماخ-زیندر را به ابزاری گران‌قیمت تبدیل کرده است. همچنین نگهداری این تداخل‌سنج، مشکل بوده و به ارتعاشات و اغتشاشات مکانیکی، حساس می‌باشد. با ابداع روش هولوگرافی^۱، جنبه‌های دیگری از تداخل‌سنج ام‌زد.آی. توسعه یافته است. در شکل ۱۰، تصاویر مربوط به اینترفروگرام‌های ماخ-زیندر و هولوگرافیک، نمایش داده شده است.



شکل ۹ - تنظیمات مربوط به تداخل‌سنج ماخ-زیندر [۲]



شکل ۱۰ - (الف) اینترفروگرام ماخ-زیندر مربوط به بخار بر خاسته از یک لامپ روشنایی گرم و (ب) اینترفروگرام هولوگرافیک مربوط به میدان دمایی در خارج و داخل یک لامپ روشنایی گرم [۲].

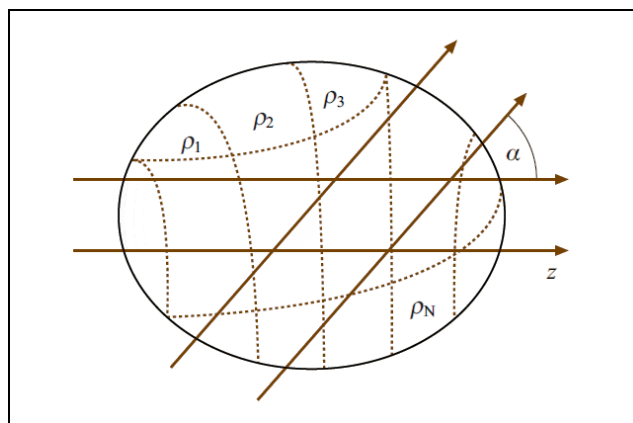
۷. پرتونگاری مقطعی نوری

عبور پرتوهای نور از جریان و یا جسم تحت بررسی، اطلاعات مفیدی را در مورد توزیع چگالی در اختیار قرار می‌دهد. با ارسال این پرتوها در زوایای مختلف و انتگرال‌گیری از اطلاعات بدست آمده در مسیر هر یک از این پرتوها می‌توان مقادیر

^۱ هولوگرافی (Holography) که در سال ۱۳۲۷ هجری شمسی (۱۹۴۹ میلادی) توسط گابور (Gabor) ابداع شد، قادر به ثبت اطلاعات نوری و ایجاد تصاویر سه‌بعدی می‌باشد.

محلی چگالی (یا گرادیان چگالی) را در حالت سه‌بعدی تعیین کرد که به آن، پرتونگاری مقطعی نوری گفته می‌شود. در این روش، امکان تبدیل مختصات کارتزین $y-z$ (در این جا برای ساده‌سازی مختصات x بیان نشده است) به مختصات $z-\alpha$ وجود دارد که α زاویه‌ی بین پرتوها با محور z می‌باشد، شکل ۱۱. اگر میدان را به $z \geq 0$ محدود کنیم، آن‌گاه α تمامی مقادیر صفر تا 180° درجه را پوشش می‌دهد. بنابراین تابع چگالی $\rho(y,z)$ از طریق تصاویر مربوط به تابش پرتوهای نور در زوایای تحت پوشش α بدست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱۱ آمده است، میدان مورد نظر از N ایمان تشکیل شده که هر یک از آن‌ها دارای مقادیر چگالی ثابت هستند. برای تعیین مقادیر مجهول ρ_i ، $i=1, \dots, N$ ، به N معادله نیاز است که این معادلات را می‌توان از روی تصاویر مربوط به هر یک از پرتوها در زوایای مختلف بدست آورد.

الگوریتم‌های دیگری نیز در مورد پرتونگاری مقطعی ارائه شده است [۱۳] اما هدف همه‌ی آن‌ها، بازسازی یک میدان سه‌بعدی با وضوح بالا و با حداقل تصاویر می‌باشد. هر تقارنی در جسم و یا میدان مورد نظر، تعداد تصاویر و در نتیجه تعداد پرتوهای مورد نیاز را کاهش می‌دهد. ساده‌ترین حالت مربوط به یک جسم متقارن محوری است که تنها با استفاده از یک تصویر و از طریق الگوریتم‌هایی همچون معکوس تبدیل آبل^۱ بازسازی می‌شود [۱۴، ۶]. در طرف مقابل، برای بررسی جریان‌های ناپایا به تنظیمات پیچیده و مفصلی نیاز است چرا که تمامی تصاویر بایستی به صورت هم‌زمان ثبت شوند. سرانجام این نکته بایستی ذکر شود که پرتونگاری مقطعی می‌تواند وضوح فضایی لازم را برای ساختارهای آشفتی در مقیاس بزرگ فراهم کند.



شکل ۱۱ - گسسته‌سازی ناحیه‌ی تحت بررسی به N ایمان با مقادیر چگالی ثابت [۲]

۸. روش شلیرن زمینه‌ای (بی.ا.اس.).

روش شلیرن زمینه‌ای یا بی.ا.اس.، یکی از روش‌های نوین در مجسم‌سازی^۲ و اندازه‌گیری تغییرات چگالی سیال می‌باشد که با استفاده از یک سامانه‌ی آزمایشگاهی به نسبت ساده، قابلیت اندازه‌گیری گرادیان چگالی دوبعدی را در یک میدان جریان شفاف دارد [۱۵]. تنظیمات بی.ا.اس.، کم‌هزینه بوده [۱۶] و به امکانات نوری پیچیده نیازی ندارد. در این روش که اولین بار توسط میر^۳ توسعه یافته [۱۷] و جزئیات آن بیان گردید [۱۸]، از یک پس‌زمینه‌ی ساده به عنوان الگوی مرجع استفاده می‌گردد. با عکسبرداری از این پس‌زمینه که یک بار در حضور جریان تحت بررسی و بار دیگر در غیاب آن صورت می‌گیرد،

^۱ تبدیل آبل که برگرفته از نام هنریک آبل (Niels Henrik Abel) می‌باشد، یک تبدیل انتگرالی است که اغلب در بررسی توابع متقارن محوری یا کروی به کار می‌رود.

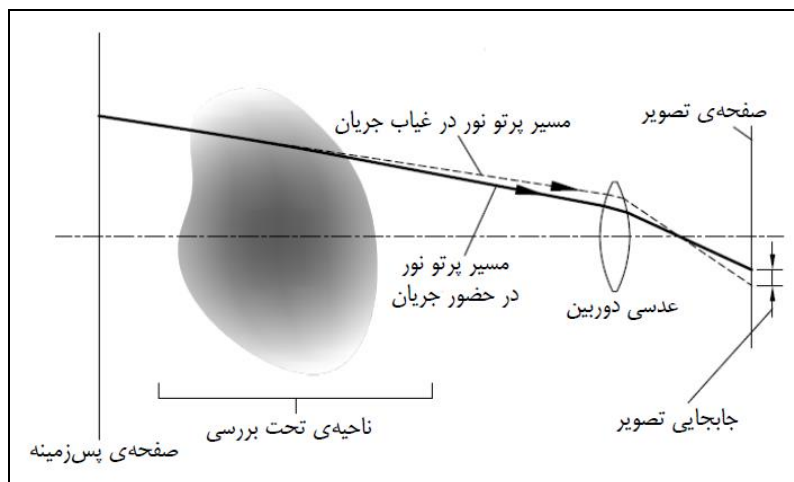
^۲ Visualization

^۳ Gerd E. A. Meier

دو الگوی متفاوت بدست می‌آید که تفاوت آن‌ها به دلیل انحراف پرتوهای نور در اثر ضریب شکست جریان می‌باشد. از روی هم قرار دادن دو الگوی ثبت شده و استفاده از روش‌های تحلیل وابستگی^۱ می‌توان بردارهای جابجایی محلی $\Delta(x,y)$ و در نتیجه زوایای انحراف نور $\varepsilon(x,y)$ را بدست آورد. با توجه به زوایای انحراف بدست آمده و با استفاده از رابطه‌ی گلدستون-دیل، رابطه‌ی (۲)، میدان چگالی محاسبه می‌گردد. همچنین از طریق میدان چگالی تعیین شده و با بکارگیری معادلات حالت می‌توان تغییرات دمایی سیال را بدست آورد.

با استفاده از روش بی.ا.اس، فرآیند تجسم و مرئی‌سازی بسیار آسان شده است چرا که دیگر نیازی به ابزارهای گران‌قیمت همچون آینه‌ها، لیزرها و لبه‌های نوک‌تیز نیست. در این روش از الگوهای پس‌زمینه‌ی مرجع، منبع نور و دوربین دیجیتال استفاده می‌شود. تنظیمات مربوط به روش بی.ا.اس. در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

این روش در مطالعه‌ی جریان‌ها و یا اجسام بزرگتر در خارج از محیط آزمایشگاهی نیز به کار می‌رود. از آنجایی که بی.ا.اس. نیز همانند روش شلیرن، اطلاعاتی در مورد زاویه‌ی انحراف و یا مشتق چگالی در اختیار قرار می‌دهد، در نام این روش از واژه‌ی آلمانی شلیرن استفاده شده است. توجه داشته باشید علی‌رغم استفاده از این واژه، اصول بی.ا.اس. با آن چه که از روش شلیرن در بخش ۴ بیان شد، فرق دارد.



شکل ۱۲ - تنظیمات روش شلیرن زمینه‌ای (بی.ا.اس.)

۹. روش شلیرن زمینه‌ای مقطعی

به منظور اندازه‌گیری سه‌بعدی چگالی جریان‌هایی با ضریب شکست نامشخص، از روش شلیرن زمینه‌ای مقطعی که ترکیبی از روش‌های شلیرن زمینه‌ای و پرتونگاری مقطعی می‌باشد، استفاده می‌گردد. در این روش از چندین دوربین که در اطراف حجم مورد بررسی قرار می‌گیرند استفاده شده و تعدادی تصاویر دو‌بعدی بی.ا.اس. بدست می‌آید. سپس با ترکیب این تصاویر و به کمک روش‌های بازسازی توموگرافیک^۲ همچون الگوریتم تصویر برگشتی فیلتر شده (اف.بی.پی.)^۳، میدان چگالی سه‌بعدی محاسبه می‌گردد. شکل ۱۳ سیستمی را که با ۹ دوربین و پس‌زمینه راه‌اندازی شده است، نمایش می‌دهد. در مواردی که جریان تحت بررسی، تغییرات زمانی دارد بایستی از چندین دوربین استفاده کرده و بطور همزمان، عکسبرداری انجام شود. اما برای تعیین ضریب شکست اجسامی که ثابت و بدون تغییر هستند و یا متوسط زمانی تغییرات

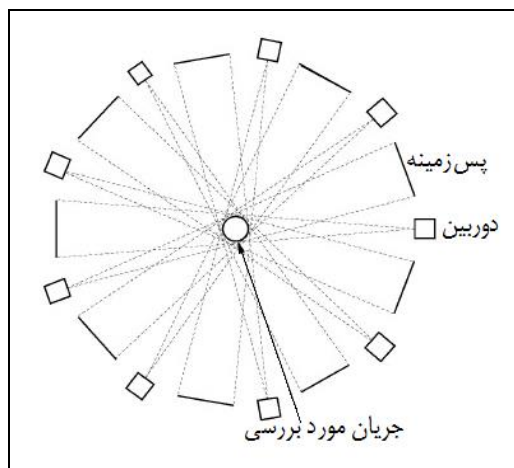
¹ Correlation

² Tomographic reconstruction methods

³ Filtered Back-Projection (FBP) Algorithm

آنها بسیار ناچیز است می‌توان از یک دوربین استفاده کرده و با گردش آن حول جسم، عکسبرداری صورت گیرد [۱۹]. همچون روش بی.ا.اس، در این‌جا نیز با استفاده از میدان چگالی تعیین شده و معادلات حالت مناسب، میدان دمایی سه‌بعدی بدست می‌آید.

روش شلیرن زمینه‌ای مقطعی نیز با توجه به اینکه از اصول روش بی.ا.اس. بهره می‌برد همانند تمامی روش‌های اندازه‌گیری، وابستگی زیادی به امکانات مورد استفاده دارد. شناخت از مسأله‌ای که قرار است این روش برای حل آن به کار گرفته شود می‌تواند بسیار مفید باشد، چرا که بسته به دقت مورد نیاز می‌توان حتی با تجهیزاتی با هزینه‌ی پائین نیز از این روش استفاده کرد. شلیرن زمینه‌ای مقطعی به دلیل کم‌هزینه بودن تجهیزات مورد استفاده در آن نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری، می‌تواند در مسائل صنعتی نیز به کار گرفته شود به شرطی که پیچیدگی و الزامات آن به خوبی مشخص شده باشد. برای مثال در جریان تراکم‌پذیر، می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری دمای استاتیک استفاده کرد که این کاربرد در بین روش‌های اندازه‌گیری دما، منحصر به فرد است.



شکل ۱۳ - تنظیمات روش شلیرن زمینه‌ای مقطعی

۱۰. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مهم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری مبتنی بر تغییرات چگالی جریان سیال، مورد مطالعه قرار گرفته و اصول آنها بیان گردیده است. در این میان، روش‌های شلیرن زمینه‌ای و شلیرن زمینه‌ای مقطعی نیز که از روش‌های جدید اندازه‌گیری چگالی سیال می‌باشند نیز معرفی شده و برخی از ویژگی‌های آنها ارائه گردیده است. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از آن است که:

- هیچ‌یک از روش‌های اندازه‌گیری چگالی، تأثیری در جریان سیال ندارند. در واقع، این روش‌ها بدون اینکه کوچکترین تداخلی در جریان سیال ایجاد کنند اطلاعات مورد نظر را ثبت کرده و نمایش می‌دهند. این ویژگی سبب شده است تا در بررسی پدیده‌های بسیار حساس و گذرا نیز بتوان از این روش‌ها استفاده نمود.

- سایه‌نگاری، یکی از ساده‌ترین روش‌های اندازه‌گیری نوری می‌باشد اما در پدیده‌هایی با تغییرات بسیار ضعیف چگالی، روش مناسبی نیست و باید از سایر روش‌های اندازه‌گیری استفاده کرد. همچنین این روش به تغییرات مشتق دوم چگالی، حساس می‌باشد.

- روش شلیرن به مشتق چگالی در راستای عمود بر تیغه، حساس است. در این روش، وجود تیغه برای ثبت تصاویر شلیرن ضروری بوده و همانند یک فیلتر فرکانس عمل می‌کند.

- روش انحراف‌سنجی ماره با استفاده از الگوهای هندسی منظم و در مقیاس ماکرو، اطلاعات کمی میزان انحراف نور در جریان‌هایی با چگالی متغیر را فراهم می‌کند.
- روش اندازه‌گیری تداخل‌سنجی، نیازمند تجهیزات نوری و مکانیکی بسیار دقیق می‌باشد، در نتیجه دارای ابزار گران‌قیمت بوده و استفاده از آنها فقط به محیط آزمایشگاهی محدود می‌شود. این روش به چگالی گاز، حساس می‌باشد.
- روش شلیرن زمینه‌ای (بی.ا.اس.) که به تغییرات چگالی حساس می‌باشد با استفاده از تنظیمات به نسبت ساده، قادر به اندازه‌گیری گرادیان چگالی دو بُعدی در یک میدان جریان شفاف می‌باشد. کم‌هزینه بودن و استفاده از این روش در خارج از محیط آزمایشگاهی، از مهم‌ترین مزیت‌های این روش به شمار می‌رود.
- روش شلیرن زمینه‌ای مقطعی با بهره‌گیری از اصول دو روش بی.ا.اس. و پرتونگاری مقطعی، میدان چگالی سه بُعدی را اندازه‌گیری می‌کند. با در نظر گرفتن الزامات این روش، می‌توان در مسائل صنعتی نیز آن را به کار بُرد.

۵. مراجع

1. Mayinger, F. and Feldmann, O. (2001), “*Optical Measurements Techniques and Applications*”, Springer, 2nd ed., ISBN: 978-3-642-63079-8.
2. Tropea, C.; Yarin, A.L. and Foss, J.F. (2007) “*Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*”, Springer, ISBN: 978-3-540-25141-5.
3. Atcheson, B.; Ihrke, I.; Bradley, D.; Heidrich, W.; Magnor, M. and Seidel, H.P. (2007), “Imaging and 3D Tomographic Reconstruction of Time-varying, Inhomogeneous Refractive Index Fields”, 34th International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques, 5–9 Aug. 2007, San Diego, California, USA. doi: 10.1145/1278780.1278819.
4. Feynman, R. P.; Leighton, R. B. and Sands, M. (1989), “*Feynman Lectures on Physics*”, vol. 2, chap. 32, Addison Wesley, ISBN: 0-201-50064-7.
5. Bagai, A. and Leishman, J. G. (1993), “Flow Visualization of Compressible Vortex Structures Using Density Gradient Techniques”, *Experiments in Fluids*, **15**, pp. 431–442, doi: 10.1007/BF00191786.
6. Merzkirch, W. (1987) “*Flow Visualization*”, Academic Press Inc., 2nd ed., ISBN: 0-12-491351-2.
7. Mandarino, J. A. (1981), “The Gladstone-Dale Relationship: Part IV. The Compatibility Concept and Its Application”, *Canadian Mineralogist*, **19**, pp. 441–450.
8. Peters, F. (2003), “A Compact Presentation of Gasdynamic Fundamentals”, *Forschung im Ingenieurwesen*, **68**, pp. 111–119, doi: 10.1007/s10010-003-0115-6.
9. Settles, G. S. (2001), “*Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*”, Springer. ISBN: 978-3-540-66155-9.
10. Fomin, N. A. (1998), “*Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements*”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-642-08357-0.
11. Dirac, P. A. M. (1984), “*The Principles of Quantum Mechanics*”, Oxford University Press.

12. Wernekinck, U. and Merzkirch, W. (1987), "Speckle Photography of spatially Extended Refractive Index Fields", *Applied Optics*, **26**, pp. 31–32, doi: 10.1364/AO.26.000031.
13. Herman, G. T. (2009), "*Fundamentals of Computerized Tomography: Image Reconstruction from Projections*", Springer, 2nd ed., ISBN: 978-1-85233-617-2.
14. Smith, L. M. and Keefer, D. R. (1988), "Abel Inversion Using Transform Techniques", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **39**, pp. 367–373, doi: 10.1016/0022-4073(88)90101-X.
15. Ota, M.; Hamada, K.; Kato, H. and Maeno, K. (2011), "Computed-Tomographic Density Measurement of Supersonic Flow Field by Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS) Technique", *Meas. Sci. Technology*, **22**, doi: 10.1088/0957-0233/22/10/104011.
16. Atcheson, B.; Heidrich, W. and Ihrke, I. (2009), "An Evaluation of Optical Flow Algorithms for Background Oriented Schlieren Imaging", *Experiments in Fluids*, **46**, pp. 467–476, doi: 10.1007/s00348-008-0572-7.
17. Meier, G. E. A. (1999), "Hintergrund Schlierenmeßverfahren", Deutsche Patentanmeldung, DE19942856 A1.
18. Meier, G. E. A. (2002), "Computerized Background-Oriented Schlieren", *Experiments in Fluids*, **33**, pp. 181–187, doi: 10.1007/s00348-002-0450-7.
19. Klinge, F. and Kompenhans, J. (2007), "Recent Development and Application of Background Oriented Schlieren Method, BOS", 9th International Scientific and Technical Conference, Moscow, Russia.