

## ژن‌درمانی در بتاتالاسمی: یک مقاله مروری

## چکیده

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۰ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۳ آنلاین: ۱۴۰۲/۲/۰۱

حدیث سلیمان‌زاده<sup>۱</sup>، ناهید نصیری<sup>۲\*</sup>

۱- گروه علوم آزمایشگاهی، بخش هماتولوژی  
آزمایشگاهی و بانک خون، دانشکده پیراپزشکی،  
دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران.  
۲- مرکز تحقیقات علوم و فناوری تشخیص  
آزمایشگاهی، دانشکده پیراپزشکی، دانشگاه علوم  
پزشکی شیراز، شیراز، ایران.

\* نویسنده مسئول: شیراز، خیابان مشکین‌فام، روبروی  
هتل هما، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، دانشکده  
پیراپزشکی.

تلفن: ۰۷۱-۳۲۲۷۰۲۳۸

E-mail: Nahid.nasiri89@gmail.com

تالاسمی نوعی بیماری ارثی اتوزومال مغلوب است که به‌علت کاهش سنتز زنجیره‌های گلوبینی هموگلوبین رخ می‌دهد. در بتاتالاسمی تجمع زنجیره‌های  $\alpha 4$  در پیش‌سازهای اریتروییدی به‌دنبال عدم تولید زنجیره بتا، منجر به خونسازی غیرموثر (عدم تعادل بین تکثیر و تمایز در پیش‌سازهای اریتروییدی مغواستخوان) و در نهایت علایم بالینی از جمله تاخیر و اختلال در بلوغ جسمی و جنسی، مشکلات قلبی، بدشکلی‌های استخوانی و هیپتواسپلنومگالی می‌شود. از محدودیت‌های درمان‌های رایج کنونی مانند ترانسفیوژن، شلاته‌کننده‌های آهن و پیوند آلوزن هماتوپوئیتیک استم سل می‌توان به گرانباری آهن، نبود اهداکننده سازگار و بروز بیماری پیوند علیه میزبان اشاره کرد. در ژن‌درمانی بیان مداوم زنجیره بتاگلوبین در سلول‌های بنیادی خود بیمار القا می‌شود. ایده ژن‌درمانی از اوایل سال ۱۹۷۰ مطرح شد و هدف از این روش درمانی، بیان ژن معیوب در سلول هدف است به‌صورتی که بتواند علایم بیماری را کاهش دهد یا به‌طورکلی رفع کند. برای ژن‌درمانی دو ویکرد کلی وجود دارد: روش *Integrating* که در این حالت ژن موردنظر به‌وسیله وکتور به‌داخل ژنوم سلول هدف الحاق می‌شود و بیان مادام‌العمر آن را به‌دنبال دارد و دیگری روش *Non integrating* است که ژن موردنظر بدون جای‌گیری در ژنوم سلول هدف و به‌صورت سیتوپلاسمی بیان ژن را ممکن می‌سازد. ژن‌درمانی بتاتالاسمی در سال ۲۰۲۲ از طرف سازمان غذا و دارو، برای بیماران ۱۲ سال به بالا که فنوتیپ  $\text{Non } \beta 0/\beta 0$  دارند تأییدیه گرفته است، به‌نظر می‌رسد که این روش درمانی برای بیماران بتاتالاسمی وابسته به ترانسفیوژن خون، روش درمانی قطعی باشد.

**کلمات کلیدی:** بتا-تالاسمی، ژن‌درمانی، پیوند هماتوپوئیتیک استم سل، وکتور.

حذف یا اضافه شدن چندین نوکلئوتید و تغییر چهارچوب خوانش می‌باشند، هرچند که حذف‌های بزرگتری نیز می‌توانند در ایجاد این اختلال نقش داشته باشند. ۱۸ نوع حذف بزرگ در ژن بتاگلوبین شناسایی شده است که بین ۲۵ جفت باز تا شش کیلوباز را شامل می‌شود. حذف ۶۱۹ جفت بازی از انتهای 3' ژن بتاگلوبین تقریباً رایج است اما محدود به جمعیت خاصی از پاکستان و هندوستان است که حدوداً یک سوم از آل‌های بتاتالاسمی را در برمی‌گیرند.<sup>۱،۲</sup> تالاسمی از نظر بالینی هتروژنوس است چرا که جهش‌های متنوعی می‌توانند

بتاتالاسمی (Beta thalassaemia) نوعی بیماری ارثی است که نقص در تولید زنجیره بتاگلوبین هموگلوبین رخ می‌دهد. تالاسمی شایعترین بیماری ارثی تک‌ژنی است و تقریباً ۳٪ از مردم دنیا ناقل ژن بتاتالاسمی هستند. این بیماری در مدیترانه، خاورمیانه و آسیای جنوب شرقی بیشترین فراوانی را دارد و شیوع آن در اروپای شمالی و آمریکای شمالی به‌علت مهاجرت در حال افزایش است.<sup>۱،۲</sup> بیش از ۳۰۰ نوع جهش نقطه‌ای و تعدادی حذف به‌عنوان علت وقوع بتاتالاسمی شناخته شده است.<sup>۳</sup> بیشتر جهش‌ها شامل جایگزینی تک‌نوکلئوتیدی،

کلوی و به دلایل مختلفی عفونت‌های مکرر اداری دارند بایستی با احتیاط بسیار مصرف شود.<sup>۱۱</sup> بنابراین به نظر می‌رسد الفاکنده‌های جدیدتر بیان زنجیره گاما و آنتی‌اکسیدان‌ها در درمان بتاتالاسمی حایز اهمیت باشند.<sup>۱۲-۱۴</sup>

استفاده از Luspatercept تحت نام تجاری REBLOZYL به تازگی از سمت Food and drug administration (FDA) تاییدیه گرفته است که می‌تواند با مهار لیگاند‌های TGF- $\beta$  در پیشبرد مرحله نهایی اریتروپوئز و درمان آنتی‌نقش بسزایی داشته باشد.<sup>۱۵</sup> مطالعات گسترده‌ای نشان داده است که مهارکننده‌های JAK2 می‌توانند در اصلاح اریتروپوئز غیر موثر و تخفیف اسپلنومگالی موثر باشند. کارآزمایی بالینی با داروی Ruxolitinib روی بیماران تالاسمی وابسته و غیروابسته به ترانسفیوژن انجام شده است. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان داد که اندازه طحال در بیماران به طور چشمگیری کاهش می‌یابد ولی در رابطه با کاهش میزان ترانسفیوژن نتایج امیدوارکننده‌ای به دست نیامد.<sup>۱۶-۱۸</sup>

داروی پیشنهادی دیگر، مهارکننده‌های فروپورتین (Ferroportin inhibitors) هستند که با هپسیدین برای اتصال به فروپورتین رقابت می‌کنند و در نهایت منجر به ایترنالیزه و یوبی‌کویتین شدن (Ubiquitination) فروپورتین می‌شوند.<sup>۱۹، ۲۰</sup>

هدف از ژن درمانی بیان مداوم ژن موردنظر به میزانی است که بتواند علائم بیماری را کاهش دهد یا به طور کامل بیماری را درمان نماید. ژن درمانی در بتاتالاسمی به شیوه ExVivo و Integrating انجام می‌گیرد، به این صورت که هماتوپوئیک استم سل‌های (Stem cells) بیمار جمع‌آوری شده به محیط کشت منتقل می‌شوند، وکتور در یک نوبت به محیط کشت این سلول‌ها اضافه شده و به درون ژنوم سلول هدف اینتگره می‌شود در نهایت سلول‌های اصلاح شده به بیمار بازگردانده می‌شوند.<sup>۲۱</sup>

۲- ژن‌تراپی: الف- طراحی وکتور: برای انتقال ژن موردنظر به سلول هدف از لنتی‌ویروس‌ها (Lentiviruses) استفاده می‌شود و از بین لنتی ویروس‌ها HIV-1 به علت اینتگره شدن موثر، کارآمدترین آنهاست. برتری HIV-1، به عنوان زیرگروهی از لنتی ویروس‌ها، نسبت به رتروویروس‌ها به این علت است که می‌توانند ژن را به هردو نوع سلول Dividing و Nondividing منتقل کنند و اهمیت این موضوع به خاطر Quiescent بودن HSC ها به عنوان سلول هدف است.<sup>۲۲</sup> از

منجر به اختلال در تولید زنجیره‌های گلوبینی شوند، که در نهایت منجر به عدم تعادل بین زنجیره‌های آلفا و بتا و رسوب زنجیره‌های اضافی آلفا در پیش‌سازهای اریترویدی می‌شود. آنتی‌به‌دنبال همولیز و اریتروپوئز غیرموثر تظاهر پیدا می‌کند.<sup>۶</sup> آهن و هم اضافی موجود درون گلبول‌های قرمز با آسیب به غشای آنها، طول عمر آنها را کاهش داده و منجر به لیز گلبول‌های قرمز می‌شوند.<sup>۶، ۷</sup>

۱- روش‌های درمانی گذشته و پیش‌رو: روش‌های درمانی مختلفی برای کاهش علائم بیماری و بهبود اریتروپوئز (Erythropoiesis) وجود دارد که از بین آنها پیوند آلوژن پیش‌سازهای مغز استخوان قطعی‌ترین روش درمان است ولی محدودیت‌هایی را به علت نبود اهداکننده سازگار و احتمال بروز بیماری پیوند علیه میزبان (Graft versus host disease, GVHD) به همراه دارد.<sup>۸</sup> از طرفی احتمال رد پیوند یا عود بیماری پس از پیوند مغزاستخوان، در تالاسمی نسبت به بدخیمی‌های دیگر بیشتر است و علت آن ترانسفیوژن مکرر، هپاتواسپلنومگالی، عدم دریافت شیمی درمانی پیش از پیوند و اریتروپوئز گسترده در مغز استخوان بیماران می‌باشد.<sup>۹</sup> ترانسفیوژن خون روش درمانی اصلی برای تالاسمی است. ترانسفیوژن مرتب و مناسب خون می‌تواند آنتی را اصلاح کند و اریتروپوئز غیرموثر را سرکوب کند، بنابراین چنانچه از کودکی آغاز شود می‌تواند از عقب ماندگی ذهنی و جسمی جلوگیری کند. یکی از معایب مهم ترانسفیوژن خون گرانباری آهن است که می‌تواند در نهایت آسیب به عضوهای داخلی مخصوصاً قلب و کبد وارد کند.<sup>۸</sup> همچنین آسیب کبد به شکل سیروز کبدی می‌تواند تظاهر پیدا کند و به دنبال سیروز کبد در برخی بیماران مشکلات گوارشی ایجاد می‌شود.<sup>۱۰</sup> اصلاح تعادل بین زنجیره آلفا و زنجیره شبه بتا به وسیله استفاده از ترکیبات الفاکنده بیان زنجیره گاما (همانند تالیدوماید و سدیم بوتیرات) می‌تواند در بهبود علائم مبتلایان بتاتالاسمی موثر باشد. ترکیباتی مانند هیدروکسی اوره در افزایش بیان زنجیره گاما و افزایش هموگلوبین F و در نتیجه بهبودی کامل یا نسبی بیماران و کاهش عوارض ترانسفیوژن‌های مکرر نقش بسزایی دارد. همچنین مطالعات متعددی ثابت کرده‌اند که استفاده از آنتی‌اکسیدان‌ها در کنار هیدروکسی اوره می‌تواند به وسیله کاهش دوز مصرفی هیدروکسی اوره و کاهش عوارض آن، در بهبودی علائم تاثیرگذار باشد، هرچند که به دلیل دفع کلوی هیدروکسی اوره، این دارو در افرادی که اختلال

۸۷ در این دو زنجیره مهم شناخته شده است.<sup>۲۹</sup> وجود توالی‌های کوتاه شده LCR (HS2, HS3, HS4) بیان بالا و اختصاصی رده اریترئیدی را ممکن می‌سازد.<sup>۳۱</sup>

وکتور BB305 به‌دنبال تغییر و اصلاح HPV569 طراحی شد و اخیراً تحت عنوان Zynteglo از طرف Food and Drug Administration (FDA) برای درمان بیماران بتاتالاسمی non  $\beta$ 0/ $\beta$ 0 در افراد ۱۲ سال به بالا تاییدیه گرفته است.

از آنجا که مطالعات اخیر نشان داده‌اند که نقش حفاظتی سکانس cHS4 متغیر است و از طرفی وجود این توالی بیان وکتور را کاهش می‌دهد، در وکتور BB305 توالی‌های cHS4 از دوطرف حذف شدند. از طرفی پروموتور CMV جایگزین LTR promoter 5' شد تا بیان وکتور را افزایش دهد.<sup>۲۷</sup> با جایگزینی پروموتور CMV و حذف 400 bp از ناحیه 3' LTR، وکتور تحت عنوان Self inactivating (SIN) شناخته می‌شود. این ویژگی فعالیت انکوژن‌های سلولی را که ممکن است به‌وسیله promoter/enhancer موجود در LTR وکتور تحریک شود را کاهش می‌دهد.<sup>۸</sup>

توالی Central PolyPurin tract (cPPT) راندمان ترانسداکشن (Transduction) را از طریق تسهیل ورود cDNA به هسته افزایش می‌دهد.<sup>۳۳</sup> Rev با اتصال به RRE Rev response element خروج ترانسکرپت‌ها را از هسته تسهیل می‌کند و توالی Gag در مرحله Packaging نقش دارد.<sup>۳۴</sup>

ب- سیستم بسته‌بندی برای تولید وکتور: مرحله بسته‌بندی برای تولید وکتوری با قابلیت انتقال و ناتوان در همانندسازی، حایز اهمیت بالایی است. احتمال تولید Replication competent lentivirus (RCL) به‌دنبال ساخته شدن وکتور وجود دارد، بنابراین عدم تولید RCL مستلزم نبود توالی مورد نیاز برای همانندسازی در وکتور است. نسل سوم لنتی وکتور با استفاده از چهار پلاسمید انتقال ژن موردنظر به سلول هدف را بدون بیان پروتئین‌های ویروسی در سلول هدف میسر می‌سازد.<sup>۳۵</sup>

دو پلاسمید Packaging به نام‌های Rev و Gag-pol در دسترس است که Rev پروتئین دخیل در خارج کردن ژنوم ویروسی را کد می‌کند Gag-pol به‌ترتیب پروتئین ساختاری کپسید و آنزیم‌های ترانس کریپتاز معکوس، اینتگراز و پروتئاز را کد می‌کند.<sup>۲۴</sup>

پلاسمید Envelope، گلیکوپروتئین مشتق شده از Vesicular stomatitis virus (VSV) را کد می‌کند. بیان این گلیکوپروتئین در

طرفی ژنوم HIV-1 به‌صورت پایداری به ژنوم میزبان اینتگره می‌شود و توانایی انتقال ژنی به طول 10kbp~ را دارد.<sup>۳۳</sup>

ترنسفورمیشن لنتی ویروس به لنتی وکتور مستلزم حذف برخی از ژن‌های غیرضروری و حفظ ژن‌های ضروری برای Packaging و تولید وکتور است.<sup>۲۴</sup> از بین ۹ ژن موجود در ژنوم HIV، ژن‌های کدکننده پروتئین‌ها حذف شده و تنها توالی‌های تنظیمی مورد نیاز برای چرخه سلولی ویروس باقی می‌مانند که شامل R/U5، Rev، response element (RRE) و Central polyPurine tract (cPPT) توالی Packaging  $\Psi$  و 3' LTR می‌باشد.<sup>۲۵</sup>

اولین لنتی وکتوری که وارد کارآزمایی بالینی ژن درمانی بتا تالاسمی شد HPV569 نام داشت. این کارآزمایی بالینی در کشور فرانسه روی سه بیمار مبتلا به تالاسمی ماژور انجام گرفت که یکی از بیماران ۱۲ ماه پس از ژن درمانی Transfusion independent شد.<sup>۲۶</sup> در دو انتهای 3' و 5' وکتور HPV569، توالی Long terminal repeat (LTR) ویروسی قرار دارد. این توالی متشکل از سه بخش است که کار تنظیم رونویسی از RNA ویروسی و در نهایت تولید پارتیکل جدید ویروسی را کنترل می‌کند. دو کپی از ژن Chicken High sensitivity (cHS4) درون LTR ویروسی، به‌منظور جلوگیری از فعال‌سازی ژن‌های مجاور توسط LCR جای گرفته است.<sup>۲۷</sup> این توالی به‌عنوان Insulator عمل می‌کند و از طریق تشکیل لوپ از واکنش بین Enhancer دور و پروموتور نزدیک، جایی که وکتور در آنجا اینتگره شده است، جلوگیری می‌کند، پس می‌تواند نقش حفاظتی داشته باشد.<sup>۲۸</sup> یک جهش نقطه‌ای (جایگزینی گلوتامین با والین) در آگزون دوم ژن بتاگلوبین در موقعیت اسیدآمینه ۸۷ طراحی شده است (T87Q). این جهش نقطه‌ای دو مزیت دارد، اول اینکه هموگلوبین حاصل از ژن درمانی را از هموگلوبین Wild-Type حاصل از ترانسفیوژن یا هموگلوبینی که خود فرد ساخته است (در صورتی که  $\beta$ + باشد) افتراق می‌دهد و دوم اینکه در کاهش پلیمریزاسیون هموگلوبین داسی نقش دارد.<sup>۲۹</sup> زنجیره بتاگلوبین Wild Type مهارکننده ضعیفی برای پلیمریزاسیون است. هنگام کاهش فشار اکسیژن، اسیدآمینه‌های ۸۵ (فیل‌آلنین) و ۸۸ (لوسین) در زنجیره بتا داسی با اسید آمینه والین ۶ در تترامر دیگر منجر به پلیمریزه شدن هموگلوبین می‌شوند. برعکس زنجیره بتا، زنجیره‌های گاما و دلتا مهارکننده‌های قوی برای پلیمریزاسیون هستند و طی مطالعاتی که انجام گرفته است نقش اسیدآمینه

ر- کارآزمایی بالینی: در دو کارآزمایی بالینی HGB204 و HGB205 نشان داده شد که سطح تولید HbA<sub>1c</sub> مرتبط با مقدار VCN بوده و ارتباطی با سن، ژنوتایپ و وضعیت اسپلنکتومی بیمار نداشته است.<sup>۴۱</sup> همچنین نشان داده شد که VCN بین ۰/۱ تا چهار به ازای هر ژنوم دیپلوئید در لکوسیت‌های خون محیطی می‌باشد و نیز مقدار هموگلوبین بیماران پس از ژن‌درمانی بین ۹/۱ و ۱۳/۲ g/dl گزارش شده است. از ۲۲ بیمار وارد شده در مطالعه که همگی در دو سال گذشته حداقل هشت بار یا ۱۰۰ ml/kg گلبول قرمز مترکم دریافت کرده بودند، ۱۳ نفر از آنها فنوتایپ non  $\beta$ / $\beta$  داشتند که ۱۲ نفر از این افراد پس از ژن‌درمانی دیگر نیازی به ترانسفیوژن نداشتند، یک نفر به ترانسفیوژن ادامه داد ولی مقدار دریافتی خون در او کاهش یافت. سه نفر از ۹ بیمار با فنوتایپ  $\beta$ / $\beta$  یا موتاسیون B+ هموزیگوت (IVS-1-110) پس از درمان مستقل از ترانسفیوژن شدند. اما به علت پایتتر بودن هموگلوبین آنها، اریتروپوئز غیر موثر در آنها اصلاح نشد.<sup>۴۲</sup>

ز- انتخاب بیماران: می‌توان این روش درمانی را برای مبتلایان تالاسمی با فنوتایپ non  $\beta$ / $\beta$  که وابسته به ترانسفیوژن هستند و هر سال بیش از هشت بار گلبول قرمز مترکم دریافت می‌کنند، اتخاذ کرد. در مورد افرادی که فنوتایپ  $\beta$ / $\beta$  دارند، بهبودی اریتروپوئز غیر موثر و پایان وابستگی به ترانسفیوژن مستلزم VCN بالاتری است که این خود عاملی برای افزایش احتمال ژنوتوکسیسیتی است.<sup>۴۳</sup>

روش‌های درمانی برای فنوتایپ  $\beta$ / $\beta$  Thalassemia به‌دست آوردن نتایج رضایت‌بخش از لحاظ درمانی، برای تمامی فنوتایپ‌های تالاسمی چالش بزرگی است. افزایش VCN می‌تواند بازده بالایی داشته باشد اما به‌علت افزایش احتمال ژنوتوکسیسیتی و کتور، قابل اعمال نیست. به‌منظور افزایش کارایی ژن‌درمانی برای بیماران با فنوتایپ  $\beta$ / $\beta$ ، وکتوری به‌نام  $\beta$ -sha2-LV $\beta$  طراحی شده است که می‌تواند همزمان با القا بیان a-T87Q، بیان زنجیره  $\alpha$ 2 را کاهش بدهد، بنابراین به‌طور موثرتری نسبت به وکتور BB305، تعادل بین زنجیره آلفا و بتا را برقرار می‌کند. الحاق MiR-30-based short hairpin RNA (shRNA) درون اینترون دوم وکتور می‌تواند به‌طور انتخابی در کاهش میزان  $\alpha$ 2-globin mRNA موثر باشد بدون اینکه روی  $\alpha$ 1-globin mRNA تاثیری داشته باشد. طراحی این وکتور برگرفته از دانشی است که نشان داده وراثت همزمان آلفا-تالاسمی با

سطح وکتور به جای گلیکوپروتئین Gp160 توکسیسته کمتری دارد و از طرفی گیرنده‌اش LDL-R است که می‌تواند طیف وسیعی از سلول‌ها را مورد هدف قرار دهد. پلاسמיד چهارم حاوی ژن موردنظر یعنی بتاگلوبین است که به فرم SIN درآمده است.<sup>۳۶</sup> این چهار پلاسמיד به روش‌های مختلف فیزیکی (مثل Flow electroporation) یا شیمیایی (مثل استفاده از CaPo<sub>4</sub>, PEI, Lipofectamine) به رده سلولی (مثل HEK293 (Human embryonic kidney) یا مشتقات آن مثل 293T انتقال داده می‌شود.<sup>۴۴</sup> جدا بودن ژن موردنظر از سایر توالی‌های موردنیاز برای بسته‌بندی، ایمنی را افزایش می‌دهد چرا که در این صورت توالی‌های بسته‌بندی به سلول هدف منتقل نمی‌شوند.<sup>۳۷</sup>

ج- جمع‌آوری، گسترش و انتقال وکتور به استم سل: به‌منظور جمع‌آوری هماتوپوئیتیک استم سل‌ها، بیمار به‌مدت چهار روز ترکیبی از GCS-F و Plerixafor دریافت می‌کند و در انتهای روز چهارم لکوفریز انجام می‌شود. به‌طوری که تقریباً  $10^6 \times 10^6$  CD34+ cells/kg جمع‌آوری شده که  $10^6 \times 10^6$  CD34+ cells/kg بدون دستکاری به‌عنوان Back up ذخیره می‌شود تا در صورت پس زده شدن پیوند، سلول‌های تغییرنیافته به بیمار باز گردانده شود. سلول‌های CD34+ به‌روش Magnetic-activated cell sorting (MACS) جدا می‌شوند و تا پیش از ترانسداکت شدن به‌مدت دو روز در محیط Serum free media همراه با FLT3L، TPO و SCF به جهت گسترش استم سل‌ها کشت داده می‌شوند.<sup>۳۸</sup>

د- ایمنی و تاثیرگذاری روش: بررسی Efficacy درمان، با تعیین مقدار سلول‌های هماتوپوئیتیک استم سل اصلاح شده از لحاظ ژنتیکی، اندازه‌گیری هموگلوبین، کاهش در حجم خون دریافتی و ایندکس اندازه‌گیری هماتوپوئیتیک استم سل (VCN) انجام می‌گیرد. دوز هر فرآورده دارویی برای سنجش Efficiency و Safety آن معیار مهمی است. در مورد ژن‌درمانی دوز دارو دو مفهوم دارد: درصد سلول‌های مودیفای شده (Modified) که به بیمار تزریق می‌شود (%LVV+) و تعداد وکتور الحاق شده در ژنوم به ازای هر سلول دیپلوئید (VCN).<sup>۴۰،۴۱</sup>

Safety با بررسی تعداد و کیفیت هماتوپوئیتیک استم سل‌های اصلاح شده پس از کشت، ژنوتوکسیسیتی (توانایی ایجاد آسیبی مانند جهش در ژنوم و نهایتاً ایجاد سرطان)، میزان مرگ‌ومیر افراد درمان شده پس از ۱۰۰ روز، عوارض جانبی و یافتن Replication competent lentivirus (RCL) مطرح می‌شود.<sup>۴۱</sup>

نزدیکی انکوژن‌ها نبوده است و ارتباطی به LentiGlobin ندارد و احتمالاً بخاطر رژیم آماده‌سازی (Conditioning regimen) بوده است.<sup>۴۶</sup> نتایج حاصل از کارآزمایی‌های بالینی انجام گرفته امیدوارکننده به نظر می‌رسند و حاکی از آن است که این روش درمانی می‌تواند بیان طولانی‌مدت و ایمن از ژن موردنظر را تضمین کند. اگرچه ژن‌تراپی بتا تالاسمی از طرف کمیسیون اروپا و FDA تاییدیه گرفته است اما چالش‌هایی مثل هزینه بالا، اثربخشی نتیجه درمان، خطرات ناشی از استفاده از ویروس به‌عنوان وکتور، احتمال جایگزینی وکتور در نزدیکی پروتوانکوژن‌ها و بروز سرطان وجود دارد که کاربرد این روش درمانی در سطح وسیع را محدود می‌کند.

بتا تالاسمی، می‌تواند علائم بالینی بتا-تالاسمی را کاهش دهد.<sup>۴۳ و ۴۴</sup> معایب و مزایای ژن‌تراپی: نگرانی‌های مرتبط با پیوند آلوژن از جمله پس زده شدن پیوند و بروز GVHD در مورد ژن درمانی وجود ندارد اما یک‌دست نبودن سلول‌های اصلاح‌شده از نظر ژنتیکی و هزینه بالای ژن درمانی از معایب این روش است.<sup>۴۵</sup> نتایج حاصل از کارآزمایی بالینی HGB206 نشان می‌دهد که یکی از بیماران ۳۶ ماه پس از درمان مبتلا به سندرم میلودیس پلاستیک (Myelodysplastic syndrome, MDS) شده است. مطالعات مولکولی و ژنتیکی متعددی برای اتیلوژنی MDS در این بیمار انجام گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که علت بروز MDS الحاق وکتور در

## References

- Kattamis A, Forni GL, Aydinok Y, Viprakasit V. Changing patterns in the epidemiology of  $\beta$ -thalassemia. *European Journal of Haematology* 2020;105(6):692-703.
- Alizadeh S, Bavarsad MS, Dorgalaleh A, Khatib ZK, Dargahi H, Nassiri N, et al. Frequency of  $\beta$ -thalassemia or  $\beta$ -hemoglobinopathy carriers simultaneously affected with  $\alpha$ -thalassemia in Iran. *Clin Lab* 2014;60(6):941-9.
- Finotti A, Breda L, Lederer CW, Bianchi N, Zuccato C, Kleanthous M, et al. Recent trends in the gene therapy of  $\beta$ -thalassemia. Vol. 6, *Journal of Blood Medicine*. Dove Medical Press Ltd 2015. p. 69-85.
- Varawalla NY, Old JM, Sarkar R, Venkatesan R, Weatherall DJ. The spectrum of  $\beta$ -thalassaemia mutations on the Indian subcontinent: the basis for prenatal diagnosis. *British journal of haematology* 1991;78(2):242-7.
- Thein SL. Molecular basis of  $\beta$  thalassaemia and potential therapeutic targets. *Blood Cells, Molecules, and Diseases* 2018;70:54-65.
- Rund D, Rachmilewitz E.  $\beta$ -thalassaemia. *N Engl J Med* 2005;353(11):1135-46.
- Tavazzi D, Duca L, Graziadei G, Comino A, Fiorelli G, Cappellini MD. Membrane-bound iron contributes to oxidative damage of  $\beta$ -thalassaemia intermedia erythrocytes. *British journal of haematology* 2001;112(1):48-50.
- Origa R.  $\beta$ -Thalassaemia. *Genetics in Medicine* 2017;19(6):609-19.
- Angelucci E, Matthes-Martin S, Baronciani D, Bernaudin F, Bonanomi S, Cappellini MD, Dalle JH, Di Bartolomeo P, de Heredia CD, Dickerhoff R, Giardini C. Hematopoietic stem cell transplantation in thalassaemia major and sickle cell disease: indications and management recommendations from an international expert panel. *haematologica* 2014;99(5):811.
- Rahimkhani M, Ghofrani H. HELICOBACTER PYLORI AND PEPTIC ULCER IN CIRRHOTIC PATIENTS [Internet]. Vol. 24, *Pak J Med Sci* 2008. Available from: www.pjms.com.pk849Rahimkhani M, Nikfallah A, Saberian M, Mordadi A, Varmazyar S, Tavakoli A. Urinary tract infection in spinal cord injuries. *Asian J Phama Clin Res*. 2014;7:178-82.
- Rahimkhani M, Nikfallah A, Saberian M, Mordadi A, Varmazyar S, Tavakoli A. Urinary tract infection in spinal cord injuries. *Asian J Phama Clin Res* 2014;7:178-82.
- Fucharoen S, Siritanaratkul N, Winichagoon P, Chowthaworn J, Siriboon W, Muangsup W, Chaicharoen S, Poolsup N, Chindavijak B, Pootrakul P, Piankijagum A. Hydroxyurea increases hemoglobin F levels and improves the effectiveness of erythropoiesis in beta-thalassaemia/hemoglobin E disease.<sup>۱۹۹۶</sup>
- Algiraigri AH, Wright NA, Paolucci EO, Kassam A. Hydroxyurea for nontransfusion-dependent  $\beta$ -thalassaemia: a systematic review and meta-analysis. *Hematology/oncology and stem cell therapy* 2017;10(3):116-25.
- Alipour M, Nasiri N, Kazemi F, Zare F, Sharifzadeh S. Resveratrol plus low-dose hydroxyurea compared to high-dose hydroxyurea alone is more effective in  $\gamma$ -globin gene expression and ROS reduction in K562 cells. *Natural Product Research* 2023;37(6):985-9.
- Cappellini MD, Taher AT. The use of luspatercept for thalassaemia in adults. *Blood advances* 2021;5(1):326-33.
- Motta I, Bou-Fakhredin R, Taher AT, Cappellini MD. Beta thalassaemia: new therapeutic options beyond transfusion and iron chelation. *Drugs* 2020;80:1053-63.
- Libani IV, Guy EC, Melchiorri L, Schiro R, Ramos P, Breda L, Scholzen T, Chadburn A, Liu Y, Kernbach M, Baron-Lühr B. Decreased differentiation of erythroid cells exacerbates ineffective erythropoiesis in  $\beta$ -thalassaemia. *Blood, The Journal of the American Society of Hematology* 2008;112(3):875-85.
- Taher AT, Karakas Z, Cassinerio E, Siritanaratkul N, Kattamis A, Maggio A, Rivella S, Hollaender N, Mahuzier B, Gadbow B, Aydinok Y. Efficacy and safety of ruxolitinib in regularly transfused patients with thalassaemia: results from a phase 2a study. *Blood, The Journal of the American Society of Hematology* 2018;131(2):263-5.
- Manolova V, Nyffenegger N, Flace A, Altermatt P, Varol A, Doucerain C, Sundstrom H, Dürrenberger F. Oral ferroportin inhibitor ameliorates ineffective erythropoiesis in a model of  $\beta$ -thalassaemia. *The Journal of Clinical Investigation* 2020;130(1):491-506.
- Richard F, van Lier JJ, Roubert B, Haboubi T, Göhring UM, Dürrenberger F. Oral ferroportin inhibitor VIT-2763: First-in-human, phase 1 study in healthy volunteers. *American journal of hematology* 2020;95(1):68-77.
- High KA, Roncarolo MG. Gene Therapy. *N Engl J Med* 2019;381(5):455-464.
- Sii-Felice K, Negre O, Brendel C, Tubsuwan A, Morel-à-l'Huissier E, Filardo C, Payen E. Innovative therapies for hemoglobin disorders. *BioDrugs* 2020;34(5):625-47.
- Buchsachacher Jr GL, Wong-Staal F. Development of lentiviral vectors for gene therapy for human diseases. *Blood, The Journal of the American Society of Hematology* 2000;95(8):2499-504.

24. Martínez-Molina E, Chocarro-Wrona C, Martínez-Moreno D, Marchal JA, Boulaiz H. Large-scale production of lentiviral vectors: current perspectives and challenges. *Pharmaceutics* 2020;12(11):1051.
25. Johnson NM, Alvarado AF, Moffatt TN, Edavettal JM, Swaminathan TA, Braun SE. HIV-based lentiviral vectors: Origin and sequence differences. *Molecular Therapy-Methods & Clinical Development* 2021;21:451-65.
26. Cavazzana-Calvo M, Payen E, Negre O, Wang G, Hehir K, Fusil F, Down J, Denaro M, Brady T, Westerman K, Cavalleco R. Transfusion independence and HMGA2 activation after gene therapy of human  $\beta$ -thalassaemia. *Nature* 2010;467(7313):318-22.
27. Magrin E, Miccio A, Cavazzana M. Lentiviral and genome-editing strategies for the treatment of  $\beta$ -hemoglobinopathies. *Blood, The Journal of the American Society of Hematology* 2019;134(15):1203-13.
28. Lu XB, Guo YH, Huang W. Characterization of the cHS4 insulator in mouse embryonic stem cells. *FEBS Open bio* 2020;10(4):644-56.
29. Negre O, Eggmann AV, Beuzard Y, Ribeil JA, Bourget P, Borwompinyo S, Hongeng S, Hacein-Bey S, Cavazzana M, Leboulch P, Payen E. Gene therapy of the  $\beta$ -hemoglobinopathies by lentiviral transfer of the  $\beta$ A (T87Q)-globin gene. *Human gene therapy* 2016;27(2):148-65.
30. Cavazzana M, Antoniani C, Miccio A. Gene therapy for  $\beta$ -hemoglobinopathies. *Molecular Therapy* 2017;25(5):1142-54.
31. Rattananon P, Anurathapan U, Bhukhai K, Hongeng S. The future of gene therapy for transfusion-dependent beta-thalassemia: The power of the lentiviral vector for genetically modified hematopoietic stem cells. *Frontiers in Pharmacology* 2021;12:730873.
32. Negre O, Bartholomae C, Beuzard Y, Cavazzana M, Christiansen L, Courne C, Deichmann A, Denaro M, De Dreuzy E, Finer M, Fronza R. Preclinical evaluation of efficacy and safety of an improved lentiviral vector for the treatment of  $\beta$ -thalassemia and sickle cell disease. *Current gene therapy* 2015;15(1):64-81.
33. Van Maele B, De Rijck J, De Clercq E, Debyser Z. Impact of the central polypurine tract on the kinetics of human immunodeficiency virus type 1 vector transduction. *Journal of virology* 2003;77(8):4685-94.
34. Poletti V, Mavilio F. Designing lentiviral vectors for gene therapy of genetic diseases. *Viruses* 2021;13(8):1526.
35. Sakuma T, Barry MA, Ikeda Y. Lentiviral vectors: basic to translational. *Biochemical Journal* 2012;443(3):603-18.
36. Hastie E, Cataldi M, Marriott I, Grdzlishvili VZ. Understanding and altering cell tropism of vesicular stomatitis virus. *Virus research* 2013;176(1-2):16-32.
37. Ferreira MV, Cabral ET, Coroadinha AS. Progress and perspectives in the development of lentiviral vector producer cells. *Biotechnology journal* 2021;16(1):2000017.
38. Soni S. Gene therapies for transfusion dependent  $\beta$ -thalassemia: current status and critical criteria for success. *American Journal of Hematology* 2020;95(9):1099-112.
39. Payen E. Efficacy and Safety of Gene Therapy for  $\beta$ -Thalassemia. *New England Journal of Medicine* 2022;386(5):488-90.
40. Paugh BS, Baranyi L, Roy A, He HJ, Harris L, Cole KD, Artlip M, Raimund C, Langan PS, Jana S, Orentas RJ. Reference standards for accurate validation and optimization of assays that determine integrated lentiviral vector copy number in transduced cells. *Scientific Reports* 2021;11(1):389.
41. Thompson AA, Walters MC, Kwiatkowski J, Rasko JE, Ribeil JA, Hongeng S, Magrin E, Schiller GJ, Payen E, Semeraro M, Moshous D. Gene therapy in patients with transfusion-dependent  $\beta$ -thalassemia. *New England Journal of Medicine* 2018;378(16):1479-93.
42. Ikawa Y, Miccio A, Magrin E, Kwiatkowski JL, Rivella S, Cavazzana M. Gene therapy of hemoglobinopathies: progress and future challenges. *Human Molecular Genetics* 2019;28(R1):R24-30.
43. Nualkaew T, Sii-Felice K, Giorgi M, McColl B, Gouzil J, Glaser A, Voon HP, Tee HY, Grigoriadis G, Svasti S, Fucharoen S. Coordinated  $\beta$ -globin expression and  $\alpha$ 2-globin reduction in a multiplex lentiviral gene therapy vector for  $\beta$ -thalassemia. *Molecular Therapy* 2021;29(9):2841-53.
44. Al Qaddoumi AA. Co-inheritance of alpha and beta-thalassemia in a Jordanian family. *Clin Lab Sci* 2006;19(3):165-8.
45. Fibach E, Rachmilewitz EA. Pathophysiology and treatment of patients with beta-thalassemia—an update. *F1000Research* 2017;6.
46. Hsieh MM, Bonner M, Pierciey Jr FJ, Uchida N, Rottman J, Demopoulos L, Schmidt M, Kanter J, Walters MC, Thompson AA, Asmal M. Myelodysplastic syndrome unrelated to lentiviral vector in a patient treated with gene therapy for sickle cell disease. *Blood advances* 2020;4(9):2058-63.

## Gene therapy in beta thalassemia: a review article

Hadis Soleimanzadeh Student of Laboratory Hematology and Blood Banking<sup>1</sup>  
Nahid Nasiri Ph.D.<sup>1,2\*</sup>

1- Department of Medical Laboratory Sciences, Division of Laboratory Hematology and Blood Banking, School of Paramedical Sciences, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran.  
2- Diagnostic Laboratory Sciences and Technology Research Center, School of Paramedical Sciences, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran.

\*Corresponding author: School of Paramedical Sciences, Shiraz University of Medical Sciences, Opposite Homa Hotel, Meshkinfam St., Shiraz, Iran.  
Tel: +98-71-32270238  
E-mail: Nahid.nasiri89@gmail.com

### Abstract

Received: 30 Mar. 2023 Revised: 06 Apr. 2023 Accepted: 12 Apr. 2023 Available online: 21 Apr. 2023

Thalassemia is an autosomal recessive hereditary disease that occurs due to a decrease in the synthesis of Please recheck. In beta thalassemia, defects in  $\beta$ -globin synthesis lead to an imbalance of  $\beta$ - and  $\alpha$ -globin chains and the accumulation of  $\alpha$ 4 chains in the erythroid precursor which leads to ineffective erythropoiesis, shortened red blood cell survival, and finally clinical symptoms such as delayed sexual and physical maturation, endocrine dysfunction, cardiomyopathy, liver disease, bone deformities and hepatosplenomegaly. Current treatments such as transfusion, iron chelating agents and allogeneic stem cell hematopoietic transplantation have limitations in their use, including iron overload, lack of a human leukocyte antigen (HLA) matched compatible donor, and graft versus host disease (GVHD). Gene therapy is a new therapeutic option for beta thalassemia patients that induces the continuous expression of beta globin chains in the patient's hematopoietic stem cells. The idea of gene therapy was first proposed in the early 1970s, and the ultimate goal of this treatment method is to express the defective gene in the target cell in a way that can reduce the symptoms of the disease or eliminate them (symptoms) altogether. There are two general methods for gene therapy: the integrating vector, in which the desired gene is inserted into the genome of the target cell and its lifelong expression follows, is the non-integrating method, in which the vector doesn't integrate into the genome of the target cell and the cytoplasmic form enables gene expression. The first beta thalassemia gene therapy was performed in France in 2006, and in this clinical trial, the first patient with the E/ $\beta$ 0 thalassemia was treated at the age of 18. Gene therapy for beta-thalassemia has been approved by the food and drug administration in 2022 for patients aged 12 years and older who have a non  $\beta$ 0/ $\beta$ 0 phenotype. It seems that this therapeutic option is the definitive treatment method for blood transfusion-dependent beta-thalassemia patients. However, this treatment method still has limitations: high cost, sensitivity of lentiviral vector production, and the possibility of integration of the vector near the proto-oncogene and its activation are some of them.

**Keywords:** beta-thalassemia, gene therapy, hematopoietic stem cell transplantation, vector.

