

# دانشگاه شهید بهشتی

وزارت علوم ، تحقیقات و فناوری

دانشگاه شهید بهشتی

پژوهشکده لیزر و پلاسما

رساله جهت اخذ درجه دکتری Ph.D

رشته / گرایش

فوتونیک

عنوان

اندازه‌گیری فشار بالا و دما با استفاده از حسگرهای فابری-پرو و

فوتونیک کریستال فیبر نوری

استاد راهنما

دکتر حمید لطیفی

استاد مشاور

دکتر فرامرز فرهی

نگارنده

سید هاشم عارف

ماه / سال

نیمسال دوم سال تحصیلی ۸۷-۸۸

۱۳۸۹/۷/۲۴

مجلس استحضات مرکز علمی پژوهش  
شعبه لیزر

۱۴۲۹۵۵



## دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ

شماره

پوست

بسمه تعالی

صورتجلسه دفاع از رساله دکتری

نمبران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین بازگشت به مجوز دفاع شماره ۵/۲۰۰/۱۰۶۷۷ مورخ ۸۸/۱۰/۱۳ جلسه هیأت داوران ارزیابی رساله

تلفن: ۲۹۹۰۱

آقای سیدهاشم عارف فرزند سیدعباس به شناسنامه شماره ۱۱۰۰۵۷ صادره از قم متولد ۱۳۵۶ دانشجوی دوره دکتری رشته فوتونیک با عنوان:

" اندازه گیری فشار بالا و دما با استفاده از سنسورهای فابری پرو و فوتونیک کریستال فیبر نوری "

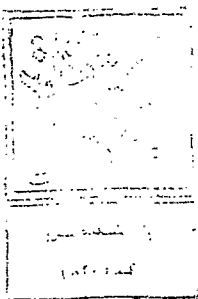
به راهنمایی دکتر حمید لطیفی

و مشاورت دکتر فرامرز فرجی

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۸/۱۰/۱۳ تشکیل گردید و براساس رأی هیأت داوران و باعنایت به ماده ۲۱، ۲۲ و ۲۳ و تبصره های مربوطه مندرج در آئین نامه دکتری مورخ ۷۲/۱۲/۸ رساله مزبور با نمره ۱۹/۱۶ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

امضاء	درجه دانشگاهی	نام و نام خانوادگی	هیأت داوران
	استاد	حمید لطیفی	استاد راهنما
	استاد	فرامرز فرجی	استاد مشاور
	دانشیار	رضا مسعودی	داور از دانشگاه
	دانشیار	عزالدين مهاجرانی	داور از دانشگاه و نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	رسول ملک فر	داور خارج از دانشگاه
	استادیار	محمدحسین قزل ایاغ	داور خارج از دانشگاه

ناظر تحصیلات تکمیلی دانشگاه:



## اقرار و تعهدنامه

اینجانب سید هاشم عارف دانشجوی مقطع دکتری دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، رشته فوتونیک رساله حاضر را بر اساس مطالعات و تحقیقات شخصی خود انجام داده و در صورت استفاده از داده‌ها، مآخذ، منابع به طور کامل به آن ارجاع داده‌ام. این رساله پیش از این به هیچ وجه در مرجع رسمی یا غیر رسمی دیگری به عنوان گزارش یا طرح تحقیقاتی عرضه نشده است. در صورتی که خلاف آن ثابت شود، درجه دریافتی اینجانب از اعتبار ساقط شده، و عواقب و نتایج حقوقی حاصله را می‌پذیرم.

تاریخ ۸۸/۱۰/۱۳

امضاء

## بسمه الله الرحمن الرحيم

خدای را شاکرم که در سایه سار توجهات ولی عصر (عج)، به من توفیق کسب علم و معرفت داد و امید را در دل من همیشه زنده نگه داشت تا بتوانم تمامی دوره‌های تحصیلی را با موفقیت طی کنم. امیدوارم همیشه مرا در راه کسب علم و نشر آن توفیق روز افزون عطا فرماید.

اکنون که رساله دکتری خود را با موفقیت به اتمام رسانده‌ام، بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات استاد ارجمندم جناب آقای دکتر لطیفی که بعنوان استاد راهنمای اینجانب، مرا در انجام این رساله یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را بنمایم. همچنین از راهنمایی‌ها و دلسوزی‌های استاد مشاور عزیزم جناب آقای دکتر فرهی تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر *Jose Luis Santos* و دانشجوی دکتری آقای *Orlando Frazão* که مرا در طی تحقیقات نه ماهه در کشور پرتغال در مؤسسه *INESC* در دانشگاه *Porto* با ایجاد فضای علمی مناسب، مرا در تکمیل رساله یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم.

بر خود لازم می‌دانم از تمامی اعضای هیات علمی، کادر آموزشی و کارمندان پژوهشکده لیزر و پلاسما به ویژه آقای امینی، مسئول کارگاه تراشکاری پژوهشکده، که با ایجاد فضای صمیمی و علمی در محیط پژوهشکده، محیطی مناسب برای دانشجویان فراهم نموده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

بخشی از پژوهش رساله با کمک‌های مالی شرکت نفت و گاز پارس انجام شده که در اینجا مراتب سپاس و قدردانی خودم را به مسئولین شرکت و مهندس علوی و سرکار خانم مهندس خرم اعلام می‌دارم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از همکاران آزمایشگاهی و خستگی ناپذیرم، آقایان زیبایی، طرقي، خیری و پور بیرام و خانم‌ها افشاری، نوری و احمدلو که مرا در انجام این رساله یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

با کمال احترام و قدردانی

تقدیم به پدر و مادر عزیزم،

همسر خوب و مهربانم،

پسر نازنینم سید علی رضا

و تمامی اعضاء خانواده‌ام

که بدون حمایت و دل‌گرمیشان به نتیجه رساندن این رساله و به  
پایان بردن دروه تحقیقاتی برایم میسر نبود.

## چکیده:

از مسائل اساسی در حسگرهای فیبر نوری جداسازی اثرات دمایی و افزایش حساسیت حسگرها نسبت به پارامتر فیزیکی مورد نظر است. ساختار فیبرهای معمولی بگونه‌ای است که حساسیت نسبتاً ضعیفی نسبت به پارامتر فشار دارند و در مقابل بدلیل حضور ناخالصی در مغزی آنها اثرات قوی ترموپاتیکی در آنها مشاهده می‌شود، که به موجب آن حساسیت متقابل فشار و دما در آنها شدید است. فیبرهای نوری مبتنی بر ساختار ریز (MOF)، متشکل از ماده سیلیکا هستند و کانال‌های هوا در طول فیبر و در اطراف مغزی آن‌ها بصورت کاتوره‌ای و یا متناوب توزیع شده‌اند. اثرات ترموپاتیکی در MOF بدلیل عدم حضور ناخالصی در مغزی و حضور کانال‌های هوا، نسبت به فیبرهای متداول ضعیف‌تر است. اثرات ضعیف‌تر دمایی در فیبرهای MOF باعث شد تا بخشی از رساله بر روی کاربرد MOF در حوزه سنسورهای فیبر نوری متمرکز شود. در این رساله، طی مراحل یک نمونه مبدل مکانیکی به منظور افزایش حساسیت به فشار و تبدیل فشار هیدروستاتیک به کرنش محوری، طراحی و ساخته می‌شود و در ادامه با استفاده از سه نوع MOF، چندین نوع حسگر ساخته و نسبت به برخی پارامترهای فیزیکی نظیر فشار، دما، کرنش، خمش و پیچش مشخصه‌یابی شده است. در طراحی و ساخت مبدل مکانیکی، کاربرد نصب در درون چاه‌های نفت و گاز مورد نظر بوده و مشخصه‌های بازه اندازه‌گیری و دقت حسگر منطبق بر نیازهای صنعت نفت تنظیم شده است. مبدل مکانیکی از سه لوله تو در تو تشکیل شده بطوریکه هر سه لوله از یک سر به هم جوش خورده و لوله درونی از یک سمت باز و از سمت دیگر بسته است. لوله بیرونی به بدنه مخزن فشار آب‌بند شده و بنابراین لوله میانی از اعمال فشار محافظت می‌شود. با اعمال فشار، لوله درونی که از یک انتها بسته است، نسبت به لوله میانی که از فشار محافظت می‌شود، تغییر طول نسبی ایجاد می‌کند که با نصب حسگر فیبر نوری نوع فابری-پرو روی آن، کرنش ناشی از فشار اندازه‌گیری می‌شود. حسگر فشار که شامل مبدل مکانیکی و حسگر فابری-پرو است، دارای حساسیت دمایی است که بصورت حساسیت متقابل فشار و دما در نظر گرفته می‌شود. حذف اثرات دمایی در این حسگر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اثر متقابل فشار و دما با ایده جایگزینی فیبر انعکاسی در کاواک فابری-پرو با سیم نازک فلزی، تا حدود قابل ملاحظه‌ای حل می‌شود. در این مرحله نمونه حسگرهای مختلفی به منظور اندازه‌گیری ضرایب انبساط دمای بخش‌های مختلف حسگر فشار ساخته شده است. بمنظور تحلیل داده‌های تجربی آزمایش و محاسبه گاف هوا در کاواک فابری-پرو از تکنیک مرکز جرم استفاده شد که بعنوان نتیجه استفاده از الگوریتم مرکز جرم، دقت اندازه‌گیری را نسبت به محاسبه به روش معمول تا بیش از ۲۰ مرتبه افزایش داده است. در

نهایت در نمونه حسگر فشار و دمای بهینه‌سازی شده که در آن حداکثر حساسیت فشار ایجاد شده و حساسیت متقابل فشار و دما تا حد ممکن کاهش یافته، حساسیت به فشار و دما به ترتیب  $3.107 \times 10^{-7} / psi$  و  $4.96 \times 10^{-7} / ^\circ C$  و حساسیت متقابل فشار و دمای  $1.7 psi / ^\circ C$ ، اندازه‌گیری شد. این حسگر قابلیت اندازه‌گیری فشار در بازه  $0 psi$  تا  $10000 psi$  را با تفکیک پذیری بیش‌تر از  $\pm 11.5 psi$  دارا است. پس از ساخت و مشخصه‌یابی حسگر بهینه‌سازی شده فشار، نمونه حسگر دمایی با حساسیت دمایی  $12.66 \times 10^{-6} / ^\circ C$  و تفکیک پذیری  $\pm 0.07 ^\circ C$  ساخته شد.

بدلیل کاربرد وسیعی که MOFها در طراحی و ساخت حسگرهای فیبر نوری نسل جدید، پیدا نموده‌اند، بخش عمده‌ای از تحقیقات این رساله بر روی کاربرد سه ساختار متفاوت MOF در ساخت تعدادی حسگر فیبر نوری و مشخصه‌یابی آنها در اعمال پارامترهای فیزیکی نظیر کرنش محوری، دما، خمش و پیچش متمرکز شده است. MOFهای مورد نظر شامل فیبر مغزی-معلق در هوا (SCF)، فیبر فوتونیک کریستالی از نوع مغزی-هوا (HC-PCF) و فیبرهای ARROW هستند که بطور مختصر به اصول کار و کاربرد آنها پرداخته می‌شود. در ادامه حسگرهای فابری-پرو مبتنی بر دو نوع SCF برای کرنش، فشار و دما مشخصه‌یابی شده و میزان حساسیت آنها مقایسه می‌شوند. همچنین با استفاده از خاصیت دوشکستی ناچیزی که در SCF ملاحظه شده، با روش قطبش سنجی و استفاده از تداخل سنج ساگاناک، میزان حساسیت به فشار حسگر بررسی شده است. سپس با استفاده از فیبرهای HC-PCF، نمونه حسگرهای تداخل مدی ساخته شده و برای کرنش، دما و خمش مشخصه‌یابی می‌شوند. به منظور استفاده عملیاتی از این حسگر و اندازه‌گیری حساسیت و تفکیک پذیری حسگر، با استفاده از تکنیک تداخل‌سنج فیبر نوری با همدوسی کم (FOLCI)، تغییرات فاز در حسگر تداخل مدی در حین اعمال پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده است. طیف نور عبوری از HC-PCF دارای مشخصه لبه گاف ممنوعه فوتونیک است، که مشخصه‌یابی آن نسبت به پارامترهای فیزیکی شامل کرنش، دما، خمش و پیچش انجام شده و بعنوان حسگر بررسی و پیشنهاد شده است. در ادامه نمونه حسگرهای تداخل مدی بر مبنای فیبرهای ARROW ساخته شده و برای پارامترهای فیزیکی کرنش، دما مشخصه‌یابی شده است. برای این نمونه حسگر نیز با استفاده از تکنیک FOLCI، تغییرات فاز تداخل سنج مدی نسبت به تغییرات پارامتر فیزیکی اندازه‌گیری شده و میزان حساسیت و تفکیک پذیری حسگر بدست آمده است.



# اندازه‌گیری فشار بالا و دما با استفاده از حسگرهای فابری-پرو و فوتونیک کریستال فیبر نوری

صفحه	فهرست مطالب
۱	پیشگفتار
۵	۱- مقدمه
۱۲	۲- مروری بر چند نمونه حسگر فشار و دمای فیبر نوری
۱۲	۲-۱ حسگر توری، براگ فیبر نوری
۱۳	۲-۱-۱ اثر کرنش، دما و فشار بر روی FBG
۱۴	۲-۱-۲ روش‌های ساخت FBG
۱۵	۲-۱-۳ روش‌های و ام‌دولاسیون سیگنال FBG
۱۷	۲-۱-۴ اندازه‌گیری فشار و دما با استفاده از FBG
۲۷	۲-۲ حسگر فابری-پرو فیبر نوری
۳۰	۲-۲-۱ تحلیل مدی حسگر EFPI تک مد
۳۵	۲-۲-۲ وضوح فریزهای تداخلی در حسگر تک مد EFPI
۳۳	۲-۲-۳ تاثیر کرنش و دما بر روی حسگر EFPI
۳۸	۲-۳ حسگرهای توزیعی
۴۱	۳- تحلیل و طراحی حسگر فشار و دمای فیبر نوری
۴۱	۳-۱ تحلیل یک استوانه توخالی در فشار و دمای استاتیک
۴۷	۳-۲ مبدل مکانیکی فشار با کرنش طولی
۴۹	۳-۳ جداسازی اثرات متقابل فشار و دما
۵۳	۳-۴ طراحی حسگر فشار و دمای فیبر نوری
۵۷	۳-۵ نتایج شبیه‌سازی مبدل مکانیکی فشار
۶۲	۴- مروری بر فیبرهای نوری بر پایه ساختار ریز و کاربرد آنها در حسگرهای فیبر نوری
۶۲	۴-۱ مقدمه
۶۴	۴-۲ فیبرهای نوری بر پایه ساختار ریز از نوع SCF
۶۹	۴-۳ فیبرهای نوری بر پایه ساختار ریز از نوع HC-PCF
۷۸	۴-۴ فیبرهای نوری بر پایه ساختار ریز از نوع ARROW

۵-ارائه نتایج تجربی حاصل شده در ساخت و تست حسگر فشار و دمای فیبر نوری .....	۸۳
۱-۵ مقدمه .....	۸۳
۲-۵ سیستم اعمال فشار و دما و چیدمان ساخت EFPI .....	۸۴
۳-۵ پردازش داده‌ها از طریق برنامه کامپیوتری بمنظور تحلیل سریعتر و دقیق‌تر داده‌ها .....	۸۹
۴-۵ ساخت و مشخصه‌یابی نمونه حسگر اولیه ساخته شده .....	۹۶
۵-۵ ساخت و مشخصه‌یابی نمونه حسگرهای بهینه‌سازی شده .....	۱۰۰
۶- نتایج تجربی ساخت و تست حسگرهای مبتنی بر MOFs .....	۱۲۱
۱-۶ ساخت و مشخصه‌یابی حسگرهای فیبر نوری مبتنی بر SCF .....	۱۲۱
۲-۶ ساخت و مشخصه‌یابی حسگرهای فیبر نوری مبتنی بر HC-PCF .....	۱۲۹
۳-۶ ساخت و مشخصه‌یابی حسگر مبتنی بر فیبرهای ARROW .....	۱۴۴
۷- جمع بندی .....	۱۴۸
۷- مراجع .....	۱۵۳
۸- پیوستها .....	۱۶۳

## فهرست شکل‌ها

صفحه

- شکل (۱-۱): نمایش شماتیک از چیدمان مربوط به تعدادی از حسگرهای فیبر نوری [3] ..... ۶
- شکل (۱-۲) طرح شماتیک از اصول کار حسگر توری براگ ..... ۱۲
- شکل (۲-۲): روش‌های ساخت FBG (الف) روش تداخل‌سنجی [17]؛  
 (ب) ماسک فازی [18]؛ (ج) روش نقطه به نقطه [19] ..... ۱۵
- شکل (۳-۲): طرح شماتیکی از روش وامدولاسیون سیستم FBG چهارتایی  
 با استفاده از یک فیلتر FFP [21] ..... ۱۶
- شکل (۴-۲): طرح شماتیکی از روش وامدولاسیون سیستم FBG چهارتایی  
 با استفاده از یک طیف‌سنج CCD که به فیبر کوپل می‌شود [21] ..... ۱۶
- شکل (۵-۲): طرح شماتیکی از روش وامدولاسیون سیستم FBG با  
 استفاده از یک تداخل‌سنج فیبر نوری [21] ..... ۱۷
- شکل (۶-۲): طرح شماتیکی از حسگر فشار FBG [15] ..... ۱۸
- شکل (۷-۲): چینش حسگر فشار FBG با استفاده از محفظه  
 حباب شیشه‌ای و نمونه‌ای از حباب شیشه‌ای [24] ..... ۱۸
- شکل (۸-۲): بهره‌تئوری در حساسیت به فشار [26] ..... ۱۹
- شکل (۹-۲): FBG روکش‌گذاری شده (الف) با یک پلیمر تنها؛  
 (ب) با دو پلیمر متفاوت در دو قسمت از FBG [27] ..... ۲۱
- شکل (۱۰-۲): حسگر فشار شامل یک FBG جاسازی شده  
 درون استوانه فلزی پر شده از پلیمر است [28] ..... ۲۲
- شکل (۱۱-۲): ساختار حسگر تفاضلی FBG برای دما و فشار بالا [29] ..... ۲۳
- شکل (۱۲-۲): (الف) عنصر فعال در حسگر فشار FBG؛ (ب) تیغه یک  
 سرگیر به شکل مثلث متساوی‌الساقین [29] ..... ۲۳
- شکل (۱۳-۲): تغییر طول موج براگ در اثر (الف) تغییر فشار؛ (ب) تغییر دما [29] ..... ۲۵
- شکل (۱۴-۲): پاسخ به فشار سه نوع از حسگرهای FBG [31] ..... ۲۶
- شکل (۱۵-۲): پاسخ به فشار و دمای حسگر FBG با فیبر نوری حفره جانبی [31] ..... ۲۷
- شکل (۱۶-۲): تداخل‌سنج فابری-پرو،  $P_t$ ،  $P_r$  و  $P_i$  به ترتیب بیانگر توان فرودی،  
 بازتابی و عبوری هستند ..... ۲۷
- شکل (۱۷-۲): منحنی بازتاب  $R_{FP}$  یک FPI کم‌اتلاف بر حسب فاز  $\phi$  [32] ..... ۲۸
- شکل (۱۸-۲): ساختارهای مختلف حسگر IFPI (الف) کاواک شکل گرفته توسط

- یک آینه داخلی و انتهای فیبر؛ (ب) کاواک شکل گرفته توسط  
 ۲۹ ..... FBG. دو آینه درونی؛ (ج) کاواک شکل گرفته توسط دو  
 شکل (۲-۱۹): ساختارهای مختلف EFPI: (الف) کاواک شکل گرفته توسط انتهای  
 فیبر و دیافراگم؛ (ب) کاواک شکل گرفته توسط یک فیلم و انتهای  
 فیبر؛ (ج) کاواک شکل گرفته در داخل تیوب شیشه‌ای توسط انتهای  
 دو فیبر نوری تک مد و چند مدی؛ (د) کاواک شکل گرفته توسط انتهای  
 فیبرهای تک مد که به یک فیبر تو خالی جوش حرارتی داده شده. ۲۹ .....  
 شکل (۲-۲۰): نمایش شماتیکی از حسگر EFPI [33]. ۳۰ .....  
 شکل (۲-۲۱): سیستم مختصات برای تحلیل حسگر EFPI. ۳۱ .....  
 شکل (۲-۲۲): توزیع شدت میدان الکتریکی (الف)  $E_1$ ، برای فیبر تک مد استاندارد  
 و (ب)  $E'_2$ ، پس از طی مسافت گاف هوا  $d$  [33]. ۳۲ .....  
 شکل (۲-۲۳): شیفت فاز القا شده  $\theta$  توسط کوپل شدگی به صورت تابعی  
 از طول گاف  $d$  برای یک فیبر تک مد استاندارد [33]. ۳۴ .....  
 شکل (۲-۲۴): نمایش شماتیکی از انحراف زاویه‌ای در حسگر EFPI. ۳۵ .....  
 شکل (۲-۲۵): پارامتر وضوح فریزها به صورت تابعی از طول گاف  
 حسگر EFPI در زاویه‌های انحراف مختلف [33]. ۳۶ .....  
 شکل (۲-۲۶): پارامتر وضوح فریز به صورت تابعی از زاویه انحراف برای  
 حسگر EFPI تک مد با طول گاف‌های مختلف [33]. ۳۷ .....  
 شکل (۲-۲۷): نمایش شماتیکی از حسگر فابری-پرو فیبر نوری. ۳۸ .....  
 شکل (۲-۲۸): (الف) نمونه‌ای از نور ورودی با پهنای باند وسیع؛ (ب) طیف نور تداخل یافته. ۳۸ .....  
 شکل (۲-۲۹): شکل (۲-۲۹): (الف) دیاگرام تراز انرژی و طیف انرژی پراکندگی رامان و  
 (ب) دیاگرام تراز انرژی و طیف انرژی پراکندگی بریلوئن (ج) مشخصات طیفی  
 پراکندگی رامان و بریلوئن [3]. ۴۰ .....  
 شکل (۳-۱): نمایش شماتیک از لوله دو سر گیر. ۴۲ .....  
 شکل (۳-۲): نمایش المان در دستگاه قطبی. ۴۳ .....  
 شکل (۳-۳): نمایش شماتیک از لوله یک سر گیر. ۴۴ .....  
 شکل (۳-۴): منحنی تنش بر حسب کرنش برای فلزات. ۴۶ .....  
 شکل (۳-۵): نمایش شماتیکی از ساختار مبدل مکانیکی به منظور  
 تبدیل فشار به کرنش طولی. ۴۷ .....

- شکل (۳-۶): نمایش شماتیک از مبدل مکانیکی در حالت جبران‌سازی دما..... ۵۱
- شکل (۳-۷): نمایش شماتیک از جبران‌سازی دمای حسگر EFPI..... ۵۲
- شکل (۳-۸): نمودار تغییرات تنش‌های نرمالیزه مماسی، محوری و شعاعی بر حسب نسبت  $a/b$ ..... ۵۵
- شکل (۳-۹): مدل Axisymmetric ساخته شده برای مدل‌سازی در ANSYS..... ۵۷
- شکل (۳-۱۰): کانتور تغییرات تنش Von-Misses روی سطح مدل دو بعدی..... ۵۸
- شکل (۳-۱۱): نمودار تغییرات تنش Von-Misses بین دو نقطه از مدل روی جداره داخلی لوله..... ۵۸
- شکل (۳-۱۲): نمودار تغییرات تنش  $\sigma_r$  بین دو نقطه از مدل روی جداره داخلی لوله..... ۵۹
- شکل (۳-۱۳): نمودار تغییرات تنش  $\epsilon_r$  بین دو نقطه از مدل روی جداره داخلی لوله..... ۵۹
- شکل (۳-۱۴): نمودار تغییرات تنش Von-Misses بین دو نقطه از مدل روی جداره داخلی لوله..... ۶۰
- شکل (۳-۱۵): نمودار تغییرات تنش  $\sigma_r$  بین دو نقطه از مدل روی جداره داخلی لوله..... ۶۰
- شکل (۳-۱۶): نمودار تغییرات تنش  $\epsilon_r$  بین دو نقطه از مدل روی جداره داخلی لوله..... ۶۰
- شکل (۳-۱۷): نمودار تغییرات تنش Von-Misses بین دو نقطه از مدل روی جداره داخلی لوله..... ۶۱
- شکل (۳-۱۸): نمودار تغییرات تنش  $\sigma_r$  بین دو نقطه از مدل روی جداره داخلی لوله..... ۶۱
- شکل (۴-۱): (الف) فیبرهای فوتونیک کریستال؛ (ب) فیبرهای با مغزی معلق در هوا؛ (ج) فیبرهای با مغزی معلق در هوا؛ (د) فیبرهای با سوراخ‌های کاتوره‌های در غلاف؛ (ه) low index core؛ (ر) فیبر فرنل..... ۶۲
- شکل (۴-۲): تصویر مقطع عرضی از SCF [54]..... ۶۵
- شکل (۴-۳): منحنی تغییرات کسر توان موجود در سوراخ‌های اطراف مغزی بر حسب شعاع مغزی در طول موج  $1550\text{ nm}$  [54]..... ۶۶
- شکل (۴-۴): (چپ) نمایش شماتیک از چیدمان آزمایش [54]؛ (راست) طیف جذب گاز استیلن بدست آمده در آزمایش [54]..... ۶۶
- شکل (۴-۵): (چپ) چیدمان تداخل سنج ساگناک [55]؛ (راست) تصویر مقطع عرضی از SCF استفاده شده در آزمایش [55]..... ۶۷
- شکل (۴-۶): پاسخ طیفی بدست آمده در تحلیل گر طیفی [55]..... ۶۸
- شکل (۴-۷): منحنی جابجایی مینیمم نزدیک به طول موج  $1530\text{ nm}$  بر حسب کرنش و دما [55]..... ۶۸

- شکل (۴-۸): (راست) سطح مقطع اولین فیبر فوتونیک کریستال از نوع index guiding که در سال ۱۹۹۵ ساخته شده و قطر سوراخ‌های هوا در آن  $300\text{ nm}$  و فاصله مراکز سوراخ‌ها برابر  $2/3\ \mu\text{m}$  [50]؛ (چپ) سطح مقطع اولین فیبر HC-PCF که در سال ۱۹۹۹ ساخته شده و قطر مغزی آن  $14/8\ \mu\text{m}$  و فاصله مراکز سوراخ‌های هوا در غلاف  $4/9\ \mu\text{m}$  است [59] ..... ۶۹
- شکل (۴-۹): دیاگرام انتشار در فیبرهای فوتونیک کریستال [65] ..... ۷۰
- شکل (۴-۱۰): نمایش شماتیک از مراحل ساخت فیبر فوتونیک کریستال
- موسوم به Stack-and-draw ..... ۷۱
- شکل (۴-۱۱): روش‌های ساخت انواع فیبرهای فوتونیک کریستال (a) Hi-Bi PCF (b) 19-cell HC-PCF (c) doped core (d) index guiding PCF ..... ۷۲
- شکل (۴-۱۲): تصاویر SEM از HC-PCF شرکت Blaze Photonics از نوع (الف) 7-cell؛ (ب) 19-cell؛ (ج) نمای نزدیکتر از مغزی 19-cell ..... ۷۲
- شکل (۴-۱۳): (الف) سطح مقطع فیبر HC-PCF استفاده شده [74]؛ (ب) تصویر نمونه کاواک ساخته شده [74]؛ (ج) چیدمان آزمایش [74] ..... ۷۳
- شکل (۴-۱۴): نتایج بدست آمده از تست دما، انحنای و کرنش [74] ..... ۷۴
- شکل (۴-۱۵): پاسخ نمونه فیبر قرار داده شده در یک تداخل سنج ساگاناک در تست دما و کرنش [77] ..... ۷۵
- شکل (۴-۱۶): (الف) تلفات مدهای فیبر در یک فیبر 19-cell [78]؛ (ب) ساختار پیشنهادی برای تک مد کردن فیبر 19-cell و توزیع شدت مد اصلی [78]؛ (ج) اتلاف مدها در ساختار پیشنهادی [78] ..... ۷۶
- شکل (۴-۱۷): منحنی ضریب شکست مؤثر مدهای مغزی هر سه نوع فیبر ( $n_{eff}$ )، ضریب اتلاف محدودسازی ( $CL$ ) مدها و ضریب پراکندگی سطحی ( $FA$ ) مدها برای فیبرهای (الف) 3-cell [79]؛ (ب) 7-cell [79]؛ (ج) 19-cell [79] ..... ۷۷
- شکل (۴-۱۸): طیف میدان نزدیک مربوط به فیبرهای (الف) 3-cell؛ (ب) 7-cell؛ (ج) 19-cell به ازای طول‌های مختلف در شرایط (سمت چپ) نور ورودی در وضعیت بهینه تزویج به مد اصلی مغزی (Optimum lunch) و (سمت راست) نور ورودی در وضعیت جابجایی عرضی (Offset lunch) [79] ..... ۷۸
- شکل (۴-۱۹): سه ساختار متداول برای ARROW شامل (الف) موجبرهای تخت؛ (ب) موجبرهای فیبری از نوع لایه‌های حلقوی هم مرکز؛

- ۷۹ ..... (ج) موجبرهای فیبری از نوع MOF
- شکل (۴-۲۰): تزویج مدهای مغزی به حفره‌های اطراف با نزدیک شدن به تشدید طول موجی حفرها در ARROW فیبری با مشخصات  $d = 3.315 \mu m, \Lambda = 5.64 \mu m$
- در طول موج‌های (الف)  $86514 \text{ nm}$ ; (ب)  $86616 \text{ nm}$ ؛  $n_1 = 1.44, n_2 = 1.8$
- ۸۱ ..... (ج)  $86618 \text{ nm}$ ; (د)  $86619 \text{ nm}$ ; (ه)  $86712 \text{ nm}$  [93]
- ۸۲ ..... شکل (۴-۲۱): نمایش شماتیک از فیلتر قابل تنظیم بواسطه اعمال دما
- ۸۵ ..... شکل (۵-۱): تصویر سیستم اعمال فشار
- ۸۵ ..... شکل (۵-۲): طرح شماتیکی از نگهدارنده حسگر دمای الکتریکی
- ۸۶ ..... شکل (۵-۳): تصویر مخزن فشار بالا و ژاکت دمایی
- شکل (۵-۴): منحنی تغییرات فشار و دما (الف) اثر تغییرات دما بر فشار
- ۸۶ ..... (ب) اثر تغییرات فشار بر دما
- ۸۷ ..... شکل (۵-۵): طرح شماتیک از یک کاواک فابری-پرو نوع بیرونی
- ۸۸ ..... شکل (۵-۶): طرح شماتیک از چیدمان ساخت حسگر EFPI
- ۸۸ ..... شکل (۵-۷): تصویر چیدمان ساخت حسگر EFPI
- شکل (۵-۸): نمودار تغییرات گاف هوا با دما برای هفت گاف بدست آمده از
- ۸۹ ..... هشت نقطه ماگزیمم پی‌درپی
- ۹۱ ..... شکل (۵-۹): نویز موجود در سیگنال EFPI
- ۹۲ ..... شکل (۵-۱۰): اثر الگوریتم میانگین‌گیری داده‌ها با پنجره  $w$ ، به ازای مقادیر مختلف  $w$
- ۹۳ ..... شکل (۵-۱۱): نمایش شماتیک از تشخیص موقعیت مرکز جرم در یک سیگنال متقارن
- ۹۴ ..... شکل (۵-۱۲): فلوجارت الگوریتم برنامه یافتن گاف هوا از طیف فابری-پرو
- ۹۵ ..... شکل (۵-۱۳): طیف تداخلی EFPI که در دمای  $23^\circ C$  و فشار  $0 \text{ psi}$  گرفته شده
- شکل (۵-۱۴): منحنی تغییرات گاف هوا با گذشت زمان در دمای ثابت
- ۹۵ ..... آزمایشگاهی و فشارهای مختلف
- ۹۸ ..... شکل (۵-۱۵): طرح شماتیک چینش آزمایشگاهی کالیبراسیون حسگر فشار فیبر نوری
- شکل (۵-۱۶): نمودار جابجایی طول موج براگ در حالت‌های (الف) افزایش
- و (ب) کاهش فشار
- ۹۸ ..... و (ب) کاهش فشار
- ۹۹ ..... شکل (۵-۱۷): طرح شماتیک محفظه گرمایی و ادوات جانبی آن
- شکل (۵-۱۸): نمودار جابجایی طول موج براگ در حالت‌های (الف) افزایش
- و (ب) کاهش دما
- ۱۰۰ ..... و (ب) کاهش دما

- شکل (۵-۱۹): طرح شماتیک از اجزاء مبدل مکانیکی مدل OFPTS-2 ..... ۱۰۱
- شکل (۵-۲۰): منحنی تجربی پاسخ حسگر OFPTS-2-FBG-1 به تغییرات فشار ..... ۱۰۲
- شکل (۵-۲۱): طرح شماتیک از حسگر EFPI برای ساخت OFPTS-2-EFPI-1 ..... ۱۰۳
- شکل (۵-۲۲): طرح شماتیک از نصب حسگر EFPI بر روی مبدل مکانیکی  
برای ساخت OFPTS-2-EFPI-1 ..... ۱۰۳
- شکل (۵-۲۳): نمایش شماتیک از چیدمان تست دمایی حسگر فیبر نوری ..... ۱۰۴
- شکل (۵-۲۴): منحنی تجربی پاسخ حسگر OFPTS-2-EFPI-1 به تغییرات فشار و دما ..... ۱۰۴
- شکل (۵-۲۵): طرح شماتیک از نصب حسگر EFPI بر روی مبدل مکانیکی  
برای ساخت OFPTS-2-EFPI-2 ..... ۱۰۵
- شکل (۵-۲۶): منحنی تجربی پاسخ حسگر OFPTS-2-EFPI-2 به تغییرات دما ..... ۱۰۶
- شکل (۵-۲۷): طرح شماتیک و تصویر مبدل مکانیکی مدل OFPTS-3 ..... ۱۰۷
- شکل (۵-۲۸): طرح شماتیک از حسگر EFPI برای ساخت OFPTS-3-EFPI-1 ..... ۱۰۸
- شکل (۵-۲۹): طرح شماتیک از نصب حسگر EFPI بر روی مبدل مکانیکی  
برای ساخت OFPTS-3-EFPI-1 ..... ۱۰۸
- شکل (۵-۳۰): نمایش شماتیک از چیدمان تست فشار حسگر فیبر نوری ..... ۱۰۹
- شکل (۵-۳۱): منحنی تغییرات گاف هوا پس از تنظیم فشار ..... ۱۰۹
- شکل (۵-۳۲): منحنی تجربی پاسخ حسگر OFPTS-3-EFPI-1 به تغییرات فشار ..... ۱۱۰
- شکل (۵-۳۳): منحنی پایداری گاف هوا در شرایط دمایی (الف)  $40^{\circ}C$  و (ب)  $45^{\circ}C$  ..... ۱۱۰
- شکل (۵-۳۴): منحنی تجربی پاسخ حسگر OFPTS-3-EFPI-1 به تغییرات دما ..... ۱۱۱
- شکل (۵-۳۵): طرح شماتیک از حسگر EFPI برای ساخت OFPTS-3-EFPI-2 ..... ۱۱۲
- شکل (۵-۳۶): منحنی تجربی پاسخ حسگر OFPTS-3-EFPI-2 به تغییرات فشار ..... ۱۱۲
- شکل (۵-۳۷): منحنی تجربی پاسخ حسگر OFPTS1-3-EFPI-2 به  
تغییرات فشار در دماهای مختلف ..... ۱۱۳
- شکل (۵-۳۸): منحنی تجربی پاسخ حسگر EFPI به تغییرات دما بمنظور  
اندازه‌گیری CTE لوله موئین (الف) تست اول؛ (ب) تست دوم ..... ۱۱۴
- شکل (۵-۳۹): طرح شماتیک از حسگر EFPI بمنظور اندازه‌گیری CTE سیم نازک برنجی ..... ۱۱۵
- شکل (۵-۴۰): منحنی تجربی پاسخ حسگر EFPI به تغییرات دما در دو بار تست  
مجزا بمنظور اندازه‌گیری CTE سیم نازک برنجی ..... ۱۱۵
- شکل (۵-۴۱): منحنی تجربی پاسخ حسگر EFPI به تغییرات دما



- ۱۱۶ ..... بمنظور اندازه‌گیری CTE مبدل مکانیکی
- شکل (۴۲-۵): منحنی تجربی پاسخ حسگر OFPTS1-3-EFPI-3 به تغییرات
- ۱۱۷ ..... فشار در دماهای (الف)  $22^{\circ}\text{C}$ ; (ب)  $40^{\circ}\text{C}$ ; (ج)  $60^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴۳-۵): منحنی تجربی پاسخ حسگر OFPTS1-3-EFPI-3 به تغییرات
- ۱۱۸ ..... فشار در سه دمای مختلف (الف) آزمایش اول؛ (ب) آزمایش دوم
- ۱۱۹ ..... شکل (۴۴-۵): نمونه‌ای از پایداری داده‌های ثبت شده با گذشت زمان در سه دمای مختلف
- ۱۲۰ ..... شکل (۴۵-۵): تست دمایی حسگر دما
- ۱۲۲ ..... شکل (۱-۶): تصویر فیبرهای SC استفاده شده در آزمایش
- ۱۲۳ ..... شکل (۲-۶): مقایسه طیف تداخلی کاواک فابری-پرو قبل و بعد از اتصال فیبر HC-PCF
- ۱۲۳ ..... شکل (۳-۶): نمایش شماتیک از چیدمان آزمایش برای مشخصه‌یابی حسگر فابری-پرو
- شکل (۴-۶): پاسخ حسگر فابری-پرو ساخته شده با فیبرهای SC نوع
- ۱۲۴ ..... سه حفره‌ای و چهار حفره‌ای در تست (الف) کرنش؛ (ب) دما
- ۱۲۷ ..... شکل (۵-۶): نتایج تست فشار و دمای حسگر فابری-پرو بر پایه فیبر SC چهار حفره‌ای
- شکل (۶-۶): چینش آزمایشگاهی مشخصه‌یابی حسگر تداخل سنج قطبشی بر
- ۱۲۸ ..... پایه فیبر SC چهار حفره‌ای
- شکل (۷-۶): طیف تداخل مربوط به حسگر تداخل سنج قطبشی بر پایه
- ۱۲۸ ..... فیبر SC چهار حفره‌ای
- شکل (۸-۶): پاسخ حسگر تداخل سنج قطبشی ساخته شده با فیبرهای SC
- ۱۲۹ ..... نوع چهار حفره‌ای در تست فشار
- شکل (۹-۶): طیف نرمالیزه عبوری و (ب) تصویر سطح مقطع از HC-PCF
- ۱۳۰ ..... نوع 7-cell استفاده شده در آزمایش
- شکل (۱۰-۶): نمایش شماتیک از چیدمان آزمایش مشخصه‌یابی حسگر
- ۱۳۰ ..... تداخل سنج مدی HC-PCF
- شکل (۱۱-۶): (چپ) طیف تداخلی از نمونه حسگر تداخل مدی ساخته شده و (راست) تصویر
- ۱۳۱ ..... محل اتصال حرارتی HC-PCF با SMF-28 در جهت محور X و Y
- ۱۳۲ ..... شکل (۱۲-۶): تداخل مدی در سه حسگر با طول‌های مختلف
- ۱۳۳ ..... شکل (۱۳-۶): نمایش شماتیک از روش اعمال خمش به حسگر تداخل مدی
- ۱۳۴ ..... شکل (۱۴-۶): پاسخ کرنش و دمای حسگر تداخل مدی
- ۱۳۴ ..... شکل (۱۵-۶): جایجایی طیف در سه دما و کرنش مختلف در طیف تداخلی

- شکل (۶-۱۶): نمایش شماتیک از تکنیک تداخل سنجی FOLCI ..... ۱۳۶
- شکل (۶-۱۷): نمایش شماتیک از چیدمان آزمایش اندازه‌گیری تغییر فاز
- در حسگر تداخل سنج مدی بکمک تکنیک FOLCI ..... ۱۳۸
- شکل (۶-۱۸): (الف) نمونه‌ای از سیگنال افت فاز (ب) نمودار سیگنال اصلی و سیگنال  
تصحیح شده در تغییرات پله‌ای کرنش ..... ۱۳۹
- شکل (۶-۱۹): نتایج تست کرنش و دمای حسگر تداخل مدی به روش FOLCI ..... ۱۳۹
- شکل (۶-۲۰): نمودار پله فازی و نوسانات فاز در آن متناظر با (الف) پله کرنش  
و (ب) پله دما ..... ۱۴۰
- شکل (۶-۲۱): طیف تضعیف از HC-PCF استفاده شده در آزمایش و تصویر سطح مقطع آن ... ۱۴۱
- شکل (۶-۲۲): نمایش شماتیک از چیدمان آزمایش ..... ۱۴۱
- شکل (۶-۲۳): (الف) جایجایی لبه PBG با کرنش؛ (ب) تغییرات اتلاف در طول موج  
میانی لبه PBG؛ (ج) تغییرات اتلاف در طول موج میانی PBG ..... ۱۴۲
- شکل (۶-۲۴): (الف) جایجایی طیف PBG با تغییرات دما؛  
(ب) تغییرات اتلاف لبه پایین PBG در حین افزایش دما ..... ۱۴۳
- شکل (۶-۲۵): تغییرات طیف PBG در تست خمش ..... ۱۴۳
- شکل (۶-۲۶): (الف) تغییرات طیف PBG در حین تغییر پیچش؛ (ب) تغییرات اتلاف  
در ناحیه میانی لبه PBG بر حسب مقادیر مختلف پیچش ..... ۱۴۴
- شکل (۶-۲۷): نمایش شماتیک از چیدمان آزمایش اندازه‌گیری فاز  
با استفاده از تکنیک FOLCI ..... ۱۴۵
- شکل (۶-۲۸): تصویر سطح مقطع فیبرهای ARROW (الف) نوع ۱ و (ب) نوع ۲ ..... ۱۴۶
- شکل (۶-۲۹): نمونه‌ای از طیف تداخلی از نمونه حسگرهای تداخل  
مدی ساخته شده از فیبرهای ARROW نوع ۱ و ۲ ..... ۱۴۶
- شکل (۶-۳۰): تغییر فاز ناشی از اعمال (الف) کرنش و (ب) اعمال دما،  
به دو حسگر تداخل مدی ساخته شده از دو نوع فیبر ARROW ..... ۱۴۷
- شکل (۶-۳۱): نمودار پله فازی و نوسانات فاز در آن متناظر با  
(الف) پله کرنش و (ب) پله دما ..... ۱۴۸

صفحه	فهرست جدول‌ها:
۸	جدول (۱-۱): لیست تعدادی از حسگرهای فیبر نوری نصب شده در چاه‌های نفت [5].....
	جدول (۱-۲): نتایج حاصل از اندازه‌گیری حساسیت توری‌های براگ
۲۰	بدون روکش و با روکش [26].....
۹۰	جدول (۱-۵): تحلیل آماری نتایج تجربی (مقادیر بر حسب $\mu m$ ).....
	جدول (۲-۵): تحلیل آماری محاسبه گاف هوا برای دو حالت محاسبه مستقیم (C) و استفاده از الگوریتم مرکز جرم (M).
۹۶	(واحد پارامترهای جدول میکرون است).....
	جدول (۱-۶): ضرایب حساسیت کرنش و دما برای حسگر فابری-پرو
۱۲۵	با فیبر SC سه حفره‌ای و چهار حفره‌ای.....
	جدول (۲-۶): اندازه‌گیری پارامتر وضوح در بازه‌های مختلف طول موجی برای
۱۳۳	حسگرهای با طول‌های مختلف.....
	جدول (۳-۶): حساسیت هر یک از حسگرها نسبت به کرنش و دما و مقادیر
۱۴۸	مربوط به تفکیک پذیری هر یک از سنسورهای تداخل مدی.....

## پیشگفتار

در ۱۵ سال گذشته، رشد چشمگیری در حوزه تحقیق و کاربرد حسگرها مشاهده شده که نظیر انقلابی که در گسترش ریزپردازنده‌ها در سال ۱۹۸۰ اتفاق افتاد، انتظار می‌رود با گسترش حسگرها تحول عظیمی در فن‌آوری‌های آینده ایجاد شود. اهمیت گسترش حسگرها و استفاده از آنها در فن‌آوری‌های آینده تا حدی است که برخی از محققین، دهه اول قرن ۲۱ (۲۰۱۰-۲۰۰۱) را دهه حسگرها نامیده‌اند. در خلال این مدت موضوع سازه‌های هوشمند فعال مطرح و از پیشرفت قابل ملاحظه‌ای برخوردار شده است. سازه‌های هوشمند متشکل از شبکه‌ای از حسگرها، واحد پردازشگر سیگنال و یک مرکز کنترل هستند. سازه‌های هوشمند عمدتاً در فن‌آوری مربوط به ساخت هواپیما، موشک، سامانه‌های فضایی، کشتی‌ها و در بدنه پلها و ساختمانها کاربرد دارند. در این میان حسگرهای فیبر نوری بعنوان زیر مجموعه‌ای از حسگرها، نقش قابل ملاحظه‌ای در بومی کردن فن‌آوری مربوط به آن و توسعه سازه‌های هوشمند تمام فیبری داشته است. حسگرهای فیبر نوری در مقایسه با حسگرهای دیگر دارای ابعاد بسیار کوچک، مصون از تداخل الکترومغناطیسی، حساسیت بالا و قابلیت بسیار عالی در مالتی پلکس شدن هستند. امروزه فیبرهای ساختار-ریز (MOF) نیز بعنوان زیر گروهی از فیبرهای نوری، کاربرد وسیعی در حسگرهای فیبر نوری دارند و بدلیل حضور ساختارهای ریز نظیر حفره‌های میکرونی هوا در اطراف مغزی آنها و خواص منحصر به فرد این نوع فیبرها، رویکردهای تازه‌ای در حوزه حسگرها ایجاد نموده‌اند. MOFها دارای ساختاری متشکل از حفره‌های هوا و یا حفره‌هایی پر شده از موادی با ضریب شکست متفاوت با جنس فیبر هستند که بصورت متناوب و یا حتی کاتوره‌ای در سطح مقطع و در طول فیبر توزیع یافته‌اند.

در طی این رساله، طراحی و ساخت یک نمونه حسگر فیبر نوری با قابلیت اندازه‌گیری فشار و دما انجام شده و با استفاده از رویکردی نو، کاربردهای جدیدی از حسگرهای فیبر نوری بر مبنای فیبرهای ساختار-ریز معرفی می‌شوند. در طراحی و ساخت حسگر فشار و دما، شرایط چاه نفت مورد نظر بوده و لذا در آزمایشگاه شرایط فشار و دمای چاه نفت ایجاد شده و حسگر مورد نظر مشخصه یابی شده است. در نمونه حسگر ساخته شده، از یک مبدل مکانیکی با قابلیت تبدیل فشار هیدروستاتیک به کرنش محوری استفاده شده است. نمونه حسگر فیبر نوری استفاده شده از نوع حسگر فابری-پرو نوع بیرونی است. مشکل عمده در حسگر فیبر نوری، مسئله حساسیت کم و تاثیر پذیری همزمان فشار و دما در آن است. به کمک مبدل مکانیکی و بهینه‌سازی آن و استفاده از روش مناسب پردازش سیگنال، حساسیت حسگر تا حد مورد نظر افزایش یافت و با تغییراتی که در ساختار کاواک فابری-پرو نوع بیرونی داده شد امکان حذف اثرات دمایی بر روی حسگر فشار فراهم