

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

(گرایش هسته‌ای)

# تکنیک PEPT و کاربردهای آن

از

زکیه زحمتکش کوشالی

استاد راهنما

دکتر علیرضا صدرممتاز

استاد مشاور

پیوند طاهرپرور

اسفند ۱۳۹۰

تقدیم به ...

او (قُلْ هُوَ اللَّهُ أَحَدٌ)

## سپاسگزاری

به ذات اعلا و اقدس او ستایش آورم که اگر به بندگان خویش درس ستایش و سپاس نمی‌آموخت و در دهان ما شکر «شکر» نمی‌گذاشت، همه یک‌باره از عطیات و مواهب وی بهره می‌بردیم؛ ولی هرگز لب به شکر و ستایش وی نمی‌گشودیم و با چنین کفران، گرامی‌ترین خصلت‌های انسانی را ترک می‌گفتیم و تا حضيض بهیمنیت فرو می‌افتادیم و شاید از بهائم نیز در مقامی فروتر می‌ایستادیم؛<sup>۱</sup>

«اللَّهُمَّ صَلِّ عَلَى مُحَمَّدٍ وَ آلِ مُحَمَّدٍ وَ عَجِّلْ فَرَجَهُمْ»

بر من واجب است که سپاس گویم هر آنکس را که در رسیدن این نعمت سببی گشته است؛ ولی حتی مرا توان نام بردن یکایک آنان که همراهیم کرده‌اند نبوده و نیست؛ در این راستا از اساتید بزرگوaram جناب آقای دکتر قاسمی‌زاد و جناب آقای دکتر وهابی‌مقدم که مسئولیت داوری را بر عهده داشتند و همچنین جناب آقای دکتر مهدوی‌فر مدیر محترم گروه فیزیک، به دلیل نهایت همکاری با اینجانب بسیار سپاسگزارم.

از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر صدرممتاز که همراهیشان در کنارم بسیار مسرت بخش بود، کمال قدردانی و تشکر را دارم.

آقای دکتر طاهرپرور که نامشان به عنوان استاد مشاور در پایان‌نامه آمده است ولی زحماتی بسیار فراتر از حد وظایف، برایم متحمل گشته‌اند و به جرأت باید بگویم که قادر به شکر تک‌تک لحظاتی که برایم وقت صرف کرده‌اند، نیستم! علی‌رغم آن با این زبان الکنم می‌گویم «بسیار سپاسگزارم».

کمال قدردانی و سپاس را نثار پدر عزیز و مادر مهربانم خواهم کرد چرا که بودندم را مدیون بودنشان هستم و اگر نبود آنچه در گنجینه وجودم به ودیعه گذاشتند، نبودم تا برای بودن نعمت حاضر سپاس گویم، آنان را که شایسته سپاسند. از همسر عزیزم بسیار سپاسگزارم چرا که رنج لحظات نزول این نعمت را به همراهم بردوش کشیدند و همواره برایم تکیه‌گاه استواری بودند.

و شکری ویژه باید داشته باشم بر نعمت بودن استاد ستودنی، خانم هوشیار، که اگر همراهی معنوی ایشان نبود اکنون کاری به پایان نرسیده بود تا در این سطور بتوانم از باقی همراهانم قدردانی کنم.

در پایان سپاس آنان را که در خاطرشان لحظه‌ای یاد من گذشت و در اجابت یادم، دعایم کردند.

«اللَّهُمَّ صَلِّ عَلَى مُحَمَّدٍ وَ آلِ مُحَمَّدٍ وَ عَجِّلْ فَرَجَهُمْ»

<sup>۱</sup> صحیفه سجادیه / امام چهارم، علی بن الحسین (ع) / ص ۴۵

## فهرست مطالب

د	فهرست جدول‌ها	.....
ذ	فهرست شکل‌ها	.....
ش	چکیده فارسی	.....
ص	چکیده انگلیسی	.....
ض	پیشگفتار	.....

### فصل اول: مبانی علم تصویربرداری

۲	۱-۱) مقدمه	.....
۵	۲-۱) علم تصویربرداری	.....
۶	۳-۱) مراحل اساسی و عمومی علم تصویربرداری	.....
۷	۱-۳-۱) تشکیل تصویر	.....
۷	۲-۳-۱) جمع‌آوری داده‌های تصویر	.....
۷	۳-۳-۱) بازیابی تصویر	.....
۷	۴-۳-۱) ثبت و توزیع تصویر	.....
۷	۵-۳-۱) نمایش / تجسم تصویر	.....
۸	۶-۳-۱) مشاهده تصویر / چشم انسان	.....
۸	۷-۳-۱) تجزیه و تحلیل تصویر	.....
۸	۸-۳-۱) تفسیر تصویر	.....
۸	۹-۳-۱) ارزیابی تصویر / بهینه‌سازی	.....
۸	۴-۱) برش‌نگاری گسیلی (ET)	.....
۹	۱-۴-۱) اصل ردیابی	.....
۱۰	۲-۴-۱) برش‌نگاری	.....
۱۲	۵-۱) ساخت تصویر در برش‌نگاری گسیلی	.....
۱۳	۱-۵-۱) جمع‌آوری داده‌ها	.....
۱۳	۱-۱-۵-۱) ایستا	.....
۱۴	۲-۱-۵-۱) پویا و دریچه‌ای	.....
۱۴	۳-۱-۵-۱) فریم مُد	.....
۱۵	۴-۱-۵-۱) لیست مُد	.....

۱۵	..... بازسازی تصویر (۲-۵-۱)
۱۵	..... نگاره برگشتی (BP) (۱-۲-۵-۱)
۱۶	..... نگاره برگشتی فیلترشده (FBP) (۲-۲-۵-۱)
۱۹	..... بازسازی تکرار (۳-۲-۵-۱)
۲۰	..... تصاویر سطح مقطعی (۶-۱)

### فصل دوم: برش نگاری گسیلی پوزیترون (PET)

۲۳	..... مقدمه (۱-۲)
۲۴	..... فیزیک پوزیترون ( $\beta^+$ ) (۲-۲)
۲۷	..... رادیودارو (۳-۲)
۲۷	..... انواع رویدادها (۴-۲)
۲۷	..... رویداد صحیح و منفرد (۱-۴-۲)
۲۸	..... رویداد تصادفی و پراکنده (۲-۴-۲)
۲۹	..... اجزای دوربین PET (۵-۲)
۳۰	..... کریستال‌های سوسوزن (۱-۵-۲)
۳۳	..... لامپ‌های فوتون‌افزا (PMT) (۲-۵-۲)
۳۵	..... تحلیلگرهای ارتفاع پالس (PHA)، تفکیک‌کننده‌های زمان (۳-۵-۲)
۳۶	..... آشکارسازی همفرود نابودی (ACD) (۴-۵-۲)
۳۷	..... سپتا (۵-۵-۲)
۳۸	..... اکتساب دوبعدی (۱-۵-۵-۲)
۳۹	..... اکتساب سه‌بعدی (۲-۵-۵-۲)
۴۰	..... سامانه آشکارسازی PET (۶-۵-۲)
۴۰	..... پوششگرهای PET (۱-۶-۵-۲)
۴۱	..... آرایش پوششگر PET (۲-۶-۵-۲)
۴۲	..... اصلاحات صورت گرفته در پوششگر PET (۳-۶-۵-۲)
۴۴	..... ویژگی‌های تصویربرداری PET (۶-۲)
۴۴	..... حساسیت (۱-۶-۲)
۴۴	..... توان تفکیک فضایی (۲-۶-۲)
۴۵	..... برد پوزیترون در بافت (۱-۲-۶-۲)
۴۵	..... گسیل فوتون‌ها در زاویه غیر از $180^\circ$ (۲-۲-۶-۲)

۴۶.....	۳-۲-۶-۲ خطای اختلاف دید (اثر عمق برهمکنش).....
۴۷.....	۷-۲ تصحیحات در تصویربرداری PET.....
۴۷.....	۱-۷-۲ تصحیح تضعیف.....
۴۸.....	۲-۷-۲ تصحیح پراکندگی.....
۴۹.....	۳-۷-۲ تصحیح زمان مرگ.....

#### فصل سوم: ردیابی ذره گسیلنده پوزیترون (PEPT)

۵۱.....	۱-۳ مروری بر تاریخچه PEPT.....
۵۲.....	۲-۳ توصیف PEPT.....
۵۳.....	۳-۳ الگوریتم مکان‌یابی در PEPT.....
۵۶.....	۴-۳ سامانه آشکارسازی در PEPT.....
۵۶.....	۵-۳ مُد اکتساب داده‌ها در PEPT.....
۵۷.....	۶-۳ ردیاب‌ها.....
۵۸.....	۷-۳ روش‌های نشاندارسازی.....
۵۸.....	۱-۷-۳ روش تابش‌دهی مستقیم.....
۵۹.....	۲-۷-۳ روش تبادل یون.....
۶۰.....	۳-۷-۳ روش اصلاح سطح.....
۶۱.....	۸-۳ پردازش نتایج PEPT.....
۶۴.....	۹-۳ محدودیت‌ها.....
۶۷.....	۱۰-۳ مقایسه مابین PEPT و PET.....

#### فصل چهارم: مروری بر برخی از کاربردهای PEPT

۶۹.....	۱-۴ مقدمه.....
۷۰.....	۲-۴ اندازه‌گیری سرعت در شارش سیالات غذایی.....
۷۰.....	۱-۲-۴ اندازه‌گیری‌های درون لوله افقی.....
۷۴.....	۲-۲-۴ اندازه‌گیری‌های درون قوطی دوار.....
۷۶.....	۳-۴ بررسی شارش جامدات در سیال درون قوطی دوار.....
۷۶.....	۱-۳-۴ اثر چسبندگی سیال و میزان حضور جامدات بر مسیر جامدات.....
۷۸.....	۲-۳-۴ اثر چسبندگی سیال و میزان حضور جامدات بر توزیع سرعت.....
۸۰.....	۴-۴ بررسی شارش ماده خمیری شکل.....
۸۴.....	۵-۴ نگاشت ساختار شارش در بستر بادافشان.....

- ۸۸..... ۶-۴) نگاهت حرکت ذره در یک بستر بادافشان باریک شده
- ۹۰..... ۱-۶-۴) نگاهت حرکت ذره
- ۹۱..... ۲-۶-۴) ارتفاع بستر
- ۹۲..... ۳-۶-۴) زمان چرخش
- ۹۳..... ۴-۶-۴) اثر حضور دهانه پاشنده
- ۹۵..... ۷-۴) مشاهده حرکت ذرات درون دریچه L شکل
- ۹۷..... ۱-۷-۴) مسیر ذره
- ۹۸..... ۲-۷-۴) سرعت ذره
- ۱۰۱..... ۸-۴) مشاهده حرکت ذرات جامد در لوله ایستاده
- ۱۰۸..... ۹-۴) نگاهت حرکت ذرات در مخلوط‌کننده مواد خشک
- ۱۱۲..... ۱۰-۴) مطالعه حرکت ذرات دانه‌ای در یک استوانه دوار
- ۱۱۶..... ۱۱-۴) مطالعه حرکت ذرات در هندسه‌های متفاوت خروجی برخیزنده
- ۱۲۰..... ۱۲-۴) تخمین کشش توان در آسیاب غلتان آزمایشگاهی
- ۱۲۱..... ۱-۱۲-۴) روش مرکز جرم ( $P_{COM}$ )
- ۱۲۳..... ۲-۱۲-۴) روش مجموع گشتاور هر سلول ( $P_{BIN}$ )
- ۱۲۶..... ۱۳-۴) اندازه‌گیری آهنگ برش در آسیاب غلتان آزمایشگاهی
- ۱۳۳..... ۱۴-۴) پیشنهادات ادامه کار
- ۱۳۴..... مراجع



## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: هسته‌های متداول گسیلنده ی پوزیترون ..... ۲۵
- جدول ۲-۲: برخی از رادیوایزوتوپ‌هایی تولید شده در شتابدهنده که در پزشکی هسته‌ای به کار می‌روند ..... ۲۶
- جدول ۳-۲: کاربرد برخی از رادیوداروهای مورد استفاده در PET ..... ۲۷
- جدول ۴-۲: خصوصیات فیزیکی کریستال‌های سوسوزن مورد استفاده در PET ..... ۳۲
- جدول ۱-۳: برد پوزیترون و توان تفکیک ..... ۶۵
- جدول ۱-۴: خلاصه‌ای از اندازه‌گیری‌ها و محاسبات کشش توان ..... ۱۲۴

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: چگونگی مشاهده تصویر..... ۲
- شکل ۱-۲: (الف) محدوده عملکردی سیستم‌های تصویربرداری اپتیکی و الکترواپتیکی، (ب) غیراپتیکی..... ۴
- شکل ۱-۳: نمایی کلی از مراحل تصویربرداری..... ۶
- شکل ۱-۴: تصویر برش عبوری از محور قائم بدن، بدست آمده توسط تصویربرداری  $^{18}\text{F-FDG-PET}$ ..... ۱۰
- شکل ۱-۵: نگاره موازی یک بعدی از برش دوبعدی یک جسم سه بعدی..... ۱۱
- شکل ۱-۶: مراحل کلیدی مطالعه‌ی پرتونگاری مقطعی گسیل..... ۱۳
- شکل ۱-۷: نمایش مراحل نگاره برگشتی ساده..... ۱۶
- شکل ۱-۸: (الف) تصویر برش  $f(x, y)$  جسم، (ب) سینوگرام  $p(x_p, \phi)$  این برش..... ۱۷
- شکل ۱-۹: (الف) نگاره پیشرو ایده آل برای برشی از تصویر در یک زاویه خاص، (ب) نگاره برگشتی..... ۱۸
- شکل ۱-۱۰: تصاویر بازسازی شده با استفاده از تعداد متفاوتی نگاره..... ۱۸
- شکل ۱-۱۱: نمایش طرح‌وار مراحل در بازسازی به روش تکرار..... ۱۹
- شکل ۱-۱۲: برش‌های متناظر با صفحات مختصات  $xy$ ،  $yz$  و  $xz$  به ترتیب از چپ: محوری، سهموی و حلقوی..... ۲۱
- شکل ۱-۲: واکنش نابودی پوزیترون - الکترون..... ۲۴
- شکل ۲-۲: نمودار شمایی واپاشی برای  $^{15}\text{O}$ ، گسیلنده  $\beta^+$ ..... ۲۵
- شکل ۲-۳: نمودار توزیع انرژی پوزیترون برای چند گسیلنده مطرح پوزیترون در پزشکی هسته ای..... ۲۶
- شکل ۲-۴: مثال‌هایی از رویدادهای همفرودی..... ۲۸
- شکل ۲-۵: رویدادهای منفرد..... ۲۸
- شکل ۲-۶: رویدادهای تصادفی..... ۲۹
- شکل ۲-۷: دوربین PET..... ۳۰
- شکل ۲-۸: نوع برهم کنش غالب برای ترکیبات متنوع فوتون فرودی و عدد اتمی ماده جاذب..... ۳۲
- شکل ۲-۹: یک لامپ فوتون‌افزا با نمایش فوتوکاتد در یک انتها، چندین داینود در درون و یک آند در انتهای دیگر..... ۳۴
- شکل ۲-۱۰: بلوک آشکارساز..... ۳۵
- شکل ۲-۱۱: رویداد همفرود پذیرفته شده پس از پردازش..... ۳۶
- شکل ۲-۱۲: یکی از جفت فوتون‌های نابودی پراکنده شده و اطلاعات آن پس زده شده است..... ۳۷
- شکل ۲-۱۳: رویدادهای تصادفی می‌توانند به عنوان رویداد صحیح عبور کنند..... ۳۷
- شکل ۲-۱۴: تصویربرداری دو و سه بعدی در PET..... ۳۸
- شکل ۲-۱۵: نمایی از یک بلوک آشکارساز که به  $8 \times 8$  برش تقسیم شده..... ۴۰
- شکل ۲-۱۶: پیکربندی‌های متفاوت پویشر PET..... ۴۱

- شکل ۲-۱۷: نمایش اشتراک گذاری یک چهارم ..... ۴۲
- شکل ۲-۱۸: آشکارساز ساخته شده با استفاده از دو ماده سوسورن با زمان‌های واپاشی متفاوت. .... ۴۳
- شکل ۲-۱۹: برد پوزیترون به عنوان عامل محدودکننده‌ی توان تفکیک ..... ۴۵
- شکل ۲-۲۰: غیر هم‌خطی بودن فوتون‌های نابودی در نتیجه تکانه باقی‌مانده از الکترون و پوزیترون. .... ۴۶
- شکل ۲-۲۱ (الف): خطای اختلاف دید (ب) اندازه‌ی بزرگتر حلقه، خطا را کاهش می‌دهد. .... ۴۷
- شکل ۲-۲۲: تضعیف در PET ..... ۴۸
- شکل ۳-۱: نحوه مکان‌یابی ذره گسیلنده پوزیترون در تکنیک PEPT ..... ۵۳
- شکل ۳-۲: نمونه‌ای از نتایج حاصل شده در لیست مُد. .... ۵۷
- شکل ۳-۳: اثرات ابعاد ذره بر روی پرتوزایی بدست آمده در روش فعال‌سازی مستقیم. .... ۶۰
- شکل ۳-۴: پرتوزایی قابل حصول در یک ذره معین با استفاده از تکنیک اصلاح سطح. .... ۶۱
- شکل ۳-۵: نمایی از کد ترک. .... ۶۲
- شکل ۳-۶: نمودار تغییر مختصات و سرعت ذره نسبت به زمان برای ذره گسیلنده پوزیترون در یک آونگ. .... ۶۳
- شکل ۳-۷: پردازش نتایج PEPT ..... ۶۴
- شکل ۳-۸: ناسازگاری رویداد نابودی و مکان. .... ۶۵
- شکل ۳-۹: نمایش ترسیمی اثر غیرهم‌خطی دو پرتو گامای نابودی. .... ۶۶
- شکل ۴-۱: نمایش طرحوار از ساختار آزمایش برای اندازه‌گیری سرعت در لوله‌های مستقیم. .... ۷۰
- شکل ۴-۲: نمایش داده‌های PEPT از سطح مقطع لوله مستقیم. .... ۷۱
- شکل ۴-۳: نمایش طرحوار اثر تعداد نقاط استفاده شده در رگرسیون خطی. .... ۷۲
- شکل ۴-۴: توزیع‌های سرعت در لوله برای نقاط متفاوت در رگرسیون برای محلول CMC ..... ۷۲
- شکل ۴-۵: توزیع‌های سرعت برای دو آهنگ متفاوت شارش متفاوت محلول CMC ۱٪ در لوله. .... ۷۴
- شکل ۴-۶: نمودار سه بعدی مسیر ذره در (ب) قوطی کاملاً پر، (ج) قوطی شامل ۱۰٪ هوا. .... ۷۵
- شکل ۴-۷: نمودار سرعت در امتداد جهت شعاعی، (الف) قوطی کاملاً پر، (ب) قوطی شامل ۱۰٪ هوا. .... ۷۶
- شکل ۴-۸: مسیرهای جامدات برای جامدات موجود در آب. .... ۷۷
- شکل ۴-۹: مسیرهای جامدات برای جامدات موجود در سیال غلیظ. .... ۷۷
- شکل ۴-۱۰: مسیرهای جامدات برای جامدات موجود در سیال رقیق شده. .... ۷۸
- شکل ۴-۱۱: توزیع سرعت جامدات برای جامدات موجود در آب. .... ۷۸
- شکل ۴-۱۲: توزیع سرعت جامدات برای جامدات موجود در سیال غلیظ. .... ۷۹
- شکل ۴-۱۳: توزیع سرعت جامدات برای جامدات موجود در سیال رقیق شده. .... ۷۹
- شکل ۴-۱۴ (الف): نمایی از یک بیرون‌ریز (اکسترودر) افقی (ب) نمایی از یک بیرون‌ریز عمودی. .... ۸۱
- شکل ۴-۱۵: مواد تولید شده به کمک روش بیرون‌ریزی. .... ۸۱
- شکل ۴-۱۶ (الف و ب): مسیر ذرات عبور نموده از قالب و (ج) سرعت ذرات در طول زمان بیرون‌ریزی. .... ۸۲

- شکل ۴-۱۷: تغییرات سرعت ذره با مکان‌های شروع متفاوت در ناحیه مکانی در بالای قالب..... ۸۳
- شکل ۴-۱۸: نمودار آهنگ تنش برشی ماکزیمم بر حسب مکان در دو سرعت متفاوت پیستون..... ۸۴
- شکل ۴-۱۹: نمای یک بستر باد افشان گاز-جامد..... ۸۵
- شکل ۴-۲۰: نمای یک بستر باد افشان حبابی..... ۸۶
- شکل ۴-۲۱: ساختار شارش و سرعت برآمدن حباب در یک بستر باد افشان پلی اتیلنی..... ۸۷
- شکل ۴-۲۲: نمایش طرحوار یک بستر باد افشان فوقانی..... ۸۹
- شکل ۴-۲۳: بردار سرعت و اشغال ترکیب شده در افشان‌سازی مهره‌های شیشه‌ای..... ۹۰
- شکل ۴-۲۴: نمودار مکان ذره انباشته شده در صفحه‌ی مرکزی XY..... ۹۱
- شکل ۴-۲۵: نمودار جایگزیدگی یک بُعدی به عنوان تابعی از ارتفاع بستر در محفظه..... ۹۲
- شکل ۴-۲۶: تقسیم بندی بستر باد افشان در تعیین زمان چرخش..... ۹۳
- شکل ۴-۲۷: اثر حضور دهانه و فشار هوای ریزسازی بر ارتفاع بستر و زمان چرخش..... ۹۴
- شکل ۴-۲۸: نمودار جایگزیدگی در صفحه‌ی XY با تمرکز بر زیر دهانه‌ی پاشنده..... ۹۴
- شکل ۴-۲۹: رژیم‌های متفاوت شارش در دریچه L شکل..... ۹۶
- شکل ۴-۳۰: نمایش تجهیزات آزمایش دریچه L شکل در تخلیه (الف) آزاد، (ب) تخلیه به درون CFB برخیزنده..... ۹۷
- شکل ۴-۳۱: مسیر ذره ردیاب درون لوله ایستاده و دریچه L شکل ۴۵ میلیمتری در  $\frac{U}{U_{mf}} = 20$ ..... ۹۸
- شکل ۴-۳۲: مکان درون دریچه L شکل به عنوان تابعی از  $L/D$ ،  $Y/D$  و  $Z/D$ ..... ۹۸
- شکل ۴-۳۳: نمونه رفتار جریان موجی درون دریچه L شکل..... ۹۹
- شکل ۴-۳۴: نمودار توزیع سرعت ردیاب درون دریچه L شکل در  $\frac{2U}{U_{mf}}$ ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۵: نمودار توزیع سرعت ردیاب درون دریچه L شکل در  $\frac{10U}{U_{mf}}$ ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۳۶: (الف) مسیر ذره ردیاب در  $\frac{U}{U_{mf}} = 6$  در لوله و دریچه (ب) مشخصات مختصات مکانی درون لوله..... ۱۰۳
- شکل ۴-۳۷: نمودار حضور ردیاب درون لوله ایستاده در محورهای Y و X/D در دو  $\frac{U}{U_{mf}}$  متفاوت..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۸: سرعت ردیاب در ناحیه بین  $Y = -50\text{mm}$  و  $Y = 350\text{mm}$  در سرعت‌های متفاوت هوادهی..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۹: نمایش عمومی نمودار سرعت ردیاب در عبور از سطح مقطع افقی لوله..... ۱۰۵
- شکل ۴-۴۰: نمودار سرعت ردیاب در سرعت هوادهی ثابت  $\frac{6U}{U_{mf}}$ ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۴۱: سرعت متوسط ذره در لوله ایستاده ۴۵mm..... ۱۰۷
- شکل ۴-۴۲: نمایش رابطه بین تخلیه آزاد و تخلیه به درون برخیزنده..... ۱۰۷
- شکل ۴-۴۳: (الف) سطح مقطعی از همزن مکانیکی، (ب) نمایی از اتافک همزن..... ۱۰۸
- شکل ۴-۴۴: نمایش پخش شدگی برش نشاندار در ناحیه بین مکان نوک داخلی تیغه و مرکز مخلوط‌کننده..... ۱۰۹
- شکل ۴-۴۵: نمایش پخش شدگی برش نشاندار در ناحیه‌ای که به طور مستقیم توسط تیغه جاروب می‌شود..... ۱۰۹

- شکل ۴-۴۶: نمایش پخش شدگی برش نشاندار در ناحیه بین نوک خارجی تیغه و لایه داخلی دیواره مخلوط‌کننده ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۴۷: جابجایی شعاعی ردیاب به صورت تابعی از زمان برای همزن شش تیغه ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۴۸: تأثیر سطح انباشتگی بر ضریب پخش محوری در همزن ..... ۱۱۲
- شکل ۴-۴۹: نمایی از یک استوانه دوار. .... ۱۱۳
- شکل ۴-۵۰: کسر زمان حضور ذره نشان‌دار در هر نقطه در صفحه فرا محوری ..... ۱۱۴
- شکل ۴-۵۱: سرعت متوسط ذره نشان‌دار در هر نقطه در صفحه فرا محوری ..... ۱۱۴
- شکل ۴-۵۲: بخش کوچکی از اطلاعات مکان ذره ردیاب ۳ میلی‌متری ..... ۱۱۵
- شکل ۴-۵۳: نمایش توزیع پراکندگی محوری ردیاب از مکان اولیه خویش در یک استوانه دوار ..... ۱۱۶
- شکل ۴-۵۴: نمایش هندسه‌های متفاوت خروجی. .... ۱۱۷
- شکل ۴-۵۵: (الف) مسیر و (ب) بردارهای سرعت ردیاب درون خروجی تند ..... ۱۱۸
- شکل ۴-۵۶: (الف) مسیر و (ب) بردارهای سرعت ردیاب درون خروجی مدور. .... ۱۱۸
- شکل ۴-۵۷: (الف) مسیر و (ب) بردارهای سرعت ردیاب درون خروجی هموار. .... ۱۱۹
- شکل ۴-۵۸: تصویر و مدل شبیه‌سازی شده ی آسیاب غلتان ..... ۱۲۰
- شکل ۴-۵۹: نمودار نمایش دهنده ی محاسبه ی کشش توان با استفاده از روش مرکز جرم ..... ۱۲۲
- شکل ۴-۶۰: نمودار نمایش دهنده ی محاسبه ی کشش توان با استفاده از روش مجموع گشتاور هر سلول ..... ۱۲۳
- شکل ۴-۶۱: نمودار مقادیر کشش توان حاصل از آزمایشات PEPT ..... ۱۲۵
- شکل ۴-۶۲: نمودارهای توزیع کشش توان بر حسب (W) ..... ۱۲۵
- شکل ۴-۶۳: آسیاب آزمایشگاهی به خدمت گرفته شده در آزمایشات ردیابی ذره گسیلنده‌ی پوزیترون ..... ۱۲۶
- شکل ۴-۶۴: میدان سرعت متوسط با استفاده از شبکه‌ی مستطیلی ۵۰×۵۰ ..... ۱۲۸
- شکل ۴-۶۵: نمودار سرعت تانژانتی در امتداد خط قطری عبوری از میانه‌ی CoC ..... ۱۲۸
- شکل ۴-۶۶: تغییرات سرعت تانژانتی بر حسب فاصله‌ی شعاعی در امتداد خط قطری ..... ۱۲۹
- شکل ۴-۶۷: آهنگ برش در امتداد خط پویش ..... ۱۳۰
- شکل ۴-۶۸: نمودار آهنگ برش برای دهانه‌ی زاویه‌ای ( $\theta \pm 20^\circ$ ) در حدود میانه‌ی مکان CoC ..... ۱۳۰
- شکل ۴-۶۹: تغییرات ماکزیمم آهنگ برش با کسری از بار در ۶۰٪ و ۷۵٪ سرعت بحرانی ..... ۱۳۱

## تکنیک PEPT و کاربردهای آن

## زکيه زحمتکش کوشالی

از اوایل سال ۱۹۷۰، پرتونگاری مقطعی گسیل پوزیترون (PET) به عنوان یک روش تصویربرداری تشخیصی، بیشترین استفاده را در تحقیقات تجربی و مطالعات بالینی داشته است. در این روش، یک ردیاب رادیواکتیو را وارد بدن بیمار کرده و پرتوزایی آن را توسط مجموعه‌ای از آشکارسازهای قرار داده شده در اطراف بیمار، ثبت می‌کنند. ایزوتوپ ردیاب با گسیل پوزیترون واپاشی کرده و متعاقباً پس از طی مسافت کوتاهی با یک الکترون نابود می‌شود. به دلیل محدودیت‌های تکنیک PET هنگام بررسی حرکت سریع ذرات در مطالعات صنعتی، تکنیک جدیدی که ردیابی گسیلنده پوزیترون (PEPT) نامیده می‌شود، توسط دیوید پارکر در سال ۱۹۹۳ ابداع گشت. PET برای نقشه‌برداری از توزیع جریان سیال در تصویربرداری پزشکی استفاده می‌شود، درحالی‌که تکنیک PEPT قادر است مکان، سرعت و جزئیات جریان درون سیستم مورد آزمایش را با نشاندارسازی یک ذره به عنوان ردیاب بدست آورد. به دلیل آنکه چگونگی رفتار سیالات در سیستم‌های خاص مورد نظر است و روش‌های سرعت‌سنجی موجود توانایی کم و مشکلات زیادی را به همراه دارند، این تکنیک گسترش یافته است. تکنیک PEPT اجازه می‌دهد یک ذره گسیلنده پوزیترون با دقت بالا و بی‌واسطه برای نقشه‌برداری از جریان‌های دانه‌ای در کاربردهای مهندسی به کار رفته در مخزن‌های غیرشفاف نیز ردیابی شود. برای مثال مخلوط شدن و انباشتگی در مخلوط‌کننده‌ها، خشک‌کننده‌ها و کوره‌های دوار؛ چرخش ذرات، ساختار شارش جامدات و الگوی جریان حباب‌ها در بستر بادافشان و خردکننده‌ها؛ حرکت جامدات در فرایندهای غذایی و .....؛ در این مطالعه این تکنیک همراه با برخی از کاربردهای گسترده‌اش توصیف شده است.

کلید واژه‌ها : دوربین گاما، PET، PEPT، الگوریتم، ذره نشاندار شده، ردیابی ذره

## Abstract

PEPT technique and its applications  
Zakieh Zahmatkesh Kushalli

From the early 1970s, positron emission tomography (PET) as a diagnostic imaging modality had been for the most part used in experimental research and clinical study. In this method a radioactive tracer is inserted into the patient and its emissions are recorded by a dedicated set of detectors placed around the device. The tracer isotope decays by emitting a positron which subsequently annihilates with an electron after travelling a short distance. Due to restrictions in PET technique in investigating of the quickly movement of particles in industrial studies, a new technique which is called positron emission particle tracking (PEPT), has been developed by Professor David Parker in 1993. The PET is used for mapping flow of liquid distribution especially in nuclear medicine imaging, while PEPT technique is able to obtain location, velocity and properties of flow through the interested systems, with labeling a particle as a tracer. Because of interested in specify of behavior of fluid into individual system and little ability and difficulties in available methods of velocimetry, this technique has been developed. The PEPT technique have been allowed up to the positron-emitting particle to be accurately and noninvasively tracked in opaque vessels for mapping granular flows for engineering applications, for example mixing and segregation in mixers, dryers, rotating kilns, particle rotation, solid flow structure, bubble flow pattern in fluidized beds and granulators, solid motion in food processors, etc. In this study we describe PEPT technique and represent some of its widespread applications.

Key words: Gamma camera , PET, PEPT, Algorithm, Labelled Particle, Particle Tracking

## پیشگفتار

علاقه‌ی دانشمندان به دانستن خواص غیرقابل رؤیت اجسام، حیطه‌ی کار علم را به گستره‌ای معطوف داشت که از آن با عنوان علم تصویربرداری یاد می‌شود. از آنجاکه این شاخه از علم نیز مانند سایر علوم با رشد تکنولوژی و صنعت در حال رشد است، نیاز به بررسی‌هایی پیرامون آن احساس می‌شود. آنچه در این پایان‌نامه بیان خواهد شد در واقع حرکتی کوچک در جهت شرح و توصیف تکنیک جدیدی می‌باشد که در راستای اعتلای علم تصویربرداری ابداع شده است و از آنجاکه تاکنون کاری در مورد شناسایی این تکنیک در ایران انجام نشده، این پایان‌نامه به عنوان اولین کار در ارائه این مطلب می‌باشد.

خلاصه‌ای از مطالب ارائه شده در این کار :

در فصل اول سعی بر این است که اصول اساسی علم تصویربرداری در ساخت تصویر ارائه شود.

در فصل دوم به صورت تخصصی‌تر به جزئیات دستگاه تصویربرداری PET پرداخته شده است که در واقع تکنیک جدید (PEPT) با اصلاحاتی که بر روی این دستگاه انجام گرفته، پا به عرصه وجود نهاده است. در این فصل سعی می‌شود تمام مطالبی که در فهم بهتر فصول بعدی حائز اهمیت است، بیان شود تا با شناختی صحیح از دستگاه تصویربرداری PET، توصیف تکنیک PEPT که در فصل سوم بدان پرداخته خواهد شد، به صورت مفیدتر ارائه گردد.

در فصل سوم تکنیک PEPT همراه با تاریخچه پیدایش آن و الگوریتمی که در مکان‌یابی اطلاعات بدست آمده نقش اساسی را ایفا می‌کند، شرح داده خواهد شد. در این فصل سعی شده است گذری اجمالی بر روش‌های نشاندارسازی ذره ردیاب مورد استفاده، انجام شود. در نهایت نحوه پردازش نتایج حاصل از این تکنیک، محدودیت‌ها و مقایسه آن با روش تصویربرداری PET ارائه خواهد شد.

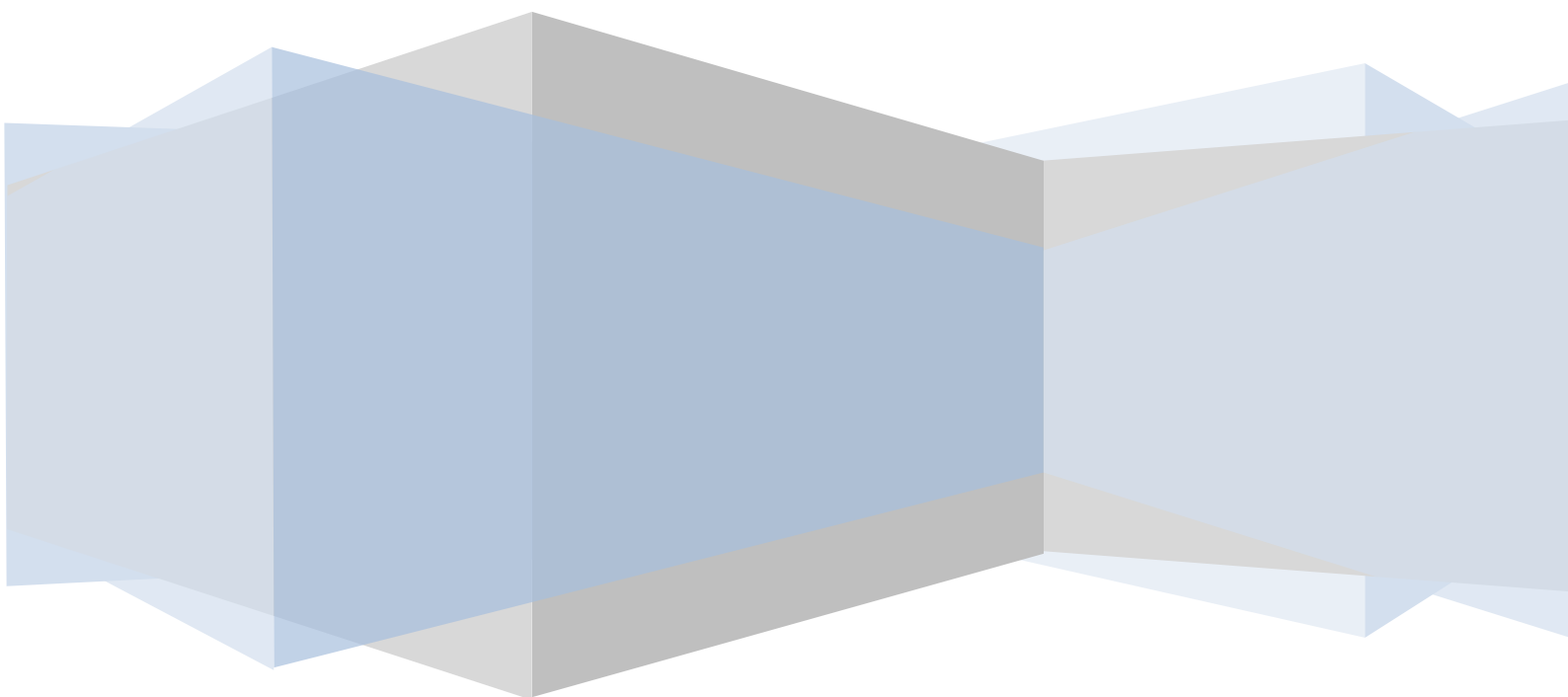
در فصل چهارم به عنوان نتیجه‌ی آنچه از تکنیک PEPT در کاربردهای صنعتی دیده شده است، کاربردهایی را بیان و به شرح برخی از نتایج حاصل از استفاده‌ی این تکنیک خواهیم پرداخت. البته هر جا لازم بوده، مقایسه‌ای با نتایج حاصل از کارهای پیشین نیز صورت گرفته است.

در نهایت با بیان پیشنهادات ادامه کار، مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه به پایان می‌رسد. همچنین پیرامون موضوع بحث شده در این کار در انتها مراجعی جهت رجوع به علاقه‌مندان بیان شده است.



# مبانی علم تصویربرداری

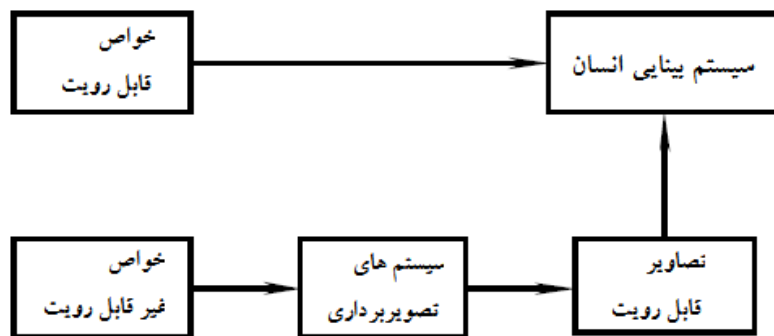
## فصل اول



## فصل اول : مبانی علم تصویربرداری

## ۱ (۴) مقدمه

هر پیشرفتی در دیدن، نیازمند توسعه و استفاده از برخی ابزار یا سیستم‌های تصویربرداری است تا بتوان خواص غیرقابل رویت جسم را در تصاویر مشاهده نمود (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱: خصوصیات قابل رویت اجسام به طور مستقیم دیده می‌شوند ولی خصوصیات غیرقابل رویت آنها به کمک سیستم‌های تصویربرداری به تصاویر قابل مشاهده تبدیل می‌شوند [۱].

در سال ۱۸۹۵ ویلهلم رونتگن<sup>۱</sup> هنگامی که در طی آزمایشات خود با تصویری از دست همسرش مواجه شد، پرتو X را کشف کرد. این تصویر سبب شد برای اولین بار بتوان با استفاده از پرتوی غیرقابل رویت (پرتو X) تصویری از یک جسم غیرقابل رؤیت (استخوان دست) ایجاد نمود.

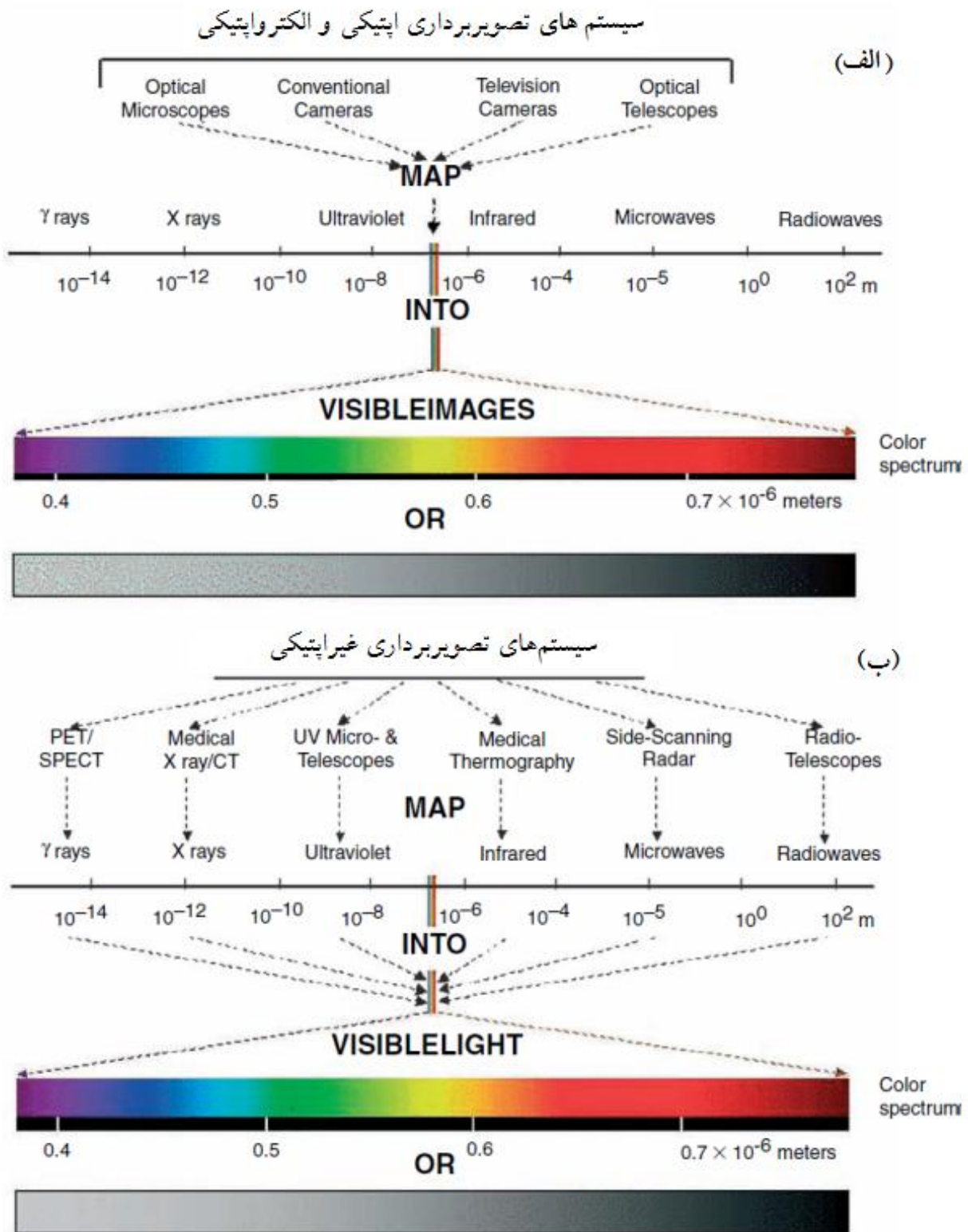
کشف رونتگن منجر به پیشرفت‌های اساسی در فیزیک مانند کشف پرتوزایی و توسعه نظریه‌های مربوط به اثر فوتوالکتریک و ... شد. همچنین موجب تولید اختراعاتی شد که رشد چشمگیری را در روش‌های تصویربرداری در پی داشت.

<sup>۱</sup> Wilhelm Rontgen

سیستم‌های تصویربرداری اپتیکی خصوصیات از جسم را که به نور مرئی مربوط است، به صورت تصاویر قابل مشاهده ترسیم می‌کند، در حالی که سیستم‌های تصویربرداری غیراپتیکی خصوصیات از جسم را که به پرتو غیرقابل رویت مربوط است، به تصویر می‌کشد (شکل ۱-۲). سیستم‌های تصویربرداری غیراپتیکی که در تحقیقات پزشکی و کاربردهای بالینی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: برش‌نگاری گسیلی پوزیترون (PET)، برش‌نگاری رایانه‌ای گسیل تک فوتون (SPECT)، برش‌نگاری رایانه‌ای پرتو X (CT)، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (MRI)، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی عملکردی (fMRI)، سونوگرافی، میکروسکوپ الکترونی و میکروسکوپ نیروی اتمی.

بنابراین در مدتی کوتاه- ۱۰۰ سال- روش‌های تصویربرداری توسعه یافتند و استفاده از طیف الکترومغناطیسی (امواج رادیویی تا اشعه گاما)، طیف‌های صوتی (ارتعاشات تا ماورای صوت) و همچنین پرتوهای مختلف ذرات (الکترون‌ها، پروتون‌ها و . . .) را ممکن ساختند. از همه مهمتر اینکه آنها قلمرو بینایی را به محدوده‌ی خواصی از جسم بردند که به طور مستقیم با نور مرئی در ارتباط نیست. بنابراین کاملاً طبیعی است که با دید غیرمسلح غیرقابل دسترس باشد. با این وجود، بسیاری از خواص غیرقابل رؤیت اجسام، توسط دانشمندان فیزیک، بیولوژی، مهندسی و پزشکان مورد توجه است.

برای مثال، در زمینه پزشکی هسته‌ای، تصاویر توزیع رادیوردیاب تزریق شده ممکن است خواص غیرقابل مشاهده‌ی بدن انسان، از جمله مقادیر حجم خون، جریان خون، خورسانی، سوخت و ساز بافت بدن، مصرف اکسیژن و . . . را آشکار سازد (در واقع همه‌ی آنهایی که می‌تواند ارزش علمی و تشخیصی داشته باشد). به طور خاص، تصویربرداری رادیونوکلئید، یک روش قدرتمند برای تحقیق در مورد اثرات داروها بر روی چنین پارامترهایی فراهم می‌کند. با بهره‌برداری از این روش، انتظار می‌رود که بینش و شناختی تازه از فرایندهای فیزیولوژیکی که در اثرات داروها درگیر است، فراهم شود و همچنین باعث کاهش چشمگیری در هزینه و زمان مورد نیاز برای آزمایش داروهای جدید شود.



شکل ۱-۲: (الف) محدوده عملکردی سیستم های تصویربرداری اپتیکی و الکترواپتیکی، (ب) غیراپتیکی که در درجه بندی رنگی و خاکستری نمایش داده شده است [۱].