Journal of Military Medicine
2026, Volume 27, Issue 6
Pages: 3040-3050
10.30491/jmm.2026.1007007.1444

Innovative Approaches of Nanotechnology in Military Medicine: A Review of Applications, Prospects, Challenges, and Risks

Zahra Hami [1*]

[1] *Toxicology Research Center, AJA University of Medical Sciences, Tehran, Iran*

Received: 20 December 2025 **Accepted:** 6 February 2026

Abstract

Nanotechnology, through the exploitation of nanoscale materials and systems, has engendered transformative advancements in contemporary medicine and unveiled unprecedented opportunities for military medical applications. Nanomaterials and nanostructures, endowed with distinctive physicochemical attributes such as high surface-to-volume ratios, enhanced bioavailability, targeted drug delivery capabilities, and stimuli-responsive functionalities, have facilitated the development of advanced drug delivery platforms, smart wound dressings, tissue engineering scaffolds, and implantable or wearable biosensors. In combat scenarios, the deployment of nanomaterials encompasses hemostasis, fluid resuscitation, wound and burn management, bone tissue regeneration, neuroprotection and analgesia, as well as advanced medical monitoring. Despite these considerable innovations, practical implementation of nanotechnology in military medicine is constrained by critical challenges including long-term biocompatibility and toxicological evaluation, operational stability under extreme conditions, manufacturing standardization, regulatory frameworks, data security, and ethical and environmental considerations. This comprehensive review systematically delineates the current and emerging applications of nanomaterials in military healthcare, elucidates prospective opportunities, and critically examines the prevailing challenges, underscoring the potential of nanotechnology as a disruptive paradigm capable of redefining combat casualty care.

Keywords: Nanotechnology, Hemostatic, Neuropathy, Tissue Engineering.

*Corresponding author: **Zahra Hami,** Email: hamiz1357@yahoo.com

مجله طب نظامی
دوره ۲۷، شماره ۶، بهمن و اسفند ۱۴۰۴
صفحات: ۳۰۵۰-۳۰۴۰
10.30491/jmm.2026.1007007.1444

رویکردهای نوآورانه نانوتکنولوژی در طب نظامی: مروری بر کاربردها، چشم اندازها، چالش‌ها و ریسک‌ها

زهرا حامی[1*]

[1] *مرکز تحقیقات سم شناسی، دانشگاه علوم پزشکی آجا، تهران، ایران*

چکیده

نانوتکنولوژی، با بهره‌گیری از مواد و سامانه‌های نانو مقیاس، تحولات چشمگیری در پزشکی مدرن ایجاد کرده و ظرفیت‌های نوینی برای طب نظامی فراهم می‌کند. نانومواد و نانوساختارها با ویژگی‌های منحصر به فردی مانند نسبت سطح به حجم بالا، فراهمی زیستی مناسب، قابلیت هدف‌گیری دارویی و همچنین پاسخ‌دهی به محرک‌ها امکان توسعه سامانه‌های دارورسانی پیشرفته، پانسمان‌های هوشمند، داربست‌های بازسازی بافت و حسگرهای زیستی پوشیدنی و کاشتنی را فراهم ساخته‌اند. در میدان‌های نبرد، کاربرد نانومواد شامل کنترل خونریزی، احیای مایعات، درمان و بازسازی زخم‌ها و سوختگی‌ها، مهندسی بافت استخوان، مدیریت آسیب‌های عصبی و درد، و پایش پزشکی پیشرفته می باشد. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، موانعی نظیر ارزیابی ایمنی بلندمدت، پایداری در شرایط عملیاتی، استانداردسازی تولید، چارچوب‌های نظارتی، حفاظت داده و نگرانی‌های اخلاقی و زیست‌محیطی محدودیت‌های استفاده عملی نانوفناوری در طب نظامی را شکل می‌دهند. این مقاله مروری، با تحلیل جامع کاربردهای نانوتکنولوژی در مراقبت‌های نظامی، چشم‌اندازها، فرصت‌ها و چالش‌های آتی این فناوری را مورد بررسی قرار می‌دهد و نشان می‌دهد که نانوتکنولوژی می‌تواند به‌عنوان یک فناوری تحول‌آفرین، بازتعریف مراقبت‌های پزشکی رزمی را رقم بزند.

کلیدواژه‌ها: نانوتکنولوژی، بندآورنده خونریزی، آسیب عصبی، مهندسی بافت.

*نویسنده مسئول: **زهرا حامی**. پست الکترونیک: hamiz1357@yahoo.com
دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۷

مقدمه

نانوتکنولوژی به پژوهش و توسعه فناوری در مقیاس نانو اطلاق می‌شود و شامل مفهوم‌سازی، طراحی، شکل‌دهی و استفاده از مواد، ابزارها و سیستم‌های کاربردی از طریق دستکاری ماده در سطح اتمی است؛ سطحی که در آن دست‌کم یکی از ابعاد ماده کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. اگرچه مفاهیم مهندسی در مقیاس نانو از دهه ۱۹۵۰ مطرح بوده‌اند، پیشرفت‌های چشمگیر در بهره‌گیری از این فناوری نوظهور از دهه ۱۹۹۰ به بعد، تحولات قابل توجهی در حوزه تشخیص و درمان ایجاد کرده است (۱).

ویژگی‌ها و عملکرد نانوذرات، به طور قابل توجهی با حالت توده‌ای (بالک) آن‌ها متفاوت است. کاهش اندازه به مقیاس نانو موجب افزایش حلالیت، افزایش نسبت سطح به جرم، بهبود خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی و سهولت در عملکردسازی می‌شود. این ویژگی‌ها افق‌های نوینی برای تشخیص، درمان و محافظت زیستی گشوده‌اند.

پیشرفت‌های اخیر در تولید انواع گوناگون نانومواد موجب گسترش کاربردهای آن‌ها در حوزه‌های مختلفی از جمله مراقبت‌های بهداشتی، فناوری‌های نانوبیوحسگری، حفاظت از محیط‌زیست و تصفیه هوا شده است. نانوتکنولوژی با فراهم‌سازی امکان افزایش کارایی درمانی، ارتقای سطح ویژه و فعال‌سازی سطحی، کاهش سمیت، بهبود هدف‌گیری دارویی، پاسخ‌پذیری به محرک‌های محیطی و افزایش فراهمی زیستی داروها، نقش مهمی در توسعه سامانه‌های نوین درمانی ایفا می‌کند. به‌کارگیری نانوتکنولوژی در زمینه‌هایی همچون ژن‌درمانی، توسعه واکسن‌ها، دارورسانی هدفمند به بافت‌های خاص ـ به‌ویژه در درمان سرطان ـ طراحی و ساخت ابزارهای حفاظتی و تشخیصی مبتنی بر نانومواد، تولید غشاهای زیست تقلید، ذرات شبه‌ویروسی و نانوماشین‌های مبتنی بر DNA، از جمله نمونه‌های برجسته کاربردهای نوین این فناوری به شمار می‌روند که افق‌های تازه‌ای را برای توسعه درمان‌های پیشرفته و کارآمدتر ترسیم می‌کنند (۲). در حوزه طب نظامی نیز، نانوتکنولوژی طی دو دهه اخیر به‌عنوان یک فناوری تحول‌آفرین مطرح شده است. محیط‌های عملیاتی نظامی غالباً با تهدیدهای پیچیده، شرایط محیطی دشوار، محدودیت منابع پزشکی و نیاز به مداخلات سریع و دقیق مواجه‌اند؛ بنابراین طب نظامی همواره به دنبال فناوری‌هایی است که بقای نیروها، کارایی عملیاتی و سلامت آن‌ها را ارتقا دهد. علاوه بر این، تهدیدهای جدید شامل حملات بیولوژیک، جنگ‌های هیبریدی، شرایط اقلیمی خاص و مأموریت‌های طولانی‌مدت در مناطق دورافتاده، نیازمند راهکارهایی برای تشخیص سریع، درمان مؤثر، ترمیم بافت‌های آسیب‌دیده و ارائه پشتیبانی پزشکی هوشمند هستند (۳).

نانومواد با ارائه سیستم‌هایی همچون نانوحامل‌های ضد میکروبی، نانوساختارهای بازسازی بافت، نانوژل‌های حساس به دما یا pH، حسگرهای نوری- الکترونیکی فوق‌حساس و منسوجات حرارتی هوشمند، به یکی از مؤثرترین ابزارها در ارتقای تاب‌آوری نیروها تبدیل شده‌اند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، کاربرد نانومواد در طب نظامی همچنان با چالش‌هایی مواجه است که شامل ارزیابی ایمنی بلندمدت، استانداردسازی فرایندها و ملاحظات اخلاقی و زیست‌امنیتی می‌شود. از این رو، مطالعات مروری گسترده برای تحلیل تحقیقات انجام شده، شناسایی فرصت‌ها و محدودیت‌ها ضروری بنظر می رسد.

هدف این مقاله مروری، ارائه بررسی جامع کاربردهای پزشکی نانومواد و نانوساختارها در طب نظامی، تحلیل چشم‌اندازهای نوین، چالش‌ها و همچنین فرصت‌های آتی این فناوری در حوزه رزم است؛ حوزه‌ای که انتظار می‌رود طی سال‌های آینده به یکی از محورهای اصلی تحول طب نظامی تبدیل شود.

طبقه‌بندی نانومواد و نانوساختارهای مورد استفاده در پیشگیری، تشخیص و درمان

نانوفناوری تحولات عمده‌ای در حوزه پزشکی ایجاد کرده و بسترهای متنوعی برای پیشگیری، تشخیص و درمان فراهم آورده است. در میان انواع مختلف نانوذرات، چندین نوع به دلیل خواص فیزیکوشیمیایی منحصربه‌فرد، زیست‌سازگاری بالا و قابلیت عملکردی برجسته، اهمیت ویژه‌ای یافته‌اند. نانوذرات لیپیدی و لیپوزوم‌ها سیستم‌های وزیکولی متشکل از لیپیدها هستند. نانوذرات لیپیدی مدرن که برای انتقال اسیدهای نوکلئیک طراحی شده‌اند، معمولاً در محدوده ۵۰ تا ۱۵۰ نانومتر قطر دارند. واکسن‌های مبتنی بر نانوذرات لیپیدی از جمله رویکردهای نانوتکنولوژی در حوزه پیشگیری هستند. نانوواکسن‌ها به‌دلیل القای پاسخ ایمنی قوی، امکان طراحی سریع، پایداری بالاتر و کاهش نیاز به دوزهای مکرر، برای حفاظت نیروهای نظامی در برابر بیماری‌های عفونی نوظهور و تهدیدات بیولوژیک اهمیت ویژه‌ای دارند. این ویژگی‌ها به‌ویژه در محیط‌های عملیاتی، مأموریت‌های طولانی‌مدت و شرایطی که دسترسی به زیرساخت‌های واکسیناسیون محدود است، کاربرد بالینی نانوواکسن‌ها را در طب نظامی برجسته می‌سازد. واکسن‌های mRNA مبتنی بر نانوذرات لیپیدی، مانند واکسن‌های mRNA کووید-۱۹، نمونه موفقی از نانوواکسن‌ها هستند که با حفاظت از آنتی‌ژن و افزایش کارایی ارائه آن به سلول‌های ایمنی، پاسخ ایمنی مؤثر و سریع ایجاد می‌کنند و به‌عنوان الگویی قابل تعمیم برای کاربردهای نظامی مطرح‌اند.

انتقال siRNA و الیگونکلئوتیدها و همچنین دارورسانی سیستمیک نیز از جمله کاربردهای دیگر نانوذرات لیپیدی می‌باشد. مزایای کلیدی آن‌ها شامل زیست‌سازگاری بالا، حفاظت از اسید نوکلئیک در برابر تخریب و قابلیت تولید در مقیاس بالینی می‌باشد (۴).

نانوذرات پلیمری از پلیمرهای طبیعی یا سنتتیک مانند پلی‌لاکتیک-کو-گلیکولیک اسید، مشتقات پلی اتیلن گلیکول و پلی‌کاپرولاکتون ساخته می‌شوند. کاربردهای آن‌ها شامل رهایش کنترل‌شده دارو، هدف‌گیری سلولی و حمل پروتئین، پپتید و ژن است. قابلیت تنظیم دقیق اندازه ذره، کنترل رهایش دارو و

زیست‌تخریب‌پذیری از مزایای اصلی آن‌ها هستند. با این حال، پیچیدگی تولید، پایداری و عامل دار کردن با لیگاندهای هدف گیری از چالش‌های مهم آن‌ها به شمار می‌آیند (۵).

نانوذرات فلزی و نیمه‌رسانا شامل نانوذرات طلا (AuNP)، نقره (AgNP) و نقاط کوانتومی (QDs) نظیر کادمیوم سلنید (CdSe) دارای خواص اپتیکی و سطحی منحصر به فرد هستند و در تصویربرداری، تشخیص، حسگرهای زیستی و درمان‌های فوتوترمال/فوتودینامیک کاربرد دارند. نانوذرات طلا به دلیل رزونانس پلاسمون سطحی و پایداری شیمیایی برجسته هستند (۶).

نانوذرات مغناطیسی از جمله نانوذرات سوپرپارامغناطیس اکسید آهن برای افزایش کنتراست در MRI، هدف‌گیری مغناطیسی، هیپرترمیا و دارورسانی مغناطیسی به کار می‌روند. قدرت مغناطیسی بالا و برخی کاربردهای بالینی از مزایا آن‌ها به شمار می‌آیند، اما کاربرد آن‌ها در بدن از لحاظ توزیع زیستی، پاک‌شدن از بدن و سمیت بلندمدت نیازمند توجه ویژه است (۷).

نانومواد کربنی دربرگیرنده لوله‌های کربنی تک جداره و چندجداره، گرافن و مشتقات آن و فولرن‌ها می‌باشند که خواص مکانیکی و الکترونیکی برجسته، سطح بزرگ و ظرفیت بالای دارورسانی دارند. کاربردها شامل دارورسانی و ژن‌رسانی، حسگرهای زیستی، مهندسی بافت، فعالیت ضد میکروبی و درمان‌های فوتوترمال است. با این حال، مشکلات زیست‌سازگاری، پاک‌شدن از بدن و سمیت سطحی از محدودیت‌های مهم آن‌ها هستند (۸).

نانوذرات سیلیکای مزو-متخلخل دارای منافذ منظم و ظرفیت بالای بارگیری دارو هستند. سطح‌سازی پاسخ‌محیطی به pH و آنزیم، امکان رهایش کنترل‌شده دارو را فراهم می‌کند و کاربردهای بالقوه‌ای در درمان سرطان و مالاریا به آن‌ها بخشیده است (۹).

دندریمرها ساختارهای شاخه‌دار سنتتیک با گروه‌های فعال سطحی متعدد هستند که در دارورسانی، ژن‌رسانی و تصویربرداری کاربرد دارند و قابلیت هدف‌گیری با تغییر سطح را فراهم می‌کنند (۱۰).

چارچوب‌های فلزی-آلی و نانوژل‌ها از جمله نانوساختارهای متخلخل و با ظرفیت بارگیری بالا هستند که می‌توانند رهایش کنترل شده دارو داشته باشند. نانوژل ها نیز، ژل‌های هیدروفیلی نانومتری با قابلیت رهایش کنترل‌شده دارو و کاربردهای موضعی و تزریقی می‌باشند (۱۱،۱۲).

نانوذرات زیستی و وزیکول‌های نانویی شامل وزیکول‌های سلولی و نانوذرات زیست تقلید از سلول‌ها منشأ گرفته یا با غشای سلولی پوشانده می‌شوند. این سیستم‌ها دارای هدف‌گیری ذاتی و کمترین ایمنی‌زایی هستند و در دارورسانی و ژن‌رسانی بالینی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۹).

رویکردهای نوآورانه نانوتکنولوژی در طب نظامی

نانوفناوری با بهره‌گیری از مواد و سامانه‌هایی در ابعاد نانومتری، ظرفیت‌های تحول‌آفرینی را برای ارتقای کارایی طب نظامی فراهم کرده است. این فناوری با ایجاد پلتفرم‌های دقیق برای پیشگیری، تشخیص، درمان و بازتوانی در شرایط میدان نبرد، می‌تواند پیامدهای آسیب‌های رزمی را کاهش دهد و آمادگی پزشکی نیروها را افزایش دهد. در حوزه پیشگیری، نانوواکسن ها با افزایش اثربخشی ایمنی، کاهش دوز مصرفی و پایداری بیشتر، نقش مهمی در حفاظت سلامت نیروهای نظامی ایفا می‌کنند و با ایجاد پاسخ ایمنی سریع‌تر و هدفمندتر، امکان مقابله مؤثر با تهدیدات زیستی و حفظ آمادگی رزمی در شرایط میدانی را فراهم می‌سازند. در حوزه تشخیص و پایش میدانی، نانوحسگرهای سریع و فوق‌حساس امکان شناسایی زودهنگام عوامل بیولوژیک، شیمیایی و پرتویی را در محیط‌های عملیاتی فراهم می‌آورند. در زمینه درمان و مراقبت از مجروحان، نانوحامل‌های دارویی هوشمند می‌توانند رهایش هدفمند و کنترل‌شده دارو را در بافت‌های آسیب‌دیده انجام دهند و زمان بهبود و نجات بیمار را کاهش دهند. همچنین، نانومواد مهندسی‌شده در پانسمان‌ها، داربست‌های ترمیمی و سامانه‌های ضدعفونی، فرایند ترمیم زخم‌های شدید، سوختگی‌ها و آسیب‌های ناشی از انفجار را تسریع می‌کنند. طراحی سطوح ضد میکروبی مبتنی بر نانوتکنولوژی نیز نقش مهمی در کاهش خطر ابتلا به عفونت در محیط‌های رزمی ایفا می‌کند.

به‌طور کلی، نانوپزشکی با ارائه رویکردهای نوآورانه در پیشگیری، تشخیص، درمان و توانبخشی، توانمندی آمادگی پزشکی نیروهای نظامی را افزایش داده و به‌عنوان یکی از فناوری‌های تحول‌آفرین در طب نظامی معاصر شناخته می‌شود. کاربردهای عملی نانوتکنولوژی در مراقبت از مجروحان جنگی را می‌توان در پنج حوزه اصلی دسته‌بندی کرد (شکل ۱). هدف این حوزه‌ها، مدیریت فوری تروما از لحظه وقوع آسیب تا انتقال به مراکز درمانی است.

شکل-۱. حوزه‌های کاربرد نانوتکنولوژی در مراقبت از مجروحان جنگی

کنترل خون‌ریزی و احیای مایعات

خونریزی غیرقابل کنترل همچنان شایع‌ترین علت مرگ در میدان نبرد است که قابل پیشگیری می‌باشد. براساس گزارش‌های وزارت دفاع ایالات متحده، تقریباً ۹۰ درصد مرگ‌های قابل پیشگیری در عملیات‌های عراق و افغانستان ناشی از خونریزی شدید بوده است. در عملیات‌های طولانی‌مدت و دور از مراکز درمانی پیشرفته، دسترسی به خون کامل یا پلاسما ممکن است تا چند روز امکان‌پذیر نباشد. بنابراین، توسعه جایگزین‌های مصنوعی خون با پایداری بالا، وزن سبک و قابلیت تزریق در شرایط صحرایی، یک اولویت راهبردی محسوب می‌شود. نانوتکنولوژی امکان طراحی حامل‌های اکسیژن و عوامل انعقادی در مقیاس نانو را فراهم کرده است که رفتار بیولوژیکی نزدیک‌تری به اجزای طبیعی خون دارند.

سامانه SynthoPlate

SynthoPlate یک پلاکت مصنوعی مبتنی بر نانولیپوزوم زیست‌سازگار با قطر ۲۰۰–۱۵۰ نانومتر است که با پپتیدهای اتصال‌یابنده به فون ویلبراند، کلاژن و گیرنده گلیکوپروتئینی GPIIb/IIIa پوشش‌دهی شده است تا چسبندگی و تجمع پلاکتی را تقلید کند. این سامانه به دلیل قابلیت لیوفیلیزه‌شدن و عمر مفید ۶ تا ۹ ماه، برای شرایط میدانی مناسب است. مطالعات حیوانی کاهش زمان خونریزی تا ۷۰ درصد و افزایش بقای ۷ روزه را نشان داده‌اند (۱۳،۱۴).

ErythroMer

ErythroMer یک گلبول قرمز مصنوعی مبتنی بر پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر با قطر حدود ۱۵۰ نانومتر است که حاوی هموگلوبین انسانی تغلیظ‌شده می‌باشد. این سامانه با شبیه‌سازی بار سطحی گلبول قرمز طبیعی، از حذف سریع توسط سیستم رتیکولواندوتلیال جلوگیری کرده و نیمه‌عمر گردش خونی حدود ۴۸ ساعت دارد. پایداری حرارتی تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و حفظ عملکرد در مدل شوک هموراژیک از مزایای آن است (۱۵).

$NanO_2$

$NanO_2$ یک حامل اکسیژن مبتنی بر نانوامولسیون پرفلوروکربنی با پوشش فسفولیپید و پلی اتیلن گلیکول است که پس از دریافت اکسیژن در ریه، آن را در بافت‌های هیپوکسیک آزاد می‌کند. نیمه‌عمر بیش از ۲۴ ساعت و امکان نگهداری به‌صورت پودر، این سامانه را برای کاربردهای رزمی مناسب می‌سازد (۱۶).

خون کامل مصنوعی

ساخت خون کامل مصنوعی که پایدار، لیوفیلیزه‌شونده، ایمن و قابل استفاده در شرایط جنگی و محیط‌های سخت باشد، یکی دیگر از اهداف تحقیقات نانوفناوری است. خون کامل در شرایط سرد تنها حدود یک ماه ماندگاری دارد (۲۱ روز در کیسه‌های حاوی محلول سیترات فسفات دکستروز و ۳۵ روز در کیسه‌های سیترات فسفات دکستروز آدنین–۱). به همین دلیل، علاقه‌مندی به تولید محصولی که بتواند بدون نیاز به زنجیره سرد در محیط‌های دورافتاده نگهداری شود و در دسترس نبودن خون کامل طبیعی، جایگزین آن باشد، افزایش یافته است. پیشرفت‌های اخیر در تولید گلبول‌های قرمز مصنوعی (ErythroMer)، پلاکت مصنوعی (SynthoPlate) و قابلیت لیوفیلیزه‌شدن، پژوهشگران را قادر ساخته است تا با ترکیب این سه جزء نانوساختار، یک خون مصنوعی سه‌جزئی طراحی کنند که بتواند جایگزین خون طبیعی گردد (۱۷).

مدیریت زخم و عفونت

مراقبت از زخم یکی از حوزه‌های کلیدی در استفاده از نانوفناوری و نانومواد مهندسی‌شده در پزشکی می‌باشد که به‌ویژه در کنترل، درمان و تسریع ترمیم زخم‌های پیچیده. پانسمان‌ها و بانداژها محور اصلی توسعه هستند و با وجود بیش از ۲,۰۰۰ محصول در بازار، اهمیت کاربردهای نوین نانو در مراقبت از زخم مشهود است. هدف اصلی مراقبت از زخم، تسهیل روند طبیعی ترمیم در چهار مرحله هموستاز، التهاب، تکثیر و بازسازی/ بلوغ است (۱۸) و نانوفناوری می‌تواند این فرآیند فیزیولوژیک را تسریع و بهینه‌سازی کند.

راهبردهای استفاده از نانومواد در ترمیم زخم

در این زمینه دو رویکرد اصلی وجود دارد (۴۱):

۱) نانومواد با ویژگی‌های درمانی ذاتی: برخی نانومواد به‌طور طبیعی خواص هموستاتیک، بازسازی بافت و ضدمیکروبی دارند و می‌توانند مستقیماً در پانسمان‌ها قرار داده شوند یا در مواد دیگر تعبیه شوند.

۲) نانومواد برای ساخت نانوحامل‌ها: نانومواد در این رویکرد برای ایجاد نانوحامل‌های دارویی به‌کار می‌روند که قادر به انتقال هدفمند عوامل درمانی به محل زخم هستند (۱۹).

بستن زخم و بانداژها

در شرایط میدان نبرد، نانومواد در حوزه‌های بستن زخم، بانداژها و پانسمان‌ها، کنترل عفونت و مراقبت از سوختگی‌ها استفاده می‌شوند.

نخ‌های بخیه نانویی: در این نخ ها، نانوفلزات و مواد زیست‌فعال به پلیمرهای نخ بخیه افزوده می‌شوند. دو روش اصلی افزودن نانومواد شامل الکتروریسی و پوشش‌دهی یا غوطه‌وری است. Xu و همکاران (۲۰) نشان دادند افزودن نانوذرات نقره و تریکلوسان به نانوالیاف الکتروریسی‌شده، فعالیت آنتی‌باکتریایی مؤثری علیه استافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیاکلی ایجاد می‌کند. نمونه‌های دیگر شامل نخ بخیه آنتی‌باکتریال پوشش‌داده شده با نانوذرات نقره و سفکسیم است (۲۱،۲۲).

چسب‌های بافتی و هیدروژل‌ها: چسب‌های سنتی غالباً از نظر چسبندگی و زیست‌سازگاری محدودیت هایی دارند. استفاده از نانوذرات Ag-lignin و سایر نانومواد در هیدروژل‌ها، واکنش‌های ردوکس فعال ایجاد و استحکام مکانیکی و قابلیت چسبندگی را افزایش می‌دهد (۲۳).

بانداژها و پانسمان‌های مبتنی بر نانومواد: در این حوزه، دو رویکرد اصلی شامل تقویت فعالیت‌های بیولوژیک و گسترش دامنه کاربرد است (۲۴). پانسمان‌های مصنوعی شامل فیلم‌ها، غشاها، فوم‌ها، ژل‌ها، کامپوزیت‌ها و اسپری‌ها می‌شوند. پلی‌ساکاریدهایی مانند کیتوزان و آلژینات، به‌ویژه در هیدروژل‌ها، نانوالیاف و فیلم‌ها، به دلیل زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری و ویژگی‌های زیست‌فعال، کاربرد گسترده دارند (۲۴–۲۶).

Acticoat FLEX 3 و NanoEx پانسمان‌های تجاری هستند که با نانوذرات نقره و ساختار زیست‌سازگار، زخم‌ها را ضدعفونی کرده، ترمیم پوست را سریع می‌کنند و برای سوختگی، زخم دیابتی، زخم پس از جراحی و فشار قابل استفاده هستند.

نانوالیاف الکتروریسی‌شده با تخلخل و آب‌دوستی ذاتی، تکثیر فیبروبلاست‌ها و بازسازی بافت را تقویت می‌کنند و ساختار نانومتخلخل آن‌ها امکان بارگذاری یکنواخت دارو و آزادسازی طولانی‌مدت را فراهم می‌کند (۲۴). مشتقات کیتوزان، مانند کربوکسی‌متیل‌کیتوزان، در تولید هیدروژل‌های تزریقی خودترمیم شونده مورد مطالعه هستند (۲۴).

پانسمان‌های هموستاتیک و پپتیدهای خودآراینده

محصولاتی مانند QuickClot Combat Gauze حاوی نانوذرات کائولین هستند که روند انعقاد خون را تسریع می‌کنند. پپتیدهای خودآراینده و نانوالیاف RADA16-I می‌توانند در کمتر از ۱۵ ثانیه لخته ایجاد کرده و در مدل‌های حیوانی مؤثر باشند (۲۷،۲۸). نانولوله‌های کربنی نیز در هیدروژل‌های انجمادی با جذب سریع خون و فعال‌سازی پلاکت‌ها به کار رفته‌اند (۲۷).

کنترل عفونت

زخم‌های باز در معرض محیط بوده و بیش از سایر بافت‌ها مستعد کلونیزه شدن توسط پاتوژن‌ها هستند. مطالعات نشان داده‌اند بیش از ۳۰ درصد از زخم‌های نبرد دچار عفونت می‌شوند. نانوفناوری نسبت به روش‌های ضد میکروبی سنتی مزایای قابل توجهی دارد، از جمله کاهش عوارض جانبی، افزایش تمرکز دارو در محل زخم، نفوذ بهتر به بیوفیلم‌ها و افزایش پایداری و نیمه‌عمر دارو (۲۹،۳۰). میسل‌های پلیمری، دندریمرها و نانوژل‌ها برای تحویل آنتی‌بیوتیک‌ها، پپتیدهای ضد میکروبی و نانوذرات فلزی استفاده می‌شوند (۳۱،۳۲). نانوذرات فلزی، به ویژه نقره، طلا، مس و اکسیدهای فلزی مانند اکسید روی (ZnO) و اکسید تیتانیوم (TiO_2) مکانیسم‌های متنوعی مانند تخریب غشا، اختلال در DNA و مهار سنتز پروتئین دارند و در پانسمان‌ها به‌کار می‌روند (۳۴–۳۲). ترکیب نانوذرات نقره با کیتوزان یا داروهایی مانند تتراسیکلین، اثربخشی ضدباکتریایی در لایه‌های عمیق بافت را افزایش می‌دهد (۳۲). پپتیدهای ضد میکروبی نیز اهداف داخل‌سلولی باکتری‌ها را مختل می‌کنند (۳۰).

مراقبت از سوختگی

سوختگی‌ها آسیب‌های پیچیده‌ای هستند که با از دست رفتن مایعات، عفونت و درد همراه‌اند (۳۵). در نیروهای نظامی، احتمال سوختگی بیش از دو برابر افراد غیرنظامی است و غالباً با انفجار مواد منفجره مرتبط است (۳۶). نانوفناوری در درمان سوختگی‌ها عمدتاً در زمینه کنترل عفونت، ترمیم زخم و مهندسی بافت کاربرد دارد. شش گروه نانومواد شامل نانوژل‌ها، کیتوزان، نانوامولسیون‌ها، نانوذرات لیپیدی، نانوذرات نقره و نانوالیاف برای مراقبت از سوختگی مطالعه شده‌اند (۲۹،۳۷،۳۸).

نانومواد ضدمیکروبی از جمله نانوژل‌ها و نانوذرات نقره رشد باکتری‌ها را مهار کرده و بازسازی بافت را تقویت می‌کنند. کیتوزان فعالیت فیبروبلاست‌ها، ماکروفاژها و لکوسیت‌ها را افزایش داده و به‌عنوان بستری برای فاکتورهای رشد و نانوذرات نقره عمل می‌کند (۳۷،۳۸). نانوامولسیون‌ها با اندازه ۲۰۰–۲۰ نانومتر، محیط آبی‌دوست و هسته آب‌گریز، لایه یکنواخت روی زخم ایجاد و باکتری‌های سوختگی را مهار می‌کنند (۲۹،۳۸،۳۹). نانولیپوزوم‌ها داروهای ضدعفونی، ضددرد و فاکتورهای رشد را مستقیم به سلول‌ها تحویل می‌دهند و ترمیم کلاژن و تشکیل ضمائم پوستی را افزایش می‌دهند (۲۹). نانوالیاف با ساختار مشابه کلاژن، محیطی شبیه ماتریکس خارج‌سلولی ایجاد کرده، رطوبت زخم را حفظ و تبادل گاز را تسهیل می‌کنند. نمونه برجسته پانسمان TuneCoat، نانوالیاف الکتروریسی شده را با داروهای ضددرد و نقره ترکیب کرده است (۴۰).

بازسازی و مهندسی بافت

مهندسی بافت و پزشکی بازساختی به توسعه جایگزین‌های بافتی برای درمان آسیب‌های گسترده تمرکز دارد و از ویژگی‌های زیستی مواد و سلول‌ها بهره می‌گیرد. برای طراحی موفق داربست‌های مهندسی بافت، سه مؤلفه اصلی لازم است: داربست‌ها (Scaffolds)، سلول‌های بنیادی و فاکتورهای رشد (۴۱).

داربست‌های نانوکامپوزیتی ساختارهای سه‌بعدی متخلخل هستند که سلول‌های بنیادی را جای داده و با تحریک تمایز و تکثیر سلولی، امکان رشد بافت جدید را فراهم می‌کنند. فاکتورهای رشد فرایندهای تمایز و تکثیر سلول‌ها را تنظیم می‌کنند. از آنجا که استخوان به‌طور طبیعی یک نانوکامپوزیت زیستی است، استفاده از نانوفناوری در طراحی داربست‌ها می‌تواند چسبندگی سلول‌ها و بازسازی بافت استخوان را تسهیل نماید. فناوری‌های مبتنی بر نانوذرات علاوه بر القای رشد استخوان، خواص ضدالتهابی و ضدباکتریایی ارائه می‌دهند و امکان چاپ سه‌بعدی بافت استخوان را فراهم می‌کنند، که منجر به کاهش جراحی‌های متعدد و کوتاه‌تر شدن زمان بهبود می‌شود.

مهندسی بافت استخوان

استخوان یک بافت همبند معدنی‌شده است که از سه نوع سلول استئوکلاست، استئوبلاست و استئوسیت و یک ماتریکس خارج‌سلولی دوفازی تشکیل شده است (۴۲). فیبرهای کلاژن نوع یک اسکلت بافت را شکل می‌دهند و مواد معدنی در آن رسوب می‌کنند؛ این فرایند توسط فاکتورهای رشد کنترل می‌شود و ترکیب اسکلت و مواد معدنی استحکام و تراکم استخوان را ایجاد می‌کند.

با تأمین جریان خون کافی، استخوان پتانسیل بازسازی خودبه خودی دارد، اما آسیب‌های شدید معمولاً نیازمند بازسازی با پیوند استخوان هستند.

نانوفناوری در مهندسی بافت استخوان اهمیت ویژه‌ای یافته است و پژوهش‌ها بر استفاده از فلزات، بیوسرامیک‌ها، پلیمرها و ترکیبات نانویی در داربست‌ها و رسانش هدفمند دارو متمرکز بوده‌اند. سه ویژگی اصلی نانوساختارهای زیستی که در بازسازی استخوان اهمیت دارند عبارت‌اند از: ویژگی‌های مکانیکی، زیست‌سازگاری و توانایی القای تشکیل استخوان جدید (۴۱).

داربست‌های مهندسی بافت استخوان

استخوان به‌طور طبیعی یک کامپوزیت با ساختارهای میکرو و نانومقیاس است که آن را برای استفاده از نانومواد در بازسازی بافت ایده‌آل می‌سازد. Lyons و همکاران (۴۳) نشان دادند که بیومواد نانوساختار عملکرد بهتری در بازسازی استخوان نسبت به مواد در مقیاس بزرگ دارند. هنگام طراحی داربست‌های استخوانی، چهار مؤلفه کلیدی باید مدنظر قرار گیرد: ترکیب شیمیایی، محرک‌های فیزیکی، معماری و ریزساختار داربست و سیگنال‌های بیوشیمیایی تنظیم‌کننده رشد و تمایز سلولی (۴۱). داربست‌ها سازه‌های سه‌بعدی متخلخل هستند که با فراهم‌سازی ریزمحیط مناسب، روند شکل‌گیری بافت استخوانی جدید را هدایت می‌کنند.

نانوساختارهای کلیدی در داربست‌های استخوان

نانوذرات سیلیکا، نانومواد کربنی، بیوسرامیک‌ها، داربست‌های نانوپلیمری، هیدروژل‌ها و نانوالیاف نانوساختارهایی هستند که در داربست‌های استخوانی بیشترین کاربرد را دارند. نانوذرات سیلیکا باعث تحریک رشد سلولی شده و حامل مؤثر مولکول‌های زیست‌فعال مانند دگزامتازون، فاکتورهای رشد و یون‌های معدنی می‌باشند (۴۱). نانومواد کربنی از جمله نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن با خواص مکانیکی و سطحی، تکثیر سلولی و تمایز استئوژنیک را افزایش می‌دهند (۴۴). بیوسرامیک‌ها شامل فسفات کلسیم، نانو–هیدروکسی‌آپاتیت و شیشه‌های زیست‌فعال بوده که فرآیند استئوژنز و رگ‌زایی را تقویت می‌کنند (۴۱). داربست‌های نانوپلیمری از پلیمرهای زیست‌سازگار مانند پلی ال– لاکتیک اسید، پلی کاپرولاکتون، پلی ال– گلیکولیک اسید و کیتوزان ساخته شده و از مسیرهای متابولیک طبیعی جذب می‌شوند (۴۱). هیدروژل‌ها، موادی با توانایی جذب آب بوده که محیط مناسب برای چسبندگی، تکثیر و تمایز سلولی فراهم می‌کنند و شامل آگاروز، آلژینات، ژلاتین و پلی وینیل الکل می باشند (۴۱). نانوالیاف نیز با نسبت سطح به حجم بالا و تخلخل زیاد، محیطی شبیه ماتریکس خارج‌سلولی ایجاد کرده و رفتارهای سلولی مطلوب از جمله چسبندگی، تکثیر و تمایز را القا می‌کنند (۴۵).

نانومواد مکمل

فلزات و اکسیدهای فلزی شامل منیزیوم و آلیاژهای آن، تیتانیوم، طلا، نقره و مس؛ لیپوزوم‌ها و همچنین نانوساختارهای DNA شامل پلاسمید و DNA تتراهدرال برای بهبود خواص داربست‌ها و موفقیت در بازسازی استخوان استفاده می‌شوند (۴۱، ۴۷–۴۴).

کنترل آسیب‌های عصبی و درد

پرسنل نظامی در میدان‌های نبرد در معرض موج‌های ضربه‌ای ناشی از انفجار، آسیب‌های تروماتیک مغزی (TBI) و آسیب‌های عصبی محیطی قرار دارند. یکی از رویکردهای نوین برای ارزیابی آسیب عصبی، پایش نشانگرهای زیستی خون است. پروتئین‌های سیستم عصبی مرکزی (CNS) مانند زنجیره سبک نوروفیلامنت (Nf-L)، تائو (Tau)، پروتئین فیبریلاری گلایال اسیدی (GFAP)، اوبیکویتین کاربوکسی‌ترمینال هیدرولاز L1 (UCH-L1) و پپتیدهای آمیلوئیدی با آسیب تروماتیک مغزی مرتبط هستند. افزایش سطح Nf-L و Tau، که فراوان‌ترین پروتئین‌های اسکلت سلولی CNS و سیستم عصبی محیطی هستند، با آسیب مغزی، بیماری‌های عصبی و ضربه‌های مکرر مغزی همبستگی دارد. سنجش کمی این نشانگرهای سرمی، امکان ارزیابی دقیق آسیب و پایش روند درمان را فراهم می‌کند (۴۸).

نانوفناوری در مدیریت درد ناشی از آسیب‌های عصبی

نانوفناوری پزشکی نقش کلیدی در بازطراحی راهبردهای مدیریت درد دارد. استفاده از نانوذرات امکان بهبود فارماکوکینتیک و فارماکودینامیک داروها از طریق کنترل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (اندازه، مورفولوژی، بار سطحی و ظرفیت بارگذاری) را فراهم می‌کند. ویژگی‌های کلیدی نانوحامل‌ها در مدیریت درد شامل موارد زیر می باشد: هدف‌گیری اختصاصی گیرنده‌ها و مسیرهای انتقال درد، تجمع موضعی در کانون درد، رهایش کنترل‌شده و طولانی مدت دارو، کاهش نیاز به دوزهای بالا و کاهش عوارض جانبی، نانوسامانه‌ها امکان تجویز دارو از مسیرهای متنوع شامل خوراکی، استنشاقی، وریدی، داخل‌نخاعی و ترانس‌درمال را فراهم کرده و چارچوب درمانی امیدبخشی در مدیریت درد ایجاد می‌کنند (۴۹).

سامانه‌های نانودارویی ضد درد

نانوفناوری با افزایش هدف‌گیری دارویی، کاهش دوزهای مورد نیاز، رهایش طولانی‌مدت و کاهش عوارض جانبی، چارچوبی نوین برای مراقبت‌های نظامی و پزشکی را در مدیریت درد با استفاده از نانوساختارهای دارویی فراهم می‌آورد. لیپوزوم‌ها و پلیمرها برای کپسوله‌سازی اوپیوئیدها، ایجاد رهایش طولانی‌مدت و کاهش سمیت سیستمیک استفاده می‌شوند. نمونه‌های تأیید شده شامل Depodur و Avinza می‌باشند (۴۹). نانوذرات لوئنکفالین–اسکوالن با هدف‌گیری واسطه‌های پیش‌التهابی، اثر ضد درد قوی‌تر از مورفین بدون ایجاد تحمل دارویی ایجاد می‌کنند (۴۹). نانوذرات سیلیکای مزومتخلخل حساس به pH با پوشش لیپوزوم پگیله و بارگذاری آگونیست گیرنده-δ اوپیوئیدی، هدف‌گیری اندوزومی و رهایش کنترل‌شده دارو را فراهم می آورند (۴۹). نانوذرات کتامین بر پایه پلی اتیلن گلیکول– پلی ال گلیکولیک اسید، زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر بوده و با ظرفیت دارویی بالا و همچنین

رهایش پایدار دارو می توانند نیمه‌عمر دارو را تا پنج روز افزایش می‌دهد (۵۰). نانوداروی LANA نیز داروی ضد درد غیراپیوئیدی با اثر طولانی است که سلول‌های درگیر در پاسخ‌های نوروایمنی مرتبط با آسیب اعصاب محیطی را هدف می‌گیرد. یک دوز LANAبیش از ۷۲ ساعت تسکین درد ایجاد می‌کند و اثر کلی دارو را تا ۱۰۰ برابر افزایش می‌دهد (۵۱).

پایش و تشخیص‌های پزشکی پیشرفته

پایش دقیق نیروهای زخمی در مراقبت‌های رزمی، یکی از مهم‌ترین عناصر مدیریت سلامت در میدان نبرد است. فناوری‌های نوین شامل حسگرهای زیستی، نانوذرات و همچنین بیوالکترونیک، امکان نظارت لحظه‌ای و جامع بر وضعیت فیزیولوژیک، زخم‌ها، عملکرد روانی و تهدیدهای محیطی (گرما، ارتفاع، عفونت و تهدیدهای شیمیایی، بیولوژیکی و هسته‌ای) را فراهم می‌کنند. این پایش بی‌وقفه، چرخه بازخوردی ایجاد می‌کند که از زمان آسیب اولیه تا رسیدن به مراکز درمانی ادامه دارد و تصمیم‌گیری‌های درمانی را بهینه می‌کند.

در این زمینه، نانوحسگرها می‌توانند پارامترهایی مانند ضربان قلب، سطح اکسیژن خون، کیفیت خواب، گلوکز و حتی حالات روانی افراد را پایش کنند. دستگاه‌های پوشیدنی شامل ساعت‌ها، عینک‌ها، حلقه‌ها و هدست‌ها نیز با بهره‌گیری از فناوری نانو، از لحاظ حساسیت، دقت و سهولت استفاده طولانی‌مدت پیشرفت‌هایی داشته‌اند (۵۲).

نانوسنسورهای کاشتنی

نانوسنسورهای کاشتنی در بافت‌ها جاسازی می‌شوند و فرایندهای فیزیولوژیک و نشانگرهای زیستی را به‌طور مداوم پایش می‌کنند. پیشرفت‌های نانوتکنولوژی، امکان کاهش واکنش‌های منفی بدن و افزایش دقت و طول عمر حسگرها را فراهم کرده است. این حسگرها می‌توانند دارای نانولوله‌های کربنی، گرافن یا ذرات طلا باشند که به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود مانند کشسانی، ساختار متخلخل و پایداری شیمیایی، عملکرد حسگرها را بهبود می‌بخشند (۵۳).

نانو حسگرهای انعطاف‌پذیر و پوشیدنی

حسگرهای کشسان و انعطاف‌پذیر، با حرکات طبیعی بدن هماهنگ شده و پایش زیستی دقیق، راحت و کارآمدی فراهم می‌کنند. این حسگرها برای کاربردهای پوشیدنی و کاشتنی در پزشکی پیشرفته و مراقبت‌های رزمی بسیار مناسب هستند (۵۴).

سیلیکون رایج‌ترین بستر حسگرها در مقیاس میکرو و نانو است، اما محدودیت‌هایی مانند انعطاف‌پذیری پایین، وابستگی به دما، نویز بالا و سازگاری زیستی محدود دارد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، محققان از نانومواد مهندسی‌شده مانند نانولوله‌های کربنی، گرافن، کربن بلک و ذرات طلا استفاده می‌کنند. ویژگی‌های ذاتی این نانومواد شامل کشسانی، ساختار متخلخل، تثبیت آنزیم‌ها و افزایش کارایی کاتالیز، عملکرد و طراحی حسگرهای الکتروشیمیایی پوشیدنی را بهبود می‌بخشد. پلیمرهای رسانا نیز به عنوان مواد پیشرو در توسعه حسگرهای انعطاف‌پذیر و پوشیدنی شناخته می‌شوند (۵۵).

چشم‌اندازهای آینده نانوتکنولوژی در طب نظامی

با توجه به سرعت شتابان توسعه نانوفناوری در مراقبت از مصدومان رزمی، انتظار می‌رود طی یک دهه آینده طب نظامی دستخوش یک بازتعریف بنیادین شود. نانوتکنولوژی در تمام ابعاد مراقبت نظامی از نقطه وقوع آسیب تا فاز مراقبت طولانی‌مدت در میدان نبرد در حال ایجاد تحول ساختاری است، به‌ویژه در کنترل خونریزی، احیای مایعات بدن، ترمیم بافت، مدیریت عفونت و پایش پیشرفته زیستی. همانطور که در این مقاله بحث شد برخی چشم‌اندازهای کلیدی عبارت‌اند از: ۱. ظهور جایگزین‌های کامل خون و سیستم‌های احیاگر هوشمند، ۲. پانسمان‌ها و پوشش‌های هوشمند با قابلیت تشخیصی و درمانی، ۳. بازسازی و مهندسی بافت در محل حادثه، ۴. تشخیص و مداخله فوق‌سریع در آسیب‌های مغزی، و ۵. توسعه نانو برای پایش مداوم نشانگرهای حیاتی، التهاب، کم‌آبی، خستگی و مواجهه با عوامل زیستی و شیمیایی.

چالش‌های پیش‌رو در کاربرد نانوتکنولوژی در طب نظامی

با وجود پیشرفت‌های سریع، چندین عامل کلیدی مانع انتقال کامل نانوفناوری از فاز تحقیقاتی به فاز عملیاتی در محیط‌های نظامی است.

۱. عدم قطعیت‌های ایمنی، زیست‌سازگاری و سمیت بلندمدت: مطالعات متعدد نشان می‌دهد که نانوذرات به دلیل اندازه کوچک و واکنش‌پذیری بالا می‌توانند در بافت‌ها تجمع یابند، استرس اکسیداتیو و التهاب ایجاد کنند، به DNA، غشاء سلول یا ارگان‌ها آسیب وارد کنند، و حتی از سد خونی–مغزی عبور کرده و خطرات نوروتوکسیک ایجاد کنند. افزون بر این، موارد سمیت کبدی، کلیوی و عصبی در نمونه‌های بالینی مرتبط با نانوذرات اکسید آهن گزارش شده است.

۲. چالش در شرایط عملیاتی: دما، رطوبت، زمان نگه‌داری: برخی گزارش ها حاکی است که بسیاری از نانومحصولات درمانی در برابر شرایط سخت میدانی مثل گرمای شدید، رطوبت و دوره‌های نگهداری طولانی پایدار نیستند و این موضوع یک مانع مهم برای کاربرد عملی در میدان نبرد محسوب می‌شود.

۳. محدودیت‌های تولید انبوه: پیچیدگی فرایند ساخت، هزینه بالای تولید نانوفرمولاسیون‌ها، مشکلات کنترل یکنواختی در مقیاس صنعتی، و نبود زیرساخت‌های استاندارد برای تولید انبوه نانوفرآورده‌ها از جمله محدودیت‌های تولید انبوه نانومواد است.

۴. ابهامات نظارتی و مسیر دشوار تأیید محصول: از بزرگ ترین موانع کاربرد بالینی نانومواد و نانوساختارها می توان به نبود چارچوب‌های نظارتی منسجم برای نانوداروها و نانوسنسورها، تفاوت استانداردها بین سازمان‌های نظامی، FDA (سازمان غذا و داروی آمریکا)، EMA (آژانس دارویی اروپا) و نهادهای ملی، و همچنین ضعف داده‌های سم‌شناسی بلندمدت اشاره کرد.

۵. چالش‌های امنیت سایبری و حفاظت داده در نانوسنسورها: نانوحسگرها که داده‌های زیستی نظامیان را جمع‌آوری می‌کنند نیازمند محافظت پیشرفته در برابر نفوذ، شنود، یا دستکاری اطلاعات هستند. امنیت و حریم‌خصوصی یکی از نقاط آسیب‌پذیر در پزشکی مبتنی بر نانوحسگرهای متصل به شبکه است.

۶. نگرانی‌های اخلاقی و زیست‌محیطی: رهایش نانوذرات به محیط‌های عملیاتی یا بیمارستانی، ایجاد مقاومت میکروبی ناشی از نانوذرات فلزی، و پیامدهای نامشخص بر اکوسیستم در مقالات به عنوان چالش‌های مهم اخلاقی و زیست‌محیطی مطرح شده‌اند.

ریسک‌های بالقوه استفاده از نانوتکنولوژی در طب نظامی

ریسک‌های بیولوژیک و ایمنی فردی: این ریسک‌ها شامل نفوذ نانوذرات به ارگان‌های حیاتی و ایجاد سمیت تجمعی؛ تحریک پاسخ‌های ایمنی غیرقابل پیش‌بینی؛ و ایجاد التهاب مزمن و اختلالات ژنتیکی ناشی از ROS می‌باشند.

ریسک خطا یا خرابکاری در نانوسنسورها: خطای اندازه‌گیری در شرایط رزمی؛ هک‌شدن یا دستکاری داده‌های پزشکی؛ و به‌خطرافتادن تصمیمات بالینی بر پایه داده‌های آلوده، نتیجه خطا یا خرابکاری در نانوسنسورها می‌باشد.

ریسک استفاده دشمن از فناوری‌های مشابه: از آنجا که نانوفناوری یک حوزه بین رشته‌ای است، امکان به‌کارگیری آن در حوزه‌های بیولوژیک، اختلال عملکرد حسی/شناختی، یا سامانه‌های نفوذناپذیر تشخیص وجود دارد.

ریسک وابستگی لجستیکی: در میدان نبرد، هرگونه اختلال در زنجیره تأمین نانوداروها یا پوشیدنی‌های نانویی می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری برای عملیات درمانی داشته باشد.

نتیجه‌گیری

استفاده از فناوری‌های نوین در مراقبت های رزمی بسیار حائز اهمیت است. محیط‌های دشوار و خطرناک میدان نبرد، چالش‌های منحصر به فردی برای ارائه مراقبت پزشکی ایجاد می‌کنند و اغلب نیازمند راهکارهای نوآورانه و فناوری‌های پیشرفته هستند که نانوتکنولوژی یکی از آن‌ها به‌شمار می‌رود. نانوتکنولوژی ظرفیت آن را دارد که طب نظامی را به مرحله‌ای کاملاً جدید وارد کند؛ مرحله‌ای که در آن تشخیص سریع، مداخله هوشمند، بازسازی بافت در محل حادثه، و پایش لحظه‌ای نظامیان، به یک استاندارد عملی تبدیل شود. با این حال، پیشرفت این حوزه به‌شدت وابسته به مدیریت ریسک، توسعه چارچوب‌های نظارتی، تولید پایدار، و استانداردسازی ایمنی زیستی است.

نکات بالینی کاربردی برای جوامع نظامی

- نانوتکنولوژی می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای مراقبت‌های پزشکی نظامی به‌ویژه در میدان نبرد ایفا کند. سامانه‌های نانومقیاس بندآورنده خونریزی و حامل‌های اکسیژن مصنوعی در کاهش مرگ‌ومیر اهمیت بالینی دارند. پانسمان‌ها و داربست‌های مبتنی بر نانومواد با خواص ضدمیکروبی و بازسازی‌کننده، ترمیم زخم‌ها و سوختگی‌های ناشی از عملیات رزمی را تسریع می‌کنند. نانوداروهای ضد درد با رهایش کنترل‌شده، امکان مدیریت مؤثر درد و آسیب‌های عصبی را همراه با کاهش عوارض جانبی فراهم می آورند. همچنین نانوحسگرهای پوشیدنی و کاشتنی امکان پایش مداوم وضعیت فیزیولوژیک نیروها و بهبود تصمیم‌گیری بالینی در شرایط عملیاتی را امکان پذیر می‌سازند.

تضاد منافع: نویسنده تصریح می‌کند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

منابع

1. Singh H, Kaur K. Role of nanotechnology in research fields: Medical sciences, military & tribology-A review on recent advancements, grand challenges and perspectives. Materials Today: Proceedings. 2023. doi:10.1016/j.matpr.2023.02.061
2. Paul S, Mukherjee S, Banerjee P. Recent advancement in nanomaterial-encapsulated drug delivery vehicles for combating cancer, COVID-19, and HIV-like chronic diseases. Materials Advances. 2023;4(9):2042-61. doi:10.1039/D2MA01075E
3. Parate BA. Nanoscience and Nanotechnology in Military and Defence Strategies. Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa. 2025;16. doi:10.5604/01.3001.0055.1524
4. Chaudhary N, Weissman D, Whitehead KA. mRNA vaccines for infectious diseases: principles, delivery and clinical translation. Nature reviews Drug Discovery. 2021;20(11):817-38. doi:10.1038/s41573-021-00283-5
5. Hami Z, Amini M, Ghazi-Khansari M, Rezayat SM, Gilani K. Doxorubicin-conjugated PLA-PEG-Folate based polymeric micelle for tumor-targeted delivery: Synthesis and in vitro evaluation. DARU Journal of Pharmaceutical Sciences. 2014;22(1):30. doi:10.1186/2008-2231-22-30
6. Georgeous J, AlSawaftah N, Abuwatfa WH, Husseini GA. Review of gold nanoparticles: synthesis, properties, shapes, cellular uptake, targeting, release mechanisms and applications in drug delivery and therapy. Pharmaceutics. 2024;16(10):1332. doi:10.3390/pharmaceutics16101332
7. Ghazi R, Ibrahim TK, Nasir JA, Gai S, Ali G, Boukhris I, et al. Iron oxide based magnetic

nanoparticles for hyperthermia, MRI and drug delivery applications: a review. RSC Advances. 2025;15(15):11587-616. doi:10.1039/D5RA00728C
8. Nabizadeh H, Feyzi B, Ahmad Salarian A, Reza Abtahi S, Mohammadi A, Hami Z. Electrochemical sensing platform based on graphene oxide-chitosan for simultaneous determination of some antihypertensive drugs. Electroanalysis. 2023;35(1): e202200022. doi:10.1002/elan.202200022
9. Lan J. Overview of application of nanomaterials in medical domain. Contrast Media & Molecular Imaging. 2022;2022(1):3507383. doi:10.1155/2022/3507383
10. Wang J, Li B, Qiu L, Qiao X, Yang H. Dendrimer-based drug delivery systems: History, challenges, and latest developments. Journal of Biological Engineering. 2022;16(1):18. doi:10.1186/s13036-022-00298-5
11. Dousti M, Golmohamadpour A, Hami Z, Jamalpoor Z. Ca-AlN MOFs-loaded chitosan/gelatin scaffolds; a dual-delivery system for bone tissue engineering applications. Nanotechnology. 2024;35(14):145101. doi:10.1088/1361-6528/ad0ef4
12. Abasalta M, Zibaseresht R, Yousefi Zoshk M, Foroutan Koudehi M, Irani M, Hami Z. Simultaneous loading of clarithromycin and zinc oxide into the chitosan/gelatin/polyurethane core–shell nanofibers for wound dressing. Journal of Dispersion Science and Technology. 2023;44(14): 2664-74. doi:10.1080/01932691.2022.2120892
13. Hickman DA, Pawlowski CL, Shevitz A, Luc NF, Kim A, Girish A, et al. Intravenous synthetic platelet (SynthoPlate) nanoconstructs reduce bleeding and improve 'golden hour'survival in a porcine model of traumatic arterial hemorrhage. Scientific Reports. 2018;8(1):1-4. doi:10.1038/s41598-018-21384-z
14. Shukla M, Sekhon UD, Betapudi V, Li W, Hickman DA, Pawlowski CL, et al. In vitro characterization of SynthoPlate™(synthetic platelet) technology and its in vivo evaluation in severely thrombocytopenic mice. Journal of Thrombosis and Haemostasis. 2017;15(2):375-87. doi:10.1111/jth.13579
15. Zaleski A. There will be blood. Science. 2024; 385(6704):16-20. doi:10.1126/science.adr4067
16. Johnson JL, Unger E. Dodecafluoropentane emulsion as an oxygen therapeutic. Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology. 2024;52(1):462-75. doi:10.1080/21691401.2024.2402908
17. Lauby RS, Johnson SA, Meledeo MA, Bynum J, Schauer SG. A Scoping Review of Promising Alternative Blood Products for Prolonged Field Care. Medical Journal, US Army Medical Center of Excellence (MEDCoE). 2022.
18. Alven S, Nqoro X, Aderibigbe BA. Polymer-based materials loaded with curcumin for wound healing applications. Polymers. 2020;12(10):2286. doi:10.3390/polym12102286
19. Stoica AE, Chircov C, Grumezescu AM. Nanomaterials for wound dressings: an up-to-date overview. Molecules. 2020;25(11):2699. doi:10.3390/molecules25112699
20. Xu L, Liu Y, Zhou W, Yu D. Electrospun medical sutures for wound healing: A review. Polymers. 2022;14(9):1637. doi:10.3390/polym14091637
21. Chittratan P, Detsri E, Chalitangkoon J, Mathaweesansurn A, Monvisade P. Antimicrobial nanolayer films of chloroxylenol–carboxyethylchitosan–modified silver nanoparticles for enhanced surgical suture performance. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2024;693:133957. doi:10.1016/j.colsurfa.2024.133957
22. Alirezaie AA, Dadpay M, Barati M, Molamirzaie A. Silk suture reinforced with Cefixime nanoparticles using polymer hydrogel (CFX@ PVA); Preparation, Bacterial resistance and Mechanical properties. Nanomed Res J. 2018;3(3):133-9. doi:10.22034/nmrj.2018.03.003
23. Yang Q. Recent developments of nanotechnology in tissue adhesives. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2021;714 (3):032089. doi:10.1088/1755-1315/714/3032089
24. Shen S, Chen X, Shen Z, Chen H. Marine polysaccharides for wound dressings application: an overview. Pharmaceutics. 2021;13(10):1666. doi:10.3390/pharmaceutics13101666
25. Aloma KK, Sukaryo S, Fahlawati NI, Dahlan K, Oemar S. Synthesis of Nanofibers from Alginate-Polyvinyl Alcohol using Electrospinning Methods. Macromolecular Symposia. 2020;391(1):1900199. doi:10.1002/masy.201900199
26. Angel N, Li S, Yan F, Kong L. Recent advances in electrospinning of nanofibers from bio-based carbohydrate polymers and their applications. Trends in Food Science & Technology. 2022; 120:308-24. doi:10.1016/j.tifs.2022.01.003
27. Peng HT. Hemostatic agents for prehospital hemorrhage control: a narrative review. Military Medical Research. 2020;7(1):13. doi:10.1186/s40779-020-00241-z
28. Jamal L, Saini A, Quencer K, Altun I, Albadawi H, Khurana A, et al. Emerging approaches to pre-hospital hemorrhage control: a narrative review. Annals of Translational Medicine. 2021;9(14):1192. doi:10.21037/atm-20-5452
29. Huang R, Hu J, Qian W, Chen L, Zhang D. Recent advances in nanotherapeutics for the treatment of burn wounds. Burns & Trauma. 2021;9:tkab026. doi:10.1093/burnst/tkab026
30. Pant A, Mackraj I, Govender T. Advances in sepsis diagnosis and management: a paradigm shift towards nanotechnology. Journal of Biomedical Science. 2021;28(1):6. doi:10.1186/s12929-020-00702-6
31. Wang Y, Sun H. Polymeric nanomaterials for efficient delivery of antimicrobial agents. Pharmaceutics. 2021;13(12):2108. doi:10.3390/pharmaceutics13122108
32. Salimi F, Mohammadipanah F. Nanomaterials versus the microbial compounds with wound healing property. Frontiers in Nanotechnology. 2021;2: 584489. doi:10.3389/fnano.2020.584489
33. Mihai MM, Dima MB, Dima B, Holban AM. Nanomaterials for wound healing and infection control. Materials. 2019;12(13):2176. doi:10.3390/ma12132176

34. Pormohammad A, Monych NK, Ghosh S, Turner DL, Turner RJ. Nanomaterials in wound healing and infection control. Antibiotics. 2021;10(5):473. doi:10.3390/antibiotics10050473
35. Chen GY, Chang CP, Wang PH. Burn wound and therapeutic challenge. Journal of the Chinese Medical Association. 2019;82(10):748-9. doi:10.1097/jcma.0000000000000172
36. Lairet JR, Bebarta VS, Burns CJ, Lairet KF, Rasmussen TE, Renz EM, et al. Prehospital interventions performed in a combat zone: a prospective multicenter study of 1,003 combat wounded. Journal of Trauma and Acute Care Surgery. 2012;73(2):S38-42. doi:10.1097/TA.0b013e3182606022
37. Souto EB, Ribeiro AF, Ferreira MI, Teixeira MC, Shimojo AA, Soriano JL, et al. New nanotechnologies for the treatment and repair of skin burns infections. International Journal of Molecular Sciences. 2020;21(2):393. doi:10.3390/ijms21020393
38. Jahromi MA, Zangabad PS, Basri SM, Zangabad KS, Ghamarypour A, Aref AR, et al. Nanomedicine and advanced technologies for burns: preventing infection and facilitating wound healing. Advanced Drug Delivery Reviews. 2018;123:33-64. doi:10.1016/j.addr.2017.08.001
39. Dolgachev VA, Ciotti S, Liechty E, Levi B, Wang SC, Baker Jr JR, et al. Dermal nanoemulsion treatment reduces burn wound conversion and improves skin healing in a porcine model of thermal burn injury. Journal of Burn Care & Research. 2021;42(6):1232-42. doi:10.1093/jbcr/irab118
40. John JV, McCarthy A, Karan A, Xie J. Electrospun nanofibers for wound management. ChemNanoMat. 2022;8(7):e202100349. doi:10.1002/cnma.202100349
41. Mirvic N, Vranic E, Hadziabdic J, Elezovic A, Hindija L. The Application of Nanotechnology in Constructing Scaffolds for Bone Tissue Engineering. InInternational Conference on Medical and Biological Engineering. Cham: Springer International Publishing. 2021. pp. 734-743. doi:10.1007/978-3-030-73909-6_83
42. Ansari M. Bone tissue regeneration: biology, strategies and interface studies. Progress in Biomaterials. 2019;8(4):223-37. doi:10.1007/s40204-019- 00125-z
43. Lyons JG, Plantz MA, Hsu WK, Hsu EL, Minardi S. Nanostructured biomaterials for bone regeneration. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2020;8:922. doi:10.3389/fbioe
44. Jampilek J, Placha D. Advances in use of nanomaterials for musculoskeletal regeneration. Pharmaceutics. 2021;13(12):1994. doi:10.3390/pharmaceutics13121994
45. Qiao K, Xu L, Tang J, Wang Q, Lim KS, Hooper G, et al. The advances in nanomedicine for bone and cartilage repair. Journal of Nanobiotechnology. 2022;20(1):141. doi:10.1186/s12951-022-01342-8
46. Burdușel AC, Gherasim O, Andronescu E, Grumezescu AM, Ficai A. Inorganic nanoparticles in bone healing applications. Pharmaceutics. 2022; 14(4):770. doi:10.3390/ pharmaceutics14040770
47. Ma W, Zhan Y, Zhang Y, Mao C, Xie X, Lin Y. The biological applications of DNA nanomaterials: current challenges and future directions. Signal Transduction and Targeted Therapy. 2021;6(1):351. doi:10.1038/s41392-021-00727-9
48. Boutte AM, Thangavelu B, LaValle CR, Nemes J, Gilsdorf J, Shear DA, et al. Brain-related proteins as serum biomarkers of acute, subconcussive blast overpressure exposure: a cohort study of military personnel. PLoS One. 2019;14(8):e0221036. doi:10.1371/journal.pone.0221036
49. Bhansali D, Teng SL, Lee CS, Schmidt BL, Bunnett NW, Leong KW. Nanotechnology for pain management: Current and future therapeutic interventions. Nano Today. 2021; 39:101223. doi:10.1016/j.nantod.2021.101223
50. Han FY, Liu Y, Kumar V, Xu W, Yang G, Zhao CX, et al. Sustained-release ketamine-loaded nanoparticles fabricated by sequential nanoprecipitation. International journal of pharmaceutics. 2020; 581:119291. doi:10.1016/j.ijpharm.2020.119291
51. USAMRMC. Long-Acting Nonopioid Analgesic (LANA) Nanomedicine for Rapid, Single-Dose, Sustained Pain Control and Rehabilitation Support After Neuromusculoskeletal Injury. Congressionally Directed Medical Research Programs, 2020.
52. Bird DT, Ravindra NM. Additive manufacturing of sensors for military monitoring applications. Polymers. 2021;13(9):1455. doi:10.3390/polym13091455
53. Profusa, Inc. Our Vision. Available from: https://profusa.com/ourvision/ [accessed 13 June 2022]
54. Das CM, Kang L, Ouyang Q, Yong KT. Advanced low-dimensional carbon materials for flexible devices. InfoMat. 2020;2(4):698-714. doi:10.1002/inf2.12073
55. Raza T, Qu L, Khokhar WA, Andrews B, Ali A, Tian M. Progress of wearable and flexible electrochemical biosensors with the aid of conductive nanomaterials. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2021;9:761020. doi:10.3389/fbioe.2021.761020