

The Effect of Stimuli-Responsive Smart Nanoparticles in the Treatment of Central Nervous System Tumors

Azadeh Mohammadgholi*

Department of Biology, CT.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Article Info:

Received: 1 Mar 2025

Revised: 3 May 2025

Accepted: 1 Jun 2025

ABSTRACT

Introduction: In recent years, significant advances have been made in nanotechnology and medicine, particularly in the treatment of nervous system tumors such as glioblastoma. Glioblastoma, as the most common and aggressive brain tumor, with an average survival of less than 15 months, has created serious challenges for current treatments, such as surgery and chemotherapy. Smart nanoparticles (SNs), a new generation of nanoparticles with the ability to cross the blood-brain barrier and selectively target tumor cells, have provided new hope to overcome these challenges. SNs can release drugs in a controlled manner in response to specific stimuli such as changes in pH or temperature, which increases the effectiveness of treatment and reduces side effects. SNs have various applications in the treatment of nervous system tumors and can significantly improve the effectiveness of chemotherapy drugs. Despite the remarkable successes, challenges such as the safety and toxicity of nanoparticles and scaling mass production difficulties still exist. However, technological advances can help solve these issues. Finally, SNs are recognized as a powerful tool in the treatment of central nervous system tumors and can play an important role in improving treatment methods. **Conclusion:** Considering its significant therapeutic potential, this review summarizes the effects of stimuli-responsive SNs and highlights their role in the treatment of central nervous system tumors.

Keywords:

1. Multifunctional Nanoparticles
2. Brain Neoplasms
3. Glioblastoma
4. Glioma

*Corresponding Author: Azadeh Mohammadgholi

Email: Azadeh.mohammadgholi57@iau.ac.ir

تأثیر نانوذرات هوشمند پاسخگو به محرک در درمان تومورهای سیستم عصبی مرکزی

آزاده محمدقلی*

گروه زیست شناسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله:

پذیرش: ۱۱ خرداد ۱۴۰۴

اصلاحیه: ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۴

دریافت: ۱۱ اسفند ۱۴۰۳

چکیده

مقدمه: در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در فناوری نانو و پزشکی، به‌ویژه در درمان تومورهای سیستم عصبی مانند گلیوبلاستوما، حاصل شده است. گلیوبلاستوما، به‌عنوان شایع‌ترین و تهاجمی‌ترین تومور مغزی، با میانگین بقای کمتر از ۱۵ ماه، چالش‌های جدی برای درمان‌های فعلی، مانند جراحی و شیمی‌درمانی، ایجاد کرده است. نانوذرات هوشمند (SNs)، نسل جدیدی از نانوذرات با قابلیت عبور از سد خونی-مغزی و هدف‌گیری انتخابی سلول‌های تومور، امید تازه‌ای را برای غلبه بر این چالش‌ها فراهم کرده‌اند. SNs می‌توانند داروها را به صورت کنترل‌شده در پاسخ به محرک‌های خاص مانند تغییرات PH یا دما آزاد کنند که این امر اثربخشی درمان را افزایش داده و عوارض جانبی را کاهش می‌دهد. SNs کاربردهای مختلفی در درمان تومورهای سیستم عصبی دارند و می‌توانند اثربخشی داروهای شیمی‌درمانی را به طور قابل توجهی بهبود بخشند. علیرغم موفقیت‌های قابل توجه، چالش‌هایی مانند ایمنی و سمیت نانوذرات و مشکلات تولید انبوه هنوز وجود دارد. با این حال، پیشرفت‌های فناوری می‌تواند به حل این مسائل کمک کند. در نهایت، SN ها به‌عنوان ابزاری قدرتمند در درمان تومورهای سیستم عصبی مرکزی شناخته می‌شوند و می‌توانند نقش مهمی در بهبود روش‌های درمانی داشته باشند. **نتیجه‌گیری:** با توجه به پتانسیل درمانی قابل توجه آنها، این بررسی اثرات SNهای پاسخگو به محرک را خلاصه کرده و نقش آنها را در درمان تومورهای سیستم عصبی مرکزی برجسته می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

- ۱- نانوذرات چند منظوره
- ۲- نئوپلاسم‌های مغزی
- ۳- گلیوبلاستوما
- ۴- گلیوما

*نویسنده مسئول: آزاده محمدقلی

پست الکترونیک: Azadeh.mohammadgholi57@iaui.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در فناوری نانو و پزشکی به وجود آمده است که امیدهای جدیدی برای درمان تومورهای دستگاه عصبی، نظیر گلیوبلاستوما و تومورهای متاستاتیک مغزی، به ارمغان آورده است. گلیوبلاستوما مولتی‌فرم (GBM) به‌عنوان شایع‌ترین و تهاجمی‌ترین تومور اولیه مغزی، با میانگین بقای کمتر از ۱۵ ماه، یکی از مرگبارترین انواع سرطان به شمار می‌آید. درمان‌های کنونی شامل جراحی، پرتودرمانی و شیمی‌درمانی هستند که با چالش‌هایی نظیر عبور داروها از سد خونی-مغزی و آسیب به بافت‌های سالم مواجه‌اند (۱-۳). این مشکلات ضرورت توسعه روش‌های نوین درمانی را بیشتر می‌سازد. نانوذرات هوشمند (Smart Nanoparticles) به‌عنوان نسل جدیدی از نانوذرات، با قابلیت عبور از سد خونی-مغزی و هدف‌گیری انتخابی سلول‌های توموری، امیدهای تازه‌ای را برای غلبه بر این چالش‌ها فراهم کرده‌اند. پیشرفت‌های اخیر همچنین نانوذرات پاسخ‌دهنده به محرک‌ها را برای هدف قرار دادن زیستگاه یا ریزمحیط تومور ایجاد کرده است که ضمن غلبه بر موانع بیولوژیکی مرتبط، از هدف‌گیری غیرفعال و فعال بهره می‌برد (۴). این نانوذرات می‌توانند داروها را به صورت کنترل‌شده و در پاسخ به محرک‌های خاص مانند تغییرات pH یا دما رهاسازی کنند، که این امر اثربخشی درمان را افزایش و عوارض جانبی را کاهش می‌دهد. مکانیسم‌های عمل نانوذرات هوشمند شامل هدف‌گیری فعال تومورها و رهایش کنترل‌شده دارو است (۵، ۶). با استفاده از لیگاندهای خاص که تنها بر روی سلول‌های توموری بیان می‌شوند، این نانوذرات می‌توانند به طور انتخابی به تومورها متصل شوند (۷). همچنین، ویژگی‌های خاص محیط تومور مانند pH اسیدی‌تر می‌تواند به‌عنوان محرکی برای رهایش دارو مورد استفاده قرار گیرد (۸). نانوذرات همچنین می‌توانند از طریق اثر نفوذ و نگهداری (EPR) به بافت تومور نفوذ کنند، زیرا عروق خونی ناقص و سیستم لنفاوی ضعیف در تومورها به آن‌ها اجازه تجمع مؤثر می‌دهد. این ویژگی‌ها نانوذرات هوشمند را به ابزاری قدرتمند در درمان تومورهای دستگاه عصبی تبدیل کرده است (۹).

نانوذرات هوشمند در درمان تومورهای دستگاه عصبی کاربردهای متنوعی دارند و یکی از مهم‌ترین آن‌ها، بهبود اثربخشی داروهای شیمی‌درمانی است. این نانوذرات می‌توانند داروها را به طور مستقیم به سلول‌های توموری منتقل کرده و اثرات سمی بر

بافت‌های سالم را کاهش دهند (۱۱، ۱۰). به‌عنوان مثال، نانوذرات حاوی داروهایی مانند دوکسوروبیسین و پاکلیتاکسل در مطالعات پیش‌بالینی موفقیت‌آمیز بوده و موجب افزایش بقای بیماران شده‌اند (۱۳، ۱۲). این نانوذرات همچنین می‌توانند در ترکیب با پرتودرمانی مورد استفاده قرار گیرند. برخی از آن‌ها، مانند نانوذرات طلا، به دلیل خاصیت جذب بالای پرتوهای ایکس، می‌توانند دوز پرتو را در محل تومور متمرکز کرده و اثربخشی درمان را افزایش دهند (۱۴). علاوه بر این، نانوذرات هوشمند قابلیت رهایش همزمان چندین دارو یا ترکیب داروها با روش‌های دیگر مانند ایمونوتراپی را دارند که می‌تواند اثرات هم‌افزای (سینرژستیک) ایجاد کند و مقاومت تومورها به درمان را کاهش دهد (۱۵). نانوذرات هوشمند همچنین می‌توانند برای تصویربرداری و تشخیص تومورها استفاده شوند. نانوذرات حاوی مواد کنتراست‌دهنده برای MRI یا CT می‌توانند به تشخیص دقیق‌تر تومورها و نظارت بر پاسخ به درمان کمک کنند (۱۶). یکی از چالش‌های اصلی در درمان تومورهای مغزی، عبور از سد خونی-مغزی است. نانوذرات هوشمند با استفاده از مکانیسم‌هایی مانند اتصال به گیرنده‌های انتقالی یا پپتیدهای نفوذکننده می‌توانند از این مانع عبور کرده و داروها را به بافت مغز برسانند (۱۷). با وجود پیشرفت‌ها، چالش‌هایی نیز وجود دارد. ایمنی و سمیت نانوذرات یکی از نگرانی‌هاست، چرا که برخی ممکن است پاسخ‌های ایمنی ناخواسته یا سمیت در بافت‌های سالم ایجاد کنند. همچنین، مقیاس‌پذیری و تولید انبوه این نانوذرات به دلیل پیچیدگی و هزینه‌های بالا هنوز یک مانع است. با این حال، پیشرفت فناوری‌های تولید می‌تواند به حل این مشکلات کمک کند (۱۸). با توجه به ویژگی‌های نانوذرات هوشمند و افزایش شیوع تومورها، به ویژه در کشورهای صنعتی، این مطالعه با هدف مرور تحقیقات انجام‌شده در زمینه تأثیر نانوذرات هوشمند پاسخگو به محرک در درمان تومورهای دستگاه عصبی مرکزی طراحی شده است.

نانوذرات هوشمند پاسخگو به محرک

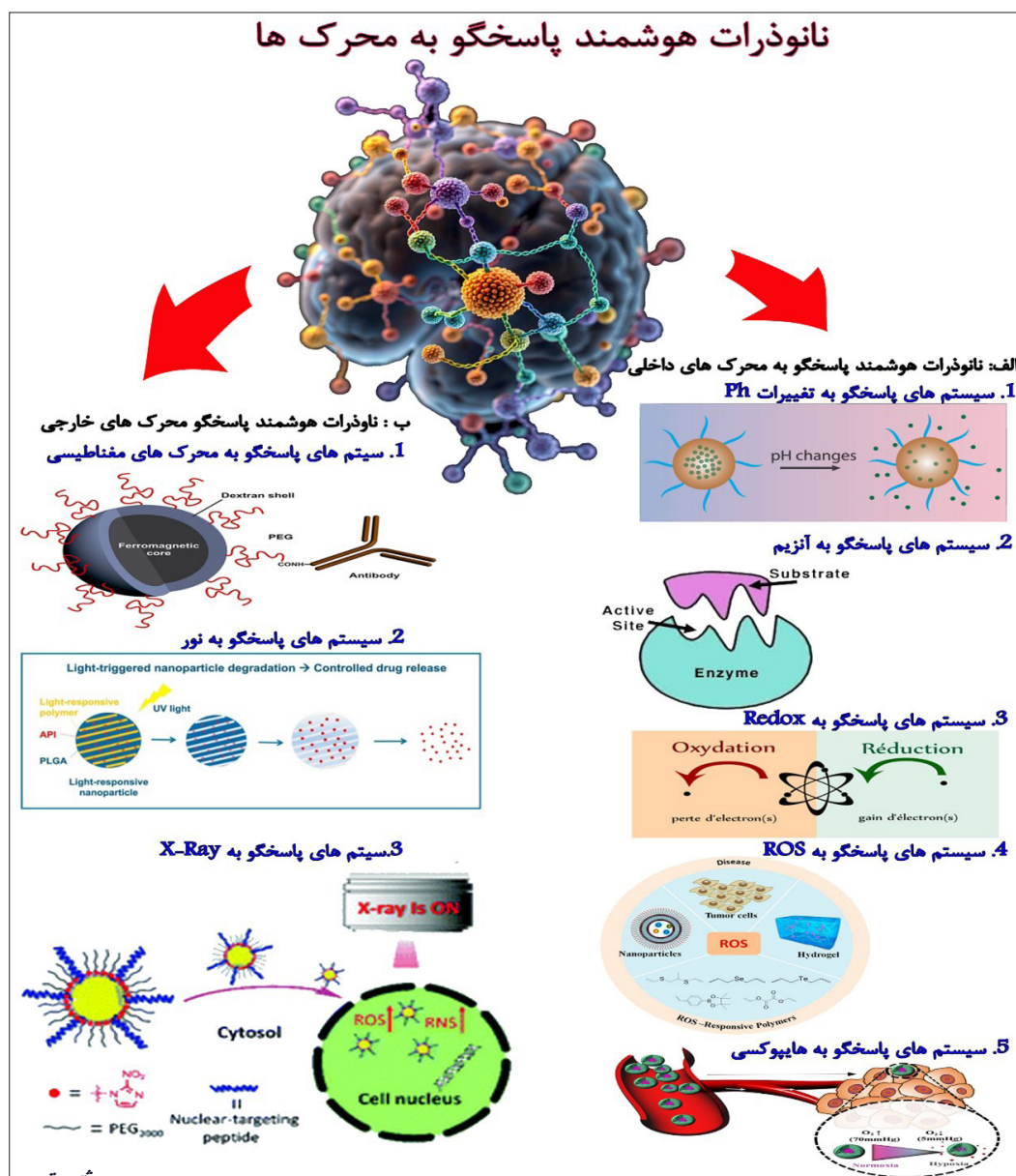
نانوذرات هوشمند پاسخگو به محرک‌های درونی عملکرد نانوذرات هوشمند به‌طور قابل توجهی مشابه یک جعبه ابزار است. این نانوذرات قادرند در پاسخ به محرک‌های داخلی و خارجی، ویژگی‌هایی نظیر شکل، ساختار، حلالیت، بار سطحی و رفتارهای خودپیوندی یا تفکیک خود را تغییر دهند. این تغییرات می‌تواند به افزایش فرار از اندوزوم‌ها، تقویت جذب سلولی و آزادسازی بار کمک کند. نانوذرات به دو دسته بر اساس

سیستم‌های واکنش‌دهنده به PH

PH نواحی پاتولوژیک معمولاً به دلیل التهاب، عفونت یا وجود تومور کمتر از PH نواحی طبیعی است. در شرایط فیزیولوژیکی، PH بافت طبیعی حدود ۷/۴ است. در حالی که در ضایعات می‌تواند تا ۶ کاهش یابد. این پدیده به‌ویژه در تومورهای جامد مانند گلیوما مشهود است. PH پایین در بافت غیرطبیعی ناشی از تکثیر بیش از حد سلول‌های توموری است که رشد عروقی نمی‌تواند نیازهای این بافت‌ها را برآورده کند. هیپوکسی ناشی از کمبود مواد مغذی و اکسیژن منجر

نوع محرک‌ها تقسیم می‌شوند: محرک‌های درون‌زا، که شامل نانومواد با اثرات واکنش‌دهنده نظیر نانوذررات طلا حساس به نور و گرما هستند، و محرک‌های برون‌زا، که شامل اصلاح نانوذررات از طریق پلیمریزاسیون یا پیوند گروه‌های عاملی با اثرات پاسخ‌دهنده می‌باشند. این نانوذررات به محرک‌های خارجی مانند تغییرات دما، PH، نور، آنزیم‌ها، ردوکس، اولتراسوند، میدان‌های مغناطیسی یا الکتریکی پاسخ می‌دهند و در زمینه‌های دارورسانی هدفمند و تصویربرداری پزشکی کاربرد دارند (۱۹،۲۰).

تصویر ۱- تصویر شماتیک از انواع مختلف نانوذررات هوشمند پاسخگو به محرک



موش‌های حامل تومور C6 در آزمایش بالینی تایید شد. لیپوزوم‌های حساس به PH اصلاح‌شده (H7K(R2) حاوی داروهای ضد تومور هستند درواقع، یک سیستم تحویل امیدوارکننده هستند که شامل محرک‌های پاسخ در PH اسیدی در ریزمحیط تومور گلیوما هستند و برای درمان ضد تومور مناسب می‌باشند (۲۵).

کورکومین، یک داروی گیاهی آگریز با پتانسیل بالا در زمینه داروسازی است که فعالیت‌های درمانی متنوعی دارد. این ماده به طور گسترده‌ای به عنوان داروی ضد سرطان مورد استفاده قرار گرفته است، اما ماهیت آگریز آن کارایی‌اش را محدود کرده است. برای غلبه بر این محدودیت، از انواع مختلف نانوحامل‌ها استفاده شده است؛ از جمله لیپوزوم‌هایی که می‌توانند از طریق استراتژی‌های مختلف تهیه شوند در تحقیقی توسط Xu و همکاران، یک هسته میسلی کاتیونی (Cur-M) برای اولین بار از پلیمر پلی لیزین پیوند شده با D-a-توکوفرول برای محصور کردن کورکومین آگریز تهیه کردند، به دنبال آن پلیمر پلی گاما گلوتامیک اسید اصلاح‌شده با دوپامین، به عنوان یک پوسته آنیونی از طریق پیوند حساس به PH برای محصور کردن هیدروکلراید دوکسوروبیسین آبدوست (DOX) روی سطح آن رسوب داده شد. با کنترل نسبت مولی Cur/DOX ترکیبی در ۳:۱، یک نانوذر حساس به PH (PD-CP-NP) ساخته شد تا به طور همزمان سلول‌های بنیادی سرطانی (CSCs) و سلول‌های تومور تمایز یافته را هدف قرار دهد. نتایج این مطالعه نشان داد که درصد CSC ها در تومورها پس از درمان با PD-CP-NP به طور قابل توجهی از ۴/۱۶ درصد به ۰/۹۵ درصد کاهش یافت. به طور کلی، PD-CP-NP ممکن است یک حامل امیدوارکننده برای درمان ترکیبی با داروهای نامزد دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت باشد (۲۶).

سیستم‌های واکنش‌دهنده به آنزیم

آنزیم‌ها نقش کلیدی در اکثر فرآیندهای متابولیک ایفا می‌کنند و ماتریکس متالوپروتئینازها (MMPs) به عنوان یک کلاس مهم و پرکاربرد از آنزیم‌ها شناخته می‌شوند. سطح بیان و فعالیت MMP ها به طور مستقیم با تهاجم تومور و متاستاز در ریزمحیط تومور مرتبط است. در واقع، خانواده MMP تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های متاستاز گلیوما دارد. MMP ها به عنوان فاکتورهای کلیدی در تخریب چسبندگی سلولی، تغییر در برهم‌کنش‌های سلول-سلول و اختلال در تعاملات سلول-ماتریس خارج سلولی (Cell-ECM) عمل می‌کنند

به افزایش گلیکولیز و کاهش بیشتر PH می‌شود (۲۱). در مطالعه‌ای، Cheng و همکاران، نانوذرهای طلائی PEGylated و اصلاح‌شده با TAT (TAT-AuNPs) را سنتز کردند تا انتقال داروی دوکسوروبیسین (DOX) را از طریق غشای سلولی و سد خونی مغزی افزایش دهند. آن‌ها پیوند هیدرازون حساس به PH را به AuNPs متصل کردند تا امکان آزادسازی کنترل‌شده دارو فراهم شود. نتایج نشان داد که DOX در ۷/۴ PH پایدار است اما در ۷/۴ PH به سرعت آزاد می‌شود. همچنین TAT-AuNPs-DOX سمیت قابل توجهی بیشتری نسبت به Dox آزاد شده نشان داد و نفوذ مؤثری از سد خونی مغزی در مدل‌های حیوانی داشت. موش‌های تیمار شده میانگین بقای طولانی مدت (۴۴ روز) را در مقایسه با گروه کنترل نشان دادند و TAT-AuNP ها برای اندام‌های حیاتی ایمن بودند که نشان‌دهنده پتانسیل آن‌ها برای بهبود درمان تومورهای مغزی و تصویربرداری غیرتهاجمی است (۲۲). علاوه بر این، Ruan و همکاران PEG-DOX-AuNPs را توسعه دادند که به طور مؤثر گلیوما را هدف قرار داده و بقای موش‌های حامل گلیوم را افزایش می‌دهند (۲۳).

سنتز نانولیپوزوم‌های پاسخگو به PH به عنوان یک موضوع تحقیقاتی نوظهور توجه زیادی را به خود جلب کرده است و تحقیقات متنوعی در این زمینه انجام شده است. به عنوان مثال، Zhao و همکاران در سال یک لیپوزوم پاسخگو به PH به عنوان حامل دوکسوروبیسین (DOX) برای درمان گلیوبلاستوما تهیه کردند. آن‌ها از یک نوع پپتید پاسخگو به PH (H7K(R2)2 برای عامل‌دار کردن لیپوزوم‌های مخفی استفاده کردند و الگوی آزادسازی دارو را در چهار PH مختلف (۵/۵، ۶، ۶/۵ و ۷/۴) بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشتر اجزای دارو در طول ۸ ساعت اول در محیط اسیدی آزاد شدند، در حالی که تنها ۲۰ درصد از آن‌ها در PH طبیعی آزاد شدند (۲۴).

Zhao و همکاران لیپوزوم‌های حساس به PH اصلاح شده با پپتید پاسخگو به PH خاص تومور حاوی دوکسوروبیسین را برای افزایش هدف‌گیری گلیوما و فعالیت ضد توموری مورد بررسی قرار داده و گزارش نمودند که فعالیت ضد توموری لیپوزوم‌های حساس به PH اصلاح‌شده (H7K(R2)2 حاوی دوکسوروبیسین در موش‌های حامل تومور C6 (سلول‌های گلیوما C6 موش صحرایی) و موش‌های دارای تومور U87-MG (سلول‌های گلیوبلاستوم انسانی) در آزمایش‌های بالینی یافت شد. فعالیت ضد رگ زایی لیپوزوم‌های حساس به PH اصلاح شده H7K(R2)2 حاوی دوکسوروبیسین در

برای تصویربرداری و درمان گلیوم ارزشمند باشد (۳۱).

سیستم‌های واکنش‌دهنده به ردوکس

در بافت‌های توموری، غلظت سیتوزولی تری‌پتید گلوتاتیون (GSH) به طور تقریبی 10×10^{-3} مولار است که این میزان ۲ تا ۳ برابر بیشتر از سطوح GSH در بافت‌های سالم است. این تفاوت در غلظت، پتانسیل اکسیداسیون و احیاء بین سلول‌های تومور و محیط اطراف را کاهش می‌دهد. به همین دلیل، آزادسازی داروها از نانوحامل‌های حساس به اکسیداسیون و احیاء می‌تواند با استفاده از این ویژگی آغاز شود. پیوندهای دی‌سولفیدی به سرعت توسط GSH شکسته می‌شوند و می‌توانند برای ایجاد حساسیت ردوکس در نانوحامل‌ها مورد استفاده قرار گیرند. رهاسازی دارو می‌تواند به صورت برنامه‌ریزی‌شده و تحت تأثیر محرک‌های پتانسیل ردوکس انجام شود. این استراتژی در طراحی نانوحامل‌های واکنش‌دهنده به اکسیداسیون و احیاء با استفاده از میسل‌های تجزیه‌پذیر تقلیل‌پذیر به کار رفته است. در مطالعه Katz و همکاران، مهارکننده کراتین کیناز (CKi) سلول‌های گلیوبلاستوما (GBM) را تحت استرس REDOX قرار می‌دهد. برای تعیین این مورد، ابتدا یک سنسج CellRox انجام دادند که با افزایش سطح ROS درون سلولی، فلورسانس سبز افزایش می‌یافت. آنها U251 را با (CKi و H_2O_2 به عنوان یک کنترل مثبت) درمان کردند و دریافتند که با شروع یک ساعت، CKi باعث افزایش قابل توجهی در ROS داخل سلولی شد. علاوه بر این، سنسج‌های DCFDA را انجام دادند و دریافتند که افزودن ان-استیل سیستئین می‌تواند سلول‌های GBM را از تولید ROS توسط CKi محافظت کند. بنابراین، این داده‌ها پشتیبانی می‌کنند که CKi باعث ایجاد استرس اکسیداسیون و کاهش در سلول‌های GBM می‌شود. با توجه به اینکه ناقلین و آنزیم‌های مسئول بیوسنتز گلوتاتیون توسط CKi تنظیم مثبت شدند (۳۲).

نانوحامل‌های حساس به ردوکس می‌توانند از طریق مواد مزوپور، دندیرمها، لیپوزوم‌ها و سایر تغییرات به دست آیند. تلاش‌ها برای توسعه نانوحامل‌های پاسخگو به اکسیداسیون و احیاء به منظور دارورسانی به مغز منجر به ایجاد میسل‌های پلیمری PEG-pLys-pPhe توسط Shao و همکارانش شده است. در مطالعه آنها، دهیدرواسکوربیک اسید (DHA) به این میسل‌ها کونژوگه شد که این اجازه را به آنها می‌دهد تا از طریق ایزوفرمت انتقال دهنده گلوکز ۱/ GLUT1¹ (GLUT1¹) از سد خونی مغزی عبور کنند. میسل‌ها داروهای آگریز را در یک هسته پایدار با یک پوسته واکنش‌دهنده به اکسیداسیون و احیاء محصور می‌کنند تا از انتشار زودرس دارو جلوگیری شود (۳۳).

(۲۷، ۲۸). آنزیم‌هایی که به‌طور بیش از حد در نواحی ضایعه و محل‌های رگ‌زایی بیان می‌شوند، به راحتی توسط نانوحامل‌هایی با قطر ۱۰ تا ۲۰۰ نانومتر از طریق اثر نفوذپذیری و احتباس افزایش یافته (EPR) قابل دسترسی هستند، که این امر به نانوحامل‌ها قابلیت پاسخگویی به آنزیم را می‌دهد. تعداد کمی از نانوحامل‌های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها که سیستم عصبی مرکزی (CNS) را هدف قرار می‌دهند، با ویژگی‌های پاسخ‌دهنده به آنزیم ساخته شده‌اند (۲۹).

Zhao و همکاران هیدروژل‌های تزریقی پاسخگو به آنزیم را پس از عمل برای معکوس کردن مقاومت تموزولوماید (TMZ) و کاهش عود موضعی پس از عمل گلیوما مورد ارزیابی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که هیدروژل‌ها می‌توانند غلظت TMZ موضعی را افزایش داده و عوارض جانبی O6-benzylamine (BG) را کاهش دهند. در داخل بدن، هیدروژل‌های (TMZ) + Tm (BG بیان O⁶-methylguanine-DNA methyl- MGMT transferase) را مهار کردند و سلول‌های گلیوما مقاوم به TMZ را به TMZ حساس کردند. علاوه بر این، هیدروژل‌های (TMZ + BG) (Tm) به طور موثری عود گلیومای مقاوم به TMZ را پس از جراحی کاهش داد و به طور قابل توجهی کارایی TMZ را برای مهار رشد گلیوما افزایش داد. این داده‌ها نشان می‌دهند که یک هیدروژل پاسخ‌دهنده به ماتریکس متالوپروتئیناز (MMP) یک روش تحویل داروی موضعی امیدوارکننده برای مهار عود گلیومای مقاوم به TMZ پس از جراحی است (۳۰).

Qin و همکاران یک پتید حلقوی آرژنین گلیسین آسپارتیک اسید (RGD) و ترانسفرین (TF) به‌عنوان لیگاندهای هدف برای درمان و هدف‌گیری گلیوما استفاده کردند. پتیدهای چرخه‌ای RGD لیگاندهای هدف‌گیری خاص سلول‌های سرطانی هستند و TF‌ها لیگاندهایی هستند که به طور خاص BBB و سلول‌های سرطانی را هدف قرار می‌دهند. در این پژوهش از لیپوزوم (LP) برای کونژوگه کردن RGD حلقوی و TFs برای ایجاد سیستم تحویل آبشاری گلیوم مغز (RGD/LP TF) استفاده شد. جذب سلولی در شرایط آزمایشگاهی و مطالعات نفوذ کروی تومور سه بعدی نشان داد که این سیستم می‌تواند سلول‌های اندوتلیال و تومور را هدف قرار دهد و همچنین به سلول‌های تومور برای رسیدن به هسته کروی تومور نفوذ کند. نتایج تصویربرداری In vivo بیشتر نشان داد که لیپوزوم حاوی RGD/TF بالاترین توزیع مغز را ارائه می‌کند. در نتیجه، لیپوزوم حاوی RGD/TF بارگذاری شده با پاکلیتاکسل بهترین فعالیت ضد تکثیری را علیه سلول‌های C6 و ساختار تومور ارائه می‌کند. در نتیجه، لیپوزوم حاوی RGD/TF ممکن است دقیقاً گلیومای مغز را هدف قرار دهد، که ممکن است

¹ Glucosetransporter isoform 1/Slc2a1

لیپوزوم‌ها و میسل‌های مبتنی بر پلیمر نیز از ROS برای آزادسازی دارو استفاده کرده و اثرات هدف‌گیری و درمانی خاصی را ارائه می‌دهند. علاوه بر این، مطالعاتی که از ROS میتوکندری برای دارورسانی استفاده می‌کنند، تطابق‌پذیری این سیستم‌ها را برجسته می‌سازند. به‌طور کلی، سیستم‌های نانوذرات پاسخ‌دهنده به ROS یک رویکرد امیدوارکننده برای درمان سرطان ارائه می‌دهند، به‌ویژه زمانی که با سایر محرک‌ها مانند دما و هیپوکسی ترکیب شوند تا اثربخشی درمان افزایش یابد (۳۶).

Raddeanin A RA، یک ماده دارویی فعال از *Anemone raddeana* Regel، نقش مهمی در سرکوب تومور ایفا می‌کند. در مطالعاتی نقش این ماده در سرکوب سلول‌های سرطانی گلیوما و گلیوبلاستوما مورد مطالعه قرار گرفته است (۳۷، ۳۸). در مطالعه Peng و همکاران، اثر درمانی بالقوه RA بر روی گلیوبلاستوما و مکانیسم‌های زمینه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. آنها یک مدل پیوند زنگرفت گلیوما U251 برای ارزیابی اثر RA در داخل بدن ایجاد نمودند. داده‌های این مطالعه نشان داد که RA زنده ماندن سلول‌های تومور را مهار می‌کند و توانایی‌های تهاجمی/مهاجری سلول‌های گلیوبلاستوما را لغو می‌کند. علاوه بر این، RA باعث آپوپتوز توسط گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) / ژان-ان ترمینال کیناز (JNK^۴) در گلیوبلاستوما می‌شود. برعکس، آنتی اکسیدان (N-Acetyl-L-cysteine (NAC و بازدارنده پان کاسپاز z-VAD-fmk با از بین بردن ROS و غیرفعال کردن کاسپاز ۳، آپوپتوز ناشی از RA را کاهش داد. علاوه بر این، مهار اتوفاجی توسط MA-۳ آپوپتوز را از طریق تولید ROS و فسفوریلاسیون JNK تشدید کرد. در داخل بدن، اثر درمانی بر پیوندهای مشتق شده از U251 در موش برهنه نشان داد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که RA رشد گلیوبلاستوما را سرکوب می‌کند، بنابراین به‌عنوان یک استراتژی امیدوارکننده و بالقوه برای شیمی درمانی گلیوبلاستوما عمل می‌کند (۳۹).

افزایش تنظیم پروتئین ترمیم DNA، MGMT^۲، به مقاومت تموزولامید در گلیوبلاستوما مولتی‌فرم کمک می‌کند. در حالی که بنزیل گوانین-O6 می‌تواند MGMT را کاهش دهد، استفاده بالینی آن به دلیل فارماکوکینتیک ضعیف محدود است. Stephan و همکاران نانوذرات اکسید آهن سوپراکسید (NPCP-BG-CTX) را برای تحویل هدفمند بنزیل گوانین به گلیوبلاستوما مولتی‌فرم توسعه دادند. این نانوذرات، پوشش داده شده با یک پلیمر زیست‌سازگار و اصلاح شده برای هدف‌گیری تومور، پایداری در گردش خون و آزادسازی مؤثر دارو در شرایط سلولی را نشان دادند. در شرایط آزمایشگاهی، آنها به طور قابل توجهی فعالیت MGMT را کاهش داده و اثرات ضد توموری تموزولامید را افزایش دادند. مطالعات بالینی روی موش‌ها نشان داد که درمان مشترک با NPCP-BG-CTX^۳ و تموزولامید میانگین بقای کلی را تا سه برابر نسبت به سایر درمان‌ها افزایش می‌دهد و همچنین سرکوب عصبی مشاهده شده با بنزیل گوانین-O6 آزاد را کاهش می‌دهد (۳۴).

سیستم‌های پاسخگو به گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) سلول‌های سرطانی به دلیل فعال‌سازی انکوژن‌ها، التهاب و آسیب‌های میتوکندری، سطوح بالاتری از گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) نسبت به سلول‌های طبیعی تولید می‌کنند (۳۵). این وضعیت منجر به توسعه نانوذرات پاسخگو به ROS شده است که به‌طور خاص برای درمان هدفمند سرطان طراحی شده‌اند. این نانوذرات با فعال‌سازی پایداری دارو در حضور ROS‌های مشخصی نظیر رادیکال‌های هیدروکسیل، پراکسیدهای هیدروژن و آنیون‌های سوپراکسید عمل می‌کنند. پیوندهای مختلفی مانند تیوکتال‌ها، تیو اترها و استرهای بورونیک، فرآیند آزادسازی دارو را تحت تأثیر ROS تسهیل می‌کنند. به‌ویژه، نانوذراتی که از پیوندهای تیوکتال و پتیدی‌های هدفدار تومور بهره‌مند هستند، در القای آپوپتوز در سلول‌های سرطانی کارایی قابل توجهی نشان داده‌اند. فرمولاسیون‌های دیگر مانند

² O6- methylguanine-DNA methyltransferase

³ Biocompatible chitosan-PEG copolymer- O6 benzylguanine- chlorotoxin

⁴ Jun N-terminal kinase

جدول ۱- جدیدترین مطالعات ثبت و انجام شده در حوزه تشخیص و درمان گلیوبلاستوما به عنوان شایع‌ترین تومور مغزی. برگرفته شده از پایگاه داده Clinicaltrials.gov

ردیف	نانوذره / دارو مورد استفاده	مکانیسم عمل نانوذره / دارو	روش درمان مورد استفاده	وضعیت مطالعه	شماره دسترسی
۱	نانوذرات اکسید آهن (NanoTherm ASI)	نانوذره به کار رفته سبب افزایش تاثیر پذیری شیمی درمانی و رادیوتراپی شده است	هائپرترمی مغناطیسی	ثبت شده	NCT06271421
۲	SGT-53 و تموزولوماید	SGT-53 مجموعه‌ای از لپیزوم کاتیونی است که توالی p53 DNA نوع وحشی طبیعی انسان را در یک چارچوب پلاسمیدی محصور می‌کند	ژن درمانی / شیمی درمانی	ثبت شده	NCT02340156
۳	NU-0129 (اسید نوکلئیک کروی که بر روی سطح یک نانوذره کروی کوچک طلا قرار گرفته است)	نانوذره کنژوگه شده با siRNA بر روی تجمع و فعالیت Bcl2 اثر می‌گذارد	درمان مولکولی هدفمند	اتمام یافته	NCT03020017
۴	نانولیپوزوم CPT-11	باعث افزایش تحویل موثر دارو در داخل تومور می‌گردد	دارو درمانی	اتمام یافته	NCT00734682
۵	نانوذرات AGuIX (Polysiloxane Gd-Chelates based nanoparticles) / تموزولوماید	این نانوذرات حاوی گادولینیوم بوده و به عنوان حساس کننده پرتو عمل می‌کنند	دارو پرتو و شیمی درمانی	در حال انجام	NCT04881032
۶	EGFR(V)-EDV-Dox	نانوذرات به پادتن های EGFR متصل میشوند و در دارورسانی دقیق به سلول های توموری نقش ایفا می‌کنند.	دارو درمانی	نامشخص	NCT02766699
۷	123I-ATT001	به عنوان مهارکننده پلی آنوزین دی فسفات ریبوز پلیمراز ۱ عمل می‌کند	دارو درمانی	ثبت شده	NCT06650605
۸	ارزیابی کارایی افزودن BPM31510. به عنوان یک نانو پراکندگی لیپیدی CoQ10	افزایش فعالیت سیستم ایمنی، کاهش رشد تومور، تاثیر بر متابولیسم سلولی و ایجاد استرس اکسیداتیو	دارو درمانی	ثبت شده	NCT06855628
۹	سلول درمانی TX103 CAR-T	شناسایی آنتی ژن سلول های توموری، هدف گیری آنتی ژن، فعال سازی ایمنی و نابودی سلول های تومور	سلول درمانی	ثبت شده	NCT06482905
۱۰	پمبرولیزوماب و تموزولوماید	پمبرولیزوماب (یک آنتی بادی مونوکلونال که با هدف قرار دادن PD-1، فعالیت سیستم ایمنی را برای شناسایی و نابودی سلول های سرطانی افزایش می‌دهد) و تموزولوماید (یک داروی شیمی درمانی که با القای آسیب به DNA سلول های سرطانی، منجر به مرگ آنها می‌شود).	دارو / شیمی درمانی	ثبت شده	NCT05700955
۱۱	فروموکسیتول و آسکوربات فارمکولوژیک	فروموکسیتول (یک ترکیب آهنی که می‌تواند به بهبود وضعیت آهن و تقویت پاسخ ایمنی در بیماران سرطانی کمک کند) و آسکوربات فارمکولوژیک (ویتامین C) به عنوان یک آنتی اکسیدان، ممکن است با ایجاد استرس اکسیداتیو در سلول های سرطانی، رشد آنها را مهار کند.	دارو درمانی	در حال انجام	NCT04900792
۱۲	Olaptesed Pegol	یک داروی RNA که با هدف قرار دادن mRNA خاص در سلول های سرطانی، تولید پروتئین های مرتبط با تومور را مهار می‌کند.	دارو درمانی	در حال انجام	NCT04121455
۱۳	داروهای ضد گلو تلمات گاباپنتین، سولفاسالازین، ممانتین به همراه تموزولوماید	داروهای ضد گلو تلمات گاباپنتین (دارویی که به تسکین درد عصبی کمک می‌کند و ممکن است کیفیت زندگی بیماران مبتلا به تومورهای عصبی را بهبود بخشد)، سولفاسالازین (یک داروی ضد التهابی که ممکن است با کاهش التهاب در میکرو محیط تومور، به کنترل رشد تومور کمک کند) و ممانتین (یک آنتاگونیست NMDA که ممکن است با کاهش فعالیت بیش از حد نورون ها در تومورهای عصبی، به محافظت از سلول های سالم کمک کند) به همراه تموزولوماید	دارو / شیمی درمانی	ثبت شده	NCT05664464
۱۴	بورتزومیب و تموزولوماید	بورتزومیب (یک مهارکننده پروتئازوم که با اختلال در تجزیه پروتئین ها، منجر به مرگ سلولی در سلول های سرطانی می‌شود) و تموزولوماید	دارو / شیمی درمانی	ثبت شده	NCT03643549
۱۵	روپیدوکسوریدین	روپیدوکسوریدین یک داروی ضد ویروسی که ممکن است به عنوان یک درمان کمکی در برخی تومورهای عصبی عمل کند. به عنوان یک حساس کننده رادیویی نیز عمل می‌نماید	دارو درمانی / رادیوتراپی	ثبت شده	NCT06359379
۱۶	Optune® و تموزولوماید	Optune® (یک دستگاه درمانی مبتنی بر میدان الکترومغناطیسی که با اختلال در تقسیم سلولی، رشد تومور را مهار می‌کند) و تموزولوماید	رادیو تراپی / شیمی درمانی	در حال انجام	NCT04471844
۱۷	Retifanlimab و Epacadostat در ترکیب با بولسیزوماب	Retifanlimab (یک آنتی بادی مونوکلونال که با هدف قرار دادن PD-1، پاسخ ایمنی بدن را علیه سلول های سرطانی تقویت می‌کند) و Epacadostat (یک مهارکننده IDO1 که با افزایش سطح تریپتوفان و تقویت پاسخ ایمنی، به مقابله با تومورها کمک می‌کند) در ترکیب با بولسیزوماب (یک آنتی بادی مونوکلونال که با مهار VEGF، رشد عروق خونی جدید در تومورها را متوقف می‌کند)	دارو درمانی	در حال انجام	NCT03532295
۱۸	Nivolumab و تموزولوماید	Nivolumab (یک آنتی بادی مونوکلونال که با هدف قرار دادن PD-1، فعالیت سیستم ایمنی را برای نابودی سلول های سرطانی افزایش می‌دهد) و تموزولوماید	دارو / شیمی درمانی	در حال انجام	NCT04195139
۱۹	دوروالوماب	دوروالوماب (یک آنتی بادی مونوکلونال که با هدف قرار دادن PD-L1، پاسخ ایمنی را برای مبارزه با تومورهای سرطانی تقویت می‌کند).	دارو درمانی و رادیو تراپی	اتمام مطالعه	NCT02866747

سیستم‌های پاسخگو به هیپوکسی

ریزمحیط تومور به ایجاد هیپوکسی کمک می‌کند که با سطوح پایین اکسیژن (۲ درصد یا کمتر) مشخص می‌شود و این وضعیت به پیشرفت سرطان و به‌عنوان یک عامل پیش‌آگهی عمل می‌کند. تکثیر سریع سلول‌های گلیوبلاستوم منجر به تشکیل نواحی هیپوکسیک در تومورها می‌شود، که این امر به سلول‌های موجود در این نواحی اجازه می‌دهد تا به دلیل عدم فعالیت و عدم دسترسی به دارو، در برابر شیمی‌درمانی مقاومت کنند. هیپوکسی همچنین موجب تهاجم تومور به بافت سالم مغز می‌شود، که نقش قابل توجهی در مرگ و میر ناشی از GBM دارد. فاکتور رونویسی HIF-1، به‌ویژه زیرواحد HIF-1 α آن، نقش مهمی در تهاجم تومور تحت شرایط هیپوکسیک ایفا می‌کند، زیرا با فعال کردن ژن‌های مرتبط با رگ‌زایی و بقای سلول، به تهاجم تومور کمک می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که مهار HIF-1 باعث افزایش حساسیت سلول‌های گلیوما به شیمی‌درمانی می‌شود. سلول‌های هیپوکسیک معمولاً با تنظیم مجدد پروتئین‌های خاص، مقاومت بیشتری در برابر درمان نشان می‌دهند. تلاش‌ها برای هدف‌گیری این سلول‌های هیپوکسیک شامل داروهایی مانند تیراپازامین است که در محیط‌های کم اکسیژن سمی عمل می‌کند؛ با این حال، در کارآزمایی‌های بالینی مزایای قابل توجهی برای بقا نشان نداده است (۴۱، ۴۰). همچنین تحقیقات بر روی استفاده از هیپوکسی برای طراحی نانوذراتی که قادر به آزادسازی داروها هستند، متمرکز شده است.

این مکانیسم بر فرآیندهای تخریب مواد خاص تحت شرایط کم اکسیژن متکی است. اجزای کلیدی شامل نیترومیدازول‌ها، آزو لینکرها و نیتروبنزیل الکل هستند که با تغییر خواص خود به هیپوکسی پاسخ می‌دهند تا آزادسازی دارو را تسهیل کنند. به‌عنوان مثال، پلیمرهای حساس به هیپوکسی، مانند آن‌هایی که با p-nitrobenzyl کونژوگه شده‌اند، به دلیل تغییر در ساختار شیمیایی خود، موجب افزایش ترشح داروهایی مانند دوکسوروبیسین (DOX) در محیط‌های کم اکسیژن می‌شوند. مطالعات دیگر نشان داده‌اند که نانوذرات مبتنی بر آزو بنزن قادرند siRNA را آزاد کنند و اثرات ضدسرطانی را در شرایط هیپوکسی افزایش دهند. علاوه بر این، هدف‌گیری سرطان با استفاده از یک پلیمروروم بارگذاری شده با DOX، رهایش دارو را در شرایط هیپوکسیک به‌طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. این تحقیق پتانسیل سیستم‌های دارورسانی پاسخگو به

هیپوکسی را در درمان سرطان برجسته می‌کند (۴۴-۴۲).

نانوذرات هوشمند پاسخگو به محرک‌های بیرونی
سیستم‌های واکنش‌دهنده مغناطیسی

نانوحامل‌های پاسخ‌دهنده مغناطیسی از ترکیب محموله‌های درمانی و اجزای فعال مغناطیسی تشکیل شده‌اند که در شرایط عادی پایدار باقی می‌مانند. اعمال میدان مغناطیسی خارجی باعث افزایش دما و در نتیجه آزادسازی محموله از نانوحامل می‌شود. این نانوحامل‌ها معمولاً از نانوذرات اکسید آهن مانند مگنتیت (Fe_3O_4) یا ماگنیت (Fe_2O_3) استفاده می‌کنند که به دلیل خواص فوق‌پارامغناطیس خود شناخته شده‌اند. نانوذرات اکسید آهن سوپراپارامغناطیس (SPIONs) کاربردهای متنوعی از جمله هدف‌گیری دارو، جداسازی زیستی، تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) و هیپرترمی مغناطیسی دارند.

با این حال، SPIONها به طور طبیعی آبگریز و مستعد تجمع هستند و بنابراین نیاز به اصلاحات سطحی با موادی مانند دکستران، PEG، سیلیس یا PEI دارند تا زیست‌سازگاری آن‌ها افزایش یابد. نانوحامل‌های پاسخ‌دهنده مغناطیسی همچنین برای افزایش غلظت دارو در نواحی هدف و کاهش اثرات جانبی خارج از هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تکنیک شامل یک منبع میدان مغناطیسی است که نانوذرات را به مکان‌های خاصی مانند تومورها هدایت می‌کند و به این ترتیب انتقال و رهاسازی دارو را تسهیل می‌کند.

نانوذرات اکسید آهن سوپراپارامغناطیس (SPIONs^۵) به‌عنوان عوامل کنتراست MRI و نانوحامل برای انتقال ژن از طریق مغناطیسی نیز عمل می‌کنند. علاوه بر این، واکنش‌های مغناطیسی و هیپرترمی که توسط میدان‌های مغناطیسی متناوب ایجاد می‌شوند، به طور انتخابی به سلول‌های تومور آسیب می‌رسانند و در عین حال بافت سالم را حفظ می‌کنند و می‌توانند با افزایش پرفیوژن و نفوذپذیری تومور، دارورسانی را بهبود بخشند (۴۵-۴۸). Cui و همکاران به بررسی سنتز نانوذرات سیلیس مغناطیسی پلی (لاکتیک-کوگلیکولیک اسید) (PLGA) اصلاح شده با ترانسفرین (Tf) برای هدف‌گیری سلول‌های گلیوما که گیرنده‌های ترانسفرین را به‌طور قابل توجهی بیان می‌کنند، پرداخته‌اند. این نانوذرات ابتدا با ایجاد یک پوسته سیلیکا از نانوذرات مغناطیسی و نانوذرات سیلیکا مزوپور تهیه شدند. دوکسوروبیسین (DOX) درون سیلیکا بارگذاری شد و سپس یک پوشش PLGA بارگذاری شده با PTX به روش امولسیون

⁵ Superparamagnetic iron oxide nanoparticles

مانند طول موج، شدت، مدت زمان قرار گرفتن در معرض و قطر پرتو نور تنظیم کنند. در حالی که نور مرئی، UV و نزدیک مادون قرمز (NIR) به طور گسترده در کلینیک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، تنها نور NIR توانایی نفوذ بسیار عمیق‌تری (تا ۱۰ سانتی‌متر) را دارد و به سلول‌ها آسیبی نمی‌زند. بنابراین، NIR برای هدف‌گیری بافت‌های عمیق مانند مغز مناسب‌تر است. چندین تحقیق وجود دارد که به بررسی استفاده از سیستم‌های حساس به نور برای دارورسانی در اختلالات سیستم عصبی مرکزی (CNS) پرداخته‌اند (۵۶-۵۱). امروزه، فتودینامیک تراپی (PDT) به طور گسترده در درمان‌های سرطان در کلینیک‌ها، از جمله سرطان ریه، سرطان مری، سرطان پوست و گلیوما و غیره استفاده شده است. ۵-آمینولولینیک اسید (ALA-۵) به‌عنوان یک متابولیت واسطه در مسیر هم‌گلوبین، توسط سازمان غذا و داروی ایالات متحده (FDA) برای برداشتن جراحی تومورهای جامد با هدایت تصویربرداری فلورسانس تأیید شده است. در سال‌های اخیر، ۵-ALA به تدریج به عنوان یک درمان حساس به نور برای PDT گلیوما مورد استفاده قرار گرفته است. ۵-ALA می‌تواند پس از مصرف خوراکی در سلول‌های گلیوما تجمع کند که در میتوکندری به پروتوپورفیرین (PpIX) تبدیل می‌شود.

پس از تابش نور، PpIX می‌تواند مقدار زیادی ROS را در سلول‌های گلیوما القا کند که می‌تواند باعث عدم تعادل استرس اکسیداتیو و مرگ سلولی شود. با این حال، چالش‌های متعددی برای PDT مبتنی بر ۵-ALA وجود دارد، از جمله عدم توانایی هدف‌گیری فعال، طول موج کوتاه طول موج تحریک، عمق نفوذ ناکافی بافت، و ناکارآمدی در محیط‌های کم اکسیژن و غیره (۵۷).

سیستم‌های پاسخگو به اشعه ایکس و رادیوداروها

اشعه ایکس به عنوان یکی از محرک‌های خارجی مهم، به طور گسترده‌ای در تصویربرداری تشخیصی (CT) و پرتودرمانی (RT) مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مزایای اصلی اشعه ایکس، قابلیت نفوذ عمیق آن است که امکان هدف‌گیری دقیق سلول‌های توموری در عمق بافت را فراهم می‌آورد. این ویژگی به پزشکان این امکان را می‌دهد که درمان را به نواحی خاصی از بدن، از جمله تومورهای سینه، ریه و مغز محدود کنند (۵۸).

با این حال، پرتودرمانی اغلب با چالش‌هایی مواجه است، به ویژه در مورد تومورهای جامد که به دلیل وجود هیپوکسی، مقاومت رادیویی را تجربه می‌کنند.

دوگانه اضافه گردید. در نهایت، Tf برای تشکیل نانوذرات DOX-PTX-NP-Tf متصل شد. تحت تأثیر میدان مغناطیسی، انتقال و جذب این نانوذرات افزایش یافت و در نتیجه سمیت قابل توجهی برای سلول‌های گلیوما نسبت به سایر فرمول‌ها مشاهده شد. در یک مطالعه بالینی روی موش‌ها، DOX-PTX-NP-Tf قوی‌ترین مهار رشد تومور را نشان داد که نشان‌دهنده پتانسیل آن به‌عنوان یک سیستم مؤثر برای درمان گلیوما است، در حالی که هیچ سمیت قابل توجهی گزارش نشد (۴۹).

گیرنده لاکتوفرین (LfR) نه تنها در BBB بلکه در سطح سلول‌های گلیوبلاستوما نیز وجود دارد، که نشان می‌دهد ترانس سیتوز با واسطه گیرنده ترانسفرین (TfR) مکانیسمی را برای مغز فراهم می‌کند تا آهن در گردش و سایر کاتیون‌های دو ظرفیتی را جذب کند. بر این اساس، ویژگی‌های منحصربه‌فرد برای هدف‌گیری تومورهای مغزی مفید خواهد بود، زیرا حامل‌های حاوی دارو که با ترانسفرین (Tf) اصلاح شده‌اند، ممکن است هم انتقال داروها از طریق BBB و هم اندوسیتوز داروها توسط سلول‌های تومور مغزی را افزایش دهند. Fang و همکاران نانوکپسول‌های امولسیون دوگانه مغناطیسی متصل به لاکتوفرین (Lf-MDCs^۶) را برای دارورسانی توسعه دادند که شامل ترکیبی از نانوذرات PAA، PVA و اکسید آهن بود. آن‌ها یک امولسیون W/O با نانوذرات Dox آبدوست و آبریز SPIO و Cur ایجاد کردند و سپس یک امولسیون دوگانه W/O/W با استفاده از PVA تشکیل دادند. این روش امکان محصور کردن Dox و Cur را فراهم کرده و الگوهای آزادسازی دارو را کنترل می‌کند که منجر به افزایش سمیت سلولی در برابر سلول‌های گلیوما RG2 از طریق اثر هم‌افزایی می‌شود. Lf-MDCها جذب سلولی بهتری را در سلول‌های RG2 که گیرنده Lf را به‌طور زیاد بیان می‌کنند، نشان دادند و هنگامی که در موش‌های حامل تومور مغزی تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفتند، سرکوب تومور قابل توجهی را نسبت به استفاده از هر دو دارو به تنهایی نشان دادند (۵۰).

سیستم‌های پاسخگو به نور

نانوحامل‌های پاسخ‌دهنده به نور به‌عنوان یکی از جذاب‌ترین سیستم‌ها در میان تمامی محرک‌های آزادسازی دارو، به دلیل غیرتهاجمی بودن نور و قابلیت بالای کنترل مکانی-زمانی از راه دور بر رهاسازی داروها، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نانوحامل‌ها قادرند خواص رهاسازی خود را با توجه به پارامترهای نوری

^۶ Lactoferrin -tethered magnetic double emulsion Nano capsules

مغز بیان می‌شوند. در مقابل، HDAC1، HDAC2 و ممکن است با بدخیمی تومور افزایش یابد، که با پیامدهای ضعیف مرتبط است. در مدل‌های گلیوما، خاموش کردن HDAC های خاص می‌تواند رشد تومور را مهار کند. کلاس‌های مختلف HDACi برای درمان شرایطی مانند بدخیمی‌های خونی تأیید شده‌اند، با تحقیقات مداوم در مورد استفاده از آنها برای تومورهای جامد مانند GB این داروها ممکن است اثرات درمان‌های استاندارد مانند رادیوتراپی و تموزولوماید را با ارتقای دسترسی بهتر کروماتین، که به عوامل شیمی‌درمانی اجازه می‌دهد موثرتر عمل کنند، افزایش دهند. علاوه بر این، HDACi دارای پتانسیل در غلبه بر مقاومت به TMZ با تأثیر بر مسیرهای پاسخ آسیب DNA است. آنها می‌توانند باعث آسیب ماندگاری DNA شوند و پاسخ به عوامل آسیب رسان به DNA را افزایش دهند و باعث توقف چرخه سلولی و آپوپتوز شوند (۶۱، ۶۰).

رادیوتراپی به‌عنوان مؤثرترین روش درمان تومورهای بدخیم مغز شناخته می‌شود؛ اما چالش اصلی در این زمینه، اطمینان از حداقل آسیب به بافت طبیعی اطراف در حالی است که بهترین دوز درمانی برای بافت تومور ارائه می‌شود. بنابراین، یکی از روش‌های اساسی درمان گلیوبلاستوما شامل رادیوتراپی همراه با حساس‌کننده‌های پرتویی است. Shirvalilou و همکاران از 5-iodo-2-deoxyuridine (IudR) به‌عنوان یک حساس‌کننده پرتوی برای گلیوبلاستوما استفاده کردند و نانوذرات اکسید گرافن مغناطیسی پوشش‌داده‌شده با پلیمر PLGA را به‌عنوان حامل دارویی برای IudR (MNPs) معرفی کردند. نتایج آزمایش‌های *in vivo* و *in vitro* نشان داد که MNP ها نه تنها زمان گردش دارو در بدن را افزایش می‌دهند، بلکه گلیوما را از طریق یک میدان مغناطیسی خارجی پس از تزریق داخل وریدی هدف قرار می‌دهند. علاوه بر این، نتایج آزمایش‌ها نرخ آزادسازی IudR بالاتری را در PH ۵/۶ نسبت به PH ۷/۴ نشان دادند، که در آن به ترتیب ۸۲ درصد و ۵۶ درصد از IudR در ۲۴ ساعت آزاد شد. سرعت رهاسازی دارو زمانی که نانوذرات به محل تومور رسیدند، به دلیل تخریب پلیمرهای PLGA تحت شرایط PH اسیدی به طور قابل توجهی افزایش یافت و توانایی‌های آزادسازی دارو کنترل‌شده MNPs را در محیط اسیدی تومور نشان داد. تحت تابش پرتو ایکس با ولتاژ بالا، IudR/MNP ها در مقایسه با گروه کنترل اثر حساس شدن تشعشع قوی‌تری را نشان داده و آپوپتوز ناشی از تابش را افزایش

Yun و همکاران گزارش کرده‌اند که مقاومت شیمیایی/رادیویی مهمترین دلیل شکست درمان گلیوبلاستوما است. معکوس کردن مقاومت شیمیایی/رادیویی GBM برای افزایش اثربخشی درمانی بسیار چالش برانگیز است. آنها کاهش قابل توجهی در مقاومت شیمیایی/رادیویی GBM توسط تولید درجا SO₂ در یک تومور را گزارش نمودند که بنا به تقاضا از پیش داروی ۵-آمینو-۱،۳-دی هیدروبنزو[c]آتیوفن ۲،۲-دی‌اکسید (ATD) بارگذاری شده بر روی نانوپارتیکل‌های ناپایدار استفاده شد. ScNP های جدید پاسخگو به اشعه ایکس به طور موثر پرتوهای ایکس بسیار نافذ را به پرتوهای فرابنفش برای کنترل تجزیه ATD برای تولید SO₂ تبدیل کردند، که به طور موثری به میتوکندری سلول های U87 مقاوم به تموزولوماید آسیب رساند تا تولید ATP را کاهش دهد و بیان P-glycoprote را کاهش دهد. در همین حال، O6-methylguanine-DNA متیل ترانسفراز (MGMT⁷) سلول‌های تومور مقاوم به دارو نیز برای جلوگیری از ترمیم DNA آسیب دیده و افزایش آپوپتوز سلولی و اثربخشی شیمی درمانی/رادیوتراپی کاهش یافت. رشد تومور آشکارا سرکوب شد و موش‌ها به طور قابل توجهی بیشتر از موش‌های مقاوم به تموزولوماید درمان نشده زنده ماندند. این پژوهش پتانسیل SO₂ را در کاهش مقاومت شیمیایی/رادیویی برای بهبود اثر درمانی در برابر تومورهای مقاوم نشان می‌دهد، اگر بتوان آن را به خوبی کنترل کرد و در سلول‌های تومور تولید کرد (۵۹).

اعضای خانواده هیستون داستیلاز (HDAC) به دلیل اثرات آنها بر فرآیندهای سلولی مختلف مانند ترمیم DNA، رشد سلولی و آپوپتوز، اهداف مهمی برای درمان گلیوبلاستوما هستند. مهارکننده‌های HDACi (HDAC) نه تنها در درمان سرطان‌ها، بلکه در اختلالات متابولیک، روانپزشکی و نورودژنراتیو نیز امیدوارکننده هستند.

خانواده HDAC شامل ۱۸ عضو است که به چندین کلاس تقسیم می‌شوند. هیستون استیل ترانسفرازها HAT گروه‌های استیل را به هیستون‌ها اضافه می‌کنند، در حالی که HDAC ها آنها را حذف می‌کنند و بر بیان ژن و ساختار کروماتین تأثیر می‌گذارند. HDACi می‌تواند سطح استیلایون را در سلول های سرطانی افزایش دهد و به طور بالقوه ژن‌های خاموش کننده تومور را فعال کند. بیان غیر طبیعی HDACs به رشد و پیشرفت گلیوما کمک می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که HDAC های خاصی مانند HDAC4 و HDAC5 در گلیوماها در سطوح پایین‌تری نسبت به بافت طبیعی

⁷ O6-methylguanine-DNA methyltransferase

از ROS ممکن است تخریب پروتئازومی و لیزوزومی (اتوفاژیک) پروتئین‌های اکسید شده را افزایش دهد. اختلال یا بار بیش از حد این مکانیسم‌های جبرانی منجر به به خطر افتادن زنده ماندن سلول می‌شود.

سلول‌های سرطانی معمولاً به دلیل مکانیسم‌های سازگاری که تومورزایی را حفظ می‌کنند، سطح درون سلولی پایه ROS را بدون عواقب مضر نشان می‌دهند. استرس اکسیداتیو بیشتر می‌تواند بر این مکانیسم‌ها غلبه کند و آسیب‌پذیری سلول‌های سرطانی را در برابر آسیب ناشی از ROS بازگرداند و پاسخ درمانی را بهبود بخشد (۶۵). Luo و همکاران یک نانوسیستم پیش‌داروی واکنش دوگانه ردوکس متشکل از پاکلیتاکسل (PTX)، اسید اولئیک و پیوندهای تیواستر را معرفی کردند که به مسائل مربوط به بارگذاری و انتشار کم دارو مرتبط با PTX آگریز می‌پردازد. این سیستم PTX را از طریق تیولیز توسط GSH یا اکسیداسیون توسط ROS آزاد می‌کند و اثرات ضد توموری قابل توجهی را در موش‌های حامل تومور نشان می‌دهد در حالی که حداقل سمیت را برای اندام‌های اصلی دارد (۶۶). Chen و همکاران نانوذرات تیوکتال (TKNs) را برای تحویل PTX توسعه دادند که به GSH و H_2O_2 حساس هستند و امکان آزادسازی دارو بر اساس تقاضا و تجزیه زیستی به محصولات جانبی ایمن را فراهم می‌کنند. این حامل با واکنش دوگانه، انتشار کنترل‌شده PTX را در محیط‌های توموری با پتانسیل‌های ردوکس متفاوت تسهیل کرده و به طور مؤثری سلول‌های سرطانی با سطوح بالای ROS و GSH را هدف قرار می‌دهد (۶۷).

نتیجه‌گیری

استفاده از نانوذرات هوشمند پاسخگو به محرک‌ها در درمان تومورهای مغزی، به عنوان یک رویکرد نوین و هدفمند، توجه زیادی را در تحقیقات پزشکی به خود جلب کرده است. این نانوذرات به دلیل توانایی عبور از BBB و تحویل دارو به صورت دقیق به بافت تومور، امیدهای تازه‌ای را برای درمان سرطان‌های مغزی ایجاد کرده‌اند. نانوذرات هوشمند می‌توانند به محرک‌های داخلی (مانند تغییرات pH، آنزیم‌ها یا سطح گلوکاتینون) یا محرک‌های خارجی (مانند نور، میدان مغناطیسی یا اولتراسوند) پاسخ دهند و دارو را تنها در محل تومور رهاسازی کنند (۶۸). این ویژگی باعث کاهش عوارض جانبی و افزایش اثربخشی درمان می‌شود. یکی از پیشرفت‌های قابل توجه در این زمینه،

دادند که این امر موجب بهبود اثر درمانی گردید (۶۲).

سیستم‌های پاسخگو به چند محرک

سیستم‌های نانوذرات هوشمند چندمحرکه، با بهره‌گیری از محرک‌های داخلی تومور نظیر pH، گلوکاتینون (GSH) و آنزیم‌ها، به طور قابل توجهی آزادسازی دارو را نسبت به سیستم‌های تک‌محرکه افزایش می‌دهند. به عنوان نمونه، نانوذرات کراتین-DOX (KDNPs) آزادسازی قابل توجهی از دارو را در شرایط محرک ترکیبی نشان داده‌اند. سایر سیستم‌ها از کوپلیمرهایی استفاده می‌کنند که به هیپوکسی و دما پاسخ می‌دهند و بسته به شرایط محیطی، کارایی‌های متفاوتی را برای انتشار دارو فراهم می‌آورند. همچنین، pH و نانوذرات حساس به حرارت برای بهبود تجمع و نفوذ دارو در بافت‌های توموری توسعه یافته‌اند. علاوه بر این، نانوذرات واکنش‌دهنده به اکسایش / pH و سیستم‌های برگشت‌پذیر بار الکتریکی به منظور دارورسانی مؤثر و درمان تومورهای مقاوم به دارو مهندسی شده‌اند. هرچند که محرک‌های داخلی می‌توانند آزادسازی دارو را تسهیل کنند، اما یکپارچه‌سازی محرک‌های خارجی مانند نور و دما ممکن است تحویل دارو را بهینه‌سازی کند. با این حال، چالش‌هایی در زمینه فعال‌سازی مؤثر این محرک‌ها در محل تومور وجود دارد. پیشرفت‌های آتی ممکن است شامل ترکیب مواد مختلف برای ایجاد سیستم‌های دارورسانی کارآمد چندمحرکه باشد (۶۴، ۶۳).

اخیراً نشان داده شده است که اتوفاژی با واسطه چپرون (CMA^۸) مکانیسم اصلی است که توسط آن درمان TMZ فعالیت HIF-1 α را در سلول‌های حساس کاهش می‌دهد، بنابراین با ارتقاء آپوپتوز سلولی، پاسخ‌دهی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، کاهش ژن‌های مرتبط با CMA برای از بین بردن حساسیت به TMZ کافی است و نقش مهم آن را در پاسخ به این دارو نشان می‌دهد. فعالیت CMA با انتشار موقت ROS به داخل سیتوپلاسم توسط میتوکندری به دنبال استرس شبکه آندوپلاسمی القا می‌شود. ROS به عنوان تنظیم‌کننده چندین مسیر وابسته به ردوکس مرتبط با رشد، تمایز، بقا و موارد دیگر توصیف شده است. با این حال، از آنجایی که رادیکال‌ها می‌توانند یکپارچگی سلول را مختل کنند، یک سیستم اکسیداسیون و کاهش هموستاز در سلول‌ها برای سم زدایی ROS وجود دارد. این مجموعه آنزیمی شامل: سوپر اکسید دیسموتاز (SOD)، گلوکاتینون ردوکناز (GR) و کاتالاز است. آسیب غیر قابل برگشت ناشی

^۸ Chaperone mediated autophagy

درمان تومورهای مغزی است. این نانوذرات می‌توانند تحت تابش نور با طول موج خاص، دارو را رها کنند یا ROS تولید کنند که به سلول‌های سرطانی آسیب می‌رسانند. این روش، که به عنوان فوتودینامیک تراپی شناخته می‌شود، در مطالعات اخیر نشان داده است که می‌تواند به طور انتخابی سلول‌های سرطانی را از بین ببرد. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌هایی مانند سمیت بالقوه نانوذرات، دشواری در عبور از سد خونی مغزی و نیاز به تولید در مقیاس صنعتی هنوز وجود دارد. تحقیقات بیشتر برای بهبود طراحی نانوذرات و ارزیابی ایمنی آن‌ها در محیط‌های بالینی ضروری است.

در نهایت، نانوذرات هوشمند پاسخگو به محرک‌ها به دلیل توانایی در تحویل هدفمند دارو و کاهش عوارض جانبی، یک گزینه امیدوارکننده برای درمان تومورهای مغزی هستند. با پیشرفت‌های بیشتر در فناوری نانو، این روش می‌تواند به یک درمان مؤثر و شخصی‌سازی شده برای بیماران مبتلا به تومورهای مغزی تبدیل شود.

استفاده از نانوذرات حساس به PH است. تومورهای مغزی معمولاً محیط اسیدی‌تری نسبت به بافت‌های سالم دارند. نانوذراتی که با پلیمرهای حساس به PH پوشش داده شده‌اند، می‌توانند دارو را در این محیط اسیدی رها کنند و از آسیب به سلول‌های سالم جلوگیری کنند. به عنوان مثال، نانوذرات پلیمری حساس به PH که حامل داروهای شیمی‌درمانی مانند دوکسوروبیسین هستند، در مطالعات پیش‌بالینی نشان داده‌اند که می‌توانند رشد تومورهای گلیوما را به طور مؤثری مهار کنند. علاوه بر این، نانوذرات مغناطیسی مانند اکسید آهن (Fe_3O_4) که به میدان مغناطیسی خارجی پاسخ می‌دهند، در درمان تومورهای مغزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

این نانوذرات می‌توانند تحت تأثیر میدان مغناطیسی، گرما تولید کنند و از طریق روش هایپرترمی مغناطیسی، سلول‌های سرطانی را از بین ببرند. ترکیب این روش با شیمی‌درمانی یا پرتودرمانی، اثربخشی درمان را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. یکی دیگر از کاربردهای نوین، استفاده از نانوذرات حساس به نور در

منابع

1. Janjua TI, Rewatkar P, Ahmed-Cox A, Saeed I, Mansfeld FM, Kulshreshtha R, et al. Frontiers in the treatment of glioblastoma: Past, present and emerging. *Advanced drug delivery reviews*. 2021; 171: 108-38.
2. Bakhtiari Moghadam B, Shirian S, Safar Mashaie K. The Effect of Astaxanthin on the Treatment of Neurological Diseases and Lesions. *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*. 2024; 13(1): 87-103.
3. Gholamkhasi N, Asghari Moghaddam N, Mohammadgholi A. Diverse cytotoxic capability of silver nanoparticles against the normal and cancerous lymphocytes. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*. 2020; 8(4): 429-39.
4. Ahmad F, Varghese R, Panda S, Ramamoorthy S, Areeshi MY, Fagoonee S, Haque S. Smart nanoformulations for brain cancer theranostics: Challenges and promises. *Cancers*. 2022; 14(21): 5389.
5. Khan MI, Hossain MI, Hossain MK, Rubel MH, Hossain KM, Mahfuz AM, et al. Recent progress in nanostructured smart drug delivery systems for cancer therapy: a review. *ACS applied bio materials*. 2022; 5(3): 971-1012.
6. Naderi N, Mohammadgholi A, Moghaddam NA. Biosynthesis of Copper Oxide-Silver Nanoparticles from Ephedra Intermedia Extract and Study of Anticancer Effects in HepG2 Cell Line: Apoptosis-Related Genes Analysis and Nitric Oxide Level Investigations. *International Journal of Molecular and Cellular Medicine*. 2024; 13(3): 303.
7. Tian H, Zhang T, Qin S, Huang Z, Zhou L, Shi J, et al. Enhancing the therapeutic efficacy of nanoparticles for cancer treatment using versatile targeted strategies. *Journal of hematology & oncology*. 2022; 15(1): 132.
8. Li Z, Huang J, Wu J. PH-Sensitive nanogels for drug delivery in cancer therapy. *Biomaterials Science*. 2021; 9(3): 574-89.
9. Shinde VR, Revi N, Murugappan S, Singh SP, Rengan AK. Enhanced permeability and retention effect: A key facilitator for solid tumor targeting by nanoparticles. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. 2022; 39: 102915.
10. Safakheil M, Ramezani M, Mohammadgholi A. The treatment of exosome and recombinant tissue plasminogen activator reduces neuronal cell death in the middle cerebral artery occlusion stroke model of rats. *Journal of Cellular Neuroscience and Oxidative Stress*. 2023; 15(1): 1122-36.
11. Kenchegowda M, Rahamathulla M, Hani U, Begum MY, Guruswamy S, Osmani RA, et al. Smart nanocarriers as an emerging platform for cancer therapy: A review. *Molecules*. 2021; 27(1): 146.
12. Shafei A, El-Bakly W, Sobhy A, Wagdy O, Reda A, Aboelenin O, et al. A review on the efficacy and toxicity of different doxorubicin nanoparticles for targeted therapy in metastatic breast cancer. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2017; 95: 1209-18.
13. Feng Z, Zhao G, Yu L, Gough D, Howell SB. Preclinical

efficacy studies of a novel nanoparticle-based formulation of paclitaxel that out-performs Abraxane. *Cancer chemotherapy and pharmacology*. 2010; 65: 923-30.

14. Torrisi L. Physical aspects of gold nanoparticles as cancer killer therapy. *Indian Journal of Physics*. 2021; 95: 225-34.

15. Zhang J, Lin Y, Lin Z, Wei Q, Qian J, Ruan R, et al. Stimuli-responsive nanoparticles for controlled drug delivery in synergistic cancer immunotherapy. *Advanced Science*. 2022; 9(5): 2103444.

16. Luo D, Wang X, Burda C, Basilion JP. Recent development of gold nanoparticles as contrast agents for cancer diagnosis. *Cancers*. 2021; 13(8): 1825.

17. Wang L, Shi Y, Jiang J, Li C, Zhang H, Zhang X, J et al. Micro-nanocarriers based drug delivery technology for blood-brain barrier crossing and brain tumor targeting therapy. *Small*. 2022; 18(45): 2203678.

18. Ahmad A, Imran M, Sharma N. Precision nanotoxicology in drug development: current trends and challenges in safety and toxicity implications of customized multifunctional nanocarriers for drug-delivery applications. *Pharmaceutics*. 2022; 14(11): 2463.

19. Sun L, Liu H, Ye Y, Lei Y, Islam R, Tan S, et al. Smart nanoparticles for cancer therapy. *Signal transduction and targeted therapy*. 2023; 8(1): 418.

20. Tamjid M, Ashrafiyan Nansa F, Golivand F, Bahari N, Wasman Smail S, Omar Khudhur Z. Use of Nanoparticles by Overcoming the Blood-Brain Barrier in the Treatment of Central Nervous System Diseases. *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*. 2023; 12(1): 85-93.

21. Perche F, Torchilin VP. Recent trends in multifunctional liposomal nanocarriers for enhanced tumor targeting. *Journal of drug delivery*. 2013; 2013(1): 705265.

22. Cheng Y, Dai Q, Morshed RA, Fan X, Wegscheid ML, Wainwright DA, et al. Blood-brain barrier permeable gold nanoparticles: an efficient delivery platform for enhanced malignant glioma therapy and imaging. *Small*. 2014; 10(24): 5137-150.

23. Ruan, S.; Yuan, M.; Zhang, L.; Hu, G.; Chen, J.; Cun, X.; et al. Tumor microenvironment sensitive doxorubicin delivery and release to glioma using angiopep-2 decorated gold nanoparticles. *Biomaterials*, 2015; 37: 425-35.

24. Zhao Y, Ren W, Zhong T, Zhang S, Huang D, Guo Y, et al. Tumor-specific PH-responsive peptide-modified PH-sensitive liposomes containing doxorubicin for

enhancing glioma targeting and anti-tumor activity. *Journal of Controlled Release*. 2016; 222: 56-66.

25. Jiang T, Zhang Z, Zhang Y, Lv H, Zhou J, Li C, et al. Dual-functional liposomes based on PH-responsive cell-penetrating peptide and hyaluronic acid for tumor-targeted anticancer drug delivery. *Biomaterials*. 2012; 33(36): 9246-258.

26. Xu HL, Fan ZL, ZhuGe DL, Tong MQ, Shen BX, Lin MT, et al. Ratiometric delivery of two therapeutic candidates with inherently dissimilar physicochemical property through PH-sensitive core-shell nanoparticles targeting the heterogeneous tumor cells of glioma. *Drug delivery*. 2018; 25(1): 1302-318.

27. Montazeri A, Ramezani M, Mohammadgholi A. Investigation the Effect of Encapsulated Bromelain Enzyme in Magnetic Carbon Nanotubes on Colorectal Cancer Cells. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*. 2021; 16: e108796.

28. Abdel-Hamid NM, Abass SA. Matrix metalloproteinase contribution in management of cancer proliferation, metastasis and drug targeting. *Molecular biology reports*. 2021; 48(9): 6525-38.

29. Victor SP, Sharma CP. Poly methacrylic acid modified CDHA nanocomposites as potential PH responsive drug delivery vehicles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2013; 108: 219-228.

30. Zhao Z, Shen J, Zhang L, Wang L, Xu H, Han Y, et al. Injectable postoperative enzyme-responsive hydrogels for reversing temozolomide resistance and reducing local recurrence after glioma operation. *Biomaterials Science*. 2020; 8(19): 5306-316.

31. Qin L, Wang C.Z, Fan H.J, Zhang C.J, Zhang H.W, Lv M.H, et al. A dual-targeting liposome conjugated with transferrin and arginine-glycine-aspartic acid peptide for glioma targeting therapy. *Oncology Letters*, 2014, 5, 2000-2006.

32. Katz JL, Geng Y, Billingham LK, Sadagopan NS, DeLay SL, Subbiah J, et al. A covalent creatine kinase inhibitor ablates glioblastoma migration and sensitizes tumors to oxidative stress. *Scientific reports*. 2024; 14(1): 21959.

33. Shao K, Zhang Y, Ding N, Huang S, Wu J, Li J, et al. Functionalized Nanoscale Micelles with Brain Targeting Ability and Intercellular Microenvironment Biosensitivity for Anti-Intracranial Infection Applications. *Advanced Healthcare Materials*. 2015; 4(2): 291-300.

34. Stephen Z.R, Kievit F.M, Veisheh O, Chiarelli

- P.A, Fang C, Wang K. et al. Redox-responsive magnetic nanoparticle for targeted convection-enhanced delivery of O6-benzylguanine to brain tumors. *ACS Nano Journal*, 2014; 8(10): 10383-395.
35. Abraki SB, Chavoshi-Nezhad S. Mitochondrial defects and oxidative stress in Alzheimer disease. *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*. 2014; 2(1): 85-94.
36. Thomas RG, Surendran SP, Jeong YY. Tumor microenvironment-stimuli responsive nanoparticles for anticancer therapy. *Frontiers in Molecular Biosciences*. 2020; 7: 610533.
37. Jia W, Zhang Y, Zhao Q, Gong M, Cao Y, Liu J, et al. Raddeanin A (RA) Inhibited EMT and Stemness in Glioblastoma via downregulating Skp2. *Journal of Cancer*. 2025; 16(1): 44.
38. Naz I, Ramchandani S, Khan MR, Yang MH, Ahn KS. Anticancer potential of raddeanin a, a natural triterpenoid isolated from anemone raddeana regel. *Molecules*. 2020; 25(5): 1035.
39. Peng F, Wang X, Shu M, Yang M, Wang L, Ouyang Z, et al. Raddeanin A suppresses glioblastoma growth by inducing ROS generation and subsequent JNK activation to promote cell apoptosis. *Cellular Physiology and Biochemistry*. 2018; 47(3): 1108-121.
40. Vlamincck B, Toffoli S, Ghislain B, Demazy C, Raes M, Michiels C. Dual effect of echinomycin on hypoxia-inducible factor-1 activity under normoxic and hypoxic conditions. *The FEBS journal*. 2007; 274(21): 5533-542.
41. Tang JH, Ma ZX, Huang GH, Xu QF, Xiang Y, Li N, et al. Downregulation of HIF-1 α sensitizes U251 glioma cells to the temozolomide (TMZ) treatment. *Experimental Cell Research*. 2016; 343(2): 148-158.
42. Zhang P, Yang H, Shen W, Liu W, Chen L, Xiao C. Hypoxia-responsive polypeptide nanoparticles loaded with doxorubicin for breast cancer therapy. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2020; 6(4): 2167-174.
43. Jing X, Yang F, Shao C, Wei K, Xie M, Shen H, et al. Role of hypoxia in cancer therapy by regulating the tumor microenvironment. *Molecular cancer*. 2019; 18: 1-15.
44. Son S, Rao NV, Ko H, Shin S, Jeon J, Han HS, et al. Carboxymethyl dextran-based hypoxia-responsive nanoparticles for doxorubicin delivery. *International journal of biological macromolecules*. 2018; 15: 110: 399-405.
45. Torchilin, V. Multifunctional and stimuli-sensitive pharmaceutical nanocarriers. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2009; 71(3): 431-444.
46. Mura S, Nicolas J, Couvreur P. Stimuli-responsive nanocarriers for drug delivery. *Nature Materials*, 2013; 12(11): 991-1003.
47. Zhang L, Dong W.F, Sun H.B. Multifunctional superparamagnetic iron oxide nanoparticles: design, synthesis and biomedical photonic applications. *Nanoscale*, 2013; 5(17): 7664-684.
48. Kong G, Dewhirst M.W. Hyperthermia and liposomes. *International Journal of Hyperthermia.*, 1999; 15(5): 345-70.
49. Cui Y, Xu Q, Chow P.K, Wang D, Wang C.H. Transferrinconjugated magnetic silica PLGA nanoparticles loaded with doxorubicin and paclitaxel for brain glioma treatment. *Biomaterials*, 2013; 34(33): 8511-520.
50. Fang J.H, Lai Y.H, Chiu T.L, Chen Y.Y, Hu S.H, Chen S.Y. Magnetic core-shell nanocapsules with dual-targeting capabilities and co-delivery of multiple drugs to treat brain gliomas. *Adv. Advanced Healthcare Materials*, 2014; 3(8): 1250-260.
51. Fomina N, Sankaranarayanan J, Almutairi A. Photochemical mechanisms of light-triggered release from nanocarriers. *Adv. Advanced Drug Delivery Reviews Journal.*, 2012; 64(11): 1005-020.
52. Katz J.S, Burdick J.A. Light-responsive biomaterials: development and applications. *Macromol. Bioscience*, 2010; 10(4): 339348.
53. Oerlemans C, Bult W, Bos M, Storm G, Nijssen J.F, Hennink W.E. Polymeric micelles in anticancer therapy: targeting, imaging and triggered release. *Pharmaceutical Research*, 2010; 27(12): 2569-589.
54. Wang F, Shen Y, Zhang W, Li M, Wang Y, Zhou D, et al. Efficient, dual-stimuli responsive cytosolic gene delivery using a RGD modified disulfide-linked polyethylenimine functionalized gold nanorod. *Journal of Controlled Release*, 2014; 196: 37-51.
55. Wang S, Xi W, Cai F, Zhao X, Xu Z, Qian J, et al. Threephoton luminescence of gold nanorods and its applications for high contrast tissue and deep in vivo brain imaging. *Theranostics*, 2015; 5(3): 251-266.
56. Agarwal A, Mackey M.A, El-Sayed M.A,

- Bellamkonda R.V. Remote triggered release of doxorubicin in tumors by synergistic application of thermosensitive liposomes and gold nanorods. *ACS Nano Journal*, 2011; 5(6): 4919-926.
57. Wu D, Chen X, Zhou S, Li B. Reactive oxidative species (ROS)-based nanomedicine for BBB crossing and glioma treatment: current status and future directions. *Frontiers in Immunology*. 2023; 14: 1241791.
58. Shazeeb MS, Acosta MT, Tiffit CJ. Role of neuroimaging in the diagnosis and treatment of rare diseases. *Frontiers in Neuroimaging*. 2025; 4: 1566484.
59. YunB, GuZ, LiuZ, HanY, SunQ, LiZ. Reducing chemo-/radioresistance to boost the therapeutic efficacy against temozolomide-resistant glioblastoma. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022; 14(34): 38617-8630.
60. Diss E, Nalabothula N, Nguyen D, Chang E, Kwok Y, Carrier F. Vorinostat SAHA promotes hyper-radiosensitivity in wild type p53 human glioblastoma cells. *Journal of clinical oncology and research*. 2014; 2(1).
61. Everix L, Seane EN, Ebenhan T, Goethals I, Bolcaen J. Introducing HDAC-targeting radiopharmaceuticals for glioblastoma imaging and therapy. *Pharmaceuticals*. 2023; 16(2): 227.
62. Shirvalilou S, Khoei S, Khoei S, Mahdavi SR, Raoufi NJ, Motevalian M, et al. Enhancement radiation-induced apoptosis in C6 glioma tumor-bearing rats via PH-responsive magnetic graphene oxide nanocarrier. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2020; 205: 111827.
63. Zheng Y, Wang L, Lu L, Wang Q, Benicewicz BC. PH and thermal dual-responsive nanoparticles for controlled drug delivery with high loading content. *ACS Omega Journal*. 2017; 2(7): 3399-405.
64. Patel P, Geed SR. Recent advancements in the application of nanomaterial in modern drug delivery and future perspective. In *Biogenic nanomaterials for environmental sustainability: principles, practices, and opportunities 2024* (pp. 319-351).
65. Lo Dico A, Salvatore D, Martelli C, Ronchi D, Diceglie C, Lucignani G, et al. Intracellular redox-balance involvement in temozolomide resistance-related molecular mechanisms in glioblastoma. *Cells*. 2019 Oct 24; 8(11): 1315.
66. Luo C, Sun J, Liu D, Sun B, Miao L, Musetti S, et al. Self-assembled redox dual-responsive prodrug-nanosystem formed by single thioether-bridged paclitaxel-fatty acid conjugate for cancer chemotherapy. *Nano letters*. 2016; 16(9): 5401-418.
67. Chen D, Zhang G, Li R, Guan M, Wang X, Zou T, et al. Biodegradable, hydrogen peroxide, and glutathione dual responsive nanoparticles for potential programmable paclitaxel release. *Journal of the American Chemical Society*. 2018; 140(24): 7373-376.
68. Bagheri AM, Ranjbar M. Nanoparticles for Drug Delivery in Parkinson's Disease: A Review of Potential Applications. *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*. 2024; 12(4): 67-80.