اولین کنگره بین المللی (هفتمین کنگره ملی) مهندسی ساخت و تولید ایران
آذرماه ۱۳۸۴ تهران- دانشگاه تربیت مدرس

# طراحی و ساخت تراز لیزری با تفکیک‌پذیری یک ثانیه

**محمد علی صادقی[۱]، فرید رضا بیگلری[۲]، حامد مصطفوی[۳]،حامد رضوی[۴]، مرتضی دشتی‌زاده[۵]**

*دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید*

h_mostafavi1980@yahoo.com

## چکیده

اندازه‌گیری به روش لیزری جهت کمیت‌هایی مانند عدم تراز بودن سطح، فاصله، زاویه، صافی سطح در چند دهه اخیر در صنعت اندازه‌گیری معمول شده است. امروزه به دلیل نیاز به سرعت عمل بیشتر در انجام اندازه‌گیری‌های دقیق صنعتی از ترازهای لیزری استفاده می‌شود. در این مقاله، طراحی و ساخت تراز لیزری برای آزمایشگاه اندازه‌گیری دقیق ارائه و شماتیک چند ایده از ترازهای لیزری آورده شده است و انواع ترازهای پیشرفته با دقت بالا معرفی و ساختمان کار آن‌ها توضیح داده شده است. با توجه به ساخت تراز لیزری با مکانیزم‌های مختلف و تست آن‌ها، مکانیزم عملکرد اتوکالیماتورها جهت طراحی و ساخت تراز لیزری انتخاب و با معرفی نحوه عملکرد آن، ساخت تراز لیزری بر اساس آن ارائه گردیده است.

**واژه‌های کلیدی:** تراز لیزری - اتوکالیماتور – مکانیزم آونگ

## ۱- مقدمه

کاربرد نور در اندازه‌گیری به روش نوری جهت پارامترهایی مانند فاصله، زاویه و صافی سطح از سالیان پیش از اختراع لیزر در صنعت اندازه‌گیری معمول بوده است. با اختراع لیزر، مهندسی اندازه‌گیری به طور وسیعی بهبود یافت و به طور کلی دقت و سادگی عمل را به دنبال داشت؛ به طور مثال به دلیل خاصیت همدوسی فضایی و عدم واگرایی نور لیزر با امکان ایجاد باریکه نور لیزر در امتداد مورد نظر [1]، عمل اندازه‌گیری و کالیبراسیون بسیار ساده گردید. همچنین به دلیل خاصیت همدوسی زمانی و درخشندگی نور لیزر امکان اندازه‌گیری فواصل طولانی به طور دقیق میسر شد [2]. علاوه بر اندازه‌گیری زوایا و فواصل کوچک و بزرگ و تنظیم کردن، لیزرها امروزه برای اندازه‌گیری سرعت خطی و زاویه‌ای جامدات و مایعات،

---

۱- استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۵- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پارامترهای هندسی و مکانیکی، تغییرات شکل، لرزش و ارتعاش و صافی سطح به کار گرفته می‌شوند. در سال‌های اخیر از نور لیزر در ساخت ترازهای دقیق استفاده زیادی شده است [3].

امروزه به دلیل نیاز به سرعت عمل بیشتر در کارهای ساختمانی، جاده‌سازی، تسطیح زمین‌های کشاورزی و انجام کارهای صنعتی از ترازهای لیزری استفاده می‌شود. به دلیل اهمیت کاربرد این نوع تراز، سعی در طراحی و ساخت یک نمونه قابل استفاده آن در آزمایشگاه اندازه‌گیری دقیق شده است.

## ۲- انواع طرح‌های پیشنهادی ترازهای لیزری

در ترازهای لیزری از نور لیزر به واسطه خواص منحصر به فرد اپتیکی آن استفاده می‌شود. نور لیزر می‌تواند همراه با انواع مکانیزم‌های آینه متصل به آونگ و یا آینه شناور بر روی یک سیال به‌کار گرفته شود. آینه متصل به آونگ و یا آینه شناور می‌تواند جهت ایجاد بازتاب نور لیزر از یک سطح مبنا به‌کار رود و با مقایسه نور مرجع با نور باز تاب شده از سطح مورد آزمایش، مقدار انحراف زاویه‌ای سطح مورد آزمایش را مشخص کند. در ادامه چند طرح پیشنهادی برای ساخت تراز لیزری آورده شده است.

### ۲-۱- تراز لیزریِ الکترونیکی با سیستم پلاریزه کننده

با توجه به شکل ۱ تراز الکترونیکی، نور منبع نوری که در اینجا یک لیزر با طول موج تقریبیِ ۶۲۸nm است، توسط یک نیم آینه (آینه ٪۵۰) به دو قسمت تقسیم شده و بخشی از آن به سمت گیرندهٔ ترانزیستوری PT1 و بخش دیگر به سمت گیرندهٔ PT2 می‌رود. قبل از هر گیرندهٔ نوری یک صفحهٔ پلاروید قابل تنظیم قرار داده شده است که با چرخاندن آن می‌توان شدت نور فرودی (دریافت شده) روی گیرنده را تنظیم کرد، تا در حالت صفر شدت نور فرودی بر هر دو گیرنده برابر بوده و رفتار آن‌ها تا حد امکان یکسان باشد.

بخشی از نور که به سمت گیرندهٔ PT1 می‌رود از یک صفحهٔ پلاروید(۳) متصل به پاندول عبور می‌کند و بعد به طرف گیرندهٔ PT1 می‌رود. بدین ترتیب با تغییر کردن زاویهٔ دستگاه نسبت به خط افق، پاندول در راستای عمود بر افق ثابت می‌ماند و صفحهٔ پلاروید متصل به آن هم زاویهٔ خود با سطح افق را حفظ می‌کند، اما صفحهٔ پلاروید ۲ با دستگاه و دقیقاً به همان اندازه نسبت به سطح افق تغییر زاویه می‌دهد، بنابراین زاویهٔ بین دو صفحهٔ ۲ و ۳ به اندازهٔ میزان کج شدن تراز نسبت به سطح افق (δθ) تغییر می‌کند. این امر سبب بیشتر شدن یا کمتر شدن شدت نور فرودی بر گیرندهٔ PT1 (بسته به جهت δθ) می‌شود، در حالی که شدت نور فرودی بر PT2 تغییر نکرده است. با تقویت اختلاف ولتاژ بین خروجی‌های PT1 و PT2، و نمایش آن روی یک صفحهٔ نمایشگرِ کالیبره شده بر مبنای میزان و جهت کج شدن تراز، می‌توان زاویهٔ انحراف تراز نسبت به حالت افقی را اندازه‌گیری کرد.

### ۲-۱-۱- محاسبات طراحی تراز لیزریِ الکترونیکی با سیستم پلاریزه کننده

طراحی پاندول: پاندول باید به‌گونه‌ای طراحی شود که در ازای ۱ ثانیه کج شدن تراز حداقل به میزان ۰/۹۵ ثانیه خم شود تا خطای اندازه‌گیری زاویه با این تراز بیش از ۰/۰۵ ثانیه نباشد. به این منظور ضخامت، پهنا، طول، و جنس تسمه، و هم‌چنین جرم وزنهٔ آویزان به تسمه باید به‌طور مناسب طراحی شود. در نتیجه می‌توان مقدار جابه‌جایی را از رابطه زیر به‌دست آورد.

$$\delta = \min\{\frac{m g_2 L^3}{3EI}, L\,\delta\theta\} \qquad (۱)$$

$$g_2 = g\,\sin(\delta\theta) = g\,\delta\theta \qquad (۲)$$

که m جرم، L طول تسمه، E مدول الاستیسیته تسمه و I ممان اینرسی مقطع تسمه است. هم‌چنین برای این‌که مطمئن باشیم وزنهٔ m و بالتَبَّع آن صفحهٔ پلاروید متصل به وزنه، هیچ‌گونه دورانی نداشته و زاویهٔ خود را با سطح افق در اندازهٔ صفر حفظ می‌کند باید همواره δ برابر Lδθ باشد، یا به‌عبارت دیگر:

$$\frac{mg_2L^3}{3EI} \gg L\delta\theta \quad \rightarrow \quad \frac{m(g\delta\theta)L^3}{3EI} = 5L\delta\theta \qquad (۳)$$

و از روابط ۲ و ۳ می‌توان نوشت

$$mgL^2 = 15EI \qquad (۴)$$

که در معادله بالا نیز m جرم، L طول تسمه، E مدول الاستیسیته تسمه و I ممان اینرسی مقطع تسمه است.

از طرفی تسمهٔ به‌کار رفته در اثر اعمال وزن mg در طولانی مدت نباید دچار خزش شود، بنابراین:

$$\frac{mg}{A} \le \frac{S_y}{15} \qquad (۵)$$

که $S_y$ تنش تسلیم جنس تسمه و A سطح مقطع تسمه است.

و از روابط ۴ و ۵ می‌توان نوشت

$$\frac{15EI}{L^2} \le \frac{A}{15}S_y \qquad (۶)$$

و ممان اینرسی مقطع تسمه از رابطه:

$$I = \frac{bh^3}{12} \ , \ A = bh \qquad (۷)$$

که b پهنای تسمه و h ضخامت تسمه است.

برای یک طراحی مناسب می‌توان نوشت:

$$(h/L)^2 \le \frac{12}{225} \times \frac{S_y}{E} = 0.053\frac{S_y}{E} \qquad (۸)$$

در حالی که نسبت h/L از مقدار زیر کمتر و یا مساوی شود

$$\frac{h}{L} \le 0.2\sqrt{\frac{S_y}{E}} \qquad (۹)$$

به عنوان یک رابطهٔ طراحی به‌جای رابطهٔ ۸ از رابطهٔ ۹ استفاده می‌کنیم.

### ۲-۱-۲- محاسبهٔ زاویهٔ اولیهٔ بین صفحات پلاروید ۲و۳

جریان عبوری از فوتوترانزیستور با شدت نور فرودی بر آن متناسب است. شدت نور عبوری از پلاروید۳ هم با $\cos^2\alpha$ متناسب است، که α زاویهٔ بین راستای قطبش صفحهٔ ۲ با راستای قطبش صفحهٔ ۳ است. بنابراین:

$$i_{PT} = kI_0\cos^2\alpha \qquad (۱۰)$$

که $i_{PT}$ جریان فوتوترانزیستور، $k$ ثابت مربوط به فوتوترانزیستور و $I_0$ شدت نور خروجی از پلاروید ۲ است.

$$V_D = R_1 i_{PT} = kR_1 I_0\cos^2\alpha \qquad (۱۱)$$

از رابطه ۱۱ می‌توان نوشت

$$\delta V_D = -(2kR_1I_0\sin\alpha\cos\alpha)\delta\alpha = -[kR_1I_0\sin(2\alpha)]\delta\theta \qquad (۱۲)$$

می‌خواهیم $\delta V_D/\delta\theta$ در رابطه بالا ماکزیمم باشد، بنابراین باید مقدار $\sin(2\alpha)=1$ یا $\alpha=45^\circ$ باشد.

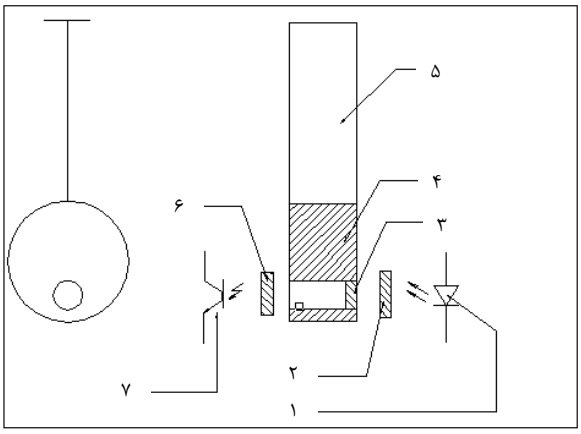
از طرفی با انتخاب $\alpha=45^\circ$ خواهیم داشت:

$$\frac{d(\delta V_D/\delta\theta)}{d\alpha} = -2kR_1I_0\cos(2\alpha) = 0 \quad @\ \alpha=45^\circ \qquad (۱۳)$$

بنابراین $\delta V_D/\delta\theta$ هم در $\alpha=۴۵^\circ$ مستقل از مقدار $\delta\theta$ بوده و یک مقدار ثابت است.

شکل ۱ به صورت شماتیک مشخص کننده دستگاه می باشد. لیست اجزاء آن عبارت است از:

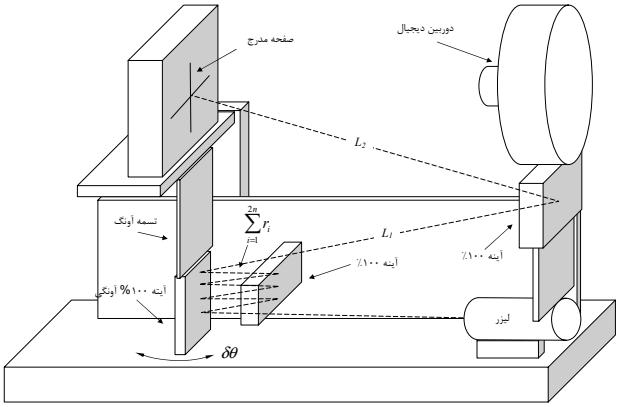
۱. لیزر فرستنده (از نوع نیمه‌رسانا)
۲. صفحهٔ پلاروید (قطبی کنندهٔ نور)
۳. صفحهٔ پلاروید متصل به پاندول
۴. وزنهٔ پاندول
۵. تیغهٔ نازک فلزی
۶. صفحهٔ پلاروید تنظیم شدت نور
۷. فوتوترانزیستور (گیرندهٔ نوری)




**شکل ۱- طرح تراز لیزریِ الکترونیکی با سیستم پلاریزه کننده**

## ۲-۲- تراز پاندولی با دوربین دیجیتال

در شکل ۲ تراز پاندولی با استفاده از دوربین دیجیتالی نشان داده شده است. در شکل۲ پرتو لیزر ابتدا به آینه کامل پاندولی تابیده شده و سپس به آینه‌ای که روبروی آونگ نصب شده است برخورد کرده و انعکاس آن به آینه آونگی برگشته و پس از چند رفت و برگشت بین این دو آینه، به آینه زیر دوربین برخورد کرده و بر روی صفحه مدرج می افتد. لازم به توضیح است که همه آینه‌های استفاده شده در این مدل آینه‌های کامل و۱۰۰٪ هستند.




**شکل ۲- طرح شماتیک تراز پاندولی با دوربین دیجیتال**

بزرگنمایی در این تراز برابر است با

$$M = 2n\delta\theta\frac{R}{\lambda} \qquad (۱۴)$$

که $R$ برابر طول مسیر پرتو لیزر از صفحه مدرج تا آینه پاندولی، $\lambda$ اندازه یک پیکسل (Pixel) به میلیمتر روی سطح صفحه مدرج، $n$ تعداد برگشت پرتو از آینه پاندولی و $\delta\theta$ زاویه پاندول است.
مقدار $R$ که برابر طول مسیر پرتو لیزر از صفحه مدرج تا آینه پاندولی است برابر است با:

$$R = \sum_{i=1}^{2n} r_i + L_1 + L_2 \qquad (۱۵)$$

که $L_1$ طول شعاع لیزر از صفحه مدرج تا آینه زیر دوربین و $L_2$ طول شعاع لیزر از آینه زیر دوربین تا آینه پاندولی و $\sum_{i=1}^{2n} r_i$ برابر طول شعاع لیزر رفت و برگشتی بین آینه پاندولی و آینه ثابت است.

### ۲-۳- اتوکالیماتور

اتوکالیماتور وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری زاویه‌های بسیار کوچک به کار می رود. محدوده کار انواع دقیق آن فقط ۱۰ دقیقه است که در وسایل معمولی این مقدار به ۱ درجه می‌رسد. ابتدا ممکن است به نظر برسد که قابلیت این دستگاه فقط به اندازه‌گیری و مقایسه زوایا محدود می‌شود. اما در مواردی که اندازه‌گیری طول مورد نیاز است نیز این دستگاه را می‌توان به کار برد. در برخی موارد برای اندازه‌گیری تختی سطوح و میزان انحنای سطح هم این دستگاه بسیار مفید خواهد بود. یکی از بزرگ‌ترین مزیت‌های اتوکالیماتورها این است که فاصله صفحه‌ای که به‌دست آوردن زاویه آن مورد نظر است تا دستگاه در محاسبات زاویه آن هیچ تاثیری نخواهد داشت.

#### ۲-۳-۱- مبانی نوری اتوکالیماتور

در ابتدا فرض کنید که آینه (Reflector) در شکل۳ بر محور سیستم عمود است. واضح است که خطوط نوری که از نقطه نورانی منتشر می‌شوند پس از عبور از عدسی شیئی (Objective lens) به صورت یک دسته پرتو موازی با آینه برخورد کرده و بازتابیده شده و پس از عبور مجدد از عدسی تصویری روی محور تشکیل می‌دهد که این امر قانون همگرایی عدسی‌ها را شرح می دهد. حال اگرمطابق شکل۳ آینه به اندازه کوچک $\alpha$ بچرخد نور باز تابیده شده به اندازه $2\alpha$ تغییر زاویه خواهد داد و یک تصویر در فاصله کانونی در محلی غیر از محور تشکیل خواهد داد که فاصله آن از محور به فاصله‌ای که پرتو نور موازی قبل از ورود مجدد به عدسی طی می‌کند وابسته نیست. بنابراین فاصله بین آینه و عدسی روی فاصله تصویر از محور و هم‌چنین اندازه تصویر تاثیر نمی‌گذارد.

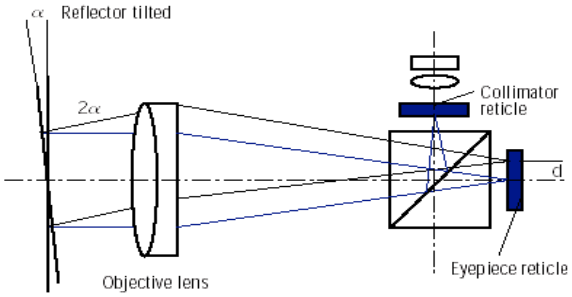
در عمل نیاز به یک شیئی داریم که در کانون عدسی قرار گرفته و پس از روشن کردن آن، فاصله شئ روشن شده را تا تصویرش اندازه‌گیری کنیم.

در شکل۳ اگر آینه بازتابنده به اندازه $\alpha$ نسبت به حالت عمود بر محور منحرف شده باشد نور بازتابیده با زاویه دو برابر این مقدار منحرف می‌شود و تصویر بعلاوه همسوساز با بعلاوه چشمی فاصله‌ای به اندازه d خواهد داشت و این فاصله تابعی از فاصله کانونی عدسی شیئی است و با احتساب اندازه $\alpha$ برحسب رادیان بدست خواهد آمد. این فاصله مستقیما از روی فاصله کانونی عدسی و زاویه $\alpha$ محاسبه می‌شود که برابر است با

$$d = 2f\alpha \qquad (۱۶)$$

که f فاصله کانونی عدسی است. این رابطه برای زوایای $\alpha$ بسیار کوچک قابل استفاده است. اگر f در رابطه بالا فاصله کانونی موثر (EFL) دستگاه باشد با ثابت بودن آن مقدار انحراف آینه برابر خواهد بود با

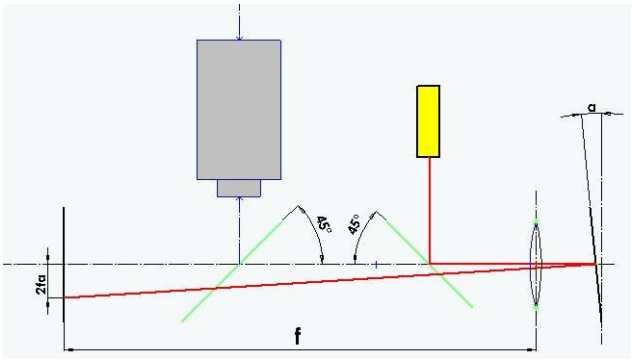
$$\alpha \approx \frac{d}{2f} \quad (۱۷)$$




**شکل ۳- نمای شماتیک عملکرد اتوکالیماتور [4]**

### ۲-۳-۲- طرح اتوکالیماتور لیزری انتخابی

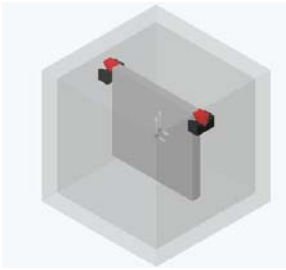
در اتوکالیماتورهای معمولی رسم بر این است که یک منبع نوری تصویر حقیقی آن را در کانون عدسی شیئی قرار دهد [5]. روش جدید دیگری که به تازگی به کار گرفته شده است این است که به جای منبع نور نقطه ای از پرتو لیزر استفاده کنیم به طوری که قبل از برخورد با آینه، پرتو لیزر روی خود محور نوری عدسی باشد. در این حالت با این تقریب که چون در وسط هر عدسی دو طرف سطح عدسی با هم تقریبا موازی هستند پرتو به صورت موازی خارج شده و پس از بازتاب از آینه هم به صورت موازی به دستگاه بر خواهد گشت. این همان اصلی است که اتوکالیماتور بر آن بنا شده است [6].




**شکل ۴- نمای شماتیک اتوکالیماتور لیزری با استفاده از دو آینه**

شکل ۴ نمای شماتیک اتوکالیماتور لیزری را با استفاده از دو آینه نشان می دهد. اگر از این دستگاه بخواهیم به عنوان تراز استفاده کنیم کافی است که برای آن سطح مبنایی تعریف کنیم و سپس زوایا را نسبت به آن اندازه‌گیری نماییم [7].

ایده ساخت این سطح مبنا به این صورت است که مفصل آونگ از گوه‌ای با زاویه کم و یک قاب و زاویه زیاد تشکیل شده است. در این حالت اصطکاک تا حد قابل قبولی کم شده و مرکز تعادل آن خطی قائم خواهد بود. کل آونگ و مفصل و آینه چسبیده شده روی آن درون ظرفی شفاف از مایعی شفاف مثل آب قرار می‌گیرد تا نوسانات آن میرا شود. ظرف کاملا عایق‌بندی شده و احتمال نفوذ مایع به بیرون از ظرف وجود ندارد. شکل۵ نمای پاندول منعکس کننده را نشان می‌دهد.

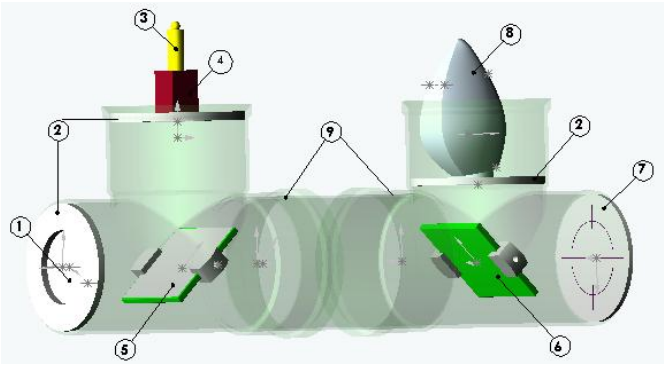


**شکل ۵- آینه قائم داخل ظرف شیشه‌ای**

## ۳- طراحی و ساخت اتوکالیماتور لیزری

### ۳-۱- طراحی و ساخت اتوکالیماتور لیزری (نمونه اول)

در این طرح (شکل۶) به جای عدسی شیئی از شیشه عینک ۲ دیوپتر استفاده شد که دارای ضخامت کم و فاصله کانونی دقیق ۵۰cm می‌باشد. از نور یک لیزر پوینتر که از درون سوراخی به قطر تقریبی یک میلیمتر عبور کرده هم به عنوان منبع نور لیزر استفاده شد. برای مشاهده نتایج تصویر نور لیزر پس از بازتاب از آینه دارای انحراف روی یک صفحه مدرج می افتد و با یک CCD می‌توان نتیجه را به کامپیوتر منتقل کرد و با دقت بسیار خوبی نتایج آن را خواند و دستگاه را کالیبره کرد. برنامه پردازش تصویر آن هم نوشته شد و مورد آزمایش قرار گرفت و قابلیت مورد نیاز تراز لیزری برای ضبط موقعیت هر نقطه در هر زمان هم به آن افزوده شد.




**شکل ۶- طراحی دستگاه نمونه اول**

### ۳-۲- بررسی اجزا دستگاه ساخته شده (نمونه اول)

۱. عدسی محدب با فاصله کانونی ۵۰ سانتی‌متر
۲. سه عد دایره از جنس پلکسی‌گلاس برای اتصال عدسی، لیزر وCCD
۳. لیزر پوینتر
۴. مکعب چوبی برای اتصال لیزر
۵. شیشه رفلکس برای خروج پرتو لیزر از دستگاه
۶. شیشه رفلکس برای مشاهده صفحه ۹ توسط CCD
۷. صفحه سفید برای تشکیل اثر لیزر
۷. CCD برای مشاهده نتایج و ارسال آن‌ها به رایانه
۹. دو عدد لوله پلیکا که برای نشان دادن اجزای درونی به صورت شفاف نشان داده شده‌اند

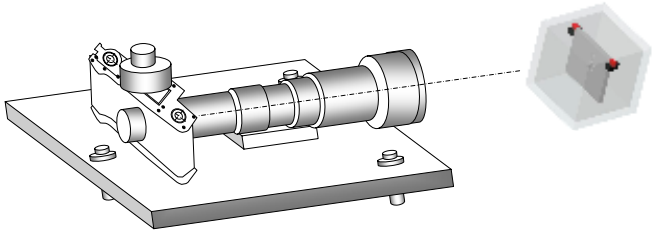
هدف نهایی ساخت وسیله‌ای کاملا تجاری و دقیق است که علاوه بر به‌کار رفتن در سیستم‌های اندازه‌گیری به عنوان اتوکالیماتور و نیز تراز لیزری می‌تواند به عنوان سیستم دقیقی برای اندازه‌گیری کمیت‌های متفاوت به صورت کامپیوتری مورد استفاده قرار گیرد.

**شکل۷- نمای حقیقی اتوکالیماتور ترازی (دستگاه نمونه اول)**

تصویر اتوکالیماتور ترازی در شکل ۷ نمایش دیده می‌شود.

### ۳-۳- طراحی و ساخت اتوکالیماتور لیزری (نمونه دوم)

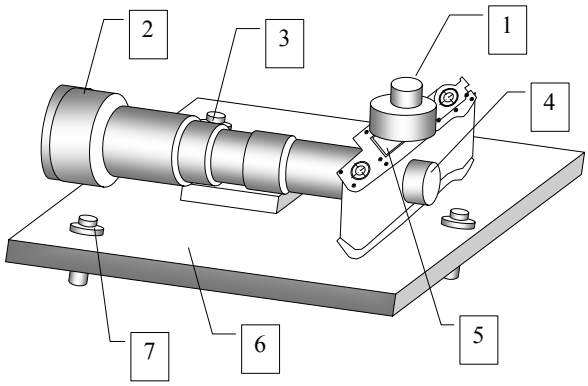
در این نمونه از لنزهای حرفه‌ای اپتیکی استفاده شده است. شکل ۸ طرح شماتیک این تراز لیزری را نشان می‌دهد.



**شکل ۸- طراح شماتیک دستگاه نمونه دوم**

### ۳-۴- بررسی اجزا دستگاه ساخته شده (نمونه دوم)

اجزا دستگاه ساخته شده نمونه دوم در ذیل لیست شده است. بعضی از این اجزا در شکل ۹ نشان داده شده است.




**شکل ۹- نمای شماتیک بعضی از اجزا دستگاه نمونه دوم**

۱. دوربین CCD برای مشاهده نتایج و ارسال آن‌ها به رایانه
۲. مجموعه عدسی محدب با فاصله کانونی متغیر ۶۵۰ الی ۱۳۰۰ میلی‌متر
۳. چهار عد آداپتور دایره شکل از جنس آلومینیم برای اتصال لیزر
۴. لیزر دیودی با طول موج ۶۲۸ nm
۵. شیشه رفلکس برای مشاهده تصویر توسط CCD
۶. صفحه اصلی بدنه دستگاه جهت نصب اجزا دستگاه
۷. سه عدد پایه میکرومتر جهت تنظیم ارتفاع و زاویه اولیه دستگاه

**شکل ۱۰- نمای حقیقی اتوکالیماتور ترازی (دستگاه نمونه دوم)**

تصویر اتوکالیماتور ترازی در شکل ۱۰ نمایش دیده می‌شود.

## نتایج:

در این مقاله مکانیزم‌های مختلف با دقت بالا برای ساخت تراز لیزری معرفی شد. پس از ساخت نمونه‌های آزمایشی و تست آن‌ها، مکانیزم عملکرد اتوکالیماتور جهت طراحی و ساخت تراز لیزری انتخاب گردید.

چند نمونه آزمایشی تراز لیزری ساخته شده عبارت بودند از:

۱. تراز لیزری - الکترونیکی با سیستم پلاریزه کننده نور لیزر

۲. تراز لیزری آونگی با چند رفت و برگشت نور

۳. تراز لیزری با سیستم اتوکالیماتور

## تشکر و قدردانی:

از آقایان مهندس مسعود شیری و مهندس علی ئی جهت انجام آرمایشها روی تراز لیزریِ الکترونیکی با سیستم پلاریزه کننده تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع:

۱- بهجت، عباس، لیزر اصول و کاربردها، دانشگاه یزد، ۱۳۸۱.

۲- حریری، اکبر و گل نبی، حسین، اصول لیزر، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۱.

۳- جزوه دستورالعمل آزمایشگاه اندازه‌گیری دقیق، گردآوری و تالیف توسط آقای دکتر بیگلری، ۱۳۸۲.

4- Metrology for Engineers, Shotbolt and Galyer, fifth edition, Cassell publishers Ltd, 1990
5- Practical engineering metrology, K.W. B. Sharp, Pitman paper backs, 1970.
6- Engineering Metrology, K. J. Hume, Macdonald and co., London, 1963.
7- Engineering Precision Measurements, A.W. Judge, Chapman and hall press, 1962.