مسمویت و ایمنی‌زایی؛ دو چالش اساسی در مسیر توسعه ایمونوتوکسین‌ها

پیام زندی[1]، فاطمه رهبری زاده[2]*

۱-دانشجو دکتری، گروه بیوتکنولوژی پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران
۲-استاد، گروه بیوتکنولوژی پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران

*صندوق پستی ۱٤۱۱۷۱۳۱۱٦، تهران، ایران
Rahbarif@modares.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۱/۰۱/۱۷ پذیرش: ۱٤۰۱/۰٦/۰۵

چکیده

ایمنوتوکسین‌ها (Its) روش جذابی برای درمان سرطان هستند؛ در این روش سموم پروتئینی با سمیت سلولی بالا به‌طور اختصاصی سلول‌های سرطانی را هدف قرار می‌دهند. ایمنوتوکسین از یک جزء هدف‌گیرنده (یک آنتی‌بادی، سایتوکاین یا پروتئین دیگری که به سلول متصل می‌شود) تشکیل شده که به‌طور شیمیایی به یک محموله سیتوتوکسیک (یک باکتری، سم گیاهی یا پروتئین انسانی سیتوتوکسیک) کونژوگه شده یا به صورت نوترکیب هم‌جوشی کرده است. ایمنوتوکسین با کمک گیرنده‌های اختصاصی، سلول هدف را می شناسد و به روش اندوسیتوز وارد سلول می شود و بعد از این که به سیتوسل راه پیدا می‌کند با کمک جزء سمی سلول سرطانی مورد نظر را از بین می‌برد. هرچند در طول دهه‌های اخیر، ایمنوتوکسین‌های مختلفی با ساختارهای متنوع بررسی و امتحان شده‌اند اما فقط ۳ ایمنوتوکسین- دنیلوکین دیفتیتوکس، تاگرازوفوسپ و موکستوموماب پاسودوتوکس- از نظر بالینی برای درمان سرطان‌های خون تایید شده‌اند. هیچ ایمنوتوکسینی برای استفاده‌های بالینی علیه تومورهای جامد تایید نشده است. در این مقاله مروری به بحث در مورد تحقیقات مهم و دو چالش در سر راه تولید و توسعه ایمنوتوکسین‌ها که موفقیت بالینی آنها را دچار محدودیت کرده است، می‌پردازیم و روش‌های غلبه بر این موانع را بررسی خواهیم کرد. این چالش‌ها شامل سمیّت برای سلول‌های هدف و غیرهدف و ایمنی‌زایی هستند.

کلید واژگان: ایمنوتوکسین، ایمنوکونژوگه، سموم، پروتئین سیتوتوکسیک، مسمومیت برای سلول‌های غیرهدف، ایمنی‌زایی

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

۱- مقدمه و هدف

تولید و گسترش عامل‌های ضد سرطانی می‌تواند نیازهای تحقق‌نیافته در زمینه درمان بالینی سرطان را برطرف کند. یکی از این روش‌ها ایمنوکونژوگه‌ها هستند که در آن یک آنتی‌بادی که میل اتصالی بسیار بالایی به سلول هدف دارد به ملکول دیگری مثل یک رادیوایزوتوپ، داروی شیمیایی، RNA کوچک تداخلی[1] یا پروتئین سیتوتوکسیک کونژوگه می‌شود و به این ترتیب سلول‌های سرطانی هدف را می‌کشد [۱]. ایمنوتوکسین‌ها[2] که یک گروه از ایمنوکونژوگه‌ها هستند، از یک ملکول هدف‌گیر که به یک سم پروتئینی کامل یا اصلاح‌شده متصل شده است، تشکیل شده‌اند. ایمنوتوکسین‌ها با استفاده از نیمه‌ای که به‌طور اختصاصی سلول هدف را شناسایی می‌کند، سم پروتئینی را به سلول مورد نظر منتقل کنند[۲, ۳].

آن بخش از ایمنوتوکسین که سلول هدف را شناسایی می‌کند، وظیفه دارد منحصراً با آنتی‌ژن (سلول هدف) که به‌طور انتخابی در سلول‌های سرطانی مورد نظر بیان یا بیش از اندازه بیان می‌شود، پیوند برقرار کند. این بخش می‌تواند آنتی‌بادی کامل یا قطعاتی از آنتی‌بادی باشد اما معمولا از دیگر لیگاندهای اختصاصی گیرنده مثل سیتوکین‌ها (نظیر اینترلوکین ۲ [IL2] و IL3)، لیگاندهای گیرنده کموکاین (مثل فراکتالکین [CX3CL1]) و فاکتورهای رشد (مثل فاکتور رشد تغییردهنده آلفا [TGFa]، فاکتور رشد اندوتلیال عروقی [VEGF] و فاکتور محرک کلونی گرانولوسیتی-ماکروفاژ [GM-CSF]) نیز استفاده می‌کند.

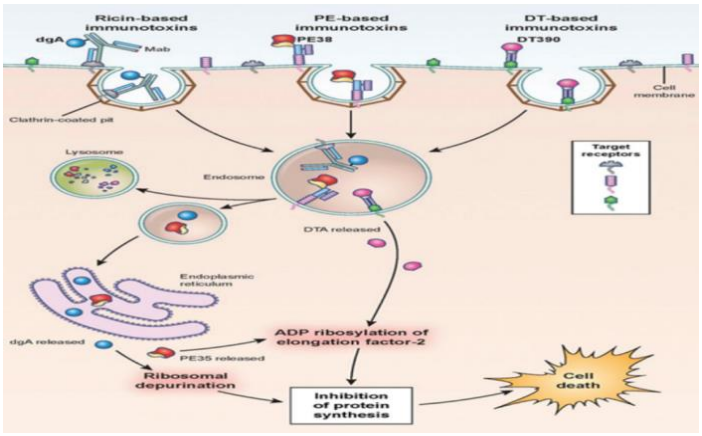
محموله سمی که توسط ایمنوتوکسین‌ها حمل می‌شود پروتئین سیتوتوکسیکی است که از باکتری (مثل اگزوتوکسین A از باکتری *Pseudomonas aeruginosa* [PE]، سم دیفتری [DT]، سم آنتراکس[3]، سموم گیاهی (مثل ریسین، ساپورین یا گلونین) یا انسانی (مثل پروتئازها یا ریبونوکلئازها [RNases]) گرفته می‌شود. اگزوتوکسین A و دیفتری که با ریبوزیلاسیون ADP فاکتور طویل‌سازی یوکاریوتی ۲[4] از سنتز پروتئین سلول‌های پستانداران جلوگیری می‌کنند، بیشتر از همه به کار می‌روند. سموم گیاهی مثل ریسین و گلونین نیز با غیرفعال کردن ریبوزوم از طریق N-گلیکوزیلاسیون RNA ریبوزومی به جای استفاده از فاکتور طویل‌سازی ۲، سنتز پروتئین‌ها را متوقف می‌کنند[٤, ٦].

بیشتر سموم به دست آمده از باکتری‌ها و گیاهان، از سه زیرواحد ساختاری یا عملکردی شامل، یک جزء متصل‌شونده به سلول برای ورود به سلول، یک موتیف با وظیفه خارج ساختن ساختار توکسین از اندامک‌های داخل سلولی و یک جزء فعال (کاتالیکی) برای القاء اثرات مسموم‌کننده تشکیل شده‌اند[۷].

در ایمنوتوکسین‌ها، جزء متصل‌شونده به سلول حذف می‌شود و جای خود را به نیمه هدف‌گیر می‌دهد که به‌طور اختصاصی سم را به تومور مورد نظر می‌رساند و سپس به کمک اندوسیتوز وابسته به گیرنده، باعث ورود به داخل سلول می‌شود. در طول فرایند ورود به سلول، نیمه سمی ایمنوتوکسین در پاسخ به تغییر شرایط محیطی شبکه اندوپلاسمی (ER)[5] و اندوزومی، بعد از انتقال به سیتوسل- جایی که تاثیرات اگزوتوکسیک خود را به جا می‌گذارد- دستخوش تغییرات ساختاری می‌شود. شکل ۱ مکانیسم عملکرد ۳ ایمنوتوکسین درمانی متفاوتف شامل سموم ریسین، یاکتری دیفتری و سم باکتری سودوموناس را نشان می دهد.

[1] interfering RNA
[2] Immunotoxins
[3] anthrax
[4] eukaryotic elongation factor 2
[5] endoplasmic reticulum

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]



شکل ۱ مکانیسم عملکرد ۳ ایمنوتوکسین درمانی متفاوت؛ سموم ریسین، یاکتری دیفتری و سم باکتری سودوموناس [٦]

۲-ایمنوتوکسین‌های تاییدشده بالینی و ایمنوتوکسین‌های در مرحله کارآزمایی بالینی

تا به امروز صدها ایمنوتوکسین مختلف بر ضد بیماری‌های متفاوت مثل سرطان‌های لنفو سیت B و T [۸]، تومورهای جا مد[۹]، بیماری پیو ند علیه میز بان[۱۰]، عفو نت های ویروسی[۱۱] و بیماری‌های خودایمنی ساخته‌شده‌اند[۱۲]. آزمایش‌های بالینی بسیار زیادی بر روی ایمنوتوکسین‌ها انجام شده و در حال انجام ا ست. با این وجود، تا به حال تنها ۳ ایمنوتوکسین برای استفاده‌های انسانی تایید شده‌اند. دنیلوکین دیفتیتوکس[٦] (Ontak®) اولین ایمنوتوکسینی بود که در سال ۱۹۹۹ برای درمان لنفوم سلول T عودکننده یا در مان نا پذیر به تایید ساز مان غذا و داروی آمریکا ر سید[۱۳]. (13). Ontak[٧] (DT-IL2) تشکیل شده از سم دیفتری کوتاه‌شده (۳۸۸ آمینواسید اول که شامل دومین جابه‌جاشونده (translocation) و جزء فعال (کاتالیکی)) به‌عنوان نیمه سمی و IL2 به‌عنوان نیمه هدفگیر. این ایمنوتوکسین، گیرنده IL2 که روی سلول‌های بدخیم و لنفو سیت‌های T تنظیم‌کننده بیان می شود را با میل ترکیبی بالایی هدف می‌دهد. در سال ۲۰۱۸، ۲ ایمنوتوکسین موکستومومب پا سودوتوکس[٨] (LUMOXITY®) [١٤] و تاگرازوفوسپ[٩] (ELZonris®)[١٥] به‌ترتیب برای درمان لو سمی سلول مویی عودکننده و نئوپلا سم سلول دندریتیک پلاسماسیتوئید بلاستیک[١٠] به تایید سازمان غذا و داروی آمریکا ر سیده ا ست. لوموک سیتی (anti-CD22 dsFv-PE38) anti-CD22 dsFv است که به PE38 که شکل کوتاه شده‌ای از PE ا ست، ات صال یافته ا ست[١٦]. Elzonris (DT-IL3) شکیل شده از IL3 که به DT کوتاه‌شده (DAB389) اتصال یافته است [۱۷]. هدف قرار دادن سرطان‌های خون؛ ت شکیل شدن از سم کوتاه شده باکتری با ایمنی‌زایی[١١] پایین و خاصیت پیوند غیراختصا صی؛ و نرخ کلی بیش از ۳۵ در صدی پا سخ به این ایمنوتوک سین‌ها در کارآزمایی‌های بالینی، ۳ م شخ صه م شترک ۳ ایمونوتوک سین مورد تائید ا ست [۱۸]. ا شکال مختلف ایمنوتوکسین‌هایی که از نظر بالینی تاییدشده یا در مرحله کارآزمایی بالینی هستند، در جدول ۱ خلاصه شده است.

[6] Denileukin diftitox
[7] Ontak
[8] Moxetumomab pasudotox
[9] tagraxofusp
[10] Blastic plasmacytoid dendritic cell neoplasm
[11] immunogenicity

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

جدول ۱ ایمنوتوکسین‌های موردتایید و تحت کارآزمایی بالینی (https://clinicaltrials.gov)

ایمنوتوکسین	نیمه هدف‌گیر	نیمه سمی	موارد تجویز	شناسه آزمایش بالینی	مرحله بالینی
دنیلوکین دیفتیتوکس (Ontak®)	IL2	DT (DAB389)	CTCL مرحله IIIC و IV ملانوما	NCT00211198 NCT01127451	تایید (۱۹۹۹) II
E7777 (Ontak® با خلوص مورد تایید)	IL2	DT (DAB389)	CTCL عودکننده یا درمان‌ناپذیر CTCL و PTCL عودکننده یا درمان‌ناپذیر PTCL	NCT01871727 NCT02676778 NCT01401530	III II I
موکستوموماب پاسودوتوکس (LUMOXITI®)	Anti-CD22 dsFv	PE (PE38	HCL B-ALL	NCT01829711 NCT02338050	تایید (۲۰۱۸) II
تاگرازوفوسپ (Elzonris®)	IL3	DT (DAB389)	BPDCN AML CML، میلوفیبروز MM	NCT02113982 NCT02270463 NCT02268253 NCT02661022	تایید (۲۰۱۸) I/II I/II I/II
MDNA55	IL-4	PE (PE38)	گلیوبلاستوما	NCT02858895	II
LMB-2	Anti-Tac scFv	PE (PE38)	HCL ATL	NCT00321555 NCT00924170	II II
A-dmDT390-bisfv (UCHT1)	Anti-CD3 bisFv	DT (DAB389)	ملانومای مرحله IV MF	NCT02990416 NCT02943642	II II
DT2219ARL	Anti-CD19 & Anti-CD22 scFv	DT (DAB389)	لوسمی لنفوبلاستی عودکننده یا درمان‌ناپذیر	NCT02370160	II
LMB-100	Anti-Mesothelin Fab	PE24) PE ایمنی‌زدایی شده)	سرطان پانکراس مزوتلیومای بدخیم	NCT02810418 NCT02798536	II I
SS1P	Anti-Mesothelin dsFv	PE (PE38)	مزوتلیوما	NCT01362790	II
MOC31PE	Anti-EpCAM murine IgG1	PE	نئوپلاسم‌های روده بزرگ	NCT02219893	I/II
اوپورتوزوماب موناتوکس (ویسینیوم)	Anti-EpCAM scFv	PE(PE38)	سرطان مثانه غیرمهاجم به ماهیچه	NCT02449239	III
T-Guard	Anti-CD3 murine IgG2b در ترکیب با anti-CD7 murine IgG2a	زنجیره A ریسین	بیماری پیوند علیه میزبان	NCT02027805	I/II
D2C7-IT	Anti-EGFR scdsFv	PE (PE38)	گلیومای بدخیم	NCT02303678	I
MT-3724	Anti-CD20 scFv	زیرواحد A شیگا	DLBCL عودکننده یا درمان‌ناپذیر	NCT02361346	I/II

۳- چالش های اساسی در تحقیق و توسعه ایمنوتوکسین‌ها و راهکارهای غلبه بر این موانع

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

هرچند ایمنوتوکسین‌ها به‌عنوان نسل نوین داروهای ضدتومور بسیار نویدبخش‌اند اما هنوز چالش‌های فراوانی در این زمینه وجود دارد که باید بر آنها غلبه کرد.

٤-سمیت برای سلول‌های هدف و غیرهدف

سموم غیرانسانی (باکتریایی و گیاهی) طراحی شده‌اند که از طریق جزء یا نیمه متصل‌شونده به گیرنده سلول میزبان- گلیکوپروتئین‌ها و گلیکولیپیدهایی که به وفور در بیشتر سلول‌ها و بافت‌ها بیان می‌شوند- طیف گسترده‌ای از انواع سموم را وارد این سلول‌ها کنند و آنها را بکشند. مثل سم باکتریایی DT، PE و سموم خانواده شیگا[12]که به ترتیب از فاکتور رشد اپیدرمی متصل‌شونده به هپارین- مثل پیش‌ساز فاکتور رشد[۱۹]، گیرنده آلفا ۲-ماکروگلوبولین و گلیکولیپید گلوبوتروئیو سیلسرامید (Gb3)[13] [۲۰] به‌عنوان گیرنده‌های میزان استفاده می‌کنند. سموم گیاهی مثل ریسین و آبرین[14]نیز برای اتصال با نیمه کربوهیدراتی از هر گلیکوپروتئین و گلیکولیپیدی به‌عنوان گیرنده استفاده می‌کنند[٦]. بنابراین، هرچند گیرنده‌های اختصاصی این سم‌ها متفاوت به نظر می‌رسد اما برای اتصال به نیمه لیپیدی گیرنده‌های میزبان یا گلیکان‌هایی که به وفور روی سلول‌ها وجود دارند، از سازوکار مشابهی استفاده می‌کنند تا وارد سلول میزبان شوند و به سم امکان دهند روی طیف وسیعی از انواع سلول‌ها اثر بگذارد. در این زمینه، ایمنوتوکسین‌های زیادی حاوی سم‌های کامل یا کوتاه‌شده وجود دارند که در کارآزمایی‌های بالینی در هدف قراردادن اختصاصی سلول‌های هدف ضعیف عمل کرده و باعث مسمومیت شدید سیستمی در سلول‌های غیرهدف- مثل سندروم نشت عروقی (VLS)[15]- شده‌اند[۲۱]. به‌عنوان مثال در کارآزمایی‌های بالینی، VLS ناشی از آسیب به سلول‌های اندوتلیال یکی از دلایل اصلی است که دوز ایمنوتوکسین‌های مبتنی بر PE، DT و ریسین را به دلیل اثرات جانبی شدید، محدود می‌کند[۲۲]. VLS همچنین جزء موارد اخطار هر سه ایمنوتوکسین موردتایید نیز هست. علاوه بر این بیماری های مختلف ناشی از مسمومیت کبدی[16]، مسمومیت کلیوی[17]و مسمومیت عروقی[18]به‌عنوان مسمومیت‌های سیستمی ناشی از تاثیر ایمنوتوکسین‌ها بر سلول‌های هدف و غیرهدف[19] گزارش شده‌اند. Ontak و LUMOXITI به ترتیب با خطراتی مثل کاهش دقت دید و دید رنگی و سندروم همولیتیک اورمیک[20] همراه هستند.

با وجود استفاده از نیمه‌ای که به‌طور اختصاصی به تومورهای هدف حمله می‌کند تا بار سمی را به‌طور انتخابی به سلول‌های تومور برساند، تولید و توسعه ایمنوتوکسین‌ها هنوز با موانعی مثل پنجره درمانی باریک[21]روبه‌رو است که از مسمومیت سلول‌های هدف و غیرهدف ناشی می‌شود. به‌عنوان مثال، دوز درمانی Ontak ۹ یا ۱۸ میکروگرم بر کیلوگرم و بیشترین دوز قابل تحمل آن برای انسان ۲۷ میکروگرم بر کیلوگرم است. در نتیجه اندک افزایشی در دوز این دارو می‌تواند با عوارض جانبی مهمی همراه باشد. بر این اساس به حداقل رساندن هر گونه مسمومیت ناشی از این داروها در سلول‌های هدف و غیرهدف نقش بسیار مهمی در گسترش پنجره درمانی آنها دارد و به شکلی ویژه می‌تواند به درمان تومورهای جامد کمک کند. از سال ۲۰۱٤ استفاده ازOntak برای درمان CTCL در ایالات متحده آمریکا متوقف شده است.

راه حل: برای به حداقل رساندن مسمومیت سلول‌های غیر هدف، سم‌هایی مثل ریسین[۲۳]، PE [۲٤] و DT [۲۵] با

[12] Shiga
[13] glycolipid globotriaosylceramide
[14] abrin
[15] Vascular leak syndrome
[16] hepatotoxicity
[17] nephrotoxicity
[18] cardiac toxicity
[19] off-target and on-target toxicities
[20] hemolytic uremic syndrome
[21] narrow therapeutic window

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

حذف یا جهش اجزاء منتقل‌شونده و متصل‌شونده به سلول به‌عنوان عامل سندروم نشت رگی، اصلاح می‌شوند. به تازگی روش آنالوگی برای توسعه Ontak نسل دوم (DT-IL2) گزارش شده که خطر سندروم نشت رگی را در موش‌های مورد آزمایش، ۵۰ برابر کاهش داده‌است[۲۶]. در این دارو، یک آمینواسید تکی به نیمه DT افزوده می شود، که با بروز سندروم نشت رگی به همراه است. در سم انسانی، گرانزیم (GrBB)[22] که یک سرین پروتئاز است و دو موتیف کاتیونی متصل به هپارین دارد. این موتیف‌ها مسئول اتصال به بافت‌های غیرهدف هستند. در طراحی جدید، بارهای کاتیونی آن کاهش یافته است. GrB که بارهای سطحی آن اصلاح شده‌اند، وقتی به TGFα، لیگاند EGFR متصل می شود، سلول‌های تومور را بسیار اختصاصی‌تر شناسایی می‌کند[۲۷].

از آنجا که عملکرد غیراختصاصی نیمه هدف‌گیر می‌تواند به اثرات جانبی در بافت‌ها و سلول‌های هدف منجر شود، استفاده از آنتی‌بادی مخصوص هدف برضد تومور نیز امری حیاتی است. علاوه بر این، وقتی گیرنده هدف بر روی سلول‌ها و بافت‌های معمولی نیز وجود داشته باشد، ایمنوتوکسین‌ها می‌توانند سلول‌های هدف را نیز دچار مسمومیت کنند. مثلا ایمنوتوکسین Anti- HER2 dsFv تلفیق شده با PE38 (erb-38) در مرحله I کارآزمایی بالینی بر روی بیماران مبتلا به سرطان سینه، باعث مسمومیت کبدی شدید می‌شود[](28). دیگر ایمنوتوکسین‌ها نیز خصوصاً در دوزهای بالا می‌توانند سلول‌های هدف را دچار مسمومیت کنند. مثلا Ontak گیرنده IL2 و SS1P (anti-mesothelin dsFv-PE38)، mesothelin را هدف قرار می‌دهد[۲۹, ۳۰].

براین اساس، انتخاب آنتی‌ژن (هدف)ی که بیان آن در سلول‌های تومور و سلول‌های عادی بسیار متمایز از هم باشد، یکی از اصول پذیرفته شده برای کارکرد اختصاصی و تحمل‌پذیری هر چه بیشتر ایمنوتوکسین‌ها است. با این وجود، آنتی‌ژن‌های سرطانی اختصاصی که در بافت‌های عادی بیان نشوند، بسیار کمیاب‌اند. یک روش جایگزین برای کاهش مسمومیت سلول‌های هدف در بافت‌های عادی ساخت ایمنوتوکسین های دومنظوره است که همزمان با دو آنتی‌ژن تومور بر روی همان نوع سلول پیوند تشکیل می‌دهند و در نتیجه می‌توانند انتخابی‌تر عمل کنند. مثلا DT2219 یک ایمنوتوکسین دومنظوره حامل DT است (آنتی CD19 scFv– آنتی CD22 scFv-DT) که سرطان‌های لنفوسیت بی را به‌طور اختصاصی شناسایی می‌کند و مسمومیت سیستماتیک بسیار محدودی دارد[۲۸].

۵-ایمنی‌زایی

القاء پاسخ ایمنی همواره مانع بزرگی بر سر راه تولید و توسعه ایمنوتوکسین‌ها بوده است؛ خاصیتی که به‌عنوان ایمنی‌زایی شناخته می شود. ایمنوتوکسین‌هایی که حاوی سموم باکتریایی و گیاهی ناهمگن هستند، ایمنی‌زایی بسیار بالایی دارند. در بیمارانی که سیستم ایمنی سالمی دارند، لنفوسیت‌های B و لنفوسیت‌های T بر ضد نیمه سمی ایمونوتوکسین پاسخ آنتی بادی های ضد-داروی (ADAs)[23]به راه می‌اندازند[۳۱]. آنتی‌بادی‌های ضددارو می‌توانند اثر ایمنوتوکسین‌ها را خنثی کنند و کارایی آن را از بین ببرند، به فرایند دفع آن از بدن سرعت می‌بخشند و در اثر پاسخ ایمنی، اثرات جانبی شدیدی در بدن ایجاد می کنند که تاثیر بلند مدت یا استفاده دوباره از این داروها را در کارآزمایی‌های بالینی با مشکل مواجه می‌کند[۳۲]. با توجه به این که ایمنوتوکسین برای این که پاسخ ضدتوموری موثری از خود به جا بگذارد، به ۵-۲ دوره مصرف نیاز دارد، ایمنی‌زایی ایمنوتوکسین‌ها یک چالش اساسی است[۳۳].

[22] granzyme B

[23] anti-drug antibodies

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

راه حل: روش‌های مختلفی برای کاهش ایمنی‌زایی ناخواسته بر ضد ایمنوتوکسین‌ها طراحی و معرفی شده است. پلی (اتیلن‌گلیکول) PEGylation[24]، درمان ترکیبی با داروهای سرکوب‌کننده ایمنی و حذف اپی‌توپ‌هایی در سموم که سبب پاسخ لنفوسیت T و لنفوسیت B می‌شوند، از این روش‌ها هستند.

PEGylation: این روش کونژوگاسیون شیمیایی با PEG است که در آن با مخفی کردن اپی‌توپ های ایمنی‌زا، ایمنوتوکسین از سیستم ایمنی میزبان دور نگه داشته می شود. این روش از طرفی سبب کاهش ایمنی‌زایی و از طرف دیگر با افزایش اندازه ملکولی، نیمه‌عمر ایمنوتوکسین را در پلاسما افزایش می‌دهد.

LMB-2 (Anti-Tac scFv-PE38) یک نمونه از این ایمنوتوکسین‌هاست که سبب پاسخ ADAs در جهت خنثی کردن Anti- PE38 را در برخی بیماران می‌شود [۳٤]. با PEGylation ناحیه لینکر بین PE38 و Anti-Tac scFv در این ایمنوتوکسین، ایمنی‌زایی آن کاهش یافته است. این روش فعالیت ضدتوموری ایمنوتوکسین را در موش‌های آزمایشگاه ۳ تا ٤ برابر افزایش داده است. با این وجود، پگیلاسیون اغلب به فعالیت سیتوتوکسیک ایمنوتوکسین‌ها لطمه می‌زند در نتیجه مانع کارآزمایی‌های بالینی بیشتر می‌شود[۳۵].

دومین راهکار شامل ترکیب ایمنوتوکسین با یک عامل سرکوبگر ایمنی است [۳٦].ایمنوتوکسین SS1P (antimesothelin dsFv-PE38) در شرایط آزمایشگاهی فعالیت ضد توموری بالقوه‌ای از خود نشان داده است اما این فعالیت ضدتوموری در مرحله I کارآزمایی بالینی بر روی بیماران مبتلا به مزوتلیوما ناچیز بوده که پیش از هر چیز ناشی از تولید آنتی‌بادی‌های ضدداروی خنثی‌کننده (ADAs) در بیماران است[۲۱]. از سوی دیگر، ترکیب SS1P با پنتو ستاتین[25]و سیکلوفسفامايد (برای کاستن از لنفوسیت‌های B و T) تولید آنتی‌بادی‌های ضددارو را به شکل قابل توجهی به تاخیر می‌اندازد و در ۳۰ درصد از بیماران مبتلا به مزوتلیوما که به شیمی‌درمانی پاسخ نداده‌اند، موجب پس‌رفت تومور می‌شود[۳۷].

سومین روش ایمنی‌زدایی از سموم خارجی است؛ فرایندی که با شناسایی و اصلاح اپی‌توپ‌هایی انجام می شود که به‌طور بالقوه سبب پاسخ لنفوسیت T و B می شوند. این اصلاح از طریق حذف یا ایجاد جهش نقطه‌ای انجام می شود[۳۱]. ایمنی‌زدایی با این روش مانع از بیان MHCII در لنفوسیت‌های B و سلول‌های T کمک‌کننده می‌شود. همچنین، این روش علاوه بر این با بلوکه کردن عرضه MHC I از شناسایی لنفوسیت‌های T سیتوتوکسیک جلوگیری می‌کند[۳۸].

LUMOXITI (anti-CD22 dsFv-PE38, HA22) که در سال ۲۰۰۲ تولید و در سال ۲۰۱۸ برای درمان لوسمی سلول مویی عودکننده تایید شد، با وجود اثربخشی در شرایط بالینی در کارآزمایی فاز III ایمنی‌زایی بالایی نشان داد. از هشتاد بیمار مورد بررسی در این آزمایش، هفتاد نفر در پایان تیمار، صرف‌نظر از وضعیت پاسخ به این ایمنوتوکسین، آنتی‌بادی ضدداروی قابل تشخیصی علیه PE38 داشتند. هرچند اثرات جانبی ناشی از ایمنی‌زایی تا حد زیادی قابل مدیریت است، اما به حداقل رساندن این اثرات می‌تواند عوارض جانبی مربوط به سموم را کاهش و اثربخشی درمانی آن را افزایش دهد؛ چرا که در این صورت امکان افزایش دوره‌های درمانی وجود دارد[۱۸, ۳۹].

پاستان[26] و همکاران، برای فرار از تله ایمنی‌زایی PE38 تلاش زیادی کردند تا با استفاده از مشتقات PE38 ایمنوتوکسین هایی با ایمنی‌زایی کمتر تولید کنند که

[24] PEGylation
[25] pentostatin
[26] Pastan

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت T و B را شناسایی و حذف کنند[۳۱]. به‌طور مثال، ۸ اسیدامینه از اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت B را در دومین III به آلانین تغییر دادند و دومین PE38 II را حذف کردند؛ به این ترتیب سم PE24 تولید شد. ایمنوتوکسین مبتنی بر PE24 HA22-LR-8M ایمنی‌زایی بسیار کمتری نشان می‌دهد و در عین حال فعالیت ضدتوموری خود را به خوبی حفظ کرده است[۴۰].

ایمنوتوکسین LMB-T20 نیز حاوی واریانت PE24 است و آلانین در ۶ اپی‌توپ احتمالی تحریک کننده لنفوسیت T جایگزین شده تا ضمن سمیت برای سلول‌های سرطانی، از ایمنی‌زایی ناشی از سلول‌های T جلوگیری کند[۴۱]. این محققان برای این که ایمنی‌زدایی را به بیشترین میزان برسانند، ۱۰ جهش آلانین را به PE24 افزودند تا اپی‌توپ‌های تحریک‌کننده لنفوسیت B و T را تضعیف کنند؛ به این ترتیب ایمنوتوکسین LMB-T14 تولید شد (آنتی مزوتلیان dsFv-PE24)(32). با این وجود برخی جهش‌هایی که برای حذف لنفوسیت‌های B معرفی شدند، باعث تولید اپی‌توپ‌های لنفوسیت T جدید می‌شوند؛ و یکی از دشواری‌های ایمنی‌زدایی کامل در درمان‌های مبتنی بر پروتئین–از جمله ایمنوتوکسین‌ها– را نشان می‌دهد[۴۲]. شایان ذکر است که اجزایی که برای ایمنی‌زدایی و حذف اپی‌توپ لنفوسیت T به PE24 اضافه می‌شوند در واقع با ایجاد اختلال در پردازش آنتی‌ژن ایمنی‌زایی را دچار نقصان می‌کنند[۴۳]. یکی از ایمنوتوکسین‌های ایمنی‌زدایی‌شده با نام LMB-100 در حال حاضر در مرحله کارآزمایی بالینی است (جدول ۱) [۴۴].

سم دیفتری نیز با معرفی جهش های نقطه‌ای در جایگاه‌های مهم ایمنی‌زدایی شده و ایمنوتوکسین CD22 Anti –scFv و Anti- CD19 scFv حامل سم دیفتری را به وجود آورده است. این توکسین فعالیت ضدتوموری خوبی علیه سرطان لنفوسیت‌های B از خود نشان داده است[۲۸]. سم گیاهی بوگانین[27]نیز با جایگزینی آلانین در ۳ اپی‌توپ پیش‌بینی‌شده لنفوسیت B ایمنی‌زدایی شده است. این روش به تولید واریانتی از بوگانین منجر شده که عاری از اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت T است (دِبوگانین[28]). انتظار می‌رود در آینده ایمنوتوکسین های ایمنی‌زدایی‌شده مختلفی در کارآزمایی‌های بالینی آزمایش شوند (جدول ۱) [۴۵, ۴۶].

۶-مقاومت به ایمونوتوکسین‌ها

با وجود آنکه مقاومت به ایمونوتوکسین‌ها در مواردی گزارش شده است اما مکانیسم بروز آن به‌طور کامل شناسایی نشده است. با این حال، مقاومت به ایمونوتوکسین‌ها در تمامی مراحل اتصال و عملکرد ایمونوتوکسین‌ها انجام می‌شود. به‌طور کلی مکانیسم عمل ایمونوتوکسین‌ها به ۴ مرحله اصلی تقسیم می‌شود. مرحله اول اتصال ایمونوتوکسین به گیرنده سطح سلولی است. در این مرحله سلول‌های هدف می‌توانند در مقابل میزان بیان آنتی‌ژن‌های سطح سلول را کاهش دهند تا هدف قرار دادن آن به راحتی انجام نشود. برای مثال در عملکرد ایمونوتوکسین SS1P، که mesothelin را هدف قرار می‌دهد، مقاومت دیده شده است. این مقاومت از طریق متیلاسیون پروموتور mesothelin و کاهش بیان این ژن انجام می‌شود[۴۷]. نقش TACE، به‌عنوان یک گلیکوپروتئین غشایی، در افزایش مقاومت به SS1P دیده شده است. در مطالعه‌ای نشان داده شد که کاهش بیان TACE از طریق یک siRNA اختصاصی سبب افزایش حساسیت سلول‌های هدف به SS1P می‌شود[۴۸].

مرحله دوم عملکرد ایمونوتوکسین ها، پردازش داخل سلولی آنها است. Furin به‌عنوان یک پروتئاز داخلی

[27] bouganin

[28] debouganin

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

سلولی، در جدا شدن آنتی بادی از توکسین اهمیت بسیار زیادی دارد. در مطالعه‌ای مشخص شده است که رده سلولی Daudi نسبت به توکسین PE سودوموناس از خود مقاومت نشان می‌دهد. در بررسی بیشتر مشخص شد که در این رده سلولی بیان furin در مقایسه با حالت عادی پایین‌تر است که می‌تواند علت کقاومت به ایمونوتوکسین نیز باشد[٤٩]. در مطالعه‌ی دیگری مشخص شد که کاهش بیان گیرنده انسولین به کاهش مقاومت به ایمونوتوکسین منجر می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است که کاهش بیان این گرنده فقط بر مرحله پردازش داخل سلولی ایمونوتوکسین‌ها اثر دارد و بر سایر مراحل قبل و بعد از آن بی اثر است. این اثر احتمالا به دلیل عملکرد گیرنده انسولین در رشد سلول‌های سرطانی بوده است[٥٠].

مرحله سوم عملکرد ایمونوتوکسین‌ها توقف سنتز پروتئین در سلول میزبان است. برای مثال ایمونوتوکسین PE از سودوموناس، با ADP-ribosylation اسیدامینه diphthamide در فاکتور طویل سازی شماره ۲ سلولی (EF2) سبب توقف عملکرد آن می‌شود. با این‌حال، این فاکتور بیانی می‌تواند با حذف diphthamide به عملکرد خود ادامه دهد. در مطالعه‌ای مشخص شده است که متیلاسیون پروموتورهای DPH1 و DPH4 به بروز مقاومت بیشتر ایمونوتوکسین منجر می‌شود[٥٣-٥١].

مرحله آخر از مکانیسم عمل ایمونوتوکسین‌ها فعال کردن فرایند آپوپتوز در داخل سلول است. این عمل در اثر مهار عملکرد مولکول mcl-1 توسط ایمونوتوکسین اتفاق می افتد. Mcl-1 یک فاکتور مهارکننده bac محسول می‌شود. Bac به‌عنوان فعال کننده آپوپتوز محسوب می‌شود. مقاومت به ایمونوتوکسین‌ها در مرحله چهارم با کاهش بیان پروتئین‌های آپوپتوتیک یا افزایش فاکتورهای ضد آپوپتوز انجام می‌شود. مهار افزایش بیان پروتئین‌های ضد آپوپتوز می‌تواند به کاهش مقاومت سلول‌های سرطانی به ایمونوتوکسین‌ها شود[٥١].

۷-نانوبادی‌ها به‌عنوان عوامل هدف‌گیر

نانوبادی یک بخش از آنتی‌بادی‌های معمول است و نواحی متصل شونده به آنتی‌ژن هدف را در خود دارد. این عوامل نسبت به آنتی‌بادی‌های معمول اندازه به مراتب کوچکتری دارند و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، آنها را قادر ساخته است که از خود پتانسیل بالایی برای اتصال نشان دهند[٥٤]. اخیرا از نانوبادی‌ها در تولید ایمونوتوکسین‌ها استفاده شده است. در ادامه به بررسی عملکرد برخی از ایمونوتوکسین‌های مبتنی بر نانوبادی خواهیم پرداخت.

۷-۱ ایمونوتوکسین ضد VEGFR2

افزایش بیان گیرنده فاکتور رشد عروقی اندوتلیال۲[29] در برخی از تومورها سبب افزایش رشد و تکثیر سلول خواهد شد. VGRNb-PE یک ایمونوتوکسین برپایه نانوبادی محسوب می‌شودکه از توکسین PE38 به‌عنوان سم، بهره می‌برد. تیمار رده سلولی 293KDR (بیان کننده VEGFR2) با این ایمونوتوکسین، سبب مهار فعالیت این گیرنده و در نتیجه کاهش رشد توموری داشت[٥٦،٥٥].

۷-۲ ایمونوتوکسین ضد CD7

مارکر CD7[30] به‌عنوان مارکر سطح سلولی در برخی سرطان‌ها نظیر اوسمی و لنفوم سلول‌های T، از خود افزایش بیان نشان می‌دهد. در یک مطالعه از VHH6 به‌عنوان نانوبادی مورد استفاده در ساختار ایمونوتوکسین علیه این مارکر سلولی استفاده شد. همچنین، از PE38 به‌عنوان بخش سمی استفاده برده شد. استفاده از این ایمونوتوکسین در موش‌های آزمایشگاهی، عملکرد آن در مهار سلول‌های توموری و افزایش بقای مدل آزمایشگاهی را نشان داد[٥٧].

۷-۳ ایمونوتوکسین ضد HSV-2 glycoprotein D

[29] Vascular endothelial growth factor receptor 2

[30] Cluster differentiation

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

سروتیپ شماره ۲ ویروس هرپس سیمپلکس (HSV-2) به‌عنوان یکی از معمول‌ترین عوامل بروز بیماری‌های مقاربتی محسوب می‌شود. نقش HSV-2 glycoprotein D به‌عنوان یک آنتی‌ژن سطح سلولی، در اتصال و ورود ویروس هرپس و گسترش سلول به سلول آن ضروری است. برای بلوکه کردن ویروس از گسترش سلول به سلول، از ایمونوتوکسین R33ExoA استفاده شده است. این ایمونوتوکسین از نانوبادی علیه آنتی‌ژن اختصاصی به‌عنوان بخش هدف گیر بهره می‌برد که در مطالعات بر روی سلول های آلوده به HSV-2 عملکرد آن در مهار ویروس مشاهده گشت[۵۸].

۸- نتیجه‌گیری و چشم انداز پیش‌رو

ایمنوتوکسین ها که هم ملکول خاصی را هدف قرار می‌دهند و هم از عامل‌های سیتوتوکسیک برای کشتن سلول استفاده می‌کنند، به دلیل خصوصیات منحصر به فردی مثل قدرت بالا و نبود مقاومت دارویی روش جذابی برای درمان سرطان به شمار می‌روند. علاوه بر این، به دلیل این که ایمنوتوکسین ها سازوکاری متفاوت با عامل‌های ضدسرطانی هدف دارند، می‌توانند به شکلی محتاطانه با عامل‌های ضد سرطانی دیگر ترکیب شوند تا سرطان‌های مقاوم به شیمی‌درمانی را درمان کنند د[۵۹, ۶۰]. حتی می‌توان دو ایمنوتوکسین مختلف را با هم ترکیب کرد تا اثر یکدیگر را تقویت کنند ، برای مثال در یک آزمایش بالینی ترکیب ایمنوتوکسین‌های anti-CD3 IgG-ricin و antiCD7 IgG-ricin برای درمان فرم حاد بیماری پیوند علیه میزبان (GVHD) و مقاوم به کورتیکواستروییید استفاده شده است[۶۱،۱۰].

با این وجود، هنوز چالش های زیادی در زمینه تحقیق و توسعه ایمنوتوکسین‌ها وجود دارد که باید بر آنها غلبه کرد. ایمنی‌زایی و مسمومیت برای سلول‌های غیرهدف هنوز یکی از مهم ترین چالش‌های طراحی ایمنوتوکسین‌های تولیدشده از سموم باکتریایی و گیاهی با ارزش بالینی بالا ست. هرچند پروتئین‌های سیتوتوکسیک انسانی به دلیل احتمال ایمنی‌زایی پایین می‌توانند جایگزین خوبی برای سایر سموم باشند، اما لازم است با مهندسی ژنتیک اصلاح شوند تا با اضافه کردن جزء دیگری برای فرار اندوزومی و ورود به سیتوسل، بتوانند از تاثیر بازدارنده‌های سیتوسولی درون سلولی در امان بمانند. در طول طراحی و تولید ایمنوتوکسین ها باید به دقت به صفات آنتی‌ژن (هدف) مثل اختصاصی بودن، توجه کرد تا ایمنوتوکسین حاصل کاملا اختصاصی عمل کند و به شکلی موثر به سیتوسل منتقل شود. استفاده از آنتی‌بادی هدف‌گیر که به شکلی اختصاصی تومور هدف را شناسایی کند و کارایی بالایی برای ورود به سلول داشته باشد برای اعمال تاثیر سمی ایمنوتوکسین در سلول‌های هدف و پیشگیری از مسمومیت سیستمی در سلول‌ها و بافت‌های غیرهدف ضروری است. تا به امروز تنها سه ایمنوتوکسین- فقط برای درمان سرطان‌های خون- تایید شده‌اند. با توجه به این که بیش از ۸۰ در صد از سرطان‌های انسانی تومور جامد هستند، لازم است در آینده تلاش‌های تحقیقاتی تا حد زیادی معطوف به ایمنوتوکسین هایی شود که تومورهای بدخیم جامد را هدف قرار می‌دهند. برای این منظور انتخاب آنتی‌ژن (هدف) مناسب، تنظیم میل ترکیبی آنتی بادی با توجه به میزان بیان آنتی‌ژن، و مهندسی آنتی‌بادی برای نفوذ موثر به داخل بافت تومور باید مورد توجه قرار گیرد تا ایمنوتوکسین به شکل موثری در تومور خانه کند و به شکلی عمیق و همگن در سراسر بافت تومور منتشر شود. انتقال مقدار کافی از ایمنوتوکسین به سیتوسل هنوز یکی از تنگناهای مهم بر سر راه استفاده موثر از این داروها است و باید با راهکارهای جدید برای ساخت ایمنوتوکسین‌های ضد سرطانی قدرتمند، هر چه زودتر برطرف شود. در حال حاضر بیشتر ایمنوتوکسین‌ها به‌عنوان یک روش درمانی ضدسرطان طراحی و ارائه شده‌اند. اما لازم است کاربرد آنها گسترش یابد و در درمان

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

عوارض دیگری مثل بیماری های ویروســـی و انگلی و خودایمنی به خدمت گرفته شوند.

۹- منابع

[1] Cruz E, Kayser V. Monoclonal antibody therapy of solid tumors: Clinical limitations and novel strategies to enhance treatment efficacy. Vol. 13, Biologics: Targets and Therapy. 2019.

[2] Munir I, Naseer RD, Sultana A, Naseer A, Shaukat B, Sultana F. Immunotoxins, an advance tool for cancer treatment: Review and update. Vol. 75, Acta Poloniae Pharmaceutica - Drug Research. 2018.

[3] Wayne AS, FitzGerald DJ, Kreitman RJ, Pastan I. Immunotoxins for leukemia. Vol. 123, Blood. 2014.

[4] Spiess K, Jeppesen MG, Malmgaard-Clausen M, Krzywkowski K, Kledal TN, Rosenkilde MM. Novel Chemokine-Based Immunotoxins for Potent and Selective Targeting of Cytomegalovirus Infected Cells. J Immunol Res. 2017;2017.

[5] Sun M, Tang H, Gao Y, Dai X, Yuan Y, Zhang C, et al. Constitutive expression and anticancer potency of a novel immunotoxin onconase-DV3. Oncol Rep. 2016;35(4).

[6] Mei X, Chen J, Wang J, Zhu J. Immunotoxins: Targeted Toxin Delivery for Cancer Therapy. Pharm Front. 2019;01(01).

[7] Pastan I, Hassan R, FitzGerald DJ, Kreitman RJ. Immunotoxin treatment of cancer. Vol. 58, Annual Review of Medicine. 2007.

[8] Kreitman RJ, Tallman MS, Robak T, Coutre S, Wilson WH, Stetler-Stevenson M, et al. Phase I trial of anti-CD22 recombinant immunotoxin moxetumomab pasudotox (CAT-8015 or HA22) in patients with hairy cell leukemia. J Clin Oncol. 2012;30(15).

[9] Alewine C, Xiang L, Yamori T, Niederfellner G, Bosslet K, Pastan I. Efficacy of RG7787, a next-generation mesothelin-targeted immunotoxin, against triple-negative breast and gastric cancers. Mol Cancer Ther. 2014;13(11).

[10] Groth C, van Groningen LFJ, Matos TR, Bremmers ME, Preijers FWMB, Dolstra H, et al. Phase I/II Trial of a Combination of Anti-CD3/CD7 Immunotoxins for Steroid-Refractory Acute Graft-versus-Host Disease. Biol Blood Marrow Transplant. 2019;25(4).

[11] Krishna BA, Spiess K, Poole EL, Lau B, Voigt S, Kledal TN, et al. Targeting the latent cytomegalovirus reservoir with an antiviral fusion toxin protein. Nat Commun. 2017;8.

[12] Zhao P, Wang P, Dong S, Zhou Z, Cao Y, Yagita H, et al. Depletion of PD-1-positive cells ameliorates autoimmune disease. Nat Biomed Eng. 2019;3(4).

[13] Manoukian G, Hagemeister F. Denileukin diftitox: A novel immunotoxin. Vol. 9, Expert Opinion on Biological Therapy. 2009.

[14] Janus A, Robak T. Moxetumomab pasudotox for the treatment of hairy cell leukemia. Expert Opin Biol Ther. 2019;19(6).

[15] Syed YY. Tagraxofusp: First Global Approval. Drugs. 2019;79(5) :579-583..

[16] Wang B, Liang M, Yao Z, Vainshtein I, Lee R, Schneider A, et al. Pharmacokinetic and pharmacodynamic comparability study of moxetumomab pasudotox, an immunotoxin targeting CD22, in cynomolgus monkeys. J Pharm Sci. 2013;102(1).

[17] Pemmaraju N, Lane AA, Sweet KL, Stein AS, Vasu S, Blum W, et al. Tagraxofusp in Blastic Plasmacytoid Dendritic-Cell Neoplasm. N Engl J Med. 2019;380(17).

[18] Kreitman RJ, Dearden C, Zinzani PL, Delgado J, Karlin L, Robak T, et al. Moxetumomab pasudotox in relapsed/refractory hairy cell leukemia. Leukemia. 2018;32(8).

[19] Naglich JG, Metherall JE, Russell DW, Eidels L. Expression cloning of a diphtheria toxin receptor: Identity with a heparin-binding EGF-like growth factor precursor. Cell. 1992;69(6).

20. [20] Kim JS, Lee MS, Kim JH. Recent Updates on Outbreaks of Shiga Toxin-Producing Escherichia coli and Its Potential Reservoirs. Vol. 10, Frontiers in Cellular and Infection Microbiology. 2020.

[21] Hassan R, Bullock S, Premkumar A, Kreitman RJ, Kindler H, Willingham MC, et al. Phase I study of SS1P, a recombinant anti-mesothelin immunotoxin given as a bolus I.V. infusion to patients with mesothelin-expressing mesothelioma, ovarian, and pancreatic cancers. Clin Cancer Res. 2007;13(17).

[22] Erickson HA, Jund MD, Pennell CA. Cytotoxicity of human RNase-based immunotoxins requires cytosolic access and resistance to ribonuclease inhibition. Protein Eng Des Sel. 2006;19(1).

[23] Smallshaw JE, Ghetie V, Rizo J, Fulmer JR, Trahan LL, Ghetie MA, et al. Genetic engineering of an immunotoxin to eliminate pulmonary vascular leak in mice. Nat Biotechnol. 2003;21(4).

[24] Wang H, Song S, Kou G, Li B, Zhang D, Hou S, et al. Treatment of hepatocellular carcinoma in a mouse xenograft model with an immunotoxin which is engineered to eliminate vascular leak syndrome. Cancer Immunol Immunother. 2007;56(11).

[25] Meng J, Liu Y, Gao S, Lin S, Gu X, Pomper MG, et al. A bivalent recombinant immunotoxin with high potency against tumors with EGFR and EGFRvIII expression. Cancer Biol Ther.

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

2015;16(12).
[26] Cheung LS, Fu J, Kumar P, Kumar A, Urbanowski ME, Ihms EA, et al. Second-generation IL-2 receptor-targeted diphtheria fusion toxin exhibits antitumor activity and synergy with anti–PD-1 in melanoma. Proc Natl Acad Sci U S A. 2019;116(8).
[27] Jabulowsky RA, Oberoi P, Bähr-Mahmud H, Dälken B, Wels WS. Surface charge-modification prevents sequestration and enhances tumor-cell specificity of a recombinant granzyme B-TGFα fusion protein. Bioconjug Chem. 2012;23(8).
[28] Schmohl JU, Todhunter D, Taras E, Bachanova V, Vallera DA. Development of a deimmunized bispecific immunotoxin dDT2219 against B-cell malignancies. Toxins (Basel). 2018;10(1).
[29] Olsen E, Duvic M, Frankel A, Kim Y, Martin A, Vonderheid E, et al. Pivotal phase III trial of two dose levels of denileukin diftitox for the treatment of cutaneous T-cell lymphoma. J Clin Oncol. 2001;19(2).
[30] Kreitman RJ, Hassan R, FitzGerald DJ, Pastan I. Phase I trial of continuous infusion anti-mesothelin recombinant immunotoxin SS1P. Clin Cancer Res. 2009;15(16).
[31] Mazor R, King EM, Pastan I. Strategies to Reduce the Immunogenicity of Recombinant Immunotoxins. Vol. 188, American Journal of Pathology. 2018.
[32] Mazor R, Onda M, Park D, Addissie S, Xiang L, Zhang J, et al. Dual B- and T-cell de-immunization of recombinant immunotoxin targeting mesothelin with high cytotoxic activity. Oncotarget. 2016;7(21).
[33] Mazor R, Onda M, Pastan I. Immunogenicity of therapeutic recombinant immunotoxins. Vol. 270, Immunological Reviews. 2016.
[34] Kreitman RJ, Wilson WH, White JD, Stetler-Stevenson M, Jaffe ES, Giardina S, et al. Phase I trial of recombinant immunotoxin anti-Tac(Fv)-PE38 (LMB-2) in patients with hematologic malignancies. J Clin Oncol. 2000;18(8).
[35] Filpula D, Yang K, Basu A, Hassan R, Xiang L, Zhang Z, et al. Releasable PEGylation of mesothelin targeted immunotoxin SS1P achieves single dosage complete regression of a human carcinoma in mice. Bioconjug Chem. 2007;18(3).
[36] Gelber EE, Vitetta ES. Effect of immunosuppressive agents on the immunogenicity and efficacy of an immunotoxin in mice. Clin Cancer Res. 1998;4(5).
[37] Hassan R, Miller AC, Sharon E, Thomas A, Reynolds JC, Ling A, et al. Major cancer regressions in mesothelioma after treatment with an anti-mesothelin immunotoxin and immune suppression. Sci Transl Med. 2013;5(208).
[38] Griswold KE, Bailey-Kellogg C. Design and engineering of deimmunized biotherapeutics. Vol. 39, Current Opinion in Structural Biology. 2016.
[39] Salvatore G, Beers R, Margulies I, Kreitman RJ, Pastan I. Improved cytotoxic activity toward cell lines and fresh leukemia cells of a mutant anti-CD22 immunotoxin obtained by antibody phage display. Clin Cancer Res. 2002;8(4).
[40] Onda M, Beers R, Xiang L, Lee B, Weldon JE, Kreitman RJ, et al. Recombinant immunotoxin against B-cell malignancies with no immunogenicity in mice by removal of B-cell epitopes. Proc Natl Acad Sci U S A. 2011;108(14).
[41] Mazor R, Zhang J, Xiang L, Addissie S, Awuah P, Beers R, et al. Recombinant immunotoxin with T-cell epitope mutations that greatly reduce immunogenicity for treatment of mesothelin-expressing tumors. Mol Cancer Ther. 2015;14(12).
[42] Dingman R, Balu-Iyer S V. Immunogenicity of Protein Pharmaceuticals. Vol. 108, Journal of Pharmaceutical Sciences. 2019.
[43] Moss DL, Park HW, Mettu RR, Landry SJ. Deimmunizing substitutions in Pseudomonas exotoxin domain III perturb antigen processing without eliminating T-cell epitopes. J Biol Chem. 2019;294(12).
[44] Hollevoet K, Mason-Osann E, Liu XF, Imhof-Jung S, Niederfellner G, Pastan I. In vitro and in vivo activity of the low-immunogenic antimesothelin immunotoxin RG7787 in pancreatic cancer. Mol Cancer Ther. 2014;13(8).
[45] Cizeau J, Grenkow DM, Brown JG, Entwistle J, MacDonald GC. Engineering and biological characterization of VB6-845, an Anti-EpCAM immunotoxin containing a t-cell epitope-depleted variant of the plant toxin bouganin. J Immunother. 2009;32(6).
[46] Shancer Z, Liu X fen, Nagata S, Zhou Q, Bera TK, Pastan I. Anti-BCMA immunotoxins produce durable complete remissions in two mouse myeloma models. Proc Natl Acad Sci U S A. 2019;116(10).
[47] Hollevoet K, Mason-Osann E, Müller F, Pastan I. Methylation-associated partial down-regulation of mesothelin causes resistance to anti-mesothelin immunotoxins in a pancreatic cancer cell line. PLoS One. 2015;10(3).
[48] Zhang Y, Chertov O, Zhang J, Hassan R, Pastan I. Cytotoxic activity of immunotoxin SS1P is modulated by TACE-dependent mesothelin shedding. Cancer Res. 2011;71(17).
[49] Mansfield E, Chiron MF, Amlot P, Pastan I, Fitzgerald DJ. Recombinant RFB4 single-chain immunotoxin that is cytotoxic towards CD22-positive cells. In: Biochemical Society Transactions. 1997.
[50] Liu XF, FitzGerald DJ, Pastan I. The insulin receptor negatively regulates the action of pseudomonas toxin-based immunotoxins and native

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

pseudomonas toxin. Cancer Res. 2013;73(7).
[51] Wei H, Bera TK, Wayne AS, Xiang L, Colantonio S, Chertov O, et al. A modified form of diphthamide causes immunotoxin resistance in a lymphoma cell line with a deletion of the WDR85 gene. J Biol Chem. 2013;288(17).
[52] Wei H, Xiang L, Wayne AS, Chertov O, FitzGerald DJ, Bera TK, et al. Immunotoxin resistance via reversible methylation of the DPH4 promoter is a unique survival strategy. Proc Natl Acad Sci U S A. 2012;109(18).
[53] Hu X, Wei H, Xiang L, Chertov O, Wayne AS, Bera TK, et al. Methylation of the DPH1 promoter causes immunotoxin resistance in acute lymphoblastic leukemia cell line KOPN-8. Leuk Res. 2013;37(11).
[54] Behdani M, Zeinali S, Karimipour M, Khanahmad H, Schoonooghe S, Aslemarz A, et al. Development of VEGFR2-specific Nanobody Pseudomonas exotoxin A conjugated to provide efficient inhibition of tumor cell growth. N Biotechnol. 2013;30(2).
[55] Tang J, Li J, Zhu X, Yu Y, Chen D, Yuan L, et al. Novel CD7-specific nanobody-based immunotoxins potently enhanced apoptosis of CD7-positive malignant cells. Oncotarget. 2016 Jun;7(23):34070–83.
[56] Geoghegan EM, Zhang H, Desai PJ, Biragyn A, Markham RB. Antiviral activity of a single-domain antibody immunotoxin binding to glycoprotein D of herpes simplex virus 2. Antimicrob Agents Chemother. 2015;59(1).
[57] Dillon RL, Chooniedass S, Premsukh A, Adams GP, Entwistle J, MacDonald GC, et al. Trastuzumab-deBouganin conjugate overcomes multiple mechanisms of T-DM1 drug resistance. J Immunother. 2016;39(3).
[58] Chandramohan V, Bao X, Yu X, Parker S, McDowall C, Yu YR, et al. Improved efficacy against malignant brain tumors with EGFRwt/EGFRvIII targeting immunotoxin and checkpoint inhibitor combinations. J Immunother Cancer. 2019;7(1).
[59] Dillon RL, Chooniedass S, Premsukh A, Adams GP, Entwistle J, MacDonald GC, et al. Trastuzumab-deBouganin conjugate overcomes multiple mechanisms of T-DM1 drug resistance. J Immunother. 2016;39(3).
[60] Chandramohan V, Bao X, Yu X, Parker S, McDowall C, Yu YR, et al. Improved efficacy against malignant brain tumors with EGFRwt/EGFRvIII targeting immunotoxin and checkpoint inhibitor combinations. J Immunother Cancer. 2019;7(1).
[61] Rahbarizadeh F, Rasaee MJ, Forouzandeh M, Allameh AA. Over expression of anti-MUC1 single-domain antibody fragments in the yeast Pichia pastoris. Mol Immunol. 2006 Feb;43(5):426-35. doi: 10.1016/j.molimm.2005.03.003. Epub 2005 Mar 25. PMID: 16337485.

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]

Toxicity and immunogenicity; two main challenges of developing immunotoxins

Payam Zandi[1], Fatemeh Rahbarizadeh[2*]

1. PhD. Student, department of Medical Biotechnology, Medical School, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran
2.Professor, department of Medical Biotechnology, faculty of Medical School, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran

Rahbarif@modares.ac.ir

Receipt: 2022/04/06 Accepted: 2022/08/27

Abstract

Immunotoxins are an attractive way to treat cancer; in this method, high-cytotoxic protein toxins target cancer cells specifically. An immunotoxin consists of a targeting component (an antibody, cytokine, or other protein that binds to the cell), that is chemically conjugated or fused in DNA level to a cytotoxic cargo (a bacterium, plant or cytotoxic human protein). Immunotoxin, with the help of specific receptors, recognizes the target cell and enters the cell by endocytosis. After entering the cytocell, it kills the target cancer cell with the help of a toxic component. Although various immunotoxins with different structures have been studied and tested in recent decades, only three immunotoxins Denileukin Diftitox, Tagraxofusp and Moxestumomab Pasudotox - have been clinically approved for the treatment of leukemia. In this article, we review important research and two challenges in production and development of immunotoxins that have limited their clinical success. Further, we highlight methods to overcome these obstacles. These challenges include target and non-target cell toxicity and immunization.

Keywords: immunotoxins, immunocongucate, toxins, cytotoxic proteins, non-target toxicity, immunization.

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOR: 20.1001.1.23222115.1401.13.4.4.3]