بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

# طراحی اپتیکی دوربین دما بالا

هادی برزویی[۱]، محمد کمالی مقدم[۲]، مصطفی کهن[۳]

[۱]گروه علوم مهندسی، پردیس فناوری‌های نوین، دانشگاه حکیم سبزواری، کد پستی ۹۶۱۷۹۷۶۴۸۷، h.borzouei@hsu.ac.ir

[۲]گروه علوم مهندسی، پردیس فناوری‌های نوین، دانشگاه حکیم سبزواری، کد پستی ۹۶۱۷۹۷۶۴۸۷

[۳]دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، کد پستی ۹۶۱۷۹۷۶۴۸۷

**چکیده – پایش داخل کوره و دیدن شعله توسط دوربین ناحیه مرئی برای اتاق کنترل اهمیت دارد. از طرفی، قطعات الکترونیکی و اپتیکی در دماهای بالا صدمه می‌بینند. برای دیدن داخل کوره از هندسه آندوسکوپی استفاده شده و تصویر کوره توسط تلسکوپ نیوتنی به بیرون از کوره منتقل می‌شود. حسگر سی‌سی‌دی و اجزای الکترونیک دربیرون از کوره قرار می‌گیرند. قسمتی از دوربین که شامل مجموعه قطعات اپتیکی می‌شود و داخل کوره قرار دارد با دمش هوای خنک با فشار ۷ اتمسفر خنک شده و دوربین تحمل دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد دارد. میدان دید قابل دید توسط این دوربین، ۱۶± درجه است و سبب می‌شود که دهانه ۴ متری کوره، تمام طول موثر مشعل و اصل شعله به صورت رنگی در اتاق کنترل دیده شوند.**

کلید واژه- آندوسکوپ، تصویربرداری از شعله، حسگر سی‌سی‌دی رنگی، دوربین دما بالا.

# Optical design of high temperature camera

**Hadi Borzouei[1], Mohammad Kamali moghadam[2], Mostafa Kohan[3]**

**[1]Department of Engineering Sciences, Campus of New Technologies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. h.borzouei@hsu.ac.ir**
**[2]Department of Engineering Sciences, Campus of New Technologies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran**
**[3]Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran**

**Abstract- Monitoring inside the furnace and seeing the flame with the visible camera is important for the control office. The electronic and optical components are damaged at high temperatures. In this work, the endoscopic geometry is used to see inside the furnace, and the image of the furnace is transmitted out of the furnace by the Newtonian telescope. The CCD sensor and electronic components are located outside the furnace. The part of the camera that is located in the furnace is cooled by blowing air with a pressure of 7 atmospheres and the high-temperature camera can withstand temperatures of 1100 degrees Celsius. The field of view visible by this camera is ±16 degrees and could see the 4-meters opening of the furnace, the full effective length of the burner, and the original flame to be seen in color in the control office.**

Keywords: color CCD, endoscope, flame imaging, high temperature camera.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15 ]

## مقدمه

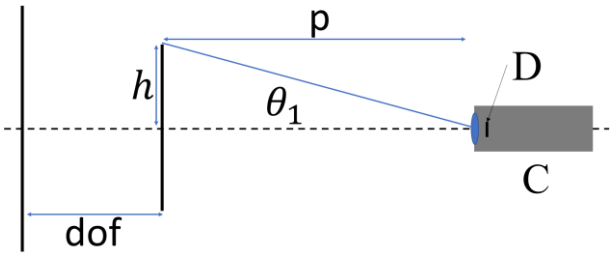
در بسیار از صنایع، فرایند کنترل و پایش، مهم و حیاتی است. این موضوع در صنایعی مانند پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، ذوب فلزات، و نیروگاه‌های حرارتی که فرایند تولید در آن‌ها با حرارت و در دمای بالا انجام می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که صنعت سیمان یکی از این صنایع است.

در این صنایع، مسول اتاق کنترل باید در تمام مدت از هر گونه اتفاقی که درون کوره می‌افتد آگاه باشد و داخل کوره را ببیند. از دست رفتن شرایط کاری، افت دما، خرابی تجهیزات مواردی هستند که ممکن است خسارت‌های بالایی به بار آورند. فرایند پایش دقیق نیازمند ابزار و شرایط ویژه ای است. دوربین دمای بالا یکی از ابزارهای پایش کوره حرارتی است. به کمک دوربین دما بالا مراحل مختلف فرایند تولید شعله از جرقه زدن تا روشن شدن کامل مشعل، ایجاد و ماندگاری شعله اصلی در کوره مشاهده می‌شود. پایش دقیق و بی‌درنگ درون کوره، توان تولید و ایمنی مجموعه را بالا می‌برد [۱].

در کوره پخت سیمان، جداره محفظه کوره دمایی بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد دارد و دمای داغ‌ترین نقطه شعله به ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. دوربین پایش و کنترل درون کوره باید تحمل دمای بالا را داشته باشد. ما از روش آندوسکوپ برای طراحی این دوربین استفاده کرده‌ایم.

## چیدمان اپتیکی

چیدمان قرارگیری دوربین و هندسه تصویربرداری از داخل کوره در شکل ۱ آمده است. فاصله اولین دیواره از محل دوربین (P) و عمق میدان دید (Dof: Depth of Focus) است. پهنای دهانه کوره ۴ متر بوده و از محل نصب دوربین ۸ متر فاصله دارد. مهمترین بخش هایی از کوره که باید توسط دوربین دیده شود در فاصله ۸ تا ۲۰ متری از محل نصب دوربین قرار دارند. مشخصات هندسی مورد نیاز برای طراحی اپتیکی در جدول ۱ آمده است.




شکل ۱: هندسه قرارگیری دوربین. دوربین با نماد C، آشکارساز دوربین با نماد D، فاصله قرارگیری اولین دیواره از جسم با p و عمق میدان دید با dof، h نیم ارتفاع جسم، $\theta_1$ نیم زاویه میدان دید، معرفی شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی مورد نیاز برای طراحی اپتیکی

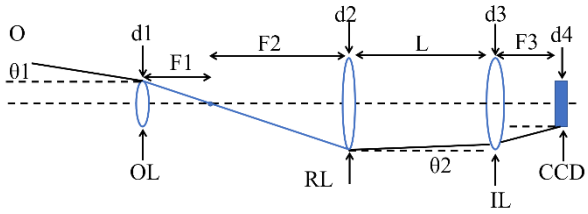
| کمیت | نماد | مقدار |
|---|---|---|
| فاصله جسم تا عدسی | P | ۸ متر |
| نیم ارتفاع جسم | h | ۲ متر |
| عمق میدان دید | Dof | ۱۲ متر |
| نیم زاویه میدان دید | $\theta_1$ | ۱۶ درجه |
| اندازه حسگر سی‌سی‌دی | D | ۵,۵۷ ×۲,۵۶ میلی‌متر مربع |

چیدمان قطعات اپتیکی در شکل ۲ رسم شده است. در این چیدمان، از یک عدسی شیئی مرکب برای دریافت نور از جسم در جلوی دوربین استفاده شده است. عدسی دوم یک



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15 ]

عدسی دوتایی بوده و نور رسیده را تقریبا موازی می‌کند. نور موازی شده توسط عدسی دوم به عدسی سوم (عدسی تصویرساز) رسیده و تصویر جسم را روی حسگر سی‌سی‌دی نگاشت می‌کند.




شکل ۲: چیدمان سیستم اپتیکی. در این چیدمان، F1 فاصله کانونی عدسی شیئی، F2 فاصله کانونی عدسی میدان‌بند، F3 فاصله کانونی عدسی تصویرساز، d1 قطر دهانه عدسی شیئی، d2 قطر دهانه عدسی میدان‌بند، d3 قطر دهانه عدسی تصویرساز، D پهنای حسگر سی‌سی‌دی، L فاصله عدسی شیئی تا عدسی تصویرساز، θ1 زاویه پرتو کناری رسیده به عدسی شیئی، θ2 زاویه خروج نور از عدسی میدان‌بند است.

میانگین فاصله ۱۴ متر برای محل جسم در نظر گرفته شده که برای یک عدسی با فاصله کانونی چند ده میلی‌متر، تقریبا بی‌نهایت فرض می‌شود. عدسی دوم به صورت هم‌کانون با عدسی اول قرار گرفته و تشکیل یک موازی‌ساز نیوتنی می‌دهد. موازی‌ساز، واگرایی نور رسیده به عدسی اول را طبق رابطه زیر کاهش داده و با واگرایی کمتر به عدسی سوم (عدسی تصویرساز دوربین) می‌فرستد [۲].

$$\frac{\theta 1}{\theta 2} = \frac{F2}{F1} \qquad (۱)$$

در این رابطه، F1، F2 به ترتیب فاصله کانونی عدسی اول و فاصله کانونی عدسی دوم و θ1 ، θ2 نیز به ترتیب واگرایی نور رسیده به عدسی اول و واگرایی نور خارج شده از عدسی دوم هستند.

فاصله کانونی عدسی اول ۱۶ میلی‌متر و فاصله کانونی عدسی دوم ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است. واگرایی با نسبت فاصله کانونی دو عدسی (۱۰۰/۱۶=۶٫۲۵) کاهش می‌یابد. واگرایی پرتو بعد از عدسی دوم با ضریب ۶٫۲۵ کاهش یافته و به مقدار ۲٫۵ درجه می‌رسد. میدان دید آشکارساز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

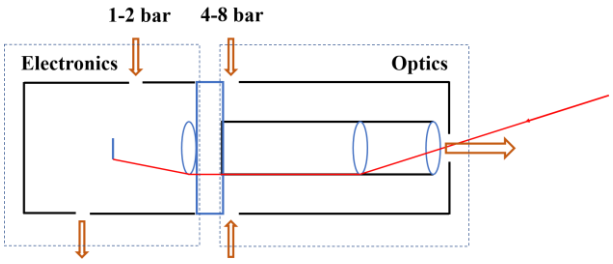
$$\alpha = \frac{1}{2}\frac{D}{F3} \qquad (۲)$$

که D پهنای حسگر سی‌سی‌دی و F3 فاصله کانونی عدسی تصویر ساز دوربین است. تمام پرتوهایی که در میدان دید دوربین قرار بگیرند به صفحه آشکارساز دوربین رسیده و ثبت می‌شوند.

اندازه حسگر سی‌سی‌دی دوربین ۵٫۵۷ ×۲٫۵۶ است و زاویه پرتو رسیده به عدسی تصویر ساز از عدسی دوم، ۲٫۵ درجه (۰٫۰۴۴ رادیان) است. طبق رابطه۲، اندازه حسگر سی‌سی‌دی تعیین کننده زاویه دریافت پرتو است. با توجه به ابعاد حسگر، فاصله کانونی عدسی تصویرساز باید بین ۳۰ (برای ضلع بزرگ حسگر) و ۶۵ (ضلع کوچک حسگر) میلی‌متر باشد تا تمام پرتوهای رسیده به عدسی اول به حسگر سی‌سی‌دی برسند. در این طراحی از عدسی تصویرساز با فاصله کانونی ۷۵ میلی‌متر استفاده شد. با این انتخاب، در هر دو راستا، تمام پرتوها به آشکارساز می‌رسند. در این طراحی برای پنجره ورودی از شیشه کوارتز استفاده شده است که مقاومت مکانیکی بسیار خوبی دارد، ضریب هدایت گرمایی آن بسیار پایین است و دمای ذوب آن ۱۷۵۰ درجه سانتی‌گراد است. این ماده در اثر شوک‌های حرارتی مقاوم بوده و ترک برنمی‌دارد. برای محافظت قطعات اپتیک و الکترونیک از صدمه ناشی از حرارت داخل کوره، تمام قطعات، داخل سازه استیل قرار گرفته و توسط دمش هوای سرد خنک می‌شوند که در شکل ۳ آمده است. در این قسمت از یک تیوپ دوجداره هم محور استفاده شده که قطعات اپتیکی داخل استوانه داخلی قرار گرفته و در بین تیوپ اول تا دوم یک لایه سال هوا دمیده می‌شود تا خنک‌کاری شود.



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15 ]




شکل ۳: چیدمان دمش هوای خنک برای محافظ حرارتی قطعات الکترونیک و اپتیک

شکل ۴: تصویر نهایی دوربین. محل عدسی‌های مختلف درون دوربین توسط بیضی‌ها آبی و محل آشکارساز توسط مستطیل قرمز مشخص شده است.

برای اندازه‌گیری میدانی عملکرد دوربین از تصویر کمدهای داخل آزمایشگاه استفاده شده که در شکل ۵ دیده می‌شوند. کل پهنای تصویر ۶ متر و در فاصله ۱۰ متری از دوربین قرار دارد. اثر ابیراهی انحنای میدان توسط خط قرمز بالای ردیف کمدها مشخص شده است.

شکل ۵: معیاری از ابیراهی انحنای میدان توسط تصویر کمدهایی که در فاصله ۱۰ متری از دهانه دوربین قرار گرفته‌اند بدست می‌آید. خط قرمز برای اندازه‌گیری انحراف تصویر از خط راست رسم شده است.

دوربین بعد از تنظیم در آزمایشگاه، در محل نهایی در کوره نصب شد. در شکل ۶ نمونه‌ای از تصویر دریافت شده توسط این دوبین از داخل کوره پخت سیمان دیده می‌شود. در این تصویر، محل مشعل، دیواره و خود شعله به وضوح مشخص است.

شکل ۶: تصویر گرفته شده از داخل کوره سیمان سبزوار توسط دوربین حرارتی دما بالا. مشعل، شعله و دیواره کوره در این عکس دیده می‌شوند.

## نتیجه‌گیری

دوربین مقاوم نسبت به دمای بالای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای پایش داخل کوره پخت سیمان ساخته شد که میدان دید ۱۶± داشته و یک تصویر رنگی با وضوح تصویر ۱۹۲۰×۱۰۸۰ پیکسل ایجاد می‌کند. این دوربین اندازه دهانه ۴ متری را در فاصله متوسط ۱۴ متری را اندکی ابیراهی انحنای میدان ثبت می‌کند. ابیراهی انحنای میدان که متریک را تغییر می‌دهد به صورت آزمایشگاهی برآورد شده و برای این کاربرد مقدار آن قابل چشم پوشی است.

## سپاسگزاری

از مدیر عامل و مسولان اجرایی شرکت سیمان لار سبزوار برای اعتماد و همکاری صمیمانه، بی‌نهایت ممنون و سپاس‌گزارم.

## مرجع‌ها

1. **عزیزیان, م.ر., تکنولوژی پخت سیمان. ۱۳۸۵: کتاب دانشجو.**
2. **Smith, W.J., Modern optical engineering: the design of optical systems. 2008: McGraw-Hill Education.**



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15 ]