



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران جنوب

دانشکده تحصیلات تکمیلی

سمینار برای دریافت درجه کارشناسی ارشد “*M.Sc*”

مهندسی نساجی – شیمی نساجی و علوم الیاف

عنوان :

بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند تولید الیاف کربن از الیاف PAN

استاد راهنما :

نگارش:

# فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان مطالب

۱	چکیده
۳	مقدمه
	<b>فصل اول : تاریخچه، معرفی و بررسی پیش زمینه های مختلف</b>
۶	۱-۱ : مقدمه
۶	۲-۱ : تاریخچه
۸	۳-۱ : روش کلی تولی الیاف کربن
۸	۴-۱ : روش های تولید الیاف کربن از پیش زمینه های مختلف
۸	۵-۱ : ترکیبات مورد استفاده جهت تولید الیاف کربن به روش پیرولیز
۱۰	۶-۱ : انتخاب پیش زمینه مناسب جهت تولید الیاف کربن به روش پیرولیز
۱۰	۱-۶-۱ : مواد سلولزی
۱۰	۲-۶-۱ : ریون
۱۰	۳-۶-۱ قیر مزوفاز و الیاف پلی اکریلونیتریل ( PAN )
۱۱	۱-۳-۶-۱ : مقایسه خصوصیات الیاف کربن حاصل از قیر مزو فاز و الیاف پلی اکریلونیتریل
۱۱	۱-۳-۶-۱ : بررسی خصوصیات کششی
۱۲	۲-۳-۶-۱ : بررسی خصوصیات فشاری
۱۲	۳-۳-۶-۱ : بررسی مقاومت الکتریکی
۱۳	۴-۳-۶-۱ : بررسی قابلیت هدایت گرمایی
۱۴	۵-۳-۶-۱ : بررسی رابطه بین خصوصیات فیزیکی الیاف کربن حاصل از PAN و Pitch
	<b>فصل دوم : بررسی روش های تولید پیش زمینه الیاف PAN</b>
۱۶	۱-۲ : آشنایی با الیاف پلی اکریلونیتریل ( PAN )
۱۶	۲-۲ : تولید پلی اکریلونیتریل
۱۷	۳-۲ : تولید مونومر اکریلونیتریل ( وینیل سیانید )

## فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان مطالب

۱۷	۴-۲: روش های پلیمریزاسیون پلی اکریلونیتریل
۱۷	۱-۴-۲: مقدمه
۱۸	۲-۴-۲: پلیمریزاسیون توده ای
۱۸	۳-۴-۲: پلیمریزاسیون محلول
۱۹	۴-۴-۲: پلیمریزاسیون تعلیقی
۱۹	۵-۴-۲: پلیمریزاسیون امولوسیونی
۲۰	۶-۴-۲: انتخاب روش مناسب پلیمریزاسیون PAN
۲۱	۵-۲: ریسندگی الیاف پلی اکریلونیتریل ( PAN )
۲۱	۱-۵-۲: مقدمه
۲۲	۲-۵-۲: روش مناسب ریسندگی الیاف پلی اکریلونیتریل ( PAN )
۲۲	۱-۲-۵-۲: روش تر ریزی الیاف پلی اکریلونیتریل ( PAN )
۲۵	۱-۱-۲-۵-۲: حلال های مناسب جهت ریسندگی الیاف PAN به روش تر ریزی
۲۵	۲-۱-۲-۵-۲: مزایای تر ریزی
۲۵	۳-۱-۲-۵-۲: معایب تر ریزی
۲۶	۲-۲-۵-۲: روش خشک ریزی الیاف پلی اکریلونیتریل ( PAN )
۲۶	۱-۲-۲-۵-۲: عوامل مهم در خشک ریزی
۲۷	۲-۲-۲-۵-۲: مزایای خشک ریزی الیاف PAN
۲۷	۳-۲-۲-۵-۲: معایب خشک ریزی الیاف PAN
۲۷	۶-۲: خواص مناسب پلیمر PAN در پلیمریزاسیون، ریسندگی و تولید به عنوان پیش زمینه تولید الیاف کربن
۲۷	۱-۶-۲: مقدمه
۲۷	۲-۶-۲: تعیین شرایط مناسب جهت دستیابی به خواص مناسب پلیمر پیش زمینه PAN

## فهرست مطالب

۲۹	۷-۲: علل ترجیح دادن الیاف PAN به دیگر پیش زمینه ها جهت تولید الیاف کربن
	<b>فصل سوم: بررسی فرآیند تولید الیاف کربن و مروری بر آخرین تحقیقات</b>
۳۱	۱-۳: مقدمه ای بر تولید الیاف کربن از پیش زمینه PAN
۳۱	۲-۳: انواع الیاف کربن تولید شده از پیش زمینه الیاف PAN
۳۲	۳-۳: مراحل اصلی پروسه تولید الیاف کربن از پیش زمینه الیاف PAN
۳۳	۴-۳: پایدارسازی الیاف پیش زمینه PAN در فرآیند تولید الیاف کربن
۳۳	۱-۴-۳: مقدمه
۳۳	۲-۴-۳: دمای مرحله پایدارسازی حرارتی
۳۴	۳-۴-۳: کشش در مرحله پایدارسازی
۳۴	۱-۳-۴-۳: مقدمه
۳۵	۲-۳-۴-۳: تاثیر کشش بر پیشرفت پایدار سازی الیاف PAN
۳۶	۳-۳-۴-۳: تاثیر نسبت کشش بر تنش وارد شده به الیاف در مرحله پایدارسازی حرارتی
۳۹	۴-۴-۳: اتمسفر مناسب جهت مرحله پایدار سازی حرارتی
۳۹	۱-۴-۴-۳: مقدمه
۳۹	۲-۴-۴-۳: کاربرد اتمسفر SO <sub>2</sub>
۳۹	۳-۴-۴-۳: کاربرد اتمسفر خنثی
۴۰	۵-۴-۳: واکنش های رخ داده در مرحله پایدار سازی حرارتی
۴۰	۱-۵-۴-۳: مقدمه
۴۱	۲-۵-۴-۳: واکنش اکسیداسیون الیاف PAN
۴۳	۳-۵-۴-۳: فرآیند هیدروژن زدایی
۴۳	۴-۵-۴-۳: واکنش حلقوی سازی

## فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان مطالب

۴۵	۳-۴-۶: عوامل تاثیر گذار در میزان اکسیداسیون الیاف PAN
۴۵	۳-۴-۶-۱: تاثیر میزان اکسیژن موجود در محیط پایدارسازی بر میزان اکسیداسیون الیاف
۴۶	۳-۴-۷: تاثیر میزان اکسیداسیون بر خواص الیاف کربن
۴۶	۳-۴-۷-۱: بررسی استحکام
۴۷	۳-۴-۷-۲: بررسی دانسیته
۴۸	۳-۴-۷-۳: بررسی میزان ازدیاد طول تا حد پارگی
۴۸	۳-۴-۸: اندازه گیری میزان اکسیداسیون الیاف در مرحله پایدارسازی
۵۰	۳-۴-۹: خصوصیات الیاف پلی اکریلونیتریل پایدار شده
۵۲	۳-۴-۱۰: مشکلات پایدار سازی الیاف پیش زمینه PAN
۵۲	۳-۵-۵: کربنیزاسیون الیاف پیش زمینه PAN، در فرآیند تولید الیاف کربن
۵۲	۳-۵-۱: مقدمه
۵۳	۳-۵-۲: بررسی خروج ترکیبات گازی از ساختار الیاف پایدار شده در مرحله کربنیزاسیون
۵۴	۳-۵-۳: اتمسفر مناسب جهت کوره کربنیزاسیون
۵۶	۳-۵-۴: بررسی فرآیند کربنیزاسیون بر اساس تفکیک محدوده دمایی
۵۶	۳-۴-۵-۱: آغاز کربنیزاسیون
۵۶	۳-۴-۵-۲: محدوده دمایی °C ۳۰۰ - ۶۰۰
۵۶	۳-۴-۵-۳: محدوده دمایی °C ۶۰۰ - ۱۰۰۰
۵۷	۳-۴-۵-۴: محدوده دمایی °C ۱۲۰۰ - ۱۴۰۰
۵۷	۳-۴-۵-۵: محدوده دمایی بالاتر از °C ۱۴۰۰
۵۸	۳-۵-۵: بررسی خصوصیات الیاف، در مرحله کربنیزاسیون
۵۹	۳-۵-۵-۱: میزان خروج نیتروژن از الیاف

## فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان مطالب

- |    |   |
|----|---|
| ۶۰ | ۲-۵-۵-۳ : میزان کاهش وزن الیاف  |
| ۶۱ | ۳-۵-۵-۳ : مقاومت الکتریکی الیاف   |
| ۶۲ | ۴-۵-۵-۳ : مدول یانگ الیاف   |
| ۶۲ | ۵-۵-۵-۳ : استحکام کششی الیاف  |
| ۶۴ | ۶-۵-۵-۳ : دانسیته الیاف   |
| ۶۵ | ۷-۵-۵-۳ : بررسی رفتار نیتروژن زدایی الیاف PAN پایدار شده در فرآیند کربنیزاسیون و تاثیر آن بر استحکام الیاف کربن نهایی |
| ۶۶ | ۸-۵-۵-۳ : کاربرد میدان مغناطیسی با شدت بالا در مرحله کربنیزاسیون جهت افزایش استحکام الیاف کربن                        |
| ۶۷ | ۹-۵-۵-۳ : بررسی تاثیر فرآیند کربنیزاسیون در محدوده های دمایی مختلف بر روی ساختار و خصوصیات مکانیکی الیاف              |
| ۶۹ | ۶-۳ : گرافیته کردن  |
| ۷۰ | ۷-۳ : تکنولوژی تولید الیاف کربن از الیاف پیش زمینه الیاف پلی اکریلونیتریل تجاری                                       |
| ۷۴ | ۸-۳ : عملیات سطحی   |
| ۷۴ | ۱-۸-۳ : ضرورت انجام عملیات سطحی   |
| ۷۵ | ۲-۸-۳ : انواع سیستم های عملیات سطحی   |
| ۷۵ | ۳-۸-۳ : روش های عملیات سطحی   |
| ۷۵ | ۴-۸-۳ : روش الکتروشیمیایی یا اکسیداسیون آندی  |
| ۷۶ | ۱-۴-۸-۳ : انتخاب الکترولیت  |
| ۷۸ | ۲-۴-۸-۳ : کاتد  |
| ۷۸ | ۳-۴-۸-۳ : عوامل تعیین کننده شدت جریان   |
| ۷۹ | ۴-۴-۸-۳ : چگونگی اعمال جریان الکتریکی به آند  |
| ۷۹ | ۵-۴-۸-۳ : شستشو   |
| ۷۹ | ۶-۴-۸-۳ : آهار زنی (سایزینگ) الیاف  |

# فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان مطالب

## فصل چهارم : کاربرد و تخمین مصارف الیاف کربن

۸۱	۱-۴ : مقدمه
۸۱	۱-۱-۴ : صنایع فضایی
۸۱	۲-۱-۴ : صنایع هوایی
۸۲	۳-۱-۴ : صنایع حمل و نقل
۸۲	۴-۱-۴ : صنایع پزشکی
۸۳	۵-۱-۴ : صنایع ساختمانی
۸۴	۶-۱-۴ : صنایع ورزشی و مصارف تفننی
۸۴	۷-۱-۴ : سایر کاربردها
۸۴	۲-۴ : بررسی تولید و مصرف الیاف کربن بر پایه الیاف پلی اکریلونیتریل در جهان
۸۵	۱-۲-۴ : بررسی بهترین تولید کننده های الیاف کربن از الیاف PAN
۸۵	۲-۲-۴ : بررسی تاریخچه و روند رشد نیاز جهانی به الیاف کربن
۸۶	۳-۲-۴ : تخمین تولید جهانی الیاف کربن از الیاف PAN بر اساس محدوده جغرافیایی و مصرف جهانی بر اساس مصارف عمده
۸۷	۴-۲-۴ : تخمین تولید جهانی الیاف کربن از الیاف PAN بر اساس پتانسیل مصارف عمده
۸۸	۵-۲-۴ : رشد مصرف الیاف کربن در سالهای ۱۹۸۵-۲۰۰۰ میلادی

## منابع و ماخذ

۹۰	فهرست منابع فارسی
۹۱	فهرست منابع لاتین
۹۴	چکیده انگلیسی

## فهرست جدول ها

شماره صفحه

عنوان

### فصل دوم

- ۲۰ : ۱-۲ : حلال های پلی اکریلونیتریل، روش ریسندگی و درصد اکریلیک تولیدی در جهان
- ۲۱ : ۲-۲ : حلال های پلی اکریلونیتریل و درصد پلیمر حل شده در آنها

### فصل سوم

- ۳۶ : ۱-۳ : مشخصات پیش زمینه جهت بررسی تاثیر نسبت کشش بر تنش در مرحله پایدارسازی
- ۳۷ : ۲-۳ : تنظیم دمای عملیات در هر منطقه حرارتی و نسبت های کشش جهت بررسی تاثیر نسبت کشش بر تنش
- ۵۱ : ۳-۳ : مقایسه ترکیبات موجود در الیاف پایدار شده و الیاف پیش زمینه
- ۵۲ : ۴-۳ : خصوصیات فیزیکی الیاف پایدار شده PAN
- ۵۴ : ۵-۳ : خروج ترکیبات گازی از ساختار الیاف اکسید شده را در محدوده دمایی  $200-1000^{\circ}\text{C}$
- ۷۰ : ۶-۳ : آنالیز شیمیایی الیاف PAN تجاری
- ۷۲ : ۷-۳ : سیکل های عملیات حرارتی مختلف پایدارسازی الیاف PAN
- ۷۳ : ۸-۳ : دانسیته و استحکام کششی الیاف PAN تجاری پایدار شده
- ۷۴ : ۹-۳ : استحکام کششی الیاف PAN تجاری پایدار شده

### فصل چهارم

- ۸۷ : ۱-۴ : تخمین تولید جهانی الیاف کربن از الیاف PAN بر اساس محدوده جغرافیایی
- ۸۷ : ۲-۴ : تخمین مصرف جهانی الیاف کربن بر پایه PAN براساس مصارف عمده
- ۸۸ : ۳-۴ : تخمین جهانی تولید الیاف کربن از الیاف PAN بوسیله پتانسیل مصارف عمده



## فهرست نمودارها

شماره صفحه

عنوان

### فصل اول

- ۱-۱ : خصوصیات کششی الیاف کربن حاصله از PAN ، قیر مزوفاز و قیر ایزوتروپیک ۱۱
- ۲-۱ : خصوصیات فشاری الیاف کربن حاصل از PAN و Pitch ۱۲
- ۳-۱ : مقاومت الکتریکی الیاف کربن حاصل از PAN و Pitch ۱۳
- ۴-۱ : قابلیت هدایت گرمایی الیاف کربن حاصل از PAN و Pitch ۱۳
- ۵-۱ : بررسی رابطه مقاومت الکتریکی و مدول الیاف کربن حاصل از PAN و Pitch ۱۴

### فصل سوم

- ۱-۳ : میزان تنش به دست آمده الیاف در مراحل مختلف از ۵ منطقه تست تنش ۳۷
- ۲-۳ : تغییرات استحکام کششی الیاف PAN اکسید شده، در ماه های مختلف سال ۴۶
- ۳-۳ : بررسی استحکام الیاف با افزایش میزان اکسیداسیون ۴۷
- ۴-۳ : بررسی دانسیته الیاف با افزایش میزان اکسیداسیون ۴۷
- ۵-۳ : بررسی میزان Extention الیاف با افزایش میزان اکسیداسیون ۴۸
- ۶-۳ : میزان اکسیژن جذب شده در الیاف پایدار شده PAN با ظرافت ۱/۵ دنیر در دمای ۲۳۰ °C ۴۸
- ۷-۳ : دانسیته الیاف اکسید شده PAN با ترکیب AN/MA در درجه حرارت های ۲۴۰، ۲۵۵ و ۲۷۰ درجه سانتیگراد در طی مرحله پایدار سازی حرارتی ۴۹
- ۸-۳ : بررسی میزان اکسیژن موجود در الیاف پیش زمینه PAN با کوپلیمرهای مختلف، پس از مرحله پایدار سازی در دمای ۲۳۰ درجه سانتیگراد، برای دستیابی به خصوصیات بهینه الیاف کربن ۵۱
- ۹-۳ : میزان خروج ترکیبات گازی از ساختار الیاف اکسید شده را در محدوده دمایی ۲۰۰-۱۰۰۰ °C ۵۳
- ۱۰-۳ : میزان کاهش نیتروژن موجود در الیاف، در مرحله کربنیزاسیون تا دمای ۱۸۰۰ °C ۵۶
- ۱۱-۳ : تاثیر درجه حرارت عملیات حرارتی نهایی بر خصوصیات مکانیکی الیاف پایدار شده در شرایط مختلف ۵۸
- ۱۲-۳ : میزان خروج نیتروژن از الیاف ۵۹

## فهرست نمودارها

شماره صفحه

عنوان

- 
- |    |  |
|----|--|
| ۵۹ | ۱۳-۳ : میزان نیتروژن موجود در الیاف تا دمای $2500^{\circ}\text{C}$                                       |
| ۶۰ | ۱۴-۳ : کاهش وزن در طی عملیات حرارتی کربنیزاسیون  |
| ۶۱ | ۱۵-۳ : میزان مقاومت الکتریکی الیاف در طی مرحله کربنیزاسیون   |
| ۶۲ | ۱۶-۳ : میزان مدول یانگ الیاف در طی مرحله کربنیزاسیون   |
| ۶۳ | ۱۷-۳ : تغییرات خصوصیات مکانیکی و جمع شدگی در الیاف با افزایش دمای عملیات حرارتی                          |
| ۶۴ | ۱۸-۳ : تغییرات دانسیته الیاف با افزایش دمای عملیات حرارتی  |
| ۶۵ | ۱۹-۳ : میزان نیتروژن، هیدروژن و بازده محصول در طی عملیات حرارتی  |
| ۶۸ | ۲۰-۳ : اختلاف خصوصیات مکانیکی ( استحکام و مدول ) الیاف کربن با پیش زمینه PAN، نسبت به دمای عملیات حرارتی |
| ۷۲ | ۲۱-۳ : منحنی های DSC و TGA الیاف PAN تجاری   |

### فصل چهارم

- |    |  |
|----|--|
| ۸۶ | ۱-۴ : تاریخچه و روند رشد نیاز جهانی به الیاف کربن از سال ۱۹۶۰ میلادی تا کنون |
| ۸۹ | ۲-۴ : رشد مصرف الیاف کربن در سال های ۱۹۸۵-۲۰۰۰ میلادی                        |

## فهرست شکل ها

شماره صفحه

عنوان

### فصل دوم

- ۱۷ ۱-۲ ( الف ) : ساختار مونومر اکریلونیتریل ( وینیل سیانید )
- ۱۷ ۱-۲ ( ب ) : ساختار پلی اکریلونیتریل
- ۲۳ ۲-۲ : نمای شماتیک از روش تر ریزی الیاف PAN به عنوان تولید پیش زمینه الیاف کربن
- ۲۴ ۳-۲ : ساختار دمبلی شکل

### فصل سوم

- ۳۵ ۱-۳ : نمای شماتیک از مرحله پایدارسازی حرارتی
- ۳۷ ۲-۳ : خط تولید پیوسته پایدار سازی الیاف PAN جهت بررسی تاثیر نسبت کشش بر تنش در مرحله پایدارسازی
- ۴۰ ۳-۳ : وقوع واکنش های مرحله پایدار سازی بطور شماتیک
- ۴۱ ۴-۳ : ساختار الیاف PAN پایدار شده
- ۴۱ ۵-۳ : ساختار الیاف PAN اکسید شده با ترکیب اکسیژن به صورت کتونی
- ۴۲ ۶-۳ : ساختار الیاف PAN اکسید شده با ترکیب اکسیژن با اتصالات اتری
- ۴۲ ۷-۳ : تبدیل ساختار الیاف PAN به ساختار های کتونیک و آروماتیک پس از اکسیداسیون
- ۴۳ ۸-۳ : واکنش هیدروژن زدایی الیاف PAN حلقوی و غیر حلقوی
- ۴۴ ۹-۳ : واکنش حلقوی سازی الیاف PAN
- ۶۷ ۱۰-۳ : نمای شماتیک از دستگاه مورد استفاده در فرآیند کربونیزاسیون با اعمال میدان مغناطیسی
- ۶۹ ۱۱-۳ : زاویه بین صفحه ها و محور الیاف
- ۷۱ ۱۲-۳ : نمای شماتیکی از روش الکتروشیمیایی در تولید الیاف کربن از PAN

### فصل چهارم

- ۸۵ ۱-۴ : بزرگترین تولید کنندگان الیاف کربن از الیاف PAN با در نظر نگرفتن کشورهای روسیه و چین

## چکیده :

الیاف کربن، به الیافی اتلاق می گردد که حداقل شامل ۹۲٪ کربن و قطری معادل ۱۰-۶ میکرون و با آرایش کاملاً جهت دار از اتم های کربن باشند.

توسعه الیاف کربن از دهه شصت آغاز گردیده، بطوری که در حدود ۳۰ سال پیش تولید الیاف کربن در ژاپن به عنوان ماده ای جدید گسترش پیدا کرد. مزایای این الیاف شامل استحکام کشش و مدول الاستیک بالا، وزن مخصوص کم، پایداری حرارتی و ابعادی بالا و ... سبب شده است که امروزه الیاف کربن در صنایع مختلف از جمله صنایع هوا و فضا، حمل و نقل، پزشکی، ساختمان، ورزشی و ... مورد استفاده قرار می گیرد.

روش اصلی تولید الیاف کربن، پیرولیز ترکیبات آلی می باشد که از میان اینگونه ترکیبات، مناسب ترین ماده، الیاف پلی اکریلونیتریل می باشند.

الیاف پلی اکریلونیتریل، الیافی سفید رنگ و مشابه به ابریشم می باشند، این الیاف با فرمول مولکولی  $[C_3H_3N]_n$ ، از حداقل ۸۵٪ وزنی ماکرومولکول ها، واحدهای اکریلونیتریل تشکیل شده و دارای دانسیته ای تقریباً  $1/17 \text{ gr/cm}^3$  و ساختاری ملکولی شامل زنجیرهای بلند و آرایش یافته است.

اساس تکنولوژی تولید الیاف کربن از الیاف PAN، شامل سه مرحله اصلی، پایداری سازی حرارتی یا اکسیداسیون، کربنیزاسیون و عملیات حرارتی دمای بالا یا گرافیته کردن است.

در مرحله پایداری سازی، ساختار الیاف بنحوی تغییر می یابد که زنجیر مولکولی ترموپلاستیک بواسطه واکنش های اکسیداسیون، حلقوی سازی و آب زدایی به پلیمر نردبانی غیر قابل ذوب تبدیل شده تا حین اعمال حرارت در مراحل بعدی ذوب نگردد.

مرحله کربنیزاسیون منجر به حذف عناصر غیر کربنی موجود در ماکرومولکول اولیه الیاف PAN می گردد و مرحله گرافیتیزاسیون جهت بهبود خواص فیزیکی الیاف کربن تولیدی بکار برده می شود که کاربرد این مرحله در فرآیند تولید الیاف کربن، اختیاری است.

از الیاف کربن با استحکام و مدول بالا می توان در تولید کامپوزیت ها همراه با رزین استفاده نمود. می توان با بکارگیری روش های مختلف و اعمال میزان بهینه از عملیات سطحی روی الیاف کربن، باعث تغییر در خواص سطحی، تهیه پیوندهایی مناسب جهت انتقال تنش بین تقویت کننده ها و رزین و با استفاده از عملیات سطحی می توان به افزایش سطح

تماس مولکولی، واکنش پذیری سطحی آنها، کاهش ترک ها و نقایص بواسطه ایجاد خصوصیات جدید که از این عملیات بدست می آید، دست یافت.

امروزه کامپوزیت های الیاف کربن توانسته اند در زمینه های مختلف تجاری و صنعتی نظیر هواپیماهای تجاری، صنایع حمل و نقل، تجهیزات پزشکی، صنایع الکتریکی، وسایل ورزشی- تفریحی و ساختمان، جانشین بسیاری از مواد و مصالح مرسوم شوند چرا که در کنار خواص مطلوب الیاف کربن، قیمت آن نیز نسبتاً کاهش یافته است. به عبارت دیگر، در حال حاضر کاربرد های گسترده ای برای الیاف کربن وجود دارند بطوری که میزان مصرف این الیاف در زمینه های غیر هوا و فضایی و نظامی افزایش قابل توجهی یافته است.