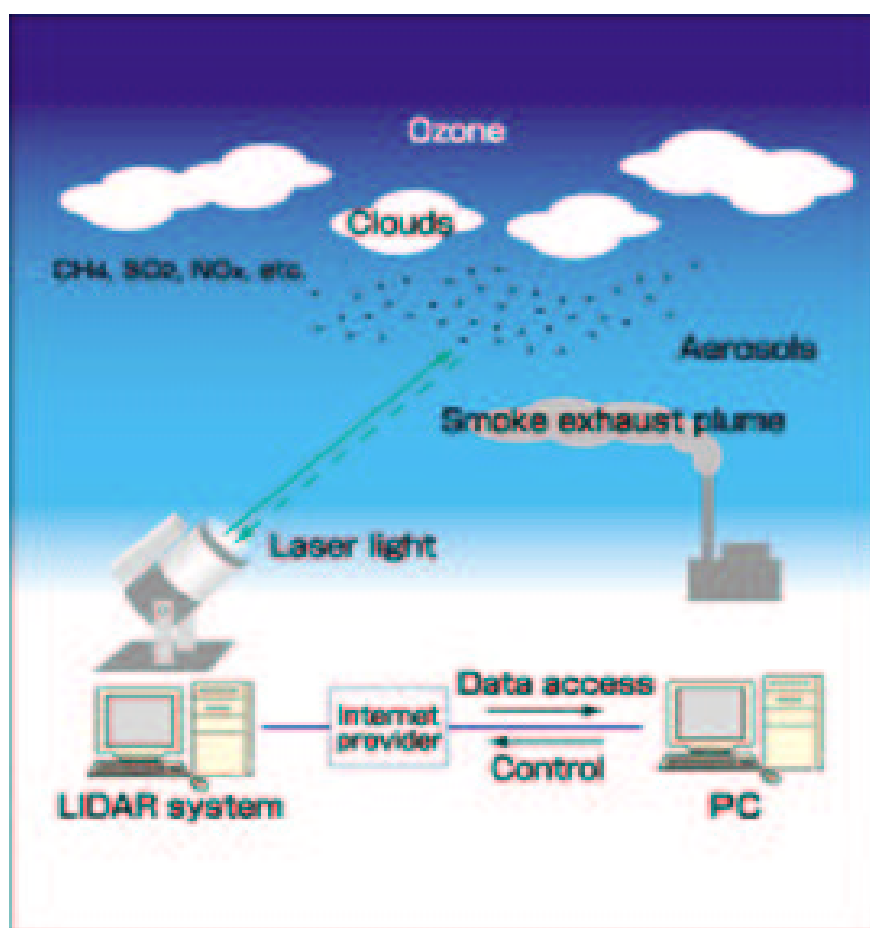


لیدار: ساختار، اصول و کاربردها



۱.۱ تاریخچه

در ۱۹۳۰ سینگ^۱ برای اندازه گیری چگالی جو روشی را پیشنهاد کرد که براساس آن باریکه ای از نور به سمت جو فرستاده می شود و پراکندگی باریکه توسط ذرات تشکیل دهنده جو آشکارسازی و مورد بررسی قرار می گیرد و بدین ترتیب پارامترهایی از جو بدست می آید. او در این مقاله یک ساختار بای استاتیک (گیرنده و فرستنده در یک فاصله از هم قرار دارند) را مناسب دانست که از یک چشمه پرتوان به عنوان فرستنده و در فاصله چند کیلومتری از آن از یک تلسکوپ بزرگ به عنوان گیرنده و برای آشکارسازی نیز از یک سامانه فوتوالکتریک استفاده شود [۱]. در ۱۹۳۶ اولین گزارش از ساخت یک سامانه لیدار توسط داگلاکس^۲ ارائه شد [۲]. در این سامانه بای استاتیک فاصله بین فرستنده و گیرنده ۲.۴ کیلومتر بود و از یک تلسکوپ با قطر ۱.۵ متر به عنوان گیرنده و یک دوربین عکاسی به عنوان آشکارساز استفاده کرد. او در این آزمایش با استفاده از زمان ثبت شدت ۱.۵ ساعت توانست داده هایی از جو تا ارتفاع ۳.۴ کیلومتر بگیرد. در همان سال هالبرت^۳ توانست توسط چنین سامانه ای تا ارتفاع ۲۸ کیلومتر نمودار چگالی جو را رسم کند [۳]. در ۱۹۳۸ اولین سیستم مونواستاتیک (گیرنده و فرستنده در یک مکان قرار دارند) توسط بورآ^۴ با استفاده از یک چشمه پالسی ساخته شد و از آن برای اندازه گیری ارتفاع ابرها استفاده کرد [۴]. با پیشرفت تکنولوژی و ثبت الکتریکی شدت پراکنده، الترمان^۵ با استفاده از یک سامانه بای استاتیک که فاصله بین فرستنده و گیرنده در آن ۲۰.۵ کیلومتر بود توانست نمودار چگالی را تا ارتفاع ۶۷.۶ کیلومتر حساب کند و با استفاده از روابط رایلی نمودار دما را تا آن ارتفاع رسم کند [۵]. در ۱۹۵۶ فردلند^۶ اولین بار از یک سامانه مونواستاتیک برای محاسبه چگالی جو استفاده کرد [۶]. با اختراع لیزر در ۱۹۶۰ تحول عظیمی در طراحی و ساخت لیدار بوجود آمد. در سال ۱۹۶۲ اولین کاربرد لیزر در فرستنده لیدار توسط

Syngé^۱

Duclaux^۲

Hulbert^۳

Bureau^۴

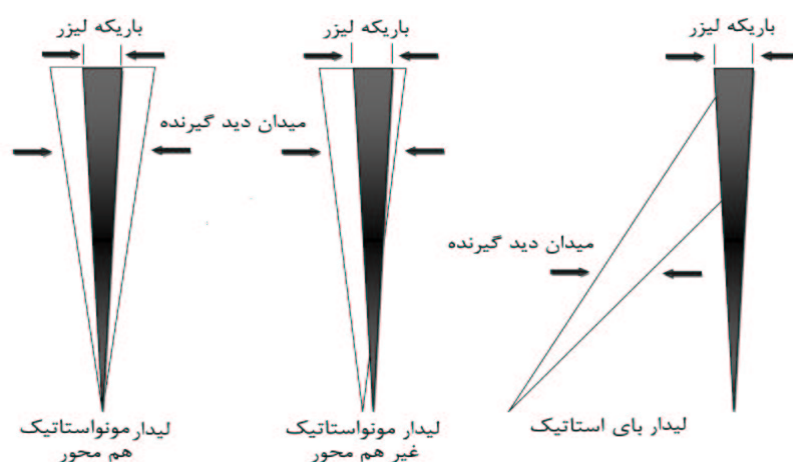
Elterman^۵

Friedland^۶

فیکو^۷ و اسمولینز^۸ گزارش شد. در این آزمایش آنها از یک لیزر پالسی یا قوت در طول موج ۶۹۴ نانومتر استفاده کردند که انرژی هر پالس آن ۰.۵ ژول بود. امروزه انواع لیدار با کاربرد های گوناگون در زمین و فضا مستقر هستند و به عنوان یک ابزار قدرتمند در زمینه های مختلف علمی فعالیت می کنند.

۲.۱ ساختار لیدار

همانطور که در مقدمه اشاره شد در یک سامانه لیداری باریکه لیزر به سمت هدف تابیده شده و بعد از برخورد به هدف، بخشی از شدت پراکنده شده باریکه لیزر توسط گیرنده جمع آوری شده به آشکارساز فرستاده می شود. حال این نحوه قرار گیری فرستنده و گیرنده نسبت به هم به دو گونه است. مونواستاتیک^۹ که در آن فرستنده و گیرنده در یک مکان قرار دارند و می توانند هم محوری یا غیر هم محور باشند. بای استاتیک^{۱۰} که در آن فرستنده و گیرنده در یک فاصله از هم قرار دارند.

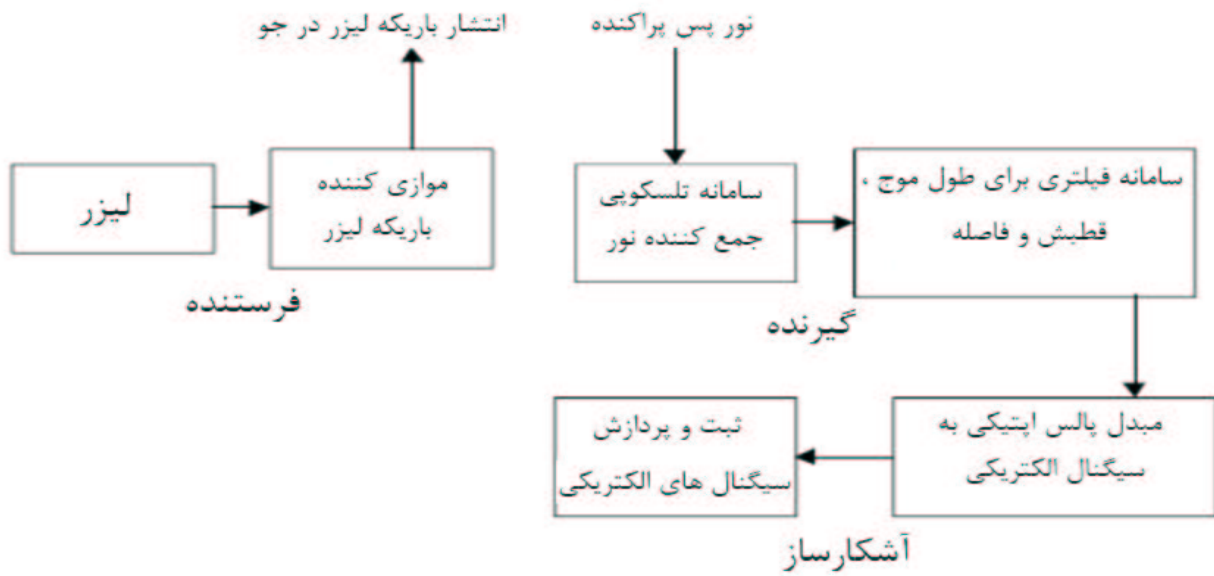


شکل ۱-۱ ساختار یک دستگاه لیدار در نحوه قرار گرفتن فرستنده و گیرنده آن نسبت به هم

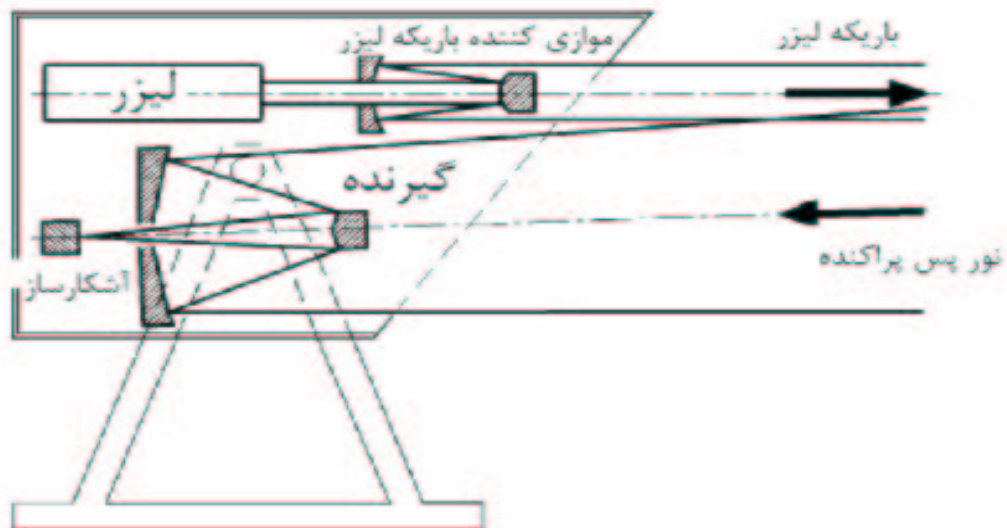
-
- Fiocco^۷
 - Smullins^۸
 - monostatic^۹
 - bistatic^{۱۰}

۳.۱ اجزاء لیدار

یک دستگاه لیدار از لحاظ اجزای تشکیل دهنده آن به سه قسمت اصلی تقسیم می شود .



شکل ۱-۲ اجزاء مختلف یک دستگاه لیدار



شکل ۱-۳ نمونه یک دستگاه لیدار

۱.۳.۱ فرستنده

فرستنده یک لیدار از دو بخش تشکیل شده است (شکل ۱-۲).

الف : لیزر ب : موازی کننده و پهن کننده باریکه لیزر

الف : لیزر

دو خصوصیت یک لیزر، واگرایی کم و تکفام بودن سبب شده است تا لیزر به عنوان فرستنده و منبع تولید باریکه نور در لیدار مورد استفاده قرار گیرد. واگرایی کم یک لیزر سبب می شود که سامانه گیرنده یک لیدار مساحت کمتری از آسمان را رصد کند و در نتیجه شدت زمینه که ناشی از نور خورشید، ماه و آلودگی های نوری شهرها بوده و برای آشکارساز نامطلوب است، کاهش یابد. همچنین با توجه به تکفام بودن یک لیزر و با استفاده از سامانه های فیلتری به کار رفته در گیرنده می توان همان پهنای طیفی لیزر را، پس از پس پراکنده شدن دریافت کرد و باقی طیف جذب شود. با این عمل تا حد زیادی شدت زمینه کاهش می یابد [۷].

لیزر مورد استفاده در لیدار پالسی یا پیوسته است. در لیدار مونواستاتیک از لیزرهای پالسی استفاده می شود و مکانی که پراکندگی رخ می دهد از محاسبه زمان رفت و برگشت پالس محاسبه می شود. ولی در لیدار بای استاتیک می توان از هر دو نوع لیزر استفاده کرد. در این لیدار از مشخصات هندسی سامانه، ارتفاعی که پراکندگی رخ می دهد محاسبه می شود [۸].

طول موج، توان خروجی و در مورد لیزرهای پالسی، پریود تکرار پالس ها به پارامترهایی وابسته است که مهمترین آن، کمیت فیزیکی مورد مطالعه در جو است. پارامترهای دیگری نظیر ارزش لیزر، طرز استفاده از آن، اندازه لیزر و ... در مورد انتخاب لیزر دخیل هستند [۷].

ب : موازی کننده و پهن کننده باریکه لیزر

این بخش معمولاً یک سیستم تلسکوپی است که باریکه خروجی از لیزر را به صورت موازی و با کمی پهنای به جو می فرستد (شکل ۱-۳). با این عمل با افزایش ارتفاع، لیزر کمتر واگرا شده و همان طور که اشاره شد برای کاهش شدت زمینه لازم است [۷].

۲.۳.۱ گیرنده

در این بخش نور پراکنده شده باریکه لیزر در اثر برخورد به مولکول ها و ذرات موجود در جو، که به سمت گیرنده برمی گردد (شکل ۱-۳) جمع آوری شده و بعد از عبور از بعضی زیربخش ها مانند فیلترهای تداخلی و قطع کننده ها به سمت آشکارساز هدایت می شود. قطر گیرنده فاکتور مهمی است. یک گیرنده با قطری بزرگ می تواند کسر بزرگتری از نور پس پراکنده را جمع آوری کند. این اندازه بسته به نوع لیدار و حوزه ارتفاعی که فعالیت می کند، از حدود ۱۰ سانتیمتر تا چندین متر متغیر است [۷]. در گیرنده های کوچک معمولاً از سیستم لنز یا آینه استفاده می شود. ولی در گیرنده های بزرگ از سامانه تلسکوپی انعکاسی استفاده می شود. بعد از جمع آوری نور پس پراکنده و قبل از هدایت آن به آشکارساز، این نور باید از بعضی از پردازشگرها نظیر فیلترها، قطبشگرها، و قطع کننده های متناوب بسته به نوع لیدار و کاربردی که برای آن در نظر گرفته اند عبور داده شود (شکل ۱-۲).

ساده ترین نوع فیلترها، فیلترهای تداخلی هستند که پهنای عبوری در حدود چند نانومتر دارند. این فیلترها فقط به نور پس پراکنده در طول موج باریکه لیزر اجازه عبور می دهند. پس تا حدود زیادی شدت زمینه کاهش می یابد [۹، ۱۰].

پردازش روی قطبش نور پس پراکنده روشی است که اغلب در لیدارهایی که برای مطالعه ابرها و ذرات معلق طراحی شده اند، استفاده می شود [۱۱، ۱۲]. معمولاً نور پس پراکنده یک باریکه لیزر که به صورت خطی قطبیده باشد از ذرات معلق و ابرها دچار تغییراتی در قطبش می شود که به عواملی از قبیل شکل ذرات و ناهمسانگردی های آنها بستگی دارد. همچنین این واقطبش می تواند ناشی از پراکندگی چند گانه هم باشد.

برای کاهش شدت زمینه، همچنین در لیدارهایی که از لیزرهایی پالسی با توان بالا استفاده می کنند برای محافظت از سیستم آشکارساز از شدت بالای نور پس پراکنده ناشی از پراکندگی در ارتفاع پایین، می توان از قطع کننده های مکانیکی یا الکترواپتیکی استفاده کرد [۱۲، ۱۳]. در مورد قطع کننده مکانیکی که صفحه دوار شیاردار است، می توان با تنظیم سرعت چرخش آن از ورود شدت پس پراکنده و زمینه تا ارتفاعی خاص جلوگیری کرد. همچنین در مورد قطع کننده الکترواپتیکی، با خاموش و روشن کردن آشکارساز در بازه های

زمانی متناسب با پهنای پالس و پریود آن، می توان به این مهم رسید [۱۴].

۳.۳.۱ آشکارساز

در این بخش نور پس پراکنده از گیرنده، دریافت شده و شدت آن به صورت تابعی از ارتفاع ثبت می شود. در لیدارهای اولیه یک دوربین عکاسی این وظیفه را انجام می داد [۱۶، ۱۵]. امروزه آشکارسازی و ثبت شدت کاملاً به صورت الکترونیکی انجام می شود. آشکارساز پالس اپتیکی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می کند و یک ثبت کننده این سیگنال را پردازش و ثبت می کند.

معمولاً سامانه آشکارسازی به دو گروه همدوس و ناهمدوس تقسیم می شود. در لیدارهایی که برای اندازه گیری سرعت باد طراحی شده اند معمولاً از سامانه آشکارسازی همدوس استفاده می شود (۲۳-۱۷). و در بقیه لیدارها سامانه آشکارسازی ناهمدوس به کار می رود.

در سامانه های آشکارسازی ناهمدوس مهمترین و معمولترین آشکارساز فوتومولتی پلایر^{۱۱} است. این آشکارساز فوتون ورودی را به یک سیگنال الکتریکی بزرگ تبدیل می کند تا سامانه الکترونیکی ثبت کننده بتواند آن را پردازش و ثبت کند [۲۴]. از دیگر آشکارسازها می توان به مولتی آنود فوتومولتی پلایر^{۱۲} [۲۵]، میکروچنل پلیت^{۱۳} [۲۶]، اولنچ فوتودیود^{۱۴} [۲۷، ۲۸] و سی سی دی^{۱۵} [۲۹، ۳۰] اشاره کرد.

خروجی آشکارساز می تواند به دو صورت آنالوگ و دیجیتال ثبت شود. در روش دیجیتال سیگنال ها منفرداً پردازش و ثبت می شوند. در روش آنالوگ از سیگنال های ورودی متوسط گیری می شود. انتخاب روش مناسب برای ثبت سیگنال به سرعت تولید آن در آشکارساز مربوط می شود [۷].

photomultiplier tubes (PMTs) ^{۱۱}

multianode photomultiplier tubes ^{۱۲}

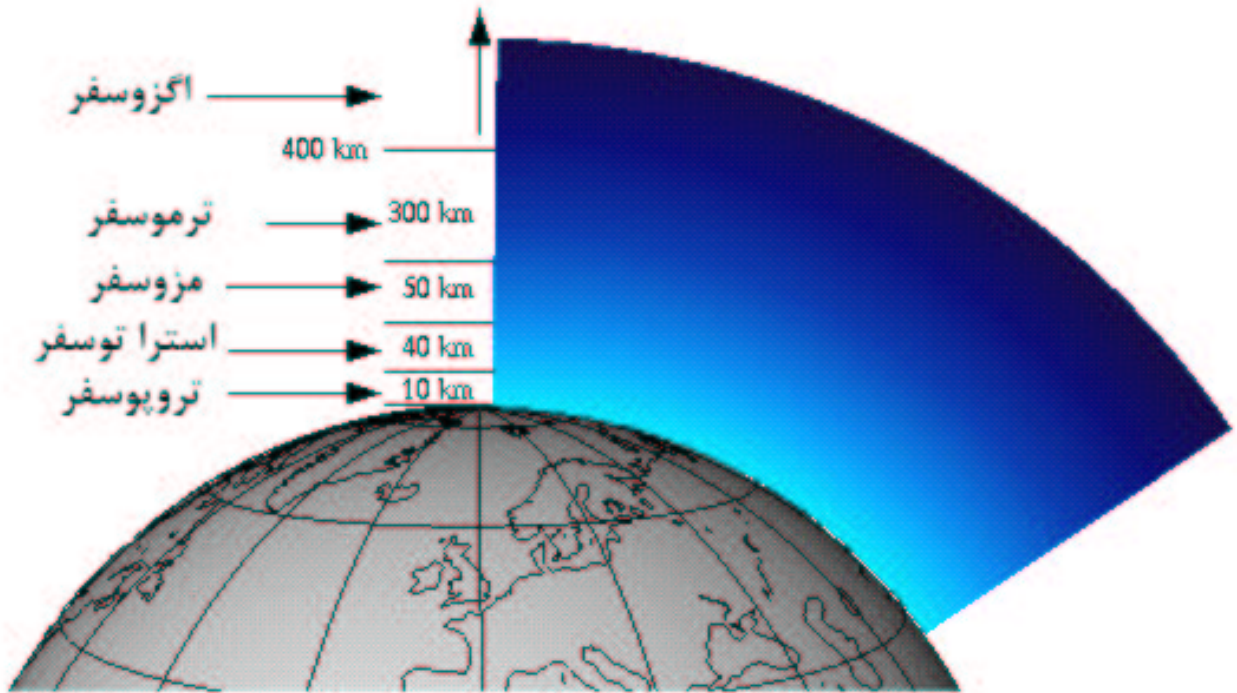
micro channel plate (MCPs) ^{۱۳}

avalanche photodiodes ^{۱۴}

charge coupled device (CCDs) ^{۱۵}

۴.۱ ساختار جو زمین

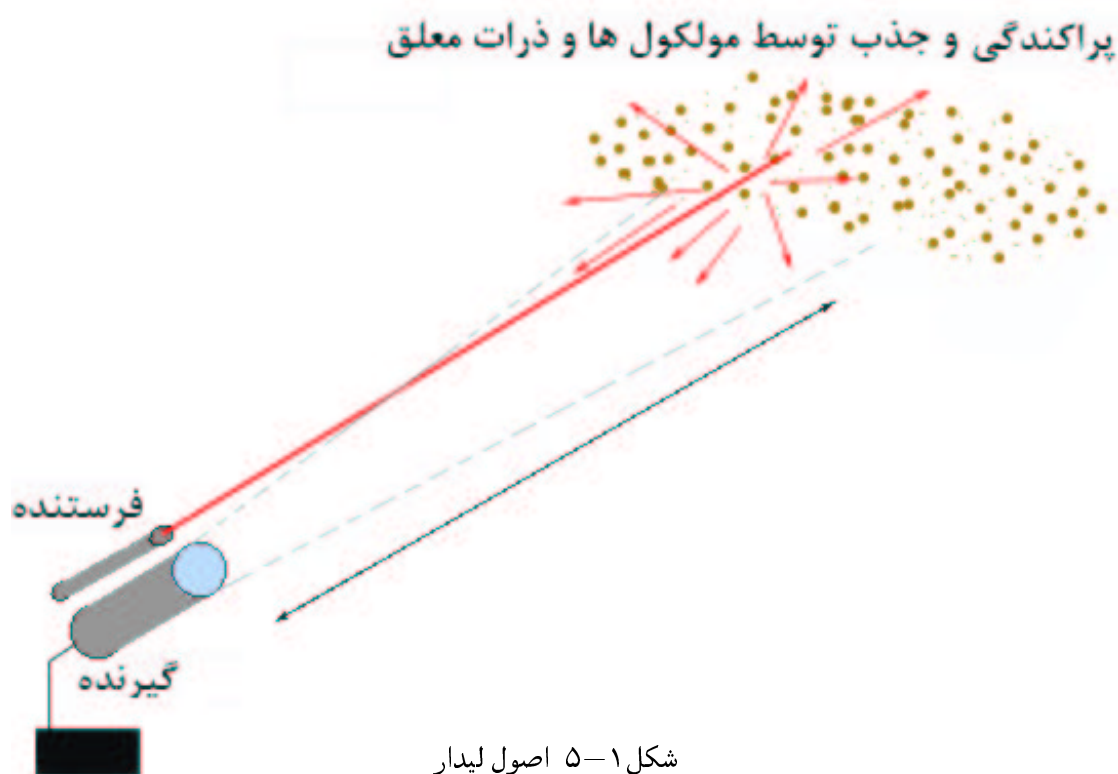
جو زمین از مولکول های گازی و ذرات معلق تشکیل شده است. که به علت جرم، بیشتر آنها در لایه پایینی جو قرار دارند. جو را از نظر پارامترهای مختلف فیزیکی از قبیل دما، چگالی، ترکیبات اتمسفری، میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی و مورد مطالعه قرار می دهند و بر اساس این پارامترها به لایه های مختلفی تقسیم می کنند. محدوده این لایه ها از نظر مکانی و زمانی ثابت نیست. چون خود این پارامترهای فیزیکی بسته به زمان و مکان تغییر می کنند. با وجود این، تغییرات را می توان طوری در نظر گرفت که دارای مقادیر متوسطی باشد. و این مقادیر متوسط به صورت مرجع در نظر گرفته می شود و بر اساس آن لایه بندی جو انجام می شود. این لایه بندی و ارتفاع آنها در شکل (۱-۴) نشان داده شده است [۳۱].



شکل ۱-۴ ساختار جو زمین

۵.۱ اصول لیدار

انتشار نور در جو زمین توسط مولکول ها و ذرات معلق دچار پراکندگی و جذب می شود. پراکندگی مولکولی در جو توسط شماری از فرآیندهای مختلف پدید می آید. که این پراکندگی ها می تواند الاستیک یا غیر الاستیک باشد. در مورد ذرات معلق به علت متفاوت بودن اندازه، و شکل، ضریب شکست و همچنین تابعیت مکانی و زمانی غلظت آنها، مطالعه آنها با پیچدگی هایی همراه است.



۱.۵.۱ پراکندگی رایلی

لورد رایلی^{۱۶} رابطه تحلیلی برای محاسبه شدت پراکندگی از ذراتی که در مقاسیه با طول موج تابش فرودی کوچکتر هستند ارائه داد. او این تئوری را برای توجیح رنگ، توزیع شدت و قطبش آسمان بر اساس پراکندگی توسط مولکول های جو ایجاد کرد. اساس این تئوری تابش دو قطبی الکتریکی است. که ذرات همچون کره های

^{۱۶} Lord Rayleigh

دی الکترونیک فرض می شوند که وقتی در برابر تابش موج الکترومغناطیسی با قطبش خطی قرار می گیرند خود تبدیل به دو قطبی هابی می شوند. حال به علت نوسانی بودن میدان الکتریکی فرودی و در پی آن جابجاشدن مراکز بارهای مثبت و منفی، خود دو قطبی نیز شروع به تابش می کند که در واقع همان تابش پراکنده است. در این تئوری فرض می شود که میدان در مرکز حجمی که پراکندگی روی می دهد باید تقریباً یکنواخت باشد و این فرض باعث می شود تا برای اندازه ذرات محدودیتی قائل شویم و اندازه آنها را کوچکتر از طول موج تابش فرودی فرض کنیم [۳۲]. معادله زیر برای پراکندگی رایلی توسط یک مولکول ارائه می شود.

$$I_m(\phi) = E_0^2 \frac{9\pi^2 \epsilon_0 c}{2N^2 \lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \sin^2 \phi \quad (1)$$

در این معادله n ضریب شکست کره نسبت به محیط است. N تعداد مراکز پراکندگی در واحد حجم است. ϕ زاویه بین محور دو قطبی و راستای پراکندگی است. معمولاً این پراکندگی در مورد مولکول های اکسیژن و نیتروژن که حدود ۹۹٪ مولکول های جو را تشکیل می دهند به کار می رود. بنابراین این دو گاز را به عنوان منابع اصلی پراکندگی رایلی در نظر می گیرند [۳۳].

۲.۵.۱ پراکندگی می

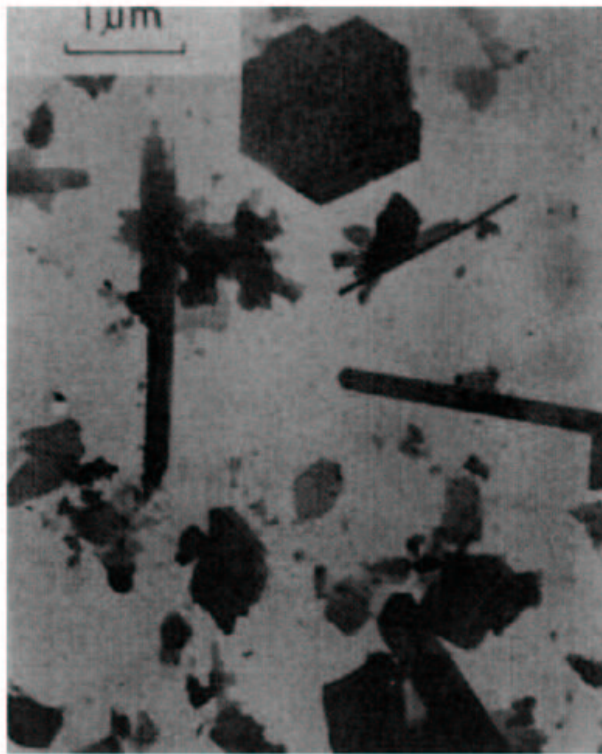
این تئوری پراکندگی توسط گوستاو می^{۱۷} مطرح شد. در اینجا یک حل تحلیلی برای پراکندگی تابش الکترومغناطیسی با هر طول موج از ذراتی کروی در هر اندازه و ضریب شکستی ارائه شد. با این اوصاف این تئوری محدودیت تئوری رایلی در اندازه ذرات را ندارد و حتی تئوری رایلی را نیز شامل می شود. اما معمولاً این تئوری برای ذراتی در ابعاد طول موج یا بزرگتر از آن به کار می رود. می توان پراکندگی را از لحاظ ابعاد ذرات به صورت زیر تقسیم بندی کرد. اپتیک هندسی < پراکندگی می < پراکندگی رایلی در ابعاد خیلی بزرگ که وارد حوزه اپتیک هندسی می شود شدت پراکنده به طول موج تابش ورودی وابسته نیست. در ابعاد خیلی کوچک (تئوری رایلی) شدت پراکنده با طول موج تابش فرودی رابطه ای به صورت λ^{-4} دارد. ولی در تئوری می، رابطه شدت پراکنده با طول موج تابش فرودی، تابعی از شعاع ذره نسبت به طول موج و ضریب شکست است [۳۳، ۳۴]. در نتیجه با آشکارسازی شدت پراکنده می توان اطلاعاتی در مورد اندازه و

^{۱۷} Gustav Mie

دیگر پارامترهای ذرات دست یافت. معمولاً این پراکندگی در مورد ذرات معلق به کار می رود. اما ذرات معلق دارای اشکال گوناگون و اندازه های متغیر هستند (شکل ۱-۶). تئوری می توسط اشخاصی بهینه شد و آنها توانستند حل هایی را برای ذرات غیر کروی ارائه دهند [۳۸ - ۳۵]. باید توجه کرد که پراکندگی رایلی و می از جمله پراکندگی الاستیک محسوب می شوند.



شکل ۱-۶ نمایی از انواع ذرات معلق و اندازه تقریبی آنها [۳۲]



شکل ۱-۷ یک مجموعه از ذرات گرد و غبار که توسط میکروسکوپ الکترونی بزرگ شده است . به اندازه ها و اشکال گوناگون و پیچیده ذرات دقت کنید [۳۴]

۳.۵.۱ پراکندگی رامان

وقتی نور تکفام بوسیله مولکول های مایع یا گاز پراکنده شود، مشاهده می شود که نور پراکنده شده دچار یک جابجایی فرکانسی شده است [۳۹]. رامان اولین بار این اثر را مشاهده کرد. این اثر بر مبنای برهمکنش نور با سطوح انرژی چرخشی و ارتعاشی کوانتومی مولکول قابل توجیه است. هر نوع مولکول سطوح انرژی چرخشی و ارتعاشی کوانتومی خاص خود را دارد. پس پراکندگی رامان از هر مولکول پهنای طیفی خاص خود را دارد و از این حقیقت می توان برای شناسایی مولکول ها استفاده کرد. این پراکندگی به علت انتقال انرژی بین نور پراکنده شده و مولکول، یک پراکندگی غیر الاستیک است.

۴.۵.۱ پراکندگی تشدید

هرگاه در یک فرآیند پراکندگی انرژی فوتون فرودی با انرژی گذار اتمی برابر باشد اتم، فوتون فرودی را جذب می کند و یک فوتون دیگر با همان فرکانس تابش می کند. پس این یک پراکندگی الاستیک است. چون هر اتم یا مولکول خط جذبی و حد دارد پس از این روش می توان برای اندازه گیری غلظت ذرات خاص استفاده کرد.

۶.۱ حوزه فعالیت لیدارها و معرفی چند نمونه از آنها

لیدارها از نظر محل قرار گرفتن و حوزه فعالیت به گروه هایی تقسیم می شوند .

لیدارهای زمین پایه که در سطح زمین قرار دارند

هوای پایه که در هواپیما یا بالگرد نصب می شوند

فضای پایه که از شاتل فضایی و ماهواره استفاده می کنند

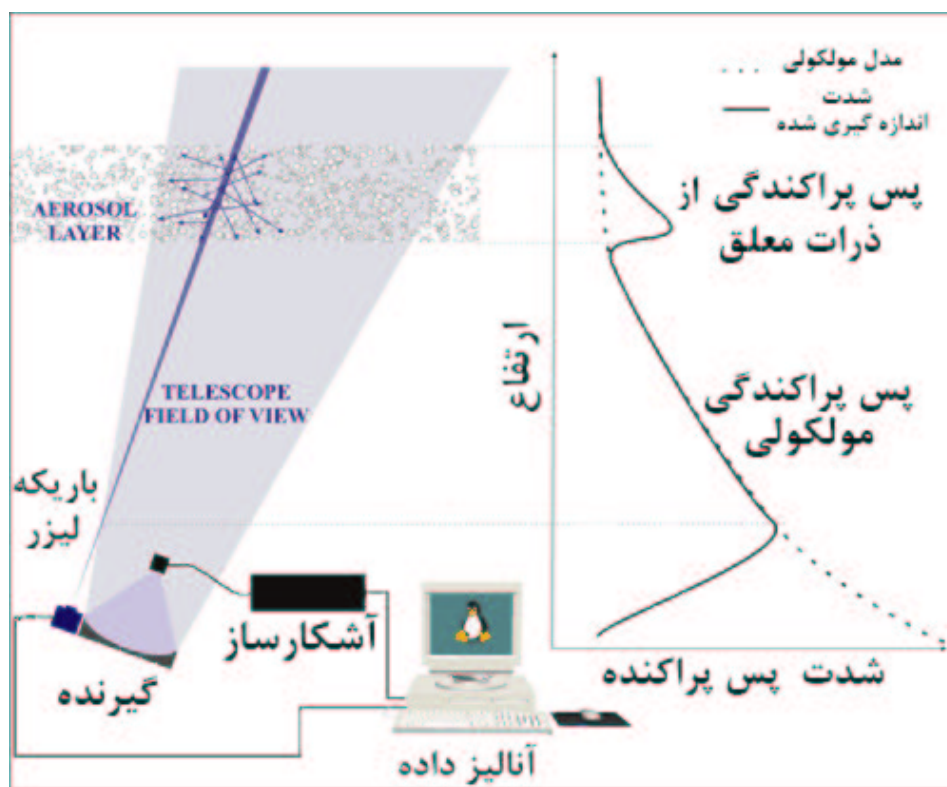
همه این لیدارها معمولاً از سطح زمین تا مزوسفر (حدود ۱۰۰ کیلومتر) را تحت پوشش قرار می دهند [۳۷] چون در لایه های بالاتر به علت غلظت بسیار کم اتم ها و مولکول ها شدت پس پراکنده بسیار ضعیف است و عملاً در برابر نوفه خود دستگاه آشکارسازی آن بسیار مشکل است .

۱.۶.۱ لیدار می

این نوع لیدار اولین نمونه لیدار بود که طراحی و ساخته شد [۳۳]. این لیدار به نام های دیگری نیز مشهور است مانند لیدار پس پراکنده الاستیک یا لیدار رایلی می. از این لیدار برای دریافت اطلاعاتی از وجود و مکان ذرات معلق و ابرها استفاده می شود. به این صورت که باریکه لیزر بعد از برخورد الاستیک با ذرات معلق و ابرها پس پراکنده شده و مکان آنها را نشان می دهد. در فرآیند پراکندگی از ذرات ممکن است یک فوتون با بیش از یک ذره برخورد کند (پراکندگی چندگانه) که با افزایش غلظت و اندازه ذرات امکان آن افزایش می یابد. لذا باید در شدت دریافتی این را در نظر گرفت و تصحیحات لازم را انجام داد [۳۳، ۳۴]. حوزه فعالیت این لیدار در لایه مرزی و تروپوسفر است که تقریباً همه ابرها و ذرات معلق در این لایه قرار دارند. این لیدار می تواند در یک

گستره طول موجی (لیزرهایی با طول موج های مختلف) فعالیت کند. اما معمولاً ناحیه مرئی آبی - سبز ترجیح داده می شود. چون در طول موج های بالاتر پراکندگی کاسته شده و در طول موج های پایینتر با اینکه پراکندگی افزایش یافته ولی جذب نیز افزایش می یابد. معمول ترین لیزر مورد استفاده، لیزر $Nd: YAG$ در هارمونیک اول و دوم آن با طول موج های 1064 و 532 نانومتر می باشد.

ذرات معلق و ابرها در مقدار تابش ورودی و خروجی از زمین نقش مهمی ایفا می کنند و باعث پراکندگی و جذب آنها می شوند. بنابراین با این کار در تحولات آب و هوایی نیز تأثیر می گذارند. پس اطلاع از مکان آنها می تواند بسیار مؤثر واقع شود. ولی برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر نظیر اندازه، شکل و ترکیبات آنها نیاز به یک سری فرض ها و اندازه گیری های اضافه با چند طول موج $[40-42]$ و روش های تغییر قطبش دارد $[40, 43, 44]$.



شکل ۱-۸ لیدار می-رایلی

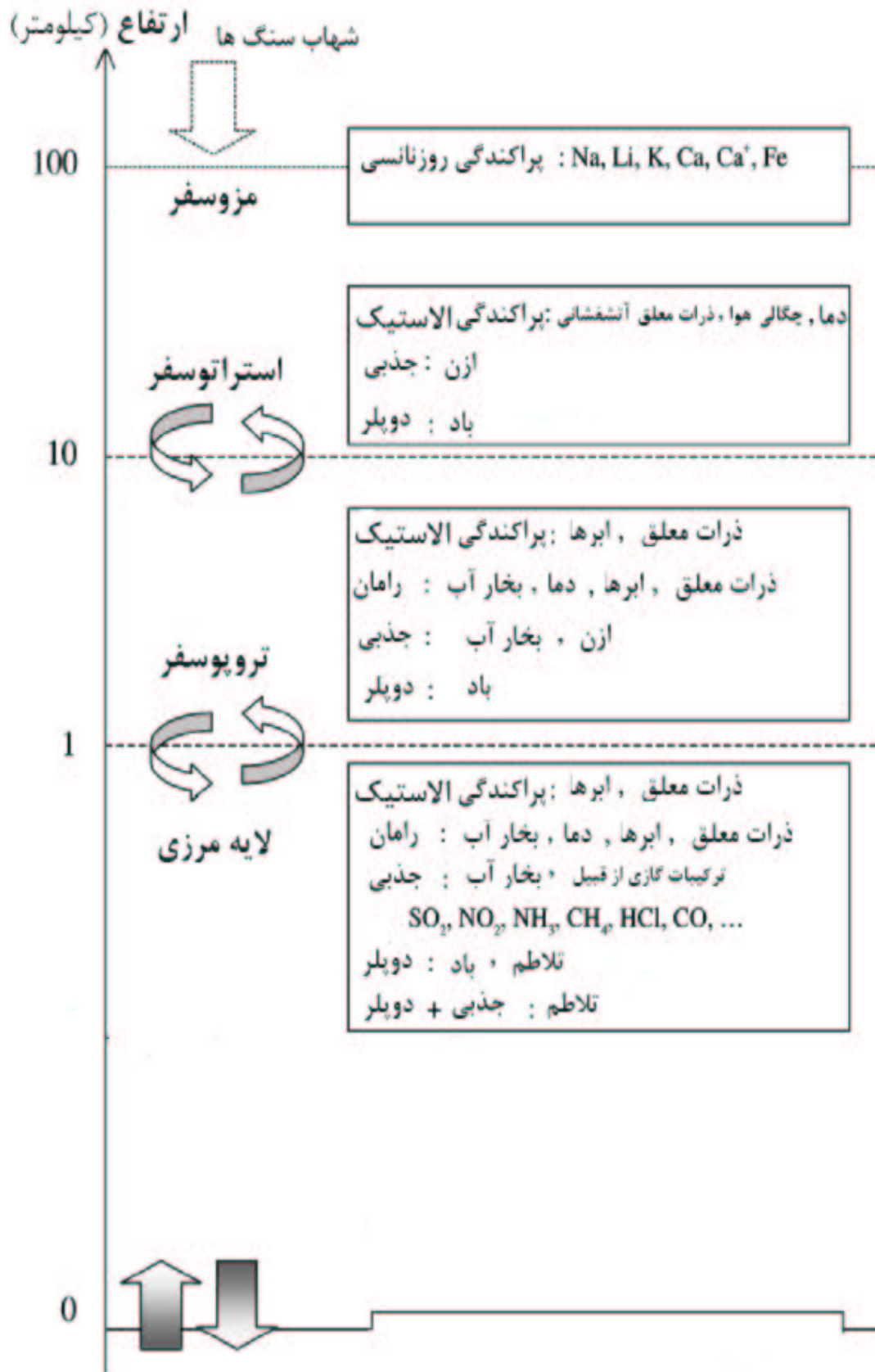
۲.۶.۱ نمونه هایی از لیدارهای دیگر

لیدار جذبی که بر اساس باند جذبی مولکول ها عمل کرده و برای اندازه گیری غلظت گازهای موجود در جو مانند بخار آب [۴۷-۴۵]، ازن [۵۰-۴۸] و ... و دما [۵۳-۵۱] به کار می رود.

برای مطالعه دما و بخار آب [۶۰-۵۴، ۳۴] و پارامترهای اپتیکی ذرات معلق و ابرها [۶۴-۶۱، ۳۴] می توان از لیداری که بر اساس پراکندگی رامان عمل می کند استفاده کرد.

به علت برخورد شهابواره ها به جو زمین در ناحیه بالایی مزوسفر لایه هایی از فلزات قلیایی مانند سدیم وجود دارد. برای فعالیت در این ناحیه از جو می توان از لیداری که بر مبنای پراکندگی تشدید عمل می کند استفاده کرد که به بررسی غلظت این اتم ها و یون های فلزی [۳۴، ۳۳]، دما و سرعت باد [۶۶-۶۵] در این ناحیه از جو پرداخت.

از نمونه های دیگر لیدار می توان به لیداری که بر اساس جابجایی فرکانسی (دوپلری) به اندازه گیری سرعت باد می پردازد اشاره کرد.



شکل ۱-۹ حوزه فعالیت لیدارهای مختلف در لایه های جو زمین

مراجع

- [١] E. H. Synge, Philos. Mag, 52, 1, 14 - 20, (1930).
- [٢] Duclaux, J. Phys. Radiat, 7, 361, (1936).
- [٣] E. O. Hulbert, J. Opt. Soc. Am, 27, 377 - 382, (1937).
- [٤] R. Bureau, Meteorologie, 3, 292, (1942).
- [٥] L. Elterman, J. Geophys. Res, 58, 519 - 530, (1953).
- [٦] S. S. Friedland, J. Katzenstein, M. R. Zatzick, J. Geophys. Res, 61, 415 - 434, (1956).
- [٧] P. S. Argill, R. J. Sica, "Lidar," The University of Western Ontario. London, Ontario, Canada, (2002).
- [٨] John. E. Barnes, Sebastian Bronner, Robert Beck, N. C. Parikh, "Boundray layer scattering measurement with a charge-coupled device camera lidar," Applied Optics, 42, 15, (2003).
- [٩] K. W. Fischer et al, Opt.Eng, 34, 499 - 511, (1995).
- [١٠] J. A. Mcky, Applied Optics, 38, 5, 851 - 858, (1999).
- [١١] A. I. Carswell, in D. K. Killinger, A. Mooradian, eds., Optical and Remote Sensing, Springer-verlag, Berlin, 318 - 326, (1983).
- [١٢] F. Cario et al, Applied Optics, 38, 4, 425 - 432, (1999).

- [13] J. P. Thayer et al, *Optical Engineering*, 36, 2, 45 - 61, (1997).
- [14] P. S. Argall, F. Jacka, *Applied Optics*, 35, 2, 619 - 629, (1996).
- [15] Duclaux, *J.phys.Radiat*, 7, 361, (1936).
- [16] E. O. Hullbert, *J. Opt. Soc. Am*, 27, 377 - 382, (1937).
- [17] J. M. Vaughan, *phy.Scripta*, T78, 37 - 81, (1998).
- [18] R. M. Huffaker, P. A. Reveley, *Pure Applied Optics*, 7, 863 - 873, (1998).
- [19] R. Targ et al, *Applied Optics*, 35, 7, 117 - 127, (1996).
- [20] R. M. Huffaker, R. M. Hardesty, *Proc.IEEE*, 84, 181 - 204, (1996).
- [21] S. M. Hannon, J. A. Thomson, *J. Mod. Opt*, 41, 2, 175 - 196, (1994).
- [22] V. M. Gordienko et al, *Optical Engineering*, 33, 3, 206 - 213, (1994).
- [23] R. Frehlich, in *Trends in Optics: Research, Development and Application*, A. Consortini, ed., Academic Press, London, England, 351 - 370, (1996).
- [24] F. L. Pedrotti, L. S. Pedrotti, "Introduction to Optics, 2nd ed," Prentice Hall, Englewood Cliffs, 24 - 25, (1993).
- [25] M. J. McGilland, W. R. Skinner, *Optical Engineering*, 36, 139 - 145. (1997).
- [26] W. C. Priedhorsky, R. C. Smith, C. Ho, *Applied Optics*, 35, 441 - 452, (1996).
- [27] T. Erikson et al, *Applied Optics*, 38, 2, 605 - 613, (1999).
- [28] N. S. Higdon et al, *Applied Optics*, 33, 6, 422 - 438, (1994).
- [29] M. Wu et al, *Appl. Spectrosc*, 54, 800 - 806, (2000).
- [30] A. M. South, I. M. Dovey, R. L. Jones, *J. Geophys. Res*, 103, 31, 191 - 202, (1998).
- [31] Dainelson, Levin, Abrams, "Meteorology," McGrawHill, (2003).

- [۳۲] R. M. Measures, "Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications," John Wiley Sons, Inc, New York, NY, (1984).
- [۳۳] C. Weitkamp, "lidar," Springer - Verlag, Berlin, (2004).
- [۳۴] Takashi. Fujii, Tetsuo. Fukuchi, "Laser Remote Sensing," CRC Press, (2005).
- [۳۵] M. Kerker, "The Scattering of Light and Electromagnetic Radiation, Academic Press, (1969).
- [۳۶] H. C. Van de Hlslst, "Light Scattering by Small Particle," John Wiley Songs, Inc, New York, NY, (1951).
- [۳۷] C. E. Bohren, D. R. Huffman, , "Absorption and Scattering of Light by Small Particle," John Wiley Songs, Inc, New York, NY, (1983).
- [۳۸] L. P. Bayvel, A. R. Jones, Electromagnetic Scattering and its Applications, Applied Science, England, London, (1981).
- [۳۹] G. Herzberg, "Molecular Spectra and Molecular Structure I," Spectra of Diatomic Molecules, 2nd ed, Van Nostrand Reinhold Company, NY, (1950).
- [۴۰] A. I. Carswell, in D. K. Killinger, A. Mooradian, eds, Optical and Remote Sensing, Springer - Verlag, Berlin, 318 - 326, (1983).
- [۴۱] A. Ansmann, et al, Geophys. Res. Lett, 27, 964 - 966, (2000).
- [۴۲] G. S. Kent, G. M. Hansen, Applied Optics, 37, 3, 861 - 3, 872, (1998).
- [۴۳] K. Sassen, R. P. Benson, J. D. Spinhirne, Geophys. Res. Lett, 27, 673 - 676, (2000).
- [۴۴] F. Cairo et al, Applied Optics, 38, 4, 425 - 432, (1999).
- [۴۵] D. Kim, et al, J. Korean Phys. Soc, 30, 458 - 462, (1997).
- [۴۶] V. Wulfmeyer, J. Atoms. Sci, 56, 1, 55 - 76, (1999).
- [۴۷] A. Fix, V. Weiss, G. Ehret, Pure Appl. Opt, 7, 837 - 852, (1998).

- [٤٨] E. V. Browell, Proc. IEEE, 77, 419 - 432, (1989).
- [٤٩] R. M. Banta et al, J. Geophys. Res, 103, 22, 519 - 544, (1998).
- [٥٠] E. Durieux et al, Atoms. Environ, 32, 2, 141 - 150, (1998).
- [٥١] J. E. Kalshoven et al, Applied Optics, 20, 1, 967 - 971, (1981).
- [٥٢] G. K. Schwemmer et al, Rev. Sci. Instrum. 58, 2, 226 - 237, (1987).
- [٥٣] V. Wulfmeyer, Applied Optics, 37, 3, 804 - 824, (1998).
- [٥٤] S. E. Bisson, J. E. M. Goldsmith, M. G. Mitchell, Applied Optics, 38, 1, 841 - 849, (1999).
- [٥٥] J. A. Cooney, J. Appl. Meteorol, 9, 182, (1970).
- [٥٦] J. A. Cooney, J. Geophys.Res. 77. 1, 78, (1972).
- [٥٧] J. A. Cooney, K. Petri, A. Salik, Applied Optics, 24, 104 - 108, (1985).
- [٥٨] S. H. Melfi, Applied Optics, 11, 1, 605, (1972).
- [٥٩] V. Sherlock et al, Applied Optics, 38, 5, 838 - 850, (1999).
- [٦٠] W. E. Eichinger et al. J. Atmos. Oceanic Technol, 16, 1, 753 - 766, (1999).
- [٦١] R. A. Ferrare et al, J. Geophys. Res, 103, 19, 673 - 689, (1998).
- [٦٢] R. A. Ferrare et al, J. Geophys. Res, 103, 19, 663 - 672, (1998).
- [٦٣] A. Ansmann et al, J. Atmos. Sci, 54, 2, 630 - 641, (1997).
- [٦٤] R. Ferrare et al, J. Geophys. Res, 105, 9, 935 - 947, (2000).
- [٦٥] P. S. Argall et al, Applied Optics, 39, 2, 393 - 400, (2000).
- [٦٦] C. Y. She et al, Geophys. Res. Lett, 22, 377 - 380, (1995).