

پژوهش‌های جهانی و پژوهش‌های محلی

محمد تقی توسلی

استاد بازنشسته‌ی دانشکده فیزیک دانشگاه تهران



دکتر توسلی
جایزه‌ی
گالیلئو گالیلئی را
دریافت می‌کند.
مردادماه ۱۳۹۰

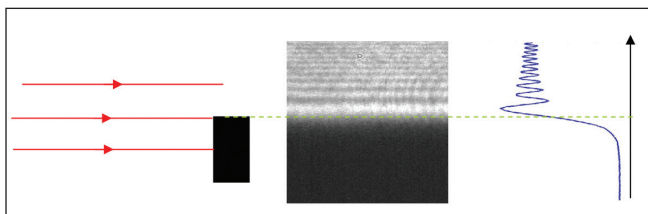
۱- مقدمه

می‌آید. تحقیق محلی برای رفع نیازها در محل صورت می‌گیرد. برخی از تحقیقات، مثل تحقیق برای کنترل تغییرات اقلیم، که مسئله‌ای جهانی‌ست، باید روی عوامل محلی انجام بگیرد ولی پیامدهای جهانی دارد. این نوع تحقیقات محلی جهانی‌اند. تحقیقات محلی بسیار متنوع هستند. برای مثال، ایران به‌طور جدی با کمبود آب مواجه است. بنابراین، پژوهش درباره‌ی تولید آب، جلوگیری از تبخیر آن، هدایت آب باران به سفره‌های زیرزمینی، استفاده‌ی بهینه از سفره‌ها، کار درباره‌ی گیاهان مقاوم به کم‌آبی، بهبود روش‌های آبیاری، و کاهش اتلاف آب همگی تحقیقات محلی هستند که پیامدهای جهانی دارند. برای ما کار درباره‌ی استفاده از انرژی خورشیدی به صورت‌های مختلف، درباره‌ی کاشی و سرامیک، درباره‌ی فرش، درباره‌ی خشک‌بار و... تحقیقات محلی محسوب می‌شود. بدون تردید تحقیق در این زمینه‌ها علاوه بر آن که باعث رونق اقتصادی، ایجاد اشتغال، کاهش آلودگی، ارتقاء سطح فناوری و گسترش فرهنگ علمی در جامعه می‌شود موضوع‌هایی را پیش می‌آورد که اهمیت جهانی خواهد داشت. اما از جمله

موضوع‌های پژوهشی در فیزیک را، به طور عام، به دو دسته‌ی محض و کاربردی می‌توان تقسیم کرد. در پژوهش‌های محض، شناخت پدیده‌های ناشناخته هدف است بدون آن که تصور روشنی از کاربردهای پدیده در نظر باشد. البته این واقعیت را نباید نادیده گرفت که در اغلب موارد برای شناخت پدیده، فناوری جدیدی ابداع می‌شود که کاربردهای متنوعی پیدا می‌کند و این خود یکی از انگیزه‌های عمده‌ی تحقیقات محض است. در پژوهش‌های کاربردی با استفاده از پدیده‌های شناخته‌شده و ناشناخته‌ای که کاربردهای آن قابل پیش‌بینی‌ست امکان ساخت کالا، دستگاه، و ارائه‌ی خدمات هدف تحقیق قرار می‌گیرد. نوع تحقیقات می‌تواند جهانی، ناحیه‌ای و یا محلی باشد و یا چنین به نظر بیاید. برای مثال، گسترش صنایع و خدمات مخابرات به تحقیقات کاربردی نیاز دارد. چون محصولات آن در سراسر جهان مشتری دارد برای خیلی‌ها این نوع تحقیق جهانی محسوب می‌شود. ولی از دید کارکنان شرکت مخابراتی، چون تحقیق را برای رفع نیازهای شرکت و بقای آن در عرصه‌ی رقابت بین‌المللی انجام می‌دهند، تحقیق محلی به حساب

۲-پراش فرنل از پله‌ی فازی ۱-۲ سابقه

بوئل^۴ و هوک^۵ در قرن هفدهم به تداخل نور در تیغه‌ی نازک شفاف توجه کردند[۵]. اما استفاده از تداخل در سنج‌شناسی بعد از آن که مایکلسون تداخل‌سنج خود را در سال ۱۸۸۱ ساخت آغاز شد[۶]. در تداخل‌سنج ضخامت تیغه به‌اختیار قابل تغییر است. این ویژگی امکان می‌دهد تغییرات کمیت‌های فیزیکی قابل تبدیل به تغییر طول و یا فاز اندازه‌گیری و مطالعه شود. همین واقعیت باعث شد که اندازه‌گیری‌های متنوع و دقیق با تداخل‌سنجی صورت بگیرد. گریمالدی^۶ نیز در قرن هفدهم پدیده‌ی پراش نور را، حتی کمی جلوتر از تداخل بررسی کرد[۵]. نظریه‌ی مقدماتی پراش را در اواخر قرن هفدهم هوینگنس^۷ ارائه کرد و در قرن نوزدهم کارهای فرنل و کیرشف آن را به صورت نظریه‌ی موجی موفقی برای توصیف بسیاری از پدیده‌های نوری درآورد. بر اساس این نظریه پراش شامل دو بخش عمده‌ی پراش فرنل و پراش فرانیهوفر است. در پراش فرانیهوفر فاز به طور خطی در فضا تغییر می‌کند و به کمک آن سازوکار دستگاه‌های تصویرساز، مبانی اپتیک فوریه، و طیف‌سنجی با توری به‌خوبی توصیف می‌شود. اما پراش فرنل کاربردهای بسیار محدودی دارد، چون فاز در آن به‌طور غیرخطی در فضا تغییر می‌کند. از طرف دیگر، چون در پراشی که تاکنون رایج بوده امکان تغییر فاز به‌طور دل‌خواه وجود نداشته از پراش فرنل رایج در سنج‌شناسی عملاً استفاده نشده است. ولی اخیراً نوع جدیدی از پراش فرنل مطرح و بررسی شده است که در آن می‌توان فاز را به‌اختیار تغییر داد. این نوع پراش کاربردهای متنوعی در سنج‌شناسی پیدا کرده است و روز به روز هم به کاربردهای آن اضافه می‌شود.



شکل ۱- نقش پراش و توزیع شدت روی پرده‌ی عمود بر جهت انتشار برای باریکه‌ی موازی پراشیده از نیم پرده‌ی کدر.

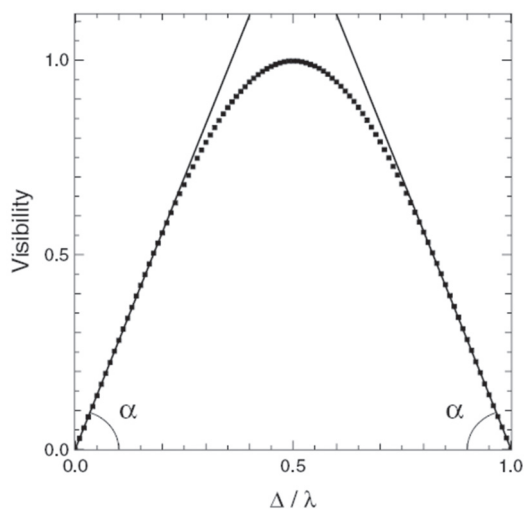
۲-۲ پراش فرنل از پله‌ی فازی

معمولاً پراش وقتی رخ می‌دهد که در مسیر انتشار باریکه‌ی نور هم‌دوس مانعی مثلاً شکاف، روزنه، یا نیم‌پرده‌ی کدر قرار بگیرد. در اینصورت توزیع شدت نور روی پرده‌ی عمود بر امتداد انتشار تغییر می‌کند و نوارهای تاریک و روشنی ظاهر می‌شود که به آن نقش پراش می‌گویند. در واقع این تغییر توزیع شدت در اثر تغییر تند دامنه‌ی میدان نور در مرز مانع و میدان رخ می‌دهد و دامنه از مقداری معین به صفر کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۱ نقش پراش و توزیع شدت روی پرده‌ی عمود بر امتداد انتشار باریکه‌ی نوری در اثر برخورد با نیم‌پرده‌ی کدر دیده می‌شود. تغییر تیز دامنه در مرز را می‌توان پله‌ای در دامنه تصور کرد. مطالعات منسجم سال‌های اخیر نشان می‌دهد که تغییر تند در فاز بخشی از موج نور نیز در پراش نقش دارد که با نظریه‌ی پراش فرنل-کیرشف قابل توصیف است [مراجع ۱۰-۷]. برای ایجاد تغییر تند در فاز بخشی از موج نور، کافی ست موج را به پله‌ی فیزیکی بتابانیم، شکل ۲-الف، و یا آن را از تیغه‌ای شفاف و غوطه‌ور در شاره‌ی شفاف عبور دهیم، شکل ۲-ب.

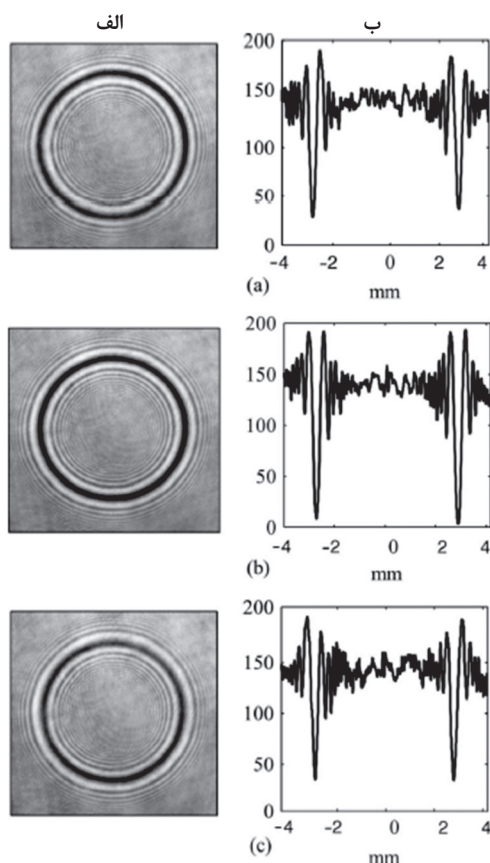
پژوهش‌های محلی مهم که با پژوهش‌های جهانی ارتباط نزدیک دارد و برای به‌بارآوردن فناوری پویا زیرساخت اساسی محسوب می‌شود پژوهش در سنج‌شناسی^۱ است. وجود و رعایت استاندارد برای هر نوع کالا، دستگاه، و خدمات برای رشد جامعه زیرساخت بنیادی است و از عوامل عمده‌ی رشد جوامع بشری بوده است. چارلز ساندرز پیرس^۲ از پیش‌گامان فلسفه و سنج‌شناسی در آمریکا، علت عمده‌ی عقب‌افتادگی علمی و فناوری آمریکا نسبت به اروپا در اوایل قرن بیستم را کم‌توجهی به سنج‌شناسی و استاندارد در آمریکا می‌داند[۱].

برای استاندارد کردن هر کالایی به اندازه‌گیری نیاز است. دقت اندازه‌گیری به نیازها، امکانات موجود، و توقعات جامعه بستگی دارد. هم‌چنین رقابت در عرضه کالاها، مرغوب‌تر الزام می‌آورد که به ارتقاء کیفیت، که همان بالابردن سطح استاندارد است توجه شود. در ضمن به‌یاد بیاوریم که بسیاری از کشف‌های مهم که به تعداد قابل توجهی جایزه‌ی نوبل منجر شده به‌دنبال بالابردن دقت‌های اندازه‌گیری حاصل شده است. بنابراین، در هر کشوری و در هر سطحی از علم و فناوری باید به سنج‌شناسی و پژوهش درباره‌ی روش‌های اندازه‌گیری توجه خاص شود. با چنین ذهنیتی و آشنایی با اپتیک، در بیست و پنج سال گذشته به‌اتفاق تعداد قابل ملاحظه‌ای دانشجو و همکار در زمینه‌ی سنج‌شناسی نوری تلاشی هدفمند داشته‌ام. در این مدت، با امکانات قابل دسترس در کشور، روش‌های اندازه‌گیری بدیعی ارائه شده و دستگاه‌های متنوعی طراحی و ساخته شده که شرح اغلب آنها در نشریات علمی داخل و خارج انعکاس یافته است. برای آنکه احساسی از نحوه‌ی برخورد با مسائل سنج‌شناسی داده باشم، دو اتفاق را که در اوایل کار رخ داد به‌اجمال شرح می‌دهم. از ابتدایی‌ترین کارها در سنج‌شناسی نوری، اندازه‌گیری ناهمواری‌های سطح فیزیکی است. یکی از راه‌های متداول کاربرد دو موج تخت است که یکی به سطح نمونه تابانده می‌شود و بازتابیده‌ی آن با موج تخت دیگر تداخل می‌کند و با تحلیل نقش تداخلی آنها در دو بُعد ناهمواری‌های سطح تعیین می‌شود. با امکاناتی که در اختیار داشتیم نمی‌توانستیم موج تخت مرجع بسازیم، خرید وسایل لازم هم ممکن نبود. بعد از مدت‌ها تأمل این فکر شکل گرفت که آیا نمی‌توان با تحلیل نقش تداخل در فضای سه‌بُعدی به‌جای فضای دو‌بُعدی ساختار دو موج مجهول را مشخص کرد؟ بعد از کار زیاد معلوم شد که این کار شدنی است. رفته‌رفته کار کامل تر شد و حالا به‌صورت روشی در آمده است که در آن به موج مرجع معلوم نیاز نیست [مراجع ۲ تا ۴]. همین‌طور زمانی لازم شد با دقت میکرومتر جسمی را به‌طور مکانیکی جابه‌جا کنیم. در آن زمان دستگاه‌هایی بود که کار جابه‌جایی را با دقت ۱۰۰ nm انجام می‌داد، ولی ما نداشتیم و امکان خرید هم نبود. بعد از چند سال کار و فکر راه جدیدی پیدا شد که امکان داد جابه‌جایی مکانیکی با دقت ۱۰ nm انجام شود. اطمینان دارم که با ادامه‌ی کار تا چند سال دیگر دقت زیر نانومتر هم ممکن می‌شود. بخش عمده‌ی کارهای من و همکاران در سنج‌شناسی نوری متمرکز است. اما ضمن این کارها با موضوع‌های علمی جالبی نیز مواجه شدیم که روی آنها یا کار نشده بود یا کم کار شده بود. کار روی این موضوع‌ها علاوه بر دست‌آوردهای علمی قابل‌اعتنا به کاربردهای جدیدی در سنج‌شناسی منجر شد که در خور توجه است. این موضوع‌ها که بخش عمده‌ی کارهای پژوهشی و سنج‌شناسی مرا شامل می‌شود، تحت سه عنوان ۱-پراش نور از پله ۲-پراکندگی نور از سطوح ناصاف ۳-کاربردهای جدید تکنیک ماره^۳، به‌اجمال در اینجا مرور می‌شود. البته کارهای انجام‌گرفته خارج از این موضوع‌ها نیز قابل توجه است ولی مجال مرور آنها نیست.

پله نقش‌های پراش نور از آن و توزیع شدت در نقش‌های آنها برای سه ارتفاع متفاوت در شکل ۵ آورده شده است.



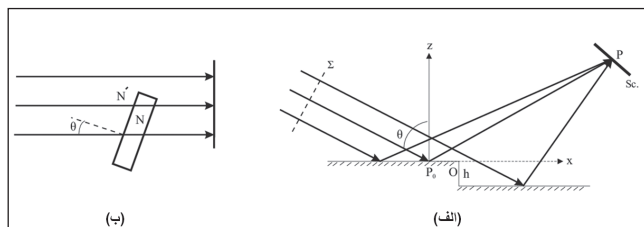
شکل ۴- نمودار نمایشی سه فریز مرکزی پراش نور از پله فازی وقتی که اختلاف راه میان صفر تا λ تغییر می‌کند. نمایشی تا فاصله کمی از بیشینه بر دو خط مستقیم منطبق است.



شکل ۵- نقش‌های پراش نور لیزر هلیوم-نئون از پله گرد با ارتفاع‌های

$$h = \frac{5\lambda}{24} \quad (a), \quad h = \frac{\lambda}{2} \quad (b), \quad h = \frac{5\lambda}{6} \quad (c)$$

(ب) نمایه‌های شدت روی هر یک از نقش‌ها.



شکل ۲- الف) پله فازی در بازتاب: میان پرتوهای بازتابیده از دو طرف لبه‌ی پله تغییرند فاز وجود دارد.

ب) پله فازی در عبور: میان پرتوهای عبور کرده از دو طرف مرز تیغه و شاره‌ی شفاف تغییرند فاز وجود دارد.

در این موارد فاز به‌طور پله‌ای تغییر می‌کند، یعنی با پله فازی مواجه هستیم. در شکل ۳- الف نقش‌های پراش نور از پله فازی با سه ارتفاع مختلف مشاهده می‌شود. در شکل ۳- ب توزیع‌های شدت متناظر نقش‌های شکل ۳- الف رسم شده است. بررسی‌های نظری و تجربی چهار ویژگی بارز به فریزهای پراش نور از پله فازی نسبت می‌دهد:

الف- نمایشی فریزها با دور شدن از لبه پله کاهش می‌یابد.

ب- فاصله‌ی فریزها از صفحه‌ی گذرنده از لبه‌ی پله با تغییر ارتفاع پله تغییر می‌کند. این تغییر برای فریزهای متناظر با نقاط نزدیک به لبه‌ی پله چشم‌گیرتر است. ج- پهنای فریزها به فاصله‌ی چشمه‌ی نور از پله و فاصله‌ی پله تا پرده‌ی مشاهده بستگی دارد و برخلاف پهنای فریزها در تداخل به طبیعت تغییر ارتفاع پله و مقدار ارتفاع بستگی ندارد.

د- اگر شدت‌های فرینه‌ی سه فریز درشت وسط نقش پراش را از چپ به راست با I_{mL} , I_{mR} , I_{mM} نشان دهیم و نمایشی این سه فریز را با رابطه‌ی

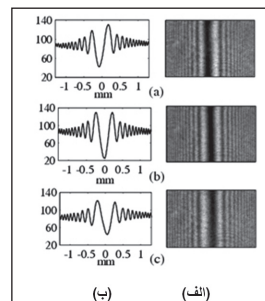
$$V = \frac{\frac{I_{mL} + I_{mR}}{2} - I_{mM}}{\frac{I_{mL} + I_{mR}}{2} + I_{mM}} \quad (1)$$

تعریف کنیم، برای مواردی که ضرایب بازتاب دو طرف پله با هم برابرند می‌توان نشان داد با تغییر ارتفاع پله در بازه‌ی یک چهارم طول موج ($\lambda/4$)، مقدار نمایشی بین صفر و یک تغییر می‌کند. این ویژگی که فقط در فریزهای نقش پراش از پله فازی دیده می‌شود امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی با دقت نانومتر را فراهم می‌کند. شکل ۴ نمایشی سه فریز مرکزی نقش پراش (رابطه‌ی ۱) را بر حسب اختلاف راه نشان می‌دهد.

شکل ۳- الف) نقش‌های پراش نور لیزر هلیوم-نئون از پله فازی یک‌بعدی با ارتفاع‌های

$$(a) \quad h = \frac{\lambda}{8}, \quad (b) \quad h = \frac{\lambda}{4}, \quad (c) \quad h = \frac{3\lambda}{8}$$

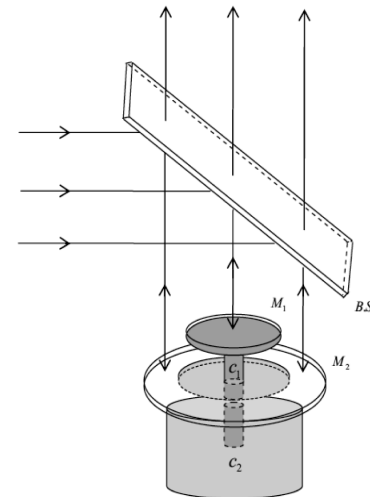
ایجاد شده در آرایش تداخل سنج ماخ-زندر (ب) نمایه‌های شدت روی نقش‌ها.



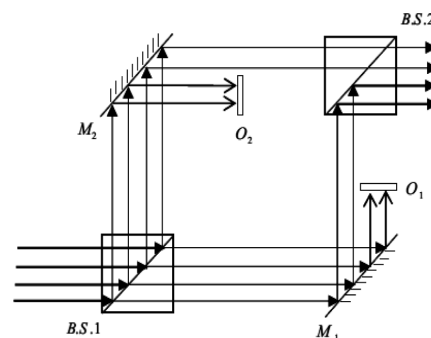
محاسبه‌ی توزیع شدت در نقش پراش نور از پله فازی دوبعدی گرد و مستطیل‌شکل در مرجع ۹ آمده است. چون پله‌ی گرد در اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های نانومتری به کار می‌رود برای آشنایی بیشتر با رفتار این نوع

۳-۲ روش‌های ایجاد پله با ارتفاع تغییرپذیر

چنان‌که قبلاً اشاره شد نمایانی فریزهای پراش نور از پله، به ارتفاع پله حساس است. بنابراین، تغییرات هر کمیت فیزیکی را که بتوان به تغییر ارتفاع پله تبدیل کرد می‌توان با اندازه‌گیری نمایانی فریزها سنجید. از این‌رو، به سازوکارهای مناسب برای تغییر دادن ارتفاع پله توجه می‌شود. طرح روشی ساده در شکل ۶-الف آمده است. آینه‌ی گرد میانی با قطری کمتر از چند میلی‌متر همراه با آینه‌ی نواری در میان گیرنده‌ی خود پله‌ای گرد می‌سازند. با جابه‌جایی پایه‌ی آینه‌ی گرد در امتداد قائم ارتفاع پله تغییر می‌کند. در شکل ۶-ب دو نیمه‌ی قرینه از دو آینه‌ی تداخل‌سنج ماخ-زندر با دو ورقه‌ی نازک و کدر پوشانده شده است. در خروجی تداخل‌سنج، نیمه‌ی باز یکی از آینه‌ها با تصویر نیمه‌ی باز آینه‌ی دیگر پله‌ای یک‌بعدی می‌سازد و با جابه‌جایی یکی از آینه‌ها ارتفاع پله تغییر می‌کند. سازوکارهای متفاوتی برای ایجاد پله با ارتفاع و یا اختلاف راه تغییرپذیر می‌توان تصور کرد. اگر زاویه‌ی فرود نور بر یک پله را تغییر دهیم اختلاف راه نوری تغییر خواهد کرد. همین‌طور، تغییر زاویه‌ی فرود نور بر تیغه‌ی شکل ۲-ب باعث تغییر اختلاف راه ناشی از پله می‌شود. بنابراین، در پراش فرنل از پله‌ی فازی می‌توان اختلاف راه را به‌اختیار تغییر داد. همین واقعیت افق جدیدی برای استفاده از پراش فرنل باز کرده که در حال گسترش است.



الف



ب

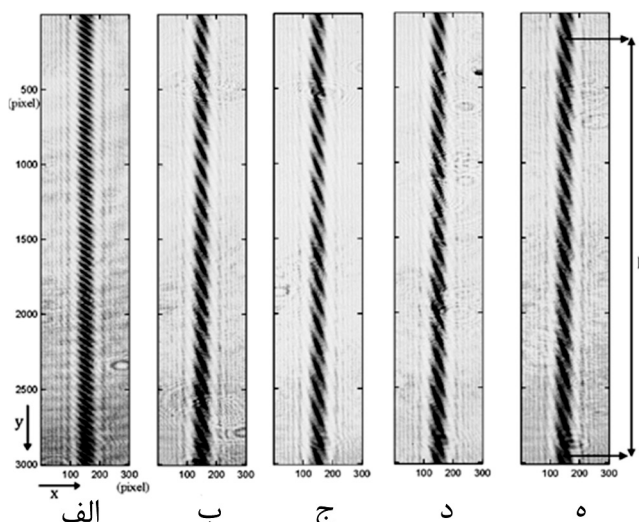
شکل ۶-الف) پله گرد با ارتفاع تغییرپذیر. با جابه‌جا شدن پایه آینه گرد در امتداد قائم، ارتفاع پله‌ای که آینه گرد با آینه نواری می‌سازد تغییر می‌کند. (ب) در تداخل‌سنج ماخ-زندر وقتی دو نیمه مکمل دو آینه با دو ورقه کدر بطور متقارن پوشیده شود، در خروجی تداخل‌سنج نیمه باز یک آینه با تصویر نیمه باز آینه دیگر پله یک-بعدی ایجاد می‌کند.

۴-۲ کاربردهای پراش فرنل از پله فازی

۴-۲-۱ کاربردهای سنج‌شناسی: نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد در فرود عمودی نور بر پله به‌ازای تغییر ارتفاع پله در بازه‌ی $0 \rightarrow \lambda/4$ ، نمایانی از صفر تا یک تغییر می‌کند. اگر آشکارگر بتواند تغییر نمایانی از مرتبه یک صدم را نشان دهد (آشکارگرهای معمولی از جمله CCD این توان را دارند)، تغییر ارتفاع از مرتبه $\lambda/400$ را می‌توان آشکار کرد. این مقدار برای طول موج‌های مرئی از مرتبه‌ی نانومتر است و اندازه‌گیری با این دقت در تداخل‌سنجی متداول امکان‌پذیر نیست. آزمایش‌های انجام گرفته، که به برخی از آنها اشاره خواهد شد، امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی با دقت نانومتر را تأیید می‌کند. طراحی و ساخت نانومترسنج بر اساس طرح شکل ۶-الف مدتی ست در جریان است. در طرح این دستگاه چون آینه‌های گرد و نواری در حجمی کوچک، از مرتبه‌ی چند سانتیمتر مکعب، جای داده می‌شوند، اثر نوفه‌های مکانیکی در مقایسه با تداخل‌سنج بسیار کم است. به‌علاوه وجود تعداد قابل ملاحظه‌ای فریز پراش در سطحی کوچک اطمینان از نتایج اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد. چون این نوع نانومترسنج اندازه‌گیری را بر حسب طول موج نور عرضه می‌کند نیاز به قالب‌بندی (کالیبراسیون) ندارد. اغلب جابه‌جاگرهای نانومتری نیاز به درجه‌گذاری دارند.

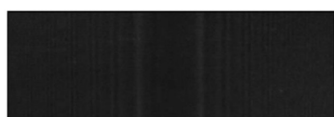
ما تاکنون از پراش فرنل برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های نازک [۱۱]، ضریب شکست مواد (گاز، مایع و جامد) [۱۲، ۱۳]، توزیع دما در اطراف سیم نازک داغ [۱۴]، تعیین نمایه‌ی ضریب شکست تار نوری [۱۵] استفاده کرده‌ایم و امکان استفاده از آن را برای اندازه‌گیری ضریب پخش مایع در مایع نیز نشان داده‌ایم [۱۰]. این روش بدون تردید کاربردهای فراوان دیگری دارد که به‌تدریج ارائه خواهد شد. اما در اینجا در باره‌ی اندازه‌گیری‌های ضخامت لایه‌های نازک، ضریب شکست اجسام، و تعیین توزیع دما در اطراف اجسام کوچک داغ را به‌اختصار خواهیم گفت. برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ی نازک ابتدا لایه‌ی نازک به صورت پله روی زیرلایه نشانده می‌شود. در صورتی که ضرایب بازتاب دو طرف لایه‌ی پله به‌هم نزدیک باشند، پله مستقیماً به کار خواهد رفت. در غیر این صورت لایه‌ای بازتاب‌دهنده به‌طور یکنواخت روی هر دو طرف لایه‌ی پله نشانده می‌شود. برای اندازه‌گیری، نمونه در آرایشی مطابق شکل ۷ روی سکوی قابل چرخشی سوار می‌شود و نمایانی فریزها با تغییر زاویه‌ی فرود اندازه گرفته می‌شود. البته، داشتن نمایانی در دو زاویه‌ی فرود برای تعیین ضخامت کافی است. ولی اندازه‌گیری در چند زاویه، دقت و اعتماد به نتیجه را بالا می‌برد. اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های نازک با روش‌های تداخل نور متداول است ولی این روش‌ها محدودیت‌های خاص خود را دارند. برای مثال، اگر ضخامت لایه بیش از $\lambda/2$ باشد، مضارب درستی از $\lambda/2$ در اندازه‌گیری با نور تک‌فام به‌راحتی آشکارپذیر نیست. دقت اندازه‌گیری در بهترین شرایط از مرتبه‌ی $\lambda/30$ است. امکان اشتباه در اندازه‌گیری زیاد است. در حالی که در روش مبتنی بر پراش عملاً محدودیتی در ضخامت لایه نیست، دقت اندازه‌گیری از مرتبه‌ی نانومتر است، چون اندازه‌گیری از برازش نمایانی‌های تجربی به یک خط محقق می‌شود نتیجه قابل اعتمادتر است. برای برازش از دو خطی استفاده می‌شود که در شکل ۴ به منحنی نمایانی مماس شده‌اند. این خط‌ها در نقاطی که از بیشینه کمی فاصله دارند کاملاً بر منحنی نمایانی منطبقند. باید این را هم اضافه کرد که با تغییر زاویه‌ی فرود همواره می‌توان نمایانی را برای اندازه‌گیری به سمت دو خط سوق داد. شکل ۸ نمایانی بر حسب کسینوس زاویه فرود را برای دو ضخامت $h_1 = 57 \text{ nm}$ و

دقیق‌تر، کار با آن آسان‌تر، و نتیجه‌ی به‌دست‌آمده قابل اطمینان‌تر است. به‌علاوه، در روش جدید، برخلاف روش شکست‌سنج آبه، مهارت آزمایشگر در اندازه‌گیری دخالت ندارد.



شکل ۹- فریزهای پراش فرنل از گوه‌ای از شیشه BK7، با زاویه راس $\alpha = 0.198^\circ$ در ظرفی مستطیل شکل حاوی الف (هوا، ب) آب، ج) استون، د) و ه) حاوی محلول الکل در آب ۳۰٪ و ۸۰٪.

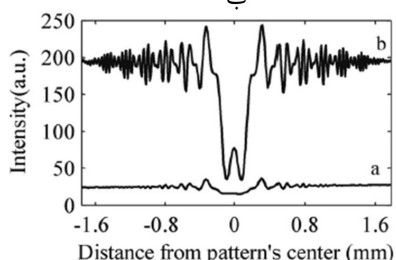
با استفاده از پراش فرنل روش بدیعی نیز برای اندازه‌گیری توزیع دما در اطراف سیمی نازک و داغ ارائه کرده‌ایم که می‌تواند به موارد مشابه تعمیم پیدا کند [۱۴]. در این روش دو سیم مشابه در دو بازوی تداخل‌سنج ماخ-زندر (شکل ۶-ب) به‌فاصله یکسان از باریکه‌ی BS قرار می‌گیرد (البته ماسک‌ها وجود ندارد). وقتی به تداخل‌سنج نور تابانده می‌شود، موج‌های پراشیده از دو سیم در خروجی تداخل‌سنج با هم تداخل می‌کنند. در صورتی که اختلاف فاز میان دو بازو مضرب فردی از π باشد تداخل تخریبی، نور خروجی را حذف می‌کند (شکل ۱۰-الف). اگر یکی از آینه‌ها را به‌قدری جابه‌جا کنیم که فاز به اندازه‌ی π تغییر کند تداخل سازنده، شدت در نقش پراش تک‌سیم را تا چهار برابر تقویت می‌کند (شکل ۱۰-ب). بنابراین، برای تغییر فاز π تغییر شدت



الف



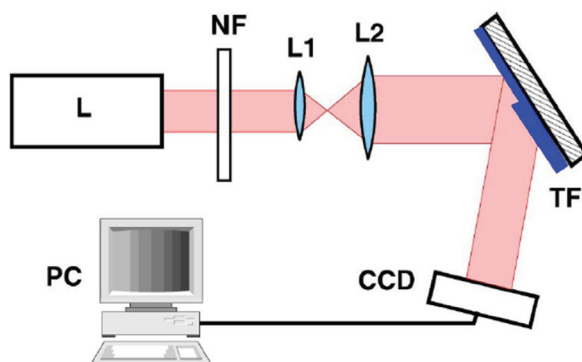
ب



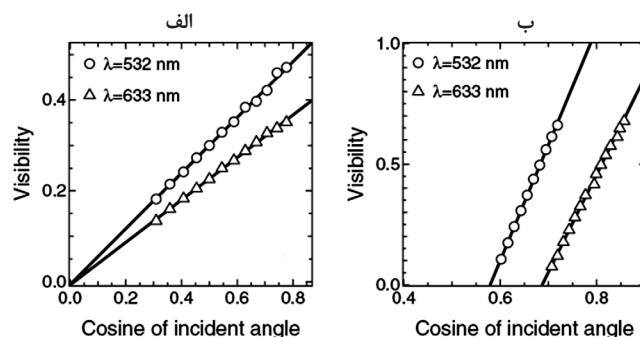
ج

شکل ۱۰- الف) وقتی نورهای پراشیده از دو سیم مشابه در بازوهای تداخل‌سنج ماخ-زندر باهم اختلاف فازی برابر با مضرب فردی از π دارند صفحه تداخل تاریک می‌شود. ب) وقتی اختلاف فاز نسبت به حالت الف به اندازه‌ی π تغییر کند تداخل سازنده شدت را چهار برابر شدت در نقش پراش تک‌سیم می‌کند. ج) نمایه‌های شدت روی هر یک از نقش‌ها.

$h_p = 462 \text{ nm}$ که با دو طول موج متفاوت به‌دست آمده نشان می‌دهد. برای جزئیات محاسبه مرجع ۱۱ را ببینید.



شکل ۷- چیدمان آزمایش برای اندازه‌گیری ضخامت لایه نازک. حروف L ، L_1 ، L_2 و TF به ترتیب نماینده لیزر، پالایه خنثی، عدسی، و فیلم نازک‌اند.



شکل ۸- نمودارهای نمایی تجربی برحسب زاویه فرود برای لایه‌هایی با ضخامت‌های الف) 462 nm (ب) 57 nm که برای دو طول موج به دست آمده‌اند.

روش اندازه‌گیری ضریب شکست اجسام شفاف با استفاده از پراش فرنل به‌اختصار به‌شرح زیر است. اگر تیغه‌ی شفافی با دو سطح کاملاً موازی و ضریب شکست N در ظرف مکعب مستطیل شکلی قرار بگیرد که در آن مایع یا گازی با ضریب شکست N' وجود داشته باشد، چنان‌که قبلاً اشاره شد، پله‌ی فازی در مرز تیغه و شاره به‌وجود می‌آید و در اثر تاباندن نور، فریزهای پراش نظیر فریزهای شکل ۳ موازی مرز تیغه و شاره تشکیل می‌شود. در صورتی که دو سطح تیغه با هم زاویه‌ی α بسازند ضخامت پله تغییر می‌کند و اختلاف فاز تابعی دوره‌ای از ارتفاع می‌شود. بنابراین، نمایانی فریزها در امتداد پله به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند. می‌توان نشان داد که دوره‌ی تکرار نمایانی، p ، با زاویه‌ی میان دو سطح تیغه، α ، رابطه‌ی زیر را دارد [۱۲]:

$$\rho = \frac{\lambda}{(N - N') \tan \alpha} \quad (2)$$

با اندازه‌گیری ρ و معلوم بودن N' ، α و N ، ضریب شکست N به دست می‌آید. در شکل ۹ نقش‌های پراشی دیده می‌شود که از تاباندن باریکه‌ی موازی نور به گوه‌ای از جنس شیشه BK7 با زاویه‌ی راس $\alpha = 0.198^\circ$ حاصل شده است که در داخل ظرفی مکعب مستطیل شکل حاوی الف) هوا، ب) آب، ج) استون، د) و ه) محلول الکل در آب ۳۰٪ و ۸۰٪ قرار داشته است. با این روش ضمن استفاده از وسایل ایمنی در دسترس در کشور، ضریب شکست با ۵ رقم با معنی به‌دست آمده است [۱۲]. مقایسه‌ی این روش با روش معروف و متداول شکست‌سنج آبه نشان می‌دهد که روش جدید

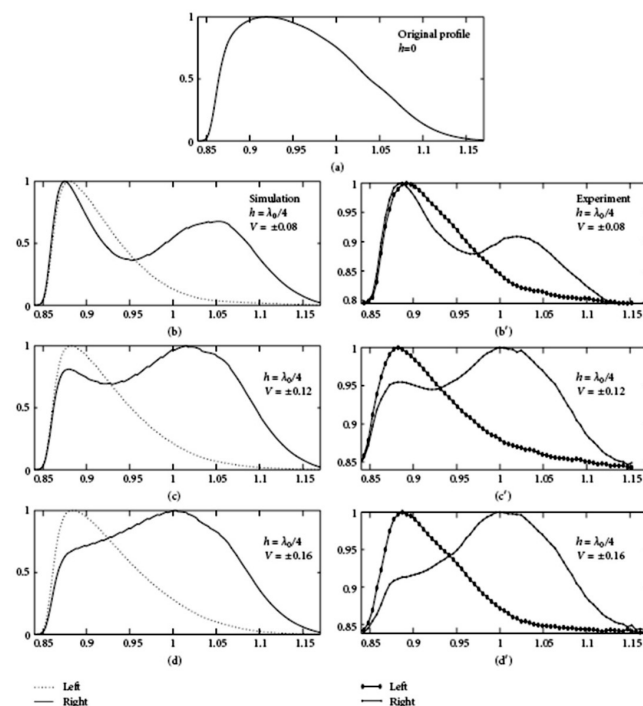
که مشغول کار خود بودیم متوجه شدیم که پله‌های فازی تکنیکی‌های قابل توجهی ایجاد می‌کنند و طیف آنها به راحتی قابل اندازه‌گیری و استفاده است. اگر پله شکل ۲-الف را با نور بس فام روشن کنیم خواهیم داشت:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \left[\cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) + 2(C_0^2 + S_0^2) \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) - (C_0 \pm S_0) \sin \varphi \right] \quad (3)$$

چون عبارت داخل کروشه به طول موج بستگی دارد مقدار آن برای طول موج‌های مختلف متفاوت است طیف نور پراشیده تعدیل می‌شود و ضریب تعدیل برابر است با

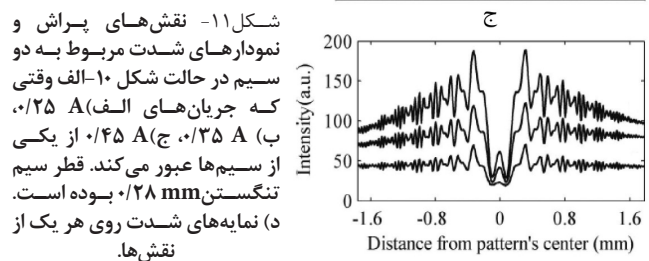
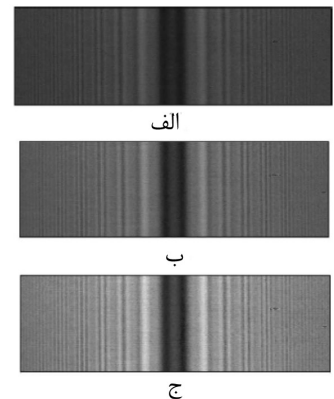
$$M = \left[\cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) + 2(C_0^2 + S_0^2) \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) - (C_0 \pm S_0) \sin \varphi \right] \quad (4)$$

ضریب تعدیل M در هر نقطه به مکان نقطه در نقش پراش بستگی دارد. زیرا پارامترهای C_0, S_0 به مکان نقطه‌ی مورد نظر نسبت به لبه‌ی پله بستگی دارند (رابطه‌ی ۴). در شکل ۱۲ طیف نور فرودی و شکل‌های تعدیل‌یافته‌ی آن در سه فاصله از لبه‌ی پله که به‌طور تجربی و از طریق شبیه‌سازی به‌دست آمده، نشان داده شده است. مطالعه‌ی تعدیل طیف توسط پله فازی به‌طور نسبتاً گسترده انجام شده است [۱۹، ۲۰، ۲۱]. مخصوصاً محمد امیری نشان داده است که طیف در زاویه‌ی بروئستر تعدیل می‌شود. هم‌چنین او امکان تغییر پیوسته‌ی طیف در پله‌ی فازی و برخی از کاربردهای آن را مطالعه کرده است [۱۹] و این کار ادامه دارد. کار دیگری که در این مقوله در جریان است طیف‌سنجی با پراش از پله‌ی فازی است. اشاره شد که با تغییر ارتفاع پله، هم نمایانی فریزها و هم فاصله‌ی فریزها از لبه تغییر می‌کند. بنابراین، اگر پله‌ی قابل تغییر با نور بس فام روشن شود با تغییر ارتفاع پله هم در امتداد لبه پله و هم در امتداد عمود بر لبه‌ی پله داده در مورد طیف به‌دست می‌آید. در واقع یک تبدیل فوری‌ی دو بعدی میان شدت نور بس فام و تغییر ارتفاع پله وجود دارد که می‌تواند دقیق‌تر از طیف‌سنجی فوری‌ی یک بعدی باشد.



شکل ۱۲- طیف چشمه نور فرودی و طیف‌های نورهای پراشیده از نقاط هم‌فاصله از دو طرف لبه پله، برای پله‌ی تجربی و شبیه‌سازی شده.

قابل توجهی داریم. حال اگر با عبور دادن جریان از یکی از سیم‌ها آن را داغ کنیم حضور گرادیان دما در اطراف سیم باعث تغییر ضریب شکست هوای اطراف سیم متناسب با دما می‌شود و تغییر شدت در نقش پراش نسبت به حالت ۱۰-الف، توزیع دما در اطراف سیم را مشخص می‌کند. در شکل ۱۱ نقش‌های پراش حاصل از پراش نور از دو سیم در حالت‌هایی نشان داده شده که از یک سیم جریان‌های متفاوت عبور کرده است. شبیه‌دار بودن نمودارهای شدت از وجود گرادیان دما در اطراف یکی از سیم‌ها حکایت دارد.



گستراندن اندازه‌گیری‌ها با استفاده از پراش فرنل ادامه دارد از جمله اندازه‌گیری‌های جریان، رویه‌نگاری سطوح اپتیکی، تعیین ثابت‌های اپتیکی مواد، اندازه‌گیری نیروهای بسیار کوچک (کمتر از نانونیوتن)، و اندازه‌گیری ضریب شکست غیر خطی. این اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که پراش فرنل از پله در سنج‌شناسی جایگاه مناسبی پیدا می‌کند. دقت زیاد و قابل استفاده بودن در مقیاس‌های کوچک در مقایسه با تداخل‌سنجی از مزایای عمده‌ی آن است. **۲-۴-۲ تعدیل طیف نور:** تا قبل از ۱۹۸۶ باور بر این بود که هر چشمه‌ی نوری طیف خاص خود را دارد که مواد تشکیل‌دهنده‌ی چشمه آن را شکل می‌دهند. در این سال امیل وولف در مقاله‌ای نشان داد در اثر عواملی نظیر وجود هم‌بستگی در بخش‌هایی از چشمه و انتشار نور در محیط‌هایی که بر نور فازی کاتوره‌ای تحمیل می‌کند، طیف نور دچار تعدیل می‌شود [۱۶] و [۱۷]. از این به بعد کارهای نسبتاً زیادی جهت شناسایی عوامل تعدیل‌کننده‌ی طیف صورت گرفت که به برخی از آنها در مرجع ۱۷ اشاره شده است. در سال ۲۰۰۲، باز وولف و همکارانش نشان دادند که در حوالی نقطه‌ی کانونی شدن موج، به‌خصوص روی محور تقارن موج، نقاط تکنیکی وجود دارد که طیف نور در نقاط نزدیک به آنها به طور غیر عادی و شدید تغییر می‌کند و شباهتی به تغییر طیف نور در منشور و توری ندارد [۱۸]. منظور از تکنیکی فازی جایی است که دامنه‌ی نور برای طول موج خاصی صفر می‌شود و فاز نامعین است. تغییر تند طیف در کلیدهای نوری در مخابرات نوری مورد توجه است. اما شدت در اطراف تکنیکی‌ها به قدری کم است که در عمل قابل استفاده نیست. ما

۳- پراکندگی نور از سطوح ناصاف

۱-۳ سابقه

وقتی نور بر مرز صاف میان دو محیط فرود می‌آید با نوشتن شرایط مرزی، مطابق با معادلات ماکسول، امتدادهای بازتاب و عبور و همچنین ضرایب بازتاب و عبور از مرز به‌طور کامل مشخص می‌شود. در واقع، میدان‌های ناشی از برهم‌کنش نور با محیط دوم در دو طرف مرز به‌طور دقیق قابل تعیین است. اما اگر مرز میان دو محیط ناصاف باشد، در حالت عام، نمی‌توان میدان‌ها را مشخص کرد (طبق تعریف، جذر میانگین مربع فاصله‌های پستی و بلندی‌های سطح مرزی از سطح صاف میانگین مرزی ناصافی گفته می‌شود). هر چه نسبت ناصافی به طول موج بزرگ‌تر باشد سطح ناصاف‌تر است. دانستن میدان‌ها در دو طرف سطح ناصاف، که به میدان‌های پراکنده‌شده معروفند، در بسیاری از شاخه‌ها، نظیر اپتیک، مخابرات و زیست‌شناسی اهمیت دارند. از طرف دیگر دانستن میزان ناصافی سطح در فناوری حائز اهمیت است. از این رو، از وقتی که ریلی به اثر ناصافی سطح توجه کرد (سال ۱۸۸۷) تاکنون کارهای نظری و تجربی زیادی برای تعیین میدان‌ها و یافتن پارامترهای سطح ناصاف انجام گرفته است [۲۳ و ۲۴]. رهیافت‌های نظری را، به‌طور کلی، به دو دسته می‌توان تقسیم کرد. در دسته اول از نظریه‌ی اختلال استفاده می‌شود. سطح صاف در این رهیافت مرجع گرفته می‌شود و ناصافی به صورت اختلال وارد مدل می‌شود. بدیهی‌ست که با این نوع رهیافت فقط برای ناصافی‌های کم می‌توان حرفی زد [۲۵]. نظریه‌های دسته‌ی دوم بر استفاده از انتگرال فرنل-کیرشف استوار است. برای اعمال این انتگرال شرایطی لازم است که بسیار محدودیت‌آور می‌شود [۲۶]. به هر حال، نور پراکنده از سطوح ناصاف شامل دو بخش هم‌دوس و ناهم‌دوس (پخشی) است که تلاش برای مشخص کردن این دو بخش هنوز هم ادامه دارد. از طرف دیگر، روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری پارامترهای سطح ناصاف ارائه شده است. تمام این روش‌ها محدودیت‌های جدی دارند و در گستره‌های محدود قابل استفاده‌اند [۲۷]. به‌خصوص از پراکندگی نور برای تعیین ناصافی سطح زیاد استفاده شده است. این روش‌ها برای سطوحی با ناصافی کم رضایت‌بخشند، اما در مورد سطوحی با ناصافی‌های زیاد کارایی ندارند. در این موارد از مقایسه‌ی شدت نور پراکنده از سطح آزمون با شدت‌های نور پراکنده از سطوح ناصاف مرجع برای تعیین ناصافی استفاده می‌شود. بنابراین، تعیین ناصافی سطوح چالشی در جریان است.

اما چگونه پای من به این حوزه باز شد؟ ضمن مسافرت‌های متوالی به دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان، در ساعات مختلف روز و در فصل‌های مختلف سال، در ناحیه‌های مشخصی از جاده سراب می‌دیدم. کم‌کم این تردید در من قوت گرفت که ممکن است تغییر دما علت تشکیل سراب نباشد. به تدریج این فکر شکل گرفت که سراب ممکن است تشکیل تصویر در سطوح ناصاف باشد. از این رو، به دنبال ایجاد تصویر در سطح ناصاف در آزمایشگاه برآمدم و کار را دنبال کردم تا رهیافتی نظری و عملی برای تشکیل تصویر در سطوح ناصاف شکل گرفت. بعداً ملاحظه شد که این رهیافت روشی مناسب برای مطالعه‌ی پراکندگی نور از سطوح ناصاف و تعیین ناصافی سطح است. این رهیافت، میدان نور پراکنده‌ی هم‌دوس را به‌درستی مشخص می‌کند، مقدار ناصافی را در گستره‌ای نسبتاً پهن برای نور مرئی به‌دست می‌دهد، تعدیل طیف در اثر پراکندگی را فرمول‌بندی می‌کند، و روش‌های مناسب و کاملاً عملی برای اندازه‌گیری ناصافی سطح فراهم می‌آورد. نتایجی که تاکنون

به‌دست آمده در شش مقاله‌ی نسبتاً مفصل انتشار یافته و کارهای قابل توجهی در جریان است. امید است در آینده‌ی نزدیک میدان پخشی نیز فرمول‌بندی شود و کاربردهای جدیدی نیز ارائه شود. در اینجا فرمول‌بندی رهیافت و نتایج به‌دست‌آمده را به اختصار شرح می‌دهم.

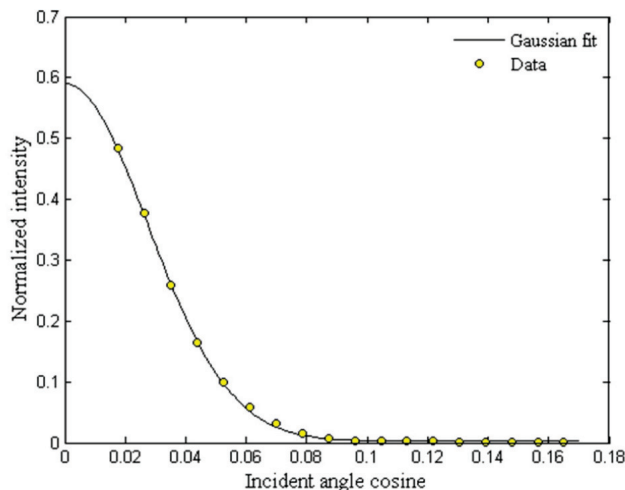
۳-۲ تشکیل تصویر در سطوح ناصاف

در شکل ۱۳-الف، نور خارج‌شده از شیئی نقطه‌ای O را عدسی L_1 موازی می‌کند و روی سطح تخت و صاف S می‌فرستد. نور پس از بازتاب از سطح S را عدسی L_2 در نقطه‌ی O' جمع می‌کند. در واقع، O' تصویر شیئی O است. اگر فاصله‌ی شیئی زیاد باشد و عدسی L_1 هم در کار نباشد عملاً پرتوهای موازی به سطح S می‌رسد و به جای عدسی L_2 هم می‌توان چشم را قرار داد. آنچه برای ایجاد تصویر لازم است حفظ هم‌دوسی (ارتباط فاز) بین نورهایی است که به نقطه‌ی O می‌رسند. در این صورت پرتوها تداخل سازنده خواهند داشت و نور کم‌تر به اطراف پخش می‌شود. حال اگر به جای سطح صاف S سطح ناصاف قرار دهیم، شکل ۱۳-ب، به سبب بازتاب پرتوها از ریزرویه‌های مختلف واقع در ارتفاع‌های متفاوت، هم‌دوسی لازم برای تشکیل تصویر از میان می‌رود و شدت نور در نقطه‌ی O' کم خواهد بود و به اطراف نقطه‌ی O' پخش می‌شود و ناظر تصویری نمی‌بیند. سطح تخت ناصاف را می‌توان مجموعه‌ای از ریزرویه‌های تخت در نظر گرفت که در فاصله‌های متفاوت از سطحی میانگین (HH' در شکل ۱۲-ب) با اندازه‌های متفاوت در جهت‌های مختلف توزیع شده‌اند. در تشکیل تصویر فقط پرتوهایی که از ریزرویه‌های موازی با سطح میانگین در امتداد بازتاب آینه‌ای بازمی‌تابند می‌توانند سهم داشته باشند [۲۸، ۲۹]. اما این پرتوها نیز با هم اختلاف راه یا اختلاف فاز دارند. دو پرتویی که از دو ریزرویه با اختلاف ارتفاع h بازمی‌تابند به اندازه θ $\cos \theta$ اختلاف راه دارند که منجر به اختلاف فاز $\frac{4\pi h \cos \theta}{\lambda}$ می‌شود. چون تعداد پرتوهای بازتابیده از سطح ناصاف در جهت بازتاب آینه‌ای بسیار زیاد است و اختلاف فازها برای سطحی که ناصافی آن کاتوره‌ای‌ست، تداخل سازنده را می‌تواند از بین ببرد و تصویر تشکیل نشود. اما این اختلاف فازها در دو حالت $h \rightarrow 0$ و $\theta \rightarrow \pi/2$ ناچیزند. حالت اول به سطح صاف و حالت دوم به زاویه‌ی فرود نزدیک به 90° مربوط است. بنابراین، سطوح ناصاف در زاویه‌های فرود نزدیک به 90° مثل آینه عمل می‌کنند. این، توجیه فیزیکی تشکیل تصویر در سطوح ناصاف است. می‌توان تابع توزیع ارتفاع ریزرویه‌ها را به شکل زیر فرمول‌بندی کرد [۲۸ و ۲۹]:

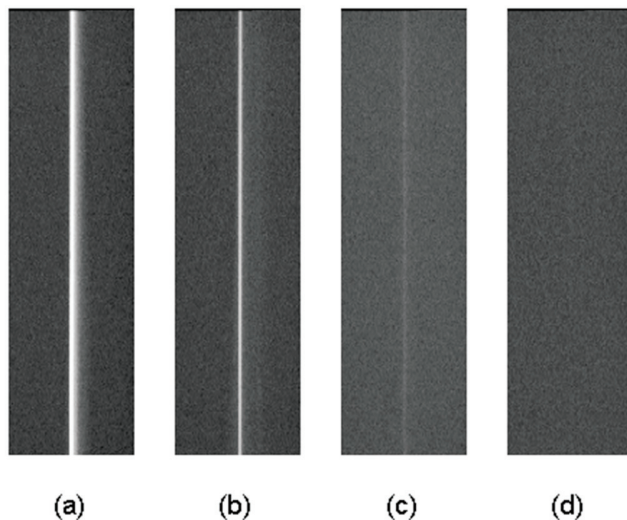
$$p(h) = 2 \int_0^\infty \sqrt{I_n(f)} \cos(2\pi fh) df \quad (5)$$

که در آن $f = \frac{2 \cos \theta}{\lambda}$ ، θ زاویه‌ی باریکه‌ی موازی نور با سطح تخت است. این رابطه حائز اهمیت است. چون با اندازه‌گیری شدت نور پراکنده‌ی هم‌دوس بر حسب کسینوس زاویه‌ی فرود و یا عکس طول موج (عدد موج)، توزیع ارتفاع در سطح ناصاف به دست می‌آید که تابع مشخصه‌ی مهمی‌ست. اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در این مورد با هر دو رهیافت، تغییر عدد موج و تغییر زاویه‌ی فرود، نتایج دقیق و سازگاری به‌دست داده است [۲۹، ۳۰]. هم‌چنین اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر اساس رابطه‌ی ۵ نشان می‌دهد توزیع ارتفاع در سطوحی که ناصافی‌شان در اثر ساییش با پودر ایجاد شده است گاؤسی‌اند [۲۹ و ۳۰]. به علاوه، با این رهیافت مسئله‌ی تعدیل طیف نور پراکنده، که دغدغه‌ی گروهی از محققان بوده، به‌طور کمی و دقیق توصیف

شکل ۱۵ چهار تصویر شکافی باریک آمده است که در آرایش شکل ۱۳ جای شیئی گذاشته شده است. این تصویرها در زاویه‌های فرود نور 82° ، 84° ، 87° و $81/75^\circ$ مشاهده می‌شوند ولی در زاویه $82/75^\circ$ عملاً دیده نمی‌شوند. ناصافی سطح $\sigma = 0/91 \mu m$ بوده است. این آزمایش و آزمایش با سطوح ناصاف دیگر نشان می‌دهد که برای تشکیل تصویر زاویه‌ی فرود آستانه وجود دارد که به ناصافی سطح و طول موج نور بستگی دارد.



شکل ۱۴- نمودار تجربی شدت پراکنده همدوس بر حسب کسینوس زاویه فرود، با علامت ۰۰۰ در نمودار. ناصافی سطح $\sigma = 0/91 \mu m$ و طول موج نور به کار رفته $\lambda = 450 nm$ بوده است. منحنی پیوسته تابع گوسی برازش شده است.

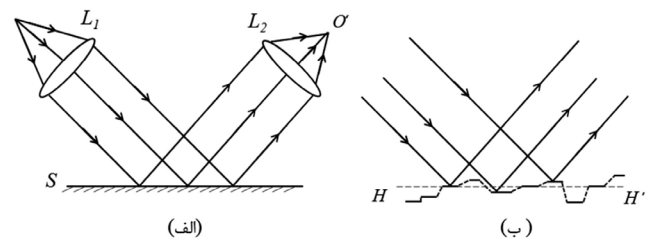


شکل ۱۵- تصویر یک شکاف باریک در سطح ناصاف با ناصافی $\sigma = 0/91 \mu m$ در زاویه‌های فرود نور 82° ، 84° ، 87° و $81/75^\circ$.

۴-۳ تشکیل سراب

باور عمومی در مورد تشکیل سراب این است که وقتی دمای زمین در قسمتی تخت و نسبتاً بزرگ، مثل قطعه‌ای در کویر یا بزرگراه، از دمای هوای بالای آن بیشتر باشد، ناظر شیئی نسبتاً دور، تصویر آن را در لایه‌های هوای مجاور زمین مشاهده می‌کند که سراب خوانده می‌شود. تشکیل سراب چنین توجیه می‌شود که بخشی از نورهای گسیل‌شده از شیء از لایه‌های هوای

شده است [۲۲، ۳۱]. نشان داده شده که طیف نور پراکنده‌ی هم‌دوس همیشه با انتقال به سرخ همراه است و پهنای آن باریک‌تر می‌شود. میزان انتقال و کاهش پهنای طیف به ناصافی سطح و زاویه‌ی فرود بستگی دارد. طیف نور پراکنده‌ی پخش‌ی، در حضور نور پراکنده‌ی هم‌دوس در زاویه‌های نزدیک به زاویه‌ی بازتاب آینه‌ای با انتقال به آبی همراه است و در غیاب نور پراکنده‌ی هم‌دوس، در بازتاب آینه‌ای با انتقال به سرخ همراه است ولی با دور شدن از زاویه‌ی بازتاب آینه‌ای انتقال به سرخ رفته‌رفته کم می‌شود [۳۱].



شکل ۱۳- (الف) همدوسی (ارتباط فازی) موجی که از شیء O خارج می‌شود تا رسیدن به نقطه تصویر O' حفظ می‌شود.

(ب) به سبب بازتاب نور از ریزوبه‌هایی که در ارتفاع‌های متفاوت قرار دارند همدوسی نور بازتابیده از سطح ناصاف به هم می‌ریزد. این واقعیت سبب می‌شود که تصویر تشکیل نشود. به عبارت دیگر نورهای همدوس به نقطه O' نرسند و شدت نور پخش شود.

۳-۳ زاویه‌ی فرود آستانه‌ی تشکیل تصویر

برای سطوح با ناصافی کاتوره‌ای تابع توزیع ارتفاع گاوسی است:

$$p(h) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

که در آن σ ناصافی سطح نامیده می‌شود.

در شکل ۱۴ نمودار تجربی نوعی شدت پهنای نور پراکنده همدوس $I_n(\theta) = I(\theta)/(I_0 A^2)$ بر حسب کسینوس زاویه فرود رسم شده است. ناصافی سطح $\sigma = 0/91 \mu m$ و طول موج نور به کار رفته $\lambda = 450 nm$ بوده است. منحنی پیوسته، تابع گاوسی برازش شده است. سطح ناصاف، سطح شیشه‌ی جامی بوده که با پودری با اندازه‌ی متوسط دانه $25 \mu m$ ساییده شده است. نمودار شکل ۱۴ نشان می‌دهد که برای افزایش شدت نور پراکنده‌ی هم‌دوس لازم است زاویه‌ی فرود بزرگ شود. شدت نور پراکنده‌ی هم‌دوس به‌طور نمایی با مربع کسینوس زاویه‌ی فرود کاهش پیدا می‌کند و آهنگ کاهش به ناصافی سطح و طول موج نور بستگی دارد. برای $h = \sqrt{2 \ln 2} \sigma$ که به‌ازای آن $p(h)$ به نصف مقدار بیشینه کاهش می‌یابد، و زاویه‌ی فرود θ_t که در رابطه‌ی

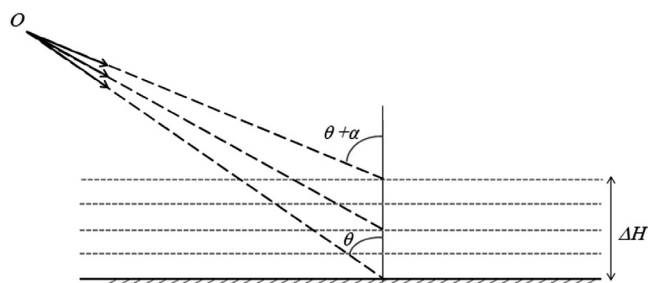
$$\frac{2 \cos \theta_t}{\lambda} = \frac{1}{2\sqrt{2 \ln 2} \sigma} \quad (7)$$

صدق می‌کند، شدت نور پراکنده‌ی هم‌دوس

$$I_n = \exp\left(\frac{-\pi^2}{2 \ln 2}\right) \quad (8)$$

می‌شود که عملاً ناچیز است. شدت به‌دست‌آمده به‌طور صریح به ناصافی سطح، زاویه‌ی فرود، و طول موج نور بستگی ندارد. از این رو، زاویه‌ی فرود متناظر با این شدت را زاویه‌ی فرود آستانه‌ی تشکیل تصویر می‌نامیم [۳۲]. در عمل، ظهور تصویر به تغییر زاویه‌ی فرود در حوالی θ_t کاملاً حساس است. ناصافی‌هایی که با آشکار کردن تصویر و استفاده از رابطه‌ی ۸ معلوم شده است با ناصافی‌های به‌دست‌آمده با روش‌های دیگر به‌خوبی هم‌خوانی دارد. در

تداخل سازنده از بین می رود و هم‌دوسی لازم جهت تشکیل تصویر خراب می‌شود. برای آن که هم‌دوسی به‌طور کامل نباشد باید اختلاف راه نوری میان لایه‌های انتهایی بازه‌ی ارتفاع، که با ΔH نشان می‌دهیم، از طول موج کمتر باشد. برای $\lambda = 600 \text{ nm}$ و زاویه‌ی فرود مربوط به مشاهده‌ی سراب در 400 m ، $\theta = 89/57^\circ$ ، پهنای بازه‌ی ارتفاع $\Delta H = 0/06 \text{ mm}$ می‌شود. گنجیدن تغییرات دما در چنین بازه‌ی باریکی مجاور سطح زمین امکان ندارد. شواهد بسیاری هست که بازه‌ی ارتفاعی توزیع دما خیلی بیشتر از این مقدار است [۱۴]. اما اگر بپذیریم چنین بازه‌ی باریکی ممکن است، به دلیل مجاورت با سطح زمین، هوای محدود به آن در تلاطم شدید است و لایه‌های پایدار تشکیل نمی‌شود. بنابراین، سراب همان تصویر در سطوح ناصاف در زاویه‌های فرود بزرگ است. اگر زاویه‌ی فرود مربوط به مشاهده‌ی سراب در 400 متری ، $\theta = 89/57^\circ$ باشد، ناصافی متناظر آن می‌شود $\sigma = 17 \mu\text{m}$. بنابراین، چون سطح بزرگ‌راه و کویر ناصافتر از سطح ناصافی‌ست که برای آزمایش ایجاد کردیم سراب در زاویه‌های فرود بزرگ‌تر و یا فاصله‌های دورتر مشاهده می‌شود. به این ترتیب ملاحظه می‌شود که سراب پدیده‌ای موجی‌ست و توجه اپتیک هندسی ندارد.



شکل ۱۷- پرتوهای خارج شده از شیء O به طرف ناحیه‌ای از زمین که در مجاور آن بازتاب کلی رخ می‌دهد زاویه‌های فرود اندکی متفاوت دارند. پرتوهایی که زاویه‌های فرود کوچک‌تر دارند از لایه‌های نزدیک به زمین و پرتوهایی که زاویه فرود بزرگ‌تر دارند از لایه‌های دورتر از زمین بازتاب کلی می‌کنند. تداخل نورهای بازتابیده تشکیل تصویر را غیر ممکن می‌کند.

در شکل ۱۸ عکس پنجره‌ای در انتهای راهرویی همراه با سراب آن در دیوار قائم راهرو نشان داده شده است. فاصله دوربین تا پنجره 40 m و فاصله دوربین تا دیوار 50 cm است. دیوار و هوای راهرو تفاوت دما ندارند. اگر اختلاف دمایی هم بود همرفت هوا در امتداد قائم مانع بازتاب کلی می‌شد. چون دیوار صاف‌تر از بزرگ‌راه یا کویر است، فاصله ناظر تا سراب به کمتر از 40 m کاهش یافته است.

این بخش را می‌توان چنین جمع‌بندی کرد. علی‌رغم این که بیش از صد و بیست سال روی پراکندگی نور از سطوح ناصاف کار شده و مقالات پرشماری انتشار یافته، رهیافت جدید، تشکیل تصویر در سطوح ناصاف، توانسته تابع توزیع ناصافی را بر حسب شدت نور پراکنده‌ی هم‌دوس ارائه کند، روش‌های مناسبی برای تعیین توزیع ناصافی سطح فراهم آورد، و مسئله تعدیل طیف نور پراکنده را فرمول‌بندی کند. از جمله کارهایی که در این زمینه در جریان است تعیین توزیع ناصافی در سطوح خیلی ناصاف با غوطه‌ور کردن سطح ناصاف در مایع با ضریب شکست مناسب، تعیین توزیع مساحت ریزویه‌ها، و ساختن نور ناهم‌دوس با پراکندگی کم از نور هم‌دوس لیزر است که کاربردهای زیادی دارد.

مجاور زمین که دماهای کم‌تر نسبت به زمین دارند بازتاب کلی پیدا می‌کند و تصویر شیء را به وجود می‌آورد (شکل ۱۶). در چنین پنداشتی فاصله‌ی ناظر تا سراب به مقدار تغییر دما بستگی دارد. برای برآورد فاصله از رابطه‌ی ضریب شکست هوا و دما [۳۳] و همین‌طور از قانون اسنل در بازتاب کلی استفاده می‌کنیم:

$$n(T) = 1.00029 - 10^{-6}T \quad (9)$$

$$n(T)\sin\theta = n(T + \Delta T) \quad (10)$$

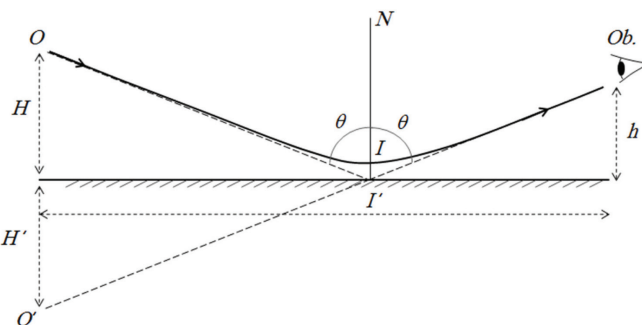
در این روابط $n(T)$ ضریب شکست هوا در دمای T ، θ زاویه فرود نور بر لایه‌ای با دمای T در نزدیکی شیء، و ΔT تغییر دما از سطح زمین تا لایه‌ی مجاور شیء است. با جاگذاری رابطه‌ی ۹ در رابطه‌ی ۱۰ به رابطه‌ی زیر می‌رسیم:

$$\sin\theta = 1 - \frac{10^{-6}\Delta T}{n(T)} \quad (11)$$

از طرف دیگر، با توجه به شکل ۱۶ و پارامترهای داده‌شده در شکل می‌توان نوشت:

$$\sin\theta = \frac{L}{[L^2 + (h+H)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

با برابر نهادن روابط ۱۱ و ۱۲، فاصله‌ی سراب تا ناظر بر حسب تغییر دما، ارتفاع‌های ناظر و شیء، h و H ، به‌دست می‌آید. برای $h=H=150 \text{ cm}$ تغییر دمای لازم جهت تشکیل سراب در فواصل 200 m ، 300 m و 400 m به ترتیب 112°C ، 50°C و 28°C و 13°C است. گذشته از اینکه آزمایش‌های ما در کویر دق، نزدیک شهرستان بیارجمند از توابع شاهرود، رابطه‌ی معنی‌داری میان تغییر دما و فاصله‌ی ناظر تا سراب نشان نداد، به‌روشنی می‌توان نشان داد که تغییر دما مجاور سطح زمین نمی‌تواند به تشکیل سراب بینجامد.

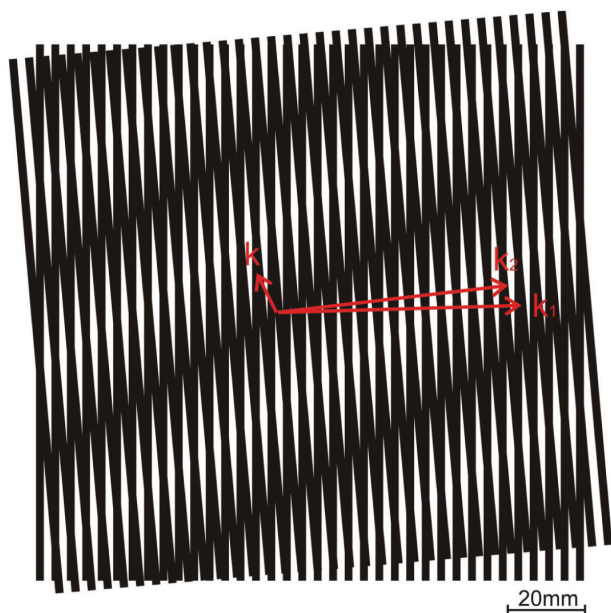


شکل ۱۶- باور عمومی بر این است که علت دیده شدن سراب (تصویر) شیء O توسط ناظر در Ob، بازتاب کلی نور از لایه‌های هوای مجاور زمین داغتر از هوا است.

طبیعی است که تغییر دما در مجاور زمین در بازه‌ی ارتفاع پایانی داری از سطح زمین رخ بدهد. در این صورت ضرایب شکست لایه‌های موجود در این بازه اندکی متفاوت خواهد بود. لایه‌ی مجاور سطح زمین کم‌ترین و لایه‌ی نزدیک به شیء یا ناظر بیشترین ضریب شکست را خواهد داشت. بنابراین، پرتوهایی که زاویه‌ی فرود کوچک‌تر دارند از لایه‌های نزدیک به زمین و پرتوهایی که زاویه‌ی فرود بزرگ‌تر دارند از لایه‌های دورتر از سطح زمین بازتاب کلی پیدا می‌کنند (شکل ۱۷). موج‌های متناظر با این پرتوها با هم تداخل می‌کنند و چون از لایه‌هایی در ارتفاع‌های متفاوت می‌آیند، میان آنها اختلاف فاز وجود دارد. اگر این اختلاف فازها در بازه‌ای بیش از 2π توزیع شده باشند

۴-۲ مبانی تکنیک ماره

در ساده‌ترین شکل، نقش ماره ساختاری تناوبی و خطی است که از برهم‌نهی دو ساختار تناوبی خطی موسوم به توری حاصل می‌شود. ساختار هر توری خطی با گام ثابت را می‌توان با برداری به نام بردار شبکه، $\vec{k}$ ، مشخص کرد که مقدار آن 2π تقسیم بر گام توری است و امتداد آن بر خطوط توری عمود است. جهت آن را طوری انتخاب می‌کنند که زاویه‌ی میان بردارهای شبکه‌ی دو توری برهم‌نهاده حاده باشد (شکل ۱۹).



شکل ۱۹- برهم‌نهی دو توری با گام‌های $q_1 = 2 \text{ mm}$ و $q_2 = 2.1 \text{ mm}$ که خطوط آنها با هم زاویه $\theta = 5^\circ$ می‌سازند. در شکل امتدادهای بردارهای شبکه توری‌ها و نقش ماره مشخص شده است.

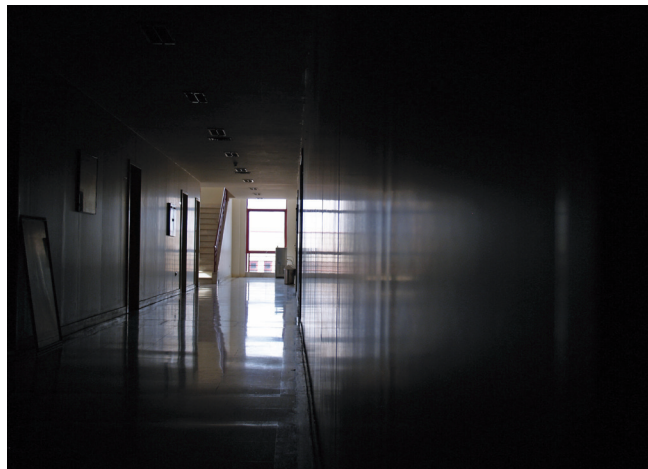
ضریب عبور از هر توری خطی را می‌توان با مجموعه توابع هم‌آهنگ با بس‌آمدهای متناسب با بس‌آمد فضایی توری نمایش داد. اما چون دوره تناوب نقش ماره فقط به تفاضل بس‌آمدهای فضایی هم‌آهنگ‌های اول دو توری بستگی دارد، برای سادگی کار، ضرایب عبور دو توری را با توابع کسینوسی نمایش می‌دهیم. به عبارت دیگر فقط هم‌آهنگ‌های اول بس‌طها را نگه می‌داریم:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{2} [1 + v_1 \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varphi_1)] \\ |v_i| &< 1 \quad (i = 1, 2) \\ T_2 &= \frac{1}{2} [1 + v_2 \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_2)] \end{aligned} \quad (13)$$

ضریب عبور دو توری برهم‌نهاده برابر خواهد بود با $T = T_1 T_2$ و یا:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2} + v_1 \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varphi_1) \right] + \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2} + v_2 \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_2) \right] + \\ &\quad \frac{v_1 v_2}{8} \cos[(\vec{k}_2 + \vec{k}_1) \cdot \vec{r} + (\varphi_2 + \varphi_1)] + \frac{v_1 v_2}{8} \cos[(\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{r} + (\varphi_2 - \varphi_1)] \end{aligned} \quad (14)$$

در رابطه‌ی ۱۴، چهار عبارت با دوره‌تناوب‌های متفاوت وجود دارد که بلندترین دوره به عبارت چهارم تعلق دارد. این جمله را که مشخص‌کننده‌ی



شکل ۱۸- عکس پنجره‌ای در انتهای راهرو همراه با سراب آن در دیوار قائم راهرو. فاصله دوربین از پنجره ۴۰ متر و فاصله دوربین از دیوار ۵۰ سانتیمتر است.

۴-کاربردهای جدید تکنیک ماره

۴-۱ سابقه

تعریف: اگر ضریب عبور یا ضریب بازتاب روی دو سطح با دوره‌تناوب‌های یک‌سان و یا نزدیک به هم تغییر کند هرگاه دو سطح برهم‌نهاده شوند، در حالتی که زاویه‌ی میان دو نقش تناوبی آنها کوچک است، نقش تناوبی جدیدی با دوره‌تناوب بسیار بزرگ‌تر ظاهر می‌شود که نقش یا فریزهای ماره^۸ نامیده می‌شود.

نقش‌های ماره در چین باستان مورد توجه بوده و بازیگران تئاتر با پوشیدن لباس دولایه‌ی توری‌مانند با نقش‌های تناوبی، هنگام راه‌رفتن نقش‌های ماره متنوع ایجاد می‌کردند که نظر تماشاگران جلب می‌کرده است. اما بررسی علمی نقش ماره را نخست ریلی در سال ۱۸۷۴ انجام داد [۳۴]. او از نقش ماره جهت بررسی عیوب توری‌های پرارش استفاده کرد، از آن پس رفته‌رفته از فریزهای ماره برای اندازه‌گیری‌های مختلف و نمایش برخی پدیده‌ها استفاده شد که شرح آنها در کتاب‌ها و تکنگاشت‌های متعدد آمده است [۳۵ و ۳۶].

من از زمان تحصیل در دوره دکتری به تکنیک ماره علاقه‌مند شدم. در مقاله‌ای خواندم برای نشان‌دادن دررفتگی^{۱۰} در بلورها، از برهم‌نهادن دو بلور نازک، مثل طلا و پالادیوم به صورت دو توری استفاده کرده‌اند و نشان داده‌اند که در حوالی دررفتگی‌های بلور، فریزهای ماره گسسته می‌شوند [۳۷]. با مطالعات بیشتر دریافتم که تکنیک ماره ابزار بسیار قدرتمندی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های کوچک و تغییرات کوچک زاویه است و می‌توان تغییرات بسیاری از کمیت‌های فیزیکی را به این نوع تغییرات تبدیل کرد. مهم‌تر این که امکانات استفاده از این تکنیک در ایران وجود دارد. بعد از بازگشت به ایران، با مهیاشدن شرایط به‌طور نسبی، به استفاده از تکنیک ماره در زمینه‌های مختلف پرداختم. از طرف دیگر چون به اشاعه‌ی این تکنیک در داخل کشور علاقه‌مند بودم کارهایی در این جهت نیز انجام دادم. نوشتن جزوه در سطوح مختلف، برگزاری کارگاه برای دانش‌آموزان، دانش‌جویان و دبیران، طراحی و ساخت دستگاه‌های مختلف مبتنی بر تکنیک ماره از جمله‌ی آنهاست. قبل از مرور کارهای پژوهشی در این حوزه لازم می‌دانم مبانی تکنیک ماره را به اختصار ولی با رهیافتی نو توصیف کنم.

رفتار نقش ماره است به شکل زیر می نویسیم:

$$T_m = A \cos[(\vec{k} \cdot \vec{r}) + \varphi] \quad (15)$$

که در آن

$$A = \frac{v_1 v_2}{8}, \quad \vec{k} = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1), \quad \varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$$

بردار $\vec{k}$ را بردار شبکه‌ی نقش ماره می نامند و مقدار آن، k ، بر حسب k_1, k_2 و زاویه‌ی میان خطوط دو توری θ ، چنین می شود:

$$k = [k_1^2 + k_2^2 - 2k_1 k_2 \cos \theta]^{1/2} \quad (16)$$

که آن را به صورت مفیدتر زیر می نویسیم:

$$k = [(k_2 - k_1)^2 + 4k_1 k_2 \sin^2(\theta/2)]^{1/2} \quad (17)$$

دوره تناوب نقش ماره، $q_m = \frac{2\pi}{k}$ ، بر حسب دوره تناوب های دو توری $q_1 = \frac{2\pi}{k_1}$ و $q_2 = \frac{2\pi}{k_2}$ با جای گذاری این مقادیر در رابطه‌ی ۱۶ به دست می آید:

$$q_m = \frac{q_1 q_2}{[q_1^2 + q_2^2 - 2q_1 q_2 \cos \theta]^{1/2}} \quad (18)$$

حالت های خاص: (الف) $k_1 = k_2$ و $\theta \neq 0$ در بسیاری موارد نقش ماره را با برهم نهاده‌ی دو توری هم گام با زاویه‌ای میان خطوط دو توری می سازند. در این صورت فریزهای ماره بر نیم ساز خطوط دو توری عمود است. برای زاویه های کوچک، که بیشتر به کار می رود، به نظر می آید که فریزهای ماره بر خطوط دو توری عمود است. در این حالت رابطه‌ی ۱۸ شکل ساده‌ی زیر را پیدا می کند:

$$q_m = \frac{q}{2 \sin(\theta/2)} \cong \frac{q}{\theta} \quad (19)$$

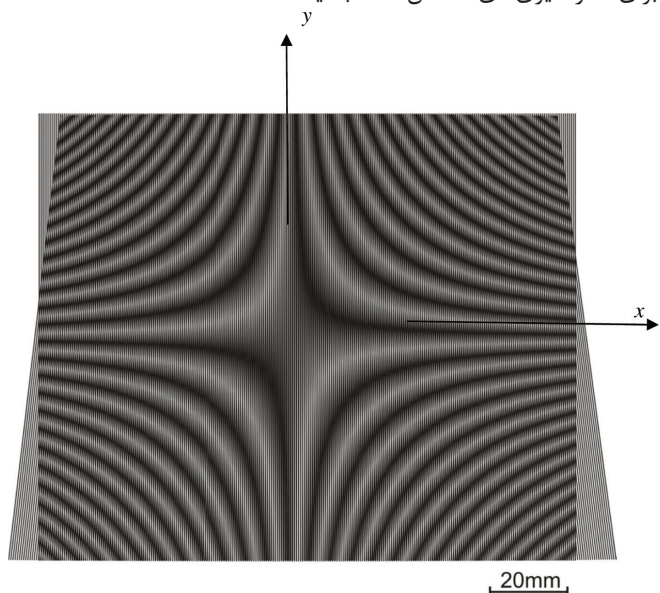
در چنین حالتی عبارت میان پرانتزهای اول رابطه‌ی ۱۷ وجود ندارد.

(ب) $\theta = 0$ و $k_1 \neq k_2$ ، از این حالت نیز زیاد استفاده می شود. در این حالت فریزهای ماره با خطوط توری ها موازی اند. فریزهای ماره در این حالت، عملاً بر فریزهای ماره در حالت (الف) عمودند. در این حالت رابطه‌ی ۱۸ شکل زیر را پیدا می کند:

$$q_m = \frac{q_2 q_1}{|q_2 - q_1|} \quad (20)$$

برای چنین حالتی جمله‌ی دوم رابطه‌ی ۱۷ از بین می رود. باید توجه داشت که تکنیک ماره نوعی پدیده‌ی تکینگی فاز است. زیرا برای $k=0$ ضرب عبور و یا بازتاب در مقیاسی بزرگتر از دوره‌ی توری ها، تغییر نمی کند و فاز در سرتاسر منطقه‌ی برهم نهش ثابت و نامعین است. اما وقتی k از مقدار صفر قدری دور می شود، $q_m = \frac{2\pi}{k}$ با تغییرات شدید ظاهر می شود. بسته به این که این تغییرات ناشی از جمله‌ی اول یا دوم رابطه‌ی ۱۷ باشد فریزهای ماره موازی یا عمود بر خطوط توری می شوند. بنابراین، مقدار و جهت فریزهای ماره در حوالی $k=0$ تغییرات بسیار تندی دارد. همین حساسیت زیاد به تغییر زاویه و تغییر گام، امکان مطالعه‌ی آن دسته از کمیت های فیزیکی را فراهم می آورد که تغییرات آنها به تغییر گام و یا تغییر زاویه میان خطوط توری قابل تبدیل هستند. در شکل ۲۰ دو توری خطی، یکی با گام

ثابت $q_1 = 0.5 \text{ mm}$ و دیگری با خطوطی که میان دو خط متوالی آن زاویه‌ی $\alpha = 0.5^\circ$ وجود دارد بر هم نهاده شده اند. روی محور گام های هر دو توری برابرند. نقطه‌ی تقارن نقطه‌ی تکینگی است. در امتداد محور x فقط زاویه‌ی میان خطوط دو توری تغییر می کند. هر چه در حوالی محور x از محور y دورتر شویم فریزهای ماره به سمت عمود بر خطوط دو توری بیشتر میل می کنند. زاویه در امتداد محور y تغییر ندارد اما تفاوت گام ها زیاد می شود. از این رو، فریزهای ماره به موازی شدن با خطوط دو توری میل می کنند. برای جهت های دیگر هر دو جمله‌ی رابطه‌ی ۱۷ مؤثرند و امتداد فریزهای ماره در هر ناحیه به وزن نسبی آنها بستگی دارد. در مناطق دور از نقطه‌ی تکینگی تغییرات فریزهای ماره کم است و فریزها عملاً خطی اند. بنابراین، در این نواحی حساسیت به تغییر زاویه و تغییر گام کم است و این نواحی برای اندازه گیری های حساس مناسب نیست.



شکل ۲۰- برهم نهی دو توری خطی یکی با گام ثابت $q_1 = 0.5 \text{ mm}$ و دیگری با خطوطی که دو خط متوالی آن با هم زاویه $\alpha = 0.5^\circ$ دارند. گام های دو توری روی محور x با هم برابرند.

۴-۳ پدیده‌ی تالپوت

تکنیک ماره در بسیاری موارد با استفاده از پدیده‌ای همراه است که خودتصویرسازی^{۱۱} یا پدیده‌ی تالپوت خوانده می شود. تالپوت آن را در اواخر قرن نوزدهم کشف کرد. هر گاه توری خطی را با نور تکفام موازی روشن کنیم، در فواصل معینی از توری، که به گام و طول موج نور بستگی دارد، توزیع شدت بلافاصله بعد از توری تکرار می شود (شکل ۲۱). فاصله‌ی میان دو مکان تکرار متوالی، فاصله‌ی تالپوت یا خودتصویرسازی گفته می شود. با استفاده از انتگرال فرنل-کیرشف این فاصله محاسبه می شود و مقدار آن:

$$L = \frac{2q^2}{\lambda} \quad (21)$$

است. حال اگر توری فیزیکی با گامی مساوی و یا نزدیک به گام توری خودتصویرساز در محل یکی از تصویرها قرار بدهیم نقش ماره ظاهر می شود. اگر اندازه گیری با تکنیک ماره با استفاده از پدیده‌ی تالپوت همراه باشد به آن انحراف سنجی ماره^{۱۲} می گویند و کاربردهای جالبی در اندازه گیری انحراف های

قابل ذکر در مورد تلاطم جو این است که ما برای اولین بار در تکنیک ماره از تلسکوپ استفاده کردیم. تلاطم جو در رصد اجرام آسمانی، عکسبرداری هوایی و ماهواره‌ای حائز اهمیت است و اندازه‌گیری دقیق آن همواره مورد توجه بوده است. برای اندازه‌گیری، توری‌ای با ابعاد متر و خطوط با فاصله چند میلیمتری را در فاصله حدود ۱۰۰ متر از تلسکوپ قرار دادیم. بعد در صفحه‌ی کانونی تلسکوپ، توری فیزیکی دیگری با مشخصات نزدیک به مشخصات تصویر توری در تلسکوپ روی تصویر توری گذاشتیم. تغییرات توری تصویر را که از تلاطم جو ناشی می‌شد در تغییرات فریزهای ماره با بزرگ‌نمایی زیاد بررسی کردیم. دقت اندازه‌گیری ده برابر دقت روش‌های دیگر بود. کار به تدریج بهتر و دقیق‌تر نیز شد. این کار مورد توجه هیئت تحریریه‌ی خبرنامه‌ی SPIE (جامعه بین‌المللی مهندسان اپتیک) قرار گرفت و از ما خواستند شرحی از کار برای خبرنامه‌شان تهیه کنیم [۴۲]. کار با تلسکوپ باعث شد که به استفاده از تکنیک ماره از فواصل دور فکر کنیم و ارتعاش سازه‌های بزرگ را از راه دور اندازه بگیریم [۴۳]. این روش امکان می‌دهد که حرکت گسل‌ها از راه دور مطالعه شود. به‌بار آوردن روش‌هایی برای اندازه‌گیری ارتعاش پل‌ها، نشست مخازن بزرگ، و تغییر شکل تاج سدها در جریان است.

در ارتباط با استفاده از تغییر نمایانی فریزهای ماره، روشی مناسب برای تعیین شکل خطوط طیفی که پهنای آنها بیشتر از نانومتر است ارائه شد که دقت آن از دقت توری پراش و منشور بیشتر است. هم‌چنین این روش امکان داد که پاشندگی محیط برای طیف پهن، نظیر طیف نور سفید، یک‌جا تعیین شود [۴۴]. از تغییر نمایانی فریزهای ماره با تغییر تعداد خطوط توری در واحد طول روش مناسبی برای تعیین توان تفکیک دستگاه‌های اپتیکی، به‌ویژه دستگاه‌های چاپگر ارائه شد که به‌جای معیار نسبتاً مبهم <تعداد نقطه در واحد طول> مستقیماً تابع انتقال مدولاسیون^{۱۴} را می‌دهد [۴۵ و ۴۶ و ۴۷]. بر اساس این روش دستگاهی ساخته شد که با آن می‌توان کیفیت دستگاه‌های چاپگر را محک زد. در زمینه‌ی استفاده از تکنیک ماره چند دستگاه ساخته شده که به ثبت داخلی رسیده و علت عدم ثبت خارجی آنها نبودن اعتبار و وقت‌گیر بودن فرآیند ثبت بوده است. از جمله‌ی این دستگاه‌ها، دستگاه شیب‌سنج، دستگاه تعیین عیوب شیشه‌ی اتومبیل، دستگاه اندازه‌گیری مدول ینگ است. خوش‌بختانه کار در زمینه‌ی استفاده از تکنیک ماره در جاهای مختلف کشور در جریان است. محمد ابوالحسنی، سیف‌الله رسولی و خسرو معدنی‌پور در این زمینه فعالند و کارهای مستقل و قابل توجهی انجام داده و می‌دهند. خود من هم در حال حاضر روی اثرات تغییرات پیوسته پارامترهای توری در نقش ماره در حوالی نقطه‌ی تکینگی کار می‌کنم.

۵- نتیجه‌گیری

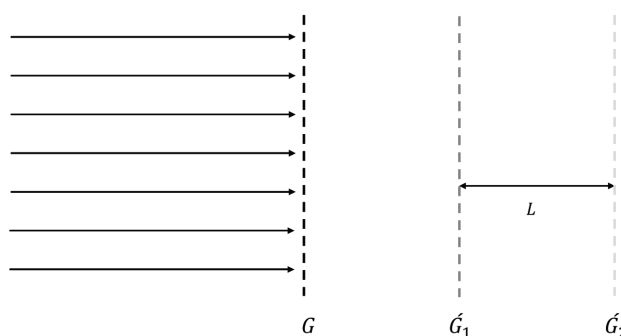
هدف اصلی از ارائه‌ی این گزارش نشان دادن این واقعیت بوده است که با امکانات موجود در کشور می‌توان به نوعی از تحقیقات کاربردی پرداخت که علاوه بر رفع برخی از نیازهای علمی و فناوری، داخلی در آن موضوع‌های مستقل و بدیع هم مطرح شود که اهمیت جهانی دارند. تنوع موضوع‌ها و تعداد مقالات انتشار یافته تصادفی بودن پیداشدن موضوع‌ها در این زمینه‌ها را نقض می‌کند. بدون تردید بسیاری از موضوع‌هایی که در کشورهای پیشرفته‌ی علمی و صنعتی موضوع‌های تحقیق روز تلقی می‌شوند حاصل رهیافت‌هایی از این نوع است. از طرف دیگر، کارهای انجام‌شده نشان می‌دهد که کاربردی نبودن بخش عمده‌ای از تحقیقات در کشور مشکل ارتباط صنعت و دانشگاه نیست. وقتی در

بسیار کوچک نور دارد. برای رسیدن به شهودی از زاویه‌های قابل اندازه‌گیری، فرض کنید در شکل ۲۲ توری G_2 در فاصله‌ی N آمین تالبوت توری G_1 قرار داشته باشد. قبل از انحراف نور، تصویر نقطه‌ی A در نقطه‌ی B از N آمین تصویر از خود است. بعد از ایجاد انحراف در نور، تصویر به نقطه‌ی B' منتقل می‌شود. جابه‌جایی تصویر به مقدار $BB' = dl$ باعث جابه‌جایی فریزهای ماره به اندازه‌ی dq_m می‌شود که با تناسب زیر به dl ربط پیدا می‌کند:

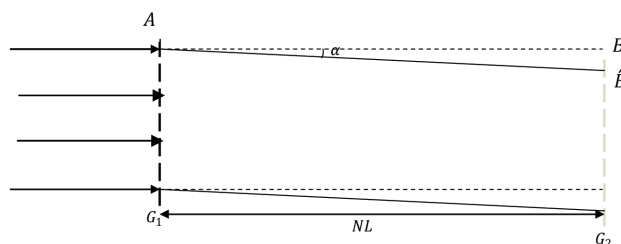
$$\frac{dq_m}{q_m} = \frac{dl}{q}$$

مطابق شکل، با قرار دادن $dq = \alpha NL$ به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{q}{q_m} \frac{dq_m}{NL} \quad (21)$$



شکل ۲۱- هر گاه یک توری خطی با نور موازی و تک‌فام روشن شود در فواصلی موسوم به فاصله تالبوت توزیع شدت بلافاصله بعد از توری تکرار می‌شود.



شکل ۲۲- اندازه‌گیری انحراف نور با استفاده از تکنیک انحراف‌سنجی ماره. قبل از انحراف نور تصویر نقطه A در نقطه B از N آمین فاصله تالبوت است و بعد از انحراف نور به نقطه B' منتقل می‌شود.

برای توری با ده خط بر میلی‌متر و $dq_m = 1 \text{ mm}$ ، $N = 5$ ، $\lambda = 600 \text{ nm}$ به دست می‌آید $\alpha \cong 6 \times 10^{-5} \text{ rad}$ که از مرتبه‌ی ثانیه است. البته در گزارش‌ها اندازه‌گیری زاویه‌های بسیار کوچک‌تر نیز آمده است. هر عامل فیزیکی، نظیر تغییر دما، تغییر غلظت، تغییر ضخامت محیط شفاف می‌تواند باعث انحراف نور شود. این نوع تغییرات با دقت زیاد با انحراف‌سنجی ماره قابل اندازه‌گیری است.

پدیده‌های فیزیکی به دو صورت روی نقش ماره تأثیر می‌گذارند و یا شکل و فاصله‌ی فریزها را تغییر می‌دهند و یا باعث کاهش نمایانی فریزهای ماره می‌شوند. هر دو اثر کاربردهای خاص خود را دارد. ما در کارهای پژوهشی خود از هر دو اثر استفاده کرده‌ایم. در اندازه‌گیری ضریب پخش مایع در مایع [۳۸]، در اندازه‌گیری تلاطم جو [۴۰ و ۳۹] و اندازه‌گیری جذب نانوذرات در عدسی گرمایی^{۱۳} [۴۱] از تغییر شکل فریزهای ماره استفاده شده است. نکته‌ی

- scattering measurements", Optical and Quantum Electronics 9(1977) 269-287
- 25- F. Gilbert, L. Knopoff, J. Geophys. Res. 65(1960)3437-44.
- 26- M. S. Howe, Proc. R. Soc. A 337(1974) 413-33.
- 27- J. M. Elson, H. E. Bennett, J. M. Bennett, "Scattering from optical surfaces", in Applied Optics and Optical Engineering, Vol. 7 (Academic Press, 1979) Ch. 7.
- 28- M. T. Tavassoly, A. Nahal, Z. Ebadi, "Image formation in rough surfaces", Optics Communication 238(2004) 252-260.
- 29- M. T. Tavassoly, M. Dashtdar, "Height distribution on a rough plane and specularly scattered light amplitude are Fourier transform pair", Optics Communication 281 (2008) 2397-2405.
- 30- M. Dashtdar, M. T. Tavassoly, "Determination of height distribution on a rough interface by measuring the coherently transmitted or reflected light intensity", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 26 No. 10 (2008) 2509-2517
- 31- M. Dashtdar, M. T. Tavassoly, "Red-shift and blue-shift in spectra of light coherently and diffusely scattered from random rough interfaces", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 26, No. 10 (2009) 2134-2138.
- 32- M. Dashtdar, M. T. Tavassoly, "Roughness measurement using threshold angle of image formation", Optical Engineering, Vol 50, Issue 12, doi:10.1117/1.3660297 (2011)
- 33- E. R. G. Eckert, R. J. Goldstein, Measurement of Heat Transfer (McGraw-Hill, New York, 1975).
- 34- K. Paturski, Handbook of Moire Fringe Technique (Elsevier, Amsterdam, 1973).
- 35- O. Kafri, I. Glatt, The Physics of Moire Metrology (John Wiley & Sons, NY, 1989).
- 36- Guy J. M. Indebetouw, R. Czarnek (Eds.), Selected Papers on Optical Moiré and applications (SPIE Press Book 1992).
- 37- D. W. Pashley, J. W. Menter, G. A. Bassett, Nature (London) 179 (1957) 752.
- 38- K. Jamshidi Ghaleh, M. T. Tavassoly, N. Mansour, 2004, "Diffusion coefficient measurements of transparent liquid solutions using moiré deflectometry", J. Phys. D: Appl. Phys. 37 (2004) 1-5
- 39- S. Rasouli, M. T. Tavassoly, "Application of the moiré deflectometry on divergent laser beam to the measurement of the angle of arrival fluctuations and the refractive index structure constant in the turbulent atmosphere", Optics Letters Vol. 33, No. 9 (2008) 980-982.
- 40- S. Rasouli, M. T. Tavassoly, "Application of moiré technique to the measurement of the atmospheric turbulence parameters related to the angle of arrival fluctuations", Optics Letters Vol. 31, No. 22 (2006) 3276-3278.
- 41- S. Rasouli, H. Ghasemi, M. T. Tavassoly, H. R. Kholesifard, "Application of parallel moiré deflectometry and single beam z-scan technique in the measurement of the nonlinear refractive index", Appl. Opt. Vol. 50, No. 16 (2011) 2356-2360.
- 42- S. Rasouli, M. T. Tavassoly, "Moiré technique improves the measurement of atmospheric turbulence parameters", SPIE Newsroom, 10.1117/2.1200702.0569.
- 43- S. Rasouli, M. T. Tavassoly, "Determination of vibration parameters of a large scale structure by measuring the visibility changes on the time average images of a sinusoidal pattern fixed on it", Optical Engineering 47 No. 5 (2008).
- 44- M. T. Tavassoly, M. Abolhassani, "Specification of spectral line shape and multiplex dispersion by self imaging and moiré technique", Optics and Lasers in Engineering Vol. 41, No. 5 (2004) 743-753.
- 45- Kh. Madanipour, M. T. Tavassoly, "Application of moiré technique to the measurement of modulation transfer function (MTF) of printing systems", Optics and Lasers in Engineering Vol. 4, No. 1 (2007) 64-69.
- 46- Kh. Madanipour, M. T. Tavassoly, "Determination of modulation transfer function of a printer by measuring the autocorrelation of the transmission function of a printed Ronchi grating", Applied Optics Vol. 48, No. 4 (2009) 725-729.
- 47- K. Madanipour, M. T. Tavassoly, "Moiré fringes as two-dimensional autocorrelation of transmission function of linear grating and its application to transfer function measurement", Optics and Lasers in Engineering 48(2010)43-47.

زیر نویس:

1. metrology
2. Charles Sanders Pierce
3. moiré
4. Boyle
5. Hooke
6. Grimaldi
7. Huygens
8. moiré
9. Rayleigh
10. dislocation
11. self-imaging
12. moiré deflectometry
13. thermal lensing
14. modulation transfer function

جامعه‌ای فرهنگ علمی گسترش لازم را نیافته باشد و در صنعت و خدمات به استاندارد کالاها توجه جدی نشود نتایج تحقیقات کاربردی نیز در قفسه‌های آزمایشگاه‌های دانشگاه بایگانی می‌شود. بنابراین، رشد فرهنگ علمی در جامعه توجه سامان یافته می‌طلبد. همچنین ضرورت دارد که زیرساخت‌های تبدیل نتایج تحقیق به کالا، دستگاه و خدمات فراهم شود. تبدیل نتایج تحقیق به کالا، دستگاه و خدمات، به همکاری تخصص‌های مختلف نیاز دارد و محقق دانشگاه نه وقتش را دارد و نه از عهده‌ی آن برمی‌آید.

در خاتمه از هیئت دبیران مجله به‌خاطر فرصتی که در اختیار من گذاشتند تا بخشی از تجربه‌هایم را گزارش کنم صمیمانه سپاس‌گزارم. همچنین از معصومه دشتدار، کتابیون سماواتی و رسول عالی‌پور که در تهیه‌ی گزارش مرا یاری کرده‌اند صمیمانه تشکر می‌کنم.

مراجع

- 1- R.P. Crease, "Charles Sanders Peirce and the first absolute measurement standard", Physics Today) December 2009(39-44
- 2- M.T. Tavassoly, A. Darudi, "Reconstruction of interfering wave-fronts by analyzing their interference pattern in three dimensions", Optic communications 175 (2000) 43 – 50.
- 3- A. Darudi, M.T. Tavassoly, "Interferometric specification of lens (single and doublet) parameters", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 25 (2001) 79- 90.
- 4- Ehsan A. Akhlaghi, Ahmad Darudi, M. Taghi Tavassoly, "Reconstructing the phase distribution of two interfering wavefronts by analysis of their nonlocalized fringes with an iterative method", Optics Express Vol. 19, No. 17 (2011) 2356.
- 5- M. Born, E. Wolf, Principles of Optics 7th Ed. (Cambridge University Press, 1999) p. xxvi.
- 6- A. A. Michelson, Phil. Mag. (5) 13 (1882) 226.
- 7- M. T. Tavassoly, H. Sahl-loul-bai, M. Salehi, H. R. Kholesifard, "Fresnel diffraction from a step in reflection and transmission", Ir. J. Phys Vol. 2, No. 5 (2001) 237-246.
- 8- M. T. Tavassoly, M. Amiri, E. Karimi, H. R. Kholesifard, "Spectral modification by line singularity in Fresnel diffraction from 1D phase step", Optics Communication 255 (2005), 23-34.
- 9- M. Amiri, M. T. Tavassoly, "Fresnel diffraction from 1D and 2D phase steps in reflection and transmission modes", Optics Communication 272 (2007) 349-361.
- 10- M. T. Tavassoly, M. Amiri, A. Darudi, R. Alipour, A. Saber, A. R. Moradi, "Optical diffractometry", J. Opt. Soc. Am. A Vol. 26, No. 3 (2009) 540-547.
- 11- M. T. Tavassoly, I. M. Haghighi, Kh. Hassani, "Application of Fresnel diffraction from a phase step to the measurement of film thickness", Applied Optics Vol. 48, No. 29 (2009) 5497-5501.
- 12- M. T. Tavassoly, A. Saber, "Optical refractometry based on Fresnel diffraction from a phase wedge", Optics Letters Vol. 35, No. 21 (2010) 3676.
- 13- A. Sabatyan, M. T. Tavassoly, "Determination of refractive indices of liquids by Fresnel diffraction", Optics & Laser Technology 41 (2009), 892- 896.
- 14- R. Aalipour, M. T. Tavassoly, A. Darudi, "Superimposing the waves diffracted from two similar hot and cold wires provides the temperature profile around the hot one", Applied Optics Vol. 49, No. 22 (2010).
- 15- A. Sabatyan, M. T. Tavassoly, "Application of Fresnel diffraction to nondestructive measurement of the reflective index of optical fibers", Optical Engineering 46 (2007) 128001.
- 16- E. Wolf, Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 1370.
- 17- E. Wolf, F. V. James, "Correlation induced spectral changes", Rep. Prog. Phys. 59 (1996) 771- 818.
- 18- G. Gbur, T. D. Visser, E. Wolf, "Anomalous Behavior of Spectra near Phase singularities of Focused Waves", Phys. Rev. Lett. Vol. 88, No. 1 (2002) 013901-4.
- 19- M. Amiri, M. T. Tavassoly, "Spectral anomalies near phase singularities in reflection at Brewster's angle and colored catastrophes", Optics Letters Vol. 33 No. 16 (2008) 1863-1865.
- 20- M. Amiri, M. T. Tavassoly, H. Dolatkah, Z. Alirezai, "Tunable spectral shifts and spectral switches by controllable phase modulation", Optics Express Vol. 18, No. 24 (2010) 25089-101
- 21- M. T. Tavassoly, M. Dashtdar, M. Amiri, "Spectral modification by diffraction and scattering", Advances in Optical Technology Vol. 2010, Article ID 613728.
- 23- J. A. Ogilvy, "Wave scattering from rough surfaces", Rep. Prog. Phys. 50 (1987) 1553-1608.
- 24- W. T. Welford, "Optical estimation of statistics of surface roughness from light