

سفر به ریزها

آشنایی سیستمی با علم نانو و فن‌آوری نانو¹

فصل چهارده و فایل صوتی چهاردهم

فن‌آوری نانو - ابزارهای جراحی مقیاس نانو²

با سلام، من ریموند رخشانی هستم. در این سلسله از مقالات³ و فایل‌های صوتی⁴، کوشش می‌کنم که علم نانو⁵ و فن‌آوری نانو⁶ را (به زبان فارسی) از پایه، بنحوی سیستماتیک⁷ به دوستانی که علاقمند هستند، در حد توان، ارائه کنم.⁸

در واقع این مقالات، فصل‌های کتاب جدیدی با همین نام (سفر به ریزها⁹) هستند که سال‌هاست بر روی آن پژوهش کرده و کار می‌کنم و در دست تهیه است، و تصمیم گرفته‌ام که پیشاپیش آن را، فصل به فصل، بطوری مجازی منتشر کنم.

از پژوهشگران و اندیشمندان عزیز خواشمنم که لینک‌ها را به دوستان و بویژه به جوانان دانش پژوه ما (که اغلب دسترسی نظاممند برای آشنایی با علم و فن‌آوری نانو - به زبان فارسی - ندارند) ارسال فرمایند. با احترام، ر. رخشانی

1

Rakhshani, Raymond. Systemic Introduction into Nanoscience and Nanotechnology. To Be Published in 2022, Createspace, Columbia, South Carolina.

2

Nanoscale Surgical Tools

3

برای دسترسی به مقاله بشکل پی دی اف و همچنین به فایل صوتی، از "کیو آر کد" زیر با موبایل عکس گرفته و مستقیم به کانال تلگرام بروید



<https://t.me/natureofscience>

همچنین می‌توانید به کانال لینکدین زیر مراجعه فرمائید

<https://www.linkedin.com/in/raymond-rakhshani-16628a5/detail/recent-activity/shares/>

4

با سپاس از دوست گرامی، جناب اسفندیار منفردزاده، که با مهر و دوستی آهنگ آغازین و پایانی "سفر به ریزها" را برای فایل‌های صوتی من ساختند.

5

"The Handbook of Nano Technology, Policy and Intellectual Property Law", John C. Miller, et al, Hoboken New Jersey: John Wiley and Sons, 2005.

6

چاپ و انتشار این مقالات و فایل‌های صوتی بدون ذکر نام نویسنده (ر. رخشانی) و مرجع، و هرگونه استفاده برای مقاصد خصوصی و اهداف انتفاعی بدون گرفتن مجوز از نویسنده اکیدا غیر قانونی است.

7

Sanders, Wesley, C. Basic Principles of Nanotechnology. CRC Press, 2018.

8

Sattler, Klaus, D. 21st Century Nanoscience – A Handbook: Industrial Applications. CRC Press, 2020.

9

Frankel, Felice, C. and Whitesides, George, M. No Small Matter: Science on the Nanoscale. Belknap Press of Harvard University, 2009.

فن آوری نانو - ابزارهای جراحی مقیاس نانو

جراحی¹⁰، در حال حاضر، موثرترین و پر استفاده‌ترین روش برای درمان سرطان، و همچنین درمان بسیاری بیماری‌های دیگر از قبیل مشکلات کلیوی و یا قلبی می‌باشد¹¹.



در مطالعه اخیری که انستیتوی ملی بهداشت آمریکا انجام داده است، نشان داده شد که برای برخی سرطان‌ها، جراحی توانسته است که ۴۵٪ بیماران را شفا بخشد¹²، در صورتی که آهنگ موفقیت داروها و شیمی درمانی از حدود ۵٪ بیشتر نبوده است. اما برای موفقیت، جراحی می‌بایست بسیار دقیق انجام شود. از بین نبردن کامل غده سرطانی می‌تواند آهنگ بقا را بی‌اندازه کاهش دهد.



برای اینکه غده‌ای سرطانی را بنحوی کامل از بین برد، جراح نیازمند آن است که بافت غده را بشناسد و قادر باشد از بافت‌های سالم متمایز کند¹³. آن ناحیه‌ای که این دو نوع متفاوت سلول بهم نزدیک هستند "حاشیه غده" خوانده می‌شود¹⁴. بسیار مهم است که کمترین

¹⁰

Jain, Kewal, K. The Handbook of Nanomedicine. Humana Press, 2017.

¹¹

Latifi, Rifat, and Rhee, Peter, and Gruessner, Rainer, W. G. Technological Advances in Surgery, Trauma and Critical Care. Springer, 2015.

¹²

Asiyanbola, B., and Soboyejo, W. For the Surgeon: An Introduction to Nanotechnology. Journal of Surgical Education 65, 2008.

¹³

Tibbals, Harry, F. Medical Nanotechnology and Nanomedicine. CRC Press, 2010.

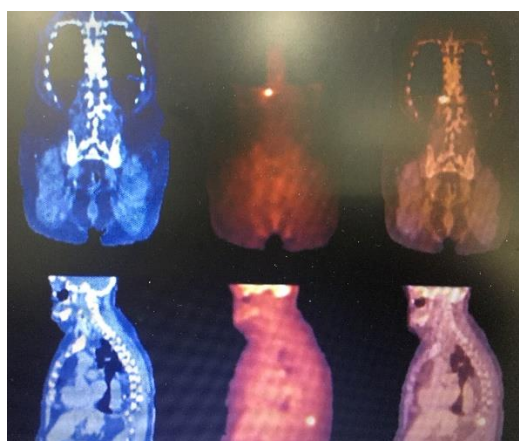
¹⁴

Ladame, Sylvain, and Chang, Jason. Bioengineering Innovative Solutions for Cancer. Academic Press, 2019.

میزان بافت سالم برداشته شود زیرا که رگ‌هایی عصبی و یا رگ‌هایی خونی ممکن است در آن بافت باشند. بنابراین تعریف دقیق "حاشیه غده" بسیار مهم است، و البته بسیار هم دشوار می‌باشد. جراح‌ها نیاز دارند که همه غده، و هیچ چیزی دیگر بجز غده، را بردارند.



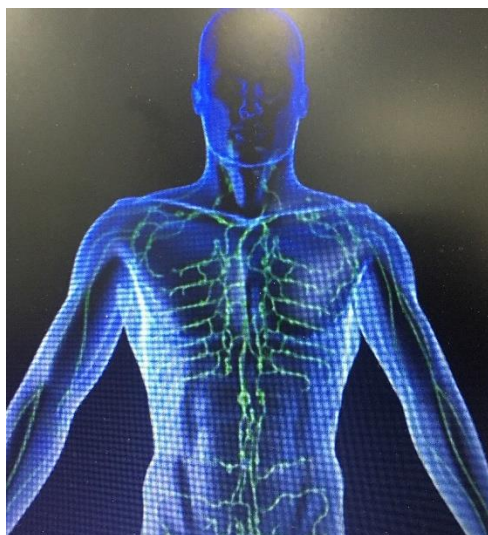
جراحان رهنمودهای بسیاری از قبیل رادیاب‌هایی رادیوآکتیو و یا ابزارهای بصری بازرسی و یا شیوه‌های فنی بررسی بافت‌ها را مورد استفاده قرار می‌دهند تا بافتی بیمار را ارزیابی کنند.



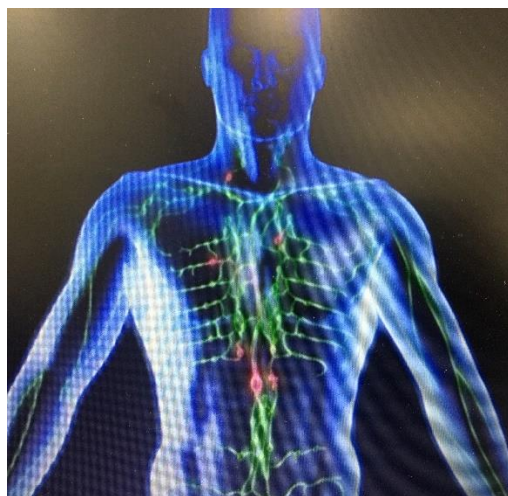
مطالعات بسیاری پیرامون عمل جراحی و ارزیابی جراح‌ها برای از بین بردن همه سلول‌های سرطانی پس از عمل انجام گرفته است، و آن مطالعات نشان می‌دهند که تقریباً در ۴۰٪ جراحی‌ها سلول‌های بدخیم، بجا گذاشته می‌شوند. این واضح است که با ابزارهای جراحی در دسترس و کنونی، عمل از بین بردن کامل سلول‌های بدخیم بسیار دشوار می‌باشد.



سیستم لنفی (یا تنابه‌ای) انسان هم مسایل را پیچیده می‌کند.



غده‌هایی لنفی در تمامی کالبد ما حضور دارند تا عوامل خارجی را گیر بباندازند. سلول‌هایی سرطانی که از غده‌ای شروع به فراوضعیتی¹⁵ شدن می‌کنند، نخست به غده‌های تنابه‌ای (یا لنفی) می‌روند. بهمین دلیل، جراح‌ها همیشه از غده‌های لنفی نزدیک به غده سرطانی نمونه‌برداری می‌کنند و آن نمونه‌ها نشان می‌دهند که آیا سرطان شروع به پخش شدن کرده است یا خیر؟ اما تشخیص و شناسایی خود همین غده‌های لنفی چالش‌برانگیز است.



در سال ۱۹۵۹، دانشمند علمی آمریکایی ریچارد فینمن¹⁶، در انستیتوی فن‌آوری کالیفرنیا¹⁷، برای نخستین بار پیرامون فن‌آوری نانو سخن گفت و پیرامون معجزه ابزارهای جراحی مقیاس نانو ایده‌پردازی کرد.

¹⁵

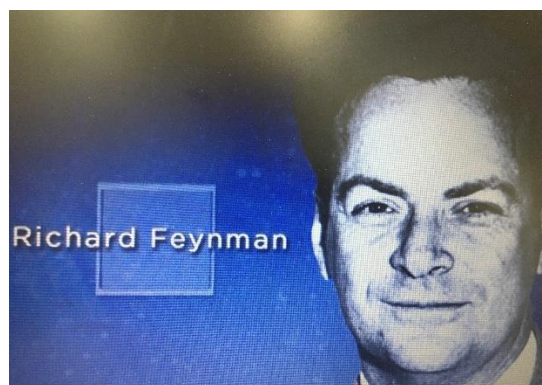
Metastatized

¹⁶

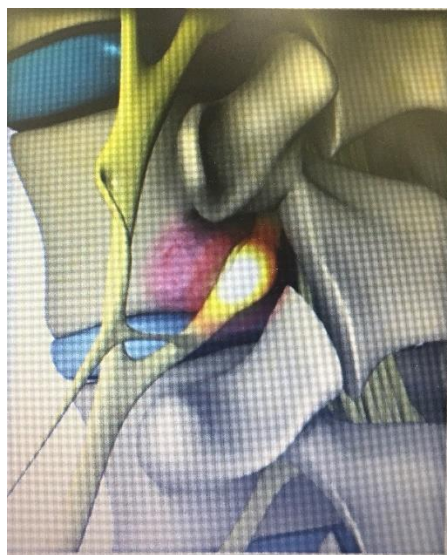
Richard Feynman

¹⁷

California Institute of Technology



در این فصل کتاب "سفر به ریزها" نشان خواهیم داد که ایده‌های **فینمن** امروز تبدیل به واقعیت شده است¹⁸. در واقع، ما امروز توانسته‌ایم جعبه‌ابزارهای جراحی نانویی بسازیم که بسیار فراتر از آنچه **فینمن** می‌اندیشید، رفته است. با چنین ابزارهایی ما توانسته‌ایم عمل جراحی را بهینه کنیم تا جایی که پزشکان نه تنها می‌توانند انبرها و تیغ‌هایی نانویی را استفاده کنند، بلکه قادرند با استفاده از موادی نانویی، ارزیابی و تشخیصی بمراتب دقیق‌تر داشته‌باشند. برای نمونه جراح‌ها، امروزه، غده‌های لنفی و حاشیه غده‌ها را با دقتی بسیار بالاتر شناسایی می‌کنند. از آن گذشته، پس از عمل، موادی نانویی فرآیند بهبود زخم‌ها را بسیار تسریع می‌کنند¹⁹. شاید در اینجا بپردازم به اینکه چگونه موادی نانویی می‌توانند حاشیه‌ی غده‌ها را دقیق ارزیابی کنند و در نتیجه به جراح‌ها یاری دهند تا مرزهای غده‌های بدخیم را هرچه شفاف‌تر ببینند. همانگونه که پیشتر اشاره کردم، رگ‌های عصبی و خونی بسیار مهمی در نزدیکی غده‌ها هستند، که به هر بهایی می‌بایست از صدمه به آنها اجتناب کرد. بهمین دلیل جراح‌ها، بدرستی، در برداشتن بیش از اندازه بافت‌ها در حین جراحی، بسیار محافظه‌کارانه عمل می‌کنند.



¹⁸

Latifi, Rifat. Modern Hospital: Patients Centered, Disease Based, Research Oriented, Technology Driven. Springer, 2019.

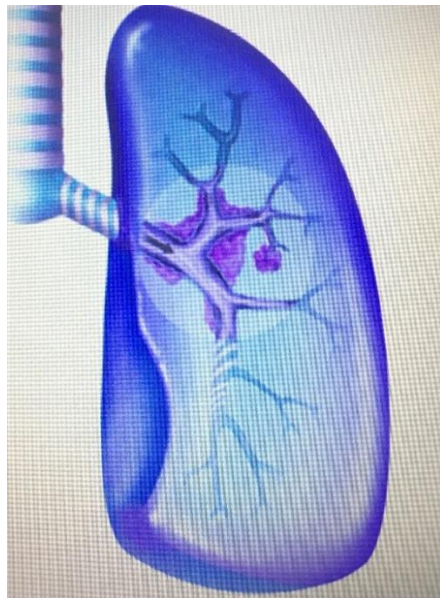
¹⁹

Kateb, Babak, and Heiss, John, D. The Textbook of Nanoneuroscience and Nanoneurosurgery. CRC Press, 2013.

اغلب پس از پایان جراحی، پزشکان نمونه‌ای کوچک از بافتی که (در ارزیابی آنها) خارج از "حاشیه‌ی غده"²⁰ است، برمی‌دارند. این نمونه پس از جراحی مورد آزمایش قرار می‌گیرد.



مطالعات نشان داده‌اند، که در بیش از ۵۰٪ موارد جراحی سرطان سینه و برداشتن غده سرطانی، باز نیاز به جراحی دوم و سپسین می‌باشد، زیرا که پزشکان قادر به تشخیص دقیق "حاشیه" نبوده‌اند. البته این واضح و درست و مبرهن است که جراحان (بدلیل حفاظت از تاثیر جانبی ناخوشایند عمل، تندرستی خانم‌ها و کاهش عواقب دیگر) بدرستی بسیار محافظه‌کارانه عمل می‌کنند. خوب، یافتن آن توازی که جراح بتواند، در عین حال، همه‌ی سلول‌های بدخیم را بردارد، چالشی بسیار دشوار می‌باشد. مطالعاتی اخیر در دانشگاه سن دیگو در کالیفرنیا²¹ نشان داده‌اند که باقیمانده غده‌ها پس از جراحی ریه، احتمال بقا برای بیماران سرطانی را تا حدود ۳۵٪ کاهش می‌دهد.



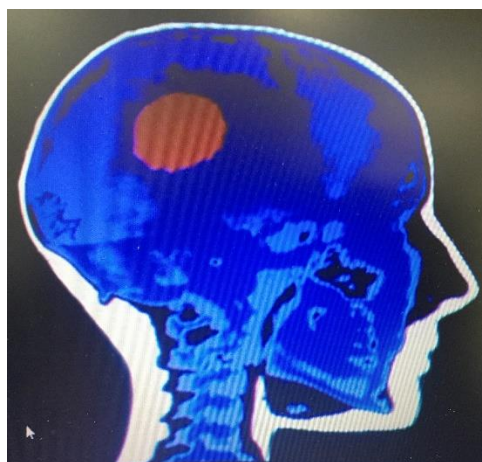
²⁰

Margins of a tumor

²¹

University of California San Diego

البته جراحان تا حد امکان از برداشت بافت‌های ریوی خودداری می‌کنند، زیرا که غده‌های سرطانی، در بیشتر موارد نزدیک به مجراها و لوله‌های تنفسی می‌باشند. در غده‌های سرطانی مغز هم با چنین مشکلی روبرو هستیم، که خطرات برداشت بیش از حد حتی چند سلول اضافه، می‌تواند در شانس بقای بیمار مداخله ناخوشایندی داشته باشد.



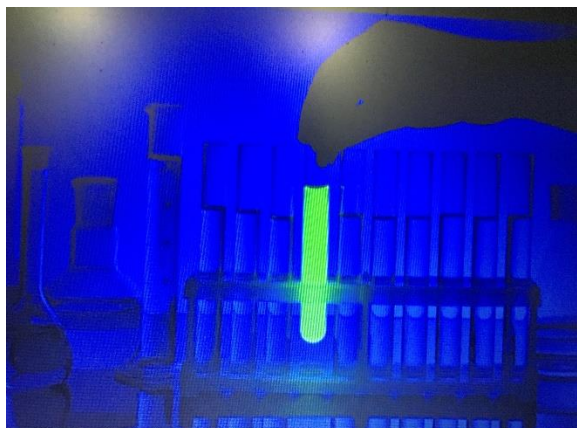
آن فاکتور یا عامل محدودکننده برای شناسایی غده‌ها و تشخیص مرزها یا حاشیه‌ها، در واقع، حساسیت بینایی چشم آدمی است.



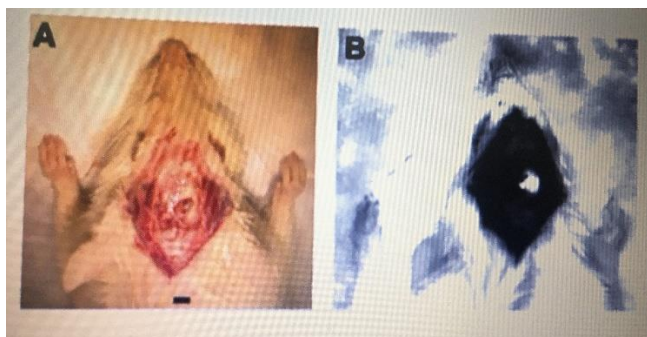
چشم انسان، بطور طبیعی، ذراتی را در حدود اندازه ۲۵۰ میکرونی (یعنی مانند ذرات گرد و غبار) توانایی دیدن دارد. بنابراین، غده‌های کوچک که در اطراف بافت‌ها هستند براحتی دیده نمی‌شوند، و برآستی، تنها در مواردی بخصوص، می‌توانیم سلول‌های سرطانی را از سلول‌های سالم متمایز کنیم، تا آنها را از میان برداشته و از بین ببریم. این چالشی اساسی برای جراحان است. اگر قادر باشیم که، در حین عمل، سلول‌های باقیمانده و حاشیه‌ای غده‌ها را شناسایی کرده و برداریم، خوب مسلماً آهنگ بقای بیمار سرطانی را افزایش می‌دهیم.



تصویربرداری از سلول‌های غده‌های بدخیم با استفاده از نانوذرات²² رویکردی بسیار قدرتمند برای شناسایی و از میان برداشتن آنها در حین جراحی شمرده می‌شود.



تصویربرداری از سلول‌های غده‌های بدخیم با استفاده از نانوذرات بر روی موش‌های آزمایشگاهی بهنگام جراحی غده‌های مغزی انجام گرفته است.



در سال ۲۰۰۲، گروهی از پژوهشگران از بیمارستان عمومی ماساچوست در شهر بوستون²³، در همکاری با دانشمندانی از دانشکده پزشکی هاروارد²⁴ نشان دادند که نانوذرات آهن بنحوی بسیار موثر و کارآ برای چنین کاربردی عمل می‌کنند. آنها نوع بسیار هوشمندانه نانوذرات اکسید آهنی را ساختند تا پیش از جراحی در تصویربرداری از غده‌ی مغزی در فرآیند ام آر آی، حاشیه‌ها را دقیق‌تر نشان داده و همچنین می‌توانست، در حین جراحی، موجب درخشش غده‌ها شود. پیش‌تر نوشتیم که اگرچه روش ام آر آی بسیار قدرتمند است اما پرهزینه می‌باشد، زیرا خود دستگاه‌ها گران هستند و در همه اتاق‌های جراحی امکان استفاده از آنها نیست. اما از دیگرسو، ردیابی درخشندگی بسیار ساده است و تنها به منبع تهیجی ارزان‌قیمتی نیاز داریم، که حتی آن منبع می‌تواند چراغ قوه‌ای کوچک باشد. پژوهشگرانی که چنین نانوذراتی دوکارکردی²⁵ را طراحی کردند، براستی موفق شدند که چیزی بسازند که دو

²²

Gupta, Saloni. Applications of Nanotechnology in Oral and Maxillofacial Surgery. LAP Lambert Academic Publishing, 2020.

²³

Massachusetts General Hospital in Boston

²⁴

Harvard Medical School

²⁵

Bifunctional nanoparticles

نوع سیگنال، یعنی سیگنالی برای ام آر آی و سیگنال دیگری برای درخشندگی، می‌فرستد²⁶. آن اکسید آهنی که در مرکز نانوذره است خواصی مغناطیسی داشته که می‌تواند سیگنال‌های ام آر آی را بخوبی دریافت کند، و رنگ شیمیایی بکار گرفته بدور مرکز نانوذره نیز، بهنگام تهییج، برون‌فرستی نوری²⁷ دارد.

دانشمندان نانو این ماده‌ی ترکیبی را به موش‌هایی آزمایشگاهی با غده‌های سرطانی مغز تزریق کرده، اجازه‌ی گردش برای ۲۴ ساعت دادند. سپس با استفاده از ام آر آی از آنها تصویربرداری شد، و تصاویر محل دقیق غده‌ها را نشان دادند. با داشتن چنین تصاویری دقیق، سپس جراحان محل غده را در جمجمه موش‌ها گشودند و با استفاده از سیگنال درخشندگی، بدقت محل دقیق بافت غده را یافتند. در تصویر بالا، درخشندگی غده بدلیل نانوذرات نشان داده شده‌است.

پس از جراحی هم، با استفاده از روش‌های علمی و ابزارهای فنی، تمامیت مغز حیوان‌ها تصویربرداری و ارزیابی شد و معین شد که همه سلول‌های سرطانی از میان برداشته شده بودند. حالا، پرسش این است که آنها چگونه به مغز حیوان نگرینند؟ خوب، آنها بسادگی توانستند که بافت مغزی را بخش‌بخش کرده، و هر بخش را با رنگ‌لکه‌هایی نانویی²⁸ آغشته کردند که می‌توانستند، در مورد سالم و یا بدخیم بودن سلول‌ها، سیگنال بفرستند. البته، این روش پس از کالبدشکافی حیوان عملی است و استفاده از چنین روشی علمی و فنی در موجود زنده میسر نیست، زیرا که موجود زنده به بافت‌ها نیازمند است²⁹. نکته اینکه، چنین رویکردی قدرتمند، با استفاده از نانوذرات، توانسته است به دستگاه بینایی انسان یاری دهد تا بهنگام جراحی، بسیار دقیق‌تر، غده‌های بدخیم مغز را کاملاً از بین ببرد.

این مطالعه‌ای بسیار شگفت‌انگیز بود که در سال ۲۰۰۳ نشان داد و ثابت کرد که تا چه میزان نانوذرات می‌توانند، برای جراحی، سودمند و موثر باشند. این واقعیت هم که مطالعه در مورد جراحی مغز بود، به ارزش شواهد و گواه‌های علمی آن افزود. البته بخاطر داشته باشیم که بدون گذشتن از آن مانعی که **مانع خون - مغزی**³⁰ نامیده می‌شود، نانوذرات امکان آن را نمی‌داشتند تا چنین توانایی‌هایی را به نمایش بگذارند³¹.

همانگونه که از نام آن مشخص است، این مانع سپری را به دور مغز می‌سازد که گذار از آن بسیار مشکل است. شبکه‌ای از مویرگ‌ها هستند که محاط بر مغزند، و اگر ما قادر بودیم تا آنها را، در جایی بیرون از مغز، پهن کنیم، درازایی معادل ۵۵۰-۵۶۰ کیلومتر می‌داشتند³². اضافه بر آن، مویرگ‌ها بسیار انبوه و درهم‌شده‌اند و سلول‌های بسیار زیادی دارند و تنها چیزهایی بسیار مشخص، امکان دسترسی به مغز را پیدا می‌کنند. یعنی تنها ملکول‌هایی کوچک که حدود یک نانومترند، مانند چیزهایی از قبیل شکر، الکل، نیکوتین و برخی داروهای ضد افسردگی می‌توانند از چنین مانعی عبور کنند، و معمولاً ملکول‌های بزرگ‌تر چنین امکانی ندارند. این واقعیت که نانوذرات آهن که حدود ۵۰ نانومترند توانستند از آن مانع عبور کنند، شگفت‌انگیز و آشکارا خوش‌اقبالانه بود.

26

Narayan, Roger, and Boland, Thomas, and Lee, Yuan-Shin. Printed Biomaterials: Novel Processing and Modeling Techniques for Medicine and Surgery. Springer, 2010.

27

Light emission

28

Nano stains

29

Jackson, Mark, J. and Ahmed, Waqar. Surface Engineered Surgical Tools and Medical Devices. Springer, 2007.

30

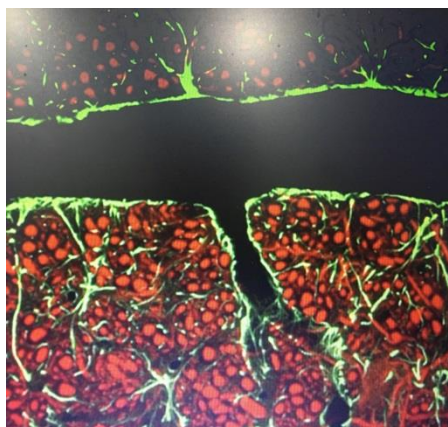
Blood – Brain Barrier

31

Dorovini-Zis, Katerian. Blood-Brain Barrier in Health and Disease. CRC Press, 2020.

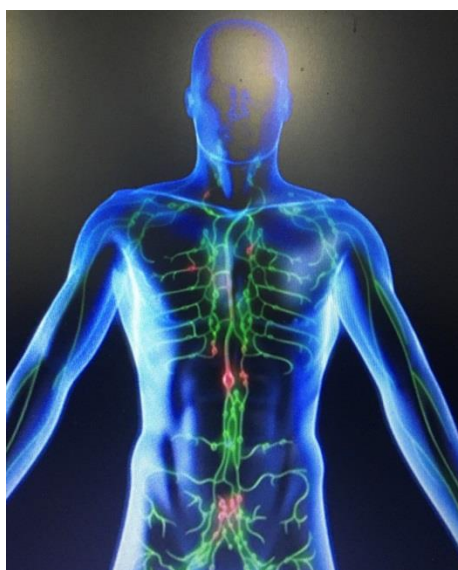
32

Lyck, Ruth, and Enzmann, Gaby. The Blood Brain Barrier and Inflammation. Springer, 2017.



در مورد اینکه این پدیده چگونه اتفاق می‌افتد، پژوهش‌ها ادامه دارند و ما هنوز نمی‌دانیم. دانشمندان بسیاری، در نقاط مختلف دنیا، برای علل و عوامل خاصیتی متفاوتی³³ که باعث می‌شود تا این نانوذرات مویرگ‌ها را فریب داده، از مانع‌گذر کنند، مشغول پژوهش هستند. بنظر می‌رسد که کمی برای نتایج می‌بایست صبر کنیم³⁴.

نوع دیگر جراحی دقیق که می‌تواند بوسیله نانوماده‌ها بهینه شود، قابلیت دیدن بهتر سیستم غده‌های لنفی (تنباه‌ای) می‌باشد³⁵. همانگونه که آگاه هستید، سیستم لنفی شبکه‌ای از مجراهاست که بجای خون، لنف را حمل و ترابری می‌کند. لنف، مایع شفاف و به رنگ زرد کمرنگ می‌باشد که در عروق لنفاوی جاری است. منشأ آن از بافت‌های بدن بوده و مجدداً از طریق سیستم لنفاوی به خون باز می‌گردد. سلول اصلی این مایع، لنفوسیت‌ها می‌باشند. این مایع حاوی اکثر ضایعاتی است که سلول‌ها تولید می‌کنند، و همچنین لنف سلول‌های بیگانه را به غدد لنفاوی منتقل می‌کند تا آنها را از بین ببرند.



³³

Different combination of properties

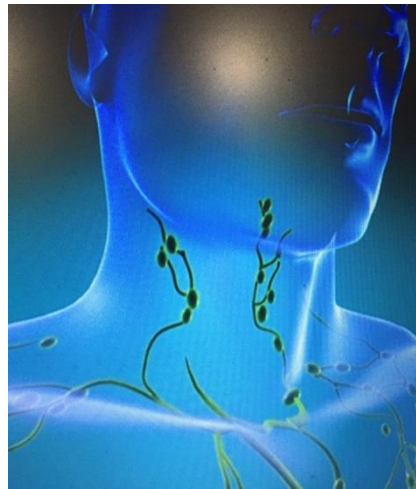
³⁴

Bhatnagar, Subhash. Neuroscience for the Study of Communicative Disorders. Wolters Klower Health, 2017.

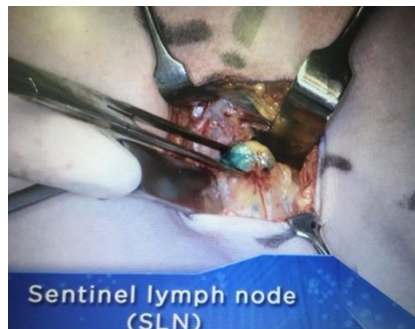
³⁵

Santambrogio, Laura. Immunology of the Lymphatic System. Springer, 2013.

سیستم لنفاوی مسیر دیگری را فراهم می‌کند تا سلول‌های سرطانی در کالبد به حرکت درآیند و فراوضعیتی³⁶ شوند. برخی سرطان‌ها بنحوی قابل‌پیش‌بینی، از محلی که شروع شده‌اند بحرکت درآمده و نخستین محل توقف‌شان غده‌ای لنفاوی و یا غده‌ی دیگری نزدیک به خود غده‌ی سرطانی می‌باشد³⁷، پیش از اینکه در بخش‌های دیگر کالبد پخش شوند³⁸.



نزدیک‌ترین غده‌ی لنفی به غده‌ای سرطانی، غده‌ی لنفی نگهبان³⁹ (SLN) نامیده می‌شود⁴⁰.



دلیل جراحی بر چنین غده‌ای آن است تا پزشکان بدانند که آیا سرطان شروع به پخش‌شدگی کرده است؟ اگر غده‌ی لنفی نگهبان حاوی سلولی سرطانی نباشد، به احتمالی بسیار بالا سرطان هنوز به بخش‌های دیگر کالبد پخش نشده‌است⁴¹.

³⁶

Metastatized

³⁷

Chikly, Bruno Do. Dissection of the Human Lymphatic System. IHH, Inc. 1999.

³⁸

Singhal, S., and Nie, S. and Wang, M. D. Nanotechnology Applications in Surgical Oncology. Annual Review of Medicine, 2010.

³⁹

Sentinel lymph node (SLN)

⁴⁰

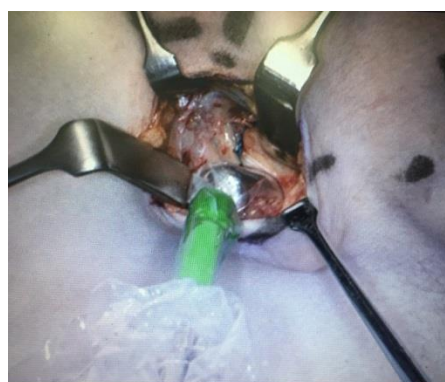
Sanchez Aguilar, Marta, and Garcia Gomez, Francisco Javier, and Alvarez Perez, Rosa Maria. Sentinel Lymph Node Biopsy and Molecular Imaging in Pediatric Melanoma. Scholars' Press, 2015.

⁴¹

Haddad, S. F. X-Plain Breast Lumpectomy and Sentinel Lymph Node Biopsy. Patient Education Institute e-Book, 2016.



اغلب شیوهی مورد استفاده برای عکسبرداری از غدهی لنفی نگهبان (SLN) تزریق نوعی ردیاب رادیوآکتیو در نزدیکی غده است. سپس، نوعی شمارشگر (یا تابش‌سنج) گایگر⁴² توسط جراح استفاده می‌شود تا گذر ردیاب به غده را مشاهده کند. خوب، مسلماً استفاده از رادیوآکتیو به کالبد به آن صدمه می‌زند و مناسب نیست. مواد نانویی رامحلی بدیل را، در این مورد، فراهم می‌کنند.



در سال ۲۰۰۶، پژوهشگرانی در دانشگاه کالیفرنیا جنوبی⁴³ (USC)، هنگامی که بر روی نقطه‌های کوآنتومی نیم‌مرسانا کار می‌کردند، متوجه شدند که با تزریق نقطه‌های کوآنتومی نیم‌مرسانا به غده‌ای سرطانی، که نقطه‌ها از خود برون‌فرستی فروسرخ دارند، آنها به سرعت در غدهی لنفی نگهبان (SLN) متمرکز و جمع می‌شوند⁴⁴. چنین نقطه‌هایی همان مسیری را طی می‌کنند که سلول‌های بدخیم فراوضعیتی در پیش می‌گیرند. آزمایشات نشان دادند که با استفاده از چنین نقطه‌هایی کوآنتومی تنها در ۱۵ ثانیه غدهی لنفی نگهبان روشن شد و درخشید، و جراحان توانستند نمونه‌گیری بسیار دقیقی برای بافت‌برداری یا بیوپسی⁴⁵ داشته باشند⁴⁶.

⁴²

Geiger counter

⁴³

University of Southern California (USC)

⁴⁴

Mariani, Giuliana, and Vidal-Sicart, Sergi, and Valdez, Renato, A. Atlas of Lymphoscintigraphy and Sentinel Node Mapping: A Pictorial Case-based Approach. Springer, 2020.

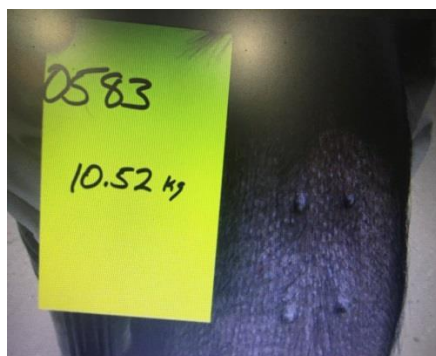
⁴⁵

Biopsy

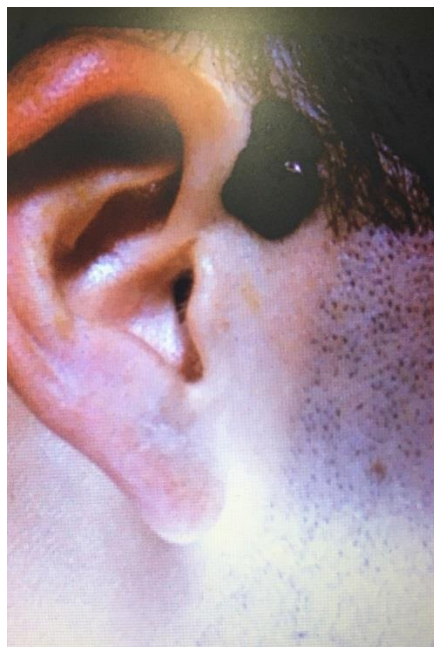
⁴⁶

Somanath, Shreyas, and Dasai, Sanjay, and Agrawal, Deepak. Sentinel Lymph Node Biopsy with MBD only, in Ca Breast: Central India. LAP Lambert Academic Press, 2015.

برای چنین آزمایشاتی اغلب از خوک‌های کوچک آزمایشگاهی که مدل سینکالر⁴⁷ خوانده می‌شود، استفاده کرده‌اند. این خوکچه‌ها اغلب آنچنان مهندسی شده‌اند که بنحوی خودانگیخته نوعی سرطان ملانوما دارند. چیزی نزدیک به ۷۰٪ سرطان ملانوما در انسان، با گذر از غدد لنفاوی متاستتیزه یا فراوضعیتی می‌شود.



نوع خوکچه‌ای ملانوما بسیار به ملانومای انسانی نزدیک است و در نتیجه استفاده از این خوکچه‌های آزمایشگاهی برای آزمایشات تصویربرداری، با استفاده از نقطه‌های کوانتومی، همخوانی رویکردی دارد⁴⁸.



خاصیت دیگر این خوکچه‌ها چنان است که آنها موهای تیره و پوستی بسیار روشن دارند که برای خوکچه‌ها غیرمعمول می‌باشد. این خاصیت، چالشی نزدیک به همان چالشی که برای دریافت نور از غده لنفی در انسان است را بوجود می‌آورد. در نتیجه، موفقیت آزمایش بر روی این خوکچه‌ها، با احتمالی بسیار بالا، موفقیت کاربرد نقطه‌ها در انسان را نیز اثبات می‌کند.

⁴⁷

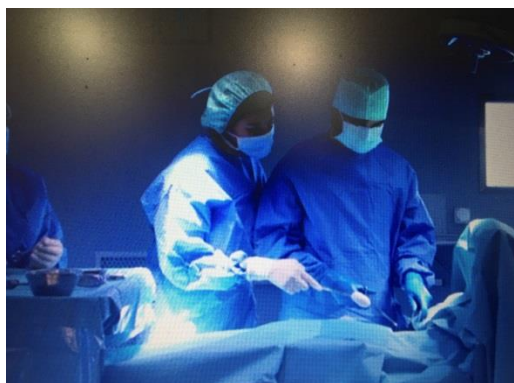
Sinclair Mini-swine

⁴⁸

Thompson, John, F. and Morton, Donald, L. and Kroon, Bin, B. R. Textbook of Melanoma: Pathology, Diagnosis, and Management. CRC Press, 2020.



البته چند سال طول خواهد کشید تا این نوع استفاده از مواد نانویی در انسان‌ها بکار گرفته شود، و مسلماً پتانسیل موثر بودن این رویکرد بسیار بالاست. بخش‌بری⁴⁹ و تراش دقیق غده‌ی لنفی از مشکل‌ترین کارها برای جراحان با شیوه‌های کنونی تصویربرداری از آنهاست. برآوردها چنین است که جراح می‌بایست، بنحوی میانگین، ۶۰ تا ۱۰۰ عمل جراحی بر غده‌ی لنفی انجام داده باشد تا بتواند بخش‌بری درستی⁵⁰ را بر بیماری انجام دهد. توانایی درخشاندن غده‌ی لنفی با استفاده از نانوذرات (همانگونه که در آزمایشگاه‌ها نشان داده شده)، حتماً منحنی آموزشی و دقت چنین عمل‌های جراحی را بهینه می‌کند.⁵¹



اینجا مایلیم در مورد موضوع مهم دیگری نیز بنویسم و آن استفاده از روبات‌ها⁵² برای جراحی می باشد⁵³. جراحی روباتی⁵⁴ سالهاست که مورد استفاده است و شکل معمول آن کنترل از راه دور⁵⁵ روبات⁵⁶ توسط جراحان می باشد که برای عمل‌های بسیار

⁴⁹

Resection

⁵⁰

Accurate resection

⁵¹

Perkins, Alan, C. and Lee, John, E. Gamma Cameras for Interventional and Intraoperative Imaging. CRC Press, 2020.

⁵²

Robots

⁵³

Ben-Yakar, A., and Bourgeois, F. Ultrafast Laser Nanosurgery in Microfluids for Genome-wide Screening. Current Opinion in Biotechnology, 2009.

⁵⁴

Robotic surgery

⁵⁵

Tavadze, Giorgio, F. and Shteinberg, Alexander. Production of Advanced Materials of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Springer, 2013.

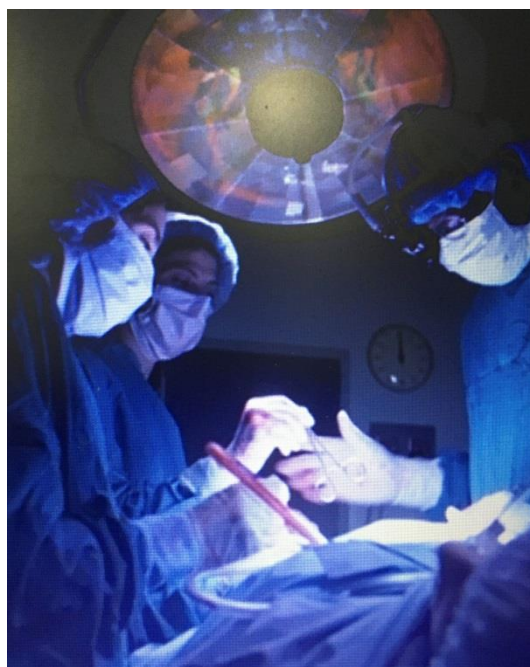
⁵⁶

Remote control of the robot

دقیق⁵⁷ احتمال لرزش دست⁵⁸ را، بهنگام برش، از بین می‌برد. امتیاز دیگر اینکه جراح می‌تواند از فواصلی بسیار دور عمل را انجام دهد، همانگونه که در سال ۲۰۰۱، پزشکی در نیویورک کیسه‌ی صفرا⁵⁹ بیماری در پاریس را عمل کرد.



اما آن چیزی که روبات‌ها ندارند، حس لامسه⁶⁰ است، و البته این حس برای بسیاری عمل‌های جراحی بسیار مهم است. با حس لمس، جراح قادر است تا میزان فشار لازم بر ابزار را معین کرده و اضافه بر آن اطلاعات مهمی پیرامون سلامت بافت را بسنجد⁶¹.



⁵⁷

Li, Zhenyu. One Dimensional Nanostructures: Electrospinning Technique and Unique Nanofibers. Springer, 2013.

⁵⁸

Hand tremors

⁵⁹

Gall bladder

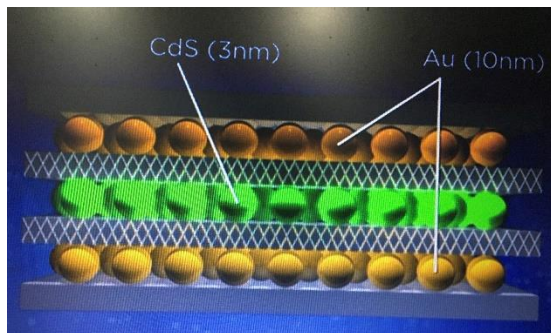
⁶⁰

Sense of touch

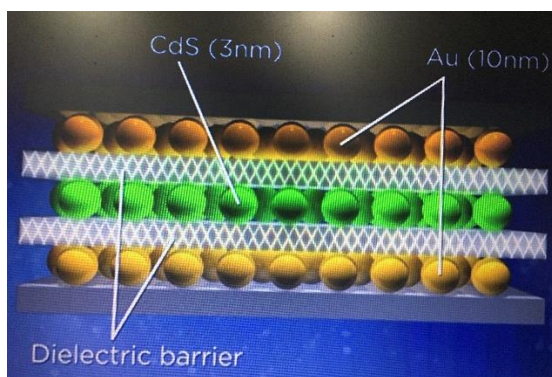
⁶¹

Hermawan, Hendra. Biodegradable Metals: From Concept to Applications. Springer, 2012.

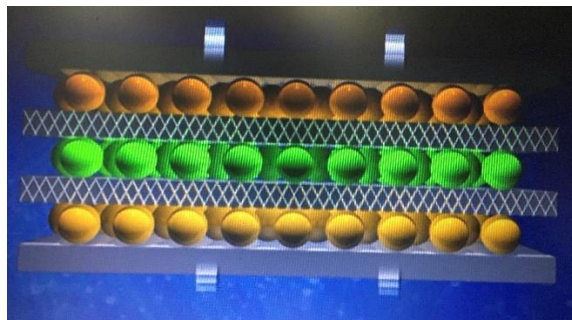
نوع مشخص نانو ایزاری بدیع می‌تواند رامحلی را فراهم نماید تا روبات، توانایی لمس داشته باشد. این ابزار در اساس ساندویچی نانوذره‌ای است که دو لایه‌ی نانوذره‌ی طلا⁶² بیرونی و لایه‌ای میانی برساخته از نانوذره‌ای از سولفید کدمیوم⁶³ دارد.



این لایه‌های گوناگون توسط لایه نرمی از پلاستیک⁶⁴ از یکدیگر جداسازی شده‌اند.



با فشار و استرس گذاشتن بر لایه‌های بیرونی نانوذرات طلا، آنها به نانوذره‌ی سولفید کادمیوم نزدیک شده و باعث برون‌فرستی نور می‌شوند⁶⁵.



در واقع نزدیکی الکترونیکی ذرات به یکدیگر است که موجب چنین پدیده‌ای است.

⁶²

Layers of gold nanoparticles outside

⁶³

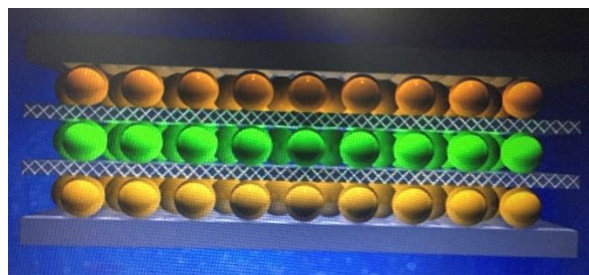
A layer of cadmium sulfide nanoparticle inside

⁶⁴

A layer of squishy plastic

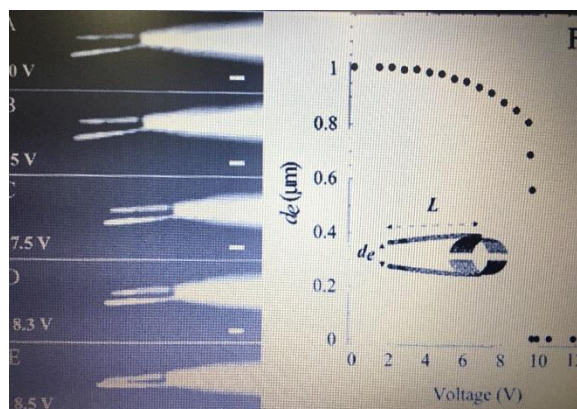
⁶⁵

Ahmed, Jameel. Optical Signal Processing by Silicon Photonics. Springer, 2013.



حال که ما دیده‌ایم که چگونه فن‌آوری نانو می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد تا غده‌ها را لمس کنیم و یا بهتر ببینیم، شاید بد نیست در مورد برخی رویکردهای نویدبخش امروزی برای توسعه ابزارهای جراحی مقیاس نانو بپردازیم.⁶⁶ هرچه ما قادر باشیم سلول‌های سرطانی را بهتر ببینیم، توانایی بهتری برای ازمیان برداشتن آنها داریم، بدون اینکه به سلول‌های سالم صدمه بزنیم. اما برای اینکه بتوانیم تک‌سلولی بدخیم را جراحی کنیم، به ابزار برشی بسیار کوچکی نیازمندیم. در سرتاسر فصل‌های پیشین "سفر به ریزها" به موادی نانویی پرداخته‌ام که توانایی واکافتی بالا⁶⁷ را در اختیار ما قرار می‌دهند، اما نکته‌ی کلیدی آن است که ما، در مقیاس‌های معمولی، چگونه بتوانیم آن مواد را در خدمت بگیریم⁶⁸. این چالشی عمده است زیرا که، برای نمونه، اگر ما قادر به در دست‌گرفتن نانولوله‌ای نیستیم، پس چگونه می‌توانیم از آنها استفاده کنیم؟

در سال ۱۹۹۹، ژورنال "علم"⁶⁹ گزارشی در مورد رویکردی هوشمندانه داشت که می‌توانست پاسخگوی چالش ما باشد. در آن رویکرد، استوانه‌ای شیشه‌ای به درازای ۱۰۰۰ نانومتر به ۲ نانولوله‌ی کربنی متصل شد⁷⁰. محل اتصال آنها فلزی طراحی شد که همچون الکترودی عملکرد داشته باشد. هنگامیکه هیچ پتانسیلی برقی در میان نبود، نانولوله‌های کربنی از یکدیگر مجزا باقی می‌ماندند. اما با جریان برقی حدود ۸ ولت، دو نوک نانولوله‌ها به یکدیگر گرایش به نزدیکی نشان دادند. تصاویر پایین چنین پدیده‌ای را نشان می‌دهند.



⁶⁶

Gupta, Nikhil, and Pinisetty, Dinesh, and Shunmugasamy, Vasanth. Reinforced Polymer Matrix Syntactic Foams: Effect of Nano and Micro-Scale Reinforcement. Springer, 2013.

⁶⁷

High resolution capability

⁶⁸

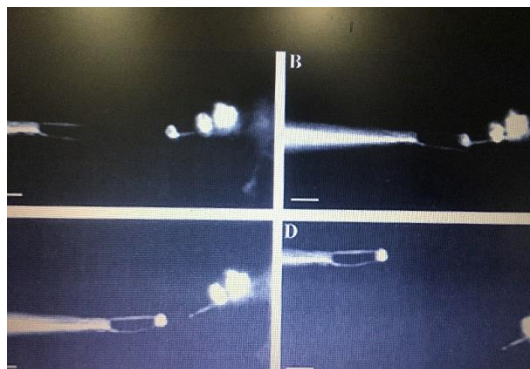
Maleque, Abdul, and Salit, Mohd Sapuan. Materials selection and Design. Springer, 2013.

⁶⁹

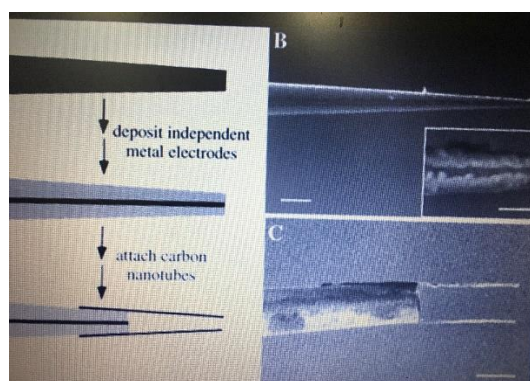
Science Journal

⁷⁰

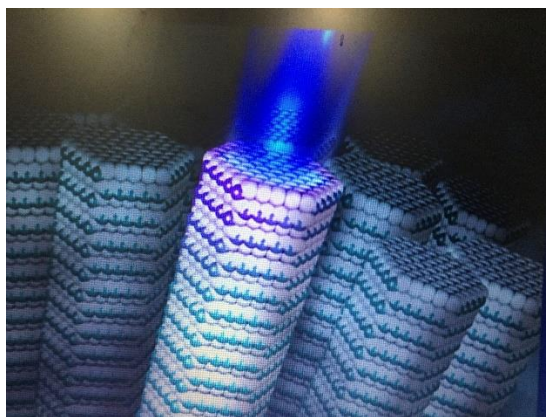
Wolfe, E. L. Applications of Graphene: An Overview. Springer, 2014.



با افزایش ولتاژ، ۲ نوک نانولوله‌ها آنچنان بهم می‌چسبند، که می‌توان آن را مانند نانو انبرکی بکار گرفت تا تکسلولی را از میان برداشت.



پژوهش‌های اجرایی بر روی این ابزار ادامه دارد و دانشمندان تاکنون (در آزمون‌های پیش‌درمانگاهی) نشان داده‌اند که می‌توانند ذره‌های پلاستیکی حدود ۱۵۰-۲۰۰ نانومتری را با استفاده از این نانو انبرک بردارند. نانولیزرها ابزارهای دیگری هستند⁷¹ که دقت در جراحی را افزایش داده‌اند. نبضان‌های بسیار سریع⁷² و متمرکز لیزری می‌توانند تکسلول‌ها را هدف قرار دهند، و حتی قادرند زیرساخت‌های سلولی را نیز مورد اصابت قرار دهند⁷³.



⁷¹

Hu, Anming. Laser Micro – Nano – Manufacturing and 3D Microprinting. Springer, 2020.

⁷²

Very rapid and focused pulsations

⁷³

Cunzhu, Tong, and Jagadish, Chennupati. Nanoscale Semiconductor Lasers. Elsevier, 2019.

این نوع رویکرد برای بریدن تکرگ‌های عصبی در کرم‌هایی، که خود تنها حدود یک میلی‌متر هستند، آزمون شده است. حالا پرسش اینجاست که چرا آزمایش و تمرین روی کرم‌ها سودمند است؟ خوب، پاسخ اینکه آنها مدل‌های خوبی هستند که دقت لازم در جراحی را برای بریدن تک‌عصب‌هایی (حدود چند میکرون) به آزمون گرفته و به اثبات می‌رسانند.⁷⁴ این نوع جراحی همچنین فرصتی فراهم می‌آورد که رشد مجدد اعصاب را مشاهده کرد، و چگونگی تجدیدتولید و فراوری اعصاب⁷⁵ را، بنحوی زنده و در زمان واقعی و بی‌وقفه⁷⁶، درک کرد.⁷⁷

تا اینجا ما به ابزارهایی گوناگون که به دقت بیشتر عمل جراحی یاری می‌دهند، نگریسته‌ایم.



در اینجا لازم می‌بینم که به ماده‌ی جالبی پردازم که به شیوه‌ای دیگر یاری می‌رساند.⁷⁸ یکی از دشوارترین چالش‌ها، در حین جراحی، خونریزی بیش از اندازه است. در طول عمل جراحی، برش رگی خونی می‌تواند ایجاد خونریزی کند. بسیاری از ما استفاده از گیره‌هایی قیچی مانند توسط جراحان را دیده‌ایم که برای بستن رگ‌هایی خونی مورد استفاده قرار می‌گیرند.



⁷⁴

Hohenester, Ulrich. Nano and Quantum Optics: An Introduction to Basic Principles and Theory. Springer, 2020.

⁷⁵

Neuro regeneration

⁷⁶

In real-time

⁷⁷

Guillotin, Bertrand, and Ali, Muhammad, and Ducom, Alexandre, and Catros, Sylvain, et al. Biofabrication: Laser-Assisted Bioprinting for Tissue Engineering. William Andrew, 2013.

⁷⁸

Wei, Gang, and Kumar, Sangamesh. Artificial Protein and Peptide Nanofibers: Design, Fabrication, Characterization, and Applications. Woodhead Publishing, 2020.

اضافه بر آن، موادی شیمیایی موجود هستند که برای جلوگیری از خونریزی می‌توانند مورد استفاده باشند، اما آنها سریع عمل نمی‌کنند. پژوهشگران حوزه‌ی مغز و اعصاب⁷⁹ نانوماده‌ی نوپنی را کشف کرده‌اند که می‌تواند برای جلوگیری از خونریزی در حین جراحی مغز و اعصاب و دیگر انواع عمل‌های جراحی، بسیار موثر عمل کند. دانشمندان بر روی پپتیدی کار می‌کردند که بنحوی خودگردآورانه تبدیل به نوعی نانوفیبر⁸⁰ می‌شود. پژوهش نخستین آنها بر روی آن ماده به عنوان دارویی جهت ترمیم صدمات مغزی بود⁸¹. آنچه آنها کشف کردند آن بود که آن پپتید، بسیار سریع، از خونریزی جلوگیری می‌کند. این نانوماده پپتیدی، بجز اینکه در حین جراحی بسیار سودمند می‌باشد، ابزار بسیار مهمی نیز برای درمان شوک‌های تکان‌دهنده‌ی⁸² ناشی از خونریزی‌های بیش از اندازه، شمرده می‌شود.

بسادگی می‌توان پیش‌بینی کرد که شاید بزودی شاهد پمادی، برساخته‌ی پپتیدی خودگردآورنده به نانوفیبری، باشیم که جایگزین تنسوپلاست⁸³ شود. برای کسانی که در منزل کودک دارند، استفاده از تنسوپلاست برای بریدگی و جراحات کوچک کودکان تقریباً هفتگی می‌باشد، بخصوص برای کودکانی که در خاک و باغ همیشه مشغول بازی هستند. بنابراین بزودی می‌بایست شاهد لوله‌های پمادی از این نانوماده باشیم که همچون "پوست مصنوعی"⁸⁴ برای درمان بریدگی‌ها مورد استفاده خواهد بود. مواد نانویی، همچنین، برای درمان سریع‌تر زخم‌ها و محدودکردن عفونت‌ها می‌توانند مورد استفاده باشند⁸⁵. نانوذرات نقره⁸⁶ برای چنین عملکردی بسیار نویدبخش هستند⁸⁷. مدت مدیدی است که دانشمندان از نانوذرات نقره برای از بین بردن باکتری‌ها استفاده می‌کنند⁸⁸، که راه مناسب جلوگیری از باکتری‌ها برای عفونتی‌کردن زخم‌هاست⁸⁹. اما مطالعه بر روی موش‌ها در دانشگاه کالیفرنیا جنوبی⁹⁰ پدیده‌ی شگفت‌انگیزی را نشان داد - که چگونه زخم‌ها، با استفاده از نانوذرات نقره⁹¹، بسیار سریع‌تر بهبود می‌یابند. آن

79

Neurology researchers

80

A peptide self assembling into a nanofiber

81

Bera, Hriday, and Mobaswar, Chowdhury, and Saha, Sudipta. Biopolymer-Based Nanomaterials in Drug Delivery and Biomedical Applications. Academic Press, 2021.

82

Acute trauma due to excessive bleeding

83

Band-Aid

84

Artificial skin

85

Yadav, Awesh, K. and Gupta, Umesh, and Sharma, Rajeev. Nano Drug Delivery Strategies for the Treatment of Cancer. Academic Press, 2020.

86

Silver nanoparticles

87

Laurencin, Cato, T. and Nair, Lakshmi, S. Nanotechnology and Regenerative Engineering: The Scaffold, Second Edition. CRC Press, 2015.

88

Vazhacharikal, Pre, and Joshy, Anand, and Hari, Akshay. Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Stingless Bee Honey and Evaluation of their Antibacterial Activity. Department of Biotechnology, Mar Augusthinos College, 2019.

89

Sugawara-Narutaki, Ayae, and Kamiya, Yukiko. Designer Biopolymers: Self-Assembling Proteins and Nucleic Acid. MDPI, 2020.

90

University of Southern California (USC)

مطالعه، برای مقایسه‌ی نانوذرات نقره بجای آنتی‌بیوتیک‌ها انجام گرفت و نشان داد که جراحات ناشی از سوختگی‌ها نزدیک به ۴ روز زودتر التیام می‌یابند و در عین‌حال، التیام پوست و جاماندگی جای زخم هم بسیار کمتر می‌باشد. در تصاویر پایین موش‌هایی را مشاهده می‌کنید که سوختگی‌های پوستی دارند⁹². هنگامیکه سوختگی‌ها با استفاده از نانوذرات نقره معالجه شدند، آن سوختگی‌ها به سرعت التیام یافتند و در حدود ۲۵ روز موهای آنها نیز شروع به رشد نمود. بدون بکارگیری نانوذرات نقره (همانگونه که مشاهده می‌کنید) بهبود چندان موفق نیست.



اما توجه داشته باشیم که مطالعات نشان داده‌اند که تنها وجود و حضور نقره نکته‌ی اصلی نیست و آزمون‌ها با نقره‌ی غیرنانوساختاری ثابت کرده‌اند که در واقع تاثیری نداشته‌اند. سولفادیازین نقره⁹³، در بسیاری موارد، برای درمان سوختگی‌ها استفاده می‌شود اما موثر بودن⁹⁴ آن بسیار محدود است. پس در واقع حضور نانوذره‌ی نقره است که اثرپذیری فلز را تقویت می‌کند⁹⁵. در فصل‌های پیشین در مورد تاثیرات نانوساختاری مفصل توضیح داده شد، و داوری علمی چنین است که نانوذرات، سیستم ایمنی را برای واکنش بیش از اندازه‌ی مصنوعیتی فریب می‌دهند، که خود موجب تقلیل التهاب می‌شود. از آنجا که نانوذرات باکتری‌ها را نیز می‌کشند، امکان عفونت زخم نیز کاهش می‌یابد.

حالا، بجز تسریع و تقویت درمان، نانوذرات می‌توانند جراحات ناشی از بریدگی را گوی‌ی لحیم بزنند و بدوزند. بسیاری از ما تجربه‌ی ناخوشایند بخیه‌زدگی و سپس کشیدن آنها را داشته‌ایم - و استفاده از چسب‌های نانوذره‌ای بدیل خوشایندتری را فراهم می‌کند. مطالعه‌ای

91

Alarcon, Emilio, I. and Griffith, May, and Udekwu, Klas, I. Silver Nanoparticle Applications: In the Fabrication and Design of Medical and Biosensing Devices. Springer, 2015.

92

Gupta, Himanshu, and Thakur, Mansee, and Singh, Dipty. Reproductive Toxicity Assessment of Gold and Silver Nanoparticles. LAP Lambert Academic Publishing, 2018.

93

Silver sulfadiazine

94

Its effectiveness

95

Consalvo, Patricia. Nano Silver Technology: Silver Nanoparticles Properties, Synthesis of Silver Nanoparticles. Amazon Kindle, 2021.

در دانشگاه رایس در ایالت تگزاس⁹⁶ چنین پدیده‌ای را نشان داد و ثابت نمود. آنها با استفاده از موش‌هایی زخم‌خورده، نانوذرات طلا را مورد استفاده قرار داده و با تابش نوری نزدیک به نور فروسرخ (حدود ۸۰۰ نانومتر) نانوذرات را دچار گرمایش کردند تا زخم‌ها را بدوزند (گویی لحیم بزنند).

در آن آزمون گروهی کنترلی نیز بود که زخم‌هایشان با استفاده از روش بخیه سنتی دوخته شد. در تصاویر پایین تفاوت هر دو نوع جراحات - تصویر بالایی با استفاده از بخیه و تصویر پایینی با استفاده از بهم‌دوختگی با نانوذرات - نشان داده شده‌اند. البته در هر دو مورد زخم‌ها بالاخره بسته می‌شوند، اما برای بیمار ناراحتی بخیه‌زنی ناخوشایندتر است و روش نوین مسلماً با استقبال روبرو خواهد بود.⁹⁷



پژوهشگران به سلول‌های پوست پس از درمان نیز نگرستانند تا مطمئن شوند که همگی سالم بودند و نتایج رضایت‌بخش بود. چنین روشی نوین بسیار نویدبخش می‌باشد زیرا که بر روی عضله‌ها نیز کار می‌کند. پژوهش‌های دانشمندان نانوپزشک برای امکان استفاده از این روش بر روی اعصاب و رگ‌های خونی ادامه دارد، و می‌بایست منتظر نتایج بود.⁹⁸

با توجه به آنچه تا کنون نوشته شد، امیدوارم که به پتانسیل استفاده از فن‌آوری نانو، و بهینه‌سازی عمل جراحی پیش و درحین و پس از آن، توجه شما را جلب کرده باشم. امروزه نانوایزهای بسیاری در دسترس هستند تا کار پزشکان را برای جراحی بسیار دقیق‌تر کنند، و مسلماً استفاده از روبات‌ها چنین فرآیندی را هرروزه بهتر خواهد کرد.⁹⁹ همانگونه که اشاره داشتم، نانومواد به پتانسیل بهبود پس از جراحی، در دوران نقاهت، نیز یاری می‌رسانند.¹⁰⁰ اگرچه من، در بیشتر موارد، به روش‌های پزشکی نانو برای درمان سرطان پرداختم، اما روش‌های مشابه (با استفاده از فن‌آوری نانو) موضوع پژوهش دانشمندان حوزه‌هایی دیگر از قبیل بیماری‌های

⁹⁶

Rice University in Texas

⁹⁷

Rajendran, Rajakumari, and Maria, Hanna, J. and Thomas, Sabu, and Kalarikkal, Nandakumar. Handbook of Research on Nano-Drug Delivery and Tissue Engineering: Guide to Strengthening Healthcare Systems. CRC Press, 2021.

⁹⁸

Mishra, Vijay, and Kesharwani, Prashant, and Mohd Amin, Mohd Cairul Iqbal, and Iyer, Arun. Nanotechnology-Based approaches for Targeting and Delivery of Drugs and Genes. Academic Press, 2017.

⁹⁹

Grumezescu, Alexandru Mihai. Drug Targeting and Stimuli Sensitive Drug Delivery Systems (Pharmaceutical Nanotechnology.) William Andrew, 2018.

¹⁰⁰

Desai, Jaydev, P. Encyclopedia of Medical Robotics. World Scientific Publishing Company, Ltd. 2018.

قلبی¹⁰¹، و آترو اسکروز¹⁰² (که گرفتگی و پلاک¹⁰³ درون شریان‌های بزرگ و متوسط است¹⁰⁴)، ترامبوژنز¹⁰⁵ (یا گرفتاری به لخته‌گی¹⁰⁶) و همچنین التهاب دیواره عضلانی و آنفارکتوس قلبی¹⁰⁷ بوده‌اند،¹⁰⁸ که همگی پیشرفت‌های شگفت‌انگیزی داشته‌اند. تا اینجا هنگامیکه پیرامون یاری‌رسانی فن‌آوری نانو به جراحی نوشته شد، به این مساله که چگونه می‌توانیم سلول‌های بیمار یا بدخیم¹⁰⁹ را از میان برداریم، پرداخته‌ام. آنچه تاکنون بدان پرداخته نشده، این است که چگونه می‌توانیم سلول‌های سالم را بازسازی کرده، بازگردانیم¹¹⁰. البته صدمات مغزی و یا نخاعی¹¹¹، در بیشتر موارد، بازگشت‌ناپذیر هستند. دلیل هم این است که ما هنوز نمی‌دانیم که چگونه سلول‌ها را مجاب به رشدی طبیعی¹¹² کنیم، و کالبد ما نیز در چنین موارد بازسازی، قاصر است. در فصل بعدی کتاب "سفر به ریزها" به نقشی که نانومواد در حوزه‌ای بسیار جالب¹¹³ - یعنی پزشکی بازرویشی¹¹⁴ - بازی می‌کنند، می‌نگریم¹¹⁵. در این زمینه، دانشمندان نانو به چگونگی استفاده از نانومادی می‌پردازند تا توانایی رویش سلول‌های نوین را در بخش‌هایی از کالبد آدمی، که صدمه دیده‌اند، یاری دهند. حتی در مواردی، نه تنها رشد سلول‌ها بلکه رویش تمامیت بافت‌ها¹¹⁶ و همچنین پیشرفت در رویش ارگان‌ها (یا اعضای) مصنوعی - خارج از کالبد - نیز (برای جراحی پیوندی) موضوع پژوهش نانوپزشک‌ها بوده

101

Meyer-Esch, Christian. Blood Vessels like a Teenager: Inside Cures Against Atherosclerosis. Createspace Independent Publishing Platform, 2017.

102

Atherosclerosis

103

Plaque

104

Reed, Stanton. Prevent and Reverse Atherosclerosis: Proven Natural Alternatives that Eliminates Cholesterol Plaque. Top Shape Publishing, LLC. 2018.

105

Thrombosis

106

Medeiros, Jeffrey, L. Joachim's Lymph Node Pathology. LWW, 2021.

107

Myocardial Infarction

108

Myocardial Infarction: Cardioprotective Effects of Fucoidan against Isoproterenol Myocardial Infarction in Rats. LAP Lambert Academic Publishing, 2021.

109

Diseased and malignant cells

110

Yang, Lei, and Bhaduri, Sarit, and Webster, Thomas, J. Biomaterials in Translational Medicine. Woodhead Publishing, 2018.

111

Brain and Spinal Cord Injuries

112

Coerced into natural growth

113

Atala, Anthony, and Lanza, Robert, and Mikos, Tony, and Nerem, Robert. Principles of Regenerative Medicine. Academic Press, 2018.

114

Regenerative medicine

115

Zhang, Lijie Grace, and Fisher, John, P. and Leong, Kam. 3D Bioprinting and Nanotechnology in Tissue Engineering and Regenerative Medicine. Academic Press, 2015.

116

Entire tissues

است¹¹⁷. اگرچه سلول‌ها در ابعادی نانویی نیستند، اما ما آموخته‌ایم که چگونه می‌توانیم با استفاده از نانومواد دستورالعمل‌های لازم¹¹⁸ را (همچون نوع طبیعی دستورات) به سلول‌ها برسانیم تا به بافت‌ها شکل ببخشند. این حوزه‌ی علمی‌ای بسیار جالب و بسرعت در حال پیشرفت است و داوری من چنین است که آشنایی با آن حوزه می‌تواند بسیار آموزنده و مجذوب‌کننده باشد. وقت و روزگار خوش. دانا و توانا باشید. ر. رخشانی

¹¹⁷

Rai, Mahendra. Nanotechnology in Skin, Soft Tissue, and Bone Infections. Springer, 2020.

¹¹⁸