

تأثیر ان - استیل سیستین بر علائم حرکتی و میزان پروتئین پارکین در کورتکس پیشانی در مدل پارکینسونی موش صحرایی

هاله حسن زاده^۱، آرمان رحیمی^۲، صبریه امینی^۳، کامبیز حسن زاده^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زیست شناسی، پردیس علوم و تحقیقات کردستان، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم زیستی و بیوتکنولوژی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
۳. استادیار زیست شناسی، گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، ایران.
۴. استادیار فارماکولوژی، مرکز تحقیقات سلولی و مولکولی، دانشگاه علوم پزشکی کردستان، سنندج، ایران. (مؤلف مسوول)، تلفن ثابت: ۰۸۷-۳۱۸۲۷۴۰۱، kambizhassanzadeh@gmail.com

چکیده

زمینه و هدف: مطالعات اخیر نشان می‌دهند که استرس اکسیداتیو نقش مهمی در پاتوفیزیولوژی بیماری پارکینسون دارد. کورتکس پیشانی به دلیل داشتن اعصاب دوپامینرژیک قابل توجهی که از مسیر نیگرواستریاتال عصب‌دهی شده‌اند، یکی از قسمت‌هایی است که در بیماری پارکینسون دچار آسیب می‌شود. از سوی دیگر خواص آنتی اکسیدانی ان - استیل سیستین از طریق تقویت گلوتاتیون به اثبات رسیده است. گلوتاتیون یکی از اصلی‌ترین سیستم‌های آنتی اکسیدان داخل سلولی است. از این رو مطالعه ما با هدف بررسی تأثیر ان - استیل سیستین در کنترل بیماری پارکینسون صورت گرفت.

مواد و روشها: در این مطالعه تجربی، موش‌های نر نژاد ویستار با وزن 40.0 ± 5.0 گرم و سن ۱۲-۱۰ ماه، سم روتنون ($2/5 \text{ mg/kg/48h, sc}$) را دریافت نمودند. ان - استیل سیستین با دوزهای (25 mg/kg/48h, ip یا 50) یک ساعت قبل از تزریق روتنون تجویز می‌شد. تست رفتاری روتارود جهت سنجش علائم حرکتی و تأیید ایجاد مدل به انجام رسید. همچنین میزان پارکین به عنوان یکی از کلیدی‌ترین پروتئین‌های مرتبط با بیماری پارکینسون، با استفاده از تکنیک وسترن بلات در ناحیه کورتکس پیشانی اندازه‌گیری شد.

نتایج: نتایج نشان داد که ان - استیل سیستین قادر است از افت عملکرد حرکتی در تست روتارود جلوگیری کند. همچنین یافته‌ها حاکی از کاهش پروتئین پارکین در ناحیه پیشانی در گروه دریافت‌کننده روتنون بود. از طرفی ان - استیل سیستین توانست از این کاهش میزان پارکین جلوگیری کند.

نتیجه‌گیری: در مجموع نتایج نشان داد که ان - استیل سیستین توانست از پیشرفت بیماری پارکینسون در مدل حیوانی جلوگیری نماید که احتمالاً مرتبط با ویژگی‌های آنتی اکسیدانی این ترکیب است.

واژه‌های کلیدی: بیماری پارکینسون، روتنون، ان - استیل سیستین، پارکین، کورتکس پیشانی

وصول مقاله: ۹۳/۶/۲ اصلاحیه نهایی: ۹۳/۸/۲۵ پذیرش: ۹۳/۹/۱۶

مقدمه

بیماری پارکینسون یکی از رایجترین بیماری‌های سیستم اعصاب مرکزی است به طوری که بیش از ۶ میلیون نفر در سراسر دنیا به این بیماری مبتلا هستند (۱). این بیماری دارای روندی تدریجی و مزمن است و تا کنون هیچگونه استراتژی پیشگیرانه یا درمان موفقیتی که در بلند مدت کارآمد باشد، برای آن شناخته نشده است (۲ و ۳). مطالعات اپیدمیولوژیکی که به منظور یافتن ریسک فاکتورهای زیست محیطی، تغذیه‌ای یا سبک زندگی در ارتباط با این بیماری صورت گرفته اند، بجز در مواردی محدود با شکست مواجه شده‌اند. یکی از مهمترین عوامل در این زمینه، قرار گرفتن در معرض سموم محیطی و از آن جمله روتنون می‌باشد (۲ و ۴). از این رو سم روتنون کاربرد زیادی برای ایجاد مدل‌های حیوانی بیماری پارکینسون دارد و ویژگی‌های پاتوفیزیولوژیک بیماری پارکینسون را به خوبی شبیه سازی می‌کند (۵).

در واقع دو عامل اصلی در مرگ سلول‌های دوپامینرژیک مغز و بروز بیماری پارکینسون نقش دارند، که عبارتند از؛ ۱. مهار کمپلکس I زنجیره انتقال الکترون در میتوکندری و ۲. افزایش سطح گونه‌های فعال اکسیژن، که متعاقب آن تخریب اکسیداتیو در اعصاب دوپامینرژیک اتفاق می‌افتد (۶-۸). به علاوه برخی مطالعات نشان داده‌اند که مسیرهای آپوپتوتیک وابسته به استرس اکسیداتیو، در تخریب اعصاب دوپامینرژیک در طی بیماری پارکینسون نقش دارند (۹). تمامی این‌ها نشان دهنده نقش مهم و غالب استرس اکسیداتیو در روند بیماری پارکینسون است.

اخیراً نقش ترکیبات آنتی‌اکسیدان در پیشگیری از پیشرفت بیماری پارکینسون به اثبات رسیده است. در این میان ان-استیل سیستئین به عنوان یک آنتی‌اکسیدان با ویژگی تقویت سیستم گلوتاتیون برای پیشگیری از پیشرفت بیماری مطرح شده است. ان-استیل سیستئین یک آنتی‌اکسیدان تیولی است که سال‌هاست در مواردی همچون درمان برونشیت مزمن و مسمویت با استامینوفن و فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفته است (۱۰ و ۱۱). تقویت سیستم

گلوتاتیونی توسط ان-استیل سیستئین به دو صورت انجام میشود: (۱) به عنوان پیش‌ساز گلوتاتیون (۲) افزایش مقادیر mRNA آنزیم گلوتاتیون پراکسیداز که به نوبه خود در افزایش سطح گلوتاتیون نقش دارد (۱۲). گلوتاتیون یکی از سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی اصلی داخل سلولی است که قادر است از طریق گروه‌های سولفیدریل خود از سطح استرس اکسیداتیو سلول بکاهد. گلوتاتیون به تنهایی یا به کمک برخی آنزیم‌های دیگر رادیکال‌های سوپر اکسید و پراکسی نیتريت‌ها را احیا می‌کند (۱۳ و ۱۴). عامل محدود کننده سرعت در بیوسنتز گلوتاتیون مقادیر قابل دسترس آمینو اسید سیستئین داخل سلولی است. بنابراین ترکیبات حاوی این آمینو اسید، مانند ان-استیل سیستئین جهت استفاده به عنوان پیش‌سازهای گلوتاتیون مورد توجه قرار گرفته‌اند (۱۵).

از سوی دیگر وجود جهش در ژن پارکین شایعترین عامل پارکینسون ارثی است (۱۶ و ۱۷). به علاوه شواهد قوی نشان می‌دهند که بیان متغیر آن در افراد مختلف، می‌تواند بر روی خطر ابتلا به بیماری پارکینسون تک‌گیر که شایعتر است، تأثیر بگذارد (۱۸). پروتئین پارکین از پروتئین‌های سیستم پروتئازومی است که در جبران آسیب‌های وارده ناشی از استرس اکسیداتیو نقش کلیدی دارد و خود نیز به استرس اکسیداتیو بسیار حساس می‌باشد (۱۹).

با توجه به آنچه گفته شد، مطالعه حاضر با هدف شناخت اثر ان-استیل سیستئین بر علائم رفتاری و سطح پروتئین پارکین در کورتکس پیشانی مدل حیوانی بیماری پارکینسون انجام شد.

روش بررسی

این مطالعه بصورت تجربی بر روی موش صحرایی به انجام رسید.

گروه بندی و ایجاد مدل

۳۰ سر موش صحرایی نر نژاد ویستار با وزن 40.0 ± 5.0 گرم و سن ۱۰-۱۲ ماه از انستیتو پاستور ایران خریداری شدند. حیوانات در قفس‌های پلی‌کربنات (۲ موش در هر قفس) و

در سیکل شبانه روزی طبیعی نگهداری می‌شدند. غذای استاندارد و آب به مقدار کافی در دسترس حیوانات قرار داشت و دمای محیط ۲۱ تا ۲۵ درجه سانتیگراد تنظیم شد. این حیوانات به صورت تصادفی در ۵ گروه آزمایشی زیر تقسیم شدند:

یک گروه از موش‌ها حامل روتون (ml/kg/48h, sc) (۱) و سالی: حامل ان - استیل سیستین (ml/kg/48h, sc) (۱) را دریافت نمودند.

یک گروه از موش‌ها روتون (۲/۵ mg/kg/48h, sc) و سالی: حامل ان - استیل سیستین (۱ ml/kg/48h, sc) را دریافت نمودند (گروه کنترل).

دو گروه از موش‌ها روتون (۲/۵ mg/kg/48h, sc) و ان - استیل سیستین (۲۵ mg/kg/48h, sc یا ۵۰) را دریافت نمودند.

یک گروه از موش‌ها حامل روتون (ml/kg/48h, sc) (۱) و ان - استیل سیستین (۵۰ mg/kg/48h, sc) را دریافت نمودند.

به منظور ایجاد مدل پارکینسونی نیز حیوانات روتون را با دوز ۲/۵ mg/kg به صورت زیر جلدی و با فواصل زمانی ۴۸ ساعت یکبار در یک دوره ۲۰ روز دریافت نمودند. روش القای مدل پارکینسونی از پیش در آزمایشگاه راه - اندازی شده بود و صحت آن توسط تست‌های رفتاری و بررسی‌های مولکولی، که نتایج آن را نیز پیشتر طی مقاله‌ای منتشر نموده‌ایم، مورد تأیید بود (۲۰).

روش انجام تست رفتاری روتارود

روتارود یک تست معتبر جهت ارزیابی آسیب‌های عصبی در جوندگان بوده و می‌تواند مکرراً برای یک حیوان تکرار شود تا قدرت عضلانی، هماهنگی اندام‌های قدامی و خلفی و تعادلش را سنجش نماید. در این مطالعه تمامی موش‌ها قبل از شروع مطالعه تحت یک برنامه آموزشی ۵ روزه قرار گرفتند تا به یک عملکرد ثابت برسند. به این ترتیب که در هر روز ۴ نوبت و هر نوبت به مدت ۳۰۰ ثانیه بر روی دستگاه در حال چرخش قرار داده می‌شدند. سرعت

چرخش محور دستگاه در روز اول آموزش ۱۱ دور در دقیقه بود که در آخرین روز آموزش به ۱۵ دور در دقیقه رسید. تست روتارود پیش از انجام تزریقات در روز اول و هر ۴۸ ساعت یک بار از روز پنجم به بعد اجرا شد و در آن مدت زمانی را که حیوان قادر بود تعادل خود را بر روی دستگاه حفظ نماید (Latency time) برحسب ثانیه، ثبت می‌شد (۲۱).

سنجش نیمه کمی سطح پروتئین پارکین توسط تکنیک وسترن بلات

در روز بیستم پس از ایجاد مدل در گروه کنترل ابتدا موش - ها (n = ۶) توسط کوکتل کتامین - زایلازین (سیگما، آلمان) بیهوش شده و سر آن‌ها با گیوتین جدا شد. سپس ناحیه کورتکس پیشانی سریعاً جدا شده و در نیتروژن مایع قرار داده شد. به دنبال آن نمونه‌ها در بافر مخصوص لیز (50 mM Tris-HCl, pH 8.0, 150 mM NaCl, 1% Roche NP-40 (w/v) که با قرص مهار کننده پروتئاز (Cat # 04 693 132 001) ترکیب شده بود هموموژنیزه شدند. سپس این نمونه‌ها توسط تکنیک برادفورد از لحاظ محتوای پروتئینی تعیین غلظت شده و در مرحله بعد بر روی SDS-PAGE ۱۰% الکتروفورز شدند. مقدار پروتئینی که درون هر چاهک ریخته می‌شد، ۵۰ µg بود. پس از آن پروتئین‌های جدا شده در ژل، توسط روش نیمه خشک بر روی غشای PVDF (Millipore, Bedford, MA) انتقال شدند. به منظور کاهش باندهای غیر اختصاصی غشای PVDF پس از دریافت پروتئین‌ها با شیر ۵% بلوکه می‌شد و سپس به مدت یک شب در دمای ۴°C با آنتی‌بادی‌های اولیه موسوم به آنتی پارکین (۵۲ kDa) محصول شرکت Abcam (Cat # ab77924) و آنتی بتا اکتین (Abcam, Cat # 8226) که با نسبت ۱ به ۱۰۰۰ رقیق شده بود، انکوبه می‌شد و متعاقب آن غشا را به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق با آنتی بادی ثانویه کوئزوگه شده با HRP که با نسبت ۱ به ۱۰۰۰۰ رقیق شده بود، انکوبه می‌شد. آن گاه باندها را توسط کیت کمیلومینسانس محصول

هر نوبت از تست، با روز اول خودش مقایسه می‌شد که این کار با استفاده از آزمون تی وابسته صورت گرفت.

نتایج

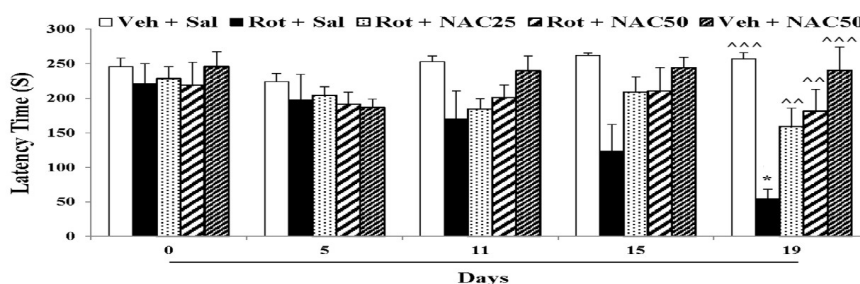
آنچنان که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، نتایج حاکی از افت عملکرد گروه کنترل (روتون + حامل ان - استیل سیستین) در تست روتارود در روز نوزدهم در مقایسه با روز اول (انجام آزمایشات پایه) می‌باشد ($p < 0/05$). بنابراین این روز به عنوان روز ایجاد مدل مدنظر قرار گرفت. همچنین در این روز تفاوت معنی داری بین گروه کنترل با گروه‌های درمانی از لحاظ قدرت عضلانی و تعادل در تست روتارود وجود داشت ($p < 0/01$) که نشان از اثر مفید ان - استیل سیستین در پیشگیری از بروز یا پیشرفت بیماری دارد.

شرکت Roche (cat # 11520709001) مرئی نموده و فیلم‌های رادیوگرافی به مدت ۵ تا ۲۰ ثانیه در معرض آن قرار گرفت. در پایان فیلم‌ها اسکن شد و توسط نرم افزار ImageJ شدت باندها اندازه گیری شد. این باندها نسبت به باندهای کنترل (بتا اکتین) نرمالیزه شده و داده‌های نهایی به صورت درصد گروه کنترل گزارش شدند.

آنالیز آماری

تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS 21 انجام شد. مقادیر به صورت میانگین \pm خطای استاندارد تعریف شده - اند. هر گروه متشکل از ۶ سر موش بود. تفاوت میانگین داده‌های گروه کنترل با سایر گروه‌ها توسط آزمون ANOVA یک طرفه بررسی و در صورت معنی داری از آزمون تعقیبی Tukey بهره گرفته شد. $P < 0/05$ به عنوان سطح معنی داری در نظر گرفته شد. در تست رفتاری روتارود به منظور فهمیدن روز ایجاد مدل، گروه کنترل در

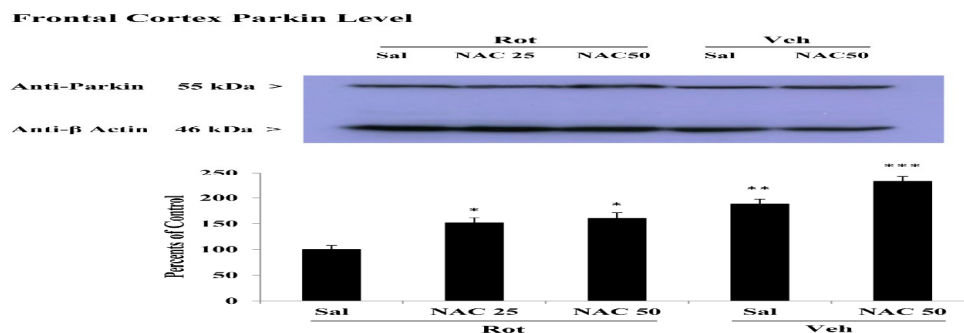
Rotarod Test



نمودار ۱ - مقایسه عملکرد گروه‌های آزمایشی در تست روتارود. داده‌ها به صورت میانگین \pm خطای استاندارد نشان داده شده است. * $p < 0/05$ نشان دهنده اختلاف معنی دار گروه کنترل (روتون + حامل ان - استیل سیستین) در آن روز با روز اول در همان گروه می‌باشد. $p < 0/01$ و $^{***} p < 0/001$ نشان دهنده اختلاف معنی دار سایر گروه‌ها با گروه کنترل می‌باشد. Rot = روتون، Veh = حامل، Sal = سالین، NAC = ان - استیل سیستین

حیوانی ایجاد شده است. از طرفی در همین نمودار دیده می‌شود که ان - استیل سیستین در هر دو دوز بکار رفته قادر بود از کاهش سطح پروتئین پارکین در این ناحیه جلوگیری کند بطوریکه میزان سطح پروتئین در گروه‌های درمانی با گروه کنترل تفاوت معنی داری داشت ($p < 0/05$).

همچنین نتایج در نمودار ۲ نشان دهنده کاهش معنی دار سطح پروتئین پارکین در ناحیه کورتکس گروه کنترل (روتون + حامل ان - استیل سیستین) نسبت به گروه دریافت کننده حامل روتون است ($p < 0/05$)، که در راستای نتایج فوق نشان دهنده ایجاد استرس اکسیداتیو و تخریب نورون‌های دوپامینرژیک کورتکس پیشانی در مدل



نمودار ۲- مقایسه سطح پروتئین پارکین در ناحیه کورتکس پیشانی مغز در گروه‌های آزمایشی. داده‌ها به صورت میانگین \pm خطای استاندارد نشان داده شده است. $p < 0.05$ ، $p < 0.01$ ، $p < 0.001$ نشان دهنده اختلاف معنی دار با گروه کنترل (روتون + سالین): حامل ان - استیل سیستئین) می‌باشد. Rot = روتون، Veh = حامل، Sal = سالین، NAC = ان - استیل سیستئین

بحث

غنی‌تر است، اما چون در مطالعه‌ای جداگانه که نتایج آن در شرف انتشار است، نقش ان - استیل سیستئین را بر مسیر نیگرواستریاتال مورد مطالعه قرار داده بودیم، و نیز از آنجایی که نقش کورتکس پیشانی در بیماری پارکینسون و ارتباط آن با مسیر نیگرواستریاتال در مطالعات گذشته اثبات شده است، در این مطالعه این ناحیه مورد بررسی قرار گرفت (۲۵). در واقع نتایج مطالعه حاضر حاکی از کاهش معنی‌دار سطح پروتئین پارکین در کورتکس پیشانی در گروه کنترل نسبت به دریافت کنندگان حامل روتون بود. در همین راستا مطالعات پیشین نیز بر آسیب‌های کورتکس پیشانی در خلال بیماری پارکینسون و نیز ارتباط این آسیب با اختلالات حرکتی و حافظه اشاره دارند (۲۵). هر چند در بیماری پارکینسون علاوه بر اعصاب دوپامینرژیک بافت کورتکس پیشانی، دیگر اعصاب همین بافت از جمله نورآدرنژیک، سروتونینرژیک و کولینرژیک هم دستخوش تغییر و آسیب می‌شوند (۲۶). از این رو احتمالاً پروتئین پارکین و استرس اکسیداتیو در تمامی این اعصاب حائز اهمیت می‌باشند و در مکانیسم‌های بروز و پشرفت بیماری پارکینسون نقش دارند. از طرفی نتایج مطالعه حاضر حاکی از آن بود که ان - استیل سیستئین توانست از افت عملکرد موش‌های دریافت کننده سم روتون در تست روتارود جلوگیری کند، که این خود

تست رفتاری روتارود به منظور بررسی ایجاد مدل و نیز تأثیر ان - استیل سیستئین بر روی مدل حیوانی پارکینسون انجام شد. نتایج تست روتارود نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین گروه کنترل با دیگر گروه‌های آزمایشی و نیز با روز نخست خودش وجود دارد و این بدان معناست که مدل بیماری پارکینسون با موفقیت ایجاد شده است.

در این پژوهش از تزریق مزمن و زیرجلدی روتون استفاده شد، زیرا مطالعات پیشین نشان داده‌اند که این رویکرد در مقایسه با دیگر روش‌های سیستمیک روند تدریجی‌تری داشته و مرگ و میر کمتری دارد، که مطلوب‌تر است (۲۲). به علاوه از موش‌های با سن بالا در این تحقیق استفاده شد، چرا که این موش‌ها نسبت به سم روتون حساستر بوده و مدل ایجاد شده به نوع انسانی بیماری شبیه‌تر خواهد بود (۲۳). همچنین با توجه به اینکه مطالعات پیشین نشان داده‌اند که زمان سپری شده بر روی دستگاه روتارود با از دست رفتن اعصاب دوپامینرژیک رابطه معکوس دارد (۲۴)، ما تصمیم گرفتیم این تست را مبنایی برای تأیید ایجاد مدل قرار دهیم.

هرچند مسیر نیگرواستریاتال در رابطه با بیماری پارکینسون نقش با اهمیت تری دارد و از لحاظ اعصاب دوپامینرژیک

سیستم با همکاری هم از آسیب سلول توسط استرس اکسیداتیو جلوگیری می‌کنند.

با وجود نتایج قابل توجهی که در این پژوهش به دست آمد، محدودیت‌ها و کاستی‌هایی نیز در آن وجود دارند، از جمله اینکه می‌توان به عدم انجام مطالعات بافت شناسی اشاره کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی آزمون‌های رفتاری روانشناختی اختصاصی نیز از حیوانات گرفته شود. به علاوه بهتر بود در مطالعات مولکولی سطح آنزیم تیروزین هیدروکسیلاز، سطح گلوکاتایون و سطح پتانسیل کاهش/ احیا در ناحیه مغزی کورتکس پیش‌پشانی مورد ارزیابی قرار گیرد.

نتیجه گیری

مطالعه حاضر نشان داد سطح پروتئین پارکین در کورتکس پیشانی مدل حیوانی بیماری پارکینسون کاهش یافت و احتمالاً این کاهش بواسطه استرس اکسیداتیو ناشی از سم روتون بوده و در بروز بیماری پارکینسون نقش داشته است. همچنین پژوهش ما نشان داد که ان-استیل سیستین قادر است از کاهش سطح پروتئین پارکین در کورتکس پیشانی مدل حیوانی پارکینسون جلوگیری نماید، که احتمالاً به دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی آن است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس خود را از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج به سبب حمایت‌های مالی اعلام می‌دارند.

می‌تواند احتمالاً ناشی از تأثیرات آنتی‌اکسیدانی و نوروپروتکتیو این ترکیب باشد. مکانیسم‌های مولکولی مختلفی در ایجاد بیماری پارکینسون متصورند، که در تمامی آن‌ها استرس اکسیداتیو و تولید گونه‌های فعال اکسیژن نقش کلیدی دارند (۲۷). جالب آن که مطالعات دیگر نشان داده‌اند سطح گلوکاتایون و آنزیم‌های مرتبط با آن در پایانه‌های سیناپسی کورتکس بیماران پارکینسونی کاهش می‌یابند (۲۸). بنابراین احتمالاً ان-استیل سیستین با تقویت سیستم گلوکاتایون و حفظ پتانسیل احیای نورون‌ها، از ایجاد استرس اکسیداتیو و آسیب ناشی از آن جلوگیری می‌کند.

به علاوه در راستای نتایج تست روتارود، مطالعه حاضر نشان داد که ان-استیل سیستین توانست از کاهش سطح پروتئین پارکین در کورتکس پیشانی مغز موش‌های دریافت کننده روتون جلوگیری نماید. در این رابطه مطالعات پیشین نشان داده‌اند که در پاسخ به شرایط استرس اکسیداتیو شناخته شده در روند بیماری پارکینسون، پروتئین پارکین در کورتکس پیشانی دچار اکسیداسیون شده و سطح آن کاهش می‌یابد (۲۹). به علاوه برخی مطالعات نشان می‌دهند که در بیماری پارکینسون علاوه بر کاهش سطح گلوکاتایون در نورون‌های کورتکس پیشانی، سطح اکسیداسیون پروتئین‌ها و لیپیدها نیز افزایش می‌یابد. از آنجایی که پروتئین پارکین جزئی از سیستم پروتئازومی سلول‌هاست و در حذف پروتئین‌ها و اجزای آسیب دیده سلول نقش دارد، پس احتمالاً ان-استیل سیستین با تقویت سیستم گلوکاتایونی، از ناکارآمد شدن سیستم پروتئازومی نیز جلوگیری نموده و در نتیجه این دو

Reference

1. de Lau LM, Breteler MM. Epidemiology of Parkinson's disease. *Lancet Neurol* 2006;5:525-35.
2. Prasad KN, Cole WC, Kumar B. Multiple antioxidants in the prevention and treatment of Parkinson's disease. *J Am Coll Nutr* 1999;18: 413-23.
3. Surmeier DJ. Calcium, ageing, and neuronal vulnerability in Parkinson's disease. *Lancet Neurol* 2007;6:933-8.

4. Di Monte DA, Lavasani M, Manning-Bog AB. Environmental factors in Parkinson's disease. *Neurotoxicology* 2002;23:487-502.
5. Cannon JR, Tapias V, Na HM, Honick AS, Drolet RE, Greenamyre JT. A highly reproducible rotenone model of Parkinson's disease. *Neurobiol Dis* 2009;34:279-90.
6. Dauer W, Przedborski S. Parkinson's disease: mechanisms and models. *Neuron* 2003;39:889-909.
7. Sherer TB, Betarbet R, Stout AK, Lund S, Baptista M, Panov AV, et al. An in vitro model of Parkinson's disease: linking mitochondrial impairment to altered alpha-synuclein metabolism and oxidative damage. *J Neurosci* 2002;22:7006-15.
8. Soto-Otero R, Mendez-Alvarez E, Sanchez-Iglesias S, Zubkov FI, Voskressensky LG, Varlamov AV, et al. Inhibition of 6-hydroxydopamine-induced oxidative damage by 4,5-dihydro-3H-2-benzazepine N-oxides. *Biochem Pharmacol* 2008;75:1526-37.
9. Sonia Angeline M, Chaterjee P, Anand K, Ambasta RK, Kumar P. Rotenone-induced parkinsonism elicits behavioral impairments and differential expression of parkin, heat shock proteins and caspases in the rat. *Neuroscience* 2012;220:291-301.
10. Scalley RD, Conner CS. Acetaminophen poisoning: a case report of the use of acetylcysteine. *Am J Hosp Pharm* 1978;35:964-7.
11. Stey C, Steurer J, Bachmann S, Medici TC, Tramer MR. The effect of oral N-acetylcysteine in chronic bronchitis: a quantitative systematic review. *Eur Respir J* 2000;16:253-62.
12. Chen CM, Yin MC, Hsu CC, Liu TC. Antioxidative and anti-inflammatory effects of four cysteine-containing agents in striatum of MPTP-treated mice. *Nutrition* 2007;23:589-97.
13. Dringen R. Metabolism and functions of glutathione in brain. *Prog Neurobiol* 2000;62:649-71.
14. Meister A, Anderson ME. Glutathione. *Annu Rev Biochem* 1983;52:711-60.
15. Smeyne M, Smeyne RJ. Glutathione metabolism and Parkinson's disease. *Free Radic Biol Med* 2013;62:13-25.
16. Wang C, Ko HS, Thomas B, Tsang F, Chew KC, Tay SP, et al. Stress-induced alterations in parkin solubility promote parkin aggregation and compromise parkin's protective function. *Hum Mol Genet* 2005;14:3885-97.
17. Mata IF, Lockhart PJ, Farrer MJ. Parkin genetics: one model for Parkinson's disease. *Hum Mol Genet* 2004;13:127-33.
18. West AB, Maraganore D, Crook J, Lesnick T, Lockhart PJ, Wilkes KM, et al. Functional association of the parkin gene promoter with idiopathic Parkinson's disease. *Hum Mol Genet* 2002;11:2787-92.
19. LaVoie MJ, Cortese GP, Ostaszewski BL, Schlossmacher MG. The effects of oxidative stress on parkin and other E3 ligases. *J Neurochem* 2007;103:2354-68.
20. Rahimmi A KF, Izadpanah E, Hassanzadeh K. Induction of Parkinson's disease model in rat by rotenone. *J Isfahan Med Sch* 2014;32:1250-58.
21. Urbach YK, Bode FJ, Nguyen HP, Riess O, von Horsten S. Neurobehavioral tests in rat models of degenerative brain diseases. *Methods Mol Biol* 2010;597:333-56.
22. Fleming SM, Zhu C, Fernagut PO, Mehta A, Dicarlo CD, Seaman RL, et al. Behavioral and immunohistochemical effects of chronic intravenous and subcutaneous infusions of varying doses of rotenone. *Exp Neurol* 2004;187:418-29.
23. Phinney AL, Andringa G, Bol JG, Wolters E, Van Muiswinkel FL, Van Dam AM, et al. Enhanced sensitivity of dopaminergic neurons to rotenone-induced toxicity with aging. *Parkinsonism Relat Disord* 2006;12:228-38.

24. Iancu R, Mohapel P, Brundin P, Paul G. Behavioral characterization of a unilateral 6-OHDA-lesion model of Parkinson's disease in mice. *Behav Brain Res* 2005;162:1-10.
25. Lewis SJ, Dove A, Robbins TW, Barker RA, Owen AM. Cognitive impairments in early Parkinson's disease are accompanied by reductions in activity in frontostriatal neural circuitry. *J Neurosci* 2003;23:6351-6.
26. Agid Y. Parkinson's disease: pathophysiology. *The Lancet* 1991;337:1321-4.
27. Zhou C, Huang Y, Przedborski S. Oxidative stress in Parkinson's disease: a mechanism of pathogenic and therapeutic significance. *Ann N Y Acad Sci* 2008;1147:93-104.
28. Harish G, Mahadevan A, Srinivas Bharath MM, Shankar SK. Alteration in glutathione content and associated enzyme activities in the synaptic terminals but not in the non-synaptic mitochondria from the frontal cortex of Parkinson's disease brains. *Neurochem Res* 2013;38:186-200.
29. Ferrer I. Early involvement of the cerebral cortex in Parkinson's disease: convergence of multiple metabolic defects. *Prog Neurobiol* 2009;88:89-103.