

## اندازه‌گیری عمق دید جوئی با استفاده از تصویربرداری از میان جو از یک توری خطی بازتابی با تابع برتابندگی سینوسی و گام کاهشی در امتداد بردار شبکه آن

الهه حریری<sup>۱</sup>، سیف‌اله رسولی<sup>۲\*</sup> و سیامک خادمی<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد، دانشکده علوم، گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
۲. دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران  
۳. دانشیار، دانشکده علوم، گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(دریافت: ۹۴/۱/۲۶، پذیرش نهایی: ۹۴/۱۱/۱۱)

### چکیده

در این مقاله روش جدیدی برای تعیین عمق دید جوئی، با استفاده از تصویربرداری از یک توری خطی بازتابی با تابع برتابندگی سینوسی که گام آن متغیر است عرضه می‌شود. اندازه‌گیری عمق دید در ساعت مشخصی از روزهای متفاوت ماه‌های آذر و دی ۱۳۹۱ که عمق دید متفاوتی داشتند صورت گرفت. یک توری خطی سینوسی با گام متغیر در محدوده ۷ تا ۱۱۰ میلی‌متر در مساحت ۱ متر در ۳ متر روی مقوای سفیدرنگ و مات چاپ شد و توری روی قاب چوبی مناسبی تعبیه و به‌طور عمودی در ارتفاع ۳ متری از سطح زمین نصب شد. از این توری از فاصله ۴۷۵ متری با تلسکوپی که در کانون آن دوربین CCD قرار داده شده بود تصویربرداری شد. تصاویر ثبت شده با استفاده از نرم‌افزار مَتَلَب تحلیل و نمایانی موضعی تصاویر توری تعیین شد. گرد و غبار موجود در جو باعث از بین رفتن تفکیک گام‌های کوچک‌تر توری می‌شود. با تعیین کوچک‌ترین گام قابل مشاهده در تصاویر، حد تفکیک زاویه‌ای از فاصله ۴۷۵ متری تعیین شد. با مقایسه کوچک‌ترین زاویه دید به‌دست آمده با کوچک‌ترین زاویه مربوط به اندازه‌گیری عمق دید با چشم غیر مسلح و فرض خطی بودن حجم آلاینده‌ها نسبت به طول مسیر دید، عمق دید به‌دست آمد. مقادیر عمق دید به‌دست آمده از این روش با عمق دید گزارش شده ایستگاه هواشناسی فرودگاه زنجان که در مجاورت محل اندازه‌گیری قرار دارد، مقایسه شد که مطابقت خوبی بین آنها مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: عمق دید جوئی، توری خطی با دامنه سینوسی و گام متغیر، تصویربرداری و انتشار نور از میان جو، ریزگردها، گرد و غبار.

### ۱. مقدمه

جوئی است. این ذرات عارضه‌های پوستی هم ایجاد می‌کنند. افزایش غلظت آلاینده‌های جوئی در حوزه اقتصاد هزینه‌های مالی ناخواسته زیادی را به کشورها تحمیل می‌کند و یکی از عوامل بازدارنده رونق صنعت گردشگری است. همچنین آلاینده‌های جوئی کیفیت و ماندگاری مواد و مصالح را کاهش می‌دهند. درعین حال، غلظت زیاد آلاینده‌های جوئی عامل برهم زنده بودجه تابشی دریافتی از خورشید در سطح زمین است.

کم شدن نمایانی یا عمق دید جوئی از دیگر آثار حضور آلاینده‌ها در جو است. ذراتی چون گرد و غبار، شن، برف، دوده، و یا قطرات آب موجود در جو، باعث جذب و پراکندگی بخشی از نورگسیلی از اجسام هدف

یکی از عوارض زیان‌بار تغییرات آب و هوایی یا تغییر اقلیم که در سال‌های اخیر بیشتر دامنگیر کشورهای خاورمیانه و البته ایران شده، افزایش غلظت آلاینده‌های ذره‌ای جو است. غلظت زیاد آلاینده‌های جوئی تاثیرات مخربی بر زندگی انسان‌ها، جانوران و گیاهان دارد. افزایش ذرات آلاینده جوئی مسبب مشکلات عدیده‌ای در حوزه‌های گوناگون سلامت و بهداشت، کشاورزی، اقتصاد، و گردشگری است. در حوزه بهداشت و سلامت، غلظت زیاد این ذرات، کیفیت دید و تنفس را کاهش می‌دهد و موجب افزایش بیماری‌های تنفسی و قلبی می‌شود. همچنین مشکلات روحی و روانی و بیماری افسردگی از دیگر تبعات افزایش غلظت آلاینده‌های

برای ناظر قابل تفکیک باشد. این بدان معنی است که با کاهش نمایانی جوّی، عمق دید جوّی و حدّ تفکیک زاویه‌ای کاهش می‌یابد. کاهش حدّ تفکیک زاویه‌ای مترادف با افزایش کمیّۀ زاویه فضایی قابل تفکیک است.

اندازه‌گیری عمق دید جوّی در شب به علت تاریکی هوا کمی متفاوت است. برای اندازه‌گیری عمق دید در شب، از یک منبع نوری با شدت مشخص در حکم هدف استفاده می‌شود. برای نمونه می‌توان با تعیین شدت روشنایی چراغ‌هایی که در پیرامون ایستگاه‌های هواشناسی و در فاصله‌های گوناگون و مشخصی از مشاهده‌گر قرار دارند، عمق دید را تعیین کرد (هاوتیر و همکاران، ۲۰۰۶).

علاوه بر روش‌های مبتنی بر مشاهده مستقیم با چشم غیر مسلح، روش‌های دستگاهی متنوعی برای تعیین عمق دید جوّی وجود دارد که می‌توان از جمله به روش‌هایی مانند عکسبرداری از جاده و تحلیل تصاویر ثبت شده (هاوتیر و همکاران، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳)، استفاده از روش لیدار پالسی میکروموج (جینجیا و همکاران، ۲۰۰۷)، عکسبرداری از افق و تحلیل تصویر آن (هاوتیر و همکاران، ۲۰۰۶)، اندازه‌گیری عمق دید با استفاده از دیدسنج (خیی و همکاران، ۲۰۰۸)، تعیین عمق نوری هواویزها با استفاده از داده‌های دید افقی و سنجش از دور (خوش‌سیما و همکاران، ۱۳۹۲)، تصویربرداری رقمی و پردازش آنها (لو و همکاران، ۲۰۰۲ و وانگ و همکاران، ۲۰۱۴)، عکسبرداری از تابلوهای مخصوص و تحلیل تصاویر آن (هاوتیر و همکاران، ۲۰۰۸ و کوان، ۲۰۰۴)، و استفاده از روش تحلیل لک و پیسه‌های باریکه لیرزی پس از انتشار از میسر نوری (جی‌آنگ و همکاران، ۲۰۱۳) اشاره کرد.

در این مقاله روشی جدید برای اندازه‌گیری عمق دید جوّی عرضه می‌شود. اساس این روش مبتنی بر تصویربرداری از میان جوّ از یک توری شبه‌خطی بازتابی با تابع برتابندگی سینوسی، استوار است. مزایای عمده این روش سادگی، هزینه کم و دقت زیاد آن است.

و در نتیجه کاهش عمق دید می‌شوند. وجود عمق دید مناسب، عامل تعیین‌کننده‌ای برای ایمنی حمل و نقل در هر سه نوع حمل و نقل زمینی، هوایی، و دریایی است. بنابراین اندازه‌گیری عمق دید در این حوزه بسیار مورد توجه است. تعیین روند کلی تغییرات نمایانی یا عمق دید جوّی در ماه‌های سال و سال‌های متوالی یکی از روش‌های علمی مواجهه با پدیده افزایش ریزگردها در جوّ است و می‌تواند کمک شایانی در چاره‌یابی مسئله کند (لای و سیکویرا، ۲۰۰۱)، (تسای و همکاران، ۲۰۰۷). با افزایش غلظت آلاینده‌های جوّی یا ریزگردها، عمق دید یا نمایانی جوّی کاهش می‌یابد. با کاهش عمق دید در جاده‌ها و بزرگراه‌ها، فاصله قابل دید خودرو یا اجسام مقابل رانندگان کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی برای جلوگیری از تصادف وسایل نقلیه، نیاز است تا سرعت مطمئنه خودروها کاهش یابد و این مستلزم صرف زمان زیادتری برای طی مسیرهای مشخص خواهد بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش عمق دید، یکی از مهم‌ترین عوامل تصادفات جاده‌ای است (کوان، ۲۰۰۴). آمار نشان می‌دهد که در اثر کاهش عمق دید به علت مه جوّی به مقدار کمتر از یک چهارم مایل (حدود ۴۰۰ متر)، سالانه نزدیک به ۷۰۰ مورد مرگ در ایالات متحد امریکا و بیش از ۱۰۰ مورد مرگ در فرانسه رخ داده است (هاوتیر و همکاران، ۲۰۱۳).

بنا به تعریف، عمق دید جوّی در طول روز بیشترین فاصله‌ای است که یک جسم سیاه‌رنگ با ابعاد مشخصی در امتداد افق قابل شناسایی باشد (جینجیا و همکاران، ۲۰۰۷ و هاوتیر و همکاران، ۲۰۰۸). در هوای پاک و تمیز که عاری از آلاینده‌های جوّی است بیشینه مقدار این فاصله با رابطه حدّ پراش مربوط به دهانه ورودی چشم انسان محدود می‌شود.

با داشتن ابعاد نوعی جسم استاندارد، می‌توان عمق دید جوّی را که از جنس طول است به کمیّۀ زاویه فضایی قابل تفکیک یا حدّ تفکیک زاویه‌ای تبدیل کرد. هنگامی که آلاینده‌های جوّی افزایش می‌یابند برای دیدن جسم استاندارد باید فاصله ناظر تا جسم کمتر شود تا دوباره

## ۲. روش پژوهش، مبانی نظری

در اپتیک ساختارهای دوره‌ای فضایی را «توری» می‌نامند. دوره تناوب فضایی یک توری، گام آن نامیده می‌شود. ساده‌ترین توری، خانواده‌ای از خطوط موازی و هم‌فاصله است که به آن «توری خطی» می‌گویند. چنانچه نور از یک ساختار دوره‌ای عبور کند توزیع دامنه و شدت پس از عبور از آن، دوره‌ای خواهد بود که در این حالت توری را «توری عبوری» می‌نامند. اگر از چنین ساختاری در بازتاب استفاده شود، آن را «توری بازتابی» می‌خوانند. توزیع شدت نور یکنواخت پس از بازتاب از یک توری بازتابی، دوره‌ای خواهد بود. چنانچه گام یا دوره تناوب فضایی یک توری در سرتاسر آن ثابت نباشد و در عین حال نسبت به مختصات فضایی کند تغییر باشد، ساختار را «شبه توری» می‌نامند.

در این تحقیق، برای پیاده‌سازی روش تجربی مدنظر و اندازه‌گیری‌ها، با استفاده از نرم‌افزار مت‌کب یک طرح شبه‌تناوبی یک‌بعدی طراحی شد؛ به نحوی که گام آن در امتداد عمود بر خطوطش به تدریج کاهش یابد و تابعیت عبور یا بازتاب آن در بازه هریک از گام‌ها سینوسی باشد. چنین ساختار دوره‌ای فضایی را توری شبه‌خطی سینوسی می‌نامیم. از این ساختار می‌توان هم در عبور و هم در بازتاب استفاده کرد. چنانچه این تابعیت فضایی را روی یک مقوا چاپ کنیم و نور بتواند صرفاً از آن بازتاب یابد، ساختار را بازتابی می‌نامند. شدت نور بازتابیده از چنین ساختاری را که موسوم به توزیع برتابندگی نور است، می‌توان برحسب تابعی از مختصات فضایی نقاط روی توری و شدت نور تابیده شده بر سطح توری بیان کرد. حال توزیع برتابندگی از سطح یک توری خطی سینوسی با گام متغیر را به صورت رابطه (۱) نمایش می‌دهیم:

$$I(x) = 1 + a_0(x) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda(x)}x\right), \quad (1)$$

که در آن،  $a_0(x)$  نمایانی موضعی خطوط توری،  $\Lambda(x)$  گام موضعی خطوط توری و  $x$  مختصه محور عمود بر خطوط توری است. در اینجا برای سادگی، تابع توزیع برتابندگی را به شدت نور تابیده شده بر سطح توری

به‌نجار کرده‌ایم. به عبارتی شدت نور تابیده شده بر سطح توری را در سرتاسر سطح توری یکنواخت و برابر مقدار واحد در نظر می‌گیریم.

در حوالی هر خط از توری، نمایانی موضعی خطوط توری یا تباین طرح دوره‌ای را می‌توان با رابطه (۲) تعیین کرد:

$$a_0(x) = \frac{(I)_{\max}(x) - (I)_{\min}(x)}{(I)_{\max}(x) + (I)_{\min}(x)}. \quad (2)$$

به عبارتی می‌توان با اندازه‌گیری کمینه و بیشینه شدت در هر گام از توری، نمایانی موضعی خطوط توری را محاسبه کرد. در حالت ایدئال برای یک توری چاپ شده روی یک مقوا، بیشینه و کمینه شدت در سرتاسر طرح دوره‌ای باید به ترتیب برابر با یک و صفر باشد. اما در عمل به‌خاطر آثار ناشی از تابع انتقال اپتیکی چاپگر و دانه‌بندی کاغذ مقوا، برای گام‌های فضایی کوچک طرح (یا بسامدهای فضایی زیاد) این شرایط مهیا نمی‌شود (معدنی‌پور و توسلی، ۲۰۰۷). اگر بسامد قطع چاپگر بزرگ‌تر از بزرگ‌ترین بسامد فضایی موجود در طرح چاپ شده باشد، باز هم می‌توان نمایانی موضعی خطوط توری را در سرتاسر سطح آن همانند حالت ایدئال برابر با یک در نظر گرفت ( $a_0(x) = 1$ ).

برای چاپ توری مورد استفاده در اندازه‌گیری‌ها، گام موضعی خطوط توری،  $\Lambda(x)$ ، را به صورت تابعی کاهشی از  $x$  و به شکل رابطه (۳) در نظر گرفتیم:

$$\Lambda(x) = \frac{1}{a + bx}, \quad (3)$$

که در آن،  $x$  مختصه طول یا فاصله از ابتدای توری و واحد آن سانتی‌متر است. ثابت‌های  $a = 1/11$  و  $b = \frac{1/0.7 - 1/11}{300} = 0.004458$  انتخاب شدند به نحوی که در  $x = 0$  توری بیشترین گام یعنی ۱۱ سانتی‌متر را دارد و در انتهای توری در سمت راست آن، گام ۷ میلی‌متر می‌شود. لازم به ذکر است که انتخاب شکل تابعی متغیر برای  $\Lambda(x)$  می‌تواند به شکل‌های دیگری هم صورت گیرد. توزیع شدت تصویر این توری در صفحه کانون پشتی یک تلسکوپ به صورت رابطه (۴) داده می‌شود:

از محل تلسکوپ، حد تفکیک زاویه‌ای از محل تلسکوپ،  $\alpha_c$ ، می‌نامیم. در چنین شرایطی دیگر گام‌های واقع در  $x$ ‌های بزرگ قابل مشاهده و تمییز با دستگاه تصویربرداری نخواهند بود و این بخش از توری، به صورت ساختاری یکنواخت دیده خواهد شد. لذا در هر اندازه‌گیری، کوچک‌ترین گام تفکیک‌پذیر، تعیین و حد تفکیک زاویه‌ای متناظر با آن محاسبه می‌شود. در حضور آلاینده‌های جو، حد تفکیک زاویه‌ای برای تلسکوپ با رابطه (۷) تعیین می‌شود:

$$\tan(\alpha_c) \approx \alpha_c = \frac{\Lambda(X_c)/2}{L} = \frac{\Lambda(X_c)}{2L} \quad (7)$$

که در آن،  $L$  فاصله توری از تلسکوپ و  $\Lambda(X_c)$  کوچک‌ترین گام از توری است که در تصویر توری قابل تفکیک است. ضریب ۲ در مخرج رابطه فوق ناشی از این واقعیت است که تشخیص دوره‌ای بودن طرح شدت توری در یک گام مشخص از آن با تلسکوپ، متناظر با مشاهده جسمی با طولی برابر با نصف گام توری است. به عبارتی، لازمه تشخیص تناوبی بودن طرح توری، تفکیک فضایی بیشینه و کمینه تابع برتابندگی توری است که فاصله آنها از هم نصف گام توری است. با جای‌گذاری رابطه (۳) در رابطه (۷) داریم:

$$\alpha_c = \frac{1/(1/11 + 0.004458 X_c)}{2 \times 475 \times 10^2} \quad (8)$$

در بهترین شرایط جو، عامل اصلی محدود کننده تفکیک گام‌های کوچک توری، حد پراش ناشی از دهانه تلسکوپ است که حد تفکیک زاویه‌ای تلسکوپ نامیده می‌شود و متناسب با طول موج نور،  $\lambda$ ، و عکس قطر

$$(\alpha_c)_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{D_t} \text{ است، } D_t \text{، یا}$$

این مقدار تفکیک زاویه‌ای صرفاً برای یک تلسکوپ ایدئال و مسیر انتشار عاری از تلاطم و آلاینده‌های جو، میسر می‌شود. در حضور تلاطم و آلاینده‌های جو، تفکیک زاویه‌ای کاهش می‌یابد و مقدار آن از  $1.22 \frac{\lambda}{D_t}$  فراتر می‌رود.

شایان ذکر است که اثرات تلاطم جو در نوردهی‌های کمتر از یک‌صدم ثانیه عملاً فقط باعث انحراف‌های

$$I'(x) = 1 + a'(x) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda(x)} x\right) \quad (4)$$

که در آن،  $\Lambda'(x)$  گام موضعی خطوط توری تصویر است و از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\Lambda'(x) = \frac{q}{p} \Lambda(x) \approx \frac{f}{p} \Lambda(x) \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $p$ ،  $q$  و  $f$  به ترتیب فاصله توری از تلسکوپ، فاصله تصویر از آینه تلسکوپ و فاصله کانونی آینه اصلی تلسکوپ است. با توجه به اینکه فاصله توری از تلسکوپ خیلی بزرگ‌تر از فاصله تصویر از آن است،  $p \gg q$ ، در رابطه (۵) از رابطه  $q \approx f$  استفاده شده است. شایان ذکر است که در تصویربرداری از توری چاپ شده روی مقوا با تلسکوپ، گام فضایی تصویر با ضریب  $f/p$  تغییر می‌کند و اثرات جو باعث تغییر شکل تابعیت  $a_0(x)$  در رابطه (۱) به صورت  $a'(x)$  می‌شود.

در رابطه (۴)، نمایانی موضعی خطوط توری تصویر،  $a'(x)$ ، پارامتری است که به صورت تجربی اندازه‌گیری می‌شود. برای توری تصویر، مقادیر نمایانی موضعی به جای رابطه (۲) با رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$a'(x) = \frac{(I')_{\max}(x) - (I')_{\min}(x)}{(I')_{\max}(x) + (I')_{\min}(x)} \quad (6)$$

همواره کمینه و بیشینه‌های شدت در تصاویر گوناگون ثبت شده از توری، از مقادیر اولیه آنها روی توری، یعنی صفر و یک، فاصله می‌گیرد. این تفاوت برای گام‌های کوچک بیشتر است و عملاً در هر آزمایشی به‌ازای مقدار مشخصی از گام توری، نمایانی تصویر صفر می‌شود. عوامل گوناگونی باعث می‌شود تا  $a'(x)$  برای مقادیر کوچک‌تر  $\Lambda'(x)$  سریع‌تر به صفر میل کند. این عوامل شامل توان تفکیک تلسکوپ، کیفیت سطوح اپتیکی عنصرهای اپتیکی واقع در مسیر تصویربرداری، دانه‌بندی مقوای مورد استفاده برای چاپ طرح تناوبی، کیفیت چاپگر، و آثار جو مانند تلاطم و کدورت جو هستند. برای هر تصویر ثبت شده، مکان یا مختصه  $x$  مربوط به گامی از تصویر توری را که مقدار اندازه‌گیری شده نمایانی یعنی  $a'(x)$  تقریباً برابر با صفر باشد، با  $X_c$  نشان می‌دهیم و زاویه فضایی دیدن نصف این گام از توری را

فاصله مطمئنه یا عمق دید را با استفاده از تصویربرداری از یک توری که بسیار نزدیک‌تر از فاصله مطمئنه باشد، می‌توان تعیین کرد. چنانچه با تلسکوپ اجسامی بسیار کوچک‌تر از ابعاد جسم استاندارد واقع در فواصل نزدیک تفکیک‌پذیر باشند، انتظار می‌رود جسمی با ابعاد استاندارد از فواصل دورتر قابل تفکیک باشد. فرض کنید با تلسکوپ قادر باشیم جسمی با ابعاد یک‌دهم جسم استاندارد را از فاصله مشخصی (در این تحقیق از فاصله ۴۷۵ متری) تشخیص دهیم. آن‌گاه با فرض خطی بودن آثار کدر بودن جوئی می‌توان نتیجه گرفت که جسمی با ابعاد استاندارد از فاصله ۴۷۵۰ متری قابل تفکیک خواهد بود. لازم به ذکر است که فرض خطی بودن که به آن اشاره شد در تقریب اول درست است و تابعیت دقیق کدر بودن جوئی با مسافت با استفاده از قانون بیر-لامبرت به صورت نمایی تعیین می‌شود (آخمانوف، ۱۹۹۷).

چون در حمل و نقل جاده‌ای به‌جای استفاده از ابعاد جسم استاندارد و فاصله مطمئنه از معیار تفکیک زاویه‌ای مطمئنه با چشم استفاده می‌شود، لذا در تقریب خطی قانون بیر-لامبرت، با فرض اینکه غلظت آلاینده‌های جوئی در طول مسیر ثابت باشد و مقدار آن چندان زیاد نباشد، می‌توان کدر بودن جوئی را به صورت تابعی خطی و البته افزایشی برحسب طول مسیر انتشار باریکه نوری در نظر گرفت و عمق دید جوئی  $V_{met}$  را با استفاده از رابطه (۹) تعیین کرد:

$$V_{met} = \frac{(\alpha_{safe})_t}{\alpha_c} L \quad (9)$$

با جای‌گذاری رابطه (۸) و  $(\alpha_{safe})_t = 0.015^\circ = 2.6 \times 10^{-4} \text{ rad}$  در رابطه (۹) و برابری  $L = 475 \text{ m}$  داریم:

$$V_{met} = \frac{2.6 \times 10^{-4}}{1 / (1/11 + 0.004458 X_c)} L = \frac{2 \times 475 \times 10^2}{1180770 \times (1/11 + 0.004458 X_c)} \quad (10)$$

که در آن،  $X_c$  برحسب سانتی‌متر جایگزین می‌شود و در نتیجه مقدار  $V_{met}$  هم واحد سانتی‌متر را خواهد داشت. نکته‌ای که ذکر آن حائز اهمیت است بازه قابل اندازه‌گیری برای  $V_{met}$  در این روش است. در این کار،

موضعی خطوط تصویر توری می‌شود و نمایانی تصویر توری را به‌طور مستقیم تحت‌تاثیر قرار نمی‌دهد (رسولی و توسلی، ۲۰۰۶a, b و رسولی و همکاران، ۲۰۰۶). به همین علت برای کمینه کردن آثار تلاطم جوئی روی تصاویر توری، می‌توان تصاویر را با نوردهی کم ثبت کرد تا عامل اصلی کاهش حد تفکیک زاویه‌ای فقط حضور آلاینده‌های جوئی باشد.

برای یک تلسکوپ، بهترین تفکیک زاویه‌ای در شرایط مساعد جوئی رخ می‌دهد. برای تلسکوپ مورد استفاده در این تحقیق، با لحاظ کردن قطر دهانه ورودی تلسکوپ برابر با ۲۰ سانتی‌متر و با در نظر گرفتن طول موج میانگین نور برابر با ۵۵۰ نانومتر، حد تفکیک زاویه‌ای یک صدم دقیقه قوسی، یا تقریباً سه میکرورادیان،  $(\alpha_c)'_{min} = 3.35 \mu\text{rad} = 0.012'$  به دست می‌آید. به لحاظ نظری و در غیاب آثار جوئی، با این تلسکوپ از فاصله ۴۷۵ متری (تلسکوپ تا توری) دو نقطه به فاصله ۱/۶ میلی‌متر تفکیک‌پذیر خواهد بود.

به‌همین قیاس برای چشم انسان با لحاظ کردن قطر دهانه ورودی مردمک چشم برابر با  $D_e = 4 \text{ mm}$ ، حد تفکیک زاویه‌ای نیم دقیقه قوسی یا ۰/۱۷ میلی‌رادیان به دست می‌آید که معادل تفکیک دو نقطه با جدایی ۱۷ سانتی‌متر از هم در فاصله یک کیلومتری است (یانوف و دووکر، ۲۰۰۹).

البته شایان ذکر است که برای بالا بردن ضریب اطمینان و ایمنی در حمل و نقل جاده‌ای، تفکیک زاویه‌ای مطمئنه برای چشم غیر مسلح را  $(\alpha_{safe})_e = 0.5^\circ$  در نظر می‌گیرند. بدیهی است با افزایش غلظت آلاینده‌های جوئی و ثابت در نظر گرفتن تفکیک زاویه‌ای مطمئنه چشم، فاصله مطمئنه برای تفکیک جسم با ابعاد مشخص برای ناظر کاهش می‌یابد و این مترادف با کاهش عمق دید است.

به‌طور مشابه، می‌توان تفکیک زاویه‌ای مطمئنه را در تصویرگیری با تلسکوپ هم با ضریبی مشابه بالاتر در نظر گرفت. لذا در این تحقیق به‌جای حد نظری زاویه فضایی قابل تفکیک با تلسکوپ یعنی  $(\alpha_c)'_{min} = 3.35 \mu\text{rad} = 0.01'$  مقدار تفکیک زاویه‌ای مطمئنه را  $(\alpha_{safe})_2 = 0.015^\circ$  در نظر می‌گیریم.

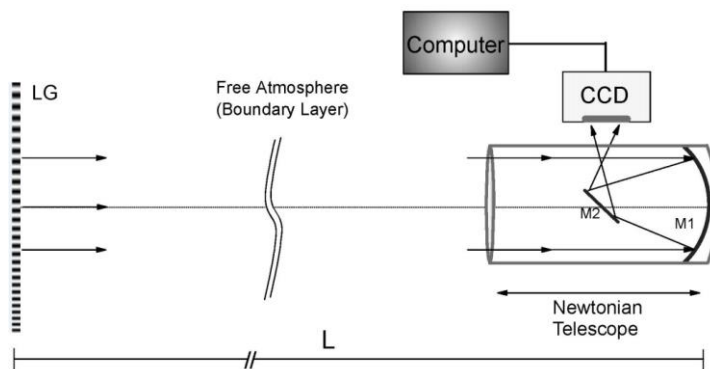
در شکل ۲ طرحی از توری مورد استفاده که با نرم افزار مَت کَب رسم شده، آورده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود دوره تناوب فضایی یا گام این توری با افزایش فاصله از سمت چپ آن کاهش می یابد. تابعیت گام این توری به صورت  $\Lambda(x) = \frac{1}{1/11 + 0.004458x}$  در امتداد طول آن تغییر می کند. به نحوی که در مقیاس طول ۳۰۰ سانتی متری توری، گام آن در سمت چپ ۱۱ سانتی متر و در انتهای سمت راست ۷ میلی متر می شود.

از ۱۱ آذر ماه تا ۱۰ دی ماه سال ۱۳۹۱، به استثنای ۲۶ آذر (به علت بارش برف) و ۱ دی (به علت بارش باران)، هر روز رأس ساعت ۱۶:۳۰ تصویربرداری از توری سینوسی صورت گرفت و همه تصاویر به دست آمده، در رایانه ثبت شد. انتخاب ساعت مشخصی از روز برای داده برداری کمک می کند تا شرایط تقریباً یکسانی برای نور زمینه داشته باشیم. هر چند تغییرات فصلی طول شبانه روز مانع محقق شدن کامل این شرایط بود. چهار نمونه از تصاویر ثبت شده از توری در چهار روز متفاوت در شکل ۳ نشان داده شده است. برای همه تصاویر ثبت شده در روزهای گوناگون، خم های توزیع شدت تصویر در راستای افقی در امتداد یک سطر مشخص رسم شد. همه کارهای تحلیل تصاویر و محاسبات با استفاده از نرم افزار مَت کَب صورت گرفت. نمودارهای یک بُعدی شدت در امتداد عمود بر خطوط توری برای هر یک از تصاویر در کنار آنها آورده شده است.

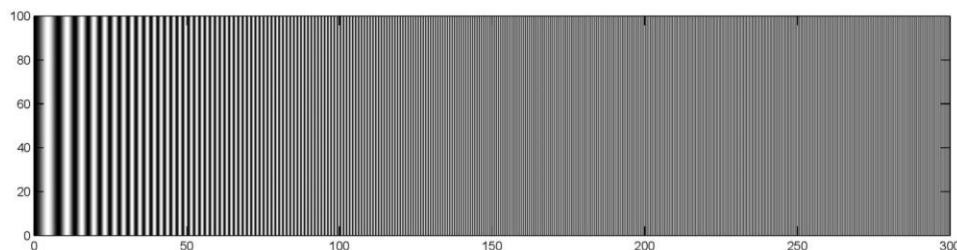
مقدار  $x_c$  در بازه صفر تا ۳۰۰ سانتی متر می تواند تغییر کند و در نتیجه مقدار  $v_{met}$  بین ۱ km تا ۱۷ km به دست می آید. بدیهی است برای اندازه گیری مقادیر کم عمق دید جوئی باید توری را نزدیک تر آورد. اندازه گیری مقادیر عمق دید جوئی فراتر از ۱۷ km معمولاً ضرورت پیدا نمی کند هر چند برای این منظور هم می توان گام های کوچک تری برای توری در نظر گرفت که این کار مستلزم استفاده از تلسکوپی با دهانه بزرگ تر است.

### ۳. چیدمان داده برداری های تجربی و اندازه گیری

یک توری خطی سینوسی با گام متغیر و با تابعیت فضایی  $\Lambda(x) = \frac{1}{1/11 + 0.004458x}$  با استفاده از نرم افزار مَت کَب طراحی و در ابعاد  $3 \times 1 m^2$  روی یک صفحه کاغذ مقوایی سفیدرنگ چاپ شد. کمترین دوره تناوب فضایی توری چاپ شده ۷ میلی متر و بیشترین مقدار آن ۱۱ سانتی متر بود. این توری در فاصله ۴۷۵ متری از محل تلسکوپ، روی پایه فلزی و ثابت در ارتفاع ۳ متری از سطح زمین نصب شد. در این آزمایش از یک تلسکوپ بازتابی مدل نیوتنی با فاصله کانونی ۱۰۰۰ میلی متر و قطر دهانه ۲۰۰ میلی متر استفاده شد. تلسکوپ در داخل اتاقی که پنجره ای مشرف بر سطح توری داشت قرار داده شد. مسیر عبور نور از بالای یک مزرعه کشاورزی بود. از یک دوربین CCD با تعداد  $570 \times 720$  پیکسل برای ثبت تصاویر توری استفاده شد. این دوربین در کانون پشتی تلسکوپ نصب شد. در شکل ۱ نمای از چیدمان مورد استفاده برای داده برداری های تجربی آورده شده است.



شکل ۱. چیدمان داده برداری های تجربی که در آن LG توری خطی با گام متغیر و با تابع پرتابندگی سینوسی است و M1 و M2 نماینده آینه های تلسکوپ نیوتنی هستند.

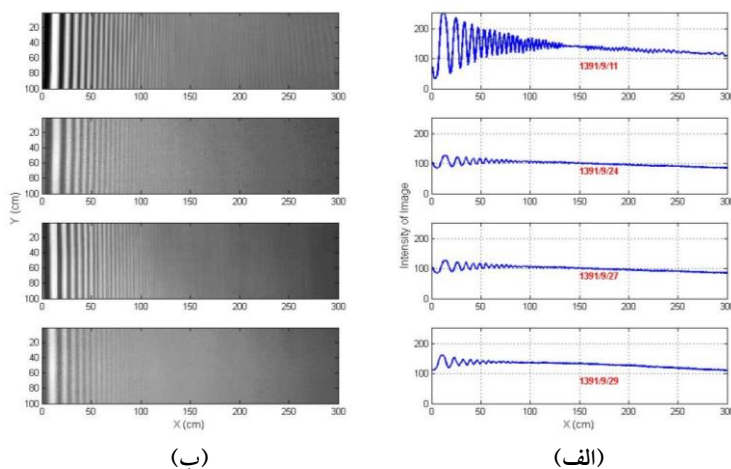


شکل ۲. طرحی از یک توری خطی که خطوط آن همگی خط‌های مستقیم و موازی‌اند و تابع برتابندگی آن در هر گام سینوسی است. بسامد فضایی این توری با افزایش فاصله از سمت چپ با تابعیت  $x = 0.004458 + 1/11$  افزایش می‌یابد. در مقیاس طول ۳۰۰ سانتی‌متری توری، گام آن در سمت چپ ۱۱ سانتی‌متر و در انتهای سمت راست ۷ میلی‌متر است. که در آن بسامدهای فضایی زیاد به‌خاطر نبود تفکیک صفحه نمایش مشاهده نمی‌شود.

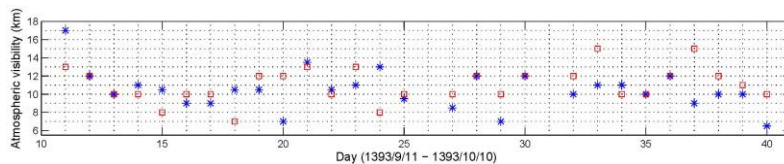
تصویر برای هر یک از تصاویر ثبت شده در روزهای گوناگون تعیین کرد. مکان یا مختصه  $x$  مربوط به گامی از تصویر توری که مقدار اندازه‌گیری شده نمایانی یعنی  $a(x)$  را تقریباً برابر با صفر تعیین می‌کنیم و آن را با  $X_c$  نشان می‌دهیم. در واقع این مکان جایی است که تابعیت نوسانی نمودار شدت یک‌بعدی تصویر توری از بین می‌رود و دیگر تناوبی بودن رفتار آن دیده نمی‌شود. مقدار  $X_c$  برای تصاویر ثبت شده از توری در چهار روز ۱۱، ۲۴، ۲۷، و ۲۹ آذرماه ۱۳۹۱ که در شکل ۳-الف نمودارهای شدت یک‌بعدی آنها آورده شده است، به ترتیب برابر با ۳۰۰، ۲۲۰، ۱۳۵، و ۱۰۵ سانتی‌متر به‌دست آمد. با استفاده از معادله (۱۰) عمق دید برای این روزها به ترتیب ۱۷، ۱۳، ۸/۵ و ۷ کیلومتر محاسبه شد.

فرض کنید جسمی را در محل توری قرار داده‌ایم و از محل تلسکوپ و با تلسکوپ به آن نگاه می‌کنیم. در شرایطی که این جسم با تلسکوپ در آستانه دیده نشدن قرار گیرد آن‌گاه طول جسم حاضر برابر با نصف گام توری در  $x = X_c$  است و زاویه فضایی چنین جسمی از محل تلسکوپ، زاویه فضایی حدی قابل دید با تلسکوپ، یا  $\alpha_c$  نامیده می‌شود. برای همه تصاویر ثبت شده، همانند آنچه که در مورد نمودارهای شکل ۳ دیده می‌شود، می‌توان مکان نمایانی تقریباً برابر صفر را تعیین و آن را با  $X_c$  نشان داد و در نهایت با استفاده از معادله (۱۰) عمق دید را برای روز ثبت داده محاسبه کرد.

با استفاده از رابطه (۶) و نمودارهای یک‌بعدی شدت تصاویر توری که در امتداد عمود بر خطوط توری رسم شده‌اند، می‌توان نمایانی موضعی را در سرتاسر طول



شکل ۳. در ستون (ب) چهار تصویر نوعی توری که با استفاده از یک تلسکوپ نیوتنی و یک دوربین CCD در روزهای ۱۱، ۲۴، ۲۷ و ۲۹ آذرماه ۱۳۹۱ ثبت شده‌اند، به ترتیب از بالا به پایین آورده شده‌است. نمودارهای یک‌بعدی توزیع شدت آنها در امتداد یک سطر از داده‌های تصاویر در ستون (الف)، آورده شده است. تاریخ ثبت هر یک از تصاویر در داخل کادر شکل‌های ستون (الف) آورده شده است. همه تصاویر در ساعت ۱۶:۳۰ روزهای موردنظر ثبت شده‌اند.



شکل ۴. در این نمودار عمق دید جوئی مربوط به روزهای ۱۱ آذر تا ۱۰ دی ماه سال ۹۱ به استثنای ۲۶ آذر و ۱ دی، که به علت بارش برف و باران امکان اجرای آزمایش نبود، آمده است. نقطه‌های سرخ‌رنگ (مربع‌ها) معرف عمق دید گزارش شده ایستگاه هواشناسی فرودگاه زنجان و نقطه‌های آبی‌رنگ (ستاره‌ها) مربوط به مقادیر عمق دید جوئی به‌دست آمده با استفاده از توری سینوسی با گام متغیر است.

از ۳ کیلومتر بوده است.

برای افزایش کیفیت تصاویر و حساسیتِ روش عرضه شده، استفاده از تلکسویی با دهانه بزرگ‌تر و دوربین CCD ایی با تفکیک فضایی زیاد ضرورت دارد. اگر دهانه تلکسوپ کوچک باشد بسامدهای فضایی زیاد توری با تلکسوپ قابل تفکیک نخواهد بود. یعنی اینکه ساختار دوره‌ای توری در ناحیه گام‌های کوچک آن در تصویر به‌صورت زمینه یکنواخت شدتی ثبت خواهد شد. چنانچه تلکسویی با کیفیت بهتر، مورد استفاده قرار گیرد و بتواند همه گام‌های توری را تفکیک کند اما دوربین مورد استفاده قدرت تفکیک گام‌های کوچک تصویر توری را نداشته باشد، باز هم آن بخش از تصویر توری به‌صورت زمینه یکنواخت شدتی ظاهر خواهد شد. البته همان‌طور که در تعدادی از تصاویر توری، نشان داده شده در شکل ۲، دیده می‌شود، چنانچه گام تصویر توری با تناوب فضایی آرایه دوربین CCD تقریباً برابر شود دیگر در تصویر توری گام اصلی نقش توری دیده نمی‌شود و تصویری با گام بزرگ‌تر اما با نمایانی کمتر ظاهر می‌شود که حاصل برهم‌نهی دو ساختار دوره‌ای نقش تصویر توری و آرایه پیکسل‌های دوربین است (امینی کادیجانی و رسولی، ۱۳۸۹، سلطانلو و رسولی، ۱۳۸۹ و رسولی، ۱۳۹۰). چنین ساختاری در اصطلاح نقش ماره دو ساختار تناوبی روی هم‌نهی شده نامیده می‌شود. بررسی جزئیات طرح ثانویه مشاهده شده روی تصاویر توری‌ها از هدف‌های تحقیق حاضر نیست. چنانچه روی تصاویر توری دقت شود این نقش ثانویه زمانی که عمق دید جوئی زیاد است دیده می‌شود و برای روزهایی که عمق دید جوئی کم است چنین ساختاری به چشم نمی‌خورد. این

با روش فوق، عمق دید جوئی برای دیگر روزهایی که تصاویر توری در آن روزها ثبت شده بود محاسبه شد و مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر گزارش شده ایستگاه هواشناسی مستقر در فرودگاه زنجان مورد مقایسه قرار گرفت. فرودگاه زنجان در ۶ کیلومتری شمال غربی محل آزمایش‌های ما قرار دارد. نمودار مقایسه داده‌های عمق دید جوئی به‌دست آمده با روش عرضه شده در این تحقیق با داده‌های ایستگاه هواشناسی فرودگاه زنجان در شکل ۴ آورده شده است.

#### ۴. بحث و مقایسه اندازه‌گیری‌ها با داده‌های ایستگاه

##### هواشناسی فرودگاه زنجان

در اینجا داده‌های به‌دست آمده از روش عرضه شده را با داده‌های عمق دید جوئی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی فرودگاه زنجان که با روش دیگری تعیین شده‌اند، مقایسه می‌کنیم. با توجه به داده‌های نمایش داده شده در شکل ۴ داریم:

الف) مقادیر اندازه‌گیری شده در هر دو روش که در روزهای ۱۲، ۱۳، ۲۸، ۳۰ آذر و روزهای ۵، ۶ دی ماه ثبت شده‌اند کاملاً برهم منطبق‌اند.

ب) مقادیر اندازه‌گیری شده در هر دو روش که در ۸ روز ۱۴، ۱۶، ۱۷، ۲۱، ۲۲ و ۲۵ آذرماه و روزهای ۴ و ۹ دی‌ماه ثبت شده‌اند تطابق قابل‌قبولی (تفاوت عمق دید کمتر از یک کیلومتر) با هم دارند.

ج) برای روزهای ۲۶ آذر و ۱ دی‌ماه که به ترتیب هوا بارانی و برفی بود داده‌ای ثبت نشد.

د) در ۵ روز شامل ۱۸، ۲۰ و ۲۴ آذرماه و روزهای ۳ و ۷ دی‌ماه تفاوت دو روش در اندازه‌گیری عمق دید بیش



## مراجع

- امینی کادیجانی، ب.، رسولی، س. و محمودی، م.، ۱۳۸۹، تعیین اندازه پیکسل‌های صفحه نمایشگر از روی تصویر ثبت شده توسط یک CCD با استفاده از تکنیک ماره، مقاله نامه سومین کنفرانس مهندسی اپتیک و فوتونیک ایران، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، ماهان کرمان.
- خوش سیما، م.، علی اکبری بیدختی، ع. و احمدی گیوی، ف.، ۱۳۹۲، تعیین عمق نوری هواویزها با استفاده از داده‌های دید افقی و سنجش از دور در دو منطقه شهری در ایران، م. فیزیک زمین و فضا، ۱۳۹(۱)، ۱۶۳-۱۷۴
- سلطانلو، ک. و رسولی، س.، ۱۳۸۹، اندازه‌گیری آهنگ ثبت تصویر در دوربین دیجیتال با استفاده از تحلیل فریزهای ماره متحرک در تصاویر ثبت شده توسط آن از یک صفحه نمایشگر، مقاله نامه سومین کنفرانس مهندسی اپتیک و فوتونیک ایران، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، ماهان کرمان.
- سلطانلو، ک. و رسولی، س.، ۱۳۹۰، اندازه‌گیری عدد گشودگی زمانی ثبت فریم‌های متوالی در دوربین‌های دیجیتال، هیجدهمین کنفرانس انجمن اپتیک و فوتونیک ایران (کنفرانس اپتیک)، تبریز، ایران، ۹۵-۹۸.
- Akhmanov, S. A. and Nikitin S. Y., Physical optics, 1997, Clarendon Press.
- Hautière, N., Labayrade, R. and Aubert, D., 2006, Real-time disparity contrast combination for on board estimation of the visibility distance, IEEE Transactions On Intelligent Transportations Systems, 7, 201-212.
- Hautière, N., Aubert, D., Dumont, É. and Tarel, J., 2008, Experimental validation of dedicated methods to in-vehicle estimation of atmospheric visibility distance, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 57(10), 2218-2225.
- Hautière, N., Babari, R., Dumont, E., Parent Chatelet, J. P. D. and Paparoditis, N., 2013, Measurements and observations of meteorological visibility at ITS stations, Climate change and regional/local responses, Dr Pallav Ray (Ed.), ISBN: 978-953-51-1132-0, InTech, doi: 10.5772/55697. Available from: <http://www.intechopen.com/books/climate-change-and-regional-local-responses/measurements-and-observations-of-meteorological-visibility-at-its-stations>
- Jiang, D., Deng, K., Zhang, P., Yao, Zh., Li, L. and Qin, K., 2013, A synchronous measurement technique for the evaluation of atmospheric extinction coefficient and refractive index structure constant, Optics Communications, 311, 288-293.
- Jinjia, G., Zhaobin, S. and Zhishen, L., 2007, Comparison of visibility measurements over horizontal path by micro-pulsed lidar and visibility meter, J. of Ocean University of China, 6, 315-318.
- Lai, L. Y. and Sequeira, R., 2001, Visibility degradation across Hong Kong: its components and their relative contributions, Atmospheric Environment, 35, 5861-5872.
- Luo, Ch-H., Liu, S. H. and Yuan, Ch-Sh., 2002, Measuring atmospheric visibility by digital image processing, Luo et al., Aerosol and Air Quality Research, 2(1), 23-29.
- بدان معنا است که زمانی که حجم آلاینده‌های جوئی زیاد می‌شود، گام کوچک توری در تصویر آن محو می‌شود و در نتیجه طرح ثانویه هم نمایان نمی‌شود. برای برطرف کردن این پدیده برای زمان‌هایی که نمایانی جوئی زیاد است می‌باید از دوربینی با تفکیک فضایی بیشتر استفاده کرد.
- ## ۵. نتیجه‌گیری
- در این مقاله روشی جدید، ساده و درعین حال قابل اعتماد برای تعیین نمایانی و عمق دید جوئی عرضه شد. روش طرح شده به صورت تجربی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش با مقادیر اندازه‌گیری شده عمق دید جوئی در ایستگاه سازمان هواشناسی زنجان واقع در فرودگاه زنجان مطابقت خوبی دارد. در مواردی هم که تفاوتی بین این دو مجموعه از اندازه‌گیری‌ها دیده می‌شود، با توجه به فاصله به نسبت زیاد محل آزمایش و ایستگاه هواشناسی فرودگاه زنجان، این امر قابل توجیه است. لازم به ذکر است که در ایستگاه هواشناسی، عمق دید جوئی با روش برآورد چشمی از سوی کارشناسان تعیین می‌شود که این خود می‌تواند منشا خطایی برای داده‌های هواشناسی و تفاوت موجود بین دو مجموعه از داده‌های اندازه‌گیری شده باشد.

- Kwon, T. M., 2004, Atmospheric visibility measurements using video cameras: relative visibility, Department of electrical and computer engineering university of Minnesota Duluth, Published by Minnesota Department of Transportation.
- Madanipour, K. and Tavassoly, M. T., 2007, Application of moiré technique to the measurement of modulation transfer functions (MTF) of printing systems, *Optics and Lasers in Engineering*, 45(1), 64-69.
- Rasouli, S. and Tavassoly, M. T., 2006a, Application of moiré technique to the measurement of the atmospheric turbulence parameters related to the angle of arrival fluctuations, *Optics letters*, 31(22), 3276-3278.
- Rasouli, S. and Tavassoly, M. T., 2006b, Measurement of the refractive-index structure constant,  $C_n^2$ , and its profile in the ground level atmosphere by moiré technique, *SPIE Proceeding*, 6364, 63640G-63640G-11.
- Rasouli, S., Madanipour, K. and Tavassoly, M. T., 2006, Measurement of modulation transfer function of the atmosphere in the surface layer by moiré technique, *SPIE Proceeding*, 6364, 63640K-63640K-10.
- Tsai, Y. I., Kuo, S-Ch., Lee, W. J., Chen, Ch-L. and Chen, P-T., 2007, Long-term visibility trends in one highly urbanized, one highly industrialized, and two Rural areas of Taiwan, *Science of the Total Environment*, 382, 324-341.
- Wang, J., Liu, X., Yang, X., Lei, M., Ruan, Sh. and Nie, K., 2014, Development and evaluation of a new digital photography visiometer system for automated visibility observation, *Atmospheric Environment*, 87, 19-25.
- Xie, L., Chiu, A. and Newsam, Sh., 2008, Estimating atmospheric visibility using general-Purpose cameras, G. Bebis, et al. (Eds.): *ISVC Part II, LNCS 5359*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 356-367
- Yanoff, M. and Duker, J. S., 2009, *Ophthalmogy*, 3rd Edition. MOSBY Elsevier. p. 54. ISBN 0444511415.