

Underlying Mechanisms of Neuroprotective Actions of Klotho Against Cognitive Impairment in Neurodegenerative Diseases

Tahereh Ghadiri*, Maryam Azarfarin, Gholamreza Namvar, Zeynab Samnia

Department of Neuroscience and Cognition, School of Advanced Medical Sciences, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

Article Info:

Received: 5 Mar 2024

Revised: 27 Feb 2024

Accepted: 5 Feb 2024

ABSTRACT

Introduction: Klotho, an elixir of life, beneficially affects several bodily systems, including the brain. During the past two decades, positive effects of klotho in systemic and neurodegenerative diseases have been frequently reported. In this review, we summarized published data addressing these protective effects in neurodegenerative diseases along with associated improvement in cognitive performance. Klotho, a product of the Klotho gene, is a pluripotent protein and exists in soluble, secretary, and transmembrane forms in various types (α , β , and γ). Klotho receptor is localized in several cerebral regions, including the choroid plexus, limbic system, Purkinje cells, hippocampus, and basal ganglia. Klotho has been shown to induce anti-aging effects through the activation of several pathways. Moreover, a growing body of evidence supports its protective and cognition-enhancing effects in different Alzheimer's models. These effects mainly emerged via enhanced synaptic plasticity and clearance of amyloid beta plus improving neuronal energy balance by affecting astrocytes metabolic pathways. Growth factors-related pathways along with Wnt signaling are the most important pathways relating to Klotho functions. Klotho also promotes antioxidant systems, such as superoxide dismutase, to diminish reactive oxygen species and consequently restricts apoptotic cell death. **Conclusion:** Due to its low regenerative capacity, the brain is of great importance for therapeutic explorations aiming to replace dead neurons. In sum, comprehension of precise mechanism of this protein actions could be promising tool to develop Klotho based-novel therapeutic approaches for treatment of neurodegenerative diseases in the future.

Keywords:

1. Alzheimer Disease
2. Memory
3. Cognition
4. Klotho Proteins

*Corresponding Author: Tahereh Ghadiri

Email: ghadiri21980@yahoo.com

مکانیزم‌های دخیل در نقش حفاظتی کلوتو در مقابل اختلالات شناختی در بیماری‌های تحلیل برنده عصبی

طاهره قدیری*، مریم آذرفرین، غلامرضا نامور، زینب سام‌نیا

گروه علوم اعصاب و شناخت، دانشکده علوم نوین پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله:

پذیرش: ۱۵ اسفند ۱۴۰۲

اصلاحیه: ۸ سفند ۱۴۰۲

دریافت: ۱۶ بهمن ۱۴۰۲

چکیده

مقدمه: کلوتوی به‌عنوان یک اکسیر ضد پیری اثرات مفیدی بر بیشتر دستگاه‌های بدن از جمله مغز دارد. در دو دهه اخیر گزارشات زیادی مبنی بر اثرات مفید کلوتو در بسیاری از بیماری‌های عمومی و نیز عصبی منتشر شده است. در مقاله حاضر، ما مجموعه گزارشات انتشار یافته در خصوص اثرات حفاظتی کلوتو در بیماری‌های تحلیل برنده عصبی را همراه بهبود عملکرد شناختی آنها خلاصه نمودیم. کلوتو محصول ژن (KL)، پروتئین پلوروی پوتنتی است که بصورت محلول، ترشحي و عرض غشایی و در فرم‌های مختلف (آلفا، بتا، و گاما) وجود دارد. گیرنده کلوتو در بیشتر قسمت‌های مخ، شامل شبکه کورویید مغز، بخش‌های مختلف سیستم لیمبیک، سلول‌های پورکنز، هیپوکامپ و اجسام قاعده‌ای بیان می‌شود. نشان داده شده است که این پروتئین از طریق فعال کردن مسیرهای متعدد اثرات ضد پیری القا می‌کند. همچنین گزارشات قابل توجهی مبنی بر نقش کلوتو در درمان و پیشگیری از بیماری آلزایمر و بهبود عملکرد شناختی در مدل‌های پیش بالینی وجود دارد. این اثرات غالباً بواسطه افزایش پلاستیسیته سیناپسی و پاکسازی آمیلوئید بتا و همچنین بهبود ذخیره انرژی نورون‌ها با اثر بر روی مسیرهای متابولیکی آستروسیت‌ها رخ می‌دهد. مسیر فاکتورهای رشد و Wnt مهم‌ترین مسیرهای واسط اثرات کلوتو هستند. کلوتو همچنین از طریق تقویت دستگاه آنتی اکسیدانی با افزایش فعالیت آنتی اکسیدان‌هایی نظیر سوپراکسیداز دیسموتاز و مهار گونه‌های واکنشی اکسیژن میزان مرگ آپوپتوتیک نورونی را کاهش می‌دهد.

نتیجه‌گیری: مغز بدلیل قابلیت بسیار پایین در جایگزین کردن نورون‌های از دست رفته، در تحقیقات پیشرو درمانی حائز اهمیت بالایی است. در مجموع، فهم چگونگی دقیق عملکرد این پروتئین می‌تواند ابزار امید بخشی جهت ایجاد پروتکل‌های درمانی جدید مبتنی بر کلوتو برای درمان بیماری‌های تحلیل برنده عصبی در آینده‌ای نزدیک فراهم نماید.

واژه‌های کلیدی:

- ۱- بیماری آلزایمر
- ۲- حافظه
- ۳- شناخت
- ۴- پروتئین‌های کلوتو

*نویسنده مسئول: طاهره قدیری

پست الکترونیک: ghadiri21980@yahoo.com

مقدمه

بشر از دیر باز به دنبال راهی برای جاودانگی و جلوگیری از پیری و عوارض ناشی از آن بوده است. در این راستا در جستجوی عناصر طبیعی موجود در طبیعت و ساختن عصاره های و اکسیرهای مختلف از گیاهان رفته و بعدها با پیشرفت علم پزشکی و داروسازی ساختن داروهای بر گرفته از عناصر بیولوژیک را در رأس کار قرار داده است. (۱) یکی از مهمترین عوارض پیری در دستگاه های مختلف بدن از دست دادن بخش وسیعی از سلول ها و همچنین نقص عملکرد صحیح سلول های باقیمانده می باشد. یکی از مهمترین دستگاه های بدن انسان که دستخوش تغییرات جبران ناپذیر با کهولت سن می گردد دستگاه عصبی می باشد. چنانچه می دانیم دستگاه عصبی به دلیل جایگاه ویژه اش در کنترل عملکرد بدن پستانداران و پیچیدگی بسیار زیادش تنها دستگاهی است که سلول های عملکردی آن (نورون ها) پس از زمان تولد قابلیت تکثیر خود را با استثنای چند نقطه جزئی در مغز، تقریباً بطور کامل از دست می دهند و این مساله اهمیت جلوگیری از روند پیری و از دست دادن آنها را در طول عمر چند برابر می کند. گذشته از روند پیری طبیعی، برخی بیماری های عمومی و به ویژه بیماری های مغزی نیز می توانند عوارضی شبیه به پیری ایجاد نموده و عملکرد مغز را بشدت متأثر سازند. پیری و بیماری های تحلیل برنده عصبی با راه اندازی مکانیزم های مولکولی ویژه سبب افزایش استرس اکسیداتیو و نیتروزاتیو در سلول ها شده و در نهایت منجر به مرگ و از دست رفتن سلول های عصبی می شوند. در بلند مدت این پدیده سبب کاهش حجم مغز و بزرگ شدن بطن ها و کاهش عملکرد اجرایی مؤثر می گردد. بروز سکته مغزی (به دلایل اولیه و یا ثانویه)، بیماری های همچون پارکینسون و آلزایمر اغلب منجر به چنین مرگ های سلولی شده و از دست دادن سلول ها به ویژه در نواحی قشر پیشانی و هیپوکامپ اعمال شناختی و حافظه را بشدت تحت تأثیر قرار می دهد.

کلوتو پروتئین حاصل از ژنی بر روی کروموزوم ۱۳ است و ابتدا توسط کلیه ها تولید می شود. افرادی که به دلیل تنوع ژنتیکی میزان بالاتری از کلوتو را دارا می باشند، نسبت به افراد عادی در فرآیند پیری علاوه بر عملکردهای شناختی بهتر، در برابر بیماری های نظیر آلزایمر مقاوم تر هستند. تزریق فرم هورمونی (محلول) کلوتو در موش ها بلافاصله باعث بهبود عملکردهای شناختی می شود که نشان دهنده در گیر شدن مسیرهای متابولیکی در مغز است. از لحاظ ساختاری کلوتو یک پروتئین یک بار گذرنده از غشاء می باشد که بعد از شکستن از فرم غشایی خود، مانند یک هورمون وارد گردش خون می شود. این پروتئین از دو دامنه شامل کلوتو ۱ و کلوتو ۲ تشکیل شده است. بخش جدا شده، به صورت یک پروتئین درون زاد عمل کرده و

نقش مهمی در عملکرد صحیح کلوتو در افزایش عملکرد شناختی و ضد تومور زایی دارد. از طرفی کلوتو ۲ توسط ADAM 10,17^۱ شکسته شده و به فرم محلول در می آید و در دستگاه عروقی به گردش در آمده و وارد دستگاه عصبی می شود (تصویر ۱). فرم محلول در خون، ادرار و مایع مغزی نخاعی یافت شده و در تنظیم گیرنده ها و انتقال دهنده های یونی و همچنین تنظیم مسیرهای سیگنالینگ مرتبط با فاکتورهای رشد نقش ایفا می کند. کلوتو غشایی در اندام هایی مانند غده پاراتیروئید، مغز، ماهیچه های اسکلتی، غدد هیپوفیز، بیضه ها، کلیه ها، گوش داخلی، تخمدان ها، کولون و سلول های اپیتلیال سینه هوموستاز کلسیم و فسفات را تنظیم می کند. جهش ژن کلوتو در موش ها باعث ایجاد نارسایی های متعدد در حیوان می شود که علائم آن ها مشابه با سندرم پیری زودرس در انسان می باشد. برعکس از افزایش بیان این ژن همراه با افزایش طول عمر گزارش شده است (۲، ۳).

این پروتئین نقش اساسی در تنظیم سوخت و ساز بدن، میلین سازی، عملکردهای شناختی و فرایندهای التهابی بازی می کند. میزان این پروتئین با افزایش سن در خون کاهش یافته و باعث سفتی شریان ها و در نتیجه باعث اختلال در دستگاه گردش خون و تصلب شرایین می شود. کاهش سطح آلفا کلوتوی خون بعد از ۴۰ سالگی منجر به بیماری های وابسته به سن نظیر سرطان، فشار خون، پوکی استخوان و بیماری های کلیوی می شود (۴). افزون بر این، کلوتو با ایجاد تغییرات مؤثر در ساختار سیناپس های موجود در هیپوکامپ و قشر نقش مهمی در کاهش سرعت کاهش کارایی شناختی ایفا می کند (۵). اگرچه کلوتو بعنوان پروتئینی مهم برای دستگاه عصبی است، اما از زمان کشف آن تا کنون با سایر بیماری های مرتبط با سن، مثل سرطان و همچنین بیماری های قلبی عروقی، کلیوی و پوست ارتباط داده شده است (۶). فرم ترشحی کلوتو در مایع مغزی نخاعی، بیان سایتوکاین / کموکاین را سرکوب می کند و در نتیجه از سلول های عصبی در برابر عوامل التهابی حفاظت می کند. کلوتو در نورون های هیپوکامپ، سلول های اپاندیمی شبکه مشیمیه، سلول های پورکنژ و ماده سفید مغز به فراوانی یافت می شود. ارتباط کلوتو در توسعه الیگودندروسیت و یکپارچگی میلین و همچنین در محافظت در برابر تشکیل پلاک های عصبی آمیلوئید و سمیت گلوتاماتی نشان داده شده است (۳). مقادیر بالای بیان این پروتئین همراه با پردازش شناختی پویاتر و حافظه و قابلیت یادآوری بسیار بهتر بوده است. هنگامی که سطح کلوتو افزایش می یابد، باعث افزایش ژن های وابسته به گیرنده های NMDAR^۲ از جمله FOS ها می شود که در تثبیت حافظه نقش دارند. تجزیه و تحلیل روی موش های که ژن کلوتو در آن ها غیر فعال شده بود، ناهنجاری های مرتبط با افزایش سن، از جمله اختلال در راه رفتن،

¹ A disintegrin and metalloproteinase

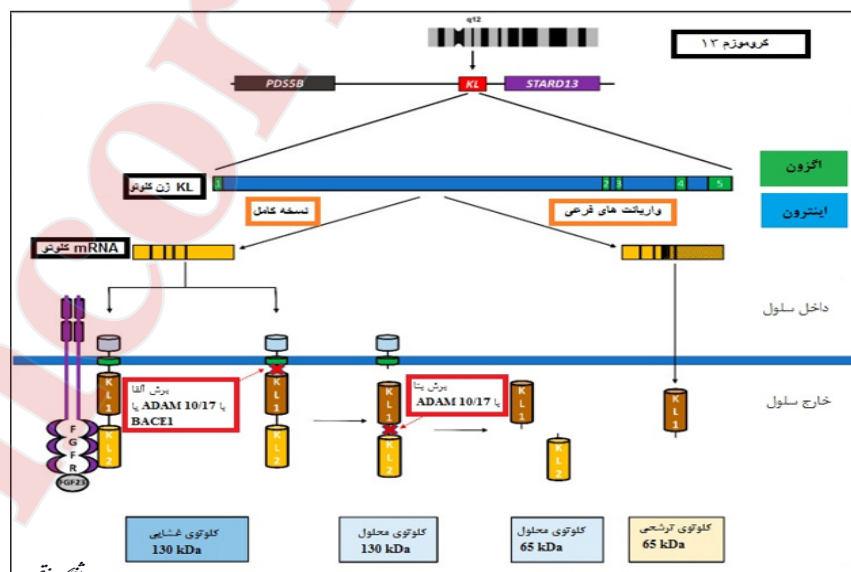
² N-methyl-D-aspartate receptor

(فقط دامنه خارج سلولی) تصویر می‌گیرد (۱۶). بطور کلی، این ژن یک پروتئین ۱۳۰ کیلو دالتونی عرض غشایی با یک قطعه کوچک سیتوپلاسمی و یک قطعه بزرگ خارج سلولی را کدگذاری می‌کند که بیشتر در کلیه‌ها ساخته می‌شود. قطعه داخل سلولی آن معمولاً از لحاظ عملکردی فعال نیست ولی قطعه خارج سلولی آن دو قسمت تکرار شونده داخلی به نام KL1 و KL2 دارد که از لحاظ توالی اسید آمینه دارای مشابهت با خانواده نوع ۱ گلیکوزیدازها بوده که پیوندهای β گلیکوزیدی در گلیکولیپیدها، گلیکوپروتئین‌ها و ساکاریدها را هیدرولیز می‌کنند. ناحیه ارتباطی بین این دو قطعه تکرار شونده از ۴ اسید آمینه (سه لایزین و یک آرژنین) تشکیل است و به طور بالقوه محل عمل آنزیم‌های پروتئولیتیک می‌باشد. برای شروع فرآیند شکستن پروتئین عرض غشایی، آنزیم‌های متالوپروتئاز 10 و ADAM 17 به قسمت غشایی قطعه خارج سلولی متصل و آن را می‌شکنند و فرم محلول کلوتو تصویر می‌گیرد که در مایعات سرمی بدن مانند خون، ادرار و مایع مغزی نخاعی ترشح می‌شود. به نظر می‌رسد، حضور انسولین و کلسیم خارج سلولی از عوامل تسهیل کننده در فرآیند شکستن پروتئین کلوتوی عرض غشایی می‌باشند. فرم ترشحی کلوتو با وزن ۷۰ کیلو دالتون طی فرآیند برش ایجاد می‌شود (۱۷، ۱۸). بنابراین در نهایت سه تصویر اصلی کلوتو به صورت عرض غشایی، محلول و ترشحی می‌باشد. فرم کامل کلوتو همراه با گیرنده‌های FGFRs⁵ در تنظیم هوموستاز انسولین و کلسیم نقش مهمی ایفا می‌کند (۱۹). کلوتو پروتئینی است که نقش‌های مختلفی در فعالیت‌های بیولوژیکی ایفا می‌کند، اما مکانیسم‌های اثر آن به طور کامل شناخته نشده است. با این حال، تحقیقات چندین مسیر سیگنالینگ را که کلوتو از طریق آن‌ها تأثیرات خود را اعمال می‌کند، روشن کرده است.

آمفیزم، پوکی استخوان، تصلب شرائین^۳، هیپومیلیناسیون، تخریب نورون‌های هیپوکامپ و نقص‌های شناختی را نشان داد به گونه‌ای که این موش‌ها بعد از دو تا سه ماه می‌مردند. در نقطه مقابل آزمایش‌ها نشان داد که بیان بالای کلوتو باعث اثرات حفاظتی در برابر استرس اکسیداتیو شده، عملکرد شناختی را بهبود بخشیده و طول عمر را ۲۰ و ۳۰ درصد در موش‌های ماده و نر افزایش می‌دهد (۷). با توجه به اثرات همه جانبه کلوتو در حفظ شرایط مناسب دستگاه‌های مختلف بدن به‌ویژه دستگاه عصبی مرکزی این مقاله قصد دارد که به اثرات مطلوب و محافظتی این پروتئین در عملکرد شناختی به‌ویژه یادگیری و حافظه بپردازد.

تاریخچه، بیوسنتز و مسیرهای سیگنالینگ

در افسانه‌های یونان باستان کلوتو، الهه‌ای است که ریسمان حیات را می‌ریسد و تقدیر انسان را معین می‌کند (۸، ۹). ژن کدکننده پروتئین کلوتو (KL) (با دو قطعه اینترون و سه قطعه اگزون) بر روی بازوی بلند کروموزوم شماره ۱۳ قرار گرفته که اولین بار در سال ۱۹۹۷ توسط کورو و همکارانش کشف شد. خانواده ژن کلوتو از سه فرم آلفا، بتا و گاما تشکیل شده است (تصویر ۱) و چند تصویری‌های^۴ مختلفی برای ژن کلوتو گزارش شده است (۱۵-۱۰). بطور کلی محصول این ژن یک پروتئین یکبار گذرنده از غشا است که دارای اثرات اندوکراین، اتوکراین و پاراکراین بروی سلول‌های هدف مختلف می‌باشد. کلوتو بطور ویژه به‌عنوان کوترانسمیتور فاکتور رشد فیبروبلاستی عمل می‌کند. آلفا کلوتو پروتئینی پُر توان است که پیری را به تأخیر انداخته و شناخت را بهبود می‌بخشد. آلفا کلوتوی موشی ۱۰۱۴ و انسانی ۱۰۱۲ توالی آمینو اسیدی دارد. در اثر برش ژنی دو نسخه از آلفا کلوتو شامل طول کامل (شامل بخش عرض غشایی داخل و خارج سلولی) و فرم ترشحی



تصویر ۱- تصویر شماتیک از ژن KL و محصولات آن. ژن KL واریانت‌های مختلف کلوتو را تولید می‌کند. پروتئین کلوتو در طول کامل (غشایی) یا کوتاه تر (ترشحی) حاصل می‌شود. پروتئین کامل غشایی پس از شکستن توسط آنزیم‌های ADAM10/17 و BACE1 فرم‌های مختلف محلول با وزن سبک‌تر را به خارج سلول آزاد می‌کند.

³ Atherosclerosis

⁴ Polymorphism

⁵ Fibroblast growth factor receptors

مسیر سیگنالینگ Wnt از مسیرهای دخیل در تکثیر و پایداری سلول‌ها می‌باشد. فعال شدن مداوم این مسیر می‌تواند منجر به پیری سلولی شود. کلوتو از طریق تعامل با این مسیر، فعالیت بیولوژیکی آن را مهار کرده و در نتیجه به عنوان یک سرکوب کننده تومور عمل می‌کند. همچنین کلوتو در تنظیم مسیر سیگنالینگ فاکتور رشد فیبروبلاست ۲۳ (FGF-23) نقش دارد. در واقع یکی از مکانیسم‌های اثر FGF-23 از طریق تعامل با فرم غشایی کلوتو است که منجر به شروع مسیرهای پایین دستی سیگنالینگ می‌شود، این مسیرها در نهایت بر بیان ژن‌ها تأثیر می‌گذارند. مشخص شده است کلوتو از طریق مسیر FGF-23 می‌تواند از مرگ سلولی ناشی از آتروفی بافت و همچنین مرگ برنامه ریزی شده سلولی (آپوپتوز) جلوگیری کند (تصویر ۲). از طرفی کلوتو با مسدود کردن آبشار سیگنالینگ انسولین و IGF-1 داخل سلولی طول عمر سلول را افزایش می‌دهد. با اتصال به گیرنده انسولین/IGF-1^{۱۲}، کلوتو فعالیت تیروزین کینازی آن را مهار می‌کند، که متعاقباً بر رویدادهای سیگنالینگ پایین دستی تأثیر می‌گذارد. این پروتئین همچنین بیان فاکتورهای رونویسی فوکسو^{۱۳} را تحریک و از این طریق منجر به تحمل استرس اکسیداتیو می‌شود. این امر به صورت بالقوه باعث تقویت اثرات ضد پیری کلوتو می‌شود (۲۱، ۲۲). کلوتو به دلیل اثرات ضد پیری خود در تنظیم اعمال شناختی نقش دارد و سبب تغییر ساختار سیناپس‌ها در هیپوکامپ و قشر مغز شده و افت عملکرد شناختی را کند می‌کند. سطوح سرمی آلفا کلوتو با افزایش سن به‌ویژه پس از ۴۰ سالگی کاهش یافته منجر به بروز بیماری‌های مرتبط با کهولت سن مانند سرطان، افزایش فشارخون و بیماری‌های کلیوی می‌گردد (۱۹).

بیان و توزیع کلوتو در دستگاه عصبی مرکزی

با اینکه کلوتو به وضوح نقش قابل توجهی در مغز ایفا می‌کند، توزیع دقیق آن در سیستم عصبی مرکزی (CNS) انسان هنوز به طور کامل شناخته نشده است. در حال حاضر بیشتر اطلاعات مرتبط با چگونگی توزیع کلوتو در مغز مربوط به مطالعات صورت گرفته بر روی موش‌ها می‌باشد. طبق مطالعات در شبکه مشیمیه، به‌ویژه در غشای رأسی سلول‌های اپاندیمی،

ژن کلوتو به مقادیر چشمگیری در کلیه‌ها بیان می‌شود. بیان این ژن تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله فاکتور رونویسی SP1 قرار می‌گیرد. با افزایش بیان SP1 بیان ژن کلوتو افزایش یافته و مقدار استرس اکسیداتیو نیز کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با مهار SP1 بیان ژن کلوتو و به تبع آن رونویسی از پروتئین کلوتو نیز کاهش می‌یابد. همچنین آنژیوتانسین ۲ در توبول‌های کلیوی از طریق فسفریلاسیون پروتئین کیناز C و مهار SP1 به صورت غیر مستقیم بیان ژن کلوتو را مهار می‌کند. جدا از عامل SP1، فاکتور TNF α ^۶ با تولید NF κ B^۷ نیز بیان ژن کلوتو را مهار می‌کند. از دیگر عوامل تأثیرگذار بر بیان ژن کلوتو ویتامین D و فاکتور رشد اپی‌درمال می‌باشد، جایی که ویتامین D با اتصال به ژن کلوتو، آن را فعال می‌کند. عوامل دیگری همچون اریتروپویتین، لوزارتان، فوزینوپریل^۸ و راپامایسین^۹ بر بیان ژن کلوتو اثر می‌گذارند (۱۷، ۲۰).

TGF- β 1^{۱۰} یکی از انواع فاکتور رشد است که در تنظیم تبدیل سلول‌های اپیتلیال به سلول‌های مزانشیمی^{۱۱} نقش مهمی ایفا می‌کند. سلول‌های مزانشیمی در فرآیندهایی مانند ترمیم بافت، بهبود زخم و رشد جنینی نقش دارند. کلوتو می‌تواند سیگنالینگ TGF- β 1 را با اتصال مستقیم به گیرنده TGF نوع ۲ و مهار اتصال لیگاند به TGF- β 1 مختل کند. این مهار منجر به کاهش نرخ تبدیل سلول‌های اپی‌تلیال به سلول‌های مزانشیمی، در سلول‌های ویژه از جمله سلول‌های سرطانی می‌شود. مسیر بعدی p53/p21 است. این مسیر با توقف چرخه سلولی و مرگ سلولی مرتبط است. نشان داده شده است که کلوتو با مهار مسیر وابسته به p53/p21، پیری سلولی را در انواع ویژه‌ای، از سلول‌ها کاهش می‌دهد. مکانیسم‌های دقیقی که کلوتو از طریق آن این مسیر را مهار می‌کند، هنوز در دست بررسی است. یکی از مسیرهایی که در تنظیم فرآیندهای سلولی مختلف نقش دارد، آدنوزین مونوفسفات حلقوی می‌باشد. مشخص شده است که کلوتو این مسیر را با افزایش تولید سوپراکسیدها در سلول‌های ویژه تعدیل می‌کند. پروتئین کیناز C عضوی از خانواده‌ی سرین/ترئونین کینازها است که پروتئین‌های هدف مختلفی را تنظیم می‌کند. کلوتو می‌تواند هر دو مسیر سیگنالینگ آدنوزین مونوفسفات حلقوی و پروتئین کیناز C را فعال کند (۱۹).

⁶ Tumor necrosis factor α

⁷ Nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells

⁸ Fosinopril

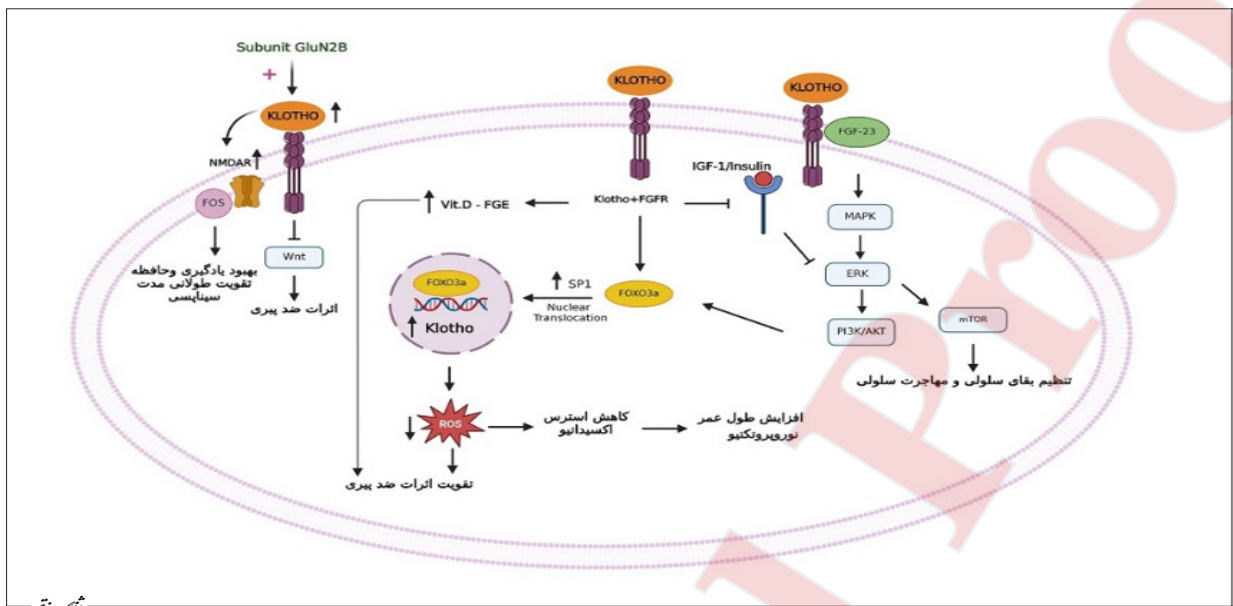
⁹ Rapamycin

¹⁰ Transforming growth factor beta 1

¹¹ Epithelial-to-mesenchymal transition

¹² Insulin like growth factor-1

¹³ FOXO



تصویر ۲- نقش کلوئو در تنظیم عملکرد سیناپسی و حافظه. سطوح بالای کلوئو باعث افزایش کارایی عملکردهای وابسته به گیرنده های NMDA می شود، مانند افزایش بیان ژن های FOS در ناحیه شکنج دندانهای، که نهایتاً منجر به بهبود یادگیری و حافظه، و همچنین تقویت طولانی مدت سیناپسی در این ناحیه می شود. در اجرای این مراحل نقش زیر واحد گیرنده NMDA میانجی گری اثرات کلوئو، یعنی GluN2B، حیاتی است تا جایی که مهار این زیر واحد در هیپوکامپ باعث حذف اثرات تقویتی کلوئو بر حافظه و یادگیری می شود.

نقاطی هستند که حضور پررنگ کلوئو در آن‌ها دیده می‌شود. همچنین نورون‌های لایه خاکستری شاخ شکمی نخاع و نورون‌های گانگلیونی شبکه میان‌تربیک دستگاه گوارش نیز مقادیر قابل توجهی از بیان و حضور پروتئین کلوئو را نشان می‌دهند (۲۴). سلول‌های اپاندیمال شبکه کوروییدی از دیگر نقاطی می‌باشد که مقادیر فراوانی از کلوئو در آن‌ها یافت می‌شود (۲۵). نکته قابل توجه آن که چندتصویری فرم ترشحي کلوئو در مغز بسیار نسبت به سایر ارگان‌ها و همچنین در مغز انسان بسیار بیشتر از سیستم عصبی موش می‌باشد (۲۶).

شناخت، بیماری‌های تحلیل برنده عصبی و کلوئو

شناخت یک اصطلاح کلی جهت اشاره به اعمال عالی ذهنی مانند یادگیری، حافظه، استدلال، تصمیم‌گیری، توجه و تکلم است. طی فرآیندهای شناختی همچون یادگیری و حافظه امکان ایجاد دانش جدید از طریق دریافت، پردازش، ذخیره‌سازی و بازخوانی فراهم می‌شود. این فرایند همراه با تغییراتی در تصویر و عملکرد سیناپس و نورون‌های پیش و پس سیناپسی می‌باشد (۲۷-۲۹). عملکرد شناختی طی پیری طبیعی (۳۰، ۳۱) و همچنین بیماری‌هایی مانند زوال عقل، آلزایمر، پارکینسون، تاژپاتی‌ها، صدمات مغزی و سکته مغزی دچار اختلال می‌شود (۳۲، ۳۳، ۲۷). از طریق پژوهش‌های صورت گرفته بر روی داده‌های ژنتیکی و عصب‌روان‌شناختی در انسان و ترکیب آن با مطالعات مولکولی، الکتروفیزیولوژیکی، دارویی و رفتاری صورت گرفته بر موش‌های تراریخته^{۱۴}، نقش کلوئو امروزه بیش از پیش در افزایش کارایی عملکردهای شناختی،

بیان کلوئو بیشترین میزان خود را دارد. همچنین فرم محلول کلوئو در مایع مغزی نخاعی انسان و موش شناسایی شده است، که نشان می‌دهد قطعه خارج سلولی کلوئو پس از برش پروتئولیتیک، از سلول‌های اپاندیم شبکه مشیمیه به داخل CSF آزاد می‌شود. در بیشتر نواحی مغز، سطوح mRNA کلوئو در مراحل اولیه رشد بالا است، در هفته دوم پس از تولد به شدت سطح آن کاهش می‌یابد و سپس به تدریج در دوره بزرگسالی به سطح اولیه دوران رشد می‌رسد. این تغییرات در نواحی آمیگدال بارزتر است، در حالی که سطح mRNA کلوئو در هیپوکامپ نسبتاً ثابت باقی می‌ماند. mRNA کلوئو در سراسر قشر مغز، هیپوکامپ، نواحی مختلف لیمبیک، آمیگدال، تالاموس، سلول‌های پورکنژ مخچه موش‌ها، بصل النخاع، بلب بویایی، جسم سیاه و هیپوتالاموس شناسایی شده است. علاوه بر مشیمیه، بالاترین سطوح mRNA ژن کلوئو در ناحیه پیش‌اپتیک داخلی، هسته پره‌اپتیک میانی، هیپوتالاموس شکمی و آمیگدال قاعده‌ای جانبی مشاهده شد. وجود کلوئو در غشای نورون‌های قشر مغز و هیپوکامپ ممکن است توضیحی برای تأثیر آن بر فرآیندهای شناختی باشد. طبق بررسی‌های بعمل آمده گزارش شده است که کلوئو در میکروگلیاها یا آستروسیت‌ها وجود ندارد اما در الیگودندروسیت‌ها بیان می‌شود، که نشان دهنده تأثیر احتمالی کلوئو بر میلینه شدن رشته‌های عصبی می‌باشد (۳، ۲۳). بر اساس داده‌های ایمونوهیستوشیمی مطالعه دکتر لیم و همکاران، جایگاه کلوئو در برخی نقاط دستگاه عصبی مرکزی انسان مشخص شد (۲۴). نورون‌های موجود در قشر مخچه و سلول‌های پورکنژ قرار گرفته مابین لایه مولکولی و گرانولار از جمله

کلوتو عملکرد شناختی را افزایش می‌دهد (۴۲، ۴۳). جالب توجه است که اثرات کلوتو در نواحی مختلف مغز متفاوت بوده، به عنوان مثال، در نورون‌های هیپوکامپ موش احتمالاً بر حافظه فضایی^{۱۶} تأثیر می‌گذارد، در حالی که بیان آن در آمیگدال با یادگیری وابسته به ترس مرتبط می‌باشد (۲۶). در مدل ژنتیکی بیماری آلزایمر در موش کاهش سطح بیان کلوتو به همراه افت اعمال شناختی و ضعف یادگیری و حافظه دیده می‌شود (۴۳). نهایتاً، کلوتو در هیپوکامپ باعث تقویت سیناپسی می‌شود، بطوری که افزایش آنی و سراسری کلوتو منجر به افزایش انعطاف‌پذیری سیناپسی، بهبود شناخت، و افزایش انعطاف‌پذیری سیناپسی می‌گردد (۴۴، ۴۵). مداخلات دارویی یا ژنتیکی که منجر به افزایش بیان کلوتو شود سبب بهبود عملکرد شناختی و حافظه می‌شود. در یک مطالعه تزریق ژن کلوتو از طریق ناقل ویروسی در هیپوکامپ مدل ژنتیکی با ضعف عملکرد سیناپسی، سبب افزایش بیان کلوتو و متعاقباً بهبود عملکرد سیناپسی و پاسخ بهتر در آزمون‌های مربوط به حافظه شد (۱۶). یکی از یافته‌های مهم درباره کلوتو تأثیر آن بر شناخت بدون در نظر گرفتن عامل سن است. تحقیقات نشان می‌دهد موش‌های تراریخته‌ای که در آن‌ها بیان بالای کلوتو صورت می‌گیرد، در تمام سنین مورد آزمایش، از جمله ۳ ماهگی، در آزمون‌های مرتبط با یادگیری و حافظه نسبت به گروه‌های کنترل غیر تراریخته به طور معنی‌داری عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. اما در انسان علی‌رغم افزایش KL-VS سرنی، از زوال شناختی مرتبط با افزایش سن کاسته نمی‌شود. در عوض، واریانت KL-VS باعث بهبود عملکردهای شناختی در طیف وسیعی از دامنه‌های سنی می‌شود، اگرچه این اثرات با افزایش بیشتر سن کاهش یافته است (۴۲). افزون بر این‌ها محققان بر این باورند که اگرچه کلوتو فعالیت‌های پایه شناختی را تنظیم می‌کند، اما با افزایش سن و کاهش سطح ترشح کلوتو، اثرات آن بر عملکردهای شناختی نیز تضعیف می‌شود. بنابراین کلوتو مستقیماً زوال شناختی را کاهش نمی‌دهد، بلکه اثرات تقویت‌کننده آن بر شناخت، مستقل از سن، می‌تواند به طور بالقوه «ذخایر شناختی»^{۱۷} فرد را افزایش دهد و در نتیجه توانایی آن‌ها را برای مقابله با اثرات نامطلوب شناختی ناشی از پیری، حداقل برای مدت معینی افزایش می‌دهد (۴۶).

کلوتو در مطالعات حیوانی

پیری

با افزایش طبیعی سن برخی از قابلیت‌های شناختی انسان از جمله توجه انتخابی، قابلیت انجام آزمون‌های پیچیده و برخی فرم‌های حافظه بلند مدت به‌ویژه یادگیری و فراخوانی اطلاعات جدید دچار اختلال می‌گردد (۴۷). اگرچه پیری بخودی خود بیماری محسوب نمی‌شود، ولی اختلالات شناختی یک ویژگی

مشخص شده است. توالی‌های کلوتو در انسان و موش تا ۹۴ درصد مشابه یکدیگر می‌باشند. کلوتو در انسان به عنوان یک نشانگر زیستی در همبستگی و ارتباط کامل با سلامت و بیماری‌ها قرار دارد (۷، ۱۹، ۳۴).

مغز انسان یک سد قوی ایمنی جهت حفاظت از خود در برابر تهدیدهای احتمالی ناشی از عبور کنترل نشده مواد، باکتری‌ها و ویروس‌ها و غیره دارد. کلوتو از نظر اندازه بسیار بزرگتر از آن است که بتواند به وسیله انتقال غیرفعال از سد خونی مغزی عبور کند. به نظر می‌رسد که علاوه بر فرم ترشخی موجود در مایع مغزی نخاعی، کلوتوی موجود در اندام‌های محیطی نیز از طریق فعال کردن مسیرهای سیگنالینگ که قادر به عبور از سد مغزی هستند، اثرات مختلف خود را بر نواحی متنوعی از دستگاه عصبی اعمال می‌کند. تغییرات سطح بیان و نیز فرم‌های مختلف کلوتو در مغز از عوامل تأثیرگذار بر روی عملکرد و کارایی شناختی فرد هم در حالت سلامت و هم بیماری است. بطوری که افراد دارای یک نسخه از چندتصویری Klotho-VS، قدرت شناختی بیشتری را از خود نشان داده‌اند. با این حال، افراد دارای دو نسخه یا فرم هموزیگوت Klotho-VS از همان سنین پایین ضریب هوشی کمتری از خود نشان می‌دهند. همچنین افزایش طول عمر، سلامت قلبی عروقی و توانایی‌های شناختی بهتر از دیگر مزیت‌های افراد دارای چندتصویری KL-VS می‌باشد (۳۵). همچنین چندتصویری G395A، که در آن گوانین با آدنین جایگزین می‌شود، بر اتصال فاکتور رونویسی پروموتور کلوتو تأثیر می‌گذارد. در بررسی افراد ۷۰ ساله و بالاتر، مشخص شد که افراد دارای چندتصویری G395A در مقایسه با افراد بدون این چندتصویری، اختلال شناختی کمتری از خود نشان دادند. علاوه بر این، افراد دارای چندتصویری G395A نمرات MMSE^{۱۵} بالاتری داشتند که گویای عملکرد شناختی نسبتاً بهتر آن‌ها است (۳۴، ۳۶). علاوه بر این، در بیماری آلزایمر، افراد مسن‌تر سطوح کمتری از کلوتو را در مایع مغزی نخاعی خود نشان دادند و این امر در زنان بارزتر است (۳۷). در تطابق با این مطالعه، یک مطالعه آینده‌نگر نشان داد که افراد با کلوتوی پلاسمايي بالاتر، نمرات ارزیابی شناختی بالاتری را در آزمون شناختی (MMSE) کسب کردند (۳۸). همچنین یک مطالعه کوهورت آینده‌نگر که بر روی بزرگسالان ایتالیایی ۵۵ ساله یا بالاتر صورت گرفت نشان داد که کاهش سطح کلوتو پلاسمايي با احتمال بالاتری منجر به کاهش معنی‌دار نمرات کسب شده در آزمون (MMSE) خواهد شد (۳۹). طبق مطالعات انسانی و حیوانی در صرع لوب گیجگاهی بیان RNA کلوتو در ناحیه هیپوکامپ کاهش نشان می‌دهند (۴۰، ۴۱). مطالعات پیش‌بالینی نیز نشان دهنده این است که کمبود کلوتو بر عملکرد حیوانات در آزمون‌های یادگیری و حافظه تأثیر منفی می‌گذارد، در حالی که بیان بالای

¹⁵ Mini-Mental State Examination

¹⁶ Spatial Memory

¹⁷ Cognitive Reserve

است. علاوه بر این در می‌مون‌های رزوس سالخورده افزایش معنی دار استرس اکسیداتیو و التهاب عصبی در ماده سفید دیده شد که نشان دهنده از بین رفتن اثرات آنتی اکسیدانی و محافظتی کلوتو است (۸).

یکی از راه‌های پیشنهادی جهت اثرگذاری کلوتو بر فرایند پیری، تنظیم مسیر سیگنالینگ Wnt است (تصویر ۳). کلوتو به انواع مختلفی از لیگاندهای Wnt متصل شده و راه‌اندازی آبشارهای سیگنالینگ، در مسیرهای پایین دستی را سرکوب می‌کند. همچنین تحقیقات نشان می‌دهد حذف ژن کلوتو در موش منجر به تقویت مسیرهای سیگنالینگ Wnt می‌شود. فعال شدن مسیر سیگنالینگ Wnt3، چرخه سلولی را با متوقف کردن آن در فاز G2/M طولانی کرده و سایتوکاین‌های فیبروزیک را تنظیم می‌کند. با این حال، درمان با کلوتو این فاز را دورزده و تولید سایتوکاین‌های فیبروزیک را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، یکسری از ترکیبات نو ترکیب کلوتو ساخته شده است که که درونی‌سازی^{۱۹} و سیگنالینگ Wnt5A را در سلول مهار می‌کند. شایان ذکر است حتی کاهش فعالیت مسیر Wnt در موش‌های جهش‌یافته فاقد کلوتو، تأثیری در روند پیری یا کند شدن آن ایجاد نمی‌کند. همچنین تزریق کلوتو به صورت محلول تأثیری بر فنوتیپ‌های مرتبط با پیری زودرس در این موش‌ها ندارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که فرم غشایی کلوتو ممکن است نقش مهم‌تری در فرایند پیری نسبت به کلوتو محلول داشته باشد (۵۱).

FOXO3a یک عامل تنظیم‌کننده افزایشی سوپراکسید دیسموتاز منگنز است و یک آنزیم مهم با اثرات آنتی اکسیدانی در می‌توکندری سلول‌های پستانداران است، این آنزیم به عنوان یک تنظیم‌کننده منفی تولید گونه‌های واکنشی اکسیژن در می‌توکندری عمل می‌کند کلوتو فسفوریلاسیون FOXO3a را افزایش داده و در نتیجه باعث سرکوب استرس اکسیداتیو، ناشی از فعالیت رادیکال‌های اکسیژن می‌شود. مقدار بالای سوپراکسیداز دیسموتاز در موش‌های تراریخته با بیان بالای کلوتو، به تولید کمتر استرس اکسیداتیو منجر می‌شود. بیان بالای کلوتو آپوپتوز ناشی از پراکسید هیدروژن، فعالیت β -گالاکتوزیداز، قطعه قطعه شدن DNA میتوکندری، تولید آنیون سوپراکسید، پراکسیداسیون لیپیدی و بیان پروتئین Bax را کاهش می‌دهد.

یکی از مکانیزم‌های احتمالی اثرات ضد پیری کلوتو از مسیر فاکتور رشد فیبروبلاست ۲۳ واسطه‌گری می‌گردد. هنگامی که FGF23 در حضور کلوتو به گیرنده‌های خود متصل می‌شود، یک آبشار سیگنالینگ را در سلول‌ها آغاز می‌کند که منجر به فعال شدن مسیرهای پایین دستی، از جمله مسیر پروتئین کیناز فعال شده با می‌توزن (MAPK) و مسیر فسفوانیزیتاید ۳-کیناز (PI3K) می‌شود. این مسیرها فرایندهای

مشترک پیری و بیماری‌های تحلیل برنده عصبی است. یکی از نشانگرهای زیستی شاخص نشان دهنده روند پیری طبیعی مغز در می‌مون‌های رزوس، کاهش سطح بیان کلوتو می‌باشد (۴۸). به صورت طبیعی افت سطح کلوتو از حد طبیعی خود در فرایند پیری، با تسریع بالقوه نقص‌های شناختی همراه است. بنابر تحقیقات صورت گرفته یکی از فاکتورهای مؤثر در پیشگیری از اختلالات شناختی در افراد مسن، بیان طبیعی کلوتو می‌باشد (۴۸،۴۹). همچنین تجویز کلوتوی پرونژاد سبب بهبود اختلال حافظه ناشی از افزایش سن در موش‌ها می‌گردد (۲۶). کاهش سطح کلوتو در موش‌ها اثرات قابل توجهی بر طول عمر نشان داده است و موش‌های فاقد کلوتو، سندرمی شبیه پیری انسان نشان می‌دهند (۱۹). حذف ژن کلوتو منجر به مرگ زودرس در بزرگسالی می‌شود، در حالی که بیان بیش از حد باعث افزایش طول عمر تقریباً تا ۳۰ درصد می‌شود. گزارش شده است که کلوتو بعنوان یک عامل "مهارگر پیری"^{۱۸} از طریق تنظیم منفی مسیر سیگنالینگ انسولین و IGF1 سبب بروز این اثرات می‌گردد (۵۰). گمان می‌رود این مکانیزم یک روش حفظ شده در روند تکامل برای کاهش پیری است. به نظر می‌رسد کلوتو به عنوان یک هورمون پدید می‌آید عمل می‌کند که چنین سیگنال دهی را تعدیل می‌کند و در نتیجه بر متابولیسم انسولین و روند پیری تأثیر می‌گذارد (۴۲، ۵۰). در مدل‌های آزمایشگاهی موشی بیان بیش از حد و سراسری کلوتو منجر به افزایش یادگیری و حافظه در آزمون‌های مختلف شناختی، مستقل از سن موش‌ها می‌شود. همچنین سطوح بالای کلوتو باعث افزایش کارایی عملکردهای وابسته به گیرنده‌های NMDA می‌شود، مانند افزایش بیان ژن‌های FOS در ناحیه شکنج دندانه‌ای، که نهایتاً منجر به بهبود یادگیری و حافظه، و همچنین تقویت طولانی‌مدت سیناپسی در این ناحیه می‌شود. لازم به ذکر است که در اجرای این مراحل نقش زیر واحد گیرنده NMDA میانجی‌گری اثرات کلوتو، یعنی GluN2B، حیاتی است تا جایی که مهار این زیر واحد در هیپوکامپ باعث حذف اثرات تقویتی کلوتو بر حافظه و یادگیری می‌شود (۵۱). علاوه بر این بیان افزایشی کلوتو در موش‌های مدل پیری سبب بهبود حافظه و محافظت از نورون‌های دوپامینرژیک در برابر استرس اکسیداتیو می‌شود (تصویر ۲) (۵۲).

همچنین شواهد دیگری اثرات ضد پیری کلوتو را نشان می‌دهد. بررسی‌های ژنتیکی انجام گرفته بر ماده سفید مغز می‌مون‌های رزوس سالخورده، تغییرات بیان ژن کلوتو را همراه با پیری روشن کرد. بیان کلوتو با افزایش سن تقریباً تا ۱.۵ برابر در ماده سفید مغز می‌مون‌ها کاهش داشت. نکته مهم این است که این کاهش به طور ویژه در ماده سفید مغز مشاهده شد که نشان دهنده ارتباط کلوتو با پیری ماده سفید

¹⁸ Aging Suppressor

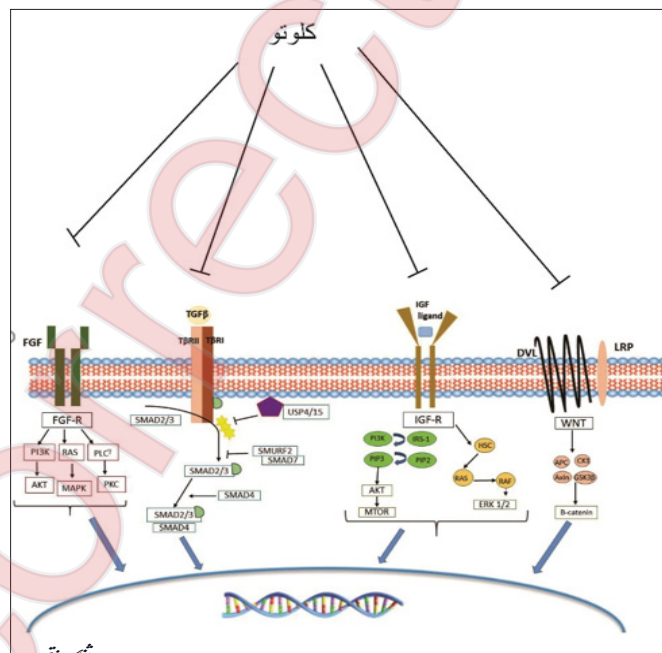
¹⁹ Internalization

پلاک‌های خارج سلولی آمیلوئیدی^{۲۰} و تشکیل کلافه‌های داخل سلولی^{۲۱} پروتئین تائو^{۲۲} می‌باشد. از شکستن پروتئولیتیک پروتئین پیش ساز آمیلوئید یک پپتید ۴۰ تا ۴۲ آمینو اسیدی به نام آمیلوئید بتا تولید می‌شود و در بیماری آلزایمر فعال شدن بیش از طبیعی آنزیم گاما سکریتاز منجر به افزایش تولید نوع نامحلول پروتئین آمیلوئید ۴۲ آمینو اسیدی می‌شود که منجر به تجمع و تشکیل رسوب می‌شود. در یک فرد سالم این پلاک‌ها به صورت طبیعی توسط میکروگلیای مغز از مایع خارج سلولی پاکسازی می‌شود. ولی در یک بیمار مبتلا به آلزایمر آمیلوئیدهای بتا در نتیجه تولید بیش از حد و همچنین اختلال در سیستم پاکسازی، تجمع می‌یابند و در نهایت پلاک‌های الیگومری و رشته‌ای را ایجاد می‌کنند که باعث اختلال و مرگ سلول‌های عصبی می‌شوند (۵۵). محققان گزارش کرده‌اند که بیان افزایش یافته کلتو با افزایش پاکسازی^{۲۳} آمیلوئید بتا عملکرد شناختی موش را در مدل APP/PS1²⁴ آلزایمر بهبود می‌بخشد (۵۶). همانند افراد مبتلا به بیماری آلزایمر (AD)، موش‌های تراریخته hAPP-J20 دارای سطوح بالایی از پپتیدهای آمیلوئید بتا (A β) در مغز هستند. این موش‌ها همچنین مرگ و میر زودرس، نقص‌های شناختی، ناهنجاری‌های رفتاری،

سلولی مختلف و بیان ژن را تنظیم می‌کنند. کلتو در مسیر سیگنالینگ FGF23 نقش مهمی دارد. FGF23 افزایش دفع فسفات در ادرار را تسهیل می‌کند. بنابراین، در موش‌های مبتلا به کمبود کلتو، فسفات در مایع خارج سلولی تجمع می‌کند، غلظت‌های بالای فسفات منجر به تشکیل رسوبات کلسیم فسفات می‌شود. سپس این رسوبات توسط پروتئین سرم Fetuin-A جذب شده و ذرات کلسی پروتئین را تصویر می‌دهند که می‌تواند باعث آسیب سلولی، کلسیفیه شدن و التهاب شود. در نتیجه، کاهش کلتو و افزایش ذرات کلسی پروتئین سبب تشدید پیری می‌شود (۵۳).

آلزایمر

آلزایمر شایع‌ترین فرم دمانس و بیماری تخریب‌کننده سیستم عصبی در سطح جهان است (۵۴). دمانس (زوال عقل) به گروهی از اختلالات مغزی اشاره دارد که همراه با از دست رفتن تدریجی قابلیت تفکر و به خاطر سپردن و بسیاری از کارکردهای شناختی دیگر می‌شود. بیش از ۳۵ میلیون نفر در جهان مبتلا به دمانس هستند و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ این رقم بیش از ۱۰۰ میلیون برسد. تجمع استرس اکسیداتیو عامل آغازگر اختلال شناخت هم در پیری و هم بیماری‌های مذکور می‌باشد (۲۷). بهترین فرضیه برای توضیح آلزایمر نظریه تجمع



تصویر ۳- مهم‌ترین مسیرهای سیگنالینگ دخیل در اثرات فیزیولوژیک کلتو. کلتو همانگونه که در متن به تفصیل توضیح داده شده است از طریق گیرنده‌های فاکتورهای رشد و نیز Wnt سبب راه افتادن آبشاری از تغییرات داخل سلولی و سپس فعال شدن فاکتورهای نسخه برداری می‌گردد. این مسیرها سبب بقاء شده و همچنین آثار حفاظتی کلتو را واسطه‌گری می‌کنند.

²⁰ Extracellular amyloid beta plaque

²¹ Intracellular neurofilibrillary tangle

²² Tau

²³ Clearance

²⁴ Amyloid precursor protein/presenelin 1

است. این مسیر برای عملکرد طبیعی هیپوکامپ در ذخیره و تثبیت خاطرات جدید اساسی است. با بررسی ریخت‌شناسی نورون‌های لایه شفاف این موش‌ها، مشخص شد آکسون‌های این ناحیه از نظر اندازه و تعداد و زیگول‌ها طبیعی هستند، اما تعداد کل سیناپس‌ها در لایه شفاف به‌طور قابل توجهی کاهش دارد. همچنین وجود ناهنجاری‌های ساختاری در هیپوکامپ این موش‌ها قابل مشاهده بود. اگرچه مکانیزم دقیق اثر کلتو در این زمینه ناشناخته است اما به نظر می‌رسد، کلتو برای حفظ ساختار و عملکرد طبیعی هیپوکامپ ضروری است (۵). طبق مطالعه‌ای کلتو به عنوان بخشی از سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی درون‌زا عمل می‌کند و نقش محافظت‌کننده عصبی مهمی در هیپوکامپ بر عهده دارد. آن چه باعث تقویت این نظریه می‌شود آن است که نشانگرهای DNA، اکسیداسیون لیپید و بیان پروتئین پروآپوپتوز Bax در هیپوکامپ موش‌های سرکوب کلتو افزایش می‌یابد در حالی که بیان پروتئین‌های آنتی‌آپوپتوز Bcl-2 و Bcl-X1 کاهش می‌یابد. این یافته‌ها با کاهش ۵۰ درصدی اکسیداسیون DNA در موش‌های با بیان بالای کلتو مطابقت دارد (۴۵). از منظر عملکردی موش‌های با کمبود کلتو نمره حافظه بلندمدت^{۲۱} بدتری نسبت به هم‌نوعان طبیعی (WT) خود کسب کردند. این موش‌ها در تشخیص‌اشیاء جدید، و همچنین آزمون‌های شرطی‌سازی ترس مبتنی بر نشانه‌های صوتی و تصویری عملکرد ضعیف‌تری داشتند، که نشان دهنده اختلال عملکرد هیپوکامپ و آمیگدال است. چنین اختلالات حافظه‌ای در موش‌های با کمبود کلتو توسط درمان با آنتی‌اکسیدان قدرتمندی به نام α -توکوفرول بهبود نشان داده و عملکرد آنتی‌اکسیدانی کلتو را تأیید می‌کند (۴۵).

تحقیق دیگری که روی موش‌های تراریخته APP/PS1 با بیماری آلزایمر صورت گرفت، ناقل‌های ویروسی میزان بیان کلتو را در مایع مغزی نخاعی و بافت مغز افزایش دادند. کارایی این موش‌ها در آزمون‌های شناختی مانند MWM و ماز Y به طرز چشمگیری بهبود پیدا کرد که نشانگر نقش حفاظتی کلتو در برابر اختلالات شناختی ناشی از آلزایمر است. همچنین بیان بالای کلتو تغییرات پاتولوژیکی نظیر تجمع پلاک‌های آمیلوئیدی، آسیب نورونی و سیناپسی و هاپیرفسفریلاسیون پروتئین‌های تائو را بهبود بخشید و از تصویرگیری کلافه‌های نوروفیبریلاری جلوگیری کرد. سمیت حاصل از تجمع پلاک‌های آمیلوئیدی در عروق مغزی به‌شدت عملکرد عروقی مغز و سد خونی مغزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیان بالای کلتو تجمع پلاک‌ها در عروق مغزی را کاهش داده و با افزایش پوشش پری‌سایتی^{۲۲} عروق مغزی و مایع مغزی نخاعی نقش حفاظتی خود را بر سیستم خون‌رسانی مغز اعمال می‌کند (۵۸). از مهم‌ترین مکانیزم‌های سیستم عصبی برای حفظ

اختلال در عملکرد سیناپسی و وجود پلاک‌های آمیلوئید عصبی را از خود بروز می‌دهند. مشخص شد افزایش بیان سطح کلتو در این دسته از موش‌ها به‌طور قابل توجهی مرگ و میر زودرس، نقص‌های شناختی، ناهنجاری‌های رفتاری، اختلالات سیناپسی و اختلال عملکرد شبکه‌های عصبی را کاهش می‌دهد. بر اساس داده‌های بیوشیمیایی و الکتروفیزیولوژیکی به دست آمده، محققان پیشنهاد می‌کنند که تقویت سیناپس‌های گلوتاماتی NMDA زیر واحد GluN2B می‌تواند مکانیزم بالقوه‌ای باشد که از طریق آن کلتو عملکردهای سیناپسی و شناختی را تقویت می‌کند و در عین حال با اثرات مضر ناشی از سطح بالای آمیلوئید بتا مقابله می‌کند. همچنین از طریق مشاهده عملکرد این موش‌ها در تست‌های شناختی حافظه نظیر^{۲۵} MWM،^{۲۶} NOR و آزمون‌های اجتنابی غیرفعال عملکرد بهتری دارند (۴۳).

موش مدل SAMP²⁷ یک مدل حیوانی شبیه ساز پیری می‌باشد که با اختلال یادگیری و حافظه و ویژگی‌های پاتولوژیک مشابه با بیماری آلزایمر مشخص می‌شود. مطالعات اخیر شواهدی را ارائه می‌دهند که نشان دهنده ارتباط مستقیم بین کاهش بیان ژن کلتو با آلزایمر در مدل موش‌های سالخورده SAMP8 است. کاهش معنی‌دار سطح mRNA کلتو در شبکه مشیمیه و کاهش سطح سرمی کلتو در موش‌های ۱۲ ماهه SAMP8 در مقایسه با گروه کنترل مشاهده شد. علاوه بر این، کاهش بیان کلتو با پیری مغز، تغییرات پاتولوژیک شبه آلزایمر و اختلال حافظه در موش‌های سالخورده SAMP8 مرتبط بود. همچنین بتا گالاکتوسیداز^{۲۸}، آمیلوئید بتای ۱-۴۲ و فسفوریلاسیون تائو به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند. اختلالات عصبی رفتاری نیز در آزمون‌های اجتنابی غیرفعال^{۲۹} و ماز Y در این دسته از موش‌ها مشاهده شد. جالب توجه است که تجویز یک داروی گیاهی با نام Ligustilide، با افزایش سطح mRNA کلتو و بیان آن در شبکه مشیمیه بطنی و افزایش سطح سرمی کلتو همراه بود. این نتایج نشان می‌دهد که اثر محافظت‌کننده عصبی این داروی گیاهی در برابر آسیب‌های عصبی دخیل در آلزایمر و کمبود حافظه ناشی از پیری احتمالاً از طریق تنظیم رونویسی ژن کلتو باشد (۵۷).

آزمایش‌های ایمونوهیستو شیمی روی موش‌های تراریخته با سرکوب کلتو مشخص کرد میزان پروتئین‌های سیناپتوفیزین برای اتصال به آنتی‌بادی در هیپوکامپ کاهش می‌یابد (۵). این امر نشان‌دهنده کم شدن تعداد وزیکول‌های سیناپسی است. این تأثیر در لایه شفاف^{۳۰}، یعنی مسیری که در آن انشعابات فیبرهای خزه‌ای با سلول‌های گرانولی موجود در شکنج دندان‌های مغز به همراه سلول‌های هرمی موجود در ناحیه CA3 شبکه‌ای از ارتباطات را تصویر می‌دهد، آشکارتر

²⁵ Morris Water Maze

²⁶ Novel Object Recognition

²⁷ Senescence Accelerated Mouse-Prone 8

²⁸ Senescence-associated beta-galactosidase

²⁹ Passive Avoidance

³⁰ Stratum Lucidum

³¹ Long Term Memory

³² Pericyte

سیاه را به بخش پشتی استریاتوم متصل می‌کند، این مسیر منبع اصلی دوپامین در اجسام قاعده‌ای بوده و در پاتولوژی بیماریار دخیل است. سینوکلئین یک پروتئین غشایی مهم در تنظیم فرآیند آگزوسیتوز است و جهش در آن در مکانیزم مرگ سلولی در بیماری پارکینسون دخیل می‌باشد. در یک تحقیق تجربی کلوتوی برونزاد به موش‌های صحرایی پارکینسونی مدل 6-OHDA تجویز شد. سپس معلوم شد کلوتو آسیب‌های وارده به نورون‌های دوپامینرژیک را به صورت چشمگیری کاهش می‌دهد. در موش‌های صحرایی تیمار شده با کلوتو بهبود در رفتارهای حرکتی دورانی^{۳۸} و تعادل^{۳۹} مشاهده شد. در سطح سلولی، کلوتو از تخریب نورون‌های تیروزین هیدروکسیلاز مثبت بخش متراکم جسم سیاه جلوگیری کرد (۶۴). علاوه بر این، کلوتو به صورت مؤثری تأثیرات مخرب آلفا-سینوکلئین‌ها، صدمات DNA و استرس اکسیداتیو به همراه CREB را بهبود می‌دهد. برخی تحقیقات کاهش تأثیر گذاری کلوتو را در پی تزریق مهارکننده‌های پروتئین کیناز A و Cam- KII گزارش کرده‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد تأثیرات حفاظتی کلوتو بر نورون‌ها در موش‌های صحرایی 6-OHDA وابسته به آبشارهای پروتئین کیناز A، CamKII و CREB باشد (۶۴). افزایش بیان آلفا-سینوکلئین انسانی در موش‌های تراریخته باعث تجمع این پروتئین در نورون‌ها و سیناپس‌ها و بروز علائم اختلالات شناختی و حرکتی مانند پارکینسون در آنها می‌شود. لئون و همکاران نشان دادند فرم محلول کلوتو با اثرات مضر شناختی در این موش‌ها مقابله کرده و عملکرد سیناپس‌ها را بهبود می‌دهد و در نهایت باعث افزایش تاب آوری سیستم عصبی در برابر بیماری پارکینسون می‌شود (۲۳، ۶۵).

مطالعاتی بر روی انواع دیگر بیماری‌های تحلیل برنده عصبی صورت گرفته است. در یکی از این تحقیقات اثرات حفاظت کننده عصبی کلوتو در مدل موش SOD1 که شبیه ساز بیماری اسکروز جانبی آمیوتروفیک^{۴۰} (ALS) هستند بررسی شد. مقادیر بالای کلوتو با به تأخیر انداختن شروع بیماری، کند کردن پیشرفت بیماری، کاهش نقص حرکتی و طولانی کردن طول عمر در این مدل موش، نتایج امیدوارکننده‌ای را نشان داد. این یافته‌ها با مطالعات اخیر در سایر مدل‌های حیوانی شبیه ساز بیماری‌های تحلیل برنده عصبی مطابقت دارد، همچنین نشان می‌دهد کلوتو ممکن است نقش مهمی در بهبود علائم پاتولوژیک بیماری داشته باشد (۶۶). طبق گزارشات موجود از بیماران مبتلا به اسکروز متعدد^{۴۱} (MS) مقدار کلوتوی خون محیطی و مایع مغزی-نخاعی در این بیماران کاهش پیدا می‌کند (۶۷، ۶۸). اگرچه پژوهشی نتیجه مخالف ارائه کرده و افزایش سطح سرمی کلوتو را در بیماران

و پایداری هوموستاز، اتوفازی و حذف پروتئین‌های مربوط به پیری و اندامک‌های آسیب دیده می‌باشد. اختلال در اتوفازی با پیشرفت بیماری آلزایمر ارتباط مستقیم دارد. P62 و LCB-2 از نشانگرهای مهم اتوفازی هستند که سطح آن‌ها به موازات اختلال اتوفازی در بیماری آلزایمر افزایش می‌یابد. افزایش بیان کلوتو سطح P62 را به طور معنی داری کاهش داده و سطح اتوفازوزوم^{۳۲}، اتولیزوزوم‌ها و نسبت LCB2 /LCB1 را افزایش می‌دهد. میکروگلیاها از طریق تقویت سیستم اتوفازی-لیزوزوم در پاکسازی پلاک‌های آمیلوئیدی نقش دارند. گزارشات حاکی از آن است که فرم محلول کلوتو باعث افزایش فاگولیزوزوم و تخریب پلاک‌های آمیلوئیدی تجمع یافته در فضای خارج سلولی توسط میکروگلیاها می‌شود. مسیر سینگالینگ^{۳۴} mTOR یک مسیر کلیدی در تنظیم فعالیت اتوفازی می‌باشد. به نظر می‌رسد کلوتو از طریق مهار مسیر Akt/mTOR و تقویت اتوفازی پاکسازی پلاک‌های آمیلوئیدی را تسهیل می‌کند (۵۸). همچنین $A\beta_{1-40}$ یکی از عوامل اصلی ایجاد آژیوپاتی ناشی از آلزایمر می‌باشد که مقدار آن به طور معنی داری توسط کلوتو کاهش می‌یابد (۵۸، ۵۹).

در تحقیقی بر روی مدل آزمایشگاهی آلزایمر در موش‌های صحرایی، Vildagliptin با کنترل التهاب، آپوپتوز و استرس اکسیداتیو از طریق تنظیم افزایش مسیر Akt و بیان کلوتو گردید. نشانگرهایی مانند Caspase 3, TNF- α , FOXO1 و BAX کاهش نشان دادند (۶۰). در مطالعه دیگری روی مدل موشی القای آلزایمر با کمک استرپتوزوسین، تجویز استاتین سبب بهبود عملکرد شناختی و حافظه شد، همچنین میزان بیان کلوتو در هیپوکامپ و نیز فعالیت سیستم آنتی اکسیدانی در این حیوانات افزایش داشت (۶۱).

پارکینسون و سایر بیماری‌های دستگاه عصبی

پارکینسون یکی دیگر از بیماری‌های تحلیل برنده عصبی پیشرونده شایع در سطح دنیا می‌باشد. این بیماری با اختلالات حرکتی نظیر کندی حرکات^{۳۵}، لرزش حین استراحت، سفتی عضلات و سختی در هماهنگی حرکات مشخص می‌شود. به نظر می‌رسد افزایش استرس اکسیداتیو، کاهش آنتی اکسیدان‌ها و تقویت فرآیندهای التهابی که به واسطه آبشارهای سلولی وابسته پروتئین کیناز A واسطه‌گری می‌شود از عوامل اصلی پیشروی این بیماری می‌باشد. تخریب نورون‌های دوپامینرژیک موجود در قسمت متراکم^{۳۶} جسم سیاه هسته قاعده‌ای شاخص اصلی پاتولوژیک بیماری است. چندین مطالعه سعی در پیدا کردن ارتباط بین کلوتو و بیماری پارکینسون داشته‌اند (۶۲، ۶۳). مسیر مخططی-سیاهی^{۳۷} یک مسیر دوپامینرژیک است که بخش متراکم جسم

³³ Autophagosomes

³⁴ Mammalian target of rapamycin

³⁵ Bradykinesia

³⁶ Pars Compacta

³⁷ Nigrostriatal

³⁸ Rotational behavior

³⁹ Narrow Beam

⁴⁰ Amyotrophic Lateral Sclerosis

⁴¹ Multiple Sclerosis

که افراد دارای ژنوتیپ APOE4/E4 میزان پلاک‌های بتا آمیلوئیدی بیشتری نسبت به افراد هتروزیگوت یا فاقد این آلل هستند. جالب اینکه اثر منفی آپو E4 در افراد هتروزیگوت برای سویه‌ی KL-VS تضعیف یا ناپدید می‌شود. این موضوع نشان دهنده اثر حفاظتی کلوتو در برابر اثرات منفی ناشی از آپو E4 در پیدایش بیماری آلزایمر است (۷۲). تحقیقات تکمیلی بر روی جمعیت‌های انسانی دیگر در مناطق جغرافیایی متفاوت نشان دهنده این است که سویه‌ی KL-VS کلوتو در افرادی که حامل ژن آن هستند، بدون توجه به سن آن‌ها، باعث بهبود شناخت در این افراد می‌شود (۷۳). طبق فرمول کوهن اندازه اثر کلوتو در افراد حامل حدود ۰٫۳۴ است. برای مقایسه اندازه مؤثر مؤثر آلل آپو E4 که قوی‌ترین عامل ژنتیکی مؤثر بر شناخت در پیری است ۰٫۲۷ می‌باشد. این اندازه اثر نشان‌گر تأثیر شگرف این سویه‌ی کلوتو بر جنبه‌های شناختی است (۷۳).

پژوهش‌ها حاکی از اختلال بیان ژن کلوتو در بیماران صرعی می‌باشد (۴۱). در همین راستا، کلوتو از طریق کنترل مسیر Nrf2 سبب بهتر شدن التهاب در مدل صرع لوب گیجگاهی می‌گردد (۷۴). از یک سو، افزایش سطح گلوتامات در شکاف سیناپسی و از سوی دیگر افزایش کلسیم داخل سلولی از عوامل مطرح در پاتوفیزیولوژی صرع است. پروتئین کلوتو با افزایش بیان پروتئین ناقل اسید آمینه‌های تحریکی مانند گلوتامات منجر به باز جذب آن‌ها از شکاف سیناپسی شده و تحریک عصبی را کاهش می‌دهد. بنابراین، افزایش سطح پروتئین کلوتو اثرات مفیدی در بیماران مبتلا به صرع دارد. علاوه بر این، کلوتو از طریق تنظیم هوموستاز کلسیم به وسیله فاکتور رشد فیبروبلاست ۲۳ و کاهش مرگ سلول‌های عصبی در ناحیه هیپوکامپ نقش حفاظتی در بیماران مبتلا به صرع ایفا می‌کند. عوامل محیطی مانند استرس و فشارهای روانی اجتماعی منجر به کاهش کلوتو همراه با افزایش سن می‌شود (۷۵). طبق گزارشات، کلوتو اختلال شناختی را در بیماران مبتلا به صرع به وسیله مهار فروپتوزیز^{۴۲} بهبود می‌بخشد (۴۰).

علاوه بر بیماری‌های تحلیل برنده عصبی پاره‌ای از تحقیقات نیز به نقش کلوتو در اختلالات روان پرداخته‌اند. اسکیزوفرنی به‌عنوان یک اختلال شایع روان ۱ درصد از جمعیت جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این بیماری همراه با افزایش استرس اکسیداتیو و کاهش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند گلوکوتاتیون پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز است. همچنین عدم بلوغ صحیح مدارهای عصبی، سلول‌های پیش‌ساز الیگو ندروسیت و کاهش تشکیل میلین توسط الیگو ندروسیت‌های بالغ و اختلال در عملکرد طبیعی دستگاه عصبی در اسکیزوفرنی دیده

مبتلا به اسکروز متعدد نشان داده است (۶۹). از آنجایی که مشخصه این بیماری از دست رفتن پوشش میلینی آکسون‌ها است، در موش‌های تراریخته‌ای که بیان کلوتو بالایی دارند، در مقایسه با موش‌های کنترل، تعداد و تراکم آکسون‌های تازه میلینه شده، به‌طور قابل توجهی افزایش نشان می‌دهد. طبق این گزارش، کلوتو با فعال کردن مسیره‌های ERK و Akt و تسریع بلوغ سلول‌های پیش‌ساز الیگو ندروسیت منجر به فعال‌سازی پروتئین mTOR می‌شود. در نتیجه فعالیت این پروتئین اتوفازای کاهش یافته و مقدار کلی توده بافتی و رشد سلولی افزایش می‌یابد. این مسیر فعال شده توسط کلوتو در تنظیم بقای سلولی، سازماندهی اسکلت سلولی و مهاجرت سلولی نقش دارد (۷۰).

در مطالعه دیگری موش‌های تراریخته دارای بیان بالای فرم غشایی کلوتو با نوزادان نوع طبیعی مقایسه شدند. میلین‌سازی مجدد در موش‌ها به مدت ۶ هفته با استفاده از یک غذای ترکیبی حاوی کوپریزون، یک شلاته‌کننده^{۴۳} مس با سمیت عصبی و مهارکننده مونوآمین اکسیداز القا شد. علاوه بر این، تزریق روزانه راپاماسین برای مهار تکثیر سلول‌های پیش‌ساز الیگو ندروسیت انجام شد. در هفته هفتم، تجویز راپاماسین و کوپریزون قطع شد و ۳ هفته بعد در هر دو گروه مجدداً میلین‌سازی بررسی شد. مشخص شد موش‌های تراریخته افزایش قابل توجهی در میلین‌سازی مجدد نشان می‌دهند. به‌طور خاص، تعداد و تراکم آکسون‌های میلینه‌شده در موش‌های تراریخته بیشتر از نوع طبیعی بود (۷۱). این نتایج اثر مفید کلوتو را در سرعت بخشیدن به میلین‌سازی مجدد نشان داد. افسردگی عمده به‌عنوان یک اختلال خلق شایع بار اقتصادی-اجتماعی زیادی به جوامع تحمیل می‌کند. علاوه بر این به علت تهدید حیات و ریسک خودکشی در پزشکی مورد توجه ویژه است. حیوانات بدون ژن کلوتو علائمی شبیه افسردگی همراه با کاهش بیان GluN2B نشان دادند. برعکس، بیان افزایشی کلوتو با بهبود علائم افسردگی و تنظیم گیرنده‌های NMDA گلوتاماتی نوع GluN2B همراه بود. در هسته آکومبنس مغز موش‌ها افزایش بیان کلوتو این کاهش بیان GluN2B را معکوس کرد. در حضور مهارکننده زیر واحدهای GluN2B گیرنده گلوتامات، آثار مثبت کلوتو بر حیوانات مستعد افسردگی دیده نشد.

کلوتو در بیماری‌های دستگاه عصبی انسان

نسبت به مطالعات پیش‌بالینی تحقیقات بالینی کمتری در مورد کلوتو در نمونه‌های انسانی وجود دارد. محققان در مطالعه کوهورت انجام گرفته بر روی جمعیت در خطر برای آلزایمر در ایالت ویسکانسین آمریکا نشان دادند

⁴² Chelator

⁴³ Ferroptosis

در مطالعه برون تنی دیگری که روی نورون‌های مشتق از هیپوکامپ موش نژاد اسپراگو-داولی و رده سلولی موشی HT22 انجام شد، درمان قبلی با کلوتوی نوترکیب سلول‌ها را از مرگ و سمیت عصبی ناشی از گلوتامات و آمیلوئید بتا حفاظت کرد. همچنین نورون‌های کشت شده هیپوکامپ موش‌های با بیان افزایشی کلوتو مقاومت بیشتری در برابر این نوع آسیب‌ها داشتند. کلوتو سبب تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی از طریق افزایش بیان تیوردوکسین/پراکسی ردوکسین (Trx/Prx) و به‌ویژه باعث القای بیان Prx-2 شد. کلوتو با فعال‌سازی مسیر PI3K/Akt و سپس فسفریله و فعال کردن فاکتور نسخه برداری FoxO3a⁴⁷ سبب بیان Prx-2 و حفاظت سلولی می‌شود (۷۹). همچنین در مطالعه‌ای که با استفاده از تکنولوژی CRISPR⁴⁸ ژن‌های کلوتو را به‌منظور بررسی نقش آن بر توانایی‌های شناختی فعال کردند مشخص شد که این فناوری به صورت درون‌زاد، بیان کلوتو در رده سلول‌ها عصبی برون تنی S5Y5 را افزایش می‌دهد. از آن جایی که تزریق این دست پروتئین‌ها به صورت محیطی با متصویر سد خونی مغزی روبرو می‌باشند، استفاده از این فناوری می‌تواند با افزایش تولید کلوتو به صورت طبیعی یک پروتکل درمانی جدید برای کاهش علائم مرتبط با برخی بیماری‌های دستگاه عصبی و اختلالات دمی‌لینه‌کننده باشد (۸۰).

نتیجه‌گیری

از آنچه گفته شد می‌توان نتیجه گرفت که کلوتو بعنوان یک پروتئین پرتون طیف وسیعی از اعمال بیولوژیک و فیزیولوژیک را تحت تأثیر قرار داده (تصویر ۴) و سبب کند شدن روند پیری و حتی جوانسازی سلولی می‌شود. چنین ویژگی در بیماری‌های مربوط به دستگاه عصبی مرکزی به‌ویژه مغز و نخاع بسیار اهمیت پیدا می‌کند. این پروتئین در مدل‌های پیش بالینی بیماری‌های تحلیل برنده عصبی از جمله درون و برون تنی اثرات حفاظتی قابل توجهی نشان داده و از طریق مسیرهای سیگنالینگ وابسته به انسولین و فاکتورهای رشد سبب تنظیم متابولیسم می‌شود. همچنین کلوتو مسیر Wnt، مسیر التهاب و نیز تجهیزات آنتی‌اکسیدانی سلول را به نفع کند شدن روند آسیب و پیری تلفیق می‌کند. اثرات حفاظتی کلوتو در مطالعات آلزایمر نشان دهنده اثر مطلوب آن در بازیابی عملکرد شناختی و بهبود حافظه است. با بکارگیری دانش ناشی از تحقیقات پایه‌امید است به زودی درمان‌های مبتنی بر کلوتو راه را به بالین بیماران بیابند.

می‌شود. همانطور که بالاتر بحث شد، ثابت شده است که کلوتو از طریق کاهش رادیکال‌های آزاد اکسیژن سطح استرس اکسیداتیو را کاهش می‌دهد. به‌علاوه، افزایش سطح پروتئین کلوتو باعث تسریع تولید الیگودندروسیت‌ها از سلول‌های پیش ساز آن می‌شود. این افزایش، تشکیل میلین را تسهیل می‌کند و منجر به بهبود کارایی سیستم عصبی می‌شود. کاهش استرس اکسیداتیو و افزایش بلوغ الیگودندروسیت‌ها احتمالاً از اثرات مفید کلوتو در اسکیزوفرنی است (۷۰). علاوه بر این، همراهی سویی‌وی و ویژه از کلوتو با استرس‌های روانی در افرادی که از استرس پس از سانحه (PTSD)⁴⁴ و مشکلات خواب رنج می‌برند، مشاهده شده است. به بیان دیگر استرس روانی با آلل کمتر شایع KL و پیری سلولی همراه است (۷۶). سطح کلوتو به میزان استرسی روانی که فرد تجربه می‌کند حساس است.

همانطور که در بالا اشاره شد، افسردگی عمده به‌عنوان یک اختلال خلق شایع بار اقتصادی-اجتماعی زیادی به جوامع تحمیل می‌کند. علیرغم درمان‌های دارویی در دسترس دو سوم بیماران معمولاً دچار عود بیماری می‌شوند. این بیماران دچار افسردگی مزمن غالباً اختلال شناختی را نیز تجربه می‌کنند. کلوتو همچنین سبب کاهش استرس اکسیداتیو و التهاب در قشر پیش پیشانی بیماران افسرده شد، بطور کلی، کلوتو مسیرهای پیام رسانی دخیل در پیدایش افسردگی مانند استرس اکسیداتیو، التهاب و انتقال سیناپسی گلوتاماتی را تنظیم می‌کند (۷۴).

کلوتو در مطالعات برون تنی⁴⁵

در مدل برون تنی آلزایمر نیز کلوتو اثرات مفیدی را در مقابله با مرگ ناشی از سمیت با آمیلوئید بتا نشان داد. در رده سلولی SH-SY5Y کلوتو این اثر را از طریق کاهش استرس اکسیداتیو و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی انجام می‌دهد (۷۷). اهمیت عملکرد آنتی‌اکسیدانی کلوتو و نقش محافظت کننده عصبی آن با استفاده از آزمایش بر رده سلولی مشتق شده از هیپوکامپ (HT22) و کشت اولیه نورون‌های هیپوکامپ نیز تأیید شده است. افزودن اس-کلوتو به این سلول‌ها به طور قابل توجهی بیان تیوردوکسین/پراکسی ردوکسین (Trx/Prx) و اکسایش⁴⁶ سلولی را افزایش داد. و از این طریق در نهایت بسیاری از فرآیندهای زیستی سلول مانند تولید انرژی، جذب و انتقال اکسیژن، مقابله با استرس اکسیداتیو و فعالیت آنزیم‌ها و مولکول‌های نشانه پرداز بهبود پیدا کرد (۷۸).

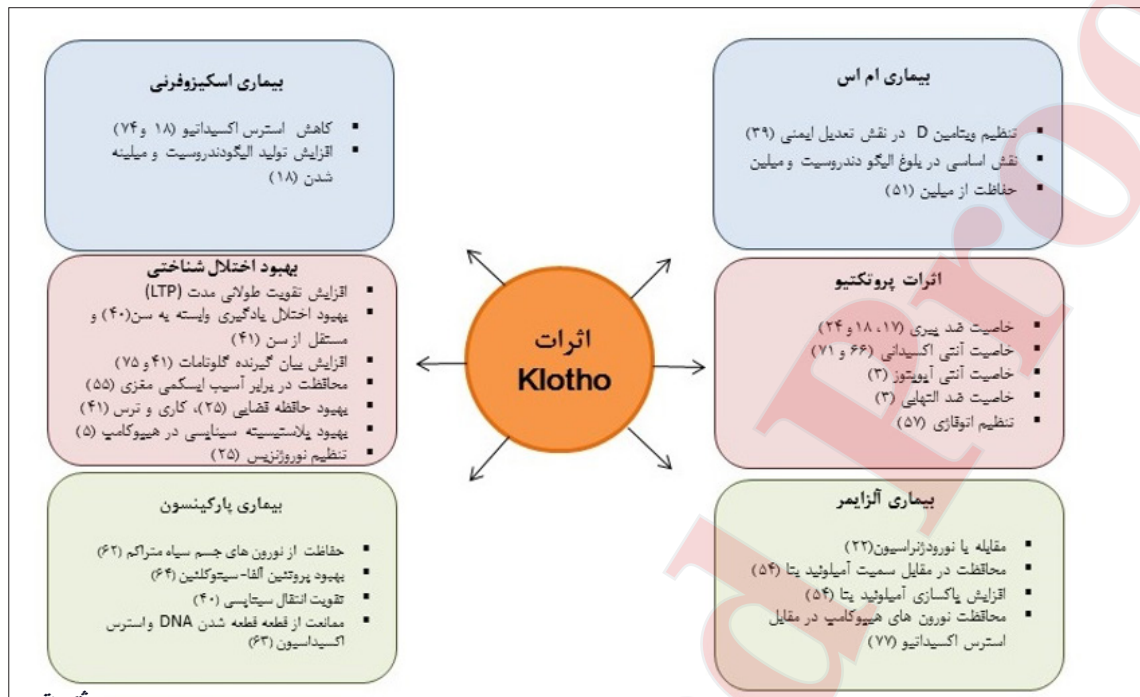
⁴⁴ Post-Traumatic Stress Disorder

⁴⁵ In vitro

⁴⁶ Redox system

⁴⁷ Factor forkhead box O3a

⁴⁸ Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats



تصویر ۴- اثرات بیولوژیک و بهبود دهنده شناخت کلوتو در پیری و بیماری ها. فرم کامل کلوتو دارای اثرات چشمگیری در بدن بخصوص در بهبود کارکرد شناختی است. بیان بالای کلوتو به روش های آزمایشگاهی سبب بهبود علائم هم شناختی و غیر شناختی در بیماران افسرده، پارکینسونی و مخصوصاً آلزایمری می شود. کلوتو این اثرات را از طریق تقویت سیناپس، افزایش بیان گیرنده های گلوتاماتی، کاهش استرس اکسیداتیو و التهاب، تنظیم اتوفازی و غیره، انجام می دهد.

منابع

- Shabani Z, Mohammad Nejad D, Ghadiri T, Karimipour M. Evaluation of the neuroprotective effects of Vitamin E on the rat substantia nigra neural cells exposed to electromagnetic field: An ultrastructural study. *Electromagn Biol Med.* 2021;40:428-37.
- Kuro-o M. Klotho and calciprotein particles as therapeutic targets against accelerated ageing. *Clinical Science.* 2021;135:1915-27.
- Abraham C, Mullen P, Tucker-Zhou T, Chen C, Zeldich E. Klotho is a neuroprotective and cognition-enhancing protein. *Vitamins & hormones.* 2016;101:215-38.
- Xu X, Liang X, Hu G, Zhang J, Lei H. Renal function and klotho gene polymorphisms among Uyghur and Kazak populations in Xinjiang, China. *Med Sci Monit.* 2015;21:44-51.
- Li Q, Vo HT, Wang J, Fox-Quick S, Dobrunz LE, King GD. Klotho regulates CA1 hippocampal synaptic plasticity. *Neuroscience.* 2017;347:123-33.
- Cararo-Lopes MM, Mazucanti CHY, Scavone C, Kawamoto EM, Berwick DC. The relevance of α -KLOTHO to the central nervous system: some key questions. *Ageing research reviews.* 2017;36:137-48.
- Abraham CR, Li A. Aging-suppressor Klotho: Prospects in diagnostics and therapeutics. *Ageing Research Reviews.* 2022:101766.
- Xu Y, Sun Z. Molecular basis of Klotho: from gene to function in aging. *Endocrine reviews.* 2015;36:91-174.
- Ananya FN, Ahammed MR, Lahori S, Parikh C, Lawrence JA, Sulachni F, et al. Neuroprotective Role of Klotho on Dementia. *Cureus.* 2023;15(6).
- Kim HK, Jeong BH. Lack of functional KLVS polymorphism of the KLOTHO gene in the Korean population. *Genet Mol Biol.* 2016;39:370-3.
- Luo L, Hao Q, Dong B, Yang M. The Klotho gene G-395A polymorphism and metabolic syndrome in very elderly people. *BMC Geriatr.* 2016;16:46.
- Marchelek-Mysliwiec M, Rozanski J, Ogrodowczyk A, Dutkiewicz G, Dolegowska B, Salata D, et al. The association of the Klotho polymorphism rs9536314 with parameters of calcium-phosphate metabolism in patients on long-term hemodialysis. *Ren Fail.* 2016;38:776-80.
- Ozdem S, Yilmaz VT, Ozdem SS, Donmez L, Cetinkaya R, Suleymanlar G, et al. Is Klotho F352V Polymorphism the Missing Piece of the Bone Loss Puzzle in Renal Transplant Recipients? *Pharmacology.* 2015;95:271-8.
- Telci D, Dogan AU, Ozbek E, Polat EC, Simsek A, Cakir SS, et al. KLOTHO gene polymorphism of GA is associated with kidney stones. *Am J Nephrol.* 2011;33:337-43.
- Yilmaz VT, Ozdem S, Donmez L, Cetinkaya R, Suleymanlar G, Ersoy FF. FGF-23, alpha-Klotho Gene Polymorphism and Their Relationship with the Markers of Bone Metabolism in Chronic Peritoneal

- Dialysis Patients. *Eurasian J Med.* 2015;47:115-25.
16. Li D, Jing D, Liu Z, Chen Y, Huang F, Behnisch T. Enhanced Expression of Secreted alpha-Klotho in the Hippocampus Alters Nesting Behavior and Memory Formation in Mice. *Front Cell Neurosci.* 2019;13:133.
 17. Kim J-H, Hwang K-H, Park K-S, Kong ID, Cha S-K. Biological role of anti-aging protein Klotho. *Journal of lifestyle medicine.* 2015;5:1.
 18. Birdi A, Tomo S, Yadav D, Sharma P, Nebhinani N, Mitra P, et al. Role of Klotho Protein in Neuropsychiatric Disorders: A Narrative Review. *Indian Journal of Clinical Biochemistry.* 2023;38:13-21.
 19. Ananya FN, Ahammed MR, Lahori S, Parikh C, Lawrence JA, Sulachni F, et al. Neuroprotective Role of Klotho on Dementia. *Cureus.* 2023;15:e40043.
 20. Vo HT, Laszczyk AM, King GD. Klotho, the key to healthy brain aging? *Brain Plasticity.* 2018;3:183-94.
 21. Liu H, Fergusson MM, Castilho RM, Liu J, Cao L, Chen J, et al. Augmented Wnt signaling in a mammalian model of accelerated aging. *Science.* 2007;803.
 22. Bergwitz C, Jüppner H. Regulation of phosphate homeostasis by PTH, vitamin D, and FGF23. *Annual review of medicine.* 2010;61:91-104.
 23. Leon J, Moreno AJ, Garay BI, Chalkley RJ, Burlingame AL, Wang D, et al. Peripheral elevation of a klotho fragment enhances brain function and resilience in young, aging, and α -synuclein transgenic mice. *Cell reports.* 2017;20:1360-71.
 24. Lim K, Groen A, Molostvov G, Lu T, Lilley KS, Snead D, et al. α -Klotho expression in human tissues. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism.* 2015;100:1308-18.
 25. Duce JA, Podvin S, Hollander W, Kipling D, Rosene DL, Abraham CR. Gene profile analysis implicates Klotho as an important contributor to aging changes in brain white matter of the rhesus monkey. *Glia.* 2008;56:106-17.
 26. Laszczyk AM, Fox-Quick S, Vo HT, Nettles D, Pugh PC, Overstreet-Wadiche L, et al. Klotho regulates postnatal neurogenesis and protects against age-related spatial memory loss. *Neurobiology of aging.* 2017;59:41-54.
 27. Bahlakeh G, Gorji A, Soltani H, Ghadiri T. MicroRNA alterations in neuropathologic cognitive disorders with an emphasis on dementia: Lessons from animal models. *J Cell Physiol.* 2021;236:806-23.
 28. Nassireslami E, Nikbin P, Payandemehr B, Amini E, Mohammadi M, Vakilzadeh G, et al. A cAMP analog reverses contextual and tone memory deficits induced by a PKA inhibitor in Pavlovian fear conditioning. *Pharmacol Biochem Behav.* 2013;105:177-82.
 29. Soltani Zangbar H, Ghadiri T, Seyedi Vafae M, Ebrahimi Kalan A, Fallahi S, Ghorbani M, et al. Theta Oscillations Through Hippocampal/Prefrontal Pathway: Importance in Cognitive Performances. *Brain Connect.* 2020;10:157-69.
 30. Shafqat A, Khan S, Omer MH, Niaz M, Albalkhi I, AlKattan K, et al. Cellular senescence in brain aging and cognitive decline. *Front Aging Neurosci.* 2023;15:1281581.
 31. Chen LK. Editorial: Aging, Body Composition, and Cognitive Decline: Shared and Unique Characteristics. *J Nutr Health Aging.* 2023;27:929-31.
 32. Prigatano GP, Russell S, Meites TM. Studying lack of awareness of cognitive decline in neurodegenerative diseases requires measures of both anosognosia and denial. *Front Aging Neurosci.* 2023;15:1325231.
 33. Kanbay M, Copur S, Ozbek L, Mutlu A, Cejka D, Ciceri P, et al. Klotho: a potential therapeutic target in aging and neurodegeneration beyond chronic kidney disease-a comprehensive review from the ERA CKD-MBD working group. *Clin Kidney J.* 2024;17:sfad276.
 34. Abulizi P, Zhou XH, Keyimu K, Luo M, Jin FQ. Correlation between KLOTHO gene and mild cognitive impairment in the Uygur and Han populations of Xinjiang. *Oncotarget.* 2017;8:75174-85.
 35. De Vries CF, Staff RT, Noble KG, Muetzel RL, Vernooij MW, White T, et al. Klotho gene polymorphism, brain structure and cognition in early-life development. *Brain Imaging Behav.* 2020;14:213-25.
 36. Xiang T, Luo X, Zeng C, Li S, Ma M, Wu Y. Klotho ameliorated cognitive deficits in a temporal lobe epilepsy rat model by inhibiting ferroptosis. *Brain Research.* 2021;1772:147668.
 37. Kundu P, Zimmerman B, Quinn JF, Kaye J, Mattek N, Westaway SK, et al. Serum Levels of alpha-Klotho Are Correlated with Cerebrospinal Fluid Levels and Predict Measures of Cognitive Function. *J Alzheimers Dis.* 2022;86(3):1471-81.
 38. Shardell M, Semba RD, Rosano C, Kalyani RR, Bandinelli S, Chia CW, et al. Plasma Klotho and Cognitive Decline in Older Adults: Findings From the InCHIANTI Study. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2016;71:677-82.
 39. Scazzone C, Agnello L, Sasso BL, Ragonese P, Bivona G, Realmuto S, et al. Klotho and vitamin D in multiple sclerosis: an Italian study. *Arch Med Sci.* 2020;16:842-7.
 40. Xiang T, Luo X, Zeng C, Li S, Ma M, Wu

- Y. Klotho ameliorated cognitive deficits in a temporal lobe epilepsy rat model by inhibiting ferroptosis. *Brain Res.* 2021;1772:147668.
41. Teocchi MA, Ferreira AE, da Luz de Oliveira EP, Tedeschi H, D'Souza-Li L. Hippocampal gene expression dysregulation of Klotho, nuclear factor kappa B and tumor necrosis factor in temporal lobe epilepsy patients. *J Neuroinflammation.* 2013;10:53.
42. Gupta S, Moreno AJ, Wang D, Leon J, Chen C, Hahn O, et al. KL1 domain of longevity factor klotho mimics the metabolome of cognitive stimulation and enhances cognition in young and aging mice. *Journal of Neuroscience.* 2022;42:40:16-25.
43. Dubal DB, Zhu L, Sanchez PE, Worden K, Broestl L, Johnson E, et al. Life extension factor klotho prevents mortality and enhances cognition in hAPP transgenic mice. *Journal of Neuroscience.* 2015;35:2358-71.
44. Dias GP, Murphy T, Stangl D, Ahmet S, Morisse B, Nix A, et al. Intermittent fasting enhances long-term memory consolidation, adult hippocampal neurogenesis, and expression of longevity gene Klotho. *Molecular psychiatry.* 2021;26:6365-79.
45. Nagai T, Yamada K, Kim HC, Kim YS, Noda Y, Imura A, et al. Cognition impairment in the genetic model of aging klotho gene mutant mice: a role of oxidative stress. *The FASEB Journal.* 2003;17(1):50-2.
46. Linghui D, Simin Y, Zilong Z, Yuxiao L, Shi Q, Birong D. The relationship between serum klotho and cognitive performance in a nationally representative sample of US adults. *Frontiers in Aging Neuroscience.* 2023;15:1053390.
47. Murman DL. The Impact of Age on Cognition. *Semin Hear.* 2015;36:111-21.
48. Castner SA, Gupta S, Wang D, Moreno AJ, Park C, Chen C, et al. Longevity factor klotho enhances cognition in aged nonhuman primates. *Nat Aging.* 2023;3:931-7.
49. Sanz B, Arrieta H, Rezola-Pardo C, Fernandez-Atutxa A, Garin-Balardi J, Arizaga N, et al. Low serum klotho concentration is associated with worse cognition, psychological components of frailty, dependence, and falls in nursing home residents. *Sci Rep.* 2021;11:9098.
50. Kurosu H, Yamamoto M, Clark JD, Pastor JV, Nandi A, Gurnani P, et al. Suppression of aging in mice by the hormone Klotho. *Science.* 2005;309:1829-33.
51. Chen C-D, Li Y, Chen AK, Rudy MA, Nasse JS, Zeldich E, et al. Identification of the cleavage sites leading to the shed forms of human and mouse anti-aging and cognition-enhancing protein Klotho. *PLoS One.* 2020:e0226382.
52. Zhou HJ, Zeng CY, Yang TT, Long FY, Kuang X, Du JR. Lentivirus-mediated klotho up-regulation improves aging-related memory deficits and oxidative stress in senescence-accelerated mouse prone-8 mice. *Life Sci.* 2018;200:56-62.
53. Chen C-D, Sloane JA, Li H, Aytan N, Giannaris EL, Zeldich E, et al. The antiaging protein Klotho enhances oligodendrocyte maturation and myelination of the CNS. *Journal of Neuroscience.* 2013;33(5):1927-39.
54. Ruis J. [Alzheimer type dementia]. *Rev Infirm.* 2008.
55. Abubakar MB, Sanusi KO, Ugusman A, Mohamed W, Kamal H, Ibrahim NH, et al. Alzheimer's Disease: An Update and Insights Into Pathophysiology. *Front Aging Neurosci.* 2022;14:742408.
56. Zhao Y, Zeng CY, Li XH, Yang TT, Kuang X, Du JR. Klotho overexpression improves amyloid-beta clearance and cognition in the APP/PS1 mouse model of Alzheimer's disease. *Aging Cell.* 2020;19:e13239.
57. Long F-Y, Shi M-Q, Zhou H-J, Liu D-L, Sang N, Du J-R. Klotho upregulation contributes to the neuroprotection of ligustilide against cerebral ischemic injury in mice. *European Journal of Pharmacology.* 2018;820:198-205.
58. Zeng C-Y, Yang T-T, Zhou H-J, Zhao Y, Kuang X, Duan W, et al. Lentiviral vector-mediated overexpression of Klotho in the brain improves Alzheimer's disease-like pathology and cognitive deficits in mice. *Neurobiology of aging.* 2019;78:18-28.
59. Li C, Siragy HM. (Pro) renin receptor regulates autophagy and apoptosis in podocytes exposed to high glucose. *American Journal Of Physiology-Endocrinology And Metabolism.* 2015;309:E302-E10.
60. Yossef RR, Al-Yamany MF, Saad MA, El-Sahar AE. Neuroprotective effects of vildagliptin on drug induced Alzheimer's disease in rats with metabolic syndrome: Role of hippocampal klotho and AKT signaling pathways. *Eur J Pharmacol.* 2020;889:173612.
61. Adeli S, Zahmatkesh M, Tavoosidana G, Karimian M, Hassanzadeh G. Simvastatin enhances the hippocampal klotho in a rat model of streptozotocin-induced cognitive decline. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry.* 2017;87:72-94.
62. Kakar RS, Pastor JV, Moe OW, Ambrosio F, Castaldi D, Sanders LH. Peripheral Klotho and Parkinson's Disease. *Mov Disord.* 2021;36:1274-6.
63. Sancesario GM, Di Lazzaro G, Grillo P, Biticchi B, Giannella E, Alwardat M, et al. Biofluids profile of alpha-Klotho in patients with Parkinson's disease. *Parkinsonism Relat Disord.* 2021;90:62-4.

64. Baluchnejadmojarad T, Eftekhari SM, Jamali-Raeufy N, Haghani S, Zeinali H, Roghani M. The anti-aging protein klotho alleviates injury of nigrostriatal dopaminergic pathway in 6-hydroxydopamine rat model of Parkinson's disease: Involvement of PKA/CaMKII/CREB signaling. *Exp Gerontol.* 2017;100:70-6.
65. Pathare GV, Shalia KK. Klotho: an emerging factor in neurodegenerative diseases. *Biomedical Research Journal.* 2019;6:1.
66. Zeldich E, Chen C-D, Boden E, Howat B, Nasse JS, Zeldich D, et al. Klotho is neuroprotective in the Superoxide Dismutase (SOD1 G93A) mouse model of ALS. *Journal of Molecular Neuroscience.* 2019;69:264-85.
67. Karami M, Mehrabi F, Allameh A, Pahlevan Kakhki M, Amiri M, Emami Aleagha MS. Klotho gene expression decreases in peripheral blood mononuclear cells (PBMCs) of patients with relapsing-remitting multiple sclerosis. *J Neurol Sci.* 2017;381:305-7.
68. Emami Aleagha MS, Siroos B, Ahmadi M, Balood M, Palangi A, Haghighi AN, et al. Decreased concentration of Klotho in the cerebrospinal fluid of patients with relapsing-remitting multiple sclerosis. *J Neuroimmunol.* 2015;281:5-8.
69. Ahmadi M, Emami Aleagha MS, Harirchian MH, Yarani R, Tavakoli F, Siroos B. Multiple sclerosis influences on the augmentation of serum Klotho concentration. *J Neurol Sci.* 2016;362:69-72.
70. Yamate-Morgan H, Lauderdale K, Horeczko J, Merchant U, Tiwari-Woodruff SK. Functional Effects of Cuprizone-Induced Demyelination in the Presence of the mTOR-Inhibitor Rapamycin. *Neuroscience.* 2019;406:667-83.
71. Zeldich E, Chen C-D, Colvin TA, Bove-Fenderson EA, Liang J, Zhou TBT, et al. The neuroprotective effect of Klotho is mediated via regulation of members of the redox system. *Journal of Biological Chemistry.* 2014;289:24700-15.
72. Erickson CM, Schultz SA, Oh JM, Darst BF, Ma Y, Norton D, et al. KLOTHO heterozygosity attenuates APOE4-related amyloid burden in preclinical AD. *Neurology.* 2019;92:e1878-e89.
73. Neitzel J, Franzmeier N, Rubinski A, Dichgans M, Brendel M, Alzheimer's Disease Neuroimaging I, et al. KL-VS heterozygosity is associated with lower amyloid-dependent tau accumulation and memory impairment in Alzheimer's disease. *Nat Commun.* 2021;12:382.
74. Xiang T, Luo X, Ye L, Huang H, Wu Y. Klotho alleviates NLRP3 inflammasome-mediated neuroinflammation in a temporal lobe epilepsy rat model by activating the Nrf2 signaling pathway. *Epilepsy Behav.* 2022;128:108509.
75. Torbus-Paluszczak M, Bartman W, Adamczyk-Sowa M. Klotho protein in neurodegenerative disorders. *Neurological Sciences.* 2018;39:1677-82.
76. Wolf EJ, Morrison FG, Sullivan DR, Logue MW, Guetta RE, Stone A, et al. The goddess who spins the thread of life: Klotho, psychiatric stress, and accelerated aging. *Brain Behav Immun.* 2019;80:193-203.
77. Sedighi M, Baluchnejadmojarad T, Afshin-Majd S, Amiri M, Aminzade M, Roghani M. Anti-aging Klotho Protects SH-SY5Y Cells Against Amyloid beta1-42 Neurotoxicity: Involvement of Wnt1/pCREB/Nrf2/HO-1 Signaling. *J Mol Neurosci.* 2021;71:19-27.
78. Cheng M-F, Chen L-J, Niu H-S, Yang T-T, Lin K-C, Cheng J-T. Signals mediating Klotho-induced neuroprotection in hippocampal neuronal cells. *Acta Neurobiol Exp (Wars).* 2015;75:60-71.
79. Zeldich E, Chen CD, Colvin TA, Bove-Fenderson EA, Liang J, Tucker Zhou TB, et al. The neuroprotective effect of Klotho is mediated via regulation of members of the redox system. *J Biol Chem.* 2014;289:24700-15.
80. Chen C-D, Zeldich E, Li Y, Yuste A, Abraham CR. Activation of the anti-aging and cognition-enhancing gene klotho by CRISPR-dCas9 transcriptional effector complex. *Journal of Molecular Neuroscience.* 2018;64:175-84.