



## دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر گروه الکترونیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک- طراحی مدارهای

مجتمع آنالوگ و دیجیتال

عنوان

طراحی سنسور اندازه گیری خمش مبتنی بر فیبر نوری

استادان راهنما

دکتر منوچهر بهرامی

دکتر علی رستمی

پژوهشگر

عطا تقی پور

تابستان ۹۱

الْحَمْدُ لِلَّهِ

تقدیم بہ

پدرم بہ استواری کوه

مادرم بہ زلالی چشمہ آب

و

خواہر و برادر عزیزم

تقدیر و شکر:

شکر و سپاس پروردگاریکتارا که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار  
حکمت او در دل شب تار، در فشان. آفریدگاری که درهای علم را بر من گشوده و مرا  
یاری می کند تا در عرصه علم و دانش، پله های سعادت و تعالی را طی کنم و به او نزدیک تر  
گردم.

از پدر دلسوز و مادر مهربانم که اصلی ترین مشوق های من در راه کسب علم و معرفت  
هستند، کمال شکر و قدردانی را دارم.

بهترین شکر اتم را تقدیم اساتید کرامت‌مردم، آقایان دکتر منوچهر بهرامی و دکتر علی  
رستمی می‌نمایم که در طول این دوره تحصیلی با صبر و حوصله یاریم نموده و، همواره پشتیبان و  
راه‌کشایم بودند. همچنین از آقایان دکتر حامد باغبان، دکتر فرخ جنابی شریفی و دکتر  
شی جیاه کوبه خاطر مساعدت و یاری بنده در انجام این پروژه، نهایت شکر را دارم.

در نهایت از دوستان عزیزم و همه کسانی که مراد نگارش این پایان نامه یاری کردند،  
کمال شکر را دارم.

عطا تقی پور

مرداد ۱۳۹۱

نام خانوادگی: تقی پور	نام: عطا
عنوان پایان نامه: طراحی سنسور اندازه گیری خمش مبتنی بر فیبر نوری	
اساتید راهنما: دکتر منوچهر بهرامی، دکتر علی رستمی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی برق - الکترونیک
گرایش: طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ و دیجیتال	تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۹۱
تعداد صفحه: ۹۳	
واژه نامه: خمش، سنسور فیبر نوری، گریٹینگ فیبر نوری براگ، گریٹینگ فیبر نوری با طول پریود طولانی	
<p><b>چکیده:</b> خمش یکی از پارامترهای مورد نظر مکانیکی است که اندازه گیری آن برای مقاصد خاصی مطلوب می باشد. امروزه سنسورهای مقاومتی برای تشخیص میزان خمش در یک جهت و یا دو جهت مخالف هم، به صورت محصول تجاری در دسترس می باشند. با این حال معایب موجود برای این نوع سنسور مانند حساسیت جانبی زیاد به دما و رطوبت، نویزپذیری از محیط اطراف، تشخیص میزان خمش تنها در یک یا دو جهت و ابعاد نسبتاً بزرگ باعث می گردد تا استفاده از این نوع سنسور خمش بسیار محدود باشد. از سویی دیگر سنسورهای فیبر نوری که در طی سالهای اخیر و با موفقیت فراوانی پا به عرصه رقابت سنسورها نهادند، فارغ از بسیاری از مشکلات بیان شده برای سنسورهای مقاومتی می باشند. مزیت هایی که سنسورهای فیبر نوری دارا می باشند از قبیل مصونیت از سیگنالهای محیطی و مقاومت در برابر نویز، ابعاد بسیار کوچک، انعطاف پذیری مکانیکی و ... باعث گردیده که محققان عرصه سنسورها به تلاش در جهت تحقق سنسور خمش مبتنی بر فیبر نوری با مزایای منحصر به فرد خود دست زنند. طی سالهای اخیر، تلاشهایی در جهت دستیابی به سنسور خمش مبتنی بر فیبر نوری انجام شده، اما همگی دارای کاستی هایی می باشند. در این پروژه، هدف طراحی یک سنسور خمش مبتنی بر فیبر نوری است به طوری که تا حد ممکن فارغ از محدودیت هایی باشد که یک سنسور خمش می تواند دارا باشد. در این راستا، ابتدا مدلی جامع برای شبیه سازی سنسورهای خمش مبتنی بر فیبر نوری ارائه می گردد و سپس با استفاده از همین مدل، شبیه سازی سنسورهای نوری مبتنی بر فیبر نوری صورت می پذیرد. در نهایت و پس از ارزیابی نتایج شبیه سازی ها، سنسور خمشی مبتنی بر فیبر نوری ارائه می گردد که توانایی سنجش میزان خمش تا بیشترین میزان مورد نظر، در بازه جهتی ۰ تا ۳۶۰ درجه را دارد و فارغ از حساسیت جانبی نسبت به فشار و دما می باشد.</p>	

فصل اول این پایان‌نامه شامل کلیات تحقیق و مفاهیم اساسی مرتبط با آن می‌باشد. فصل دوم جزئیاتی در مورد تئوری مساله و مدلی جامع برای شبیه‌سازی سنسور خمش مبتنی بر فیبر نوری ارائه می‌دهد. فصل سوم نتایج حاصل از شبیه‌سازی سنسورهای خمش مبتنی بر فیبر نوری را در بر می‌گیرد. ارزیابی حساسیت‌های جانبی سنسور خمش مبتنی بر FBG در فصل چهارم گردآوری گشته است. فصل پنجم، یک نوع سنسور خمش مبتنی بر FBG که در برابر تغییرات دما و فشار مقاوم است را معرفی می‌کند. در نهایت، فصل ششم شامل نتیجه‌گیری و پیشنهادات در مورد پایان‌نامه است.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات تحقیق
۲	۱-۱ مقدمه
۵	۲-۱ سنسور خمش
۶	۳-۱ سنسور خمش مقاومتی
۹	۴-۱ سنسور خمش مبتنی بر فیبر نوری
۹	۱-۴-۱ فیبر نوری و مدهای انتشاری در آن
۱۷	۲-۴-۱ گریٹینگ فیبر نوری
۱۹	۱-۲-۴-۱ گریٹینگ فیبر نوری با طول پریود طولانی
۲۰	۲-۲-۴-۱ گریٹینگ فیبر نوری براگ
۲۱	۳-۴-۱ سنسور خمش مبتنی بر LPFG
۲۳	۴-۴-۱ تحقیقات انجام شده تاکنون در زمینه سنسور خمش مبتنی بر LPFG
۲۶	۵-۴-۱ سنسور خمش مبتنی بر FBG
۲۷	۶-۴-۱ تحقیقات انجام شده تاکنون در زمینه سنسور خمش مبتنی بر FBG
۳۰	۵-۱ مقایسه بین انواع سنسورهای خمش
۳۳	فصل دوم: تئوری و مدل شبیه سازی سنسور خمش مبتنی بر فیبر نوری
۳۴	۱-۲ مقدمه
۳۴	۲-۲ بررسی و تحلیل مکانیکی فیبر خم شده
۳۵	۳-۲ مدلسازی فیبر نوری خم شده
۳۷	۴-۲ تئوری و نحوه شبیه سازی سنسور خمش مبتنی بر LPFG
۳۹	۵-۲ تئوری و نحوه شبیه سازی سنسور خمش مبتنی بر FBG



۴۰	فصل سوم: نتایج و بحث
۴۱	۱-۳ مقدمه
۴۱	۲-۳ بازه خمش در نظرگرفته شده برای شبیه‌سازی سنسورهای خمش مبتنی بر فیبر نوری
۴۱	۱-۲-۳ اتساع رگ آئورت و عمل جراحی اندووسکولار
۴۶	۲-۲-۳ کاربرد سنسور خمش مبتنی بر فیبر نوری در عمل جراحی اندووسکولار
۴۷	۳-۳ سنسور خمش مبتنی بر LPFG
۵۶	۴-۳ سنسور خمش مبتنی بر FBG
۶۱	۵-۳ ارزیابی سنسورهای خمش مبتنی بر LPFG و مبتنی بر FBG و مقایسه بین آنها
۷۱	فصل چهارم: حساسیت‌های جانبی سنسور خمش مبتنی بر FBG
۷۲	۱-۴ مقدمه
۷۳	۲-۴ حساسیت جانبی سنسور خمش مبتنی بر FBG نسبت به فشار
۷۷	۳-۴ حساسیت جانبی سنسور خمش مبتنی بر FBG نسبت به دما
۸۰	۴-۴ بحث پیرامون حساسیت‌های جانبی سنسور خمش مبتنی بر FBG
۸۱	فصل پنجم: سنسور خمش مبتنی بر FBG مقاوم در برابر تغییرات دما و فشار
۸۲	۱-۵ مقدمه
	۲-۵ پیاده‌سازی سنسور خمش مبتنی بر FBG مقاوم در برابر تغییرات دما و فشار بر روی فیبر
۸۳	نوری خاص
	۳-۵ معرفی سنسور تشخیص شکل <sup>۱</sup> مقاوم در برابر تغییرات دما و فشار بر پایه سنسور خمش
۸۵	مبتنی بر FBG بر روی فیبر نوری خاص

---

<sup>۱</sup> Shape Sensing

۸۷	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۸	۱-۶ مقدمه
۸۸	۲-۶ نتیجه‌گیری
۸۹	۳-۶ پیشنهادات
۹۰	مراجع

## فهرست شکلها

- شکل ۱-۱: (الف) و (ب): کاربرد سنسور خمش در تعیین وضعیت اندام‌های ورزشکاران در حین ورزش (ج): استفاده از سنسور خمش در تعیین وضعیت انگشتان روبات (د): کاربرد سنسور خمش در ساخت دستکش‌های هوشمند
- ۳
- شکل ۱-۲: دایره به شعاع R عبور کننده از قسمت خم شده جسم
- ۵
- شکل ۱-۳: نمونه‌ای از سنسور خمش مقاومتی
- ۶
- شکل ۱-۴: خمش اعمالی به یک سنسور خمش مقاومتی
- ۷
- شکل ۱-۵: (الف): ساختار سنسور خمش بر پایه نانوکامپوزیت (ب): تغییر مقاومت دوسر لایه نانوکامپوزیت در اثر خمش [۳]
- ۸
- شکل ۱-۶: پرتوی نوری در برخورد به مرز مشترک بین دو محیط
- ۱۰
- شکل ۱-۷: انتقال نور در فیبر نوری
- ۱۰
- شکل ۱-۸: شکل مدهای مربوط به فیبر نوری
- ۱۳
- شکل ۱-۹: (الف): برقراری شرط بازتابش کلی در فیبر نوری مستقیم و انتقال پرتوی نوری (ب): نقض شرط بازتابش کلی در اثر خم شدن فیبر و فرار نور از ناحیه هسته به ناحیه پوسته
- ۱۵
- شکل ۱-۱۰: نمودار ثابت انتشار موج (نرمالیزه شده) بر حسب فرکانس (نرمالیزه شده) برای یک فیبر نوری نوعی و فرکانسهای قطع و بحرانی مربوط به آن
- ۱۶
- شکل ۱-۱۱: گریتینگ فیبر نوری یکنواخت
- ۱۸
- شکل ۱-۱۲: LPFG و نحوه عملکرد آن
- ۱۹
- شکل ۱-۱۳: FBG و نحوه عملکرد آن
- ۲۰
- شکل ۱-۱۴: (الف): مفهوم پدیده جدایی مد در اثر خمش بر روی فیبر نوری حاوی LPFG (ب): رابطه بین میزان جدایی مد و میزان خمش اعمالی [۱۲]
- ۲۲

- شکل ۱-۱۵: میزان جدایی مد بر اثر خمش [۱۱] ۲۴
- شکل ۱-۱۶ (الف): جابجایی طول موج براگ در اثر خمش (ب): نمودار میزان جابجایی طول موج براگ بر حسب میزان خمش [۱۴] ۲۶
- شکل ۱-۱۷: FBG ایجاد شده که در مرکز سطح مقطع فیبر قرار ندارد [۱۵] ۲۸
- شکل ۱-۱۸: نمودار جابجایی طول موج براگ بر حسب میزان خمش [۱۵] ۲۸
- شکل ۱-۱۹: سطح مقطع فیبر نوری پلیمری با هسته نامرکزی [۱۴] ۲۹
- شکل ۱-۲۰: جابجایی طول موج براگ بر اثر خمش در فیبر نوری هسته نامرکزی پلیمری [۱۴] ۳۰
- شکل ۲-۱: محورهای مختصات مربوط به سطح مقطع فیبر نوری خم شده حول دایره به شعاع R ۳۵
- شکل ۳-۱: رگ آئورت و مسیر آن در بدن ۴۲
- شکل ۳-۲: قسمت های مختلف رگ آئورت ۴۳
- شکل ۳-۳: اتساع رگ آئورت در قسمت های مختلفی از این رگ ۴۴
- شکل ۳-۴: عمل جراحی اندووسکولار ۴۵
- شکل ۳-۵: قرار دادن استنت گرفت توسط میل جراحی در محل اتساع رگ آئورت ۴۵
- شکل ۳-۶: انجام عمل اندووسکولار توسط پزشک زیر اشعه ایکس ۴۶
- شکل ۳-۷: شکل مدها و نمودار برش در جهت محور X شدت نور مربوط به مدهای  $LP_{01}$ ،  $LP_{04}$  و  $LP_{13even}$  به ازای مقدار خمش های  $K=0, 4, 10, 15, 20, 26m^{-1}$  که از شبیه سازی در طول موج  $1550nm$  به دست آمده اند ۴۸
- شکل ۳-۸: ضریب شکست موثر مدهای  $LP_{01}$ ،  $LP_{04}$  و  $LP_{13even}$  در طول موج  $1550nm$  نسبت به میزان خمش فیبر ۴۹
- شکل ۳-۹: طول موج های کوپل نور از مد هسته به مدهای  $LP_{04}$  و  $LP_{13even}$  ۵۱
- شکل ۳-۱۰: میزان جدایی مدها برای سنسور خمش مبتنی بر LPFG در بازه خمش مورد نظر ۵۲

- شکل ۳-۱۱: میزان کوپل نور از مد هسته به مدهای  $LP_{04}$  و  $LP_{13\text{even}}$  به ازای میزان خمش موردنظر ۵۳
- شکل ۳-۱۲: نمودار ضریب شکست فیبر نوری از نوع W در مقایسه با فیبر نوری عادی ۵۵
- شکل ۳-۱۳: افزایش حساسیت سنسور خمش مبتنی بر LPFG بر روی فیبر نوری از نوع W نسبت به فیبر نوری عادی ۵۶
- شکل ۳-۱۴: سطح مقطع و ابعاد فیبر نوری چهارهسته‌ای ۵۷
- شکل ۳-۱۵: (الف): فیبر نوری چهارهسته‌ای در پنج زاویه مختلف خمش (ب): جابجایی طول موج براگ در اثر خمش (ج): میزان جابجایی طول موج براگ بر حسب میزان خمش ۵۸
- شکل ۳-۱۶: فیبر نوری حاوی LPFG به علت طول زیاد آن در تشخیص خمش‌های تیز دچار مشکل می‌شود ۶۳
- شکل ۳-۱۷: هسته‌های شماره ۱ و ۲ تحریک شده در فیبر چهارهسته‌ای حاوی FBG ۶۵
- شکل ۳-۱۸: پاسخ هر یک از هسته‌های شماره ۱ و ۲ سنسور خمش مبتنی بر فیبر نوری ۴هسته‌ای به ازای خمش‌ها و زوایای خمش متفاوت ۶۶
- شکل ۴-۱: تغییر طول فیبر بر اثر فشار  $24000Pa$  ۷۴
- شکل ۴-۲: تغییر سطح مقطع فیبر بر اثر فشار  $24000Pa$  ۷۵
- شکل ۴-۳: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتیجه تحلیل به دست آمده ۷۶
- شکل ۴-۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتیجه تحلیلی برای حساسیت جانبی نسبت به دما برای سنسور خمش مبتنی بر FBG ۷۸
- شکل ۴-۵: انبساط ایجاد شده در اثر افزایش دما به اندازه  $10^{\circ}C$  در فیبر نوری مورد نظر ۷۹
- شکل ۵-۱: فیبر نوری ۷هسته‌ای مورد استفاده توسط NICT برای اهداف ارتباط نوری با نرخ بالا ۸۴

شکل ۵-۲: میزان جابجایی طول موج براگ در اثر خمش به ازای زوایای مختلفی از خمش برای یک

هسته نامرکزی از فیبر نوری ۷ هسته‌ای

شکل ۵-۳: سنسور Shape Sensing دچار خمش سه بعدی

۸۵

۸۶

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱: مقایسه بین سنسور خمش مقاومتی و سنسور خمش مبتنی بر فیبر نوری ۳۱
- جدول ۱-۳: مقایسه سنسور خمش مبتنی بر LPFG و سنسور خمش مبتنی بر FBG ۶۹

فصل اول:

کلیات تحقیق



## ۱-۱ مقدمه

حسگر<sup>۱</sup> (سنسور) دستگاهی است که کمیت فیزیکی مورد نظر را اندازه گرفته و آن را به شکل قابل فهم برای کاربر نشان می‌دهد. سنسورهای اندازه‌گیری دما، اندازه‌گیری فشار، اندازه‌گیری رطوبت، اندازه‌گیری میزان ماده مورد نظر در محیط مورد بررسی، تنها نمونه‌هایی از سنسورهای مورد استفاده در صنعت و دیگر زمینه‌های زندگی روزمره انسانها می‌باشند.

سنسورهای نوری<sup>۲</sup> از دو دهه قبل تاکنون توانسته‌اند نسل جدیدی از سنسورها را به جامعه علمی و صنعتی دنیا معرفی کنند. امروزه شرکت‌های صنعتی تولید کننده سنسورها نیز به سوی استفاده از تکنولوژی نوری در جهت ساخت و بهبود ویژگی‌های سنسورها گام بر می‌دارند و بیشتر این شرکت‌ها انواع سنسورهای نوری را به بازار عرضه کرده‌اند. بنابر گزارشی که از سوی انجمن پیشرفت صنعت اپتوالکترونیک آمریکا<sup>۳</sup> منتشر شد، مجموع سود شرکت‌های تولید کننده سنسورهای نوری در سال ۲۰۰۹ میلادی، بالغ بر ۵ میلیارد دلار بوده است [۱].

سنسورهای مختلفی با ساختار و اصول عملکرد متفاوت در حوزه سنسورهای نوری جای دارند. یکی از انواع سنسورهای نوری، سنسورهای نوری مبتنی بر فیبر نوری<sup>۴</sup> می‌باشند که به علت ویژگی‌های خاص خود بیش از انواع دیگر سنسورهای نوری مورد توجه بوده‌اند. از مزایای سنسورهای فیبر نوری نسبت به بقیه انواع سنسورها می‌توان به موارد زیر اشاره داشت [۱]، [۲]:

- عملکرد بر اساس سیگنال نوری و مقاومت در برابر تداخل‌های فرکانسی و امواج الکترومغناطیسی

- وزن کم و ابعاد کوچک

---

<sup>1</sup> Sensor

<sup>2</sup> Optical Sensors

<sup>3</sup> Optoelectronics Industry Development Association (OIDA)

<sup>4</sup> Fiber Optic Sensors

- انعطاف‌پذیری مکانیکی قابل توجه فیبر نوری که منجر به کاربردهای ویژه سنسورهای فیبر نوری می‌شود.

- مقاومت فیزیکی در برابر شرایط نامناسب محیط مانند رطوبت، دما و وجود عامل‌های خوردنده شیمیایی در محیط.

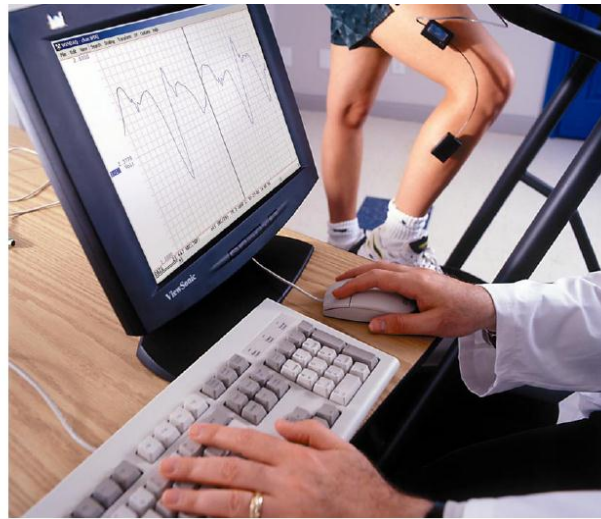
- سازگاری با سیستم‌های انتقال اطلاعات نوری.

خمش یکی از پارامترهای مطلوب اندازه‌گیری در موارد گسترده‌ای می‌باشد. اندازه‌گیری خمش در تعیین حالت سیستم‌های مکانیکی نقش اساسی را ایفا می‌کند. چنین اندازه‌گیری توسط سنسور خمش<sup>۱</sup> قابل انجام می‌باشد. مشخص نمودن وضعیت اندام‌های یک ورزشکار در حین ورزش، تعیین وضعیت قسمت‌های مختلف روبات‌ها، مشخص نمودن وضعیت انگشتان دست برای ساخت دستکش‌های هوشمند به عنوان دریافت اطلاعات از نحوه حرکت انگشتان، نمونه‌هایی از کاربرد سنسورهای خمش می‌باشند که در شکل‌های ۱-۱ (الف-د) نمایش داده شده‌اند.



(الف)

<sup>۱</sup> Bending Sensor



(ب)



(د)

(ج)

شکل ۱-۱ (الف) و (ب): کاربرد سنسور خمش در تعیین وضعیت اندام‌های ورزشکاران در حین ورزش (ج): استفاده از

سنسور خمش در تعیین وضعیت انگشتان روبات (د): کاربرد سنسور خمش در ساخت دستکش‌های هوشمند

در ادامه، به توضیح دقیق‌تر در مورد سنسور خمش و همچنین انواع سنسورهای خمش ارائه شده،

پرداخته خواهد شد.

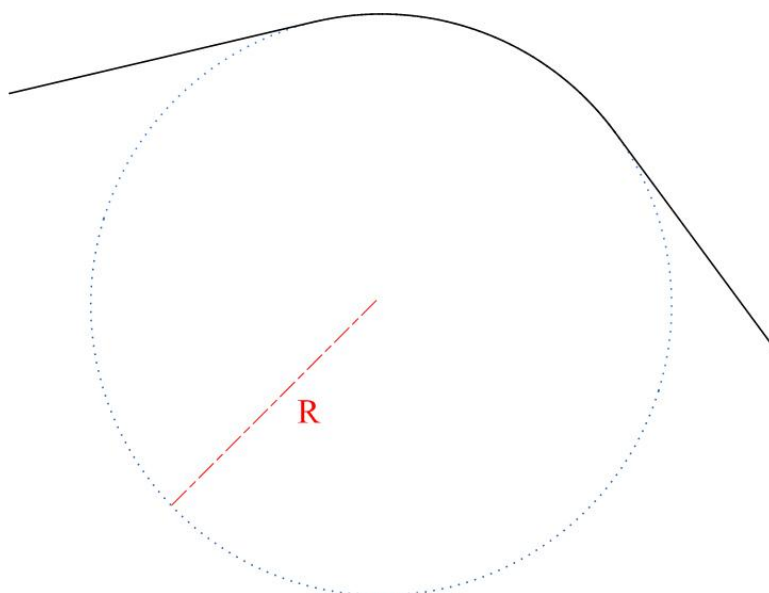
## ۲-۱ سنسور خمش

سنسور خمش دستگاهی است که برای اندازه‌گیری میزان خمش مورد استفاده قرار می‌گیرد. میزان خم شدن یک ساختار با پارامتری به نام میزان انحنا که با  $K$  نشان داده می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. میزان انحنا بر حسب  $m^{-1}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K = \frac{1}{R} \quad (1-1)$$

در رابطه (۱-۱)،  $R$  بر حسب متر، بیانگر اندازه شعاع دایره‌ای است که قسمت خم شده سنسور

خمش مورد نظر بر روی این دایره قرار می‌گیرد. شکل ۲-۱ نشان دهنده این مطلب می‌باشد.



شکل ۲-۱: دایره به شعاع  $R$  عبور کننده از قسمت خم شده جسم

خروجی یک سنسور خمش، اندازه  $K$  را نشان می‌دهد.