

نقش دهنده‌های اکسید نیتریک در درمان زخم در دیابت شیرین

حمیده افضلی^۱، رضا نوروزی‌راد^۲، دکتر محمد خاکساری^۱، دکتر اصغر قاسمی^۲

(۱) گروه فیزیولوژی و فارماکولوژی، دانشکده پزشکی افضلی پور، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران. (۲) مرکز تحقیقات فیزیولوژی غدد، پژوهشکده علوم غدد درون‌ریز و متابولیسم، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران نشانی مکاتبه‌ی نویسنده‌ی مسئول: تهران، ولنجک، خیابان یمن، ابتدای پروانه، پژوهشکده علوم غدد، دکتر اصغر قاسمی؛
 e-mail: Ghasemi@endocrine.ac.ir

چکیده

مقدمه: زخم پای دیابتی یک عارضه‌ی جدی دیابت شیرین است که شامل ضایعات در بافت‌های عمیق همراه با اختلالات عصبی و بیماری‌های عروقی محیطی در اندام‌های تحتانی می‌باشد. تأخیر در التیام زخم در دیابت، سبب بستری شدن‌های طولانی و حتی قطع اندام‌های انتهایی می‌شود. دیابت شیرین با کاهش فراهم زیستی اکسید نیتریک در ارتباط است و سبب نقص عملکرد پوست می‌شود. اکسید نیتریک یک رادیکال آزاد با نیمه عمر کوتاه است که در پوست تولید و عملکردهای فیزیولوژیک متعددی اعمال می‌کند. شواهد نشان می‌دهند که اکسید نیتریک التیام زخم را تسریع می‌کند. در این مطالعه مروری، مسیرهای تولید اکسید نیتریک در پوست و هم‌چنین نقش دهنده‌های اکسید نیتریک در التیام زخم دیابتی توصیف شده است. افزایش استرس اکسیداتیو و افزایش فعالیت آنزیم آرژیناز باعث کاهش فراهم زیستی اکسید نیتریک در افراد دیابتی می‌شود. داده‌های موجود نشان می‌دهد که دهنده‌های اکسید نیتریک مانند نیتريت، میزان اکسید نیتریک در زخم دیابتی را افزایش می‌دهند و التیام زخم را بهبود می‌بخشند. به نظر می‌رسد که افزایش اکسید نیتریک در افراد دیابتی می‌تواند از طریق افزایش رسوب کلاژن، تکثیر کراتینوسیت‌ها در لبه‌های زخم و در نتیجه افزایش ظرفیت ساخت اپیتلیال مجدد، جذب شیمیوتاکسی سایتوکاین‌ها، افزایش تشکیل عروق خونی کوچک و افزایش جریان خون در محل زخم باعث تسریع روند التیام در زخم افراد دیابتی شود. می‌توان نتیجه گرفت که دهنده‌های اکسید نیتریک به احتمال زیاد دارای نقش درمانی بالقوه و مقرون به صرفه برای زخم دیابتی هستند.

واژگان کلیدی: اکسید نیتریک، التیام زخم، زخم پای دیابتی، دیابت شیرین

دریافت مقاله: ۹۷/۹/۲۷ - دریافت اصلاحیه: ۹۸/۲/۲۳ - پذیرش مقاله: ۹۸/۳/۱۱

مقدمه

دیابت شیرین یکی از رایج‌ترین اختلالات متابولیک در جهان است که به وسیله‌ی نقص در ترشح یا عملکرد انسولین و یا ترکیبی از هر دو عامل به وجود می‌آید.^۱ براساس گزارش فدراسیون بین‌المللی دیابت^۱ در سال ۲۰۱۷، ۴۲۵ میلیون بزرگسال در سن ۲۰ تا ۷۹ سال مبتلا به دیابت بودند و برآورد شده است که این میزان در سال ۲۰۴۵ به ۶۲۹ میلیون نفر افزایش می‌یابد.^۲ دیابت شیرین اثرات مخربی بر سلامت و کیفیت زندگی افراد دارد.^۳ یکی از عوارض جدی دیابت، تأخیر در روند التیام زخم است که منجر به ایجاد

زخم‌های مزمن در اندام‌های تحتانی (به ویژه پا) در بیماران دیابتی می‌شود.^{۳،۴} زخم‌های مزمن باعث کاهش تحرک و عملکرد اجتماعی شده و به علاوه سلامت کلی فرد را به خطر می‌اندازند؛ بنابراین از عوامل اصلی بستری شدن و قطع عضو (آمپوتاسیون) در بیماران دیابتی به شمار می‌روند^۵ به طوری که در هر ۳۰ ثانیه، یک اندام تحتانی به علت دیابت در جهان قطع می‌شود.^۶ به منظور دسترسی به درمان‌های جدید، باید ساز و کارهای پاتولوژی فیزیولوژیکی که منجر به اختلال روند التیام زخم در افراد دیابتی می‌شوند، مورد بررسی قرار گیرند.

بیمارستان، ۱۵ روز و میزان قطع عضو ۵۸ درصد گزارش شده است^{۲۷} که میزان نیاز به قطع عضو از آمارهای جهانی (۵ تا ۲۴ درصد) بالاتر است.^{۲۳}

التیام زخم

پوست به عنوان یک پوشش محافظتی بدن از محیط خارجی، به طور مداوم در معرض آسیب‌های بالقوه است و بنابراین التیام زخم یک فرآیند حیاتی برای بقای تمام موجودات زنده است. التیام زخم پوستی یک فرآیند بسیار هماهنگ است که طی چهار مرحله: "هموستاز"، "التهاب"، "پرولیفراسیون" و "بازسازی" که با هم همپوشانی دارند رخ می‌دهد.^{۲۸}

بلافاصله پس از ایجاد زخم، آبشار انعقادی فعال می‌شود، پلاکت‌ها تجمع پیدا می‌کنند و لخته فیبرینی تشکیل می‌شود^{۲۹} که به عنوان یک داربست برای مهاجرت سلول‌ها عمل می‌کند.^{۲۸،۲۹} تعداد زیادی از فاکتورهای رشد مثل فاکتور رشد مشتق از پلاکت (PDGF)ⁱⁱⁱ و فاکتور رشد ترانسفورم کننده‌ی بتا^{iv} (TGFβ) از پلاکت‌ها آزاد می‌شوند و در تشکیل ماتریکس خارج سلولی در مراحل بعد نقش دارند.^{۲۸} سپس نوتروفیل‌ها و مونوسیت‌ها از جریان خون وارد بستر زخم می‌شوند (دیپدنز)^{۲۸} و مرحله‌ی التهابی را آغاز می‌کنند. سایتوکاین‌هایی مثل اینترلوکین‌ها (IL-1β و IL-6)، فاکتور نکروز دهنده‌ی تومور آلفا^v (TNFα)، کموکاین‌ها، پروستاگلاندین‌ها^{vi} (PGE₂) و فاکتورهای رشد مثل PDGF، TGFβ، فاکتور رشد اپیدرمی^{vii} (EGF) و فاکتور رشد اندوتلیال عروقی^{viii} (VEGF) از سلول‌های التهابی آزاد می‌شوند.^{۳۱} مرحله التهاب اغلب حدود ۷۲ ساعت طول می‌کشد.^{۳۲}

مرحله پرولیفراسیون (تکثیر) به وسیله‌ی تشکیل ماتریکس موقت، آنژیوژنز (رگ‌زایی) و تشکیل اپی‌تلیال مجدد مشخص می‌شود. تعادل بین نسبت ماتریکس متالوپروتئینازها^{ix} (MMPs) و مهار کننده‌ی بافتی ماتریکس متالوپروتئینازها^x (TIMP) باعث حفظ ماتریکس خارج سلولی می‌شود.^{۳۳} ماتریکس خارج سلولی ساختاری را به

دیابت شیرین منجر به اختلال در عملکرد سلول‌های اندوتلیال و کاهش تولید اکسید نیتریکⁱ (NO) می‌شود.^۶ نوروپاتی دیابتی، بیماری‌های عروقی محیطی و عفونت از عوامل اصلی دخیل در اختلال التیام زخم افراد دیابتی می‌باشند^۷ و کاهش تولید NO نقش مهمی در ایجاد هر کدام از این عوامل دارد.^{۸-۱۱} درمان‌های در دسترس زخم دیابتی شامل مدیریت هرگونه عفونت با استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها،^{۱۲} برداشت فشار از پا،^{۱۳} دبریدمان زخم (برداشت بافت نکروزه زخم)،^{۱۴} پانسمان زخم،^{۱۳} استفاده موضعی از فاکتورهای رشد،^{۱۵} استفاده از روغن ماهی غنی از اسیدهای چرب امگا-۳،^{۱۶} استفاده از فشار منفی موضعی^{۱۳} و استفاده از امواج شوکی خارجی^{۱۷،۱۸} می‌باشد. با این وجود، درمان این عارضه به درمان‌های مؤثرتری نیازمند است. اگرچه نقش NO به عنوان یک واسطه در التیام زخم در مطالعات مروری پیش‌تر مورد بررسی قرار گرفته است،^{۱۹-۲۱} اما مطالعات اندکی نقش NO را در پاتوفیزیولوژی روند التیام زخم در زخم پای دیابتی مورد بررسی قرار داده‌اند؛ بنابراین هدف این مطالعه، مرور نقش NO با تأکید بر اثرات آن در التیام زخم دیابتی می‌باشد. برای جمع‌آوری اطلاعات از پایگاه‌های Pubmed, Science direct, Google scholar استفاده شده است.

اپیدمیولوژی زخم پای دیابتی

شیوع زخم پای دیابتیⁱⁱ (DFU) در جهان حدود ۶/۳ درصد است که در مردان (۴/۵ درصد) بیشتر از زنان (۳/۵ درصد) و در بیماران دیابتی نوع ۲ (۶/۴ درصد) بیشتر از بیماران دیابتی نوع ۱ (۵/۵ درصد) است.^{۲۲} احتمال ابتلا به DFU در بیماران دیابتی ۱۵ الی ۲۵ درصد می‌باشد^{۲۳} که بخش بزرگی از این زخم‌ها (۵ تا ۲۴ درصد) ۶ الی ۱۸ ماه پس از این‌که تشخیص داده شدند، منجر به قطع عضو می‌شوند^{۲۴} به طوری که خطر قطع عضو در افراد دیابتی ۱۵ الی ۴۶ برابر بیشتر از افراد غیر دیابتی است.^{۲۳} میزان بقا در افراد دیابتی، ۵ سال پس از قطع عضو، ۴۱ الی ۷۰ درصد کاهش می‌یابد^{۲۳-۲۵} و خطر مرگ در افراد دیابتی با سابقه‌ی DFU، ۵۰ درصد بیشتر از افراد دیابتی بدون DFU است.^{۲۶} در آمریکای شمالی و اروپا ۷ الی ۲۰ درصد از کل هزینه‌های دیابت مربوط به DFU می‌باشد.^۲ در ایران در طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰ متوسط مدت بستری بیماران DFU

iii - Platelet-derived growth factor

iv - Transforming growth factor-β

v - Tumor necrosis factor-α

vi - Prostaglandin E2

vii - Epidermal growth factor

viii - Vascular endothelial cell growth factor

ix - Matrix metalloproteinases

x - Tissue inhibitor of metalloproteinases

i - Nitric oxide

ii - Diabetic Foot Ulcer

شوند.^{۳۰} زخم‌های مزمن زمانی ایجاد می‌شوند که در روند طبیعی التیام زخم، اختلال به وجود آید و نتواند مشابه زخم‌های عادی در طول یک دوره زمانی و روند طبیعی التیام یابد.^{۳۱} شایع‌ترین انواع زخم‌های مزمن به عنوان زخم وریدی، زخم فشاری و زخم پای دیابتی طبقه‌بندی می‌شوند.^{۳۰،۳۱}

در دیابت شیرین هر کدام از این مراحل ممکن است مختل و مانع پیشرفت منظم التیام زخم شود.^{۲۸،۳۲} در جدول شماره- ۱، اختلالات ایجاد شده در مراحل مختلف التیام زخم دیابتی ارائه شده است. اختلال در التیام زخم دیابتی ناشی از عوامل داخلی (نوروپاتی، مشکلات عروقی و دیگر عوارض سیستمیک ناشی از دیابت) و خارجی (عفونت زخم، تشکیل پینهⁱⁱⁱ و فشار بیش از حد به محل) می‌باشد.^{۲۸}

وجود می‌آورد تا تعامل‌های سلول-سلول و ماتریکس-سلول را فراهم کند که باعث تسریع سیگنال ترانسداکشنⁱ در زخم می‌شود.^{۳۲} این مرحله روزها تا هفته‌ها ادامه دارد.^{۳۲}

در مرحله بازسازیⁱⁱ، بافت گرانوله دوباره شکل می‌گیرد و اسکار (جای زخم) تشکیل می‌شود. توده‌ی زخم حاوی سلول‌های کمی است و عمدتاً از کلاژن و دیگر پروتئین‌های خارج سلولی تشکیل شده است. این مرحله چند ماه تا چند سال به طول می‌انجامد.

زخم حاد زخمی است که طی یک سری روندهای منظم و به موقع بازسازی می‌شود و یکپارچگی آناتومیکی و عملکردی اندام برقرار می‌شود.^{۳۴} تصادف، تروما، سوختگی و جراحی حوادثی هستند که باعث ایجاد زخم‌های حاد می-

جدول ۱- اختلالات ایجاد شده در مراحل مختلف التیام زخم دیابتی

مرحله هموستاز و التهاب	مرحله پرولیفراسیون (تکثیر)	مرحله بازسازی
↓ تجمع سلول‌های التهابی	↓ پرولیفراسیون	↓ تجزیه پروتئین‌های ماتریکس خارج سلولی
↓ فاکتورهای رشد (TGF- β , VEGF)	↓ مهاجرت سلولی	↓ ضخامت اسکار
↑ سایتوکاین‌های پیش التهابی (IL-6, TNF- α)	↓ فاکتورهای رشد (VEGF, PDGF, TGF- β 1)	↓ قدرت کششی
↓ فاگوسیتوز	↓ پاسخ به فاکتورهای رشد	↓ انقباض زخم
↑ زمان مرحله به بیش از ۳ روز	↓ رگ‌زایی	
	↓ بیان ماتریکس خارج سلولی (کلاژن I و III، فیبرونکتین)	
	↓ ساخت اپی‌تلیال مجدد	
	MMPs ↑	
	TIMPs ↓	

↓ کاهش، ↑ افزایش

اکسید نیتریک در پوست

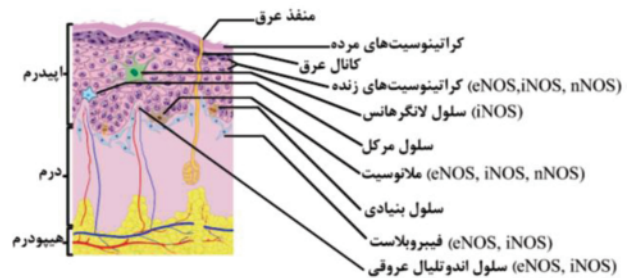
از حدود ۲۵ سال پیش که پژوهشگران کشف کردند NO تقریباً در همه‌ی سلول‌های پوستی (کراتینوسیت‌ها، فیبروبلاست‌ها، ملانوسیت‌ها و سلول‌های اندوتلیال) ساخته می‌شود، شواهد رو به رشدی وجود دارد که این مولکول نقش مهمی در تقویت التیام زخم،^{۱۹} کنترل تکثیر و تمایز کراتینوسیت‌ها،^{۳۷} اثرات ضد میکروبی،^{۱۰،۱۱} تنظیم فعالیت فولیکول مو،^{۳۸} واکنش‌های ایمنی و التهاب پوستی،^{۳۹} توسعه‌ی ادم،^{۴۰} اریتم،^{۴۱} تولید ملانین^{۴۲} پس از تماس با اشعه‌ی فرابنفش^{iv} (UV) و جلوگیری از آپوپتوز ناشی از UV ایفا می‌کند.^{۴۳،۴۴} تولید NO در پوست توسط مسیرهای

آنزیمی،^{۴۵،۴۶} غیر آنزیمی^{۴۷} و یا توسط باکتری‌های سطح پوست^{۴۸} صورت می‌گیرد.

- i- Signal transduction
- ii- Remodeling
- iii- Callus
- iv- Ultraviolet

مسیر آنزیمی تولید NO در پوست

در مسیر آنزیمی، NO از L-آرژینین به کمک سه ایزوform از آنزیم NO سنتتازⁱ (NOS) یعنی اندوتلیالیⁱⁱ (eNOS)، القاییⁱⁱⁱ (iNOS) و نورونی^{iv} (nNOS) که تقریباً در همه‌ی سلول‌های پوستی وجود دارند، تولید می‌شود (شکل ۱).^{۴۵،۴۶} اگرچه در مورد بیان eNOS در کراتینوسیت‌ها در مطالعات اتفاق نظر وجود ندارد،^{۴۹-۵۲} اما بیان eNOS در ملانوسیت‌های طبیعی^{۵۱} و سلول‌های ملانوم بدخیم انسان تأیید شده است.^{۵۳} ژن eNOS همچنین در فیبروبلاست‌ها^{۴۵} و سلول‌های اندوتلیال عروق کوچکی که از هیپودرم به سمت درم کشیده شده‌اند نیز بیان می‌شود.^{۵۵،۵۶} بیان nNOS هم در کراتینوسیت‌ها هم در ملانوسیت‌ها مشاهده شده است.^{۵۷} در مقایسه با eNOS و nNOS الگوی بیان iNOS بیشتر روشن شده است.^{۴۵،۴۶} بیان iNOS بعد از تحریک سایتوکاین‌ها در تمام سلول‌های پوست قابل تشخیص است و عمدتاً با فرایندهای التهابی در پاسخ‌های ایمنی اولیه همراه است.^{۴۵،۴۶}



شکل ۱- جایگاه انواع ایزوform‌های NOS در سلول‌های مختلف پوست انسان

مسیر غیر آنزیمی تولید NO در پوست

مقدار قابل توجهی از NO در پوست ممکن است توسط مسیر غیر آنزیمی طی واکنش‌های نوری از نیتريت و اس-نیتروزوتیول‌ها^v (RSNOs) تولید شود.^{۴۷} اشعه‌ی UV به عنوان جزئی از طیف امواج الکترومغناطیسی است که بین طول موج نور مرئی (۴۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر) و اشعه‌ی ایکس (۰/۱ تا ۱۰ نانومتر) قرار گرفته است.^{۵۸} UV بر اساس خواص الکترومغناطیسی‌اش به UV-A، UV-B و UV-C تقسیم می‌شود. UV-C دارای کوتاه‌ترین طول موج (۱۰۰

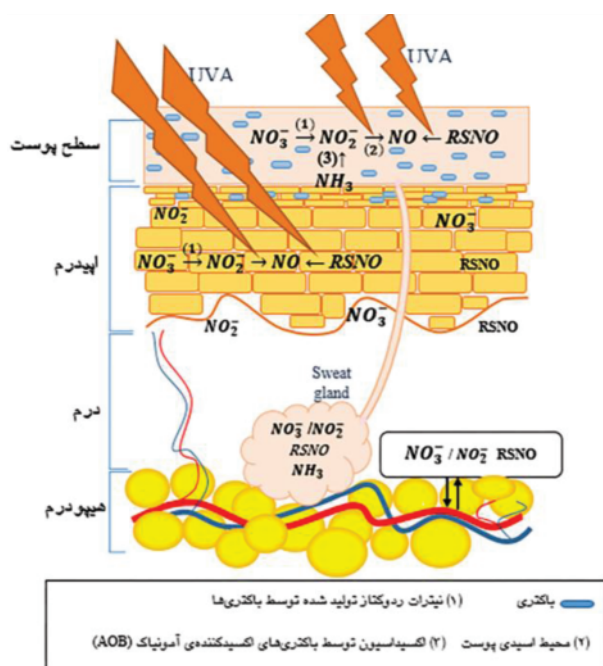
تا ۲۸۰ نانومتر) و بالاترین انرژی، UV-A دارای بلندترین طول موج (۳۱۵ تا ۴۰۰ نانومتر) و حداقل انرژی و UV-B (۲۸۰ تا ۳۱۵ نانومتر) بین این دو موج قرار گرفته است.^{۵۸} آن‌جایی که اتمسفر UV-C را جذب می‌کند، نور خورشید عمدتاً از UV-A (۹۰ تا ۹۵ درصد) و UV-B (۵ تا ۱۰ درصد) تشکیل شده است.^{۵۸}

در پوست انسان سالم غلظت نیتريت و RSNO، به ترتیب ۲۵ و ۳۶۰ برابر بیشتر از پلاسما است و قرار دادن پوست انسان در معرض اشعه‌ی UV-A، موجب تولید NO در اثر تجزیه‌ی نیتريت و RSNOها توسط نور می‌شود (شکل ۲).^{۴۷} همان‌طور که مکانیسم تجزیه نیتريت ناشی از UV-A در زیر نشان می‌دهد (واکنش‌های ۱ الی ۵)، نیتريت باعث تولید NO و رادیکال اکسیژن ($O^{\cdot-}$) می‌شود (واکنش ۱)، که به سرعت به رادیکال هیدروکسیل (OH^{\cdot}) تبدیل می‌شود (واکنش ۲). تجزیه و تحلیل دقیق مکانیسم تجزیه نیتريت ناشی از نور در پوست انسان نشان می‌دهد که در ادامه‌ی واکنش‌ها، گونه‌های رادیکالی بسیار واکنشی و بالقوه سیتوتوکسیک مانند نیتروژن دی‌اکسید (NO_2^{\cdot}) تولید می‌شود (واکنش ۳). NO_2^{\cdot} به سرعت با NO ترکیب می‌شود و دی‌نیتروژن تری‌اکساید (N_2O_3) را به وجود می‌آورد (واکنش ۴)، که یک عامل نیتروزه کننده‌ی بسیار مؤثر به ویژه برای تیول‌ها است. به وسیله‌ی این واکنش، NO_2^{\cdot} باعث کاهش NO آزاد شده از تجزیه نیتريت ناشی از UV-A می‌شود. در حضور تیول‌ها مثل گلووتاتیون ظرفیت به دام انداختن NO توسط NO_2^{\cdot} به وسیله‌ی سه واکنش بی‌اثر می‌شود. اول، N_2O_3 به طور مؤثری تیول‌ها را نیتروزه می‌کند و RSNO را به وجود می‌آورد (واکنش ۶) که RSNO به خودی خود در تماس با اشعه‌ی UV-A باعث تولید NO و Thiyl رادیکال‌ها^{vi} (RS^{\cdot}) می‌شود (واکنش ۷). دوم، NO_2^{\cdot} به وسیله‌ی تیولات‌ها^{vii} (GS^{\cdot}) (از مشتقات تیول) به نیتريت احیا می‌شود (واکنش ۸). سوم، واکنش RS^{\cdot} با GSNO باعث تولید NO و یک دی‌سولفید ($RS-SR$) می‌شود. بنابراین واکنش تیول‌ها با NO_2^{\cdot} و N_2O_3 باعث افزایش تولید NO می‌شود. واکنش تیولات‌ها با NO_2^{\cdot} تقریباً ده برابر سریع‌تر از واکنش با N_2O_3 می‌باشد.^{۵۹} نسبت تیول به نیتريت در پوست انسان بیشتر از ۳۰۰ است و حضور آنتی‌اکسیدان‌ها و آنزیم‌های احیا کننده‌ی تیول در پوست، تولید

vi -Thiyl radicals
vii -Thiolates

i -Nitric oxide synthase
ii -Endothelial nitric oxide synthase
iii - Inducible nitric oxide synthase
iv -Neuronal nitric oxide synthase
v -S-nitrosothiols

هستند که نور UV-A می‌تواند به طور طبیعی به آن‌ها نفوذ کند.^{۴۶،۶۴}



شکل ۲- تولید NO به وسیله‌ی اشعه‌ی فرابنفش نوع A (UV-A) و آنزیم‌های باکتریایی در پوست انسان

NO در زخم

پس از آسیب پوست، میزان NO یک روز پس از آسیب اولیه، طی فاز التهابی زخم، به سرعت افزایش می‌یابد.^{۶۵} NO طی التیام زخم، توسط انواع مختلفی از سلول‌های ایمنی و سلول‌های پوستی ترشح و باعث اثرات مختلفی می‌شود.^{۶۶} اثرات مفیدی که NO بر روی ترمیم زخم می‌گذارد به اثراتی که بر روی رگ‌زایی، التهاب، پرولیفراسیون سلول‌ها و رسوب ماتریکس می‌گذارد، نسبت داده شده‌است (شکل ۳).^{۶۶} نیترات (NO_3^-) و نیتريت (NO_2^-) که مجموعاً (NO_x) نامیده می‌شوند، به عنوان متابولیت‌های پایدار NO در پلاسما، ادرار و بافت وجود دارند.^{۶۷} در تحقیقات مربوط به التیام زخم تجربی و بالینی NO_x به عنوان یک شاخص جایگزین قابل اعتماد برای فعالیت زیستی NO زخم استفاده می‌شود.^{۶۷} برای اندازه‌گیری NO_x زخم، از مایع زخم استخراج شده از اسفنجی که در محیط زخم کشت شده^{۶۸،۶۹} و یا از محصول تجزیه‌ی زخم^{۷۰-۷۲} استفاده می‌شود. بین کاهش میزان NO پوستی و تخریب روند التیام زخم در بیماری‌هایی مثل دیابت^{۷۳،۷۴} (جدول ۲) و سوء تغذیه^{۷۴}

مقدار زیادی NO برای مدت طولانی، در طول تماس با UV-A را تضمین می‌کند.^{۴۷} مکانیسم تجزیه نیتريت در حضور UV-A در زیر نشان داده شده است. (اشعه‌ی UV-A با hv_{365nm} مشخص شده‌است).

- (1) $NO_2^- + hv_{365nm} \rightarrow NO \cdot + O \cdot^-$
- (2) $O \cdot^- + H_2O \rightarrow OH \cdot + OH^-$
- (3) $NO_2^- + OH \cdot \rightarrow NO_2 \cdot + OH^-$
- (4) $NO_2 \cdot + NO \cdot \leftrightarrow N_2O_3$
- (5) $N_2O_3 + H_2O \rightarrow 2 NO_2^- + 2 H^+$
- (6) $N_2O_3 + GS^- \rightarrow NO_2^- + GSNO$
- (7) $GSNO + hv \rightarrow NO \cdot + GS \cdot$
- (8) $NO_2^- + GS^- \rightarrow NO_2 \cdot + GS \cdot$

نقش باکتری‌های سطح پوست در تولید NO

باکتری‌های اکسید کننده‌ی آمونیاکⁱⁱ (AOB) گروهی از میکروارگانیسم‌های سطح پوست پستانداران هستند که در چرخه‌ی نیتروژن در پوست نقش دارند.^{۴۸} AOB باعث تولید نیتريت از آمونیاک آزاد شده از عرق می‌شود (شکل ۲).^{۴۸،۶۰} شیوه‌های بهداشتی جدید منجر به از بین بردن این باکتری‌ها از سطح پوست شده است.^{۴۸} عرق همچنین دارای نیترات با غلظتی تقریباً مشابه با سرم است (حدود ۱۶ تا ۵۲ میکرومولار) و بسیاری از باکتری‌های میکروفلور پوست (مثل استافیلوکوک اپیدرمیدیس)، دارای آنزیم نیترات ردوکتاز هستند که باعث تبدیل نیترات به نیتريت می‌شوند، سپس نیتريت تحت شرایط اسیدی پوست (حدود pH ۴/۵) به NO تبدیل می‌شود (شکل ۲).^{۴۸،۶۱} در اپیدرم و غدد عرق سطح پوست انسان، نیترات (تا ۱۰۰ میکرومولار) محصول غالب NO می‌باشد، پس از آن نیتريت (تا ۷ میکرومولار) و به مقدار خیلی کمتر RSNOها (تا ۱۵ میکرومولار) وجود دارند.^{۴۴،۴۷}

سه عامل باعث تسهیل تولید NO در پوست می‌شوند: ۱. غلظت بالای نیتريت در پوست؛^{۴۷} ۲. pH اسیدی پوست (یکی از فاکتورهای ضروری برای تولید NO از نیتريت، محیط اسیدی سطح پوست است)؛ در آزمایش‌های انسانی^{۶۲} و حیوانی^{۶۳} ماهیت اسیدی خارجی‌ترین لایه پوست (لایه شاخی اپیدرم) با pH ۴/۵ گزارش شده است. ۳. قرار گرفتن در معرض نور فرابنفش؛ لایه‌های خارجی پوست تنها مناطقی

i -High voltage 365 nanometer

ii -Ammonia oxidizing bacteria

iii -Wound lysates

ارتباط وجود دارد و اختلال در التیام زخم دیابتی یکی از شناخته شده‌ترین شرایط زخم مزمن است.

جدول ۲- میزان NOx و نیتريت در نمونه‌های زخم بر حسب زمان اندازه‌گیری در برخی حیوانات آزمایشگاهی سالم و دیابت نوع یک

منبع	نیتريت	NOx	زمان اندازه‌گیری (روز بعد از ایجاد زخم)	نمونه	وضعیت سلامت	جنس	نژاد	حیوان آزمایشگاهی
۷۳	NR	۱۱۰ میکرومول در لیتر	۱۰	مایع زخم	سالم	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی
۷۳	NR	۹۰ میکرومول در لیتر	۱۰	مایع زخم	دیابت نوع یک	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی
۶۸	NR	۱۴۵/۲ میکرومول در لیتر	۱۰	مایع زخم	سالم	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی
۶۸	NR	۴۶/۴ میکرومول در لیتر	۱۰	مایع زخم	دیابت نوع یک	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی
۷۵	NR	۶۲، ۷۵ و ۳۹ میکروگرم در میلی‌لیتر (به ترتیب)	۱۰ و ۳، ۱	مایع زخم	دیابت نوع یک	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی*
۷۶	NR	۵۱/۲ نانوگرم در میلی‌لیتر	۱۰	مایع زخم	سالم	نر	لوئیس	موش صحرایی
۷۶	NR	۵۹/۴ نانوگرم در میلی‌لیتر	۱۰	مایع زخم	دیابت نوع یک	نر	لوئیس	موش صحرایی
۷۲	۱/۲ میکرومول به ازای میکروگرم پروتئین تام	NR	۱۴	محصول تجزیه‌ی زخم	سالم	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی
۷۲	۰/۲ میکرومول به ازای میکروگرم پروتئین تام	NR	۱۴	محصول تجزیه‌ی زخم	دیابت نوع یک	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی
۷۰	NR	۱۶ نانومول در گرم	۷	محصول تجزیه‌ی زخم	سالم	ماده	C57BL	موش سوری
۷۰	NR	۷ نانومول در گرم	۷	محصول تجزیه‌ی زخم	دیابت نوع یک	ماده	C57BL/KsJ-m ^{+/+} Leptdb (db+/db+)	موش سوری [†]

NR (گزارش نشده). * افزایش بیان پروتئین eNOS در پوست محل زخم گزارش شده است. † کاهش بیان Phospho-eNOS در پوست محل زخم گزارش شده است. اندازه‌گیری NOx و نیتريت در تمام مطالعات به روش رنگسنجی گریس انجام شده‌است.

نقش NO در دیابت و زخم دیابتی

قند خون بالای مزمن در بیماران دیابتی منجر به افزایش پلی‌ال‌ا^۱ و مسیرهای گلوکز آمین، فعال‌سازی پروتئین کیناز C و تشکیل محصولات نهایی گلیکاسیونⁱⁱ (AEGs) می‌شود که منجر به استرس اکسیداتیو^{vii,viii} و سپس افزایش گونه‌های اکسیژن فعالⁱⁱⁱ (ROS) مانند آنیون سوپراکسید (O_2^-) می‌شود. این گونه‌های اکسیژن فعال به سرعت با رادیکال‌های NO واکنش نشان می‌دهد و در نهایت منجر به کاهش فراهم زیستی NO در دیابت می‌شود.^{viii} میزان آنیون سوپراکسید در پوست موش‌های دیابتی نوع یک افزایش پیدا می‌کند (شکل ۳)^{vii} و ژن درمانی پوستی eNOS باعث افزایش NO، کاهش میزان سوپراکسید و بهبود التیام زخم می‌شود.^{vii} از طرفی

افزایش فعالیت آرژیناز در بافت زخم دیابتی (db/db)، با تبدیل L-آرژینین به L-اورنیتین و اوره، باعث کاهش آرژینین (پیش‌ساز تولید اندوژن NO) موجود در زخم شده و فراهم زیستی NO را کاهش می‌دهد (شکل ۳).^{vi} براساس یک مطالعه‌ی مروری، L-آرژینین چه در مدل‌های حیوانی و چه در بیمارانی که مکمل L-آرژینین را دریافت کرده‌اند باعث تسریع روند التیام زخم می‌شود.^{vi} به نظر می‌رسد اختلالات NO در دیابت نه تنها در تظاهرات دیابت و پیشرفت آن درگیر است بلکه باعث توسعه اختلالات عملکردی و متابولیکی در تقریباً همه‌ی بافت‌ها از جمله پوست می‌گردد.^{vi}

- i- Polyol
- ii- Advanced glycation end products
- iii -Reactive oxygen species

جدول ۳- اثرات تقویت سیستم NO (افزایش NO اندوژن) بر التیام زخم در دیابت نوع یک

منبع	افزایش التیام زخم از طریق	نحوه‌ی اعمال مداخله	مداخله	میزان استرپتوزوتوسین (STZ) (میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن)	جنس	نژاد	حیوان آزمایشگاهی
۷۶	↑ هیدروکسی پرولین و NOx در محل زخم	تزریقی (داخل صفاقی)، ۱ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن در روز، سه بار در روز	L-آرژینین	۷۰	نر	لوئیس	موش صحرایی
۸۳	↑ بیان TGF-β در محل زخم	خوراکی (گاواژ)، ۲ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن در روز، سه بار در روز	L-آرژینین	۶۰	نر	NR	موش سوری
۷۳	↑ هیدروکسی پرولین در محل زخم	خوراکی (گاواژ)، ۱ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن در روز، سه بار در روز	مولسیدومین	۷۰	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی
۱۷	↑ بیان eNOS و VEGF ↑ ساخت عروق جدید در پوست محل زخم	موضعی، ۰/۲۵ میلی ژول در میلی‌متر مربع با فرکانس ۴ هرتز	امواج شوکی خارجی	۱۵۰	NR	C57BL/6	موش سوری
۸۵	تقویت بیان eNOS و سنتز NO در پوست تشدید ساخت عروق و افزایش جریان خون ناحیه	موضعی	Lov-loaded TES	۶۰	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی
۷۵	↑ پرولین مایع زخم ↑ قدرت انقباضی زخم ↑ بیان eNOS پوست و تولید NO در مایع زخم	خوراکی (گاواژ)، ۰/۴ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن در روز، به مدت ۵ روز	پراواستاتین	۷۰	نر	اسپراگ داوولی	موش صحرایی

NR گزارش نشده

بردن NO اگزوژن نیز باعث بهبود روند التیام زخم می‌شود، هرچند که درباره‌ی کاربرد NO اگزوژن در مورد زخم‌های دیابتی گزارش کمتری وجود دارد (جدول ۴).^{۸۹-۹۱} یکی از این موارد، استفاده از کرم‌های نیتريت سدیم اسیدی شده در محل زخم دیابتی می‌باشد که باعث تسریع بسته شدن زخم در مدل ژنتیکی دیابت نوع دو موش‌های سوری شده است.^{۹۲} همچنین پانسمان‌های هیدروژل^{iv} (PVA) که آزاد کننده NO هستند، نقص در التیام زخم دیابتی نوع یک در موش‌های صحرایی را برمی‌گرداند.^{۹۳} این پانسمان‌ها باعث افزایش ضخامت بافت گرانوله‌ی محل زخم می‌شوند که با افزایش تکثیر فیبروبلاست‌ها و افزایش تشکیل عروق خونی کوچک در محل زخم تشخیص داده می‌شود.^{۹۳}

مصرف خوراکی پراواستاتینⁱ (مهارکننده‌ی HMG CoA ردوکتاز)، باعث افزایش تجمع هیدروکسی پرولین و قدرت انقباضی زخم و افزایش بیان eNOS و تولید NO در زخم دیابتی نوع یک در موش‌های صحرایی می‌شود.^{۷۵} در مطالعه‌ای دیگر یانگⁱⁱ و همکارانش با استفاده از تکنیک‌های مهندسی بافت، داربستیⁱⁱⁱ (Lov-loaded TES) را ساختند که توپولوژی ماتریکس خارج سلولی را تقلید می‌کرد و برای مهاجرت سلولی و انتقال مواد مغذی به ناحیه‌ی زخم مفید بود.^{۸۵} آن‌ها با بارگذاری استاتین بر روی این داربست باعث تقویت بیان eNOS و سنتز NO بر روی زخم دیابتی در مدل دیابتی نوع یک و تسریع روند التیام زخم شدند.^{۸۵}

تولید NO از طریق منابع اگزوژن

دهنده‌های NO مثل نیتريت و نیترات سدیم در کنترل متابولیک دیابت نوع دو نقش دارند.^{۸۶-۸۸} به علاوه، به کار

i -Pravastatin

ii -Yang

iii -Lovastatin (Lov)-loaded tissue engineering scaffold (TES)

iv -Poly (vinyle alcohol)

جدول ۴- اثرات NO درمانی (NO اکزوزن) بر التیام زخم دیابتی

منبع	اثرات بر روی زخم	نحوه‌ی مصرف	مداخله	نوع دیابت (نحوه‌ی ایجاد)	جنس	نژاد	حیوان آزمایشگاهی
۹۲	تسریع بسته شدن زخم	موضعی	کرم نیتريت سدیم اسیدی شده	نوع دو (Lepr db/db)	نر	NR	موش سوری
۹۳	↑ ضخامت بافت گرانوله در محل زخم ↑ سطح NO و GSH پوست ↑ فعالیت SOD و کاتالاز پوست	موضعی	پانسمان‌های هیدروژل PVA آزاد کننده NO	نوع دو (Lepr db/db)	ماده	NR	موش سوری
۹۴	↓ محتوای MDA پوست ↑ VEGF و TGF-β سرم ↑ بیان TGF-β در محل زخم	موضعی	باندازه‌های حاوی نانوذرات دهنده‌ی NO	نوع یک (تزریق STZ)	نر	BALB-C	موش سوری
۸۳	↑ بیان iNOS ↑ التیام زخم	موضعی	L-آرژینین	نوع یک (تزریق STZ)	نر	NR	موش سوری

GSH: Glutathione, SOD: Superoxide dismutase, MDA: Malondialdehyde

NR گزارش نشده

نتیجه‌گیری و آینده‌نگری

کاهش سطح سرمی و پوستی NO در دیابت، ناشی از افزایش سوپراکسایدها و افزایش فاکتورهای التهابی در افراد دیابتی از عوامل تأثیرگذار در تأخیر روند ترمیم زخم دیابتی است. علی‌رغم شیوع بالاتر زخم پای دیابتی در بیماران دیابتی نوع دو، بیشتر مطالعات انجام شده جهت بررسی اثرات مفید NO بر روی زخم در افراد دیابتی نوع یک صورت گرفته است که لزوم بررسی بیشتر در بیماران دیابتی نوع ۲ را نشان می‌دهد. تجویز دهنده‌های NO با هدف افزایش NO در محل زخم، می‌تواند به عنوان یک روش درمانی با اثرات مفید بر روی التیام زخم دیابتی مورد توجه قرار بگیرد. NO از طریق افزایش رگ‌زایی، افزایش سنتز کلاژن، افزایش قدرت انقباضی زخم، افزایش مهاجرت سلولی و انتقال مواد مغذی به ناحیه زخم باعث تسریع روند التیام زخم دیابتی می‌شود. تمام این اثرات به طور بالقوه برای مدیریت زخم پای دیابتی اهمیت دارد.

سپاسگزاری: این پژوهش با حمایت مالی پژوهشکده علوم غدد درون‌ریز و متابولیسم دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی (گرنه: ۱۴۰۸۵ و ۹۷۰۶) انجام شده است. نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در پژوهش حاضر وجود ندارد.

از روش‌های دیگر جهت افزایش تولید NO در محل زخم استفاده از بانداژهای حاوی نانوذرات دهنده‌ی NO است که باعث افزایش التیام زخم در موش‌های دیابتی نوع یک می‌شوند.^{۹۴}

اگرچه NO اثرات مفیدی می‌تواند بر روی التیام زخم دیابتی در دیابت نوع یک بگذارد، اما چون یک مولکول گازی با نیمه عمر کوتاه می‌باشد، حفظ یک میزان مؤثر از NO در محل زخم یک مشکل آشکار در بالین است و برای پیدا کردن راه حل مناسب نیاز به مطالعات بیشتری است. علاوه بر این، التیام زخم پوستی در جوندگان نمی‌تواند به طور کامل التیام زخم پوستی در انسان را تقلید کند^{۹۵،۹۶} که لزوم انجام مطالعات انسانی در این زمینه را نشان می‌دهد. در جدول ۵ برخی از خصوصیات آناتومیکی و فیزیولوژیکی پوست انسان با جوندگان که در روند التیام زخم نقش دارند به صورت مختصر مقایسه شده‌اند.

جدول ۵- مقایسه‌ی ویژگی‌های آناتومیکی و فیزیولوژیکی پوست انسان با جوندگان

ویژگی	انسان	جوندگان
ساختار پوست	پوست محکم	پوست شل
الگوی اولیه در التیام زخم	تشکیل اپی‌تلیال مجدد	انقباض زخم
عضله‌ی پانیکولوس کانوزوس	ندارد	دارد
آنزیم L-گلوکونولاکتون	ندارد	دارد
غدد اکرین و آپوکرین	دارد	ندارد

References

1. Crawford K. Review of 2017 Diabetes Standards of Care. *Nurs Clin North Am* 2017; 52: 621-63.
2. Ogurtsova K, da Rocha Fernandes JD, Huang Y, Linne-nkamp U, Guariguata L, Cho NH, et al. IDF Diabetes Atlas: Global estimates for the prevalence of diabetes for 2015 and 2040. *Diabetes Res Clin Pract* 2017; 128: 40-50.
3. Boulton AJ, Vileikyte L, Ragnarson-Tennvall G, Apelqvist J. The global burden of diabetic foot disease. *Lancet* 2005; 366: 1719-24.
4. Kunkemoeller B, Kyriakides TR. Redox Signaling in Diabetic Wound Healing Regulates Extracellular Matrix Deposition. *Antioxid Redox Signal* 2017; 27: 823-38.
5. Vileikyte L. Diabetic foot ulcers: a quality of life issue. *Diabetes Metab Res Rev* 2001; 17: 246-9.
6. Ghasemi A, Jeddi S. Anti-obesity and anti-diabetic effects of nitrate and nitrite. *Nitric Oxide* 2017; 70: 9-24.
7. Noor S, Zubair M, Ahmad J. Diabetic foot ulcer—a review on pathophysiology, classification and microbial etiology. *Diabetes Metab Syndr* 2015; 9: 192-9.
8. Heltianu C, Guja C. Role of nitric oxide synthase family in diabetic neuropathy. *J Diabetes Metab* 2011; 5: 002.
9. Allen JD, Giordano T, Kevil CG. Nitrite and nitric oxide metabolism in peripheral artery disease. *Nitric Oxide* 2012; 26: 217-22.
10. Wei XQ, Charles IG, Smith A, Ure J, Feng GJ, Huang F-p, et al. Altered immune responses in mice lacking inducible nitric oxide synthase. *Nature* 1995; 375: 408.
11. Klebanoff SJ. Reactive nitrogen intermediates and antimicrobial activity: role of nitrite. *Free Radical Biology and Medicine* 1993; 14: 351-60.
12. Edmonds M, Foster A. The use of antibiotics in the diabetic foot. *Am J Surg* 2004; 187: S25-S8.
13. Alexiadou K, Doupis J. Management of diabetic foot ulcers. *Diabetes Ther* 2012; 3: 4.
14. Lebrun E, Tomic-Canic M, Kirsner RS. The role of surgical debridement in healing of diabetic foot ulcers. *Wound Repair* 2010; 18: 433-8.
15. Galiano RD, Tepper OM, Pelo CR, Bhatt KA, Callaghan M, Bastidas N, et al. Topical vascular endothelial growth factor accelerates diabetic wound healing through increased angiogenesis and by mobilizing and recruiting bone marrow-derived cells. *Am J Pathol* 2004; 164: 1935-47.
16. Khaksari-Haddad M. Omega-3 fatty acids and wound healing in diabetes. *Koomesh* 2004; 5: 121-32.
17. Hayashi D, Kawakami K, Ito K, Ishii K, Tanno H, Imai Y, et al. Low-energy extracorporeal shock wave therapy enhances skin wound healing in diabetic mice: A critical role of endothelial nitric oxide synthase. *Wound Repair Regen* 2012; 20: 887-95.
18. Moretti B, Notarnicola A, Maggio G, Moretti L, Pascione M, Tafuri S, et al. The management of neuropathic ulcers of the foot in diabetes by shock wave therapy. *BMC Musculoskelet Disord* 2009; 10: 54.
19. Witte MB, Barbul A. Role of nitric oxide in wound repair. *Am J Surg* 2002; 183: 406-12.
20. Efron DT, Most D, Barbul A. Role of nitric oxide in wound healing. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 2000; 3: 197-204.
21. Isenberg JS, Ridnour LA, Espey MG, Wink DA, Roberts DA. Nitric oxide in wound-healing. *Microsurgery* 2005; 25: 442-51.
22. Zhang P, Lu J, Jing Y, Tang S, Zhu D, Bi Y. Global epidemiology of diabetic foot ulceration: a systematic review and meta-analysis. *Ann Med* 2017; 49: 106-16.
23. Alavi A, Sibbald RG, Mayer D, Goodman L, Botros M, Armstrong DG, et al. Diabetic foot ulcers: Part I. Pathophysiology and prevention. *J Am Acad Dermatol* 2014; 70: 1-18.
24. Most RS, Sinnock P. The epidemiology of lower extremity amputations in diabetic individuals. *Diabetes Care* 1983; 6: 87-91.
25. Lavery L, Van Houtum W, Harkless L. In-hospital mortality and disposition of diabetic amputees in The Netherlands. *Diabet Med* 1996; 13: 192-7.
26. Iverson M, Tell GS, Riise T, Hanestad BR, Qstbye T, Graue M, et al. History of foot ulcer increases mortality among individuals with diabetes: ten-year follow-up of the Nord-Trondelag Health Study, Norway. *Diabetes Care* 2009; 32: 2193-9.
27. Mashayekhi M, Larijani B, Mohajeri M, Rambod C. Frequency of amputation in patients with diabetic foot ulcer hospitalized in Shariati Hospital, 2002- 2011. *Iranian Journal of Diabetes and Lipid Disorders* 2013; 12: 543-54. [Farsi]
28. Falanga V. Wound healing and its impairment in the diabetic foot. *Lancet* 2005; 366: 1736-43.
29. Sinno H, Prakash S. Complements and the wound healing cascade: an updated review. *Plast Surg Int* 2013; 2013: 146764.
30. Su WH, Cheng MH, Lee WL, Tsou TS, Chang WH, Chen CS, et al. Nonsteroidal anti-inflammatory drugs for wounds: pain relief or excessive scar formation? *Mediators Inflamm* 2010; 2010: 413238.
31. Lindley LE, Stojadinovic O, Pastar I, Tomic-Canic M. Biology and biomarkers for wound healing. *Plastic and reconstructive surgery* 2016; 138: 18S-28S.
32. Wang P-H, Huang B-S, Horng H-C, Yeh C-C, Chen Y-J. Wound healing. *Journal of the Chinese Medical Association* 2018; 81: 94-101.
33. Kunkemoeller B, Kyriakides TR. Redox signaling in diabetic wound healing regulates extracellular matrix deposition. *Antioxid Redox Signal* 2017; 27: 823-38.
34. Lazarus GS, Cooper DM, Knighton DR, Percoraro RE, Rodeheaver G, Robson MC, et al. Definitions and guidelines for assessment of wounds and evaluation of healing. *Wound Repair Regen* 1994; 2: 165-70.
35. Whitney JD. Overview: acute and chronic wounds. *Nurs Clin North Am* 2005; 40: 191-205.
36. Izadi K, Ganchi P. Chronic wounds. *Clin Plast Surg* 2005; 32: 209-22.
37. Krischel V, Bruch-Gerharz D, Suschek C, Kröncke K-D, Ruzicka T, Kolb-Bachofen V. Biphasic effect of exogenous nitric oxide on proliferation and differentiation in skin derived keratinocytes but not fibroblasts. *J Invest Dermatol* 1998; 111: 286-91.
38. Wolf R, Schönfelder G, Paul M, Blume-Peytavi U. Nitric oxide in the human hair follicle: constitutive and dihydrotestosterone-induced nitric oxide synthase expression and NO production in dermal papilla cells. *J Mol Med* 2003; 81: 110-7.
39. Mowbray M, Tan X, Wheatley PS, Morris RE, Weller RB. Topically applied nitric oxide induces T-lymphocyte infiltration in human skin, but minimal inflammation. *J Invest Dermatol* 2008; 128: 352-60.
40. Teixeira M, Williams T, Hellewell P. Role of prostaglandins and nitric oxide in acute inflammatory reactions in guinea-pig skin. *Br J Pharmacol* 1993; 110: 1515-21.
41. Warren JB. Nitric oxide and human skin blood flow responses to acetylcholine and ultraviolet light. *FASEB J* 1994; 8: 247-51.

42. Roméro-Graillet C, Aberdam E, Biagoli N, Massabni W, Ortonne JP, Ballotti R. Ultraviolet B radiation acts through the nitric oxide and cGMP signal transduction pathway to stimulate melanogenesis in human melanocytes. *J Biol Chem* 1996; 271: 28052-6.
43. Weller R, Schwentker A, Billiar TR, Vodovotz Y. Autologous nitric oxide protects mouse and human keratinocytes from ultraviolet B radiation-induced apoptosis. *Am J Physiol Cell Physiol* 2003; 284: C1140-C8.
44. Mowbray M, McLintock S, Weerakoon R, Lomatschinsky N, Jones S, Rossi AG, et al. Enzyme-independent NO stores in human skin: quantification and influence of UV radiation. *J Invest Dermatol* 2009; 129: 834-42.
45. Cals-Grierson MM, Ormerod A. Nitric oxide function in the skin. *Nitric Oxide* 2004; 10: 179-93.
46. Stancic A, Jankovic A, Korac A, Buzadzic B, Otasevic V, Korac B. The role of nitric oxide in diabetic skin (patho) physiology. *Mech Ageing Dev* 2017; 30: 11-9.
47. Paunel AN, Dejam A, Thelen S, Kirsch M, Horstjann M, Gharini P, et al. Enzyme-independent nitric oxide formation during UVA challenge of human skin: characterization, molecular sources, and mechanisms. *Free Radic Biol Med* 2005; 38: 606-15.
48. Whitlock DR, Feelisch M. Soil bacteria, nitrite and the skin. *The Hygiene Hypothesis and Darwinian Medicine*: Springer; 2009. p. 103-15.
49. Shimizu Y, Sakai M, Umemura Y, Ueda H. Immunohistochemical localization of nitric oxide synthase in normal human skin: expression of endothelial-type and inducible-type nitric oxide synthase in keratinocytes. *J Dermatol* 1997; 24: 80-7.
50. Sakai M, Shimizu Y, Nagatsu I, Ueda H. Immunohistochemical localization of NO synthases in normal human skin and psoriatic skin. *Arch Dermatol Res* 1996; 288: 625-7.
51. Jackson M, Frame F, Weller R, McKenzie RC. Expression of nitric oxide synthase III (eNOS) mRNA by human skin cells: melanocytes but not keratinocytes express eNOS mRNA. *Arch Dermatol Res* 1998; 290: 350-2.
52. Stallmeyer B, Anhold M, Wetzler C, Kahlina K, Pfeilschifter J, Frank S. Regulation of eNOS in normal and diabetes-impaired skin repair: implications for tissue regeneration. *Nitric Oxide* 2002; 6: 168-77.
53. Joshi M, Strandhoy J, White W. Nitric oxide synthase activity is up-regulated in melanoma cell lines: a potential mechanism for metastases formation. *Melanoma Res* 1996; 6: 121-6.
54. Wang R, Ghahary A, Shen YJ, Scott PG, Tredget EE. Human dermal fibroblasts produce nitric oxide and express both constitutive and inducible nitric oxide synthase isoforms. *J Invest Dermatol* 1996; 106: 419-27.
55. Jankovic A, Ferreri C, Filipovic M, Ivanovic-Burmazovic I, Stancic A, Otasevic V, et al. Targeting the superoxide/nitric oxide ratio by L-arginine and SOD mimic in diabetic rat skin. *Free Radic Res* 2016; 50(sup1): S51-S63.
56. Bull HA, Hothersall J, Chowdhury N, Cohen J, Dowd PM. Neuropeptides induce release of nitric oxide from human dermal microvascular endothelial cells. *J Invest Dermatol* 1996; 106: 655-60.
57. Roméro-Graillet C, Aberdam E, Clément M, Ortonne JP, Ballotti R. Nitric oxide produced by ultraviolet-irradiated keratinocytes stimulates melanogenesis. *J Clin Invest* 1997; 99: 635-42.
58. D'Orazio J, Jarrett S, Amaro-Ortiz A, Scott T. UV radiation and the skin. *Int J Mol Sci* 2013; 14: 12222-48.
59. Opländer C, Suschek CV. The role of photolabile dermal nitric oxide derivatives in ultraviolet radiation (UVR)-induced cell death. *Int J Mol Sci* 2012; 14: 191-204.
60. Brusilow SW, Gordes EH. Ammonia secretion in sweat. *American Journal of Physiology-Legacy Content* 1968; 214: 513-7.
61. Weller R, Pattullo S, Smith L, Golden M, Ormerod A, Benjamin N. Nitric oxide is generated on the skin surface by reduction of sweat nitrate. *J Invest Dermatol* 1996; 107: 327-31.
62. Öhman H, Vahlquist A. The pH gradient over the stratum corneum differs in X-linked recessive and autosomal dominant ichthyosis: a clue to the molecular origin of the "acid skin mantle"? *J Invest Dermatol* 1998; 111: 674-7.
63. Hanson KM, Behne MJ, Barry NP, Mauro TM, Gratton E, Clegg RM. Two-photon fluorescence lifetime imaging of the skin stratum corneum pH gradient. *Biophys J* 2002; 83: 1682-90.
64. Suschek CV, Opländer C, van Faassen EE. Non-enzymatic NO production in human skin: effect of UVA on cutaneous NO stores. *Nitric Oxide* 2010; 22: 120-35.
65. Rizk M, Witte MB, Barbul A. Nitric oxide and wound healing. *World J Surg* 2004; 28: 301-6.
66. Luo JD, Chen AF. Nitric oxide: a newly discovered function on wound healing. *Acta Pharmacol Sin* 2005; 26: 259-64.
67. Boykin JV Jr. Wound nitric oxide bioactivity: a promising diagnostic indicator for diabetic foot ulcer management. *J Wound Ostomy Continence Nurs* 2010; 37: 25-32.
68. Schäffer MR, Tantry U, Efron PA, Ahrendt GM, Thornton FJ, Barbul A. Diabetes-impaired healing and reduced wound nitric oxide synthesis: a possible pathophysiologic correlation. *Surgery* 1997; 121: 513-9.
69. Witte MB, Thornton FJ, Tantry U, Barbul A. L-Arginine supplementation enhances diabetic wound healing: involvement of the nitric oxide synthase and arginase pathways. *Metabolism* 2002; 51: 1269-73.
70. Bitto A, Irrera N, Pizzino G, Pallio G, Mannino F, Vaccaro M, et al. Activation of the EPOR-β common receptor complex by cibinetide ameliorates impaired wound healing in mice with genetic diabetes. *Biochim Biophys Acta Mol Basis Dis* 2018; 1864: 632-9.
71. Stallmeyer B, Kämpfer H, Kolb N, Pfeilschifter J, Frank S. The function of nitric oxide in wound repair: inhibition of inducible nitric oxide-synthase severely impairs wound reepithelialization. *J Invest Dermatol* 1999; 113: 1090-8.
72. Zhang Z, Zhao M, Wang J, Ding Y, Dai X, Li Y. Oral administration of skin gelatin isolated from chum salmon (*Oncorhynchus keta*) enhances wound healing in diabetic rats. *Mar Drugs* 2011; 9: 696-711.
73. Witte M, Kiyama T, Barbul A. Nitric oxide enhances experimental wound healing in diabetes. *Br J Surg* 2002; 89: 1594-601.
74. Schäffer M, Tantry U, Ahrendt GM, Wasserkrug HL, Barbul A. Acute protein-calorie malnutrition impairs wound healing: a possible role of decreased wound nitric oxide synthesis. *J Am Coll Surg* 1997; 184: 37-43.
75. Laing T, Hanson R, Chan F, Bouchier-Hayes D. Effect of pravastatin on experimental diabetic wound healing. *J Surg Res* 2010; 161: 336-40.
76. Shi HP, Most D, Efron DT, Witte MB, Barbul A. Supplemental L-arginine enhances wound healing in diabetic rats. *Wound Repair and Regen* 2003; 11: 198-203.

77. Brownlee M. The pathobiology of diabetic complications: a unifying mechanism. *Diabetes* 2005; 54: 1615-25.
78. Assmann TS, Brondani LA, Boucas AP, Rheinheimer J, de Souza BM, Canani LH, et al. Nitric oxide levels in patients with diabetes mellitus: A systematic review and meta-analysis. *Nitric Oxide* 2016; 61: 1-9.
79. Luo JD, Wang YY, Fu WL, Wu J, Chen AF. Gene therapy of endothelial nitric oxide synthase and manganese superoxide dismutase restores delayed wound healing in type 1 diabetic mice. *Circulation* 2004; 110: 2484-93.
80. Kämpfer H, Pfeilschifter J, Frank S. Expression and activity of arginase isoenzymes during normal and diabetes-impaired skin repair. *J Invest Dermatol* 2003; 121: 1544-51.
81. Stechmiller JK, Childress B, Cowan L. Arginine supplementation and wound healing. *Nutr Clin Pract* 2005; 20: 52-61.
82. Yamasaki K, Edington HD, McClosky C, Tzeng E, Lizonova A, Kovesdi I, et al. Reversal of impaired wound repair in iNOS-deficient mice by topical adenoviral-mediated iNOS gene transfer. *J Clin Invest* 1998; 101: 967-71.
83. Jerônimo MS, Barros AD, Morita VE, Alves EO, Souza NL, Almeida RM, et al. Oral or topical administration of L-arginine changes the expression of TGF and iNOS and results in early wounds healing. *Acta Cir Bras* 2016; 31: 586-96.
84. Gurdol F, Cimsit M, Oner-Iyidogan Y, Koçak H, Sengun S, Yalcinkaya-Demirsoz S. Collagen synthesis, nitric oxide and asymmetric dimethylarginine in diabetic subjects undergoing hyperbaric oxygen therapy. *Physiol Res* 2010; 59: 423-9.
85. Yang Y, Yin D, Wang F, Hou Z, Fang Z. In situ eNO-S/NO up-regulation—a simple and effective therapeutic strategy for diabetic skin ulcer. *Sci Rep* 2016; 6: 30326.
86. Gheibi S, Bakhtiarzadeh F, Jeddi S, Farrokhfall K, Zardooz H, Ghasemi A. Nitrite increases glucose-stimulated insulin secretion and islet insulin content in obese type 2 diabetic male rats. *Nitric Oxide* 2017; 64: 39-51.
87. Gheibi S, Jeddi S, Carlström M, Gholami H, Ghasemi A. Effects of long-term nitrate supplementation on carbohydrate metabolism, lipid profiles, oxidative stress, and inflammation in male obese type 2 diabetic rats. *Nitric Oxide* 2018; 75: 27-41.
88. Bahadoran Z, Ghasemi A, Mirmiran P, Azizi F, Hadaegh F. Beneficial effects of inorganic nitrate/nitrite in type 2 diabetes and its complications. *Nutr Metab* 2015; 12: 16.
89. Weller R, Ormerod AD, Hobson RP, Benjamin NJ. A randomized trial of acidified nitrite cream in the treatment of tinea pedis. *J Am Acad Dermatol* 1998; 38: 559-63.
90. Ormerod A, White M, Shah S, Benjamin N. Molluscum contagiosum effectively treated with a topical acidified nitrite, nitric oxide liberating cream. *Br J Dermatol* 199; 141: 1051-3.
91. Phillips R, Adjei O, Lucas S, Benjamin N, Wansbrough-Jones M. Pilot randomized double-blind trial of treatment of Mycobacterium ulcerans disease (Buruli ulcer) with topical nitrogen oxides. *Antimicrob Agents Chemother* 2004; 48: 2866-70.
92. Weller R, Finnen MJ. The effects of topical treatment with acidified nitrite on wound healing in normal and diabetic mice. *Nitric Oxide* 2006; 15: 395-9.
93. Masters KSB, Leibovich SJ, Belem P, West JL, Poole-Warren LA. Effects of nitric oxide releasing poly (vinyl alcohol) hydrogel dressings on dermal wound healing in diabetic mice. *Wound Repair Regen* 2002; 10: 286-94.
94. Samaha R, Othman AI, El-Sherbiny IM, Amer MA, Elhusseini F, ElMissiry MA, et al. Topical Nitric oxide in nanoformulation enhanced wound healing in experimental diabetes in mice. *Research Journal Of Pharmaceutical Biological And Chemical Sciences* 2017; 8: 499-514.
95. Trøstrup H, Thomsen K, Calum H, Hoiby N, Moser C. Animal models of chronic wound care: the application of biofilms in clinical research. *Chronic Wound Care Mangament Res* 2016; 3: 123-32.
96. Dorsett-Martin WA. Rat models of skin wound healing: a review. *Wound Repair Regen* 2004; 12: 591-9.

Review Article

The Role of Nitric Oxide Donors in Wound Healing in Diabetes Mellitus

Afzali H¹, Norouzirad R², Khaksari M¹, Ghasemi A²

¹Department of Physiology and Pharmacology, Afzali Pour Medical Faculty, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran, ²Endocrine Physiology Research Center, Research Institute for Endocrine Sciences, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, I. R. Iran.

e-mail: Ghasemi@endocrine.ac.ir

Received: 18/12/2018 Accepted: 01/06/2019

Abstract

Introduction: Diabetic foot ulcer is a serious complication of diabetes mellitus; it consists of lesions in the deep tissues associated with neurological disorders and peripheral vascular disease in the lower limbs. Delayed wound healing in diabetes leads to long-term hospitalization and even amputation of distal organs. Diabetes mellitus is associated with decreased nitric oxide bioavailability that causes dysfunction of the skin. Nitric oxide, a short-lived free radical, is produced in the skin, where it has important physiological functions. Much evidence suggests that nitric oxide accelerates wound healing. This review describes the pathways of nitric oxide production in the skin as well as role of nitric oxide donors in diabetic wound healing. Increased oxidative stress and arginase activity contribute to decreased nitric oxide bioavailability in diabetes. Based on data available, nitric oxide donors such as nitrite increase nitric oxide levels in the diabetic wound and improve wound healing. It seems that increased nitric oxide in diabetic patients improves wound healing by increased collagen deposition and keratinocytes proliferation in the wound edges there by increasing reepithelialization capacity, chemoattractant of cytokines, increased formation of small blood vessels and increased blood flow to the wound site. In conclusion, nitric oxide donors could be considered as a potential and cost-effective treatment for diabetic wounds.

Keywords: Nitric oxide, Wound healing, Diabetic foot ulcer, Diabetes mellitus