



بسم الله الرحمن الرحيم

شناسایی نقاط کلیدی فناوری نانو در زنجیره ارزش حسگرهای کوانتومی

تهیه کننده:

ستاد توسعه فناوری نانو و میکرو - ستاد توسعه اقتصاد دانش بنیان کوانتوم، لیزر و فوتونیک

تابستان ۱۴۰۵

خلاصه مدیریتی	۳
۱-پایش مقالات مشترک در حوزه فناوری‌های کوانتوم و نانو	۴
۱-۱ مقدمه‌ای بر ارتباط فناوری کوانتوم و نانو	۴
۱-۲ بررسی وضعیت همگرایی به صورت کمی	۵
۱-۳ مقایسه وضعیت ایران با جهان در نقاط همگرایی	۷
۲-کاربردهای نانو در حسگرهای کوانتومی	۱۰
۱-۲ روش و منابع گردآوری اطلاعات	۱۰
۲-۲ مهم‌ترین محصولات همگرای بین دو فناوری	۱۲
۲-۳ درخت فناوری محصولات کاملاً نانویی با بلوغ بالا	۱۶
۲-۳-۱ حسگرهای مبتنی بر الماس نیتروژن-تهی‌جا	۱۶
۲-۳-۲ آشکارساز تک‌فوتونی مبتنی بر نانوسیم	۱۷
۳-بررسی امکانات و توانمندی کشور در حوزه‌های منتخب	۲۱
۴-مراجع	۲۵

خلاصه مدیریتی

این مطالعه در ادامه مجموعه فعالیت‌های آینده‌پژوهی و رصد فناوری انجام شده است که در مراحل پیشین، ضمن شناسایی فناوری‌های نوظهور و آینده‌ساز، **فناوری‌های کوانتومی** را به‌عنوان یکی از حوزه‌های نوظهور با میزان تاثیرگذاری تحول‌آفرین برای فناوری نانو شناسایی کرده و سپس در یک مطالعه تخصصی‌تر، وضعیت ادبیات علمی، روندهای پژوهشی، مراکز علمی برتر و تعاملات میان دو حوزه نانو و کوانتوم، با اتکا به شواهد مقالات و اختراعات، مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه حاضر، ضمن استفاده از برخی یافته‌های پیشین، دامنه بررسی به‌صورت دقیق‌تر بر **نانوحسگرهای کوانتومی** و نقاط ورود و نقش‌آفرینی فناوری نانو در زنجیره ارزش آنها متمرکز شده است.

در این راستا، ابتدا با پایش ادبیات علمی و شواهد فناورانه و صنعتی، خانواده‌های اصلی حسگرهای کوانتومی و فناوری‌های نانویی مرتبط، شناسایی و سپس با ترسیم زنجیره فناوری محصولات منتخب، نقاطی که فناوری نانو در ساخت یا عملکرد حسگر نقشی اساسی یا مؤثر دارد، مشخص شد. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه بسیاری از معماری‌های حسگرهای کوانتومی الزاماً برای عملکرد اصلی خود به فناوری نانو وابسته نیستند اما در برخی خانواده‌ها، نانو به بخش جدایی‌ناپذیر عنصر حسگری، ماده فعال یا فرآیند ساخت تبدیل شده است.

بر اساس این مطالعه، سه خانواده اصلی فناوری نانویی با اهمیت در حسگرهای کوانتومی شناسایی شدند که عبارت‌اند از: الماس‌های تک‌بلور مبتنی بر نانوساختارهای نیتروژن-تهی‌جا (NV)، نانوسیم‌های ابررسانا و مواد دوبعدی با اولویت hBN. از منظر بلوغ فناوری و شواهد بازار، فناوری‌های الماس NV و حسگرهای آشکارساز تک‌فوتون مبتنی بر نانوسیم‌های ابررسانا (SNSPD) در مقایسه با حسگرهای مبتنی بر hBN و سایر نقص‌های اسپینی، از شواهد صنعتی و تجاری قوی‌تری برخوردارند.

همچنین، تجهیزات موردنیاز برای توسعه دو حسگر مبتنی بر NV و حسگر SNSPD و وضعیت دسترسی به این تجهیزات در کشور، با هدف امکان‌سنجی توسعه صنعتی این محصولات، بررسی شد. نتایج نشان داد که با اتکا به زیرساخت‌ها و تجهیزات موجود در کشور، توسعه این دو حسگر به شیوه متداول امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، در حوزه نانوالماس، لازم است روش‌ها و مسیرهای جایگزین برای تأمین یا ایجاد قابلیت‌های موردنیاز پیگیری شود. در خصوص SNSPD نیز می‌توان با تمرکز بر طراحی تراشه، به این بخش از زنجیره تولید ورود کرد و ساخت تراشه را در خارج از کشور برون‌سپاری نمود.

۱-پایش مقالات مشترک در حوزه فناوری های کوانتوم و نانو^۱

۱-۱ مقدمه ای بر ارتباط فناوری کوانتوم و نانو

فناوری های کوانتومی یک حوزه در حال تحول در فصل مشترک فیزیک و مهندسی است و بر بهره برداری از ویژگی های منحصر به فرد مکانیک کوانتوم تمرکز دارد. این حوزه شامل طیف گسترده ای از فناوری هایی است که بر پدیده های کوانتومی از جمله درهم تنیدگی کوانتومی، برهم نهی و تونل زنی، تکیه می کنند. محاسبات، حسگرها، رمزنگاری، شبیه سازی، اندازه گیری و تصویربرداری کوانتومی از جمله حوزه های فناوری های نوظهور کوانتومی هستند. با این حال عموماً فناوری های کوانتومی با سه حوزه اصلی محاسبات کوانتومی^۲، ارتباطات کوانتومی^۳ و حسگری کوانتومی^۴ شناخته می شوند (Error! Reference source not found.).

با افزایش توجه و علاقه جامعه علمی جهان به حوزه فناوری کوانتوم، یک سرفصل جدید در منابع علمی دیده می شود که علوم کوانتوم-نانو (Quantum Nanoscience) نام گرفته است. علوم کوانتوم-نانو یک حوزه بین رشته ای است که اصول مکانیک کوانتومی را با علم و فناوری سیستم های نانو ترکیب می کند و بر روی مطالعه و دستکاری مواد و پدیده ها در فصل مشترک فیزیک کوانتوم و نانو تمرکز دارد. هدف علوم کوانتوم-نانو درک رفتار مکانیک کوانتومی منحصر به فرد برزیافته در سیستم های نانو مقیاس و استفاده از این دانش برای توسعه مواد، دستگاه ها و فناوری های جدید با عملکرد بهتر است.

علوم کوانتوم-نانو گستره وسیعی از زمینه های تحقیقاتی را دربرمی گیرد و شامل مطالعه نقاط کوانتومی، نانوسیم ها، نانو لوله ها و دیگر ساختارهای نانومقیاس می شود. این ساختارها همگی به دلیل اندازه کوچک و امکان محصور شدن^۵ الکترون ها خواص کوانتومی از خود نشان می دهند. علوم کوانتوم-نانو همچنین پدیده های انتقال کوانتومی مانند تونل زنی الکترون و انتقال بالستیک را در ابزارهای نانو بررسی می کند. علاوه بر این، برهمکنش بین سیستم های نوری و نانو مقیاس را بررسی می کند که منجر به پیشرفت هایی در زمینه هایی مانند پلاسمونیک، اپتیک کوانتومی و نانوفوتونیک می شود.

^۱ تمامی مطالب این بخش از گزارش به چاپ رسیده در فصلنامه فناوری نانو، شماره ۲۸۵ و به آدرس <https://nano.ir/fa/312/285> مستخرج شده

است. این گزارش به صورت مشترک توسط دو ستاد نانو و کوانتوم تهیه شد.

^۲ Quantum Computing

^۳ Quantum Communication

^۴ Quantum Sensing

^۵ confinement

با ظهور شاخه علوم کوانتوم-نانو و مشخص شدن نقش و اهمیت آن در علوم و فناوری، به تدریج مراکز تخصصی این حوزه در برخی از دانشگاه‌ها و موسسات علمی دایر شده است. برخی مراکز مهم در زمینه علوم کوانتوم-نانو عبارت‌اند از:

- مرکز علوم کوانتوم-نانو IBS کره جنوبی،
- دپارتمان علوم کوانتوم-نانو موسسه نانوفناوری کاولی^۶ دلف هلند،
- گروه علوم کوانتوم-نانو شبکه نانو فناوری شورای تحقیقات استرالیا^۷،
- مرکز علوم کوانتوم-نانو مایک و اوفیلیا لازاردیس^۸ دانشگاه واترلو کانادا،
- بخش علوم کوانتوم-نانو موسسه پیتر گرونبرگ، مرکز پژوهش ژولیش^۹ آلمان.

۱-۲ بررسی وضعیت همگرایی به صورت کمی

جهت ارزیابی کمی میزان همگرایی بین دو فناوری نانو و کوانتوم، از پایش مقالات استفاده شده است. بدین صورت که در ابتدا با استفاده از کلیدواژه‌سازی مناسب و مرتبط با فناوری کوانتوم، کل مقالات مرتبط با این حوزه استخراج شد. سپس با استفاده از کلیدواژه مرتبط با فناوری نانو و ترکیب آن با کلیدواژه مرتبط با فناوری کوانتوم (با استفاده از عملگر منطقی AND)، مقالات همگرایی بین دو فناوری استخراج و میزان همگرایی فناوری نانو با کوانتوم نیز مشخص شده است.

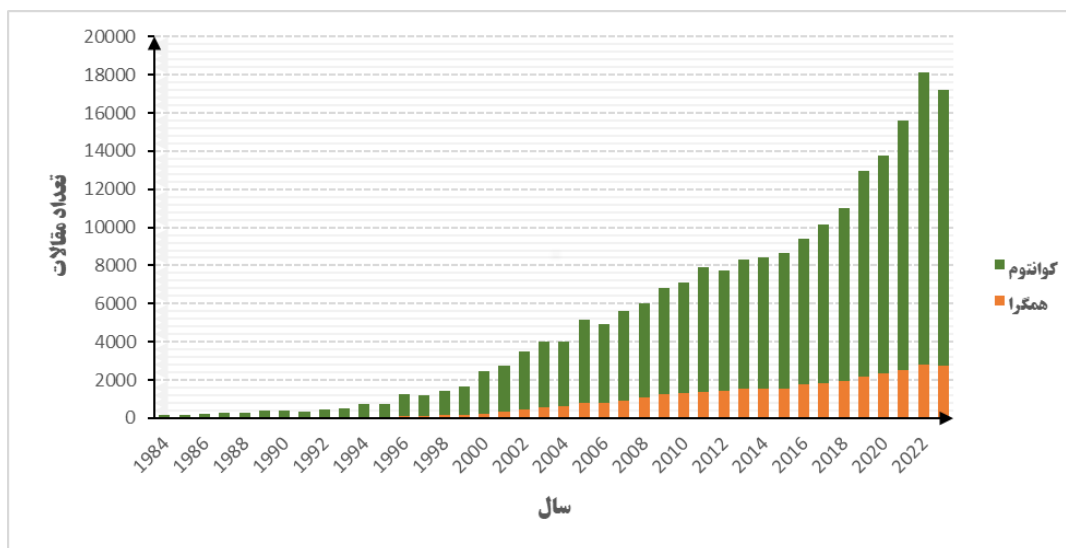
شکل ۲، روند مقالات سالانه از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳ را در حوزه فناوری کوانتوم و همچنین در حوزه مشترک کوانتوم-نانو، نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که تعداد مقالات در حوزه کوانتوم از ۱۶۸ مقاله در سال ۱۹۸۴، به بیش از ۱۷۰۰۰ مقاله در سال ۲۰۲۳ رسیده است. همچنین تعداد مقالات همگرایی بین فناوری کوانتوم و نانو از دو عدد در سال ۱۹۸۴ به بیش از ۲۷۰۰ مورد در سال ۲۰۲۳ رسیده است.

⁶ Department of Quantum Nanoscience - Kavli Institute of Nanoscience

⁷ Quantum Nanoscience Group - The Australian Research Council Nanotechnology Network

⁸ Mike and Ophelia Lazaridis Quantum Nanoscience Center

⁹ Quantum Nanoscience Division - Peter Grünberg Institute, Research Center Jülich

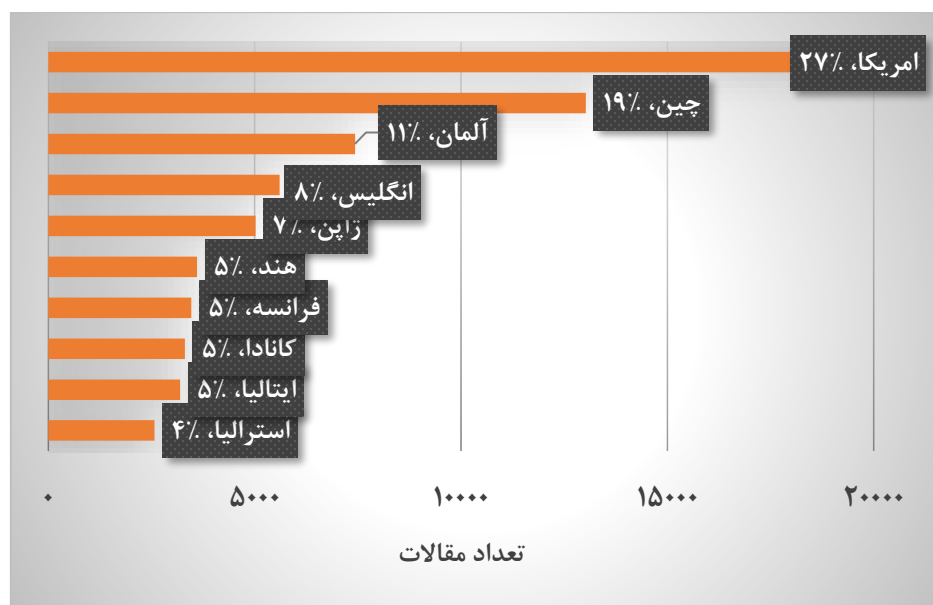


شکل ۱. نمودار روند تعداد مقالات حوزه کوانتوم و نانو-کوانتوم طی سه دهه اخیر

اگرچنانچه تعداد مقالات مشترک به تعداد مقالات فناوری کوانتوم تقسیم شود آنگاه می‌توان گفت میزان همگرایی در اواسط دهه ۱۹۸۰، حدود ۱٪ بوده است در حالی که این مقدار در سال ۲۰۰۴، به میزان ۱۶٪ رسیده و از آن به بعد نیز تقریباً در همین محدوده ثابت مانده است. به صورت تجمیعی نیز کل مقالات پایش‌شده در حوزه فناوری کوانتوم و بخش همگرا، به ترتیب برابر ۲۱۳۰۰۰ و ۳۵۰۰۰ مورد است که نسبت این دو عدد نیز برابر ۱۶,۴٪ است. بنابراین می‌توان گفت که میزان همگرایی بین این دو فناوری، قابل توجه و در محدوده ۱۶٪ است.

۳-۱ مقایسه وضعیت ایران با جهان در نقاط همگرایی

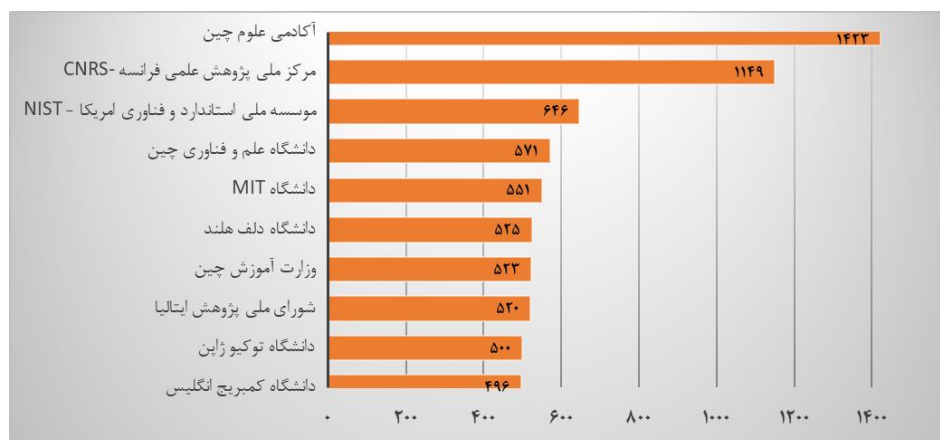
نمودار شکل ۲ کشورهای برتر حوزه کوانتوم-نانو و سهم هریک از مقالات این حوزه را نشان می‌دهد. مطابق شکل در این حوزه، پنج جایگاه برتر مانند حوزه کوانتوم به کشورهای آمریکا، آلمان، انگلیس و ژاپن اختصاص دارد. هند، فرانسه، کانادا، ایتالیا و استرالیا نیز رتبه ششم تا دهم را دارند. اختلاف بیشتر آمریکا با چین و سایر کشورها در این حوزه نسبت به کل حوزه کوانتوم نیز قابل توجه است. ضمن این که در حوزه کوانتوم-نانو نیز با در نظر گرفتن همکاری بین کشورها، حدود ۸۰ درصد کل مقالات با مشارکت حداقل یکی از ۱۰ کشور برتر به چاپ رسیده است.



شکل ۲. سهم ۱۰ کشورهای برتر در انتشار مقالات حوزه کوانتوم-نانو.

در بررسی موسسات علمی با بیشترین سهم در مقالات دو حوزه کوانتوم و کوانتوم-نانو، به طور مشابه موسساتی از چین، فرانسه و آمریکا رتبه‌های برتر را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری این کشورها بر روی تحقیقات در این دو حوزه است. (**Error! Reference source not found.** و شکل ۳). ضمن این که حضور دانشگاه دلف هلند در موسسات برتر کوانتوم-نانو علیرغم حضور نداشتن این دو کشور در بین ۱۰ رتبه برتر، حائز اهمیت است.

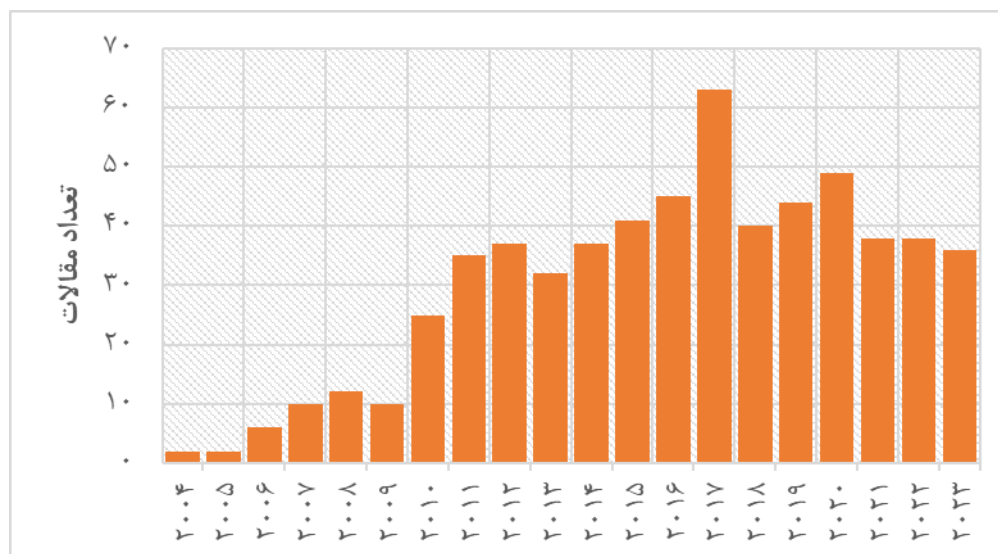
^{۱۰} محور افقی تعداد مقالاتی است که حداقل یک نویسنده از کشور مورد نظر در آن حضور دارند. درصدهای مشخص شده نیز نسبت این مقالات به کل مقالات حوزه را نشان می‌دهند.



شکل ۳. نمودار تعداد مقالات چاپ شده در ده مؤسسه علمی برتر کوانتوم-نانو.

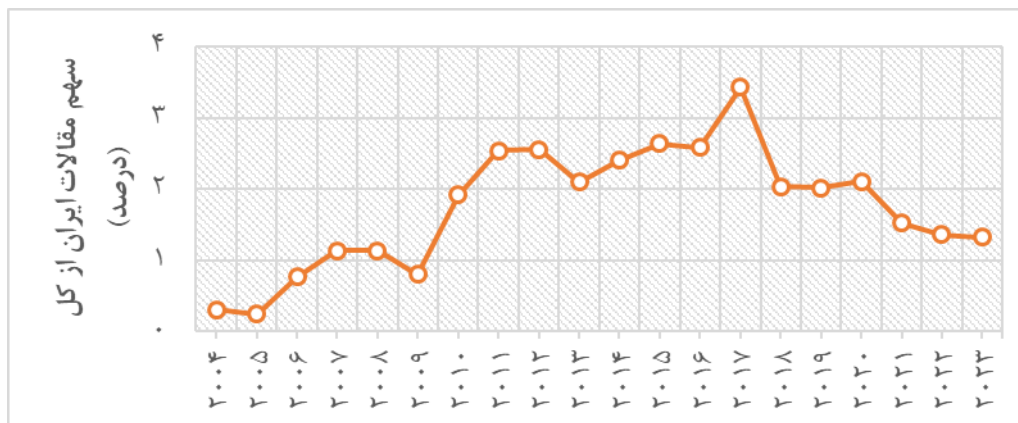
در حوزه کوانتوم-نانو، تعداد کل مقالات ایران حدود ۶۰۰ مورد است که نمایانگر سهم ۱/۷ درصدی ایران از کل مقالات این حوزه است. در حالی که این درصد برای حوزه کوانتوم به تنهایی، ۱/۲ درصد است. بیشتر بودن سهم ایران در این حوزه نسبت به کل فناوری‌های کوانتومی می‌تواند به برنامه‌ریزی‌ها و سرمایه‌گذاری‌های کشور در حوزه نانو مربوط باشد که نوید فراهم بودن نسبی بستر و زیرساخت کار در حوزه کوانتوم-نانو نسبت به حوزه‌های دیگر کوانتوم را می‌دهد.

شکل ۴ روند تعداد مقالات بر حسب سال در حوزه کوانتوم-نانو را برای کشور ایران نشان می‌دهد. همانند شکل ۳، روند کلی در ۲۰ سال اخیر تا سال ۲۰۱۷ افزایشی بوده و پس از یک کاهش نسبی، به مقدار ثابتی و حتی یک شیب ملایم نزولی رسیده است.



شکل ۴. نمودار تعداد مقالات ایران در کوانتوم-نانو بر حسب سال.

شکل ۵ نیز نمودار تغییرات سهم ایران از کل مقالات حوزه کوانتوم-نانو را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، سهم ایران از کل مقالات حوزه کوانتوم-نانو تا سال ۲۰۱۱ یک روند صعودی داشته اما پس از آن به طور مرتب کاهش یافته است.



شکل ۵. نمودار سهم تعداد مقالات ایران از کل جهان در کوانتوم-نانو بر حسب سال.

بررسی رتبه ایران در حوزه کوانتوم-نانو نیز نشان می‌دهد از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷ رتبه ایران از ۴۱ به ۱۴ ارتقا یافته اما بعد از آن به صورت مرتب تا جایگاه ۲۶ افت کرده است و پایین‌تر از کشورهای چین، کره جنوبی، عربستان سعودی، سنگاپور و رژیم صهیونیستی قرار گرفته است. در سال ۲۰۲۳، رتبه ایران در کل مقالات منتشرشده و به صورت تجمیعی در حوزه فناوری‌های کوانتوم-نانو نیز ۲۲ جهان است. تمامی این آمارها حکایت از افت رتبه عملی ایران در این حوزه بعد از سال ۲۰۱۷ دارد.

۲- کاربردهای نانو در حسگرهای کوانتومی

۲-۱ روش و منابع گردآوری اطلاعات

به منظور شناسایی فناوری‌های حسگری کوانتومی و نقاط همگرایی آنها با فناوری نانو، مطالعه‌ای چندمنبعی بر پایه منابع علمی، فناورانه و صنعتی انجام شد. ابتدا گزارش‌های تخصصی، مطالعات مروری و نقشه‌های راه برای ترسیم چشم‌انداز فناوری و شناسایی حوزه‌ها، کمیت‌های قابل اندازه‌گیری و معماری‌های مختلف بررسی شد. سپس مقالات پژوهشی برای بررسی سازوکار عملکرد، مواد و فرآیندهای فنی، اسناد ثبت اختراع برای شناسایی معماری‌ها و فرآیندهای قابل ساخت، و در نهایت منابع صنعتی و وبسایت شرکت‌ها برای بررسی محصولات واقعی، وضعیت تجاری و شواهد تولید یا استقرار مورد استفاده قرار گرفتند. در جدول زیر خلاصه‌ای از مهم‌ترین منابع آورده شده است.

جدول ۱- لیست مهم‌ترین منابع استفاده شده جهت تعیین انواع حسگرهای کوانتومی مرتبط با فناوری نانو

نوع منبع	مهم‌ترین منابع مورد استفاده	نقش در تحلیل
گزارش‌ها، مرورها و نقشه‌های راه	گزارش دفتر حسابرسی دولت آمریکا درباره حسگرهای کوانتومی؛ گزارش و توضیحات NIST درباره حسگری کوانتومی؛ نقشه راه ملی کانادا در حوزه حسگری کوانتومی؛ نقشه راه راهبردی صنعت کوانتوم اروپا	شناسایی حوزه‌های اصلی حسگری کوانتومی، فناوری‌های اصلی، روندهای توسعه و وضعیت کلی بلوغ فناوری
مقالات علمی و منابع دانشگاهی	مقالات مروری درباره حسگرهای کوانتومی زیستی مبتنی بر نانوماس؛ مقالات مروری درباره فوتونیک یکپارچه در حسگری و ارتباطات کوانتومی؛ مقاله مروری درباره حسگری کوانتومی با استفاده از نقص‌های اسپینی در مواد فراتر از الماس؛ مقاله پژوهشی درباره مغناطیس‌سنجی کوانتومی با یک مرکز اسپینی منفرد در hBN	بررسی سازوکارهای کوانتومی، مواد و نانو ساختارهای مورد استفاده، معماری حسگرها و فناوری‌های نوظهور
اسناد ثبت اختراع	پتنت‌های مرتبط با اجزای الماس برای حسگری کوانتومی؛ پتنت‌های مغناطیس‌سنج اتمی و سلول‌های بخار؛ پتنت‌های گرانش‌سنج و گرانش‌سنجی گرادیانی؛ پتنت‌های مرتبط با سلول‌های بخار فلزات قلیایی؛ پتنت‌های مربوط به ساخت آشکارسازهای تک‌فوتونی ابررسانا و یکپارچه‌سازی آنها با موجبرهای نوری	شناسایی معماری‌های قابل ساخت، مواد و فرآیندهای تولید، فناوری‌های ساخت و لایه‌های دارای مالکیت فکری

^{۱۱} اکثر مقالات بررسی شده در این بخش، پیشتر در گزارش رصدی در فصلنامه فناوری نانو، شماره ۲۸۵ به چاپ رسیده و منتشر شده‌اند.

منابع صنعتی، محصولات QZabre و Qnami در زمینه میکروسکوپ‌های راستی‌آزمایی وجود محصولات واقعی، بررسی	محصولات و کوانتومی؛ محصولات QuSpin و Twinleaf در مغناطیس‌سنجی وضعیت تجاری و تولید، شناسایی شرکت‌های
شرکت‌ها	اتمی؛ محصولات Exail و AOSense در گرانش‌سنجی؛ ساعت اتمی تراشه‌مقیاس Microchip؛ سامانه‌های حسگری Rydberg شرکت‌های Inflection, Rydberg Technologies؛ سامانه‌های SNSPD شرکت ID Quantique؛ محصولات نانوالماس شرکت Adamas Nanotechnologies

پس از ترسیم چشم‌انداز، با توجه به بلوغ فناوری، اهمیت کاربردی و وجود شواهد معتبر، ۱۲ خانواده محصول برای تحلیل عمیق‌تر انتخاب شد. برای هر محصول، زنجیره تولید به صورت معکوس از محصول نهایی تا زیرسامانه‌ها، اجزا، مواد، فرآیندها، تجهیزات تولید و آزمون بازسازی و «درخت فناوری» آن تشکیل شد.

سپس هر گره از منظر ارتباط با فناوری نانو ارزیابی شد. در این ارزیابی، کوانتومی بودن و نانویی بودن دو ویژگی مستقل در نظر گرفته شدند و ارتباط نانویی تنها در مواردی لحاظ شد که ساختار، ماده یا فرآیند در مقیاس نانو نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد یا ساخت داشته باشد. بر این اساس، نقش نانو در پنج سطح «کاملاً نانویی»، «وابسته به نانو»، «فعال شده به کمک نانو»، «فرصت نانویی» و «غیرنانویی» طبقه‌بندی شد.

در نهایت، با تمرکز بر گره‌های نانویی، قابلیت‌های قابل توسعه، محصولات میانی، فرآیندهای ساخت، تجهیزات تخصصی و گلوگاه‌های فناورانه شناسایی شدند تا علاوه بر مؤلفه‌های نانویی موجود در محصولات کوانتومی، فرصت‌های توسعه فناوری و ایجاد کسب‌وکار مستقل نیز مشخص شود.

در این مرحله، آمار کمی مربوط به تعداد جست‌وجوها و منابع غربال شده در پایگاه‌های مختلف ثبت نشده است؛ بنابراین گزارش بر تشریح روش مطالعه، سلسله‌مراتب شواهد و منابع نهایی مورد استفاده متمرکز است که فهرست آنها در بخش مراجع ارائه شده است.

۲-۲ مهم‌ترین محصولات همگرای بین دو فناوری

با استفاده از روشی که در بخش قبل اشاره شد، تمامی ۱۲ محصول کوانتومی یافت‌شده که تا حدی نیز با فناوری نانو مرتبط هستند، در جدول زیر آورده شده است. در این جدول علاوه بر معرفی محصول نهایی و نوع و میزان ارتباط با فناوری نانو، سطح بلوغ محصولات و مهم‌ترین شرکت‌ها و مراکز برتر در زمینه حسگرهای کوانتومی، آورده شده‌اند.

جدول ۲-لیست مهم‌ترین حسگرهای شناسایی شده کوانتومی مرتبط با فناوری نانو

ردیف	محصول نهایی	ارتباط با فناوری نانو	سطح بلوغ	میزان ارتباط	مؤسسات برتر
۱	میکروسکوپ کوانتومی روبشی و مغناطیس‌سنج مبتنی بر الماس نیتروژن-تهی‌جا (NV-diamond quantum scanning microscope / magnetometer)	بخش کلیدی، الماس دارای مراکز نیتروژن-تهی‌جا در نزدیکی سطح است. عمق این نقص‌ها و چگالی آنها در مقیاس نانومتری کنترل می‌شود؛ همچنین نوک الماسی و نانو ساختار آن با استفاده از لیتوگرافی و اچ پلاسمایی ساخته می‌شوند. همین ساختار نانومقیاس، فاصله حسگر از نمونه، تفکیک مکانی و حساسیت را تعیین می‌کند.	TRL 8-9	کاملاً کلیدی از طریق نانوماده	شرکت‌ها: Qnami, QZabre, Adamas و QuantumDiamonds Nanotechnologies؛ مؤسسات و دانشگاه‌ها: ETH زوریخ، زیست‌بوم‌های پژوهشی بازل و اشتوتگارت، دانشگاه‌های هاروارد و MIT و مراکز متعدد پژوهشی فعال در حوزه مراکز NV
۲	OPM / SERF magnetometer	عنصر کوانتومی، بخار اتمی روبیدیوم، سزیم یا پتاسیم است و ذاتاً نانویی نیست. ساخت سلول‌های MEMS، پوشش‌ها و اجزای مینیاتوری می‌تواند با استفاده از فناوری‌های میکرو و نانو ساخت بهبود یابد، اما فناوری نانو برای اصل عملکرد حسگر ضروری نیست.	TRL 9	غیرضروری	شرکت‌ها: Cerca, Twinleaf, QuSpin و سایر شرکت‌های تخصصی؛ مؤسسات: NIST؛ دانشگاه‌ها: دانشگاه ناتینگهام و UCL؛ زیست‌بوم پژوهشی: کلرادو
۳	مغناطیس‌سنج SQUID جریان مستقیم / نانو (dc SQUID / nanoSQUID magnetometer)	قلب حسگر شامل اتصال جوزفسون و لایه‌های نازک ابررسانا است. سد تونلی و فصل مشترک‌ها در مقیاس اتمی و نانومتری کنترل می‌شوند؛ در NanoSQUID	TRL 5-9	مهندسی در ابعاد نانو	شرکت‌ها: STAR, Supracon, Magnicon و Cryoelectronics مؤسسات: PTB و NIST؛ دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها: آزمایشگاه‌های دانشگاهی فعال در حوزه تجهیزات ابررسانا

۴	Rydberg RF / E-field sensor	عنصر کوانتومی، اتم‌های Rb/Cs در حالت ریذبرگ هستند و خود ماده کوانتومی نانویی نیست. نانو بیشتر در کوچک‌سازی و به‌ویژه یکپارچه‌سازی فوتونیک‌ی وارد می‌شود؛ مثلاً موجبرهای های با مقطع نانومقیاس و ساختارهای شبکه پراش می‌توانند برای یکپارچه‌سازی استفاده شوند.	TRL 7–9	غیرضروری	شرکت‌ها: Rydberg Technologies و Infleqtion؛ مؤسسات: NIST و ARL؛ دانشگاه‌ها: گروه‌های دانشگاهی فعال در حوزه حسگری اتمی
۵	Cold-atom absolute gravimeter	اتم‌های سرد و تداخل‌سنجی ماده‌موج، هسته اصلی کوانتومی این محصول را تشکیل می‌دهند و فناوری نانو برای اصل اندازه‌گیری ضروری نیست. نقش فناوری نانو بیشتر در لیزرهای نیمه‌رسانا، پوشش‌های نوری و مسیرهای کوچک‌سازی سامانه است.	TRL 9	غیرضروری	شرکت‌ها: Exail و AOSense؛ مؤسسات: LNE-SYRTE و LP2N؛ دانشگاه‌ها و مراکز: دانشگاه استنفورد و زیست‌بوم AOSense و سایر مؤسسات ملی اندازه‌شناسی
۶	Cold-atom quantum gravity gradiometer	دو تداخل‌سنج اتمی عنصر کوانتومی اصلی هستند. نانو عمدتاً برای کوچک‌سازی اپتیک، لیزر، خلأ و در آینده برای فوتونیک اتمی یکپارچه مطرح است و برای اصل کار ضروری نیست.	TRL 7–8	غیرضروری	شرکت‌ها: Delta.g و AOSense؛ دانشگاه‌ها: دانشگاه بیرمنگام؛ AOSense به‌عنوان شرکت دارای نمونه نمایشی فناوری
۷	Hybrid cold-atom quantum inertial sensor / IMU	عنصر کوانتومی، تداخل‌سنجی اتمی برای اندازه‌گیری شتاب/چرخش است؛ فناوری نانو بیشتر در ایجاد سامانه‌های خلأ بسیار بالا و فشرده، فناوری فوتونیک و کوچک‌سازی سامانه مطرح می‌شود.	TRL 5–7	غیرضروری	شرکت‌ها: Infleqtion، Aquark و AOSense و یکپارچه‌سازان سامانه‌ها؛ دانشگاه‌ها و سازمان‌ها: ESA/GMV، Imperial College London؛ آزمایشگاه‌ها: آزمایشگاه‌های دفاعی
۸	ساعت اتمی در مقیاس تراشه (Chip-scale atomic clock (CSAC)	کوچک‌سازی ساعت به یک سلول بخار فلز قلیایی با ساختار میکروالکترومکانیکی(MEMS) ساخت ریزمقیاس محفظه و مجموعه لایه‌های اپتیکی و حرارتی متکی است. خود اتم‌های روبیدیوم/سزیم نانوماده	TRL 9	مهندسی در ابعاد نانو و میکرومتری	شرکت: Microchip؛ مؤسسه: NIST؛ زیست‌بوم صنعتی: مجموعه شرکت‌ها و فعالان صنعتی حوزه سامانه‌های زمان‌سنجی

			نیستند، اما معماری میکرو و نانوساخت برای دستیابی به ابعاد چپ‌مقیاس و تولید صنعتی اهمیت اساسی دارد.
۹	Rack / tactical optical or cold-atom clock	تراز اتمی، عنصر کوانتومی این سامانه است؛ فناوری نانو بیشتر از طریق فوتونیک یکپارچه، پوشش‌های نازک و بسته‌بندی خلأ می‌تواند حجم و مصرف انرژی را کاهش دهد، اما معماری پایه بدون فناوری نانو نیز قابل اجرا است.	شرکت‌ها: Aquark, IonQ, Vector Atomic و Infleqtion و شرکت‌های تخصصی ساعت اتمی؛ مؤسسات: NIST و JILA؛ مراکز: مؤسسات ملی اندازه‌شناسی
۱۰	سامانه آشکارساز تک‌فوتونی ابررسانای نانوسیمی (SNSPD single-photon detector system)	لایه‌های بسیار نازک از جنس WSi, NbTiN, NbN و MoSi و همچنین فرایند الگودهی با استفاده از لیتوگرافی با تفکیک بالا، برای عملکرد تک‌فوتونی ضروری هستند.	شرکت‌ها: Single Quantum, ID Quantique و Photon Spot و دانشگاه‌ها و مؤسسات: MIT, NIST و JPL؛ آزمایشگاه‌ها: آزمایشگاه‌های آشکارسازهای ابررسانای کوانتومی در اروپا و آسیا
۱۱	زیست‌حسگر کوانتومی/دماسنج مبتنی بر نانوالماس نیتروژن-تهی‌جا (Nanodiamond NV quantum biosensor / nanothermometer)	حامل حسگر خود یک نانوالماس است که دارای مراکز قابل خوانش کوانتومی است. اندازه ذرات، ویژگی‌ها و شیمی سطح و ایجاد مراکز نیتروژن-جای‌خالی، مستقیماً بخشی از معماری محصول هستند.	شرکت: Adamas Nanotechnologies و تأمین‌کنندگان تجهیزات پژوهشی؛ مؤسسات: QST ژاپن؛ دانشگاه‌ها: آزمایشگاه‌های دانشگاهی فعال در حوزه علوم زیستی کوانتومی
۱۲	حسگرهای کوانتومی مبتنی بر نقص‌های اسپینی در مواد دوبعدی (hBN / 2D spin-defect quantum sensor)	این محصولات اساساً بر یک ماده دوبعدی با ضخامت اتمی، یعنی نیتريد بور شش‌ضلعی (hBN)، و نقص‌های نقطه‌ای مهندسی‌شده در آن بنا شده است. ضخامت اتمی، مهندسی نقص‌ها، پرتودهی یا کاشت یونی و کنترل سطح، ساختار و عملکرد خود عنصر حسگری را تعیین می‌کنند.	بازیگران نوظهور: شرکت‌های نوپا و زیست‌بوم‌های فعال در حوزه مواد پیشرفته؛ وضعیت بازار: هنوز شرکت غالب یا محصول تجاری تثبیت‌شده‌ای شناسایی نشده است

همانطور که از جدول فوق مشخص است، عملاً می‌توان گفت که شش محصول در حوزه حسگرهای کوانتومی هستند که ارتباط قوی با فناوری نانو داشته و به عبارتی کاملاً نانویی هستند. این محصولات عبارتند از:

- ۱) میکروسکوپ کوانتومی روبشی مبتنی بر نانوالماس نیتروژن-تهی‌جا (ردیف اول جدول)
- ۲) مغناطیس‌سنج مبتنی بر الماس نیتروژن-تهی‌جا (ردیف اول جدول)
- ۳) سامانه آشکارساز تک‌فوتونی ابررسانای نانوسیمی (ردیف دهم جدول)
- ۴) حسگر زیستی کوانتومی مبتنی بر الماس نیتروژن-تهی‌جا (ردیف یازدهم جدول)
- ۵) دماسنج مبتنی بر الماس نیتروژن-تهی‌جا (ردیف یازدهم جدول)
- ۶) انواع حسگرهای کوانتومی (با تمرکز بر مغناطیس‌سنج، دماسنج، الکترومتر) مبتنی بر نقص‌های اسپینی در مواد دوبعدی (ردیف دوازدهم جدول)

همچنین دو مورد دیگر نیز علیرغم اینکه مرتبط با مهندسی سطح در ابعاد نانومتری-میکرومتری هستند که بسته به تعاریف مختلف از فناوری نانو (یعنی الزام به وجود نانوماده یا خیر) می‌توانند ذیل محصولات نانویی لحاظ شوند. این دو مورد نیز به ترتیب عبارتند از:

- مغناطیس‌سنج SQUID جریان مستقیم / نانو (ردیف سوم جدول)
- ساعت اتمی در مقیاس تراشه (ردیف هشتم جدول)
- با توجه به توضیحات فوق و اطلاعات جدول می‌توان گفت که در بین نانوحسگرهای کوانتومی که به صورت مستقیم در آن‌ها از فناوری نانو و به واسطه وجود یک نانوماده استفاده شده است، بیشترین سطح بلوغ مرتبط با تولید نانوماده عبارتند از: الف) الماس نیتروژن-تهی‌جا (NV-diamond) و دو حسگر میکروسکوپ کوانتومی روبشی و مغناطیس‌سنج مبتنی بر این نانوماده و همچنین ب) سامانه آشکارساز تک‌فوتونی ابررسانای نانوسیمی که در سطح بلوغ بالایی قرار گرفته و تجاری هم شده است.

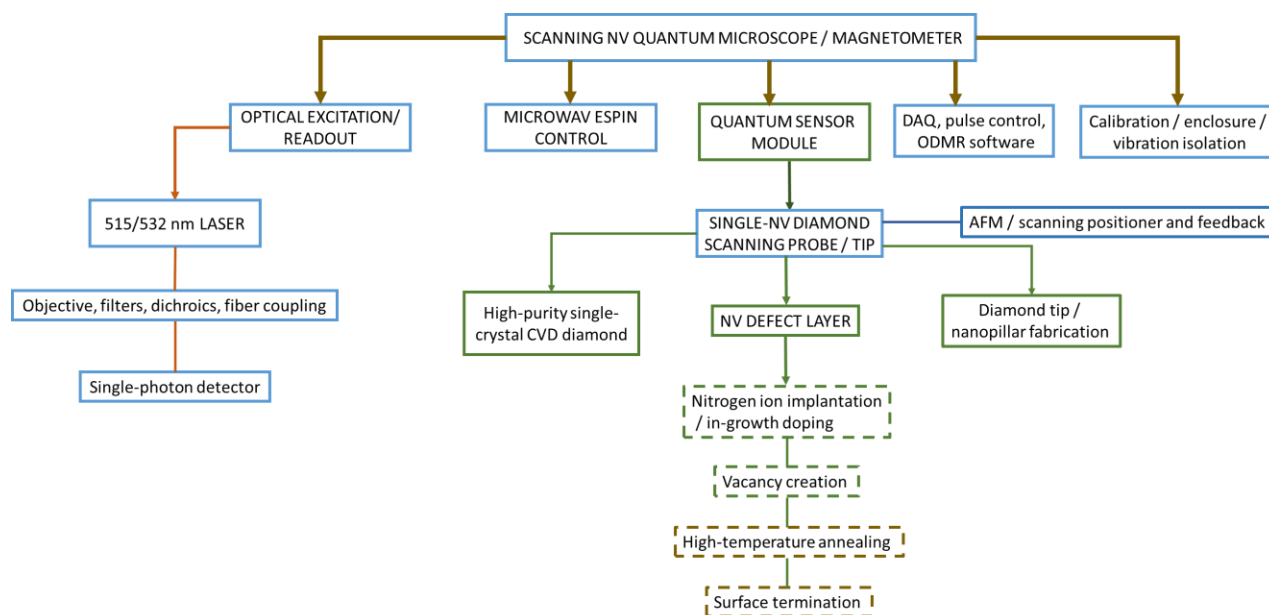
در مرتبه بعدی نیز حسگرهای زیستی کوانتومی بر نانوالماس نیتروژن-تهی‌جا، دماسنج مبتنی بر این نانوماده و همچنین انواع حسگرهای مبتنی بر مواد دوبعدی و به خصوص نیتريد بور شش‌ضلعی (hBN) قرار دارند که در سطوح بلوغ پایینی قرار داشته و صرفاً نمونه‌های آزمایشگاهی از آن‌ها ساخته شده است.

با توجه به سطح بلوغ این سه نوع از حسگرها، درخت فناوری برای صرفاً دو حسگر مبتنی بر الماس و نانوسیم ترسیم شده و توضیحات تکمیلی آورده شده است.

۲-۳ درخت فناوری محصولات کاملاً نانویی با بلوغ بالا

۲-۳-۱ حسگرهای مبتنی بر الماس نیتروژن-تهی‌جا

در شکل زیر، درخت فناوری مرتبط با میکروسکوپ کوانتومی و مغناطیس‌سنج کوانتومی مبتنی بر نانوالماس نیتروژن-تهی‌جا، آورده شده است. لازم به ذکر است که درخت فناوری مربوط به دماسنج و حسگرهای زیستی مبتنی بر نانوالماس نیز مشابهت زیادی با درخت شکل ۶ دارد و به همین دلیل از بیان آن خودداری شده است.



شکل ۶. درخت فناوری میکروسکوپ اتمی/مغناطیس‌سنج کوانتومی

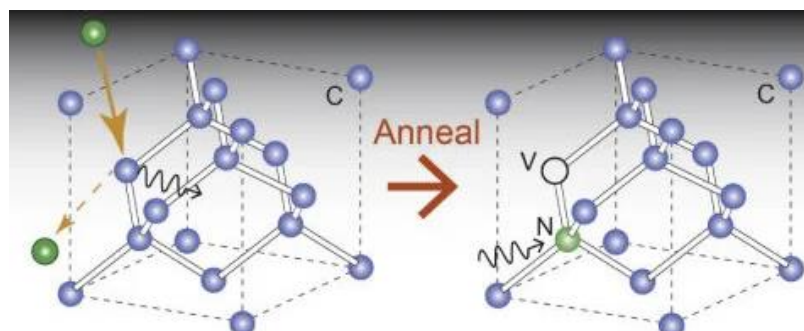
با توجه به این شکل مشخص است که در وهله اول، یک محصول نهایی به پنج بخش اصلی تقسیم می‌شود که عبارتند از: ماژول حسگر کوانتومی، تحریک و خوانش نوری، ماژول کنترل اسپینی با مایکروویو، سیستم اخذ داده و کنترل پالس به همراه نرم‌افزار و نهایتاً پایداری مکانیکی شامل محفظه و ایزولاسیون ارتعاشی.

با توجه به بررسی ارتباط با فناوری نانو، لازم به ذکر است که بخش خوانشگر اپتیکی علیرغم وجود کلمه ۵۱۵ نانومتر، ارتباطی با فناوری نانو نداشته و بیانگر صرفاً طول موج است. تنها بخش اصلی مرتبط با نانو همان ماژول حسگر کوانتومی است که با کادر سبز در شکل فوق، نمایش داده شده است. این بخش خود به دو زیربخش تقسیم می‌شود که عبارتند از: پروب یا تیپ روبشی مبتنی بر الماس تک کریستال نیتروژن-تهی‌جا و سامانه موقعیت‌دهی روبشی و بازخورد که از این دو مورد نیز تنها مورد اول مجدداً با فناوری نانو مرتبط است.

همچنین در مرحله بعدی، پروب یا تیپ روبشی مبتنی بر الماس تک کریستال نیتروژن-تهی جا به سه زیربخش اصلی تقسیم می‌شود که عبارتند از: رشد الماس تک لایه، ایجاد نقص ساختاری همراه با اضافه کردن نیتروژن و ساخت نوک الماسی (نانوستون الماسی). البته در برخی روش‌های تولید ممکن است رشد الماس تک‌لایه همزمان با همان مراحل اضافه کردن نیتروژن و ایجاد نقص ساختاری (تهی جا) باشد. نوک الماسی نیز صرفاً ایجاد یک شکل مناسب از الماس تهیه شده جهت کاربرد در میکروسکوپ یا حسگر کوانتومی است.

در نهایت نیز، ایجاد نقص ساختاری (تهی جا) با دوپ کردن نیتروژن، خود شامل ۴ مرحله اصلی می‌شود که عبارتند از: کاشت یونی نیتروژن یا دوپینگ در حین رشد، ایجاد تهی جا (با کاشت یونی / پرتودهی الکترونی)، بازپخت در دمای بالا و پاکسازی و غیرفعالسازی سطح الماس.

به منظور درک بیشتر مفهوم الماس تک کریستال نیتروژن-تهی جا، نحوه قرارگیری اتم‌ها در شکل زیر آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با استفاده از ابزارهایی مانند کاشت یون، نیتروژن به داخل ساختار الماس نفوذ کرده و علاوه بر ایجاد نقص ساختاری، با همان مکانیزیم یا پرتودهی یونی، در ساختار نیز وارد می‌شود.

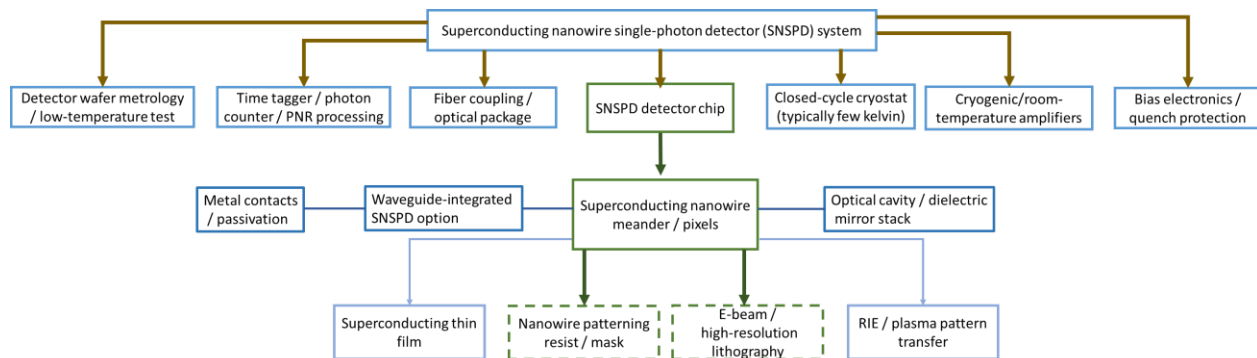


شکل ۷. تصویری از ایجاد نقص ساختاری و همچنین اضافه کردن نیتروژن به ساختار الماس

با توجه به مطالب این قسمت می‌توان در یک کلمه گفت که با هدف تعیین نقطه همگرایی فناوری با فناوری کوانتومی، بایستی ساخت «پروب حاوی الماس تک‌بلور با مراکز نیتروژن-تهی جا (NV) در نزدیکی سطح» هدف‌گذاری شود. در رابطه با این پروب ذکر این نکته فنی اهمیت دارد که لازم نیست تمامی ساختار الماس مذکور دارای ساختار نیتروژن-تهی جا باشد بلکه این ساختار در نزدیکی سطح پروب کفایت می‌کند.

۲-۳-۲ آشکارساز تک‌فوتونی مبتنی بر نانوسیم

در شکل ۷، درخت فناوری مرتبط با آشکارساز تک‌فوتونی مبتنی بر نانوسیم ابررسانا، آورده شده است.

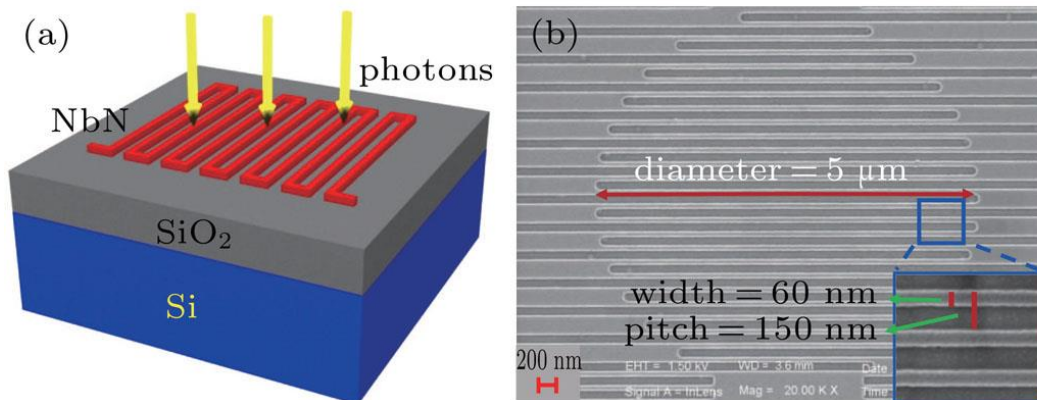


شکل ۸. آشکارساز تک فوتونی مبتنی بر نانوسیم ابررسانا

با توجه به شکل، می توان نتیجه گرفت که آشکارساز تک فوتون در وهله اول، به شش زیربخش تقسیم می شود که عبارتند از:

- ۱) چیپ تشخیصی آشکارساز که بخش اصلی و کاملاً نانویی محصول نهایی است.
- ۲) کوپلینگ فیبری/ بسته بندی نوری که ارتباطی با فناوری نانو ندارد.
- ۳) کرایواستات در سیکل بسته و دماهای کلوین پایین (سامانه سرمایشی) که ارتباطی با فناوری نانو ندارد.
- ۴) مدار تأمین و تنظیم جریان بایاس/ حفاظت در برابر کوئینچ که ارتباطی با فناوری نانو ندارد.
- ۵) ثبت کننده زمانی/ شمارنده فوتون/ پردازش تفکیک تعداد فوتون ها که ارتباطی با فناوری نانو ندارد.
- ۶) مشخصه یابی تراشه/ویفر آشکارساز و آزمون در دمای پایین که ارتباطی با فناوری نانو ندارد.

به منظور درک مفهومی از آشکارساز تک فوتونی مبتنی بر نانوسیم، تصویری از تراشه در شکل ۹ نمایش داده شده است. همانطور که از این تصویر مشاهده می شود، در این تراشه از یک الگوی رفت و برگشتی (Meander) نانوسیم (معمولاً در ابعاد ۲۰ الی ۱۰۰ نانومتر) بهره برده می شود. این الگو با استفاده از لیتوگرافی (ترجیحاً روش پرتودهی) و در یک فیبر متشکل از موادی با خاصیت ابررسانایی مانند NbN ساخته می شود که معمولاً ارتفاع الگو در محدوده ۱۵ نانومتر است. لیتوگرافی باید به گونه ای باشد تا بتواند نهایتاً یک نانوسیم با قطر ۵۰-۱۰۰ نانومتر تهیه کند در حالی که فواصل بین این نانوسیم ها نیز حدود سه برابر قطر است. لازم به ذکر است که الگوی شکل ۹، ساده ترین و متداول ترین الگوی رائج است و کاملاً قابلیت تغییر به اشکال مختلف دیگری نیز دارد.



شکل ۹. آشکارساز تک فوتونی مبتنی بر نانوسیم ابررسانا

بنابراین با توجه به این توضیحات شکل ۹ و درخت فناوری در شکل ۸، بخش اصلی مرتبط با فناوری نانو در چیپ تشخیصی نهفته است. این بخش نیز خود به چهار زیربخش تقسیم می شود که عبارتند از:

- نانوسیم ابررسانا با الگوی رفت و برگشتی (Meander)/پیکسل های نانوسیمی که کاملاً مرتبط با فناوری نانو است.
- حفره نوری/ساختار چندلایه آینه دی الکتریک که ارتباط مستقیم با فناوری نانو ندارد.
- موجبر نوری یکپارچه شده با چیپ اصلی که این موضوع ارتباط مستقیم با فناوری نانو نداشته و برای افزایش کارایی نیز بسته به طراحی ممکن است استفاده شود.
- اتصالات فلزی / لایه غیرفعال ساز سطح که ارتباط مستقیم با فناوری نانو ندارد.

در نهایت با توجه به این چهار زیربخش، تنها موضوع مرتبط با فناوری نانو، نانوسیم ابررسانا با الگوی رفت و برگشتی (یا پیکسل های نانوسیمی) است که خود به چهار زیربخش تقسیم می شود. این زیربخش نهایی عبارتست از:

- ساخت لایه نازک ابررسانا از موادی همچون NbN، NbTiN، WSi، MoSi که به صورت مستقیم در حوزه فناوری نانو قرار نمی گیرد.
- تشکیل لایه مقاوم نانولیتوگرافی/ ماسک الگودهی نانوسیم که مرتبط با فناوری نانو است.
- لیتوگرافی با پرتو الکترونی و تفکیک پذیری بالا که در ادامه مرحله قبلی، به منظور تشکیل دقیق نانوسیم که کاملاً مرتبط با فناوری نانو است.
- انتقال الگوی لیتوگرافی شده با اچ یونی و پلاسمایی که مستقیماً در زمره فناوری نانو قرار نمی گیرد.

با توجه به توضیحات این بخش می‌توان نتیجه گرفت که بخش مرتبط با فناوری نانو از آشکارساز، چیپ تشخیصی است و در مراحل ساخت یک چیپ تشخیصی، نانوسیم‌های رفت و برگشتی بایستی ساخته شوند که این بخش کاملاً به صورت مستقیم با فناوری نانو مرتبط است.

۳- بررسی امکانات و توانمندی کشور در حوزه‌های منتخب

در این قسمت با توجه مطالب قسمت قبل، تجهیزات و دستگاه‌های لازم برای تولید هریک از محصولات به ترتیب آورده شده است. سپس وجود این تجهیزات در کشور نیز گزارش شده و در نهایت راهکارهایی جهت ساخت دو حسگر قسمت قبل نیز ذکر شده است.

۱) الماس نیتروژن-تهی‌جا (نانوالماس)

اگرچنانچه یکبار دیگر، فرآیند متداول ساخت پروب مبتنی بر الماس نیتروژن-تهی‌جا را مرور کنیم، تمامی مراحل لازم از منظر تجهیزات در جدول ۳ به ترتیب آورده شده است. با توجه به این جدول، مراحل و تجهیزات مرتبط با ردیف اول تا سوم جهت تشکیل الماس نیتروژن-تهی‌جا، مراحل چهارم تا ششم به جهت تبدیل نانوالماس به پروب (جهت استفاده در حسگر یا میکروسکوپ نهایی) و همچنین تجهیزات مراحل هفتم تا نهم صرفاً به جهت آنالیز کیفیت محصول نهایی است.

جدول ۳- مراحل و تجهیزات اصلی مرتبط با ساخت نانوالماس

ردیف	مرحله تولید و تجهیز اساسی	توضیحات تکمیلی	وضعیت کشور
۱	CVD Diamond	ساخت الماس با کیفیت با فناوری CVD	دستگاه‌های معمولی در کشور وجود دارد که پاسخگوی این نیاز نیست
۲	Ion Implantation	دستگاه کاشت یون با ولتاژ بالای ۲,۵ کیلوولت که جهت ایجاد نقص ساختاری و اضافه کردن نیتروژن به الماس ضرورت دارد.	دستگاه‌های بسیار معمولی در کشور وجود دارد که پاسخگوی این نیاز نیست
۳	High-temperature vacuum/inert annealing furnace	کوره پخت در محدوده دمایی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس	
۴	Surface Cleaning/Termination (Plasma)	تمیزکاری سطوح با تجهیزاتی نظیر پلاسما	
۵	EBL	لیتوگرافی با روش پرتودهی الکترونی جهت ساخت پروب در ابعاد ۲۰۰ نانومتر از مجموعه الماس	دستگاه‌های بسیار معمولی در کشور وجود دارد که پاسخگوی این نیاز نیست

۶	ICP-RIE	برش قسمت‌های اضافه الماس با تجهیزات پلاسمایی جهت رسیدن به پروب مد نظر نهایی	دستگاه‌های بسیار معمولی در کشور وجود دارد که پاسخگوی این نیاز نیست
۷	Confocal + PL	جهت شناسایی و مکان‌یابی NV	دستگاه با کیفیت قابل قبول در کشور وجود دارد
۸	ODMR + Single-Photon Characterization	جهت بررسی خواص اسپینی و کوانتومی	دستگاه مد نظر در کشور وجود ندارد
۹	SEM/AFM QC	جهت بررسی ابعاد سطح	دستگاه با کیفیت قابل قبول در کشور وجود دارد

همانطور که از جدول فوق مشخص است، اصلی‌ترین تجهیزات مد نظر جهت ساخت یک نانوالماس مطلوب که دستگاه کاشت یون است در کشور وجود ندارد و به همین دلیل فعالیت‌ها در سطح اثبات فناوری و یا نمونه‌های آزمایشگاهی خواهد ماند. بنابراین گزینه اول جهت ساخت الماس مد نظر، برون سپاری است که در این حالت صرفاً دانش طراحی (که بعید است اهمیت چندانی در این حوزه داشته باشد) به درون کشور رسوب خواهد کرد و وابستگی ساخت، باقی خواهد ماند.

اگر چنانچه روش غیرمتداول ساخت الماس یعنی رشد همزمان بلور به همراه نقص ساختاری و اضافه کردن نیتروژن به صورت همزمان نیز پیگیری شود، آنگاه در صورت موفقیت‌آمیز بودن طرح، بخش کلیدی حسگر کوانتومی ساخته شده و تنها تبدیل کردن آن به یک پروب، در خارج از کشور انجام خواهد شد. در نتیجه پیگیری این مسیر تا حد زیادی وابستگی به خارج از کشور خصوصاً در بخش کلیدی را کاهش خواهد داد.

۲) نانوسیم

با توجه به اطلاعات بخش دوم گزارش، چنانچه فرآیند ساخت نانوسیم از منظر تجهیزات و فرآیندها مرور شود، مهم‌ترین تجهیزات مرتبط با این حوزه در جدول زیر آورده شده است. با توجه به جدول فوق می‌توان گفت که سه مرحله اول صرفاً جهت ساخت و آنالیز فیلم ابررسانا، مراحل چهارم تا هفتم جهت ساخت Meander، مرحله هشتم جهت آنالیز Meander، مرحله نهم به جهت ایجاد اتصالات فلزی برای متصل به مدار نهایی و بقیه مراحل از دهم تا دوازدهم نیز به جهت آنالیز محصول است.

جدول ۴ - مراحل و تجهیزات اصلی مرتبط با ساخت آشکارساز تک‌فوتون

ردیف	مرحله تولید	تجهیز اساسی	توضیحات تکمیلی	وضعیت آمادگی کشور
۱	Wafer Cleaning	Wet Bench / Wafer Cleaning System	تهیه زیرلایه کاملاً تمیز و آماده لایه‌نشانی	اسپاترینگ با این کیفیت در کشور وجود نداشته و در نتیجه انجام این مراحل امکان‌پذیر نیست
۲	Superconducting Thin-Film Deposition	UHV Magnetron Sputtering System	ساخت فیلم ابررسانای بسیار نازک با ضخامت حدود ۵-۱۵ نانومتر	
۳	Thin-Film Characterization	Ellipsometer / Profilometer + 4-Point Probe	آنالیز تأیید ضخامت، یکنواختی و مقاومت ورقه‌ای فیلم	
۴	Resist Coating	Spin Coater + Hot Plate	ایجاد لایه resist یکنواخت برای لیتوگرافی	تجهیزات در حد قابل قبول وجود دارد
۵	Meander Patterning	Electron-Beam Lithography (EBL)	تعریف الگوی نانوسیم meander با عرض معمولاً حدود ۲۰-۱۰۰ نانومتر با لیتوگرافی پرتوالکترونی	EBL با این کیفیت در کشور وجود ندارد و انجام این مرحله میسر نیست
۶	Resist Development	Resist Developer / Wet Development Station	تبدیل الگوی EBL به ماسک موردنیاز برای اچ	دستگاه با کیفیت قابل قبول در کشور وجود دارد.
۷	Pattern Transfer / Etching	ICP-RIE / RIE Plasma Etcher	حذف قسمت‌های بدون ماسک و تبدیل فیلم ابررسانا به نانوسیم meander	دستگاه پلاسمایی برش با این کیفیت وجود ندارد
۸	Nanowire Dimensional QC	SEM + AFM	اندازه‌گیری عرض نانوسیم، فاصله خطوط، یکنواختی و عیوب ساختاری	دستگاه با کیفیت قابل قبول در کشور وجود دارد.
۹	Metal Contact Fabrication	Photolithography/EBL + Metal Evaporator Sputter	ایجاد پدها و اتصالات فلزی برای اتصال نانوسیم به مدار	دستگاه مطلوب با کیفیت وجود ندارد
۱۰	Electrical Characterization	Probe Station + Electrical Measurement System	بررسی پیوستگی نانوسیم، مقاومت و مشخصات الکتریکی اولیه	دستگاه با کیفیت قابل قبول در کشور وجود دارد
۱۱	Cryogenic Test	Closed-Cycle Cryostat + Cryogenic Measurement System	اندازه‌گیری رفتار ابررسانایی	دستگاه آنالیز Cryogenic و Cryostat در کشور وجود ندارد
۱۲	Electro-Optical Characterization	Cryogenic Optical Test Setup + Photon Source/Detector + Time-Tagger	اندازه‌گیری بازده آشکارسازی تک‌فوتونی	

با توجه به جدول فوق مشخص است که اکثر تجهیزات اصلی مورد نیاز برای ساخت و حتی تست آشکارساز تکفوتون در کشور وجود نداشته و لذا انجام این فعالیت در کشور امکان‌پذیر نیست. اما از آنجایی که این تجهیزات ساخت در فب‌های میکروالکترونیک دنیا وجود دارد، می‌توان صرفاً در داخل کشور به طراحی تراشه در ابعاد، جنس و حتی الگوی مختلف پرداخت و ساخت تراشه را به یکی از فب‌های میکروالکترونیک در جهان سپرد. این حالت نیز برای کشور مطلوب است زیرا ساخت این آشکارساز با عملکرد مناسب نه تنها در حسگرهای کوانتومی بلکه در ارتباطات نیز اهمیت داشته و رسوب این بخش از دانش به داخل کشور نیز حائز اهمیت است.

۳) جمع‌بندی

با توجه به مطالب این بخش، ساخت پروب مبتنی بر نانوالماس با روش متداول در کشور امکان‌پذیر نبوده و لذا گزینه مطلوب، ساخت نانوالماس با روش غیرکلاسیک یعنی رشد همزمان بلور الماس با نیتروژن و ایجاد نقص در کشور می‌باشد. پس از این مرحله می‌توان با همکاری یکی از فب‌های تحقیق و توسعه در جهان، نسبت به ساخت پروب اقدام کرد. در این راستا، یک پروژه با معرفی ستاد کوانتوم به ستاد نانو از دو سال گذشته شروع شده و توسط ستادنانو حمایت شده است. تزریق نقدینگی به این پروژه و همچنین انجام حداقل دو پروژه موازی دیگر با هدف ساخت نانوالماس ضرورت دارد.

همچنین مشخص شد که ساخت آشکارساز تکفوتون نیز به دلیل عدم وجود امکانات ساخت در کشور میسر نبوده و تنها راه حل، طراحی انواع تراشه‌ها در کشور و برون‌سپاری ساخت به خارج از کشور است. با توجه به انواع نوآوری ممکن در شکل تراشه (و در واقع meander)، حتی این رویکرد نیز فرصتی برای کشور در زمینه ورود به زنجیره جهانی توسعه این نوع از تراشه‌ها فراهم خواهد کرد.

- 1) GAO — <https://www.gao.gov/products/gao-25-107876>
- 2) NIST — <https://www.nist.gov/quantum-information-science/quantum-sensing-explained>
- 3) Quantum Consortium — <https://quantumconsortium.org/publication/2026-market-forecast-quantum-sensing/>
- 4) National Quantum Strategy Canada — <https://ised-isde.canada.ca/site/national-quantum-strategy/en/overview-canadas-national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-roadmap-quantum-sensing>
- 5) EuroQuIC — <https://www.euroquic.org/strategic-industry-roadmap-2025/>
- 6) QZabre — QSM — <https://www.qzabre.com/QSM>
- 7) QZabre — QST — <https://www.qzabre.com/QST>
- 8) Qnami — ProteusQ — <https://qnami.ch/portfolio/proteusq/>
- 9) Element Six — DNV B1 — <https://www.e6.com/about/news/dnv-b1-launch>
- 10) Adamas Nanotechnologies — Quantum Diamond Products — <https://www.adamasnano.com/quantum-diamond-products>
- 11) Adamas Nanotechnologies — Diamond Plates — <https://www.adamasnano.com/diamond-plates>
- 12) Google Patents — WO2015071487A1 — <https://patents.google.com/patent/WO2015071487A1/en>
- 13) Google Patents — WO2026078134A1 — <https://patents.google.com/patent/WO2026078134A1/en>
- 14) Quspin — QZFM — <https://quspin.com/products-qzfm/>
- 15) Quspin — Products — <https://quspin.com/products/>
- 16) Twinleaf — microSERF — <https://twinleaf.com/magnetometers/microSERF/>
- 17) Google Patents — US8334690B2 — <https://patents.google.com/patent/US8334690B2/en>
- 18) Magnicon — Magnetometers — <https://www.magnicon.com/squid-sensors/magnetometers>
- 19) Magnicon — SQUID Sensors — <https://www.magnicon.com/squid-sensors/>
- 20) Exail — Quantum and Metrology Instruments — <https://www.exail.com/product-family/quantum-and-metrology-instruments-photonics>
- 21) Exail — Quantum Gravimeters — <https://www.exail.com/fr/product/quantum-gravimeters>
- 22) AOSense — Gravimeter — <https://aosense.com/products/atom-optic-sensors/gravimeter/>
- 23) Delta-G — <https://www.delta-g.co.uk/>
- 24) Google Patents — US11269111B2 — <https://patents.google.com/patent/US11269111B2/en>
- 25) Royal Navy — Quantum Technology Trial, Dec. 2025 — <https://www.royalnavy.mod.uk/news/2025/december/19/20251219-royal-navy-trials-quantum-tech-with-imperial-college-london>
- 26) ESA NAVISP — <https://navisp.esa.int/project/details/437/show>
- 27) Royal Navy — Quantum Navigation Trials, Jun. 2025 — <https://www.royalnavy.mod.uk/news/2025/june/17/20250617-quantum-navigation-p2000-trials>
- 28) Royal Navy — Quantum Clock Trials, Aug. 2026 — <https://www.royalnavy.mod.uk/news/2026/august/14/20260814-dcto-quantum-clock-trials>
- 29) Microchip — CSAC SA65 — <https://www.microchip.com/en-us/product/CSAC-SA65>

- 30) Google Patents — US20110187464A1 — <https://patents.google.com/patent/US20110187464A1/en>
- 31) DARPA — It's About Time — <https://www.darpa.mil/news/2026/its-about-time>
- 32) Rydberg Technologies — Products — <https://www.rydbergtechnologies.com/products>
- 33) Infleqtion — Quantum Spectrum — <https://infleqtion.com/infleqtion-introduces-quantum-spectrum-the-first-fundamental-shift-in-rf-sensing-architecture-in-decades/>
- 34) Google Patents — WO2023014740A1 — <https://patents.google.com/patent/WO2023014740A1>
- 35) ID Quantique — ID281 SNSPD System — <https://www.idquantique.com/quantum-detection-systems/products/id281-snsdpd-system/>
- 36) ID Quantique — ID281 Pro SNSPD System — <https://www.idquantique.com/quantum-detection-systems/products/id281-pro-snsdpd-system/>
- 37) Google Patents — US20230031577A1 — <https://patents.google.com/patent/US20230031577A1/en>
- 38) Google Patents — WO2021011041A2 — <https://patents.google.com/patent/WO2021011041A2/en>
- 39) RSC — Chemical Society Reviews, 2025 — <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/cs/d4cs00650j>
- 40) Adamas Nanotechnologies — Nanoscale Sensors — <https://www.adamasnano.com/nanoscale-sensors>
- 41) RSC — Transactions, 2025 — <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/tc/d4tc05290k>
- 42) ACS Nano — <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.5c00802>
- 43) Nature Communications — <https://www.nature.com/articles/s41467-025-59642-0>
- 44) NIST — Giant Atoms: Measuring Radiation — <https://www.nist.gov/quantum-information-science/quantum-sensing-explained/giant-atoms-measuring-radiation>
- 45) Google Patents — CN114221629A — <https://patents.google.com/patent/CN114221629A/en>
- 46) Google Patents — US20250258210A1 — <https://patents.google.com/patent/US20250258210A1>