

فازترایی: گذشته، حال و آینده

فرزانه فتحی^۱، مهدی زین‌الدینی^{۱*}

مقاله مروری

مقدمه: فازها به عنوان عوامل ویروسی، نقش مهمی در زیست‌فناوری مولکولی ایفا می‌کنند. این ویروس‌ها به عنوان ابزاری ایده‌آل در این حوزه شناخته شده و تحقیقات جدید نشان‌دهنده پتانسیل گسترده آن‌ها در زیست‌پزشکی است. تحقیقات در مورد فازها نشان داد که این ویروس‌ها دارای پتانسیل در توسعه درمان‌های جدید از جمله استفاده از فازها به عنوان عوامل ضد سرطان، حامل مولکول‌ها در تصویربرداری، بازسازی بافت، دارورسانی، توسعه واکسن و درمان بیماری کووید ۱۹ است. اثر باکتری‌کشی فاز توسط فناوری CRISPR-Cas برای درمان باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک نیز مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. در این مقاله مروری نقش کلیدی فازها در تحقیقات و توسعه درمان‌های آینده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری: فازها به عنوان ابزاری با پتانسیل عظیم در زمینه مهندسی زیستی، مهندسی بافت، توسعه واکسن و ایمونوتراپی، ظهور کرده‌اند. ترکیب ژنتیکی فازها را می‌توان برای توسعه واکسن‌های جدید و سیستم‌های نمایش آنتی ژن مورد استفاده قرار داد. فازها فرصت‌های جدیدی را برای هدف قرار دادن فاکتورهای اختصاصی سلول‌های سرطانی، باز کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: فازدرمانی، نمایش فاز، واکسن فاز

ارجاع: فتحی فرزانه، زین‌الدینی مهدی. فازترایی: گذشته، حال و آینده. مجله علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد ۱۴۰۳؛ ۳۲ (۱۱): ۷۹-۸۳۶۶.

۱- پژوهشکده علوم و فناوری زیستی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

* (نویسنده مسئول): تلفن: ۰۲۱۲۲۹۷۴۶۰۴، پست الکترونیکی: zeinoddini@modares.ac.ir، صندوق پستی: ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

فاژدرمانی اولین بار توسط *Felix d'Herelle* بیش از یک قرن پیش کشف شد و از آن زمان به عنوان یک ابزار مؤثر در توسعه زیست‌شناسی و درمان عفونت‌های باکتریایی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از فاژها به عنوان تنها عوامل درمانی در طول دوره عفونت باکتریایی به بیمار، فاژدرمانی معمولی گفته می‌شود (۱). باکتریوفاژها، ویروس‌هایی هستند که به طور اختصاصی در باکتری‌ها تکثیر می‌شوند و به عنوان یکی از اشکال زنده غالب روی این سیاره شناخته می‌شوند. این ویروس‌ها به سلول‌های باکتریایی حمله کرده و در آن‌ها تکثیر می‌شوند، و به همین دلیل به عنوان ابزاری مؤثر در درمان عفونت‌های باکتریایی مورد توجه قرار گرفته‌اند (۲،۳). فاژدرمانی، به‌ویژه پروتئین‌های مشتق‌شده از فاژ، به عنوان یک عامل ضد میکروبی قوی، مدت‌ها قبل از کشف پنی‌سیلین شناخته شده بود. با کشف پنی‌سیلین و سایر آنتی‌بیوتیک‌ها در دهه ۱۹۴۰، فاژدرمانی به تدریج کنار گذاشته شد. در حال حاضر، فاژدرمانی در ایالات متحده برای ضد عفونی کردن مواد غذایی و سطوح، دام و محصولات گیاهی به کار می‌رود. در روسیه و گرجستان، محصولات مبتنی بر فاژ برای درمان عفونت‌های باکتریایی مقاوم به درمان‌های مرسوم در دسترس هستند (۳). فاژها، باکتری‌های گرم مثبت و منفی را آلوده کرده و معمولاً تحت تأثیر مقاومت آنتی‌بیوتیکی قرار نمی‌گیرند، که این ویژگی آن‌ها را به ابزار موثری در مقابله با باکتری‌های مقاوم به چند دارو (Multi Drug Resistant، XDR، MDR، and Extensively Drug Resistant) تبدیل کرده است. فاژهای بدخیم با چرخه لیتیک (lytic cycle) به دلیل توانایی در ایجاد شکست سلولی و کاهش خطر انتقال ژن افقی از طریق ترانسداکشن (Transduction)، برای اهداف درمانی ترجیح داده می‌شوند. فاژدرمانی به دو شکل مونوفاژ (استفاده از یک فاژ) و پلی‌فاژ (استفاده از چند فاژ، معروف به کوکتل فاژ) انجام می‌شود (۳،۴). با توجه به توانایی‌های متعدد و کاربردهای گسترده، فاژها نقش کلیدی در آینده تحقیقات و درمان‌های زیست‌پزشکی ایفا خواهند کرد. ما در این مقاله قصد داریم

پیشرفت‌های اخیر در این زمینه و ظرفیت‌های بی‌نظیر فاژها برای توسعه درمان‌های جدید و بهبود سلامت انسان‌ها را بررسی کنیم.

روش بررسی

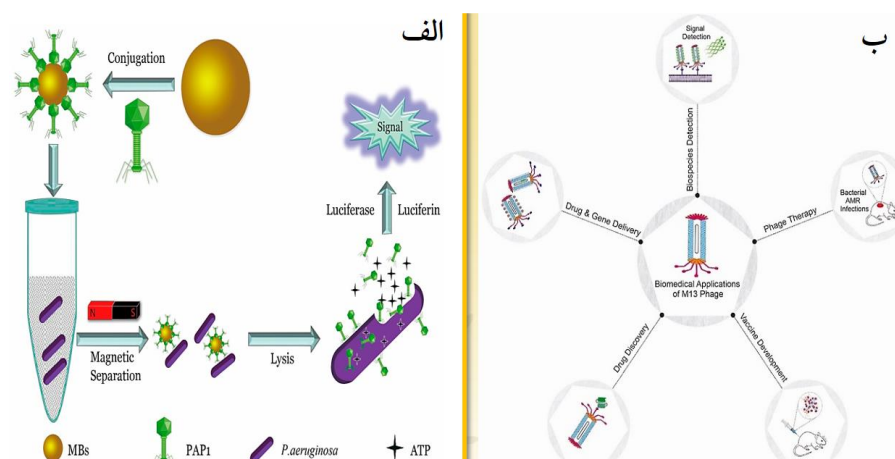
این مطالعه مروری روایتی با استفاده از مقالات مرتبط از پایگاه‌های علمی معتبر انگلیسی مانند PubMed، ProQuest، Scopus و موتور جستجوی Google Scholar در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ انجام شد. کلیدواژه‌های phage therapy، phage vaccine و Phage display و ترکیبات احتمالی آن‌ها برای جستجو استفاده شد. پس از حذف موارد تکراری و ارزیابی عنوان و چکیده، ۲۸ مقاله برای مطالعه انتخاب شدند. ابتدا خلاصه‌ای از کاربردهای غیردرمانی فاژها ارائه می‌گردد، سپس در بخش کاربردهای درمانی به بیان واکسن‌های فاژی، درمان بیماری سرطان و کووید ۱۹ با استفاده از فاژها، نقش فاژها در بازسازی بافت، به کارگیری فناوری کریسپر در مقابله با باکتری‌ها و درمان عفونت‌های باکتریایی اشاره خواهد شد.

نتایج

۱. کاربردهای غیردرمانی: فاژها به عنوان نانومواد در توسعه کاوشگرهای زیستی مبتنی بر فاژ برای تشخیص موادی مانند DNA، پروتئین‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها و انگل‌ها استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۷، He و همکاران یک پروب مغناطیسی PAP₁ را برای تشخیص سودوموناس آئروژینوزا توسعه دادند. این پروب ابتدا به باکتری متصل شده، سپس با آلوده کردن آن، باکتری لیز شده و ATP آزاد می‌گردد که به وسیله سیستم شبتابی لوسیفرز ATP-بیولومینسانس شناسایی شد (شکل ۱-الف). در سال ۱۹۳۸، فاژها برای طبقه‌بندی باکتری‌ها براساس تایپ فاژی مورد استفاده قرار گرفتند. فاژتایپینگ براساس تفاوت حساسیت باکتری‌ها به فاژها امکان شناسایی جنس‌ها و گونه‌ها را فراهم می‌کند. از خواص نوری نانومواد می‌توان برای تشخیص سریع و حساس استفاده کرد. به عنوان مثال، برخی از نانومواد فلزی (نقره یا طلا) دارای اثرات تشدید پلاسمونی قوی هستند، بنابراین می‌توانند

مهندسی شده است. ماتریس های رنگی ساختاری براساس فازها به سادگی با کنترل سرعت کشش بسته های فاز M13 عامل دار ساخته شدند. این سیستم هنگام قرارگرفتن در معرض حلال های آلی، آنتی بیوتیک ها و مواد شیمیایی مضر مانند تری نیترو تولوئن تغییرات رنگ قابل توجهی را نشان می دهد. از این پتانسیل به عنوان پلتفرمی برای نظارت بر محیط زیست در زمان واقعی استفاده می شود (۶).

مستقیماً حضور و کمیت اشیاء کشف شده در نمونه ها را هنگامی که کاوشگرهای هیبریدی جذب کرده و با اهداف مورد نظر کمپلکس تشکیل می دهند، منعکس کنند (۵). حس گرهای رنگ سنجی توجه قابل توجهی را در زمینه حس گرهای زیستی مبتنی بر باکتریوفاز M13 به دلیل مزایایی مانند فرآیندهای ساخت آسان و روش های تشخیص سریع و مستقیم به خود جلب کرده اند. Moon و همکارانش گزارش کردند که دو نوع حسگر ساختاری مبتنی بر رنگ با استفاده از فازهای M13



شکل ۱: الف- ترکیب فاز و مهره مغناطیسی همجوشی بسیار ویژه برای ساخت یک پروب خاص برای غنی سازی سودوموناس آئروژینوزا و آزادسازی ATP از باکتری از طریق لیز فاز (۵). ب- کاربردهای بالینی فاز M13 در تحویل ژن و دارو، فاز تراپی، کشف دارو، توسعه واکسن و تشخیص گونه های زیستی (۱۳).

به ویژه مغز استفاده کند (شکل ۱-ب) (۱۰). این ویژگی ها نشان دهنده پتانسیل بالای فازها در تحویل هدفمند دارو و واکسن و مقابله با مقاومت آنتی بیوتیکی است (۱۱). روش نمایش فاز، که توسط Smith در سال ۱۹۸۵ معرفی شد، شامل تزئین کپسید فاز با پپتیدها یا پروتئین ها است و به عنوان ابزار مؤثری در انتقال عوامل درمانی از جمله ژن ها، واکسن ها و داروها، هدف گیری سلول های یوکاریوتی، طراحی نانومواد، تحقیقات و درمان سرطان، تصویربرداری زیستی و بسیاری کاربردهای دیگر نقش مهمی ایفا می کند و رویکردی موثر برای شناسایی پروتئین ها، اپی توپ ها، میموتوپ ها (mimotope) و آنتی ژن ها است (شکل ۲-الف) (۱۲). فرآیند غربالگری کتابخانه های فاز در برابر پروتئین های هدف با استفاده از

۲. کاربردهای درمانی: استفاده بی رویه از آنتی بیوتیک ها منجر به ظهور پاتوژن های MDR شده است. فازها با داشتن مکانیسم های ضد باکتری متعدد می توانند عفونت های مقاوم به دارو را کاهش دهند (۴). فازهای لیتیک بدون تأثیر بر فلور طبیعی بدن و سلول های یوکاریوتی در محل عفونت تکثیر می شوند و نیازی به تنظیم دقیق دوز ندارند، زیرا تعداد آنها به صورت خودکار در محل عفونت افزایش می یابد (۷، ۸). پلاستیسیته ژنتیکی فازها امکان تغییر سطح و استفاده از آنها را برای اهداف پزشکی آینده نگر فراهم می کند (۹). فاز M13 به عنوان نانوحامل چندظرفیتی عمل می کند و می تواند پپتیدها یا آنتی بادی های هدفمند را نمایش دهد تا تحویل دارو را بهبود بخشد و از ساختار نازک نانوالیاف مانند خود برای نفوذ به موانع

مبتنی بر فاژ به نام RBDSARS-PLPs یا RBDSARS (Phage-like particle) با تزئین ذرات فاژمانند (PLPs)، (Receptor) (PLPs) فاژ لامبدا با دومین اتصال به گیرنده (RBD).binding domain نوترکیب از سندروم تنفسی خاورمیانه ساخته شده است (۲). واکسن مبتنی بر فاژ محافظت کافی در برابر چندین بیماری ویروسی مانند وپروس نقص ایمنی انسانی، وپروس هرپس سیمپلکس و وپروس پاپیلومای انسانی نوع شانزده ارائه می‌کند. هم‌چنین فناوری نمایش فاژ، محافظت ضد ویروسی کافی در برابر وپروس هیپاتیت سی انسانی و هیپاتیت بی انسانی فراهم می‌کند (۲، ۱۱). واکسن‌های مبتنی بر فاژ علیه عفونت‌های باکتریایی شامل کلأمیدیا تراکوماتیس، اشرشیاکلا، ویبریولا، بوردتلاپروتوسیس در مدل‌های موشی امتحان شده و اثربخش بوده‌اند. هم‌چنین، واکسن‌های مبتنی بر فاژ علیه عفونت‌های انگل ریپیسفالوس میکروپلاس، فاسیولاهیاتیکا و پلاسمودیوم-فالسپاروم ساخته و آزمایش شده‌اند. واکسن‌های مبتنی بر فاژ علیه بیماری‌های غیرعفونی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از جمله این بیماری‌ها می‌توان به بیماری آلزایمر، دمانس فرونتوتیمپورال (Frontotemporal dementia)، رینیت آلرژیک (Allergic rhinitis)، فشارخون بالا و بیماری‌های قلبی و عروقی اشاره کرد (۲).

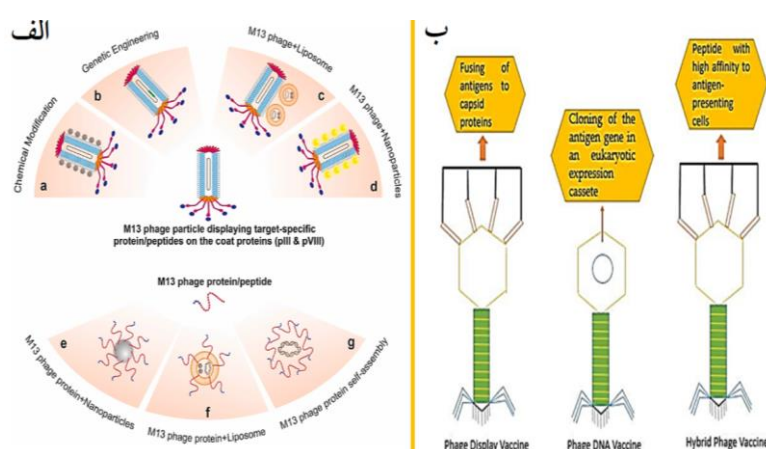
۲.۲. سرطان سینه و فاژدرمانی: فاژدرمانی به‌عنوان روشی نوین و امیدوارکننده در درمان سرطان‌ها، به‌ویژه سرطان سینه در حال پیشرفت است. در سال ۲۰۰۴، An و همکارانش پپتید ضدسرطانی F56 را از طریق غربالگری کتابخانه فاژ M13 جداسازی کردند که در موش‌های دارای نقص ایمنی شدید که با سلول‌های سرطان سینه انسانی کاشته‌شده بودند، اثرات ضد رگزایی و ضدمتاستاتیک نشان داد. هم‌چنین، آنتی‌بادی انسانی scFv 12H7 با اثرات مهاری تومور بر روی سلول‌های سرطان سینه سه‌گانه منفی شناسایی شد که به‌طور قابل‌توجهی اندازه تومور را کاهش داد. پپتید فاژی LGLRGSL نیز که به‌طور خاص به سلول‌های گذار اپیتلیال - مزانشیمی متصل می‌شود، به‌عنوان ابزاری برای شناسایی اولیه سرطان سینه متاستاتیک

انتخاب میل ترکیبی در شرایط آزمایشگاهی به‌عنوان بیوپنینگ (biopanning) شناخته می‌شود. این فرآیند شامل انتخاب میل ترکیبی فاژها با پروتئین‌های هدف و بررسی کاربردهای بالقوه آن‌ها است، که ممکن است با توالی‌یابی نسل بعدی (NGS, Next Generative Sequencing) بهبود یابد (۱۳).

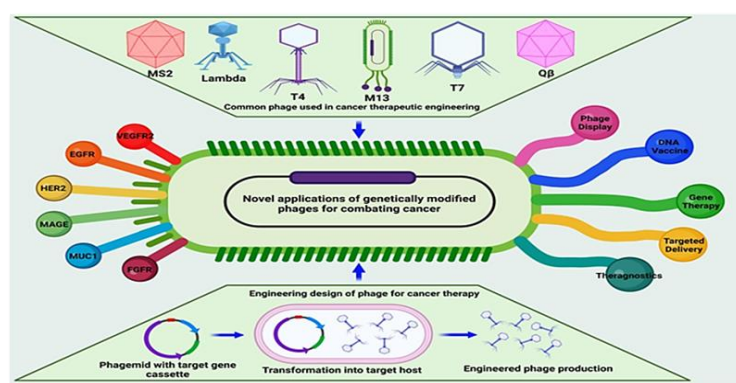
۱.۲. واکسن‌های فاژی در مبارزه با بیماری‌ها: واکسیناسیون یکی از مؤثرترین روش‌ها برای پیشگیری از بیماری‌های عفونی است. فناوری واکسن‌های مبتنی بر فاژ از فاژها به‌عنوان حامل‌هایی برای ارائه آنتی‌ژن به سیستم ایمنی استفاده می‌کند تا پاسخ ایمنی مناسبی برای محافظت در برابر بیماری‌های خاص ایجاد شود. این فناوری شامل سه نوع واکسن اصلی است: واکسن‌های نمایشی، واکسن‌های DNA و واکسن‌های هیبریدی (شکل ۲-ب). در واکسن‌های نمایشی، از روش نمایش فاژ برای بیان آنتی‌ژن‌ها استفاده می‌شود. در این روش، فاژها، پروتئین‌ها یا پپتیدهای آنتی‌ژنی را با پروتئین‌های پوششی خود بیان می‌کنند یا آنتی‌ژن‌ها به‌صورت شیمیایی به سطوح فاژ متصل می‌شوند. واکسن‌های DNA مبتنی بر فاژ شامل یک قطعه ژنی کدکننده آنتی‌ژن یا تقلید از اپی‌توپ ژنوم فاژ هستند که در یک کاست یوکاریوتی در پلاسمید کلون شده و سپس در ذرات فاژ بسته‌بندی می‌شود. این فاژها توسط سلول‌های ارائه‌دهنده آنتی‌ژن مانند ماکروفاژها و سلول‌های دندریتیک شناسایی و جذب می‌شوند، که به نوبه خود آنتی‌ژن را بیان کرده و پاسخ ایمنی تطبیقی را آغاز می‌کنند (۱، ۲، ۱۱). واکسن‌های هیبریدی ترکیبی از واکسن‌های نمایشی و واکسن‌های DNA هستند. برای تولید این واکسن‌ها، از چندین فاژ لیتیک و رشته‌ای استفاده می‌شود، به‌ویژه آن‌هایی که در اشریشیاکلا تکثیر می‌شوند. فاژهای رایج استفاده‌شده در مطالعات انتخابی شامل لامبدا، M13، AP205، T7، MS2، T4، Qβ و M13KE هستند. ذرات فاژ نمی‌توانند در سلول‌های یوکاریوتی تکثیر شوند، بنابراین ایمن‌تر از سایر واکسن‌های ویروسی هستند. واکسن‌های مبتنی بر فاژ معمولاً نیازی به ادجوانت ندارند، زیرا دی‌نوکلئوتید دئوکسی‌سیتیدیلات-فسفات-دئوکسی‌گوانیلات غیرمتیل‌ه در ژنوم فاژ این اثر کمکی را القا می‌کند. واکسن

مورد توجه قرار گرفته است. پلتفرم واکسن مبتنی بر فاز با نمایش HER2 و نوع D16HER2 بر روی فازهای M13 ایجاد شده و نشان داده که می‌تواند پاسخهای ایمنی مؤثری علیه سلولهای سرطانی حاوی HER2 ایجاد کند. فاز درمانی با استفاده از فازهای M13 به‌عنوان روشی نوآورانه در درمان سرطان مطرح شده است (شکل ۳) (۲).

معرفی شده است. همچنین، ذرات فاز M13 نو ترکیب توانسته اند هشت ایمونوژن واکسن را نمایش دهند که استفاده از سه مورد از این واکسن‌ها در مدل‌های موش T1 BC4 به مهار واضح رشد تومور منجر شده است (۱۴). گیرنده دو فاکتور رشد اپیدرمی انسانی (Human epidermal growth factor receptor-2، HER2) که با پیش‌آگهی ضعیف سرطان سینه مرتبط است، به‌عنوان یک هدف واکسن در برابر این بیماری



شکل ۲: الف- تحویل دارو و ژن با استفاده از ذرات فاز M13 و پروتئین‌های منتقله از فاز M13 (۱۳). ب- تصویری از واکسن‌های نمایش فاز، واکسن‌های DNA فاز و واکسن‌های فاز هیبریدی (۱۱).



شکل ۳: تصویری از مهندسی، کاربرد و انواع فازهای مورد استفاده در ایمونوتراپی سرطان (۲).

۵.۲. استفاده از فاژها در مقابله با کووید ۱۹: کروناویروس جدید (Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2)، SARS-CoV-2 باعث ایجاد بحران جهانی در بهداشت عمومی شده است. همراه با واکسن ها و داروها، محققان استفاده از نانومواد چندظرفیتی مبتنی بر فاژ را برای مقابله با این ویروس بررسی کرده اند. این نانومواد که میموتوپ های ویروسی پروتئین های اسپایک SARS-CoV-2 را نمایش می دهند، می توانند به گیرنده های سلول های انسانی متصل شوند و درک بهتری از مکانیسم عفونت ویروسی ارائه دهند (۱۷).

۶.۲. نقش فاژهای M13 در بازسازی پوست، استخوان، قلب و عروق، و اعصاب: بازسازی پوست با استفاده از فاژها به دلیل فعالیت ضدباکتریایی آنها در مقابله با عفونت ها و مقاومت ضدباکتریایی مؤثر است. در سال ۲۰۲۰، Zhang و همکاران هیدروژل ABgel را تولید کردند که شامل مواد زیستی (مانند اسید هیالورونیک، اکس آلژینات، آنزلاتین)، باکتریوفاژها و فاکتورهای رشد (فاکتور رشد فیبروبلاست اسیدی) برای تقویت بازسازی زخم و مبارزه با باکتری های مقاوم به آنتی بیوتیک است. این مطالعه، نشان داد که ABgel بهتر از HOGgel (شامل اسید هیالورونیک، اگزالژینات و ژلاتین) عمل می کند. فاژهای مهندسی شده نیز به عنوان مواد زیست سازگار برای بازسازی استخوان استفاده شده اند، Wang و همکاران گزارش کرد که آرژنین-گلیسین-اسپارتیک اسید M13-(RGD) باعث ایجاد استئوتوژنز عروقی در داربست های سه بعدی از جمله HA/β-TCP و کیتوزان با سلول های بنیادی مزانشیمی می شود (۶). یکی از روش های مهندسی نانومواد مبتنی بر فاژ، تکنیک الکتروریسی است. الکتروریسی، الیافی را در محدوده نانومتر تا میکرومتر با عبور محلول های پلیمری از ولتاژ بالا ایجاد می کند. فاژ M13 با استفاده از تکنیک الکتروریسی برای ایجاد بیونانوفیبرها در مهندسی بافت به کار رفته و نانوالیاف الکتروریسی شده به دلیل ساختار متخلخل و نسبت سطح به حجم بالا شبیه ماتریکس خارج سلولی بافت های بومی است و همچنین رطوبت و مواد مغذی را برای محل زخم فراهم کرده و

۳.۲. تومور مغزی و فاژدرمانی: گلیوبلاستوما یکی از بدخیم ترین تومورهای اولیه مغزی است که به دلیل رشد سریع و مقاومت به درمان های مرسوم، درمان آن دشوار است. فاژ M13 به عنوان یک ابزار کمک کننده در افزایش اثربخشی داروهای شیمی درمانی مطرح شده است. در سال ۲۰۱۹، Przystal و همکارانش پیشنهاد کردند که تموزولوماید (Temozolomide)، داروی شیمی درمانی که قادر به عبور از سد خونی-مغزی است، می تواند با ژن درمانی ترکیب شده و از طریق فاژ M13 به طور مستقیم به محل گلیوبلاستوما منتقل شود. بیان HSVtk تحت کنترل یک پروموتور ناشی از تجویز TMZ قرار گرفت. ناقل، لیگاند RGD4C را در پروتئین پوشش جزئی pIII روی کپسید M13 که گیرنده اینتگرین avβ3 موجود در سلول های تومور را متصل می کند، دارد. سپس، وکتور هیبریدی درونی شده و ژنوم نو ترکیب به هسته تحویل داده می شود تا بیان ژن درمانی به نام HSVtk را ایجاد کند که باعث مرگ سلولی با آپوپتوز می شود (۱۴، ۱۵). ترکیب ژن درمانی و شیمی درمانی از طریق فاژها می تواند بهبود قابل توجهی در اثربخشی درمان ها ایجاد کند (۲).

۴.۲. سرطان روده بزرگ و فاژدرمانی: سرطان کولورکتال (Colon Cancer)، CRC یکی از علل اصلی مرگ و میر ناشی از سرطان در جهان است. رشد بیش از حد فوزوباکتریوم نوکلئاتوم (*Fusobacterium Nucleatum*)، Fn در بافت CRC نقش مهمی در ایجاد یک ریز محیط توموری سرکوب کننده ایمنی ایفا می کند. استفاده از فاژ M13 به عنوان یک راه حل مناسب برای بازسازی ریز محیط ایمنی تومور و فعال سازی سلول های ایمنی ذاتی مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۹، Dong و همکارانش درمان ترکیبی نانوموادی فاژی را پیشنهاد کردند که شامل سویه فاژ M13 متصل به Fn بود. نانوذرات نقره به سطوح فاژ M13 متصل شدند تا سیستم هیبریداسیون M13@Ag ایجاد شود. این سیستم توانست Fn پروتومورال را حذف کرده، گسترش سلول های سرکوب گر مشتق از میلوئید را مهار و سلول های ایمنی ضد تومور را فعال کند (۱۶).

فعال سازی رگ زایی و تمایز سلولی را تسهیل می کنند (شکل ۴). در بازسازی قلب و عروق، فاژ M13 به عنوان نانوحامل برای افزایش توانایی پیوند و عملکرد سلول های بنیادی استفاده می شود. Jang و همکاران فاژهای M13 مهندسی شده ای را طراحی کردند که پپتیدهای RGD و SDKP را به ترتیب در pVIII و pIII نمایش می دهند که برای بررسی اثربخشی و ماندگاری پیوند سلول های پیش ساز قلب انسان (human Hcpc),cardiac progenitor cells در نواحی ایسکمیک قلب طراحی شدند. نتایج نشان داد که فاژهای مهندسی شده رگ زایی و احتباس hCPC را در ناحیه انفارکتوس میوکارد موش افزایش داده اند. در بازسازی عصبی در دستگاه عصبی مرکزی شامل رشد مجدد آکسون ها از سلول های عصبی نوزاد به دنبال آسیب تروماتیک مغزی است. فاژهای M13 می توانند سلول های درمانی را حمل کرده و پپتیدهای عملکردی را با نشانه های بیوشیمیایی در امتداد ویریون نانو ساختار نمایش دهند. میکروذرات فیبروئین ابریشم از پیل های کرم ابریشم برای زیست سازگاری تهیه شده و سپس با پلی اتیلن ایمین پوشانده شدند تا امکان اتصال الکترواستاتیکی فاژ به آن ها فراهم شود. ترکیب فاژ با میکروذرات فیبروئین ابریشم به بهبود ترمیم بافت مغز آسیب دیده در اثر سکته مغزی کمک کرد و نورون های غنی از آکسون را در مغز متصل کرده و عملکرد حرکتی اندام حیوانات را به طور قابل توجهی بهبود بخشید (۱۴).

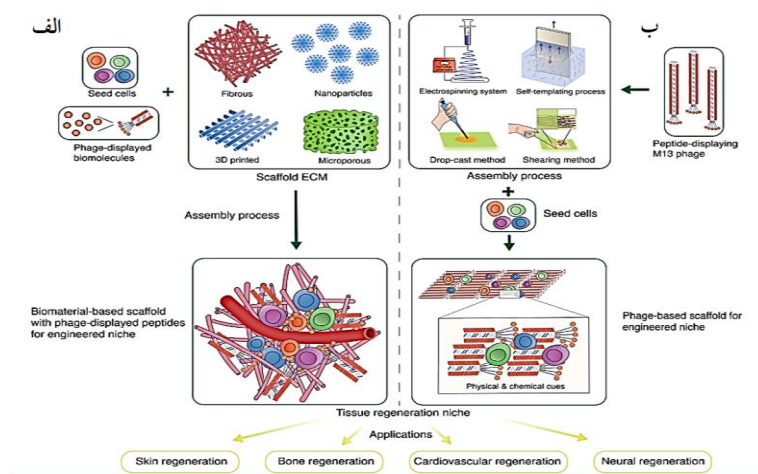
۷.۲. کریسپر ابزاری نوین برای مقابله با باکتری های مقاوم به دارو: اگرچه کریسپر به عنوان سامانه ایمنی باکتری در برابر باکتریوفاژها معرفی شده است، اما سیستم کریسپر-Cas9 (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) به عنوان یک ابزار مولکولی قدرتمند، جایگزینی مؤثر برای آنتی بیوتیک های معمولی در درمان باکتری های مقاوم به دارو نیز شناخته شده است. این سیستم توانایی غیرفعال کردن ژن های مقاوم به آنتی بیوتیک و فاکتورهای بیماری زا باکتریایی را دارد و با برش مکان های خاص در ژنوم باکتری ها، آن ها را به باکتری های حساس تبدیل می کند. فاژها به دلیل توانایی طبیعی خود در تزریق DNA به

باکتری ها، به عنوان حامل هایی مناسب برای انتقال سیستم کریسپر-Cas9 به باکتری ها استفاده می شوند. در این روش، کریسپر-Cas9 در ناقل های فاژمید (phagemid) بسته بندی شده و باکتری های مقاوم را هدف قرار می دهد. پس از تحویل، سیستم کریسپر-Cas9 توالی های هدف را از طریق RNA راهنما شناسایی و باعث برش دو رشته ای DNA باکتریایی یا حذف پلاسمید مقاومت دارویی شده که منجر به مرگ سلولی می شود (شکل ۵-الف). مزیت این فناوری این است که می تواند به گونه ای برنامه ریزی شود که طیف اثر ضد میکروبی آن در برابر توالی های DNA خاص یک باکتری خاص تنظیم شود. این ویژگی باعث می شود که تنها باکتری هایی که حاوی DNA هدف هستند از بین بروند، در حالی که سایر باکتری ها تحت تاثیر قرار نمی گیرند. از طریق این فناوری می توان فاژهای مهندسی شده را مستقیماً تولید کرد (۱۸). از کریسپر هم چنین برای ساخت فاژهای نو ترکیب و توسعه واکسن ها، از جمله واکسن کووید-۱۹، استفاده شده است. استفاده از نوکلئازهای Cas9 و نوع پنج Cas12a با مهندسی ژنوم کریسپر، توالی از درج های ژن SARS-CoV-2 نو ترکیب را در یک فاژ برای توسعه واکسن T4 کووید ۱۹ ایجاد کرد؛ که پاسخ های آنتی بادی گسترده ای را علیه اجزای مختلف، مانند آنتی ژن های اختصاصی NP و E تحریک و اثربخشی آن را تأیید کرد (شکل ۵-ب) (۱۱). در مطالعه ای، Robert و همکاران یک سیستم CRISPR-Cas9 IIA را برای ایجاد شکست های دو رشته ای در ژن های *blaSHV-18* یا *blaNDM-1* ایجاد کردند که به ترتیب مقاومت در برابر آنتی بیوتیک های بتالاکتام با طیف گسترده را رمزگذاری می کند. آن ها نشان دادند که درمان *E.coli* *EMG2* با یک پلاسمید مبتنی بر M13 حاوی نوکلئاز هدایت شده با RNA منجر به کاهش ۲ تا ۳ برابری در سلول های زنده می شود (۱۳). باکتریوفاژها مهارکننده هایی را رمزگذاری می کنند که به عنوان پروتئین های آنتی کریسپر شناخته می شوند. این بازدارنده ها سیستم دفاعی کریسپر-Cas9 باکتریایی را مختل کرده و منجر به توقف رشد و متعاقب آن شکست باکتریایی می شوند. پروتئین های

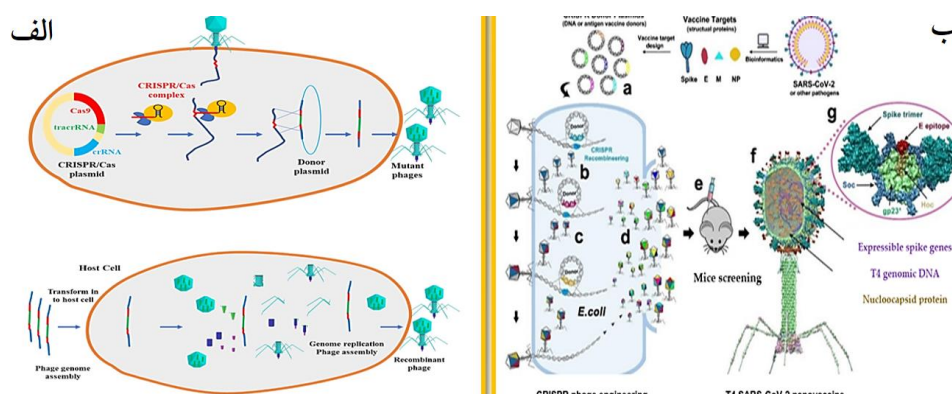
اوتيت خارجي و مياني مزمن است. در نواحی غيرقابل دسترس مانند گوش داخلي، استنشاق فاژ می تواند یک مکمل درمانی ارزشمند باشد. مطالعه‌ای نشان داد که پپتیدهای خاصی می توانند از پرده گوش به گوش میانی منتقل شوند و کارایی درمان‌های ژنی یا دارویی را افزایش دهند. در درمان عفونت‌های دندان، فرمولاسیون پولوکسامر P407 حاوی فاژهای انتروکوک EFDG1 و EFLK1 توانست تعداد سلول‌های انتروکوک را در کانال‌های ریشه موش‌ها تا ۹۹ درصد کاهش دهد (۲۱،۲۲). عفونت‌های دستگاه گوارش و ادراری مشکلات شایعی هستند که اثرات زیانباری بر سلامت افراد دارند. فاژدرمانی به عنوان رویکردی نوین برای درمان این عفونت‌ها به دلیل توانایی آن‌ها در هدف‌گیری باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک و تخریب بیوفيلم‌ها، مورد توجه قرار گرفته است (۲۰). برای درمان هلیکوباکتر پیلوری، عامل اصلی زخم معده، فاژدرمانی می‌تواند بدون آسیب به تعادل میکروبیوتای روده مؤثر باشد (۱۵). هم‌چنین، فاژها در درمان عفونت‌های ادراری ناشی از باکتری‌های انتروباکتریاسه، اشرشیاکلا و کلبسیلا پنومونیه نتایج مثبتی داشته‌اند (۲۱). علاوه بر این، فاژدرمانی می‌تواند به عنوان جایگزینی برای درمان واژینوز ناشی از رشد بیش از حد گاردنرلا واژینالیس استفاده شود و به کاهش نرخ عود این عفونت کمک کند (۱۵).

آنتی‌کریسپر می‌توانند جایگزین خوبی برای پاتوژن‌های مقاوم به دارو باشند. کشف این بازدارنده‌ها در سیستم باکتریایی کریسپر دری جدید به روی رویکردهای درمانی جایگزین علیه باکتری‌های مقاوم به دارو باز کرده است (۳).

۸.۲. نقش فاژدرمانی در درمان عفونت‌ها: اگرچه کارآزمایی‌های بالینی هنوز شواهد قطعی برای اثربخشی فاژدرمانی ارائه نکرده‌اند، اما تعداد مطالعات موردی موفق در استفاده از فاژتراپی برای درمان عفونت‌های تهدیدکننده زندگی در حال افزایش است (جدول ۱) (۱۹). فاژها به عنوان یک راه‌حل نوین و مؤثر برای درمان عفونت‌ها، به‌ویژه در برابر باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک، مطرح شده‌اند. بیماران مبتلا به زخم پای دیابتی به دلیل گردش خون ضعیف، ایجاد بیوفيلم روی زخم‌های مزمن و مقاومت باکتریایی به آنتی‌بیوتیک‌ها، در معرض خطر بالای قطع عضو قرار دارند. فاژها، که مستقل از مقاومت آنتی‌بیوتیکی عمل می‌کنند، می‌توانند بیوفيلم‌ها را تخریب کرده و عفونت‌های مزمن را پاکسازی کنند (۲۰). استافیلوکوکوس اورئوس مقاوم به متی‌سیلین و دیگر پاتوژن‌ها مانند انتروکوک فکاليس و سودوموناس آئروژینوزا می‌توانند عفونت‌های چشمی ایجاد کنند. استفاده از فاژ KPP12 به صورت قطره چشمی در درمان کراتیت در موش‌ها، موفق به کنترل عفونت و حفظ ساختار قرنیه شد (۱۵). سودوموناس آئروژینوزا یکی از شایع‌ترین عوامل ایجادکننده



شکل ۴: الف- داربست متعارف مبتنی بر مواد زیستی با پپتیدهای نمایش داده‌شده توسط فاژ و سلول‌های بنیادی کاشته‌شده برای نیچ‌های مهندسی‌شده. ب- داربست مبتنی بر فاژ بیومیمتیک با سلول‌های بنیادی کاشته‌شده برای نیچ مهندسی‌شده (۱۴).



شکل ۵: الف- راه اندازی مجدد فاز و مونتاژ توسط DNA ژنومی، DNA سازواره سلول میزبان فاز با فازهای عفونی نو ترکیب جدید ترکیب می شود (۱۸). ب- مراحل ساخت نانوواکسن T4-SARS-CoV-2 با استفاده از کریسپر (۱۱).

جدول ۱: کارآزمایی های بالینی ثبت شده با استفاده از فاز درمانی در سال های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ (۷، ۱۹).

سال	مسیر اولیه تجویز	نوع عفونت	پاتوژن باکتریایی	نتیجه بالینی
۲۰۲۰	آبیاری مثانه	عفونت مجاری ادراری	<i>Staphylococcus</i> <i>Streptococcus</i> <i>E. coli</i> <i>P. aeruginosa</i> <i>Proteus</i>	میزان موفقیت مشابه با دارونما (۷).
۲۰۲۰	داخل وریدی	باکتری، اندوکاردیت	<i>Staphylococcus aureus</i>	هیچ واکنش نامطلوبی گزارش نشد. این روش در عفونت های شدید از جمله اندوکاردیت عفونی و شوک سپتیک بی خطر است (۷).
۲۰۱۹	داخل وریدی	عفونت تیبیا/استخوان مربوط به تروما	<i>XDR Acinetobacter baumannii</i> and <i>MDR Klebsiella pneumoniae</i>	موفقیت بالینی: بهبود سریع بافت و ریشه کنی کشت های مثبت (۱۹).
۲۰۱۹	داخل وریدی	فیبروز سیستمیک	<i>MDR Pseudomonas aeruginosa</i>	موفقیت بالینی: عدم وجود ذات الریه مکرر یا تشدید CF در ۱۰۰ روز پس از پیگیری (۱۹).
۲۰۱۹	داخل وریدی	فیبروز سیستمیک	<i>Mycobacterium abscessus</i>	بهبود بالینی: بسته شدن زخم استروم، بهبود عملکرد کبد و رفع قابل توجه ندول های پوستی عفونی (۱۹).
۲۰۱۸	موضعی	عفونت مفصل پروتز (لگن)/استخوان	<i>MDR Pseudomonas aeruginosa</i> and <i>penicillin-resistant Staphylococcus aureus</i>	موفقیت بالینی: نتیجه در ۱۸ ماهگی مطلوب بود، بدون هیچ نشانه بالینی عفونت مداوم (۱۹).
۲۰۱۸	موضعی	زخم پای دیابتی با استئومیلیت/استخوان	<i>Penicillin-resistant Staphylococcus aureus</i>	موفقیت بالینی: رفع کامل زخم عفونی و استئومیلیت (با پیگیری ۳ سال بعد ثابت شد) (۱۹).
۲۰۱۸	موضعی	عفونت استخوان و مفاصل	<i>XDR Pseudomonas aeruginosa</i>	بهبود سریع و عدم رشد باکتری، اما بیمار در روز ۴۵ به دلیل پیشرفت قابل توجه متاستازهای ستون فقرات فوت کرد (۱۹).

۲۰۱۸	خوراكي و استنشاقی	فیبروز سیستمیک	<i>MDR Achromobacter xylosoxidans</i>	موفقیت بالینی: رفع تنگی نفس، کاهش سرفه، بهبود عملکرد ریه از ۵۴٪ به ۸۴٪ (۱۹).
۲۰۱۸	داخل وریدی و استنشاقی	پنومونی مکرر (گیرنده پیوند ریه دو طرفه)	<i>MDR Pseudomonas aeruginosa</i>	موفقیت بالینی: رفع پنومونی و بهبود وضعیت تنفسی (۱۹).
۲۰۱۸	داخل وریدی	عفونت محل کرانیکتومی	<i>MDR Acinetobacter baumannii</i>	هیچ نشانه دیگری از عفونت در محل کرانیوتومی وجود ندارد. کشت باکتری های خون منفی است. درمان قطع شد. بیمار فوت کرد (۱۹).
۲۰۱۸	موضعی	عفونت پیوند عروق پروتز با فیستول همراه	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	موفقیت بالینی: هیچ نشانه ای از عود در ۱۸ ماهگی وجود ندارد (۱۹).
۲۰۱۸	داخل وریدی	باکتری می / سپسیس	<i>MDR Pseudomonas aeruginosa</i>	درمان با باکتریوفاز خون بیمار را استریل کرد، اما تزریق باید پس از جبران آنافیلاکسی به دلیل نارسایی پیشرونده قلبی متوقف شود (۱۹).

جدول ۲: مزایا، معایب و شباهت‌های فازدرمانی در مقایسه با آنتی‌بیوتیک درمانی (۱).

مزایا	شباهت‌ها	معایب
ویژگی: میکروبیوتا را از بین نمی‌برد	تجویز به محیطی با pH خنثی شده نیاز دارد	ویژگی: باکتری عامل باید از قبل شناسایی شود، طیف اثر باریک
خود محدودسازی: پس از کشته شدن میزبان باکتریایی، فعالیت آن متوقف می‌شود	موفقیت درمانی به متغیرهایی مانند زمان شروع درمان بستگی دارد	القای تولید آنتی‌بادی خنثی کننده فاز (ارتباط بالینی باید تعیین شود)
برای بیماران مبتلا به آلرژی آنتی‌بیوتیکی موجود است	فعالیت تحت تأثیر سیستم ایمنی بدن بیمار است	حجم قابل توجهی از شواهد کوچک تر و کارآزمایی‌های بالینی به درستی طراحی شده که از اثربخشی آن حمایت می‌کند
ایمنی: هیچ تأثیری بر سلول‌های پستانداران ندارد	تطبیق پذیری در مسیرهای مدیریت	فقدان چارچوب قانونی خاص و مسائل حقوقی در مورد مالکیت معنوی
تولیدمثل نمایی امکان دوزهای کمتری را فراهم می‌کند	بروز مقاومت باکتریایی به عامل درمانی	
تکامل: اگر مقاومت ایجاد شود، فازها در کنار باکتری‌ها جهش می‌یابند		
فعالیت آنتی بیوفیلیم		
تولید ساده و ارزان		
فراگیر بودن		

نتیجه‌گیری

علی‌رغم نیاز به روش‌های جدید برای درمان عفونت‌های باکتریایی، فازتراپی به‌طور معمول در کاربردهای بالینی استفاده نمی‌شود، زیرا فازها با آنتی‌بیوتیک‌های معمولی بسیار متفاوت هستند (جدول ۲) (۲۳). هم‌چنین، عدم وجود استاندارد روشن برای جداسازی و خالص‌سازی فازها باعث می‌شود اثربخشی آن‌ها متغیر باشد، لذا توسعه استراتژی‌های مناسب برای غلبه بر این محدودیت‌ها ضروری است (۲۴). با توجه به بحران فزاینده

مقاومت ضد میکروبی و پیش‌بینی افزایش مرگ‌ومیر تا سال ۲۰۵۰، نیاز فوری به توسعه درمان‌های ضدباکتریایی مانند فازها احساس می‌شود. یکی از راهکارها ایجاد بانک فاز ملی یا منطقه‌ای است (۲۵). شناسایی گیرنده‌های فاز می‌تواند بهبود طراحی کوکتل‌های فاز، کشف ضد میکروب‌های جدید و ترکیب هم‌افزایی فازها با آنتی‌بیوتیک‌ها را ممکن سازد (۲۶). تحقیقات جدید نشان می‌دهند که فازها ممکن است در ترکیب میکروبیوتای روده برای بهبود فرایندهای شناختی یا درمان

بیماری‌های باکتریایی سیستم عصبی مانند آنسفالیت مننگوکوکی مؤثر باشند. همچنین، ارتباط باکتریوفازها با سیستم‌های ضد ویروسی شبیه کریسپر پیشرفت قابل توجهی است که می‌تواند چشم‌انداز جدیدی در فاز درمانی ایجاد کند (۲۷). فازها در تصویربرداری و تشخیص سلول‌های سرطانی با استفاده از نانولوله‌های کربنی و نانوذرات مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که دقت و کارایی تشخیص و درمان سرطان را بهبود می‌بخشند (۱۴). در آینده، فازها ممکن است به عنوان ابزارهای کلیدی برای حل برخی مشکلات جهانی مانند افزایش تولید غذا با مبارزه با پاتوژن‌های باکتریایی، ضعیف کردن حشرات، نماتدها و سایر آفات یوکاریوتی که به میکروبیوتای باکتریایی خود وابسته هستند، کاهش گونه‌های باکتریایی محرک چاقی در میکروبیوتای روده انسان یا افزایش تکثیر گونه‌های تقویت‌کننده لاغری، کاهش جمعیت متانوژن‌ها و در نتیجه کاهش گرمایش جهانی مفید باشند. استفاده از فازها در صنایع غذایی می‌تواند برای جلوگیری از آلودگی توسط کرونوباکتر ساکازاکی در شیر خشک نوزاد و کلسترییدیوم بوتولینوم در عسل مفید باشد. کشورهای در حال توسعه باید به سمت استقلال در تولید و توسعه فازها پیش بروند تا بتوانند با بحران‌های بهداشتی مقابله کنند (۱۵). تحقیقات در حوزه فاز درمانی به سرعت در حال گسترش است و هر روز کاربردهای جدیدی برای این روش درمانی کشف می‌شود. اگرچه فاز درمانی هنوز به طور کامل جایگزین آنتی‌بیوتیک‌ها نشده است، اما

پتانسیل بالایی در مقابله با مقاومت دارویی دارد و انتظار می‌رود در آینده نزدیک نقش مهمی در درمان عفونت‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک ایفا کند. درک تکامل باکتری‌ها در برابر فازها و مقاومت به فاز درمانی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. ایجاد مجموعه‌های جامع داده‌های ژنوتیپی و فنوتیپی و استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند به بهبود انتخاب فاز کمک کند. همچنین، پیشرفت‌های فناوری در خالص‌سازی و مهندسی دقیق‌تر فازها پتانسیل بالایی برای بهبود این روش دارند. با وجود اینکه جنبه‌های بالینی فاز درمانی هنوز به طور کامل روشن نشده است، مهندسی ژنتیک امکان طراحی فازهایی با ویژگی‌های مطلوب را فراهم می‌کند. با تلاش‌های مستمر، فازها می‌توانند به یکی از ارکان اصلی درمان‌های ضد باکتریایی در آینده تبدیل شوند (۳، ۱۲، ۲۸).

سپاس‌گزاری

این مطالعات در پژوهشکده علوم و فناوری زیستی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، انجام شده است که از مسئولین دانشگاه تشکر می‌گردد.

حامی مالی: ندارد.

تعارض در منافع: وجود ندارند.

مشارکت نویسندگان

در ایده، نگارش و ویرایش مقاله کلیه نویسندگان مشارکت داشتند.

References:

- 1-Gordillo Altamirano FL, Barr JJ. *Phage Therapy in the Postantibiotic Era*. Clin Microbiol Rev 2019; 32(2): e00066-18.
- 2-Palma M. *Aspects of Phage-Based Vaccines for Protein and Epitope Immunization*. Vaccines 2023; 11(2): 436.
- 3-Anyaegebunam NJ, Anekpo CC, Anyaegebunam ZK, Doowuese Y, Chinaka CB, Odo OJ, et al. *The Resurgence of Phage-Based Therapy in the Era of Increasing Antibiotic Resistance: From Research Progress to Challenges and Prospects*. Microbiol Res 2022; 264: 127155.

- 4-Luong T, Salabarria AC, Roach DR. *Phage Therapy in the Resistance Era: Where Do We Stand and Where are We Going?* Clin Ther 2020; 42(9): 1659-80.
- 5-Paramasivam K, Shen Y, Yuan J, Waheed I, Mao C, Zhou X. *Advances in the Development of Phage-Based Probes for Detection of Bio-Species.* Biosensors 2022; 12(1): 30.
- 6-Kim SM, Heo HR, Kim CS, Shin HH. *Genetically Engineered Bacteriophages as Novel Nanomaterials: Applications Beyond Antimicrobial Agents.* Ront Bioeng Biotechnol 2024; 12: 1319830.
- 7-Pirnay JP, Ferry T, Resch G. *Recent Progress Toward the Implementation of Phage Therapy in Western Medicine.* FEMS Microbiol Rev 2022; 46(1): fuab040.
- 8- Samaee HR, Eslami G, Rahimzadeh G, Saeedi M, Badabi AD, Asare-Addo K, et al. *Inhalation Phage Therapy as a New Approach to Preventing Secondary Bacterial Pneumonia in Patients with Moderate to Severe COVID-19: A Double-Blind Clinical Trial Study.* J Drug Deliv Sci Technol 2023; 84: 104486.
- 9- Ragothaman M, Yoo SY. *Engineered Phage-Based Cancer Vaccines: Current Advances and Future Directions.* Vaccines (Basel) 2023; 11(5): 919.
- 10-Nazir A, Song J, Chen Y, Liu Y. *Phage-Derived Depolymerase: Its Possible Role for Secondary Bacterial Infections in COVID-19 Patients.* Microorganisms 2023; 11(2): 424.
- 11-Ul Haq I, Krukiewicz K, Yahya G, Haq MU, Maryam S, Mosbah RA, et al. *The Breadth of Bacteriophages Contributing to the Development of the Phage-Based Vaccines for COVID-19: An Ideal Platform to Design the Multiplex Vaccine.* Int J Mol Sci. 2023; 24(2): 1536.
- 12-Rehman S, Ali Z, Khan M, Bostan N, Naseem S. *The Dawn of Phage Therapy.* Rev Med Virol 2019; 29(4): e2041.
- 13-Fadaie M, Dianat-Moghadam H, Ghafouri E, Naderi S, Darvishali MH, et al. *Unraveling the Potential of M13 Phages in Biomedicine: Advancing Drug Nanodelivery and Gene Therapy.* Environ Res 2023; 238(Pt 1): 11713.
- 14-Chang C, Guo W, Yu X, Guo C, Zhou N, Guo X, et al. *Engineered M13 Phage as A Novel Therapeutic Bionanomaterial for Clinical Applications: From Tissue Regeneration to Cancer Therapy.* Mater Today Bio 2023; 20: 100612.
- 15-García-Cruz JC, Huelgas-Méndez D, Jiménez-Zúñiga JS, Rebollar-Juárez X, Hernández-Garnica M, Fernández-Presas AM, et al. *Myriad Applications of Bacteriophages Beyond Phage Therapy.* PeerJ 2023; 11: e15272.
- 16-Dong X, Pan P, Zheng DW, Bao P, Zeng X, Zhang XZ. *Bioinorganic Hybrid Bacteriophage for Modulation of Intestinal Microbiota to Remodel Tumor-Immune Microenvironment Against Colorectal Cancer.* Sci Adv 2020; 6(20): eaba1590.
- 17-Petrenko VA, Gillespie JW, De Plano LM, Shokhen MA. *Phage-Displayed Mimotopes of SARS-Cov-2 Spike Protein Targeted to Authentic and Alternative Cellular Receptors.* Viruses 2022; 14(2): 384.
- 18-Balcha FB, Neja SA. *CRISPR-Cas9 Mediated Phage Therapy as an Alternative to Antibiotics.* Animal Diseases 2023; 3(1): 1-1.

- 19-Pires DP, Costa AR, Pinto G, Meneses L, Azeredo J. ***Current Challenges and Future Opportunities of Phage Therapy***. FEMS Microbiol Rev 2020; 44(6): 684-700.
- 20-Young MJ, Hall LM, Merabishvili M, Pirnay JP, Clark JR, Jones JD. ***Phage Therapy for Diabetic Foot Infection: A Case Series***. Clin Ther 2023; 45(8): 797-801.
- 21-Melo LD, Oliveira H, Pires DP, Dabrowska K, Azeredo J. ***Phage Therapy Efficacy: A Review of the Last 10 Years of Preclinical Studies***. Crit Rev Microbiol 2020; 46(1): 78-99.
- 22-Pierzynowska K, Morcinek-Orłowska J, Gaffke L, Jaroszewicz W, Skowron PM, Węgrzyn G. ***Applications of the Phage Display Technology in Molecular Biology, Biotechnology and Medicine***. Crit Rev Microbiol. 2024; 50(4): 450-90.
- 23-Nilsson AS. ***Pharmacological Limitations of Phage Therapy***. Ups J Med Sci 2019; 124(4): 218-27.
- 24-Lin J, Du F, Long M, Li P. ***Limitations of Phage Therapy and Corresponding Optimization Strategies: A Review***. Molecules 2022; 27(6): 1857.
- 25-Nagel T, Musila L, Muthoni M, Nikolich M, Nakavuma JL, Clokie MR. ***Phage Banks as Potential Tools to Rapidly and Cost-Effectively Manage Antimicrobial Resistance in the Developing World***. Curr Opin Virol 2022; 53: 101208.
- 26-Altamirano FL, Barr JJ. ***Unlocking the Next Generation of Phage Therapy: The Key is in the Receptors***. Curr Opin Virol 2021; 68: 115-23.
- 27-Jędrusiak A, Fortuna W, Majewska J, Górski A, Jończyk-Matysiak E. ***Phage Interactions with the Nervous System in Health and Disease***. Cells 2023; 12(13): 1720.
- 28-Gelman D, Yerushalmy O, Alkalay-Oren S, Rakov C, Ben-Porat S, Khalifa L, et al. ***Clinical Phage Microbiology: A Suggested Framework and Recommendations for the In-Vitro Matching Steps of Phage Therapy***. Lancet Microbe 2021; 2(10): e555- 63.

Phage Therapy: Past, Present and Future

Farzaneh Fathi¹, Mehdi Zeinoddini^{*2}

Review Article

Introduction: As viral agents, phages serve a significant purpose in molecular biotechnology. These viruses are considered as ideal tools in this field and recent studies revealed their wide potential in biomedicine. Research on phages showed that these viruses have the potential to develop new treatments, encompassing phages as anti-cancer solutions, transporters of imaging substances, tissue repair, medication distribution, vaccine formulation, and addressing COVID-19. The bactericidal effect of phage via CRISPR-Cas technology is also used to treat antibiotic-resistant bacteria. In this review study, we will explore the key role of phages in the research and development of future treatments.

Conclusion: Phages have arisen in the field of bioengineering with great potential in tissue engineering, vaccine development, and immunotherapy. The genetic composition of phages can be utilized to develop new vaccines and antigen display systems. Phages have opened new opportunities to target specific molecular determinants of cancer cells.

Keywords: phage therapy, phage display, phage vaccine.

Citation: Fathi F, Zeinoddini M. **Phage Therapy: Past, Present and Future.** J Shahid Sadoughi Uni Med Sci 2025; 32(11): 8366-79.

¹Department of Science and Biotechnology, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

***Corresponding author:** Tel: 02122974604, email: zeinoddini52@mut.ac.ir