بسمه‌تعالی

عنوان

تصویربرداری شلیرنz شکل

نگارنده:

مریم نظری

خرداد ۱۴۰۴

چکیده

در این پژوهش به بررسی جامع فناوری تصویربرداری شلیرن، به‌ویژه در پیکربندی Z شکل، پرداخته‌ایم. در ابتدای گزارش، تاریخچه مختصری از ظهور و پیشرفت سامانه‌های تصویربرداری شلیرن ارائه کرده‌ایم و اهمیت این روش در ثبت تغییرات جزئی در شاخص شکست نور ناشی از نوسانات چگالی، دما و ترکیب محیط‌های شفاف موردتأکید قرار گرفته است. سپس، اصول فیزیکی و نظریه‌های مرتبط با انحراف نور - از جمله رابطه گلدستون - دیل و قوانین اپتیکی - بررسی شده و نقش عوامل کلیدی نظیر منبع نور، آینه‌های جمع‌کننده و تیغه نازک در افزایش حساسیت و دقت سامانه را شرح داده‌ایم.

در این مطالعه با معرفی چیدمان Z شکل، نحوه‌ی طراحی و تنظیم دقیق اجزای اپتیکی جهت به‌حداقل‌رساندن خطاهای ناشی از پراش و آستیگماتیسم، همراه با تحلیل‌های ریاضی و معادلات مرتبط، ابعاد مهم عملکردی این روش را تبیین می‌کند. علاوه بر این، کاربردهای متنوع این فناوری در زمینه‌های دینامیک سیالات، دالانه‌های باد، تشخیص نشت گاز، مطالعات پلاسما و حتی کاربردهای آموزشی معرفی گردیده و محدودیت‌های موجود در استفاده از سامانه‌های تصویربرداری شلیرن موردبحث قرار گرفته است. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که سامانه شلیرن Z شکل به‌عنوان ابزاری دقیق و غیرتهاجمی، باقابلیت بررسی پدیده‌های پیچیده و ثبت سریع تغییرات محیطی، پتانسیل بالایی در بهبود تحلیل و بهینه‌سازی طراحی‌های آزمایشی دارد.

کلمات کلیدی : تصویربرداری شلیرن نوع Z، آینه‌های کروی، شاخص شکست نور، نوسانات چگالی

فهرست مطالب

فهرست مطالب .....أ
فهرست شکلها .....ت
پیشگفتار ۱
تصویربرداری شلیرن ۳
۱-پیشگفتار ۴
۲- تاریخچه..... .....۴
۲-۱ مطالعات اولیه و مشاهده‌ی پدیده‌های نوری.....۴
۲-۲ کاربردهای اولیه در آزمون‌های نوری ۵
۲-۳ ظهور فن شلیرن مدرن ۶
۳-کاربردهای تصویربرداری شلیرن.....۹
۴-نظریه نوری ۲۱
۴-۱ اصل اساسی.....۲۲
۴-۲ روابط متقابل نوری و ترمودینامیکی.....۲۳
۴-۲-۱ ضریب شکست ۲۳
۴-۲-۲ میزان حساسیت سامانه ۲۶
۴-۲-۳ محدوده‌ی اندازهگیری.....۳۱
۴-۲-۴ وضوح تصویر.....۳۲
۴-۴ کاربرد روش شلیرن ۳۳
۴-۴-۱ منبع نور ۳۶
۴-۴-۲ لبه شلیرن ۳۶
۵-تصویربرداری شلیرن z شکل ۳۷
۵-۱ چیدمان آزمایشگاهی سامانه شلیرن دو آینه‌ای نوع Z ۳۹

۵-۲ زاویه شیب آینه..... ۴۰
۵-۳ شدت آستیگماتیسم ۴۰
۵-۴مزایا و محدودیت‌های سامانه تصویربرداری شلیرن Z شکل ۴۲
۵-۴-۱ مزایا ۴۲
۵-۴-۲ محدودیت‌ها ۴۲
۵-۵ کاربردها و نکات عملی..... ۴۲
۶-۱ مقدمه و هدف ۴۳
۶-۲ طراحی سامانه شلیرن..... ۴۳
۶-۳ بررسی هزینه‌ها ۴۴
۶-۴ انتخاب محل نصب سامانه ۴۵
۶-۵ تنظیم و تراز اپتیک ۴۵
۶-۶ عیب‌یابی و مشکلات رایج..... ۴۶
۶-۷ ضبط و عکسبرداری از تصاویر شلیلِرن ۴۶
۶-۸ نتیجه‌گیری و کاربردهای سامانه ۴۶
منابع..... ۴۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۱: سامانه شلیرن اولیه هوک، با استفاده از دو شمع، یک عدسی و چشم انسان. ۵

شکل ۲: نمودارهای فوکو از یک آینه سهموی، (الف) قبل از معرفی لبه چاقویی (ب) پس از معرفی لبه چاقویی [۱۳].....۶

شکل ۳: دو دستگاه شلیرن اول توپلر. نماهای پرسپکتیو از (الف) نمونه اولیه او (توپلر ۱۸۶۴) و (ب) دستگاه شلیرن بهبود یافته او که در سال ۱۸۶۷ در نمایشگاه جهانی پاریس (توپلر a۱۸۶۷) به نمایش گذاشت. ۸

شکل ۴: نمودار طرح کلی سامانه BOS برای تجسم پاشش سوخت[۱۷]. ۱۱

شکل ۵: چیدمان و فواصل تجهیزات آزمون شلیرن [۱۹]. ۱۳

شکل ۶: شکل ریزحفره‌ها زیر میکروسکوپ نوری. ۱۵

شکل ۷: طرحواره‌ای از یک چیدمان شلیرن مبتنی بر لیزر. ۱۶

شکل ۸: ساختار شبکه روش پیشنهادی. ۱۹

شکل ۹: آرایش نوری برای فن شلیرن به روش توپلر. ۲۳

شکل ۱۰: نمایش حساسیت تصویر شلیرن. ۲۹

شکل ۱۱: کاهش کیفیت به‌دلیل وجود پراش[۱]. ۳۰

شکل ۱۲: محدوده‌ی اندازه‌گیری جت پاشش [۱]. ۳۱

شکل ۱۳: نحوه قرار گرفتن لبه‌ی تیغه [۱]. ۳۲
شکل ۱۴: چیدمان نوری ۳۴
شکل ۱۵: نقطه کانونی مماسی و سهموی، که از اعمال آینه‌های مقعر ناشی می‌شود..... ۳۴
شکل ۱۶:چیدمان نوری با دو آینه مقعر، چیدمان Z..... ۳۵
شکل ۱۷: پیکربندی تک آینه‌ای خارج از محور..... ۳۷
شکل ۱۸: پیکربندی نوع Z دو آینه‌ای. ۳۸
شکل ۱۹: شرایطی که کانون آینه‌ها دقیقاً بر لبه‌های پرتو موازی منطبق باشد..... ۴۰

پیشگفتار

سامانه‌های تصویربرداری شلیرن[1] از اوایل دهه ۱۸۰۰ میلادی برای به‌تصویرکشیدن تغییرات در شاخص شکست نور به دلیل نوسانات چگالی محیط‌های شفاف به کار گرفته شده‌اند [۱]. این سامانه‌ها به‌عنوان یک ابزار تجسم پویا و روشن، در درجه اول برای انجام مطالعات بصری کیفی به کار می‌روند. اپتیک شلیرن روشی آموزنده و غیرتهاجمی برای مطالعه محیط‌های شفاف و نوری ارائه می‌دهد [۲]. یکی از برتری‌های ویژه این روش این است که بدون وارد کردن نیروی اضافی یا اختلال در جریان اصلی سیال، تغییرات بسیار جزئی چگالی یا ضریب شکست را به تصویر می‌کشد. این بدان معناست که تصویربرداری شلیرن می‌تواند الگوهای واقعی جریان یا تغییرات محیطی را به طور بی‌پرده ثبت کند[۳] ,[۱]. علاوه بر مطالعه جریان‌ها در دینامیک سیالات، تصویربرداری شلیرن در بررسی محیط‌های نوری کاربرد دارد؛ به‌عنوان‌مثال، در بررسی تغییرات ضریب شکست ناشی از تغییرات دما یا فشار در مواد. علاوه بر این، تطبیق‌پذیری روش‌های شلیرن منجر به کاربرد آنها در زمینه‌های متنوعی مانند هواشناسی شده است، جایی که می‌توانند به تجسم گرادیان‌های دما در جو کمک کنن این ویژگی‌ها آن را به ابزاری قدرتمند در زمینه‌های اپتیکی، مطالعات حرارتی و حتی برخی کاربردهای پزشکی بدل کرده است ,[٤] [٥].

در آغاز قرن بیستم، محدودیت‌های فنی و اقتصادی مانع از پیشرفت تصویربرداری شلیرن شدند. این سامانه نیازمند تنظیمات اپتیکی بسیار دقیق بود، و کوچک‌ترین خطا در تنظیم اجزا باعث اختلال در اندازه‌گیری‌ها می‌شد. به دلیل این حساسیت بالا، تنها آزمایشگاه‌های پیشرفته قادر به استفاده از آن بودند. علاوه بر این، هزینه‌های بالای ساخت و راه‌اندازی چنین سامانه‌هایی موجب شد که کاربردهای آن عمدتاً به تحقیقات تخصصی، نظامی و صنعتی محدود شوند و استفاده روزمره از آن دشوار باشد. همچنین، طراحی سامانه‌های شلیرن برای محیط‌های ثابت باعث کاهش انعطاف‌پذیری آنها در بررسی پدیده‌های دینامیکی و تغییرات سریع شد [۸]–[٦].

با پیشرفت دوربین‌های دیجیتال و افزایش توان محاسباتی، فن‌های تصویربرداری شلیرن به شکل چشمگیری بهبود یافته‌اند. استفاده از حسگرهای دیجیتال با رزولوشن و فریم ریت[2] (به نمایش تعداد تصاویر ثابت گفته می‌شود که به‌سرعت حرکت می‌کنند) بالا امکان ثبت دقیق تغییرات جزئی در چگالی و ضریب شکست محیط را فراهم کرده است. همچنین، به کمک پردازنده‌های قدرتمند و الگوریتم‌های پیشرفته بینایی رایانه، تجزیه‌وتحلیل سریع و دقیق

---

[1] Schlieren imaging

[2] Frame Per Second

تصاویر امکان‌پذیر شده و پژوهشگران قادرند تغییرات دینامیکی را به‌صورت کمی و کیفی بررسی کنند –[۹] [۱۲].

در این گزارش، تاریخچه و اصول تصویربرداری شلیرن، بررسی طراحی یک سامانه شلیرن پایه، پیشرفت‌ها در سامانه‌های محاسباتی شلیرن و کاربردهای آینده و فن‌های تحلیل پیاده‌سازی مفاهیم تصویربرداری شلیرن را بررسی می‌کنیم.

تصویربرداری شلیرن

۱- پیشگفتار

شلیرن به الگوهای نوری قابل‌مشاهده (مانند رگه‌ها یا خط‌های تیره و روشن) گفته می‌شود. هنگامی رخ می‌دهد که نور از طریق یک مایع یا گاز شفاف که دارای تغییرات ناهمگن در چگالی، دما یا ترکیب شیمیایی است، عبور می‌کند. این تغییرات منجر به اختلاف در ضریب شکست[۱] می‌شوند و نور را به‌گونه‌ای منحرف می‌کنند که در نتیجه، الگوهای نوری روی صفحه‌ی ثبت یا حسگر ظاهر می‌شوند. مفهوم پشت تصویربرداری شلیرن مبتنی بر اصول اساسی نوری مانند قانون اسنل است. وقتی که یک پرتو نور از نواحی با چگالی یکنواخت عبور می‌کند، مسیر آن تقریباً مستقیم باقی می‌ماند؛ اما در حضور گرادیان‌های چگالی یا دمایی، مقدار شکست نور تغییر می‌کند و پرتو از مسیر اصلی منحرف می‌شود.

تصویربرداری شلیرن[۲] یک روش نوری بی‌نظیر است که قابلیت مشاهده‌ی آنچه که معمولاً غیرقابل‌دیدن است را فراهم می‌کند. این روش تغییرات ریز شاخص شکست نور ناشی از تغییرات در تراکم، فشار، دما یا ترکیب یک محیط شفاف اغلب هوا، گاز یا حتی مایعات را برجسته می‌کند. به طور ویژه در بررسی جریان‌های هوا، دینامیک سیالات، و حتی در تصویربرداری پزشکی کاربرد دارد.

این روش بر اساس انحراف نور هنگام عبور از محیط‌هایی با چگالی متغیر عمل می‌کند. در یک سامانه تصویربرداری شلیرن، نور از یک منبع نقطه‌ای عبور کرده و توسط یک آینه یا عدسی هم‌راستا می‌شود. سپس این نور از محیط موردبررسی عبور کرده و تغییرات چگالی باعث انحراف مسیر آن می‌شود. در نهایت، یک‌تیغه یا مانع نوری در نقطه کانونی قرار داده می‌شود تا این تغییرات را برجسته کند و تصویر نهایی روی یک دوربین یا صفحه‌نمایش ثبت شود.

۲- تاریخچه

۲-۱ مطالعات اولیه و مشاهده‌ی پدیده‌های نوری

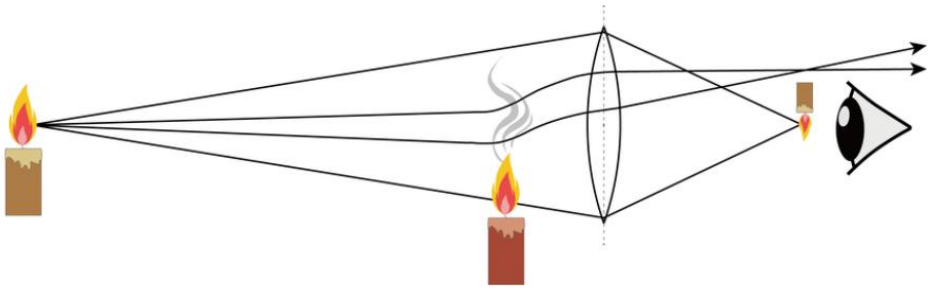
در دوران‌های اولیه‌ی مطالعات نوری، دانشمندانی مانند رابرت هوک (۱۶۳۵–۱۷۰۳) به بررسی پدیده‌های مرتبط با انحراف نور در محیط‌های شفاف پرداختند. در زمان او، رویکرد معمول در شلیرن استفاده از مرزهای واضح تاریک-روشن برای نمایش تغییرات انکسار نور در محیط‌های شفاف بود. هوک به‌عنوان یکی از بهترین

---

۱ refractive index

۲ Schlieren imaging

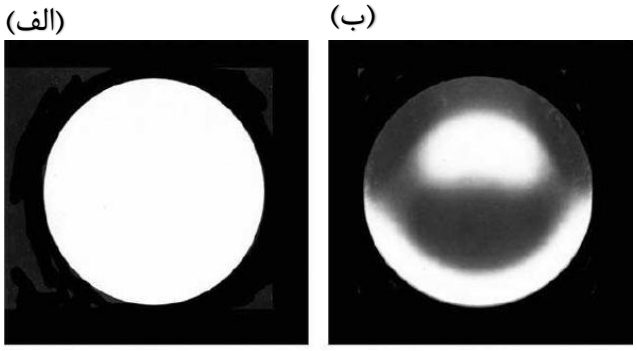
سازندگان ابزار در زمان خود، این روش را تغییر داده و به‌جای استفاده از مرز تاریک-روشن در فاصله دور، از تصویر شعله شمع بهره برد. او با استفاده از یک آینه مقعر یا عدسی، تصویر شعله شمع را بر روی مردمک چشم تابانده و به این ترتیب یک مرز نوری متفاوت و به مراتب دقیق‌تر ایجاد کرد (شکل۱-۱). هوک در آزمایش‌های خود از ابزارهایی مانند عدسی‌های بزرگ استفاده می‌کرد؛ اما این آزمایشات به‌عنوان پایه‌های نظری شکل‌گیری «تصویرسازی شلیرن» مدرن محسوب نمی‌شود. پژوهش‌های او بیشتر به شناخت ساختارهای میکروسکوپی و مشاهده‌ی تغییرات نوری ناشی از عدم یکنواختی مواد پرداخته‌اند و نظام‌شدن یک فن م [۱].



شکل ۱: سامانه شلیرن اولیه هوک، با استفاده از دو شمع، یک عدسی و چشم انسان.

۲-۲ کاربردهای اولیه در آزمون‌های نوری

فردی به نام لئون فوکو[۱] در میانه‌ی قرن نوزدهم (۱۸۶۸-۱۸۱۹) در فرانسه، به خصوص در جهت ارزیابی کیفیت عدسی و آینه‌های تلسکوپی، از مفهومی مشابه استفاده کرد. در این فن که به آزمون تیغه‌ی فوکو معروف است، یک‌تیغه نازک در نقطه‌ی کانونی قرار می‌گرفت تا ناهماهنگی‌های نوری ناشی از عیوب سطحی را آشکار کند (شکل ۲)[۱۳]. این رویکرد به مرور زمان برای آزمون‌های اپتیکی و ارزیابی کیفیت سازه‌های نوری توسعه یافت اما به معنای واقعی تصویرسازی شلیرن برای بررسی تغییرات چگالی سیالات نیست [۱].



۱ Leon Foucault

شکل ۲: نمودارهای فوکو از یک آینه سهموی، (الف) قبل از معرفی لبه چاقویی (ب) پس از معرفی لبه چاقویی [۱۳].

۲-۳ ظهور فن شـ

تحولات قابل‌ملاحظه در زمینه‌ی تصویرسازی شلیرن در فرن نوزدهم (عموما در دهه‌های ۱۸۶۰ و ۱۸۷۰) صورت گرفت. در این دوره، دانشمندی به نام آگوست توپلر[۱] دستگاهی را طراحی کرد که اصول اساسی تصویرسازی شلیرن را در قالب یک سامانه اپتیکی متقارن به نمایش می‌گذاشت. در این سامانه:

- نور از یک منبع همگن (که بعدها از منابع پرقدرت‌تری مانند لنزهای نقطه‌ای یا LED ها استفاده شد) تأمین می‌شد.
- نور از سیالی حاوی تغییرات چگالی عبور می‌کرد.
- تغییرات ناشی از اختلاف شاخص شکست توسط یک‌تیغه نازک در نقطه‌ی کانونی تشدید می‌شد تا تضادهای نوری نمایان شود.

این سامانه توپلری اولین نمونه‌ی سامانه‌های شلیرن قابل‌قبول به شمار می‌آید[۱] و هنر به‌کارگیری آن تأثیر چشمگیری در مطالعات دینامیک سیالات، دالانه‌های باد و تحلیل شوک‌های هواپیمایی داشته است.

آگوست توپلر نقش بسزایی در توسعه و کاربرد تصویرسازی شلیرن داشت و چیدمان اپتیکی‌ای را ترتیب داد که به‌خوبی تغییرات شاخص شکست ناشی از جریان‌های سیالات (مانند جریان هوای متراکم جت) را به تصویر می‌کشد. این چیدمان (شکل ۳) که امروزه به نام "روش توپلر "شناخته می‌شود، اصول زیر را دارد:

۱- منبع نور و اماده‌سازی پرتو:

ابتدا نور از یک منبع همگن (در زمان‌های اولیه اغلب یک شمع یا منبع نوری مشابه) تامین می‌شود. سپس با استفاده از یک عدسی محدب بزرگ، این نور به‌صورت پرتوهای موازی (کلولاسیون) تنظیم می‌شود. این تنظیم اولیه باعث می‌شود که هر گونه تغییرات جزئی در مسیر نور بعد از عبور از ناحیه‌ی آزمون بیشتر به چشم آید.

۲- ناحیه‌ی آزمون - محل مشاهده تغییرات چگالی:

[۱] August Toepler

پرتوهای نور از ناحیه‌ای عبور می‌کنند که در آن جریان‌های سیال (مثلاً یک جت هوای متراکم) قرار دارند. در این محل، به دلیل تغییرات چگالی (و در نتیجه تغییر در ضریب شکست) مسیر نور دچار انحراف‌های اندک می‌شود. این تغییرات در جهت و میزان منحرف شدن، وابسته به شدت و روند گرادیان‌های چگالی در سیال است.

۳- جمع‌بندی نور و تبدیل تغییرات زاویه‌ای به تضادهای نوری:

پس از عبور از ناحیه‌ی آزمون، نور توسط یک عدسی یا آینه جمع‌آوری شده و به نقطه‌ی کانونی متمرکز می‌شود. در این نقطه، یک‌تیغه نازک[۱] قرار می‌گیرد. این تیغه نقش کلیدی در تبدیل کوچک‌ترین تغییرات زاویه‌ای ناشی از اختلاف‌های چگالی به تغییرات قابل‌مشاهده در شدت نور (کنتراست) دارد. به بیان دیگر، قسمت‌هایی از نور که به دلیل تغییر زاویه به سمت تیغه‌ی کانونی متقاطع می‌شوند، مسدود شده و در تصویر نهایی به‌صورت نواحی تیره ظاهر می‌شوند.

٤- تصویر نهایی:

در نتیجه، تصویری حاصل می‌شود که الگوهایی از روشن و تاریک را نشان می‌دهد؛ این الگوها بازتاب‌دهنده‌ی نواحی با چگالی و ضریب شکست متفاوت در جریان سیال هستند. در مورد جریان‌های هوای متراکم جت، این روش به‌خوبی قادر است ساختار و پویایی مرزهای جریان را آشکار کند [١٤].

روش توپلر به‌واسطه‌ی سادگی در طراحی و حساسیت زیاد در تشخیص تغییرات کوچک شاخص شکست، به ابزاری مؤثر برای مطالعات دینامیک سیالات و بررسی جریان‌های پیچیده تبدیل شده است. این چیدمان نه‌تنها در تحقیقات تجربی، بلکه در کاربردهای مهندسی مانند دالانه‌های باد و تحلیل شوک‌های هواپیمایی نیز جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است.

پس از معرفی اولیه توسط توپلر، پژوهشگران دیگری نیز بر بهبود و توسعه این روش کار کردند. برای مثال، منتشرشدن نتایج و اصلاحات در سال ۱۹۸۴ توسط هایاشی[۲] و همکاران نشان از تلاش برای افزایش دقت و

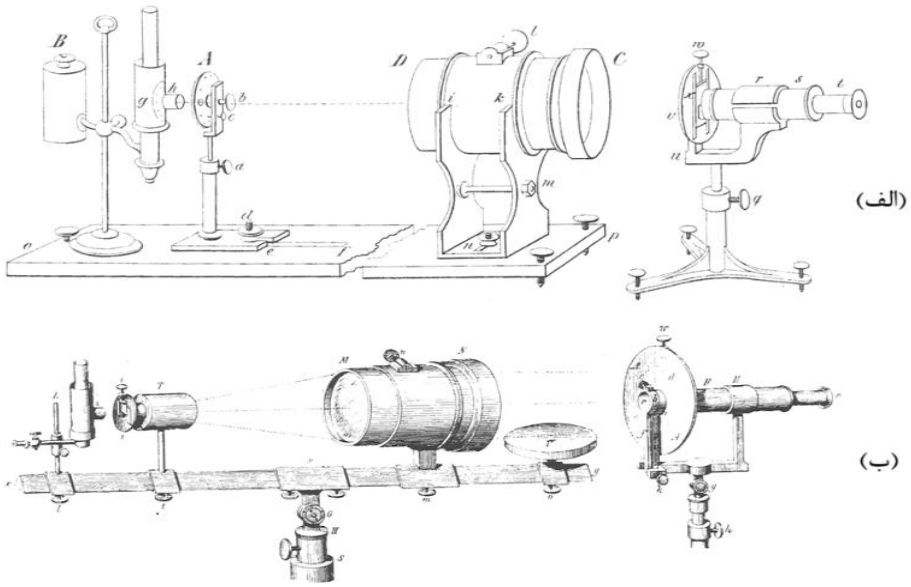
[۱] Knife-edge

[۲] Hayashi

حساسیت سامانه شلیرن داشت. در ادامه، کونیگ[۱] و شپرد[۲] در سال ۱۹۹۰ با ارائه تغییرات فنی مهم، قابلیت کاربرد این فن در مطالعات پیچیده جریان‌ها را بهبود بخشیدند. این پیشرفت‌ها موجب شدند تا توانمندی سامانه در تشخیص تغییرات جزئی در جریان‌های سیالات به شکل چشمگیری افزایش یابد.

در سال ۱۹۸۲، ستلز[۳] روشی نوآورانه ارائه داد که در آن از ترکیب سه‌رنگ اصلی (سبز، قرمز و آبی) برای تشکیل منبع نوری استفاده شد؛ بدین ترتیب نور سفید به مجموعه‌ای از رنگ‌های متمایز تفکیک می‌شد. این نوآوری کمک کرد تا تصاویر به‌دست‌آمده از سامانه شلیرن با وضوح و کنتراست بیشتری ارائه شوند و جزئیات دقیق تغییرات چگالی در سیالات بهتر قابل‌تشخیص باشد.

اسپیکر[۴] و کالمر[۵] در سال ۱۹۸۶، پریسنر[۶] و همکاران در سال ۱۹۹۸ و اسپیچر و همکاران در سال ۱۹۹۱ از روش‌های شلیرن و شدوگرافی[۷] در فرایندهای تزریق و احتراق در موتورهای درون‌سوز استفاده کردند. به‌علاوه، تحلیل‌های پیشرفته در حوزه سامانه‌های پیشرانش توسط پژوهشگران مانند موراکامیس[۸] و پاپاموشو[۹] در سال ۲۰۰۱ و همچنین پاپاموشو در سال ۲۰۰۰ انجام شد. این مطالعات با به‌کارگیری فن‌های تصویرسازی شلیرن، توانستند عملکرد و ویژگی‌های جریان‌های موجود در سامانه‌های پیشرانش را به‌دقت موردبررسی قرار داده و به بهینه‌سازی طراحی‌های مهندسی کمک شایانی نمایند.



شکل ۳: دو دستگاه شلیرن اول توپلر. نماهای پرسپکتیو از (الف) نمونه اولیه او (توپلر ۱۸۶۴) و (ب) دستگاه شلیرن بهبود یافته او که در سال ۱۸۶۷ در نمایشگاه جهانی پاریس (توپلر a۱۸۶۷) به نمایش گذاشت.

۱ Konig
۲ Sheppard
۳ Settles
۴ Spicher
۵ Kollmeire
۶ Preussner
۷ Shadowgraph
۸ Murakamis
۹ Papamoschou

پس از معرفی اولیه توسط توپلر، پژوهشگران دیگری نیز بر بهبود و توسعه این روش کار کردند. برای مثال، منتشرشدن نتایج و اصلاحات در سال ۱۹۸۴ توسط هایاشی و همکاران نشان از تلاش برای افزایش دقت و حساسیت سامانه شلیرن داشت. در ادامه، کونیگ و شپرد در سال ۱۹۹۰ با ارائه تغییرات فنی مهم، قابلیت کاربرد این فن در مطالعات پیچیده جریان‌ها را بهبود بخشیدند. این پیشرفت‌ها موجب شدند تا توانمندی سامانه در تشخیص تغییرات جزئی در جریان‌های سیالات به شکل چشمگیری افزایش یابد.

در سال ۱۹۸۲، ستلز روشی نوآورانه ارائه داد که در آن از ترکیب سه‌رنگ اصلی (سبز، قرمز و آبی) برای تشکیل منبع نوری استفاده شد؛ بدین ترتیب نور سفید به مجموعه‌ای از رنگ‌های متمایز تفکیک می‌شد. این نوآوری کمک کرد تا تصاویر به‌دست‌آمده از سامانه شلیرن با وضوح و کنتراست بیشتری ارائه شوند و جزئیات دقیق تغییرات چگالی در سیالات بهتر قابل‌تشخیص باشد.

به‌علاوه، تحلیل‌های پیشرفته در حوزه سامانه‌های پیشرانش توسط پژوهشگران مانند موراکیس و پاپاموشو در سال ۲۰۰۱ و همچنین پاپاموشو در سال ۲۰۰۰ انجام شد. این مطالعات با به‌کارگیری فن‌های تصویرسازی شلیرن، توانستند عملکرد و ویژگی‌های جریان‌های موجود در سامانه‌های پیشرانش را به‌دقت موردبررسی قرار داده و به بهینه‌سازی طراحی‌های مهندسی کمک شایانی نمایند[۱۵] .

۳- کاربردهای تصویربرداری شلیرن

تحقیقات گاوو[1] (۲۰۰۷) نمونه‌ای بارز از کاربرد فن عکس‌برداری سریع شلیرن در بررسی دینامیک افشانه سوخت‌هاست. در این مطالعه، با بهره‌گیری از دوربین‌های با سرعت بسیار بالا و تنظیمات نوری دقیق، تلاش شده تا تغییرات جزئی در الگوهای افشانه بتوان به‌وضوح ثبت و تحلیل کرد. این فن به دلیل حساسیت فوق‌العاده‌ای که در تشخیص تغییرات شاخص شکست ناشی از اختلاف چگالی وجود دارد، قادر است تفاوت‌های ظریف بین افشانه ترکیبات اتانول - بنزین و گازوئیل خالص را به تصویر بکشد. خواص فیزیکی اتانول، بنزین و گازوئیل (مانند چگالی، ویسکوزیته، نقطه جوش و سرعت تبخیر) از همدیگر متفاوت است. این تفاوت‌ها بر الگوی افشانه تأثیر می‌گذارد؛ به‌عنوان‌مثال، ترکیبات اتانول - بنزین معمولاً زاویه پاشش وسیع‌تری، نفوذ کمتری در فضای اطراف و الگوهای نازک‌تر قطرات نسبت به گازوئیل خالص دارند.

عکس‌برداری سریع شلیرن این تفاوت‌ها را بادقت بالا نشان می‌دهد، به‌طوری‌که می‌توان به‌صورت بصری تغییرات ریز در الگوی جریان، پراکندگی قطرات و منطقه‌های تبخیری را موردبررسی قرارداد. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه به بهبود سامانه‌های تزریق سوخت در موتورهای احتراق داخلی کمک کرده و می‌تواند منجر به بهینه‌سازی فرایندهای احتراق و کاهش انتشار آلاینده‌ها شود. به طور مثال، درک بهتر از نحوه پراکندگی سوخت و نحوه تبخیر آن در گام اولیه احتراق، مهندسان را قادر می‌سازد تا طراحی‌های بهینه‌تری از سامانه‌های انژکتور و تنظیم زمان‌بندی تزریق ارائه دهند. در نهایت، کار گاوو با استفاده از فن عکس‌برداری سریع شلیرن، نشان داد که چگونه تصویربرداری دقیق از افشانه‌های سوختی می‌تواند به تبیین تفاوت‌های مولکولی و پویای بین ترکیبات مختلف اتانول - بنزین و گازوئیل خالص کمک کند. این مطالعات پایه‌ای را برای بهبود عملکرد موتورهای احتراق داخلی و کاهش میزان آلایندگی‌ها فراهم می‌آورد [۱۶].

در مطالعه‌ی بنگ[2] (۲۰۱۲)، از فن BOS که مخفف شلیرن پس زمینه‌گرا[3] است به‌عنوان یک روش غیرمخرب و تصویربرداری سریع بهره گرفته شد تا خصوصیات افشانه سوخت اکسیژن را به‌دقت موردبررسی قرار دهد (شکل ۴).

در روشBOS ، یک پس‌زمینه‌ی تصادفی (معمولاً شامل الگوی نقطه‌ای یا دانه‌های پراکنده) قرار می‌گیرد. نور از این پس‌زمینه عبور کرده و پس از عبور از ناحیه‌ای که افشانه سوخت (در اینجا سوخت اکسیژن) در آن وجود

---

[1] Gao

[2] Bang

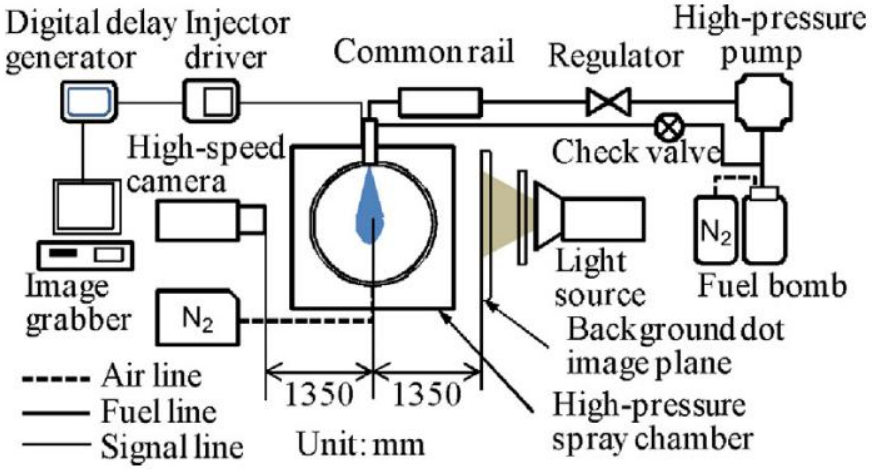
[3] Background Oriented Schlieren

دارد، به دوربین می‌رسد. تغییرات ریز در شاخص شکست به‌خاطر گرادیان چگالی یا دما باعث می‌شوند که تصویر پس‌زمینه دچار جابه‌جایی‌های پیکسلی شود. با استفاده از فن‌های پردازش تصویر (به طور معمول از طریق الگوریتم‌های همبستگی)، این جابه‌جایی‌ها اندازه‌گیری و تحلیل می‌شوند.

در افشانه‌های سوخت اکسیژن، تغییرات سریع و پیچیده‌ای در ساختار ذرات مایع به وجود می‌آید که می‌تواند شامل توزیع قطرات، پراکندگی و تغییرات چگالی در نواحی مختلف افشانه باشد. فن BOS به دلیل توانایی خود در ثبت تصاویر با نرخ فریم بالا و قابلیت پردازش دیجیتال، این امکان را ایجاد می‌کند که:

۱) تغییرات کوچک مکانیکی در الگوی پس‌زمینه تحت‌تأثیر افشانه ثبت شوند.
۲) با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر، تغییرات زمانی افشانه به‌صورت آنی بررسی و تحلیل می‌شوند.
۳) ازآنجایی‌که تغییر شاخص شکست به چگالی یا دما وابسته است، می‌توان با استفاده از کالیبراسیون، این تغییرات را به مقادیر کمی از چگالی یا دما تبدیل کرد.

بنابراین، در مطالعه‌ی بنگ (۲۰۱۲) این فن به کار گرفته شد تا اطلاعات دقیقی از رفتار افشانه سوخت اکسیژن، شامل الگوهای پراکندگی و ویژگی‌های تغییرات ذرات در گام گازی یا مایع به دست آید. نتایج به‌دست‌آمده از چنین تحلیل‌هایی می‌تواند در بهبود طراحی سامانه‌های تزریق سوخت یا بهینه‌سازی شرایط احتراق در موتورهای احتراق داخلی مفید باشد [۱۷].



شکل ۴: نمودار طرح کلی سامانه BOS برای تجسم پاشش سوخت[۱۷].

در سال ۲۰۱۳، یک گروه مجهز تحقیقاتی به سرپرستی پروفسور بلندینو، پروژه‌ای پیشگامانه را باهدف بررسی خصوصیات جریان در دالانه باد مافوق‌صوت اجرا کردند. در این پروژه از سامانه شلیرن نوع Z بهره گرفته شد که به‌واسطه‌ی طراحی خاص آن امکان ثبت دقیق و با وضوح‌بالا تغییرات شاخص شکست ناشی از تغییرات چگالی و دما در جریان‌ها را فراهم می‌آورد.

یکی از نکات برجسته این مطالعه، استفاده از عدسی‌های غیرکروی[۱] به‌جای عدسی‌های کروی بود. عدسی‌های کروی معمولاً دچار انحرافات نوری مانند ابیراهی کروی می‌شوند که موجب کاهش وضوح تصویر و افزایش اشتباهات اپتیکی می‌گردد. با به‌کارگیری عدسی‌های غیرکروی، این خطاها به حداقل رسیده و تصاویر به‌دست‌آمده از سامانه شلیرن بادقت و کنتراست بسیار بهتری ثبت می‌شوند. این بهبود در کیفیت تصاویر به‌ویژه در مطالعات جریان‌های مافوق‌صوت بسیار حیاتی است، زیرا در این شرایط تغییرات ریز در شاخص شکست ناشی از اختلافات ناپیوسته در خصوصیات سیال (مانند چگالی یا دما) باید به‌دقت موردبررسی قرار گیرند.

در نتیجه، استفاده از عدسی‌های غیرکروی در سامانه شلیرن نوعZ ، امکان تحلیل دقیق‌تر خصوصیات جریان و شناسایی ساختارهای دینامیکی موجود در دالانه باد را فراهم کرد که این امر به پیشرفت دانش و بهبود عملکرد سامانه‌های آزمایشی در حوزه آئرودینامیک منجر گردید [۱۸].

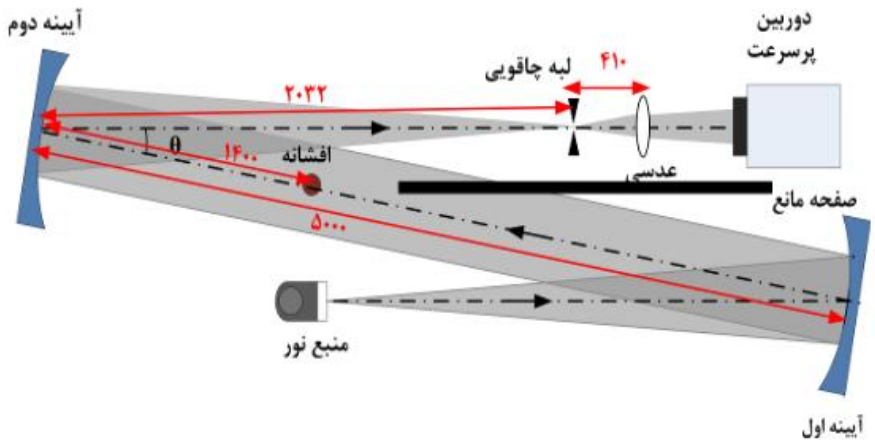
در مطالعه تجربی انجام‌شده توسط حاجی علی‌محمدی در سال ۲۰۱۲، تأثیر نسبت فشار به چگالی بر فواره ناشی از تزریق مستقیم گاز از افشانه چند سوراخ موردبررسی قرار گرفت. در این تحقیق، تنظیمات مختلف فشار ورودی و چگالی گاز به کار گرفته شدند تا پویایی و ساختار فواره تزریق، از جمله الگوی خروج گاز، سرعت نفوذ، تکه‌شدن جریان و میزان پراکندگی قطرات مطالعه شود.

در این تحقیق، شرایط مختلف فشار و چگالی گاز تنظیم و اعمال شدند. هدف از تغییر این عامل‌ها این بود که رابطه میان نسبت فشار به چگالی و ویژگی‌های خروجی فواره (شکل، پهنا و سرعت آن) به‌صورت تجربی مشخص شود. با استفاده از ابزارهای تصویربرداری سریع و فن‌های تصویربرداری شلیرن تغییرات مربوط به فواره تزریق از افشانه چند سوراخ به طور دقیق ثبت گردید (شکل ۵).

[۱] Aspheric Lenses

نتایج نشان داد که افزایش نسبت فشار به چگالی منجر به خروج گذرای پویاتر و با ساختار متفاوت از افشانه می‌شود. به‌عنوان‌مثال، شرایطی که در آن فشار نسبت به چگالی بالا باشد، باعث ایجاد فواره‌ای بانفوذ و پراکندگی بیشتر می‌شود که می‌تواند در بهبود اختلاط سوخت - هوا و کارایی سامانه‌های احتراق مستقیم نقش مؤثری داشته باشد. این یافته‌ها می‌تواند به مهندسان در بهینه‌سازی طراحی افشانه‌های چند سوراخ جهت کاربردهای صنعتی مانند موتورهای درون‌سوز و سامانه‌های تزریق سوخت کمک کند [۱۹].

در مجموع، این مطالعه تجربی با ارائه داده‌های دقیق دررابطه‌با چگونگی تغییر الگوهای فواره تزریق گاز به‌ازای تغییرات عامل‌های فشار و چگالی، مبنایی کاربردی برای بهبود طراحی و عملکرد سامانه‌های تزریق مستقیم ارائه نموده و اهمیت واپایش دقیق شرایط عملیاتی را در موفقیت آن‌ها برجسته می‌کند.



شکل ۵: چیدمان و فواصل تجهیزات آزمون شلیرن [۱۹].

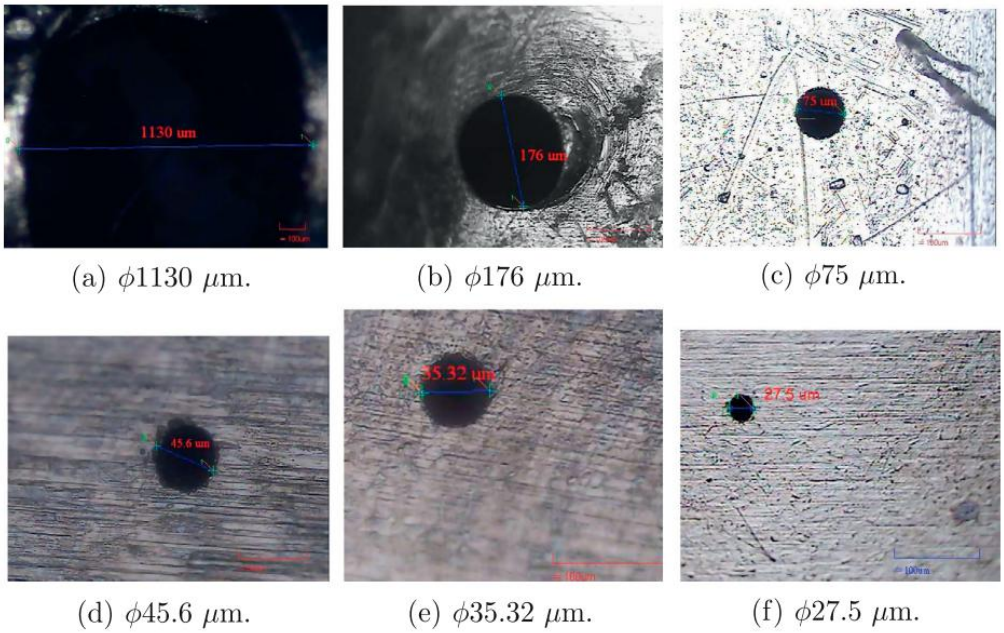
در سال ۲۰۱۳، تینگ[۱] روش شلیرن را برای تشخیص نشت گاز در لوله‌ها به کاربرد. در این روش، تغییرات کوچک در شاخص شکست نور به دلیل تفاوت چگالی ناشی از نشت گاز، به‌صورت الگوهای روشن و تاریک در تصاویر ثبت می‌شوند.

[۱] Chen-ChingTing

وقتی گاز از لوله نشت می‌کند، به دلیل اختلاف چگالی نسبت به محیط اطراف، شاخص شکست نور در نواحی اطراف نشت تغییر می‌کند. بر اساس قانون اسنل و معادله ایکول، این تغییرات منجر به انحراف پرتوهای نور از مسیر اصلی‌شان می‌شود. در سامانه شلیرن، نور پس از عبور از ناحیه مورد آزمایش توسط عدسی یا آینه متمرکز می‌شود و در نقطه کانونی، یک‌تیغه نازک قرار می‌گیرد. این تیغه به نحوی پرتوهای منحرف شده را مسدود می‌کند یا اجازه عبور آن‌ها را می‌دهد، به‌طوری‌که تغییرات کوچک در زاویه انحراف، به تضادهای شدت نور تبدیل شده و به‌راحتی قابل‌مشاهده می‌گردد. با استفاده از این روش، تینگ توانست به شکل غیرمخرب و سریع، نواحی نشت گاز را شناسایی کند. تصاویر حاصل از سامانه شلیرن نشان‌دهنده الگوهای تغییریافته بوده که به شناسایی دقیق محل نشت کمک می‌کند (شکل ۶). این امر موجب می‌شود که حتی نشت‌های پنهان یا کم ظهور نیز قابل‌تشخیص باشند.

از مهم‌ترین برتری‌های این روش می‌توان به تشخیص سریع و غیرمخرب نشت گاز، اثربخشی در شناسایی تغییرات اندک در شاخص شکست ناشی از تغییر چگالی، امکان استفاده در محیط‌های حساس بدون ایجاد تداخل یا آسیب و فراهم‌آوردن اطلاعات دیداری دقیق جهت پیشگیری از رویدادها و بهبود نگهداری سامانه‌های لوله‌کشی اشاره کرد.

این مطالعه نمونه‌ای از کاربرد عملی فن شلیرن در زمینه‌های صنعتی برای افزایش ایمنی و بهبود نگهداری سامانه‌های لوله‌کشی و تشخیص سریع نشت‌های احتمالی به شمار می‌آید [۲۰].



(a) $\phi 1130\ \mu m$. (b) $\phi 176\ \mu m$. (c) $\phi 75\ \mu m$.

(d) $\phi 45.6\ \mu m$. (e) $\phi 35.32\ \mu m$. (f) $\phi 27.5\ \mu m$.

شکل ۶: شکل ریزحفره‌ها زیر میکروسکوپ نوری.

در سال ۲۰۱۴، رگرت از یک منبع نور فلورسانس تحریک‌شده با لیزر برای تجسم جریان‌هایی با سرعت بسیار بالا (جریانی با عدد ماخ ۱۱) استفاده کرد. در این روش که مبتنی بر پایه فلورسانس القایی لیزری[۱] است، یک تَپ لیزری به ماده یا گازی که دارای یک ماده فلورسانت است تابیده می‌شود. این تابش باعث تحریک مولکول‌ها یا ذرات فلورسانت می‌شود که به‌سرعت از حالت انرژی بالا به حالت پایین‌تر برمی‌گردند و در طی این تخلیه انرژی، نور را با طول‌موج‌های متفاوتی نسبت به لیزر تحریک‌کننده منتشر می‌کنند (شکل ۷).

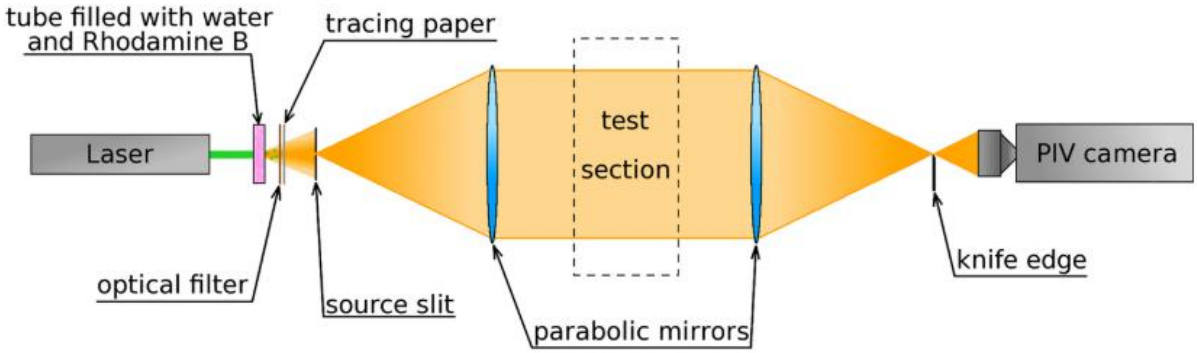
این نور فلورسانس که از غلظت و وضعیت فیزیکی ماده در جریان اطلاع می‌دهد، توسط دوربین‌های با سرعت برداشت بالا ثبت می‌گردد. به‌واسطه‌ی زمان‌بندی دقیق بین تَپ‌های لیزر و ثبت تصاویر، می‌توان ساختارهای دینامیکی جریان را به طور لحظه‌ای و با وضوح‌بالا دنبال کرد. روش LIF به‌ویژه در جریان‌های ابر سرعت[۲] که تغییرات سریع در دما، چگالی و سایر خواص فیزیکی رخ می‌دهد، توانایی تبدیل تغییرات کم در شاخص شکست و وضعیت فلورسانس به اطلاعات تصویری دقیق را دارد.

مزیت اصلی این فن در چنین شرایطی، امکان تجسم دقیق ساختارهای جریان، تابش‌های ناپیوسته و لایه‌های دینامیکی در مناطق با سرعت بسیار بالا است که به کمک روش‌های تصویرسازی متداول دشوار است. استفاده از

[۱] Laser-Induced Fluorescence - LIF

[۲] Supersonic/Hypersonic

یک منبع نور فلورسانس تحریک‌شده با لیزر، به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا پدیده‌های پیچیده‌ای؛ مانند شوک‌های هوا و مناطق اختلاط را در شرایط ماخ ۱۱ به‌وضوح مشاهده و تحلیل کنند.



شکل ۷: طرح‌واره‌ای از یک چیدمان شلیرن مبتنی بر لیزر.

در سال ۲۰۱۸، ترالدی[۱] و همکارانش به بررسی جامع استفاده از روش تصویربرداری شلیرن برای تشخیص و تحلیل پلاسمای جوی پرداختند. پلاسماهای فشار جوی به دلیل کاربردهای فراوان در پروژه‌های صنعتی (مانند پردازش مواد، فعال‌سازی سطح، جوشکاری‌ها و پوشش‌دهی‌ها) و حوزه‌های پزشکی (مثلاً درمان‌هایی که به ویژگی‌های پلاسما تکیه دارند) از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. این کاربردها نیازمند داشتن ابزارهایی هستند که بتوانند رفتار سیال دینامیکی و ویژگی‌های فیزیکی پلاسما را به‌دقت ثبت کنند. در این مقاله به بررسی تصویربرداری شلیرن، به‌عنوان یک روش غیر مداخله‌گر، امکان مشاهده تغییرات جزئی در شاخص انکسار ناشی از تغییرات در چگالی، دما و ترکیب گازها را فراهم می‌کند، می‌پردازد.

وقتی یک پرتو نور از منبع تابیده شده به‌عنوان نمونه از یک محیط شفاف با تغییراتی در چگالی عبور می‌کند، به دلیل اختلاف در شاخص انکسار، مسیر نور تغییر می‌کند. با استفاده از اجزایی مانند آینه‌های مقعر یا عدسی‌ها و به‌کارگیری یک لبه‌ی نازک در نقطه کانونی، انحرافات کوچک نور به تغییرات کنتراست تبدیل می‌شود. این تغییرات در شدت نور تصویر نهایی باعث آشکارشدن جزئیات جریان‌های سیال و ساختارهای دینامیکی در محیط پلاسما می‌شود. به دلیل تنوع در هندسه و شرایط عملیاتی منابع پلاسمای جوی، تنظیم دقیق سامانه‌های اپتیکی و بهبود

[۱] Traldi

کیفیت تصویر از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله به ارائه مثال‌هایی از کاربرد تصویربرداری شلیرن در بررسی‌های عملی منابع پلاسمایی می‌پردازند. نمونه‌های مطرح عبارت‌اند از:

جت‌های پلاسما غیرتعادلی: استفاده از این فن برای تحلیل تغییرات سیال دینامیکی و رفتار توربولانس در جریان‌های پلاسما.

پلاسمای عامل واپایش جریان[۱]: نحوه تأثیر پلاسما بر واپایش جریان هوا در سطوح مختلف مانند بال هواپیما یا توربین‌های بادی از طریق مشاهده دقیق الگوهای تغییر جریان.

منابع پلاسما حرارتی: بررسی کاربرد تصویربرداری شلیرن در تحلیل فرایندهای حرارتی، مانند فرایندهای جوشی و برش‌های مرتبط با پلاسما.

این مثال‌ها نشان می‌دهند که با به‌کارگیری فناوری‌های نوین مانند دوربین‌های با سرعت بالا و الگوریتم‌های پیشرفته پردازش تصویر، می‌توان اطلاعات کیفی و حتی در مواردی کمی از ویژگی‌های سیال دینامیکی پلاسما به دست آورد.

این تحقیق به طور جامع نشان می‌دهد که چگونه استفاده از تصویربرداری شلیرن، با بهره‌گیری از اصول فیزیکی دقیق و تنظیمات اپتیکی مناسب، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تشخیصی غیر مداخله‌گر، اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار سیال دینامیکی پلاسماهای جوی ارائه دهد. این فناوری، به کمک پیشرفت‌های فنّاورانه در دوربین‌ها و پردازش‌های دیجیتال، نقشی کلیدی در توسعه و بهبود فرایندهای پلاسما محور در صنایع گوناگون ایفا می‌کند [۲۱].

در سال ۲۰۲۵، لینگ‌جی لی و همکارانش یک روش نوین مبتنی بر یادگیری عمیق به نام FCSD-Net را برای بازسازی تصاویر شلیرن از میدان‌های جریان احتراقی در اتاقک احتراق اسکرام جت معرفی کرده‌اند. هدف اصلی این تحقیق ارائه ابزاری غیرمخرب برای بازیابی دقیق ساختارهای موجی و آشفتگی موجود در جریان‌های ابر سرعت استفاده از داده‌های فشار دیواری است.
در این مطالعه؛ شبکه پیشنهادی از دوشاخه تشکیل شده است؛ شاخه‌ی اصلی مبتنی بر یک معماری ترنسفورمر نسخه اصلاح‌شده (Swin-Transformer V۲) برای استخراج ویژگی‌های جهانی و بلندمدت، و شاخه‌ی کمکی

[۱] Plasma Actuators

مبتنی بر شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) که به تمرکز بر ویژگی‌های محلی و جزئی مانند لبه‌ها، بافت و ساختارهای جزئی کمک می‌کند (شکل ۸).

با استفاده از یک ماژول ادغام ویژگی‌ها[۱]در ساختارU-Net ، ویژگی‌های استخراج‌شده از هر دوشاخه به طور تدریجی و هماهنگ ترکیب می‌شوند تا نمایندگی کاملی از تصویر شلیرن حاصل شود.

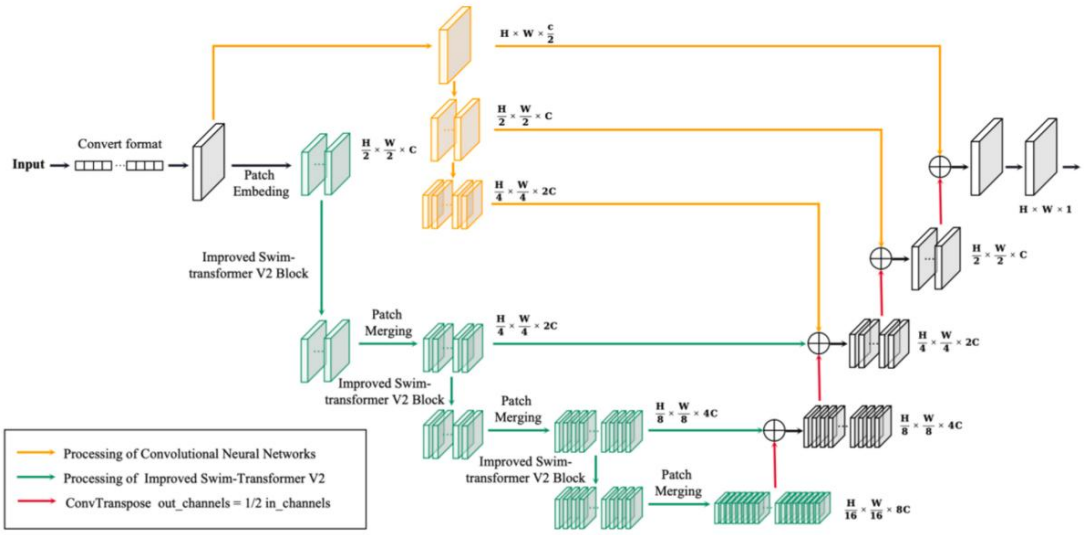
روش FCSD-Net توانسته است با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های دالانه باد و فشار دیواری، ساختارهای اصلی موج‌های ضربه‌ای، تغییرات دینامیکی و مناطق آشفته را با وضوح‌بالا بازسازی کند.

به طور کمی، این مدل نسبت به مدل‌های مرجعی که پیش‌تر استفاده شده بودند، موفق به افزایش شاخص‌های کیفیت تصویر از جمله افزایش حدود ۵.۵۴ درصد در SSIM، افزایش ۳.۰۲dB در PSNR و همبستگی پیرسون (تقریباً ۲.۴ درصد بهبود) شده است.

این روش امکان نظارت دقیق بر ثبات و ساختار جریان‌های احتراقی در موتورهای اسکرام جت را فراهم می‌کند که از جنبه‌های ایمنی و بهبود عملکرد این سامانه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. علاوه بر این، این رویکرد به‌عنوان ابزاری مؤثر در واپایش جریان‌های احتراقی و جهت بهینه‌سازی فرایند احتراق محسوب می‌شود.

به طور خلاصه، این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از معماری‌های پیشرفته یادگیری عمیق، به‌ویژه ترکیب قابلیت‌های ترنسفورمر وCNN ، می‌تواند تصویرسازی دقیق و با وضوح‌بالایی از میدان‌های جریان احتراقی در محیط‌های ابر سرعت (مثل اتاقک احتراق اسکرام جت) ایجاد کند که این امر نقش مهمی در درک بهتر پدیده‌های پیچیده‌ی جریان و بهبود عملکرد سامانه‌های احتراقی ایفا می‌کند [۲۲].

[۱] Feature Fusion Module



شکل ۸: ساختار شبکه روش پیشنهادی.

در سال ۲۰۲۵، جیانگ و همکارانش، در یک پژوهش سامانه تصویربرداری شلیرن مبتنی بر گوشی هوشمند را برای اندازه‌گیری سرعت صوت ارائه می‌دهند. این روش هم از دیدگاه کیفی و هم کمی، پدیده‌های صوتی مانند قانون هویگنز و ماهیت طولی امواج صوت را به نمایش می‌گذارد. این مطالعه با استفاده از تلفن هوشمند به‌جای دوربین‌های پرسرعت، امکان مشاهده و تحلیل امواج صوت را فراهم می‌کند. یکی از دلایل اهمیت این موضوع این است که پدیده‌های صوتی به‌صورت بصری کمتر شهودی هستند و نشان‌دادن آن‌ها از طریق تصویربرداری شلیرن به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا بهتر خواص انتشار امواج صوتی، تداخل و تشکیل الگوهای استوانه‌ای را درک کنند. در این مطالعه برای تجهیز و طراحی آزمایش از ابزار زیر استفاده شده است:

آینه سهموی با قطر ۲۰۳ میلی‌متر (فاصله کانونی ۷۵۰ میلی‌متر)، گوشی هوشمند، LED (با پوشش نوار سیاه و سوراخ کوچک جهت ایجاد منبع نور نقطه‌ای)، پایه آزمایشگاهی، ژنراتور سیگنال دوتایی، تقویت‌کننده سیگنال و ژنراتور فراصوت. در این سامانه، آینه سهموی حدود ۱.۵ متر از گوشی هوشمند قرار می‌گیرد LED به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که نقطه نوری کوچک و شدید را به‌وسیله آینه سهموی به گوشی منعکس کند. سیگنال ژنراتور به دو مسیر تقسیم شده؛ یکی جهت رانش ژنراتور فراصوت و دیگری جهت رانش LED که با همان بَسامد چشمگیر بودن اثرات فراصوت را ممکن می‌سازد.

از مهم‌ترین برتری‌های این تحقیق می‌توان به‌سادگی طراحی، تطبیق با اصول فیزیکی، دقت بالای نتایج (خطای نسبی کمتر از ۱٪) و کاربرد آموزشی آن اشاره کرد [۲۳].

هدف این گزارش بررسی دقیق تصویربرداری شلیرن با چیدمان‌های مختلف به‌ویژه چیدمان z شکل و بررسی نظریه نوری و روش کارکرد آن با آینه‌های کروی است. در جدول ۱ تعدادی از مطالعاتی که در دو سال اخیر توسط تصویربرداری شلیرن انجام‌گرفته؛ ذکر شده است.

چن ۲۰۲۴	شبیه‌سازی فیزیکی تصویربرداری متمرکزکننده‌ی شلیرن برای جریان لایه‌مرزی فراصوت [۲٤]
چن ۲۰۲۴	ارزیابی سرعت‌سنجی جریان نوری مبتنی بر موجک بدون هسته برای تصاویر شلیرن [۲٥]
طلعت ۲۰۲۴	تصویربرداری شلیرن و طبقه‌بندی ویدئویی تلفظ‌های الفبا: بهره‌برداری از جریان‌های آوایی برای تشخیص گفتار و گفتاردرمانی[۲٦]
ژانگ ۲۰۲۴	تعیین محصولات پیشرانه با استفاده از LIPS با تفکیک زمانی و توزیع مکانی همراه با تصویربرداری پرسرعت شلیرن [۲۷]
محسنی مهر ۲۰۲۴	شبیه‌سازی پلاسما و جریان باد یونی در یک تخلیه مانع سطحی مورداستفاده برای تبدیل گاز، معیارگذاری شده توسط تصویربرداری شلیرن [۲۸]
لای ۲۰۲۵	تحلیل ویژگی‌های جریان خارجی و سرعت جت جاروب کننده زیر صوت بالا با استفاده از روش تجسم شلیرن و سرعت‌سنجی تصویر شلیرن [۲۹]
وانگ ۲۰۲۵	شناسایی حالت جریان چند حسگری و تولید تصویر شلیرن برای ورودی مافوق‌صوت [۳۰]
چانگ ما ۲۰۲۵	مطالعه‌ای بر روی تجسم فرایند ذوب‌شدن هویج منجمد به کمک اولتراسوند با استفاده از یک سامانه تصویربرداری شلیرن درجا [۳۱]
وردنبورگ ۲۰۲۵	بازیابی کمی چگالی جت‌های گازی برای منابع EUV با تولید هماهنگ بالا با یک سامانه تصویربرداری فشرده شلیرن [۳۲]
کویین ۲۰۲۵	تصویربرداری شلیرن با جهت‌گیری پس‌زمینه روی پردازنده با استفاده از سخت‌افزار درجه مصرف مصرف کننده [۳۳]
لین ۲۰۲۵	تصویربرداری هولوگرافیک با تمرکز شلیرن (HFSI) برای تجسم جریان سه‌بعدی [۳٤]
گاردون ۲۰۲۵	اندازه‌گیری‌های مبتنی بر ویژگی جریان‌های مافوق‌صوت از تصاویر شلیرن [۳٥]

٤- نظریه نوری

مبنای فیزیکی تصویربرداری شلیرن از قانون اسنل ناشی می‌شود که بیان می‌کند نور در اثر بر همکنش با ماده کند می‌شود. اگر محیط همگن باشد، مانند خلأ یا فضا، نور به طور یکنواخت و با سرعت ثابت حرکت می‌کند. هنگام مواجهه با محیط‌های ناهمگن، مانند سیالات در حال حرکت، پرتوهای نور می‌شکنند و از مسیر پیوسته خود منحرف می‌شوند و در نتیجه شلیرن ایجاد می‌شود. تصویربرداری شلیرن بر اساس انحراف پرتو نور موازی ناشی از عبور از گرادیان‌های شاخص شکست که نتیجه تغییرات چگالی یا دما در یک سیال است. حال اگر بخواهیم به اصول فیزیکی دیگری که بر عملکرد این روش تأثیرگذارند بپردازیم، موارد زیر قابل‌ذکر هستند:

۱. رابطه گلدستون - دیل

این رابطه به‌صورت تقریبی تغییرات شاخص شکست را به تغییرات چگالی ربط می‌دهد. به همین دلیل، وقتی چگالی سیال تغییر می‌کند - مثلاً در ناحیه یک شوک یا جریان داغ - شاخص شکست نیز تغییریافته و باعث انحراف پرتوهای نور می‌شود. این رابطه، پایه‌ای برای تحلیل کمی تصاویر شلیرن محسوب می‌شود.

۲. قوانین نوری و هندسه اپتیکی

بر اساس اصل فِرما، نور مسیرهایی را از میان نقاط بهینه در فضای با تغییرات شاخص شکست اتخاذ می‌کند. در یک سامانه شلیرن، نور پس از عبور از محیط متغیر، با استفاده از عدسی یا آینه به نقطه کانونی متمرکز شده و در آنجا یک حاشیه (مثلاً لبه‌دار) قرار می‌گیرد تا تغییرات کوچک در زاویه انحراف به تغییراتی در شدت نور تبدیل شود. این تبدیل حساسیت سامانه را بسیار افزایش می‌دهد.

۳. اثر برش[1]

قرارگیری یک المان برش‌دار در نقطه کانونی به گونه‌ای عمل می‌کند که حتی انحرافات جزئی زاویه‌ای، تغییرات قابل‌توجهی در میزان نوری که به حسگر می‌رسد ایجاد می‌کنند. این امر به فن شلیرن اجازه

[1] Knife-Edge Effect

می‌دهد تا ناهنجاری‌های بسیار ریز در گرادیان‌های شاخص شکست (که ناشی از تغییرات چگالی یا دما هستند) به‌وضوح تجسم شوند.

٤. تقویت آنالوگ خطی[1] و حد کوچک زاویه

در بیشتر کاربردها فرض بر این است که انحراف پرتوها در حد کوچک زاویه قرار دارند، به‌طوری که رابطه بین زاویه انحراف و گرادیان شاخص شکست تقریباً خطی است. این مفروضهٔ کوچک زاویه باعث می‌شود تا تغییرات کوچک در چگالی یا دما به طور مستقیم و کم یافته قابل‌تفسیر شوند.

٥. تأثیرات دیفراکشن و اختلالات اپتیکی

در کاربردهای دقیق‌تر، باید به پدیده‌های نوری مانند پراش نور و صحت تنظیمات اپتیکی نیز توجه کرد. هرگونه خطای اپتیکی یا اختلال در ترتیب اجزا (مثلاً عدم دقت در هم‌مرکزی پرتوها یا ویرایش‌های غیرخطی) می‌تواند بر اندازه‌گیری‌های کمی تأثیر گذارد.

این اصول در کنار هم، تصویربرداری شلیرن را به ابزاری فوق‌العاده حساس و کاربردی برای مطالعه جریان‌های سیال، شاخص‌های حرارتی، ضربه‌ها و موارد مشابه تبدیل می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر، این فن اجازه می‌دهد تا تغییرات ریز فیزیکی ناشی از ناپیوستگی‌های چگالی یا دما به شکلی بصری و حتی کمی تحلیل شوند.

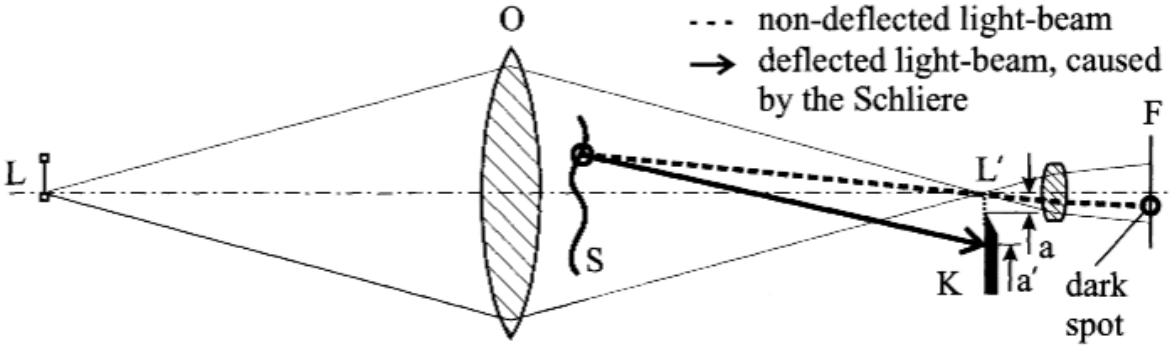
۴-۱ اصل اساسی

اصل اساسی فن شلیرن در شکل ۹ نشان‌داده‌شده است. L یک منبع نور محدود با روشنایی همگن است. عدسی شیئی O که باید کروی و با تصحیح بی‌رنگ باشد، تصویری از منبع نور در 'L ایجاد می‌کند. در این نقطه، لبه شلیرن K (مثلاً لبه چاقویی) قرار دارد. لبه تیز K موازی و به‌اندازه فاصله a تا محور نوری چیدمان از هم فاصله دارد، به‌طوری‌که تصویر منبع نور تا حدی توسط لبه شلیرن پوشانده شده است. یک عدسی در پشت لبه شلیرن، تصویر تیزی از شلیرن را روی صفحه یا فیلم F نمایش می‌دهد.

[1] Linearization

اگر پرتو نوری توسط یک شیلر S منحرف شود، بسته به جهت گرادیان، می‌تواند در جهت لبه شیلر یا دور از آن شکسته شود. هنگامی که شکست در جهت لبه شیلر باشد، نقطه روی تصویر که مربوط به موقعیت شیلر در حجم اندازه‌گیری است، در مقایسه با نقاط دست‌نخورده روی تصویر، تیره‌تر خواهد بود.

برعکس، هنگامی که پرتو از لبه شیلر منعکس می‌شود، نقطه مربوطه روشن‌تر خواهد بود. اگر قرار است توزیع چگالی به‌صورت کمی تعیین شود، لازم است این توزیع چگالی روشنایی را با استفاده از نورسنجی ارزیابی کرد. علاوه بر این، تنظیمات نوری بیشتری در چیدمان شکل ۹ باید انجام شود تا رابطه کمی بین توزیع شدت در F و انحراف نور در S که تابعی از تغییرات چگالی در شیلر است، آشکار شود [۳۶].



شکل ۹: آرایش نوری برای فن شلیرن به روش توپلر.

۲-۴ روابط متقابل نوری و ترمودینامیکی

انحراف نور به دلیل تغییر ضریب شکست در مسیر پرتوهای نور، اساس فن شلیرن است. برای کاربرد این فن در زمینه انتقال حرارت و جرم، باید همبستگی بین کمیت‌های ترمودینامیکی و نوری تعیین شود.

۱-۲-۴ ضریب شکست

ضریب شکست n یک محیط شفاف که بر طول‌موج مشخصی در محدوده نور مرئی اعمال می‌شود را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد.

$$n = \frac{c_0}{c}, \qquad (۱)$$

به ترتیب با سرعت نور در خلأ c. و در محیط c، اگر به بررسی میدان‌های دما در گازهای ایده‌آل بپردازیم، معادله حالت به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\rho = \frac{p}{RT}, \qquad (۲)$$

که در آن ρ چگالی و R ثابت گاز ویژه محیط است. T دمای مطلق آن و p فشار بارومتریک اعمال شده بر میدان است. برای گازها، رابطه ساده شده لورنس- لورنتس بین ضریب شکست و چگالی، به دلیل $n \approx ۱$ معتبر است:

$$n - ۱ = K\rho, \qquad (۳)$$

k در اینجا ضریب گلدستون - دیل نامیده می‌شود (حدود ۰.۲۳ cm^3/g برای $p_0 = ۱۰۱۳\ hPa;\ T_0 = ۲۷۳.۱۵k$)، عموماً در گازها ضریب شکست بسیار جزئی تغییر می‌کند. ضریب شکست به طور جزئی به چگالی وابسته است، بنابراین برای اینکه تغییرات انحراف مشاهده شود با از روش‌های حساس نوری استفاده کرد. میزان انحراف (n-۱) به ویژگی‌هایی مانند اختلاف دما، تغییرات چگالی، طول موج و اختلاط ناهمگون مواد بستگی دارد. تغییرات چگالی ناشی از اختلاف دما یا سرعت‌های بالا در جریان‌های گازی موجب تغییرات در ضریب شکست شده و در نتیجه، باعث انحراف نور می‌شود. این پدیده در کاربردهایی مانند تصویربرداری در محیط‌های پرآشوب، اندازه‌گیری دقیق عامل‌های هوافضایی، و حتی در بررسی پدیده‌های جوی اهمیت زیادی دارد. برای جامدات، معادلات تحلیل رفتار نور به دلیل ساختار منظم و غیرمتغیر ماده پیچیده‌تر می‌شوند. در این حالت، انحراف نور تحت‌تأثیر عوامل مختلفی مانند ناهمگنی‌های درونی، تنش‌های مکانیکی و تغییرات دمایی رخ می‌دهد. روش‌های پیشرفته‌ای مثل تحلیل اجزای محدود (FEM) و مدل‌سازی نوری دقیق برای بررسی این پدیده‌ها به کار می‌روند.

در محیط‌های ناهمگن، تغییرات ضریب شکست می‌تواند باعث انحرافات خاصی شود که وابسته به ویژگی‌های ماده و ساختار آن است. همان‌طور که اشاره کردید، طول موج نور (λ) نقش مهمی در میزان انحراف ایفا می‌کند. با افزایش طول موج، ضریب شکست معمولاً کاهش می‌یابد، که باعث کاهش میزان انحراف نور در محیط‌های ناهمگن می‌شود. این ویژگی در بسیاری از کاربردهای اپتیکی مهم است، مانند تصویربرداری مادون قرمز یا کاربردهای لیزری که در محیط‌های متغیر و دارای آشفتگی مورداستفاده قرار می‌گیرند. همچنین، انتخاب طول موج‌های مختلف برای سامانه‌های نوری می‌تواند بر میزان دقت و توانایی نمایش انحرافات تأثیرگذار باشد. برای نمونه، در سامانه‌های اپتیکی که نیاز به کاهش اثرات پراکندگی دارند، از طول موج‌های بلندتر استفاده می‌شود، در حالی که برای رزولوشن بالاتر در محیط‌های خاص، طول موج‌های کوتاه‌تر ترجیح داده می‌شود.

ویژگی هندسی نور در محیط‌های ناهمگن تا حد زیادی قابل پیش‌بینی هستند و می‌توان با تحلیل گرادیان‌های ضریب شکست، میزان انحراف پرتوها را مشخص کرد. انحنای مسیر نور در چنین محیط‌هایی معمولاً با گرادیان ضریب شکست متناسب است، که این موضوع را می‌توان با معادلات شکست هندسی[۱] توضیح داد. در نتیجه انحنای اشعه طبق رابطه (۵) برابر است با:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial x}$$
$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial y} \qquad (۵)$$

که z، y، x جهت‌های استاندارد دکارتی و n ضریب شکست را نشان می‌دهد. با یک‌بار انتگرال‌گیری زاویه انحراف پرتو طبق معادلات (۶) در جهت x و y به دست می‌آید:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{n}\int \frac{\partial n}{\partial x}\,\partial z$$
$$\varepsilon_y = \frac{1}{n}\int \frac{\partial n}{\partial y}\,\partial z \qquad (۶)$$

هر دو معادله (۶) جز معادلات اساسی هستند که برای تکنیک‌های شلیرن و سایه‌نگاری به‌کار می‌روند. این معادلات بیان می‌کنند هر چه چگالی بیشتر باشد، میزان بازتابش بیشتر خواهد بود. اختلاف چگالی در نواحی شفاف ناهمگن، اصلی است که پشت تکنیک شلیرن قرار دارد. شلیرن ممکن است در یک، دو یا سه بعد اتفاق می‌افتد.

سایه‌نگاری پرتوها[۲]، یکی از روش‌های تصویربرداری اپتیکی است که در آن تغییرات چگالی محیط باعث تغییر مسیر نور شده و به‌صورت سایه‌ها ثبت می‌شود. این روش بیشتر برای مشاهده تغییرات چگالی در سیالات، موج‌های ضربه‌ای و جریان‌های آشفته مورداستفاده قرار می‌گیرد. میزان روشنایی در این تکنیک به مشتق دوم مکانی یا لاپلاسین بستگی دارد:

$$\frac{\partial^2 n}{\partial} - \partial x^2 \qquad (۷)$$

---

[۱] Geometrical Optics

[۲] Shadowgraphy

در روش سایه‌نگاری، میزان جابه‌جایی پرتوهای انحرافی نشان‌دهنده تغییرات چگالی یا جریان محیط موردبررسی است. برخلاف شلیرن که تغییرات چگالی را با تمرکز مجدد در عدسی متمرکزکننده تحلیل می‌کند، سایه‌نگاری این تغییرات را بیشتر به‌صورت پراکندگی پرتوها نشان می‌دهد. در واقع، این پراکندگی پرتوها ناشی از تفاوت در ضریب شکست محیط است. وقتی تغییر چگالی درون سیال رخ می‌دهد (مثلاً در اثر موج‌های ضربه‌ای یا گرادیان دما)، مسیر نور منحرف می‌شود، که در تصاویر سایه‌نگاری به‌صورت مناطق روشن و تاریک دیده می‌شود..

میزان روشنایی در تصویر شلیرن از مشتق اول مکانی نسبت به ضریب شکست به دست می‌آید ($\frac{\partial n}{\partial x}$) بنابراین تصویر شلیرن زاویه ی انحراف ε را نشان می‌دهد. حساسیت بالا و سازگاری این تکنیک نوری باعث شده که این شیوه به شدوگرافی ترجیح داده شود.

۲-۲-۴ میزان حساسیت سامانه

حساسیت در واقع به کیفیت و وضوح گرادیان‌های چگالی اشاره دارد که در تصویر شلیرن دیده می‌شود .این ویژگی تحت‌تأثیر عواملی مانند کیفیت منبع نور، آینه‌ها، عدسی‌های متمرکزکننده، دوربین و نیز تنظیم مناسب اجزای سامانه است تا گرادیان‌های ناحیه‌ی آزمون به‌خوبی در تصویر شلیرن مشاهده شوند. حساسیت را می‌توان به‌صورت کمی و بر اساس عامل‌های اندازه‌گیری‌شدنی نظیر فاصله کانونی آینه‌ها یا ارتفاع منبع نور محاسبه کرد. محاسبه حساسیت کمک می‌کند تا مشخص شود کدام عامل‌ها باید تغییر کنند تا نتایج دقیق‌تر و بهتری حاصل شود.

هر منبع نور دارای میزان روشنایی ویژه است که در اینجا با علامت (B) نشان داده‌ایم. نور از منبع به سمت شکاف با ابعاد b و h هدایت می‌شود، به ترتیب عرض و ارتفاع شکاف هستند. میزان روشنایی سرچشمه نور در آینه‌ی اول E. تابعی از B، h،b و فاصله‌ی کانونی آینه‌ی اول f_1 است.

$$E_{\cdot} = \frac{B \times b \times h}{f_1^2} \qquad (۸)$$

معادله (۸) را قابل‌استفاده برای محاسبه و تعیین روشنایی پس‌زمینه‌ی تصویر شلیرن (E) است. a برابر است با نسبت فاصله‌ی کانونی دو آینه ضرب در ارتفاع شکاف:

$$a = \frac{f_2}{f_1} \times h \qquad (۹)$$

روشنایی پس‌زمینه در تصویر شلیرن را می‌توان با حل معادله فوق برای h و جایگزین‌کردن نتایج در معادله (۷) محاسبه کرد. فاکتور بزرگ‌نمایی m برای مرتبط کردن سایز واقعی گرادیان‌های بخش آزمون با تصویر خروجی به کار می‌رود (بزرگ‌نمایی برابر است با: نسبت طول تصویر در دستگاه نوری به طول جسم).

$$E = \frac{B \times b \times a}{m^{2} \times f_{1} \times f_{2}}, \qquad (۱۰)$$

روشنایی در یک نقطه‌ی ویژه در تصویر شلیرن را می‌توان باتوجه‌به E مشخص کرد. ΔE نشان‌دهنده‌ی اختلاف روشنایی است. پرتو نور در یک نقطه به اندازه‌یΔa منحرف می‌شود که می‌توان آن را به‌صورت ضرب زاویه انحراف ε در فاصله‌ی کانونی آینه دوم تعریف کرد.

$$\Delta a = \varepsilon \times f_{2} \qquad (۱۱)$$

از معادله (۱۱) می‌توان برای محاسبه ارتفاع a استفاده کرد. با جاگذاری در معادله (۹) خواهیم داشت:

$$\Delta E = \frac{B \times b \times \varepsilon}{m^{2} \times f_{1}}, \qquad (۱۲)$$

در مقابل، c یکی از خصوصیات تصویر است که سامانه شلیرن به وجود می‌آورد. این عامل به‌صورت نسبت اختلاف روشنایی محلی بر روشنایی زمینه قابل‌تعریف است.

$$C = \frac{\Delta E}{E}, \qquad (۱۳)$$

با ترکیب معادلات قبل، می‌توان کنتراست تصویر را به‌عنوان تابعی از زاویه‌ی انحراف نور محاسبه کرد. این رابطه نشان می‌دهد که هرچه زاویه‌ی انحراف پرتوها بیشتر باشد، تغییرات شدت روشنایی در تصویر نیز چشمگیرتر خواهد بود:

$$C = \frac{\varepsilon + f_{2}}{a} \qquad (۱۴)$$

حساسیت در اینجا بیانگر میزان تغییرات خروجی نسبت به تغییرات ورودی است و می‌توان آن را به‌صورت مشتق مرتبه‌ی اول کنتراست نسبت به زاویه‌ی انحراف تعریف کرد. این رابطه در سایه‌نگاری به ما کمک می‌کند تا میزان تغییر شدت نور در تصویر را در پاسخ به تغییرات زاویه‌ی انحراف کمی‌سازی کنیم.

در واقع، مقدار S نشان می‌دهد که چگونه تغییرات کوچک در زاویه‌ی انحراف می‌توانند بر کنتراست تصویر تأثیر بگذارند. این مفهوم در تحلیل موج‌های ضربه‌ای و تغییرات چگالی بسیار مهم است، زیرا حساسیت بالاتر می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از ساختارهای ناپایدار جریان ارائه دهد.

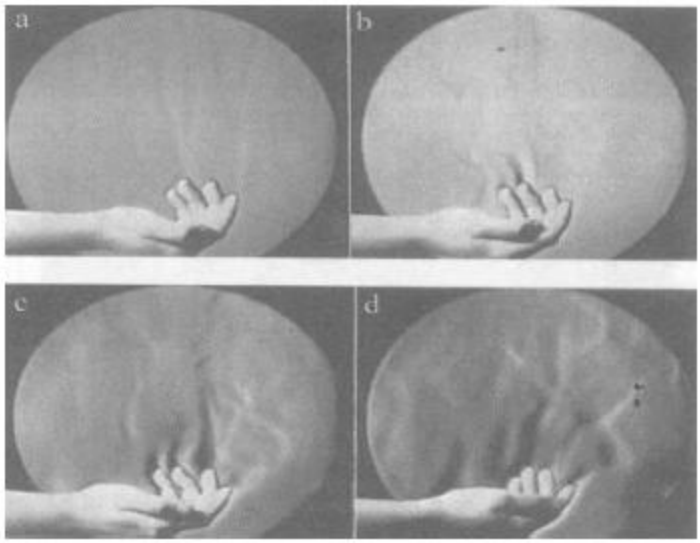
$$S = \frac{\partial C}{\partial \varepsilon}, \tag{۱۵}$$

با جاگذاری معادله (۱۳) در (۱۴) می‌توان حساسیت را بر حسب فاصله‌ی کانونی به‌عنوان خروجی و یک ورودی که در اینجا همان ارتفاع شکاف است تعریف کرد.

$$S = \frac{f_۲}{a}, \tag{۱۶}$$

تنظیم دقیق زاویه‌های هندسی در سامانه شلیرن به بهبود حساسیت تصویر کمک می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، با کاهش اختلاف ارتفاع بین شکاف نوری و لبه تیغه (همان قسمت قطع‌کننده نور) از پراکندگی ناخواسته نور جلوگیری شده و تغییرات اندکی در مسیر پرتوها واضح‌تر قابل‌تشخیص خواهند بود. انتخاب آینه با فاصله‌ی کانونی طولانی‌تر نیز باعث بهبود بهره‌وری نوری شده و تأثیر تغییرات زاویه‌ی انحراف را بر روی تصویر تقویت می‌کند.

علاوه بر این، افزایش فاصله کانونی به معنای افزایش پراکندگی افقی پرتوهای انحرافی در صفحه‌ی تصویر است؛ بنابراین، با طولانی‌تر کردن فاصله کانونی، تغییرات کوچک در زاویه انحراف به تغییرات بزرگ‌تری در شدت نور تبدیل شده و حساسیت سامانه بیشینه می‌شود. افزایش حساسیت در تصویر شلیرن در شکل ۱۰ نشان‌داده‌شده است.



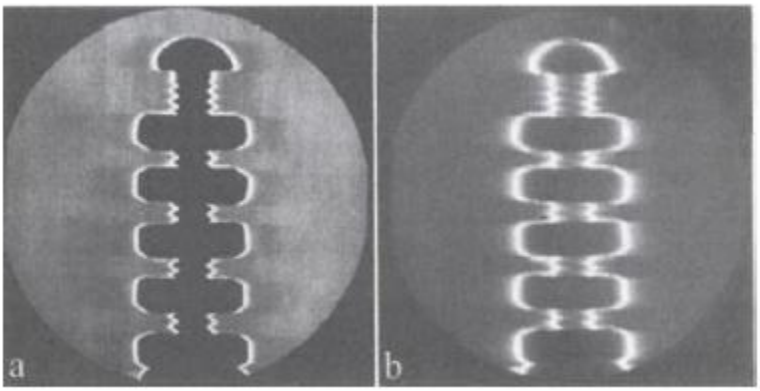
شکل ۱۰: نمایش حساسیت تصویر شلیرن.

محدودیت‌های دستیابی به حساسیت بالا در تصاویر شلیرن ناشی از چندین عامل فیزیکی و طراحی سامانه‌های نوری است. طبق آنچه در کتاب ستلز بیان شده، یک اصل اساسی وجود دارد که بیان می‌کند رعایت حداقل تغییرات ارتفاع بین شکاف نوری و لبه تیغه برای تشخیص دقیق کنتراست ضروری است. در ادامه، بسیاری از کاربران شلیرن متوجه شده‌اند که حداقل کنتراست قابل‌تشخیص به تقریب برابر با ۰.۰۵ می‌باشد؛ بنابراین، برای دستیابی به حساسیت مطلوب، انتخاب آینه با حداکثر فاصله کانونی لازم است. اما افزایش فاصله کانونی به افزایش هزینه‌ها منجر می‌شود و اندازه آینه و چیدمان آن باید با ابعاد کل سامانه هماهنگ باشد.

یکی دیگر از محدودیت‌ها، کاهش ارتفاع شکاف است که به دلیل اثرات پراش (دمای پراش یا شکست[۱]) حساسیت را کاهش می‌دهد؛ این پراش باعث می‌شود که نور، بجای تمرکز در نقطه مدنظر، به‌صورت سایه‌های روشن پخش شود و در نتیجه کیفیت تصویر پایین بیاید. شکل ۱۱ نمونه بارزی از این اثر را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، اگرچه کاهش ارتفاع شکاف ممکن است از نظر فیزیکی مطلوب به نظر برسد، ولی نتیجه آن کاهش حساسیت ناشی از اثر پراش است [۱].

[۱] diffraction

این معادلات و محدودیت‌ها نشان‌دهنده‌ی چالش‌های اصلی در بهینه‌سازی سامانه‌های شلیرن هستند، جایی که باید بین افزایش حساسیت (مثلاً با استفاده از آینه‌هایی بافاصله کانونی طولانی‌تر) و محدودیت‌های عملی مانند هزینه، ابعاد سامانه و اثرات نوری مانند پراش به‌دقت توازن برقرار شود.



شکل ۱۱: کاهش کیفیت به‌دلیل وجود پراش[۱].

پراش می‌تواند در بخش آزمون منجر به ایجاد نقص‌هایی مانند حفره در تصویر شلیرن شود؛ اما در اکثر موارد این نقص‌ها یا نادیده گرفته می‌شوند یا توسط الگوریتم‌های پردازش تصویر حذف و ترمیم می‌گردند. در واقع، نرم‌افزارهای دیجیتال امروزی با به‌کارگیری روش‌هایی همچون تشخیص لبه، هموارسازی[۱]، تشدید[۲] و اصلاح تصویر، کمک می‌کنند تا نقص‌های ناشی از پراش از بین برود و تصویر نهایی با کنتراست بالاتر و حساسیت مطلوب‌تر ارائه شود.

این بهبود در کنتراست به نوبه خود حساسیت سامانه شلیرن را افزایش می‌دهد، چرا که تغییرات جزئی در زاویه انحراف پرتوها و اثرات چگالی در تصویر واضح‌تر نمایان می‌شوند. در محیط‌های آزمایشگاهی و کاربردهای دقیق نوری، حذف یا کاهش اثر پراش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا کمک می‌کند تا اطلاعات دقیق‌تری از پدیده‌های دینامیکی و تغییرات چگالی محیط به دست آید.

---

[۱] smoothing

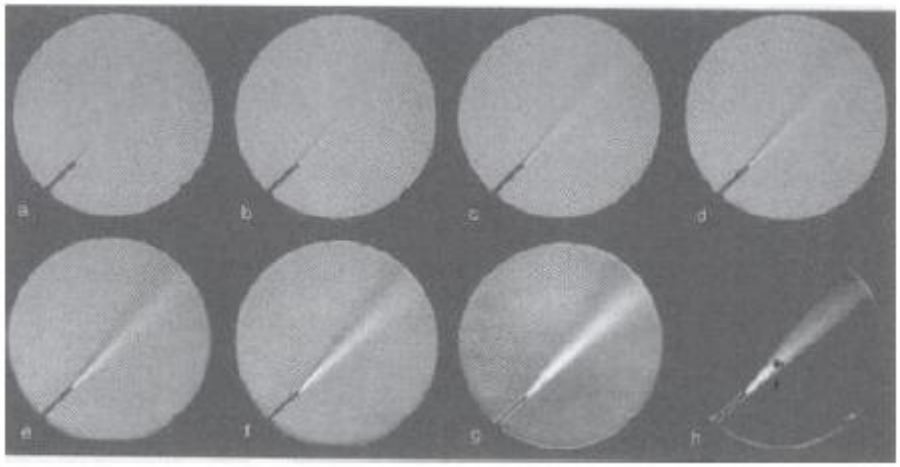
[۲] enhancement

۳-۲-۴ محدوده‌ی اندازه‌گیری

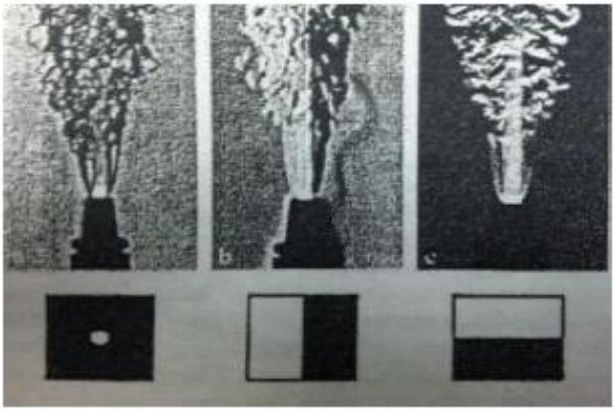
در سامانه شلیرن، محدوده‌ی اندازه‌گیری در واقع همان محدوده‌ای از روشنایی است که تغییرات چگالی در بخش آزمون را بر روی تصویر منعکس می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، میزان بازتاب یا قطع جریان پرتوهای نور از بخش آزمون توسط لبه تیغه تعیین‌کننده‌ی محدوده‌ی اندازه‌گیری است.

وقتی لبه تیغه تنها ۰٪ از تصویر را قطع کند، به این معناست که تیغه عملاً از تصویر خارج شده است؛ در مقابل، زمانی که تیغه تصویر به طور کامل (۱۰۰٪ قطع) مسدود می‌شود، شرایط بسیار متفاوتی ایجاد می‌گردد. در حالت ۵۰٪ قطع، نواحی تاریک و روشن به طور مساوی در تصویر حاضر می‌شوند که تعادل خوبی ایجاد می‌کند، ولی برای رسیدن به حداکثر حساسیت یعنی توانایی ثبت دقیق تغییرات اندک در چگالی با ۹۰٪ قطع جریان اتفاق می‌افتد.

این تناسب نشان می‌دهد که حساسیت تصویر و محدوده‌ی اندازه‌گیری در یک نسبت عکس نسبت یکدیگر قرار دارند؛ وقتی حساسیت افزایش می‌یابد (با قطع جریان بیشتر)، محدوده‌ی اندازه‌گیری کاهش پیدا می‌کند و بالعکس. همچنین، لبه تیغه پرتوهای نوری را در سه حالت جهت (مثلاً نقطه‌ای، عمودی و افقی) قطع می‌کند؛ این تغییر جهت و نوع قطع جریان، مستقیماً بر الگوی نهایی تصویر تأثیر می‌گذارد. ازاین‌رو، انتخاب درست نحوه‌ی قرارگیری لبه تیغه نه‌تنها تعیین‌کننده‌ی تنظیمات حساسیت و محدوده‌ی اندازه‌گیری است، بلکه برای به‌دست‌آوردن تصویری بهینه از سامانه شلیرن، اهمیت فراوانی دارد[۱].



شکل ۱۲: محدوده‌ی اندازه‌گیری جت پاشش [۱].



شکل ۱۳: نحوه قرار گرفتن لبه‌ی تیغه [۱].

۴-۲-۴ وضوح تصویر

وضوح تصویر در سامانه‌های شلیرن به توانایی نمایش جزئیات تصویر مربوط می‌شود. این وضوح معمولاً با تعداد خطوط قابل‌تفکیک در هر میلیمتر (lines/mm) تعریف می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر، هر چه تعداد خطوط در هر میلیمتر بیشتر باشد، تصویر قدرت تفکیک بهتری دارد. در بسیاری از سامانه‌های شلیرن، مقدار وضوح بین ۱۲ تا ۳۲ خط بر میلیمتر به دست می‌آید. ازآنجاکه هدف اصلی سامانه‌های شلیرن، نشان‌دادن تغییرات چگالی یا شیب‌های شاخص شکست از طریق تغییرات در شدت نور (کنتراست) است، وضوح تصویر به‌عنوان معیاری که بر توانایی نمایش جزئیات دقیق تأکید دارد، در مقایسه با حساسیت (توان تشخیص تغییرات اندک) یا محدوده اندازه‌گیری (محدوده‌ای از تغییرات روشنایی که قابل ثبت است) اهمیت کمتری پیدا می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، سامانه‌های شلیرن طوری طراحی می‌شوند که حتی با وضوحی نسبتاً محدود، بتوانند تغییرات جزئی در شاخص شکست و جابه‌جایی پرتوها را به‌خوبی تشخیص دهند.

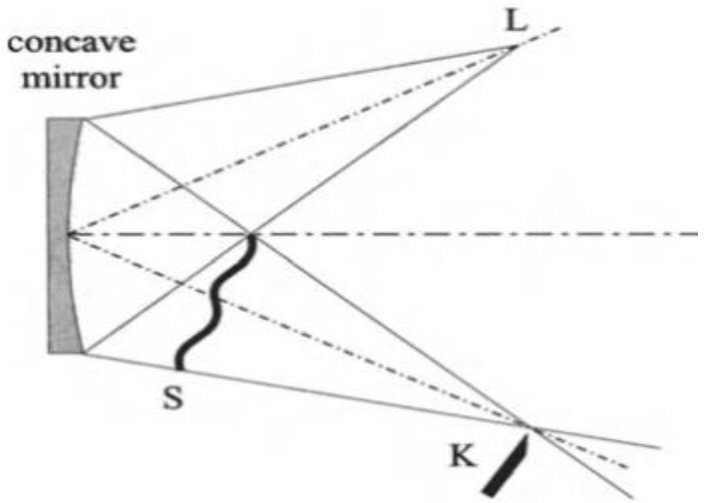
۴-۴ کاربرد روش شلیرن

آرایش نوری فن شلیرن همان‌طور که در شکل ۹ نشان‌داده‌شده، تنها یکی از چندین امکان موجود است. اگرچه اصل نوری پایه همیشه یکسان است، اما چهار آرایش نوری اصلی با جهت‌گیری عملی را می‌توان تشخیص داد که هر کدام کم‌وبیش برای یک کاربرد خاص مناسب هستند. به‌جای عدسی شیئی O در شکل ۹ که شامل یک عدسی جمع‌آوری‌کننده بافاصله کانونی بلند است، می‌توان از آرایش‌هایی با موارد زیر استفاده کرد:

- دو عدسی جمع‌آوری‌کننده با یک پرتو نور موازی در بین آنها،
- یک آینه مقعر (شکل ۱۱ .S)
- دو آینه مقعر با یک پرتو نور موازی در بین آنها (شکل S.۱۳)

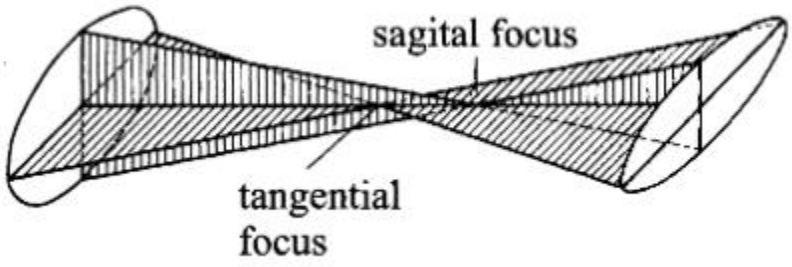
مزیت چیدمان‌هایی که تنها یک جزء نوری دارند، جمع‌وجور بودن آنهاست، اما فقط در صورتی قابل‌استفاده هستند که حجم اندازه‌گیری نزدیک به عدسی جمع‌آوری‌کننده یا آینه مقعر باشد. هنگام استفاده از دو جزء نوری، حجم اندازه‌گیری را می‌توان در هر موقعیت‌محوری پرتو نور موازی قرارداد. به‌طورکلی، هنگام استفاده از عدسی‌ها یا آینه‌ها، تفاوتی وجود ندارد.

بااین‌وجود، شایان‌ذکر است که برای کاربردهایی با حجم اندازه‌گیری بزرگ‌تر، تهیه آینه‌هایی با بالاترین کیفیت، در مقایسه با عدسی‌های صرفاً مناسب، آسان‌تر و ارزان‌تر است تا از اشتباهات انحراف یا شلیرن از شیشه عدسی جلوگیری شود. استفاده از تنها یک آینه مقعر منجر به دو چیدمان ممکن می‌شود. چیدمان نوری می‌تواند به‌گونه‌ای ساخته شود که پرتو نور یک یا دو بار از شلیرن عبور کند. در حالت اول، منبع نور خارج از محور نوری آینه مقعر است (شکل ۱۱).



شکل ۱۴: چیدمان نوری

باتوجه‌به این الزام که شلیرن باید تاحدامکان به آینه نزدیک باشد، کاربرد عملی این چیدمان محدود است. علاوه بر این، روشنایی آینه از کنار منجر به خطاهای آستیگماتیک می‌شود: دونقطه کانونی از دولایه اصلی سامانه سرچشمه می‌گیرند. با فرض اینکه در شکل ۱۱ لایه کششی، لایه مماسی و عمود بر آن، لایه سهمی شکل باشد، دونقطه کانونی همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان‌داده‌شده است، رخ می‌دهند.

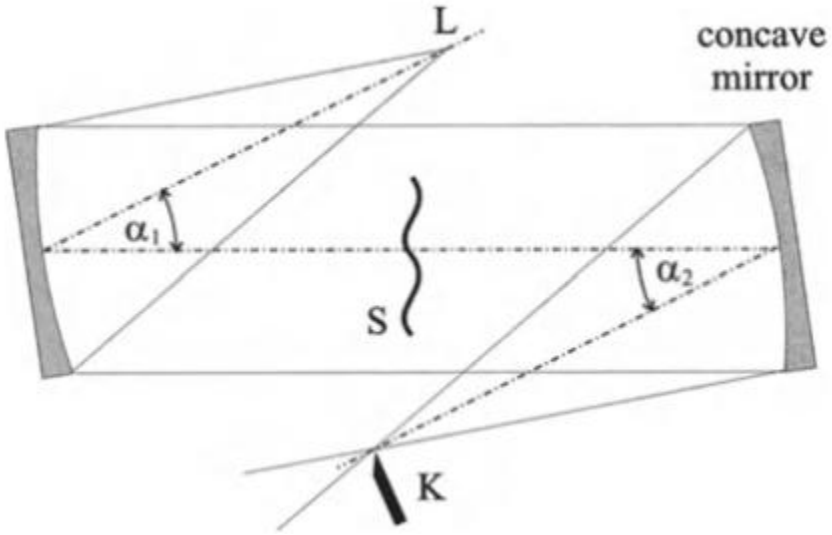


شکل ۱۵: نقطه کانونی مماسی و سهموی، که از اعمال آینه‌های مقعر ناشی می‌شود.

بسته به تراز لبه شلیرن (تراز در شکل ۱۱ عمودی است)، باید در نقطه کانونی مماسی یا سهموی باشد. با استفاده از یک زاویه کوچک بین پرتوهای نور ورودی و خروجی (با استفاده از فاصله کانونی زیاد آینه مقعر)، فاصله بین دونقطه کانونی را می‌توان به حداقل رساند. برای افزایش حساسیت چیدمان شلیرن با یک آینه مقعر، پرتو نور

می‌تواند دو بار یا حتی بیشتر از شلیرن عبور کند. این امر را می‌توان با روشی به نام "چیدمان هم‌زمانی" که در آن منبع نور روی محور نوری آینه مقعر قرار دارد، محقق کرد. این چیدمان فقط باید برای انحرافات کوچک اعمال شود. در انحرافات بزرگ‌تر، پرتو نور منعکس شده ممکن است از شلیرن در موقعیت متفاوتی عبور کند؛ بنابراین، تفسیر این تصاویر بسیار دشوار است؛ زیرا زاویه انحراف پرتو دیگر به موقعیت مربوطه روی شلیرن بستگی ندارد. چیدمان به‌اصطلاح "Z" که شامل دو آینه مقعر است (شکل S.۱۳) در مقایسه با چیدمان با دو عدسی جمع‌کننده، سازگاری خوبی بین فشردگی چیدمان و انعطاف‌پذیری بالا است. خطاهای آستیگماتیکی که هنگام استفاده از یک آینه مقعر ظاهر می‌شوند، در صورتی جبران می‌شوند که فاصله کانونی دو آینه مقعر و زوایای α_1 و α_2 بین نور ورودی و خروجی یکسان باشند و منبع نور در طرف مقابل حجم اندازه‌گیری از لبه شلیرن قرار داشته باشد.

جهت نور ورودی و خروجی در آینه دوم باید خلاف جهت نور در آینه اول باشد. در مواردی که از یک آینه سطحی در پرتو نور موازی برای تغییر جهت آن استفاده می‌شود، جهت نور ورودی و خروجی در هر دو آینه باید یکسان باشد [۳٦].



شکل ۱۶:چیدمان نوری با دو آینه مقعر، چیدمان Z.

۴-۴-۱ منبع نور

انتخاب درست منبع نور، ارتباط زیادی باکیفیت اندازه‌گیری‌ها و حساسیت کل مجموعه دارد. به‌طورکلی، حساسیت با کاهش طول‌موج نور افزایش می‌یابد. آرگون - یون و لامپ‌های قوسی مشابه، تنها برای تعداد محدودی از کاربردها با گرادیان‌های بالا قابل‌استفاده هستند، زیرا الزامات یک منبع نور با وسعت محدود و روشنایی همگن برآورده نمی‌شود. در بسیاری از موارد، لازم است یک تصویر میانی از منبع نور ایجاد شود و اندازه آن با یک دیافراگم مناسب محدود شود. به‌طورکلی، لامپ‌های تخلیه جیوه و سدیم و سایر لامپ‌های قوسی، منابع نوری مناسبی برای استفاده در اندازه‌گیری‌های شلیرن هستند.

۴-۴-۲ لبه شلیرن

دو نوع مختلف از لبه‌های شلیرن قابل‌تشخیص هستند. اگر انحرافات کوچک باشند، بهترین انتخاب استفاده از لبه شلیرن است که می‌تواند برای منابع نور مستطیلی به‌صورت لبه چاقویی یا در صورت استفاده از منبع نور دایره‌ای به‌صورت روزنه گرد باشد. مورد دوم علاوه بر این، امکان تجسم گرادیان‌ها در تمام جهات در حجم اندازه‌گیری (بدون تمایز جهات) را فراهم می‌کند، درحالی‌که استفاده از لبه چاقویی، چیدمان نوری را به تجسم گرادیان‌ها فقط در یک‌جهت محدود می‌کند. برای کیفیت گرادیان‌های تجسم شده ضروری است که لبه شلیرن درست در نقطه کانونی آینه یا عدسی قرار داشته باشد.

موقعیت دقیق لبه شلیرن را می‌توان با اعمال روش زیر پیدا کرد:

پس از تعیین موقعیت تقریبی، لبه شلیرن ازیک‌طرف به مسیر پرتو منتقل می‌شود. اگر تصویر روی صفحه از همان سمتی که لبه شلیرن به مسیر پرتو منتقل می‌شود، تیره‌تر شود، لبه شلیرن باید از صفحه دور شود. اگر لبه شلیرن خیلی نزدیک به اپتیک شلیرن باشد، تیرگی معکوس رخ می‌دهد. موقعیت دقیق در صورتی پیدا می‌شود که تصویر روی صفحه‌نمایش با حرکت لبه شلیرن به سمت پرتو نور، به طور یکنواخت تیره‌تر شود. اگر گرادیان‌ها قوی‌تر باشند، می‌توان از یک کلید خاکستری یا یک‌تیغه رنگی به‌جای لبه شلیرن استفاده کرد. مقدار خاکستری روی تصویر یا رنگ به ترتیب، تعیین قدرت نسبی و جهت گرادیان در حجم اندازه‌گیری را تسهیل می‌کند. شایان یادآوری است که انحراف پرتوهای نور تابعی از فاصله کانونی آینه مقعر یا عدسی جمع‌آوری‌کننده است. پرتو نوری که با زاویه ε در شلیرن منحرف می‌شود، باعث انحراف در لبه شلیرن a' به شرح زیر می‌شود:

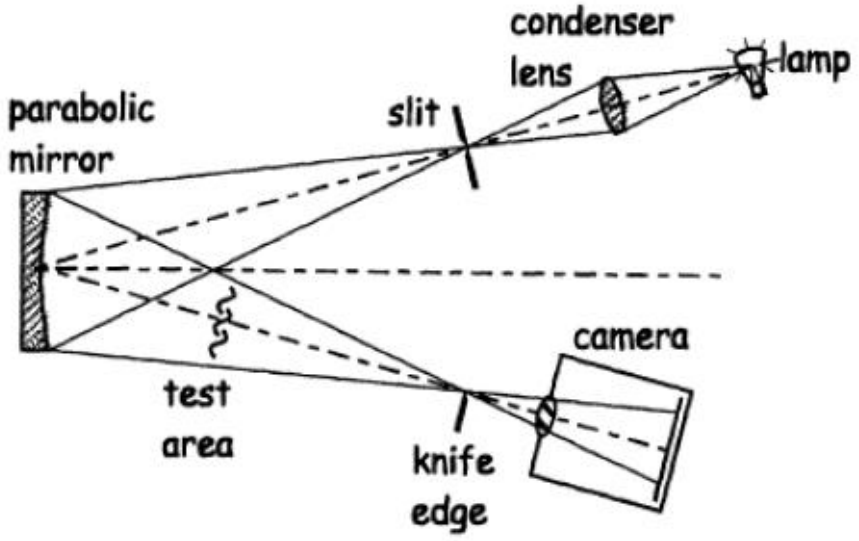
$$a' = \varepsilon f \qquad (۱۷)$$

بافاصله کانونی f آینه مقعر یا عدسی جمع‌کننده، معادله ۱۷ فقط برای یک چیدمان نوری با پرتو نور موازی معتبر است. انحراف a به موقعیت شیلر محوری در پرتو نور موازی بستگی ندارد.

۵- تصویربرداری شلیرن z شکل

پیکربندی نوع Z مزایای خود را از محل قرارگیری آینه‌ها می‌گیرد؛ زاویه انحراف θ تضمین می‌کند که هیچ انحرافی در سامانه، مانند کما یا آستیگماتیسم، وجود نخواهد داشت (آینه اول منفی آینه دوم است). انحراف آینه سهموی با θ و با ($f/n.$) افزایش می‌یابد. زاویه انحراف باید بسیار کوچک باشد، به خصوص در پیکربندی تک آینه‌ای، تا از تقاطع دوگانه جسم با نور جلوگیری شود: اولاً، در مسیر نور از منبع تا آینه و ثانیاً از آینه تا دوربین.

در پیکربندی تک آینه‌ای، مهم‌ترین مشکل، محل قرارگیری جسم مورد مشاهده است (شکل ۱۷). اگر آینه قطر کمی داشته باشد، ناحیه آزمایش با محدودیت‌های شدیدی روبرو خواهد شد و جلوگیری از خطای فوق‌الذکر را بسیار دشوار می‌کند. این خطا، همراه با انحراف آینه، پیکربندی تک آینه‌ای را به‌عنوان پیکربندی مناسب برای انجام آزمایش‌ها مستثنی می‌کند. حساس‌ترین پیکربندی، پیکربندی نوع Z است.



شکل ۱۷: پیکربندی تک آینه‌ای خارج از محور.

در پیکربندی نوع Z، اگر فاصله بین آینه‌ها کمتر از $2f_2$ باشد، همین اتفاق می‌تواند رخ دهد. آینه‌های سهموی مورداستفاده در شلیرن فاصله کانونی مؤثر زیادی دارند که خطر ناحیه آزمایش بسیار کوچک را از بین می‌برد و

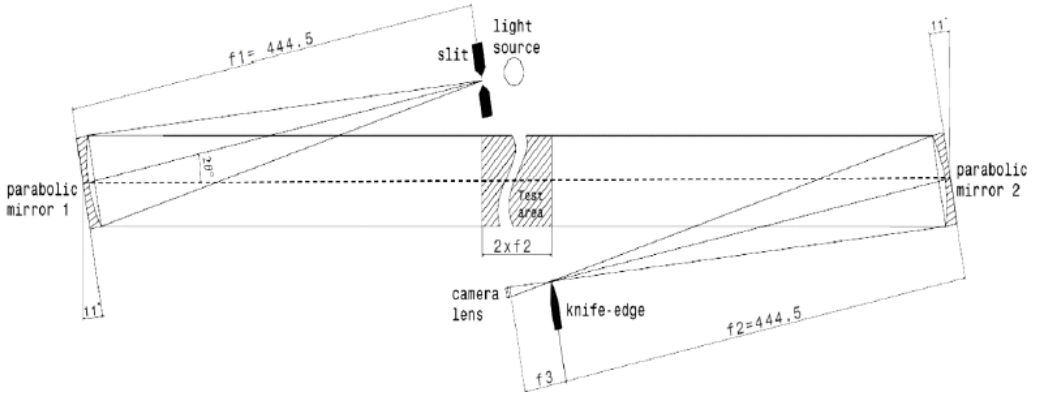
حساسیت را افزایش می‌دهد. فاصله بین آینه‌ها می‌تواند به اندازه نیاز آزمایش باشد، مادامی که آینه‌ها به طور صحیح تراز شده باشند. مزیت دیگر آینه‌های سهموی، میدان دید بزرگ است.

فن تجسم شلیرن از آینه‌های آبکاری شده با آلومینیوم استفاده می‌کند، زیرا در طیف نور مرئی ساطع می‌شود و با طیف منابع نور مطابقت دارد. گزینه‌های دیگر ممکن است برای این موضوع مناسب نباشند، مانند آینه‌های آبکاری شده با طلا که فقط در طیف IR مفید هستند.

بر اساس مقیاس آزمایش‌ها، می‌توان قطر آینه‌های سهموی مورداستفاده را نیز انتخاب کرد. به‌عنوان‌مثال، سایه‌نگاری الماس شوک که قبلاً انجام شده، فقط در فاصله چند میلی‌متر پخش می‌شود، بنابراین قطر آینه‌ها می‌تواند چندبرابر بزرگ‌تر از آن باشد. به‌طورکلی، این پیکربندی برای مشاهده اختلالات کوچک استفاده خواهد شد. با درنظرگرفتن این حقایق، باتوجه‌به اینکه آینه‌ها باید آبکاری آلومینیوم شوند، در طیف ۴۰۰-۷۰۰ نانومتر (همانند منبع نور)، بافاصله کانونی کمی بزرگ‌تر و قطر کوچک کار کنند [۳۷].

همان‌طور که ستلز به‌خوبی در کار نمادین خود تصریح می‌کند [۳۸]، سامانه نوع Z شلیرن از مزیت یک منطقه آزمایش بسیار بزرگ (بسیار بزرگ‌تر از $2f_2$) برخوردار است. در این صورت، استفاده از آینه‌های تخت ضروری است تا فضای آزمایشگاهی مورد نیاز برای انجام آزمایش کاهش یابد.

اگرچه، آینه‌های تاشو مگر در موارد اجباری مطلوب نیستند، زیرا حساسیت بالایی به ارتعاشات در سامانه ایجاد می‌کنند، زاویه انحراف بسیار بزرگی ایجاد می‌کنند که باعث افزایش ابیراهی آینه‌ها می‌شود و همچنین ترازکردن سامانه را بسیار دشوار می‌کند. مسیر نوری سامانه شلیرن نوع Z در شکل ۱۸ نشان‌داده‌شده است [۳۷].



شکل ۱۸: پیکربندی نوع Z دو آینه‌ای.

طرح، زاویه شیب آینه برابر با ۱۱ درجه را نشان می‌دهد. این زاویه برای تطبیق بهتر تجهیزات در طرح، اغراق‌آمیز است. معمولاً آینه‌های خارج از محور با زاویه‌ای نه بیشتر از ۳ درجه کج می‌شوند [۳۹]. همچنین، $f_{\#}$ نشان دهنده فاصله کانونی دوربین است که با تغییر عدسی دوربین تغییر می‌کند.

۵-۱ چیدمان آزمایشگاهی سامانه شلیرن دو آینه‌ای نوع Z

در سامانه شلیرن دو آینه‌ای نوع Z هدف اصلی ایجاد یک مسیر نوری به شکل حرف Z است که امکان عبور نور از بخش مورد آزمایش را فراهم سازد و تغییرات اندک در شاخص شکست ناشی از تغییرات چگالی یا دما را به‌صورت کنتراست در تصویر نهایی آشکار کند. چیدمان آزمایشی سامانه شلیرن نوع Z با دو آینه، با پیروی از جنبه‌های اساسی اپتیک و فیزیک شکست انجام می‌شود. درک اصول اولیه اپتیک فوریه به ویژه در چیدمان سامانه شلیرن مفید است.

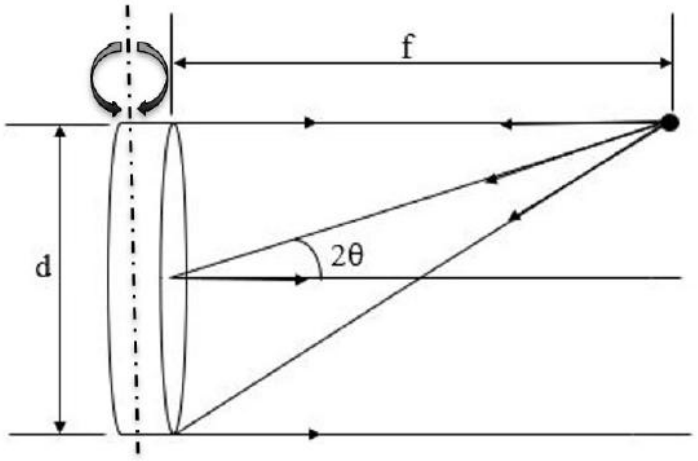
پردازشگر نوری فوریه با یک منبع نور نقطه‌ای همدوس که به سمت عدسی اول که در فاصله یک فاصله کانونی (f) از منبع نور نقطه‌ای قرار دارد، هدایت می‌شود، شروع می‌شود. سپس عدسی اول یک پرتو موازی تولید می‌کند که به یک جبهه موج مسطح اشاره دارد که توسط عدسی دوم که در فاصله $2f$ از عدسی اول قرار دارد، به کانون آورده می‌شود. فضای بین دو عدسی، ناحیه آزمایشی است که در آن اختلالات خاصی ایجاد می‌شود. این اختلال در تصویربرداری شلیرن می‌تواند ستون حرارتی یک شمع در حال سوختن، جریان کم منبسط شده از طریق نازل یا برخی پدیده‌های انتقال حرارت باشد. نوری که توسط عدسی دوم به کانون آورده می‌شود، چیزی را تولید می‌کند که طیف فرکانس فضایی فوریه نامیده می‌شود. اگر یک پدیده جریان خاص باعث ایجاد گرادیان چگالی در ناحیه آزمایش شود، می‌توان طیفی از فرکانس‌های پایین‌تر و بالاتر را به دست آورد و کاری که تکنیک شلیرن انجام می‌دهد، اساساً کوتاه کردن آن بخش از طیف است. معمولاً نیمی از طیف فرکانس فضایی فوریه مسدود می‌شود و در نتیجه یک تصویر رگه حساس در صفحه خروجی ایجاد می‌شود. در عمل، یک‌تیغه نازک یا یک فیلتر رنگی به‌خوبی کار می‌کند. در سامانه شلیرن نوع Z، لنزها با آینه‌ها جایگزین می‌شوند و جهت‌گیری به جای یک الگوی خطی، شکل Z را تقلید می‌کند. علاوه بر این، زاویه خاصی بین منبع نور و آینه شلیرن اول و بین آینه شلیرن دوم و لبه چاقو حفظ می‌شود. سایر عامل‌ها مانند پردازنده نوری فوریه حفظ می‌شوند [٤٠]. در چیدمان سامانه شلیرن نوع Z حداقل فاصله بین دو آینه باید $2f$ [۳۹] باشد.

۵-۲ زاویه شیب آینه

بر اساس این فرض که کانون‌های آینه‌های شلیرن با لبه انتهایی پرتو موازی که به آن برخورد می‌کند، مطابق شکل ۱۹، منطبق هستند، زاویه بین پرتو ورودی و خروجی به‌صورت زیر داده می‌شود:

$$\tan(۲\theta) = \frac{d}{۲f} \qquad (۱۸)$$

که در آن d قطر آینه و f فاصله کانونی آینه است. با جاگذاری مقادیر قطر (d) و فاصله کانونی (f) آینه در معادله ۱۷، زاویه بین پرتو ورودی و خروجی به دست می‌آید.



شکل ۱۹: شرایطی که کانون آینه‌ها دقیقاً بر لبه‌های پرتو موازی منطبق باشد.

۵-۳ شدت آستیگماتیسم

در سامانه شلیرن نوع z، تقارن آینه‌های روی محور مختل می‌شود و این منجر به انحرافی به نام آستیگماتیسم می‌شود. کلمه آستیگماتیسم ترکیبی از کلمات یونانی به معنای «بدون» و «علامت» یا «نقطه» است که اساساً به معنای «غیر نقطه‌ای» یا عدم تمرکز یک نقطه بر روی یک نقطه است. این به دلیل چرخش خارج از محور آینه‌های شلیرن ایجاد می‌شود که منجر به تفاوت در طول مسیر در امتداد خط مرکزی نوری و حاشیه آینه‌های شلیرن می‌شود. این تفاوت در طول مسیر به‌عنوان شدت آستیگماتیسم (Δf) در نظر گرفته می‌شود، همانطور که در شکل

۲۰ نشان‌داده‌شده است. صرف نظر از تلاش‌های دشوار، حذف کامل آستیگماتیسم از هر سامانه آینه‌ای خارج از محور، از جمله سامانه تصویربرداری شلیرن نوع Z، تقریباً غیرممکن است. یک فرمول هندسی برای یافتن شدت آستیگماتیسم در یک سامانه تصویربرداری شلیرن نوع Z وجود دارد [۳۹]:

$$\Delta f = f.\frac{\sin^2\theta}{cos\theta} \qquad (۱۹)$$

که در آن θ زاویه شیب آینه است. برای زاویه شیب آینه کوچک، معادله ۱۹ به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$\Delta f = \frac{d^2}{4f} \qquad (۲۰)$$

که در آن d قطر آینه است. هرچه مقدار Δf برای آینه‌ای بافاصله کانونی f و زاویه خارج از محور θ مشخص، کوچکتر باشد، شدت آستیگماتیسم کمتر خواهد بود.

در ادامه به طور خلاصه اجزای اصلی و مسیر نوری سامانه شلیرن نوع Z با دو آینه را توصیف می‌کنیم.

منبع نور و شکاف

منبع نور قوی (مانند لامپ Xenon)پس از عبور از شکاف نوری به سمت آینه اول هدایت می‌شود. شکاف با تولید یک منبع نقطه‌ای یا خطی کوچک به تفکیک بهتر جزئیات کمک می‌کند.

آینه اول (آینه موازی‌ساز)

این آینه سهموی یا پارابولیک نور ورودی را به پرتوهای موازی تبدیل می‌کند؛ به عبارتی نور پس از آینه اول به‌صورت موازی منتشر می‌شود. این امر تضمین می‌کند که پرتوها در بخش آزمون بدون واگرایی یا واهمگی زیاد حرکت کنند.

بخش آزمون

در این گام، نور به داخل جریان یا محیط مورد آزمایش وارد می‌شود. هر گونه تغییر در چگالی یا دما، موجب تغییر شاخص شکست و در نتیجه انحراف پرتوهای نور می‌گردد.

آینه دوم (آینه متمرکزکننده)

پرتوهای موازی پس از عبور از بخش آزمون وارد آینه دوم می‌شوند که وظیفه‌ی متمرکزسازی آن‌ها به یک نقطه کانونی را بر عهده دارد. این نقطه کانونی محل قرارگیری تیغه قطع‌کننده است.

تیغه نازک و تصویربرداری

در صفحه‌ی کانونی آینه دوم، یک‌تیغه نازک قرار می‌گیرد. تیغه، پرتوهای تغییر جهت‌یافته به واسطه تغییرات شاخص شکست را قطع می‌کند؛ به‌طوری‌که تنها نور مستقیم و غیر منحرف به حسگر یا دوربین می‌رسد. نتیجه این پردازش، تصویر نهایی با کنتراست بالا و نمایش تغییرات دینامیک در جریان است.

۵-٤ مزایا و محدودیت‌های سامانه تصویربرداری شلیرن Z شکل

۵-۴-۱ مزایا

طراحی ساده‌تر با استفاده از دو آینه که عیب‌یابی و تنظیم هم‌محوری را آسان‌تر می‌کند.

کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری نسبت به سامانه‌های پیچیده‌تر.

مناسب‌بودن برای مطالعات آزمایشگاهی که فضای کافی برای قراردادن بخش آزمون فراهم می‌شود.

۵-۴-۲ محدودیت‌ها

بسته به ابعاد ناحیه مورد آزمایش و کیفیت آینه‌ها، ممکن است محدوده اندازه‌گیری و حساسیت سامانه نسبت به تغییرات بسیار اندک محدود باشد.

همانند سایر سامانه‌های شلیرن، نیاز به تنظیمات دقیق جهت جلوگیری از اثرات نامطلوب پراش دارد.

در برخی موارد، وضوح تصویر ممکن است کمتر از سامانه‌های چندآینه‌ای باشد که باوجود حساسیت بالا در تشخیص تغییرات شاخص شکست، جزئیات ریز تصویر نسبتاً کمتر نمایش داده می‌شود.

۵-۵ کاربردها و نکات عملی

سامانه‌های شلیرن دو آینه‌ای نوع Z به دلیل سادگی و کارایی مطلوب، در مطالعات جریان‌های گاز (به‌ویژه در دالانه‌های باد و آزمایش‌های پویایی‌شناسی سیالات) کاربرد فراوانی دارند. تنظیم دقیق تیغه، انتخاب آینه‌های با مشخصات مناسب (طول کانونی و قطر مطلوب) و کالیبراسیون دقیق سامانه از مهم‌ترین مراحل در بهینه‌سازی

عملکرد این سامانه به شمار می‌آید. همچنین، استفاده از دوربین‌های دیجیتال مدرن و الگوریتم‌های پردازش تصویر می‌تواند به بهبود کنتراست و حذف نوفه‌های ناشی از پراش کمک کند.

این پیکربندی به محققان اجازه می‌دهد تا پدیده‌های ناپیدا در سیالات را به‌صورت تصویری مشاهده و تحلیل کنند؛ از جمله مشاهده موج‌های ضربه‌ای، تغییرات گرادیان حرارتی و سایر پدیده‌های دینامیک سیالات که در شرایط آزمایشگاهی مهم هستند.

٦- راه‌اندازی سامانه ساده‌ی شلیرن

در ادامه می‌خواهیم روش‌های راه‌اندازی یک سامانه تصویر برداری ساده شلیرن را بررسی کنیم. آگوست توپلر در مورد سامانه شلیرن در یکی از مقالات خود آورده است: کار با این دستگاه در نگاه اول ممکن است ناخوشایند به نظر برسد، اما در عمل بسیار آسان است [٤١].

انواع مختلفی از این سیستم نوری به عنوان پروژه‌های علمی توسط چندین نسل ساخته شده‌اند.

۶-۱ مقدمه و هدف

۶-۲ طراحی سامانه شلیرن

دو نوع اصلی سامانه شلیرن وجود دارند:

- ✓ **سامانه مبتنی بر لنز** :ساده‌تر برای تنظیم، اما گران‌تر.
- ✓ **سامانه مبتنی بر آینه** :اقتصادی‌تر اما نیازمند تنظیمات دقیق‌تر.

در این بخش، به انتخاب یک سامانه نوع Z پرداخته که از دو آینه کوچک تلسکوپی (به قطر حدود ۱۰۸ میلی‌متر و با رتبه نوری مناسب) استفاده می‌کند. مزیت اصلی این طراحی، سادگی در تنظیم اپتیک و فراهم کردن قابلیت‌های عملی برای یادگیری اصول ترازکاری و هم‌ترازی نوری است.

- **تراز نوری :** تراز کردن اجزای اپتیک مانند آینه‌ها، عدسی‌های کانونی، تیغه نازک که در یک صفحه مرکزی یکپارچه قرار گیرند.

زاویه‌های ورودی و خروجی :با استفاده از محاسبات مثلثاتی، تنظیم زوایای مناسب برای نور ورودی و خروجی پیشنهاد شده است تا عملکرد بهینه سیستم در محدوده‌های عملی حفظ شود .برای داشتن عملکرد صحیح، حداقل زاویه برش آینه‌ها باید حدود **۳۴ درجه** باشد تا بازتاب‌ها به‌درستی کنترل شوند. همچنین، طول کلی سامانه باید **۱.۵ متر** باشد تا فضای کاری مناسبی ایجاد کند.

- **انتخاب عدسی‌ها و آینه‌ها :**انتخاب اجزای نوری با توجه به کیفیت ساخت و هزینه‌های موجود توضیح داده شده است؛ مانند استفاده از عدسی‌هایی با طول کانونی ۲۰۶ میلی‌متر برای تنظیم تصویر شلیرن و بهبود وضوح در آزمایش‌های مشاهده جریان‌های هوایی.

۶-۳ بررسی هزینه‌ها

بخش بعدی به برآورد هزینه‌های ساخت سامانه اختصاص دارد:

- **اجزای اصلی :**قیمت اولیه برای اجزای اصلی همچون آینه‌های کوچک تلسکوپی و عدسی‌ها باید با توجه به نوع آزمایش برآورد شوند.
- **منبع نوری :**استفاده از چراغ‌های هالوژن یا ذرّات چراغی اقتصادی به‌عنوان منبع نور پیشنهاد شده است که هزینه کمی دارند.
- **قطعات مکانیکی و نصب :**هزینه‌های مربوط به میز کار و تجهیزات اتصالات اپتیکی (مانند قفل‌های پیچ دستی و سراشیبی‌های تنظیم ارتفاع) ممکن است بیشترین بخش هزینه نهایی را تشکیل دهند؛ اگر این قطعات به‌صورت آماده تهیه شوند، ممکن است هزینه‌ها بیشتر شوند. در عوض، استفاده از ساخت قطعات به‌صورت کارگاهی می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد. همچنین راه‌هایی برای کاهش هزینه‌های مربوط به تجهیزات، مانند ساختن پایه‌های اپتیکی به‌جای خرید تجاری آن‌ها، پیشنهاد می‌شود.

۶-۴ انتخاب محل نصب سامانه

برای موفقیت در تنظیم سامانه، انتخاب یک میز محکم و یک اتاق مناسب اهمیت زیادی دارد. نکات کلیدی مطرح شده عبارتند از:

میز یا میز کار: برای داشتن سطح ثابت و بدون لرزش میز محکم و تراز ضروری است. میز باید فضای کافی برای قرارگیری سیستم به طول ۱.۵ متر داشته باشد؛ هرچند که ابعاد بزرگ‌تر، راحتی بیشتر در تنظیم اجزای نوری فراهم می‌کند.

- **محل نصب اتاق :**یک اتاق بدون نور پس‌زمینه و دارای تهویه‌ی کنترل‌شده، مانند زیرزمین، پیشنهاد می‌شود. این امر کمک می‌کند تا اثرات نویزهای نوری و هوایی که بر عملکرد سیستم تأثیرگذار هستند، به حداقل برسند.
- **توجه به نوسانات محیط :**وجود افراد، جریان‌های هوایی ناخواسته یا تغییرات دما به وضوح تصویر شلیرن آسیب می‌زند؛ لذا آرامش محیط از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۶-۵ تنظیم و تراز اپتیک

تنظیم دقیق اجزای اپتیکی سامانه، بر عملکرد صاف تصویر شلیرن تأثیر زیادی دارد. مراحل اصلی به‌طور خلاصه عبارتند از:

- **تراز کردن آینه‌ها :**با استفاده از یک الگوی مرجعی (مانند یک دایره ۱۰۸ میکرونی بر روی کاغذ سفید) زمان تنظیم اولیه انجام می‌شود.
- **تنظیم تیغه نازک :**جایگاه دقیق لبه‌ی تیغ[1] باید در محور نوری قرار گیرد تا هنگام جابجایی در نور، تغییرات ظریف در روشنایی به‌خوبی نشان داده شود.
- **تنظیم فاصله‌ها :**فاصله بین اجزای مختلف) آینه‌ها، لنزها، تیغه نازک و صفحه مشاهده (باید به دقت اندازه‌گیری و تنظیم شود تا تصویر نهایی با کیفیت باشد.

[1] Blade

۶-۶ عیب‌یابی و مشکلات رایج

- **تنظیمات ناهماهنگ :**عدم تراز دقیق اجزای نوری می‌تواند منجر به یکنواخت نبودن روشنایی و ایجاد مشکلاتی مانند آستیگماتیسم شود.
- **تصویر مبهم :**استفاده از لنز نامناسب یا قرارگیری صفحه مشاهده در فاصله نادرست می‌تواند سبب تار شدن تصویر شود. راهکارهای ارائه‌شده شامل استفاده از اشیاء متمرکز (مانند لوله‌های اندازه‌گیری فاصله یا چراغ‌های مخصوص) برای کمک به تنظیم دقیق تصویر است.
- **اثرات منابع نوری گسترده :**در صورتی که منبع نور فراتر از نقطه نوری کوچک باشد، تصویر به صورت مبهم یا دارای حاشیه‌های نامشخص ظاهر می‌شود؛ این پدیده به درستی توضیح داده شده و راهکارهایی برای کاهش اثرات آن ارائه شده است.

۶-۷ ضبط و عکسبرداری از تصاویر شلیرن

ثبت تصاویر شلیرن، یکی از مراحل جذاب پس از تنظیم سامانه است:

- **روش‌های مختلف :**از استفاده از دوربین‌های دیجیتال با لنز قابل جابجایی و یا دوربین‌های ویدئویی بهره برده می‌شود..
- **توصیه‌ها :**استفاده از دوربین‌های حرفه‌ای ۳۵ میلی‌متری یا دوربین‌هایی با قابلیت تنظیم دستی به‌عنوان بهترین راهکار برای ثبت تصاویر با کیفیت بالا مطرح می‌شود.
- **چالش‌های عکسبرداری :**سامانه‌های خودکار در دوربین‌های ارزان قیمت ممکن است به دلیل محدودیت‌های لنز و فاصله کانونی دچار مشکل شوند؛ بنابراین توصیه می‌شود از تجهیزات حرفه‌ای یا تنظیمات دستی استفاده شود.

۶-۸ نتیجه‌گیری و کاربردهای سامانه

اگرچه سامانه ارائه‌شده از نظر هزینه و سادگی به‌عنوان یک نمونه «آموزشی» معرفی می‌شود، اما در عمل می‌تواند نگاهی عمیق به پدیده‌های جریان هوایی، آلودگی‌های گرمایی و دیگر کاربردهای علمی ارائه دهد. علاوه بر این، این سیستم می‌تواند به عنوان نقطه‌ی شروعی برای پروژه‌های پیشرفته‌تر در آزمایشگاه‌های دینامیک سیالات و سایر زمینه‌های علمی مورد استفاده قرار گیرد [۳۹].

منابع

[۱] A. Scheer, H. Kruppke, and R. Heib, *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Medi*, Edit ۱. Springer Science & Business Media, ۲, ۲۰۰۱. doi: ۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-٦٤۲-٥٦٦۸۰-٦.

[۲] A. G. C. Gwyer, "Improvements in the Schlieren method," *J. Sci. Instrum.*, vol. ۱۱, no. ۱, p. ۳۱, ۱۹۳٤, doi: ۱۰,۱۰۸۸/۰۹٥۰-۷٦۷۱/۱۱/۱/۱۱٦.

[۳] H. Richard and M. Raffel, "Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method," *Meas. Sci. Technol.*, vol. ۱۲, no. ۹, pp. ۱٥۷٦–۱٥۸٥, ۲۰۰۱, doi: ۱۰,۱۰۸۸/۰۹٥۷-۰۲۳۳/۱۲/۹/۳۲٥.

[٤] Amrita Mazumdar, "PRINCIPLES AND TECHNIQUES OF SCHLIEREN IMAGING SYSTEMS," *Columbia Univ. Comput. Sci. Tech. Reports*, vol. ۱٤, pp. ۱–۱٦, ۲۰۱۳, doi: ۱۰,۱۱۰۹/NSSMIC.۲۰۱۳,٦۸۲۹۳۳۳.

[٥] G. E. Elsinga, B. W. Van Oudheusden, F. Scarano, and D. W. Watt, "Assessment and application of quantitative schlieren methods: Calibrated color schlieren and background oriented schlieren," *Exp. Fluids*, vol. ۳٦, no. ۲, pp. ۳۰۹–۳۲٥, ۲۰۰٤, doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۳٤۸-۰۰۳-۰۷۲٤-۸.

[٦] G. Meier, "Computerized background-oriented schlieren," *Exp. Fluids*, vol. ۳۳, no. ۱, pp. ۱۸۱–۱۸۷, ۲۰۰۲, doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۳٤۸-۰۰۲-۰٤٥۰-۷.

[۷] G. Wetzstein, R. Raskar, and W. Heidrich, "Hand-held Schlieren photography with light field probes," *2011 IEEE Int. Conf. Comput. Photogr. ICCP 2011*, pp. ۱–۸, ۲۰۱۱, doi: ۱۰,۱۱۰۹/ICCPHOT.۲۰۱۱,٥۷٥۳۱۲۳.

[۸] A. Vogel, I. Apitz, S. Freidank, and R. Dijkink, "Sensitive high-resolution white-light Schlieren technique with a large dynamic range for the investigation of ablation dynamics," *Opt. Lett.*, vol. ۳۱, no. ۱۲, p. ۱۸۱۲, ۲۰۰٦, doi: ۱۰,۱۳٦٤/ol.۳۱,۰۰۱۸۱۲.

[۹] B. Atcheson, W. Heidrich, and I. Ihrke, "An evaluation of optical flow algorithms for background oriented schlieren imaging," *Exp. Fluids*, vol. ٤٦, no. ۳, pp. ٤٦۷–٤۷٦, ۲۰۰۹, doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۳٤۸-۰۰۸-۰٥۷۲-۷.

[۱۰] M. J. Hargather and G. S. Settles, "Natural-background-oriented schlieren imaging," *Exp. Fluids*, vol. ٤۸, no. ۱, pp. ٥۹–٦۸, ۲۰۱۰, doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۳٤۸-۰۰۹-۰۷۰۹-۳.

[۱۱] V. Gopal, J. L. Klosowiak, R. Jaeger, T. Selimkhanov, and M. J. Z. Hartmann,

"Visualizing the invisible: the construction of three low-cost schlieren imaging systems for the undergraduate laboratory," *Eur. J. Phys.*, vol. ٢٩, no. ٣, pp. ٦٠٧–٦١٧, ٢٠٠٨, doi: ١٠,١٠٨٨/٠١٤٣-٠٨٠٧/٢٩/٣/٠٢٠.

[١٢] S. B. Dalziel, G. O. Hughes, and B. R. Sutherland, "Whole-field interaction measurements by `synthetic schlieren'," *Exp. Fluids*, vol. ٢٨, pp. ٣٢٢–٣٣٥, ٢٠٠٠.

[١٣] J. Ojeda-Castañeda, *Optical Shop Testing*, Third., no. November ٢٠٠٦. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ٢٠٠٦. doi: ١٠,١٠٠٢/٩٧٨٠٤٧٠١٣٥٩٧٦.ch٨.

[١٤] P. Krehl and S. Engemann, "August Toepler - The first who visualized shock waves," *Shock Waves*, vol. ٥, no. ١–٢, pp. ١–١٨, ١٩٩٥, doi: ١٠,١٠٠٧/BF٠٢٤٢٥٠٣١.

[١٥] S. Martnez-Martnez, F. Sanchez, V. Bermudez, and J. Manuel, "Liquid Sprays Characteristics in Diesel Engines," in *Fuel Injection*, ٢٠١٠, pp. ١٩–٤٩. doi: ١٠,٥٧٧٢/٩٧٢٤.

[١٦] J. Gao, D. Jiang, and Z. Huang, "Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of ethanol-gasoline blends and gasoline," *Fuel*, vol. ٨٦, no. ١٠–١١, pp. ١٦٤٥–١٦٥٠, ٢٠٠٧, doi: ١٠,١٠١٦/j.fuel.٢٠٠٦,١١,٠١٣.

[١٧] S. H. Bang and C. S. Lee, "Comparison between background oriented Schlieren (BOS) technique and scattering method for the spray characteristics of evaporating oxygenated fuels," *Optik (Stuttg).*, vol. ١٢٤, no. ١٥, pp. ٢١٤٧–٢١٥٠, ٢٠١٣, doi: ١٠,١٠١٦/j.ijleo.٢٠١٢,٠٦,٠٧١.

[١٨] W. Bugden *et al.*, "Design and Construction of a Supersonic Wind Tunnel with Diagnostics," *Worcester Polytech. Institute, JB3-SWT3*, ٢٠١٣.

[١٩] S. M. M. A. Hajiali Mohammadi, D. Honnery, A. Abdullah, "Experimental investigation of the effect of pressure and density ratio on the gaseous spray of the group-hole nozzle," *J. Engine Res.*, vol. ٢٨, pp. ١١–١٩, ٢٠١٢.

[٢٠] C. C. Ting and C. C. Chen, "Detection of gas leakage using microcolor schlieren technique," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. ٤٦, no. ٨, pp. ٢٤٦٧–٢٤٧٢, ٢٠١٣, doi: ١٠,١٠١٦/j.measurement.٢٠١٣,٠٤,٠٧٣.

[٢١] E. Traldi *et al.*, "Schlieren imaging: a powerful tool for atmospheric plasma diagnostic," *EPJ Tech. Instrum.*, vol. ٥, no. ١, pp. ١–٢٣, ٢٠١٨, doi: ١٠,١١٤٠/epjti/s٤٠٤٨٥-٠١٨-٠٠٤٥-١.

[٢٢] L. Li, Y. Tian, X. Deng, H. Zhang, and M. Yang, "Deep reconstruction of

schlieren images for scramjet combustion flow field analysis using FCSD-net with feature completion strategy," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. ١٦٤, no. March, p. ١١٠٣٧١, ٢٠٢٥, doi: ١٠,١٠١٦/j.ast.٢٠٢٥,١١٠٣٧١.

[٢٣] A. You, M. Be, and I. In, "Measuring the Speed of Sound by Schlieren Imaging," *Phys Teach*, vol. ٦٣, no. January ١٩٦٥, pp. ٢٦٦–٢٦٨, ٢٠٢٥.

[٢٤] M. Chen, B. Liu, F. Qin, X. Liu, and B. Zhou, "Physically based simulation of focusing schlieren imaging for a hypersonic boundary layer flow," *Appl. Opt.*, vol. ٦٣, no. ٦, p. A٤٤, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٣٦٤/ao.٥٠٩٦٦٥.

[٢٥] M. Chen, Z. Zhao, Y. Hou, J. Zhu, M. Sun, and B. Zhou, "Evaluation of seedless wavelet-based optical flow velocimetry for schlieren images," *Phys. Fluids*, vol. ٣٦, no. ٧, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٠٦٣/٥,٠٢٠٨٦٩٢.

[٢٦] M. Talaat, K. Barari, X. A. Si, and J. Xi, "Schlieren imaging and video classification of alphabet pronunciations: exploiting phonetic flows for speech recognition and speech therapy," *Vis. Comput. Ind. Biomed. Art*, vol. ٧, no. ١, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١١٨٦/s٤٢٤٩٢-٠٢٤-٠٠١٦٣-w.

[٢٧] X. Zhang *et al.*, "Determination of propellant products by time resolved and spatial distribution LIPS combined with high-speed schlieren imaging," *J. Anal. At. Spectrom.*, vol. ٣٩, no. ٣, pp. ٩٧٤–٩٨١, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٠٣٩/d٣ja٠٠٢٨٣g.

[٢٨] S. Mohsenimehr, S. Wilczek, T. Mussenbrock, and A. von Keudell, "Plasma and Flow Simulation of the Ion Wind in a Surface Barrier Discharge Used for Gas Conversion Benchmarked by Schlieren Imaging," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. ٤٥, no. ١, pp. ٨٥–١١٢, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٠٠٧/s١١٠٩٠-٠٢٤-١٠٥٣٣-٠.

[٢٩] B. Lai *et al.*, "Analysis of high subsonic sweeping jet external flow characteristics and velocity using schlieren visualization and schlieren image velocimetry method," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. ١٦٣, no. August ٢٠٢٤, p. ١١١٣٩٧, ٢٠٢٥, doi: ١٠,١٠١٦/j.expthermflusci.٢٠٢٤,١١١٣٩٧.

[٣٠] Y. J. Wang, Y. P. Zhao, Y. Jin, and K. X. Hou, "Multi-sensor flow state identification and schlieren image generation for supersonic inlet," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. ١٥٨, no. December ٢٠٢٤, p. ١٠٩٨٨٦, ٢٠٢٥, doi: ١٠,١٠١٦/j.ast.٢٠٢٤,١٠٩٨٨٦.

[٣١] C. Ma, Z. S. Qin, J. Y. Song, L. F. Bian, and C. Yang, "A study on the visualization of ultrasound-assisted thawing process of frozen carrots using an in-situ schlieren imaging system," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. ١٠٠,

no. December ٢٠٢٤, ٢٠٢٥, doi: ١٠,١٠١٦/j.ifset.٢٠٢٤,١٠٣٨٩٥.

[٣٢] S. Weerdenburg and A. W. C. Roland Horsten, “Quantitative density retrieval of gas jets for high harmonic generation EUV sources with a compact schlieren imaging system,” *Appl. Opt.*, vol. ٦٤, no. ١٤, pp. ٣٨٧١–٣٨٧٩, ٢٠٢٥.

[٣٣] M. K. Quinn, W. J. Crowther, K. Wood, and K. Kabbabe, “Onboard background-oriented schlieren imaging using consumer-grade hardware,” *Aeronaut. J.*, pp. ٥٨٢–٥٩٢, ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٠١٧/aer.٢٠٢٤,١١٩.

[٣٤] Z. Lin *et al.*, “Holographic focusing schlieren imaging (HFSI) for three-dimensional flow visualization,” *Exp. Fluids*, vol. ٦٦, no. ١, pp. ١–٧, ٢٠٢٥, doi: ١٠,١٠٠٧/s٠٠٣٤٨-٠٢٤-٠٣٩٥١-٥.

[٣٥] A. Guardone, M. Zocca, P. Gajoni, F. Mondonico, and C. C. Conti, “Characteristics-based measurements of supersonic flows from schlieren images,” *Exp. Fluids*, vol. ٦٦, no. ٤, pp. ١–١٩, ٢٠٢٥, doi: ١٠,١٠٠٧/s٠٠٣٤٨-٠٢٥-٠٣٩٥٨-٦.

[٣٦] D.-I. O. F. Franz Mayinger, Oliver Feldmann (auth.), Prof. em. Dr.-Ing. E.h. Franz Mayinger, *Optical Measurements_ Techniques and Applications-Springer-V*. Germany: Springer, ٢٠٠١.

[٣٧] E. Prisacariu, V. Vilag, R. Nicoara, C. Suciu, C. Dobromirescu, and M. Dombrovschi, “Calculating and Setting Up A Schileren System,” *Turbo*, vol. VII, no. ٢, pp. ٢٥–٣٤, ٢٠٢٠.

[٣٨] E. Rathakrishnan, *Measurements , and Experiments and Experiments*. CRC Press, ٢٠٠٧.

[٣٩] G. S. Settles, *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media*. Springer Science \& Business Media, ٢٠٠١.

[٤٠] S. Maharjan, K. Darlami, and L. Poudel, “Design and Setup of Z-type Schlieren Imaging System for Flow Visualization,” pp. ٧٥–٨٢, ٢٠٢٣.

[٤١] A. Töpler, “Optische Studien nach der Methode der Schlierenbeobachtung,” *Ann. Phys.*, vol. ٢٠٧, no. ٦, pp. ١٨٠–٢١٥, ١٨٦٧, doi: ١٠,١٠٠٢/andp.١٨٦٧٢٠٧٠٦٠٣.