

The Role of Microglia in the Pathophysiology of Post-Traumatic Stress Disorder

Amir Mohamad Behzad Basirat¹, Faezeh Yaghoubi², Nafiseh Hadei³, Fatemeh Davoodi-Dehaghani⁴, Zahra Behzad Basirat^{2*}, Batool Mousavi⁵

¹Janbazan Medical and Engineering Research Center (JMERC), Tehran, Iran

²Shefa Neuroscience Research Center, Khatam Alanbia Hospital, Tehran, Iran

³Department of Clinical Psychology, Faculty of Humanities, Shahed University, Tehran, Iran

⁴Department of Biology, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

⁵Prevention Department, Janbazan Medical and Engineering Research Center (JMERC), Tehran, Iran

Article Info:

Received: 20 Dec 2024

Revised: 3 May 2025

Accepted: 23 July 2025

ABSTRACT

Introduction: The role of immune activation in psychiatric disorders has attracted considerable attention in the past two decades and has become the beginning of a new era for the treatment of psychiatric diseases. Neuroinflammation has been recognized as a key mechanism in the onset and progression of various neurodegenerative diseases, including Alzheimer's disease, Parkinson's disease, and multiple sclerosis. In addition, chronic inflammation caused by immune cells, especially microglia, plays a significant role in many psychiatric diseases such as autism, chronic stress, anxiety disorders, and posttraumatic stress disorder (PTSD). Epidemiological studies have demonstrated that PTSD is significantly associated with an increased risk of diseases characterized by immune dysregulation and chronic neuroinflammation, often induced by microglial activation and excessive production of inflammatory cytokines. In this regard, several studies have reported that individuals with PTSD exhibit elevated levels of proinflammatory markers, such as interleukin-1 beta, interleukin-6, tumor necrosis factor-alpha, and C-reactive protein compared to healthy subjects. Neuroinflammation is not only associated with PTSD, but may also play an important role in its pathogenesis and pathophysiology. Microglia, as innate immune cells in the brain, play an important role in maintaining the homeostasis of the central nervous system. However, excessive activation of neurotoxic microglia leads to neuroinflammation, resulting in damage to healthy brain tissue. Consequently, understanding microglial function provides a promising avenue for the treatment of psychiatric disorders, such as PTSD.

Conclusion: This review article describes the role of microglial pathophysiology in the development and progression of PTSD, with a focus on neuroinflammatory mechanisms.

Keywords:

1. Neuroinflammatory Diseases
2. Central Nervous System
3. Mental Disorders
4. Cytokines

*Corresponding Author: Zahra Behzad Basirat

Email: Behzad.zb77@gmail.com

نقش میکروگلیا در پاتوفیزیولوژی اختلال استرس پس از سانحه

امیر محمد بهزاد بصیرت^۱، فائزه یعقوبی^۲، نفیسه هادئی^۳، فاطمه داویدی دهاقانی^۴، زهرا بهزاد بصیرت^{۵*}، بتول موسوی^۶

^۱ مرکز تحقیقات مهندسی و علوم پزشکی جانبازان، تهران، ایران
^۲ مرکز تحقیقات علوم اعصاب شفا، بیمارستان خاتم الانبیاء، تهران، ایران
^۳ گروه روانشناسی بالینی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
^۴ گروه زیست‌شناسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^۵ گروه پیشگیری، مرکز تحقیقات مهندسی و علوم پزشکی جانبازان، تهران، ایران

اطلاعات مقاله:

پذیرش: ۱۴۰۴ مداد

اصلاحیه: ۱۴۰۴ اردیبهشت

دریافت: ۱۴۰۳ آذر

چکیده

مقدمه: نقش فعال‌سازی سیستم ایمنی در اختلالات روانپزشکی در دو دهه گذشته توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است و به آغاز دوره جدیدی برای درمان بیماری‌های روانپزشکی تبدیل شده است. التهاب عصبی به عنوان یک مکانیسم کلیدی در شروع و پیشرفت بیماری‌های مختلف تخریب‌کننده عصبی، از جمله بیماری آزاریم، بیماری پارکینسون و مولتیپل اسکلروزیس، شناخته شده است. علاوه بر این، التهاب مزمن ناشی از سلول‌های ایمنی، به ویژه میکروگلیا، نقش مهمی در بسیاری از بیماری‌های روانپزشکی مانند اوتیسم، استرس مزمن، اختلالات اضطرابی و اختلال استرس پس از سانحه (PTSD) ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

- ۱- بیماری‌های التهاب عصبی
- ۲- سیستم عصبی مرکزی
- ۳- اختلالات روانی
- ۴- سیتوکین‌ها

مطالعات اپیدمیولوژیک نشان داده‌اند که PTSD به طور قابل توجهی با افزایش خطر ابتلاء به بیماری‌هایی که با اختلال تنظیم ایمنی و التهاب عصبی مزمن مشخص می‌شوند، مرتبط است، که اغلب توسط فعال‌سازی میکروگلیا و تولید بیش از حد سیتوکین‌های التهابی القا می‌شوند. در این راستا، چندین مطالعه گزارش داده‌اند که افراد مبتلا به PTSD در مقایسه با افراد سالم، سطوح بالاتری از شانگرهای پیش‌التهابی مانند اینترلوکین-۱، اینترلوکین-۶، فاکتور نکروز تومور آلفا و پروتئین واکنشگر C را نشان می‌دهند. التهاب عصبی نه تنها با PTSD مرتبط است، بلکه ممکن است نقش مهمی در پاتوژنز و پاتوفیزیولوژی آن نیز داشته باشد. میکروگلیا، به عنوان سلول‌های ایمنی ذاتی در مغز، نقش مهمی در حفظ هومئوستاز سیستم عصبی مرکزی ایفا می‌کنند. با این حال، فعال‌سازی بیش از حد میکروگلیاهای نوروتوکسیک منجر به التهاب عصبی شده و در نتیجه به بافت سالم مغز آسیب می‌رساند. در نتیجه، در ک عملکرد میکروگلیا یک مسیر امیدوارکننده برای درمان اختلالات روانپزشکی، مانند PTSD، فراهم می‌کند. **نتیجه‌گیری:** این مقاله مرواری به شرح نقش پاتوفیزیولوژی میکروگلیا در ایجاد و پیشرفت PTSD، با تمرکز بر مکانیسم‌های التهاب عصبی، می‌پردازد.

*نویسنده مسئول: زهرا بهزاد بصیرت

پست الکترونیک: behzad.zb77@gmail.com

اختلال روانشناختی تعریف می‌شود که افراد ممکن است پس از قرارگرفتن در معرض مرگ واقعی یا تهدید شده، خشونت (مانند جنسی، فیزیکی) یا آسیب جدی آن را تجربه کنند (۱۸، ۱۹). ویژگی‌های PTSD شامل علائم مزاحم (مانند تجربه مجدد رویداد به شکل « فلاش‌بک »)، رفتارهای اجتنابی (مثلًا اجتناب از یادآوری بیرونی رویداد یا تلاش برای اجتناب از افکار ناراحت‌کننده)، شناختها یا احساسات تغییریافته است (۲۰، ۲۱). PTSD یک نگرانی مهم برای جانبازان و سربازان در مناطق جنگی است و آنها در معرض خطر بالایی برای ابتلا به این اختلال هستند. ایالات متحده از سال ۲۰۰۱ بیش از ۲,۵ میلیون نیروی نظامی را در عراق مستقر کرده است و حدود ۱۷-۲۲ درصد از آنها پس از تجربه رزمی خود دچار PTSD شده‌اند (۲۲-۲۴). باعث اختلالات رفتاری و همچنین اختلالات ایمنی می‌شود (۲۵، ۲۶). در افراد مبتلا به PTSD، تعادل در محور هیپوتوالاموس- هیپوفیز- آدرنال (HPA) مختل شده و میزان بیان سیتوکین‌ها، کموکاین‌ها، پروتئین واکنشی C و نشانگرهای استرس اکسیدانتیو تغییر می‌کند؛ این تغییرات ممکن است در عملکرد مناطقی از مغز که مسئول تنظیم ترس و فرآیندهای حافظه هستند، اختلال ایجاد کنند (۲۷-۲۹).

عملکرد میکروگلیا

میکروگلیاهای بسیار ناهمگن و منشعب هستند و با یک هسته کوچک با بازوهای^۱ زیاد و ظریف مشخص می‌شوند. بازوهای میکروگلیا به طور مداوم، تصادفی و مکرر در همه جهات منبسط و منقبض می‌شوند و به عنوان ناظر ایمونولوژیک سیستم عصبی مرکزی را بررسی می‌کنند (۳۰). فاکتورهای ترشح شده از پاتوژن باعث می‌شود که میکروگلیاهای توسط بازوهای خود از طریق پاسخ به گرادیان‌های شیمیایی به سمت محل آسیب مهاجرت کرده و با تشکیل ساختارهای توبی و زنجیره‌ای بافت آسیب دیده را فاگوستیوز کند. میکروگلیاهای به طور کلی بر اساس عملکردشان به دنبال فعل سازی توسط عوامل مختلف به دو فنوتیپ طبقه‌بندی می‌شوند: فنوتیپ M1 و فنوتیپ M2 (۳۱-۳۴).

میکروگلیاهای با فنوتیپ M1 که با نشانگرهای سطحی شامل HLA-DR، CD80، CD86 و CD197^۲ مشخص می‌شوند و توسط اینترفرون گاما (IFN-γ)، لیپوپلی ساکارید (LPS)، فاکتور نکروز کننده ی تومور-آلfa (TNF-α) فعال شده و باعث تولید سیتوکین‌های پیش التهابی مانند: اینترلوكین-1 (IL-1)، اینترلوكین-6 (IL-6)، اینترلوكین-12 (IL-12)، اینترلوكین-۱۸ (IL-18)

سیستم عصبی مرکزی مجهرز به شبکه ای پراکنده و کارآمد از فاگوستیت‌های تک هسته‌ای است. میکروگلیا سلول‌های ایمنی مغز و اولین پاسخ دهنده‌ان در خط دفاعی سیستم عصبی مرکزی و آسیب‌های مغزی هستند (۱). مطالعات نشان داده‌اند که میکروگلیا از اجداد میلوئیدی اولیه در کیسه زرده جنینی منشا می‌گیرد که از طریق لوله عصبی در حال رشد مهاجرت می‌کنند و کل پارانشیم^۱ را در بر می‌گیرند (۲). میکروگلیاهای با تولید فاکتورهای ضد التهابی و التهابی به طیف وسیعی از آسیب‌ها پاسخ می‌دهند (۳). میکروگلیاهای در سیستم عصبی مرکزی با نورون‌ها تعامل دارند، از طریق فاگوستیوز در هرس سیناپسی شرکت می‌کنند، گیرنده‌های سیناپسی را تنظیم می‌کنند، بر حافظه تأثیر می‌گذارند و نقش مهمی در حافظه ترس (fear mem-) (ory) ایفا می‌کنند (۴، ۵). میکروگلیاهای در طول عمر از طریق تقسیم آهسته باقی می‌مانند و عملکردهای خود را حفظ می‌کنند. آن‌ها همچنین فعالیت‌های حیاتی مانند نظارت بر سیستم ایمنی، مقاومت در برابر عفونت و پاسخ به عوامل بیماری زا را انجام می‌دهند (۶، ۷).

التهاب یک موضوع جدایی ناپذیر در فیزیولوژی بدن است. هرگونه آسیب به بدن منجر به شروع واکنش‌های التهابی می‌شود. سیستم عصبی مرکزی و محیطی عاری از آسیب نیست. در سیستم عصبی مرکزی، نورون‌ها وظایف بسیاری از جمله: تنظیم وضعیت فیزیولوژیکی، مدیریت و تنظیم سیستم ایمنی، مشارکت در رفتارهای اجتماعی، احساسات و انتقال سیگنال‌های عصبی را به عهده دارند (۸)، از این رو آسیب به نورون‌ها منجره فعال شدن سلول‌های ایمنی برای ترمیم، اصلاح و تنظیم عملکرد سیناپسی و در نهایت حمایت از نورون‌ها در برابر استرس می‌شود (۹). تولید فاکتورهای التهابی توسط سلول‌های ایمنی می‌تواند منجر به کاهش عوامل بیماری‌زا و محافظت از نورون‌ها در برابر عفونت و عوامل ویروسی شود (۱۰، ۱۱). در صورتی که تولید عوامل التهابی توسط سلول‌های ایمنی کنترل نشود، پیشرفت مداوم آن باعث آسیب به نورون و در نهایت التهاب عصبی می‌شود (۱۲، ۱۳). میکروگلیاهای به عنوان سلول‌های ایمنی مغز، طیف وسیعی از عوامل التهابی و ضدالتهابی را تولید می‌کنند. مطالعات متعددی نشان داده است که میکروگلیا نقش مهم و کلیدی در بیماری‌زایی بیماری‌های تخریب کننده عصبی ناشی از التهاب مزمن دارد (۱۴-۱۷). اختلال استرس پس از سانجه (PTSD) به عنوان یک

¹ Parenchyma

² Processes

میکروگلیا، نقش مهمی در پاتوفیزیولوژی التهاب عصبی و اختلالات عصبی دارد (۴۰، ۴۷). این سلول‌ها به عنوان سلول‌های ایمنی ساکن در سیستم عصبی مرکزی عمل کرده و به حفظ تعادل هومئوستاز عصبی کمک می‌کنند. میکروگلیا از نظر تکامل و عملکرد، تفاوت‌های قابل توجهی با دیگر سلول‌های ایمنی داشته و به طور خاص در پاسخ‌های التهابی نقش دارند (۴۸). در موقع استرس یا آسیب به سیستم عصبی مرکزی، میکروگلیا به حالت فعال در می‌آید و شروع به ترشح سیتوکین‌های التهابی و فراخوانی سایر سلول‌های ایمنی می‌کند (۳) همچنین فعال شدن میکروگلیا تحت تأثیر عوامل ترشح‌شده از آستروروسیت‌ها قرار گرفته که این مسئله به ایجاد یک حلقه بازخورد مثبت می‌انجامد که ممکن است در نهایت باعث ایجاد التهاب مزمن شود (۴۹-۵۱).

در مغز، نورون‌ها تلاش‌های محافظتی عصبی را برای مبارزه با جنبه منفی التهاب با پاکسازی بقایای سلولی و تنظیم ترشح عوامل نوروتروفیک، سیتوکین‌ها و پروتئین‌ها انجام می‌دهند. التهاب مزمن در مغز بر انعطاف‌پذیری نورون‌ها تأثیر می‌گذارد، حافظه را مختل می‌کند و به طور کلی یک عامل اصلی آسیب بافتی در اختلالات نورودئراتیو در نظر گرفته می‌شود (۵۲، ۵۳). التهاب عصبی مزمن که به عنوان پاسخ ایمنی غیرطبیعی در سیستم عصبی مرکزی شناخته می‌شود، می‌تواند منجر به ایجاد ترکیبات پروتئینی خطرناک، از جمله پروتئین‌های آمیلوئیدی و تاو در بیماری‌های زوال عقل شود (۵۴). التهاب مزمن به طور قابل توجهی می‌تواند بر روی عملکرد نورون‌ها تأثیر منفی بگذارد و در زمینه‌های شناختی و حرکتی اختلال ایجاد کند (۵۵). میکروگلیا با دیگر سلول‌های ایمنی مانند آستروروسیت‌ها و سلول‌های ایمنی محیطی همکاری می‌کنند. ارتباط این سلول‌ها می‌تواند تأثیر عمیقی بر فرآیندهای التهابی و ترمیم بافت داشته باشد. در بیماری‌های تخریب کننده عصبی، میکروگلیاهای فعال سیتوکین‌های التهابی مانند TNF-α، IL-6 و IL-1β، گونه‌های فعال اکسیژن و اکسیتوکسین‌ها از جمله گلوتامات را آزاد می‌کنند و از طریق انتشار چنین مولکول‌هایی باعث اثرات مضر می‌شود (۵۶).

بنابراین التهاب عصبی با نقش محوری میکروگلیاهای به عنوان تنظیم‌کننده اصلی پاسخ‌های التهابی در مغز، می‌تواند عملکرد مناطقی از مغز مانند آمیگدال، هیپوکامپ و قشر پیشانی که در پردازش احساسات، حافظه و تنظیم استرس نقش دارند تحت تأثیر قرار دهد و در نهایت منجر به علائمی مانند بازگشت به

IL-18)، اینترلوکین-۲۳ (IL-23) می‌شوند (۳۵-۳۸).

میکروگلیاهای M2 با نشانگرهای سطحی خود شامل CD301، CD209 و CD206 مشخص می‌شوند و توسط اینترلوکین-۴ (IL-4)، اینترلوکین-۱۰ (IL-10) فعال می‌شوند (۳۷). میکروگلیاهای M2 با ترشح فاکتورهای ضدالتهابی مانند فاکتور رشد تغییردهنده بتا (TGF-β)، فاکتور رشد شبکه انسولین-۱ (IGF-1)، فاکتور رشد فیبروبلاست (FGF) و اینترلوکین-۳ (IL-3)، اینترلوکین-۱۰ (IL-10) پاسخ‌های التهابی را سرکوب می‌کند و باعث ترمیم، بازسازی نورون‌ها می‌شوند. بنابراین دارای یک اثر محافظت کننده عصبی هستند (۳۹). میکروگلیاهای M2 برای مونتاژ مناسب شبکه‌های عصبی پیچیده ضروری هستند. همچنین میکروگلیاهای توانایی پاکسازی سلول‌های آپوپوتیک و آزادسازی عوامل نوروتروفیک و هورمون‌های رشد را در فضای خارج سلولی نشان می‌دهند (۴۰). مطالعات نشان داده در روند افزایش سن، فعال شدن پیشرونده و ترشح سیتوکین‌های پیش التهابی توسط میکروگلیا یک ریزمیکیت ضد نوروزنر ایجاد می‌کند که تکثیر سلول‌های بنیادی عصبی را تضعیف می‌کند. میکروگلیا با نورون‌ها، آستروروسیت‌ها و رگ‌های خونی ارتباط برقرار کرده و آن‌ها را پردازش می‌کند و به طور مداوم وضعیت عملکردی سیناپس‌ها را کنترل می‌کند (۴۱-۴۲).

علاوه بر گیرنده‌های ایمنی، میکروگلیا گیرنده‌های متعددی را برای انتقال دهنده‌های عصبی و نوروبپتیدهای آزاد شده توسط نورون‌ها که ارتباطات عصبی-گلیا را ارتقا می‌دهند، بیان می‌کند (۳۸). این گیرنده‌ها به میکروگلیا اجازه می‌دهند تا با هدایت بازوهای خود به سمت سیناپس‌های عصبی به منظور تأثیرگذاری بر شکل‌پذیری سیناپسی و ترمیم بازسازی نورون، فعالیت نورون‌ها را کنترل کند (۴۴).

با توجه به طیف وسیعی از ترشح فاکتورهای مختلف از سلول‌های میکروگلیا آن‌ها را به عنوان سلول‌های مؤثری در پاسخ ایمنی و کلید اصلی التهاب در سیستم عصبی مرکزی در نظر می‌گیرند. میکروگلیا با فنوتیپ M1 عوامل بیماری‌زا را به درون خود کشیده و آن‌ها را می‌بلعد و در پاسخ‌های التهابی شرکت می‌کند. همچنین می‌توان میکروگلیاهای را توسط گیرنده‌های تشخیص الگو مرتبط با آسیب برای ترویج فاگوسیتوز باقی‌مانده سلولی فعال کرد (۴۵، ۴۶). در نتیجه، میکروگلیا M1 می‌تواند با تولید، ترشح فاکتورهای و فرایندهای التهابی باعث سرکوب عامل بیماری‌زا شوند، اما با بیان بیش از حد عوامل التهابی باعث آسیب به نورون و بافت سالم مغز می‌شوند.

نقش دارد. استرس روانی-اجتماعی ممکن است از طریق مسیرهای دیگر، از جمله آزادسازی نورآدرنالین از سیستم عصبی سمپاتیک و متعاقب آن فعال شدن گیرنده‌های β -آدرنرژیک، اثرات مستقیمی بر فعالیت میکروگلیا داشته باشد (۴۵). نقش میکروگلیا به عنوان بازیگران مهم در سنجش استرس و پاسخ به آن در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۶۸). با توجه به تعداد بالای گیرنده‌های گلوکوکورتیکوئیدی موجود در هیپوکامپ و فشر جلوی مغز، این نواحی به احتمال زیاد به افزایش هورمون کورتیکوسترون حساس هستند و منجر به اثرات غیرمستقیم بر روی میکروگلیا در این مناطق می‌شود. علاوه بر این، از آنجایی که میکروگلیا گیرنده‌های گلوکوکورتیکوئیدی و مینeralوکورتیکوئیدی را بیان می‌کند (۶۹-۷۱)، ممکن است اثرات مستقیم افزایش هورمون کورتیکوسترون ناشی از استرس بر میکروگلیا وجود داشته باشد (۷۲). نسانگرهای میکروگلیا در تعدادی از اختلالات روانی مانند افسردگی، اضطراب، اسکیزوفرنی و اختلالات طیف اوتیسم گزارش شده است (۷۳-۷۶). بنابراین استرس، به عنوان یک محرك بالقوه باعث افزایش فعالیت میکروگلیا می‌شود و ممکن است به ایجاد اختلالات اعصاب و روان مختلف کمک کند.

میکروگلیا و PTSD

مطالعات اخیر نشان داده است که اختلالات ایمنی با واکنش‌های التهابی بیش از حد در بیماران PTSD وجود دارد (۷۷). اختلالات ایمنی، التهاب عصبی و تخریب عصبی را در پاتوزنر بیماری‌های تحلیل برنده عصبی القاء و تقویت می‌کند (۷۸-۸۰). میکروگلیاهای نقش مهمی در التهاب محیطی و همچنین در التهاب عصبی ناشی از آسیب‌های مغزی، استرس، افسردگی و PTSD ایفا می‌کنند (۷۳، ۸۱). فاکتورهای ترشح شده در ریز محیط‌های میکروگلیا برای نوروژن‌ز و عملکرد عصبی حیاتی هستند از این رو، ممکن است فعال‌سازی میکروگلیا ناشی از استرس و اختلال در عملکرد میکروگلیا منجر به ایجاد PTSD شود (۸۲).

مطالعات نشان می‌دهد که ترومای شبه PTSD با سطح بالای هورمون آزاد کننده کورتیکوتروپین باعث زوال عقل و بیماری تحلیل برنده عصبی مانند آلزایمر می‌شود (۸۴، ۸۳). همچنین همبودی آسیب مغزی تروماتیک و PTSD در جانبازان مبتلا به این اختلال می‌شود (۸۶، ۸۵). به طور مشابه، مطالعات همچنین سطوح بالای سیتوکین‌ها از جمله IL-6، TNF- α ، IL-1 β ، TNF- α ، IFN- γ و IFN- β را در بیماران PTSD نشان داده اند (۸۷، ۸۸). این سیتوکین‌ها

خطرات آزاده‌نده (اختلال استرس پس از سانجه)، مشکلات در تمکز، تحریک‌پذیری و اضطراب شود. میکروگلیا و استرس

مطالعات اپیدمیولوژیک نشان داده است که استرس، در اوایل دوران کودکی و حتی در مراحل بعدی زندگی، با افزایش سیتوکین‌های پیش التهابی همراه است که خطر ابتلا به بیماری‌های اعصاب و روان را در بزرگسالی افزایش می‌دهد (۵۷-۵۹). سیستم ایمنی و سیستم عصبی مرکزی ارتباط نزدیکی دارند و یکدیگر را تنظیم می‌کنند. سیستم ایمنی به عوامل استرس را پاسخ می‌دهد و از طریق مکانیسم‌های مختلفی از جمله سیگنال‌دهی سیتوکین، عصب واگ و سیستم لنفاوی با سیستم عصبی مرکزی ارتباط برقرار می‌کند. به دلیل ارتباط قوی بین سیستم ایمنی و سیستم عصبی مرکزی، فعال شدن سیستم ایمنی می‌تواند باعث التهاب عصبی شود که با فعال شدن میکروگلیا و تولید سیتوکین‌های پیش التهابی در مغز مشخص می‌شود (۶۰-۶۲).

یک مطالعه متالایز نشان داد که استرس روانی-اجتماعی باعث افزایش نشانگر-1 Iba میکروگلیا حداقل در یک ناحیه از مغز و اغلب در چندین ناحیه می‌شود. این یافته‌ها حاکی از آن است که قرار گرفتن در معرض استرس روانی-اجتماعی می‌تواند از طریق فعال‌سازی میکروگلیا و سایر پاسخ‌های ایمنی در سیستم مختلف را افزایش دهد (۶۳). تجربیات استرس را نواحی خاصی از مغز و سیستم عصبی سمپاتیک را فعال می‌کند و باعث ترشح نورآدرنالین، آدرنالین و هورمون‌های گلوکوکورتیکوئیدی در جریان خون می‌شود (۶۴، ۶۵). چندین فرضیه، از جمله تغییرات در سیستم استرس در محور هیپوپotalamo-hypophysis، پاسخ‌های ایمنی غیرطبیعی و تغییرات پایدار در شکل‌های سلولی و مولکولی همچنین تغییرات اپی رئتیکی برای توضیح مسیرهای نوروبیولوژیکی که ناملمایمات دوران کودکی را منشا بیماری‌های اعصاب روان در بزرگسالان مرتبط می‌کند، پیشنهاد شده‌اند. استرس باعث ترشح هورمون آزاد کننده کورتیکوتروپین از هسته پارابطئنی^۳ هیپوپotalamo-hypophysis شده که این امر بر فوتیپ و عملکرد میکروگلیا تاثیر می‌گذارد. هورمون آزاد کننده کورتیکوتروپین، سلول‌های گلیا را از طریق گیرنده‌های خود فعال می‌کند تا سلول‌های گلیا واسطه‌های التهابی عصبی را آزاد کنند (۶۶، ۶۷). هیپوکامپ مغز به عنوان ناحیه‌ای ویژه برای پاسخ به محرك‌های استرس را با بیان بیش از حد گیرنده‌های گلوکوکورتیکوئیدی در نظر گرفته می‌شود و در پاسخ بدن به سیگنال‌دهی استرس از طریق محور هیپوپotalamo-hypophysis-آدرنال

³ Paraventricular nucleus

حافظه را مختل می‌کند و از آنجایی که بیان IL-1 β به دنبال استرس شدید افزایش می‌یابد، افزایش IL-1 β ممکن است در ایجاد یادگیری ناسازگار ترس دخیل باشد که نشان دهنده نقش آن در الگوی یادگیری ترس است؛ بنابراین سیگنال‌دهی IL-1 β برای توسعه یادگیری ترس افزایش‌یافته ضروری است، زیرا مسدود کردن عملکرد IL-1 β به دنبال استرس زای شدید با آنتاگونیست گیرنده (IL-1Ra) از ایجاد یادگیری ترس تقویت شده با استرس جلوگیری می‌کند (۱۰۲، ۱۰۳).

مطالعات دیگر پیشنهاد کرده‌اند که میکروگلیای مستقر در هیپوکامپ بیان P2X7R پیش التهابی را قبل از تغییرات رفتاری مربوط به استرس افزایش داده و مسدود کردن P2X7Rs از ایجاد فنوتیپ مشابه PTSD پس از قرارگرفتن در معرض استرس طولانی مدت^۴ جلوگیری کرد که نشان می‌دهد فعال سازی P2X7Rs ناشی از استرس و تولید سایتوکاین‌های پیش التهابی توسعه میکروگلیا در ایجاد اختلال استرس پس از سانحه نقش دارد (۱۰۴-۱۰۶).

خانواده پروتئین‌های گیرنده شبه (NLRs)^۵ گروهی از از گیرنده‌های تشخیص الگو سیتوزوولی هستند که به عنوان واسطه پاسخ ایمنی ذاتی اولیه به آسیب سلولی و استرس شناخته شده‌اند. در میان NLRP3، NLRs یکی از اعضایی است که به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است و عمدها در میکروگلیا بیان می‌شود (۱۰۷). یک مطالعه نشان داد که فعال سازی NLRP3 التهابی عمدها در میکروگلیا اتفاق می‌افتد و در مدل حیوانی اضطراب ناشی از شوک‌های الکتریکی باعث بروز التهاب سیستمیک می‌شود. بیان NLRP3 را می‌توان در میکروگلیا، آستروسیت‌ها و نورون‌ها در طی شرایط پاتولوژیک شدید، مانند آسیب نخاعی شناسایی کرد، اما فقط در میکروگلیا تحت شرایط فیزیولوژیکی یافت می‌شود. استرس منجره جهش هوموپاکس B8 (Hoxb8)، فقط در میکروگلیا موش‌ها بروز می‌کند) می‌شود که در موش باعث نظافت پاتولوژیک، اضطراب زیاد و استرس می‌شود که مستقیماً باعث اختلالات عصبی روانی در موش‌ها شده و مشابه اختلال وسواس فکری-اجباری^۶ (OCD) و اختلالات طیف اوتیسم^۷ (ASDs) مشاهده شده در انسان است (۱۰۸).

این یافته‌ها نشان می‌دهند که فعال سازی کمپلکس التهابی NLRP3 در مغز ناشی از ترموماها و اختلال استرس پس از سانحه، نقش مهمی در ایجاد التهاب عصبی و کاهش پروتئین‌های کلیدی پیش‌سیناپسی در مدارهای عصبی مرتبط با حافظه ترس ایفا می‌کند.

می‌توانند از سد خونی-مغزی عبور کنند و به گیرنده‌های سلول‌های گلیا متصل شوند و MAPK ها را فسفریله کنند که منجر به فعال شدن فاکتور هسته‌ای کاپا B (NF-kB) و آزادسازی واسطه‌های التهابی بیشتر توسط میکروگلیا شود (۹۰، ۹۱). مطالعات نشان می‌دهد که IL-6، IL-1 β و TNF α می‌توانند به طور مستقیم انعطاف پذیری عصبی را تضعیف کند و باعث اختلالات اعصاب و روان شوند (۹۱-۹۴). شواهد دیگر حاکی از آن است که افزایش تعداد میکروگلیا می‌تواند شکل پذیری سیناپسی را مختل کند و از این جهت با از دست رفتن سیناپس منجر به اختلالات خلقی و اضطرابی شود (۹۳).

مطالعات ارتباط بین فعالیت میکروگلیا و پیامدهای رفتاری را در مدل‌های حیوانی بررسی کردند و نشان دادند که فعالیت میکروگلیا با علائم مشابه اضطراب و نشانه‌های افسردگی در مدل PTSD مرتبط است. در ادامه به تعدادی از این مطالعات در مدل‌های حیوانی می‌پردازم.

در یک مطالعه حیوانی، پژوهشگران با استفاده از شوک غیرقابل اجتناب به پا^۸، مدلی از PTSD در موش‌ها ایجاد کردند. نتایج حاصل از تکنیک ایمونوهیستوشیمی این آزمایش نشان داد که استرس مزمن باعث افزایش Iba-1 (نشانگر میکروگلیا) در CA3 و CA1 نواحی خاصی از مغز، به ویژه در مناطق CA3 و CA1 در هیپوکامپ می‌شود. همچنین، مورفوЛОژی میکروگلیا در هیپوکامپ از حالت استراحت (غیرفعال) به شکل آمیبوژید (فعال) تغییر کرد که نشان دهنده فعال شدن میکروگلیا در اثر استرس در مدل PTSD است (۹۵).

به خوبی شناخته شده است که NF-kB یک تنظیم کننده حیاتی فرآیندهای ایمنی است (۹۶-۹۸). پاسخ سریع آستروسیت‌ها، میکروگلیاهای و فعال شدن مسیر NF-kB پس از استرس منجر به افزایش سیتوکین‌های خاص مانند IL-18 و TNF- α می‌شود (۹۹). مطالعات فزاینده نشان داده که فاکتورهای التهابی مانند IL-1 β ، IL-6 و TNF α می‌توانند به طور مستقیم انعطاف پذیری عصبی را تضعیف کنند و باعث اختلالات خلقی شوند که نشان دهنده وضعیت ایمنی بیش از حد در سیستم عصبی محیطی است (۹۹). مطالعات نشان داده است که افزایش بیان زن‌های مرتبط با PTSD در بیماران NF-kB در مقایسه با گروه غیر PTSD وجود دارد (۱۰۰، ۱۰۱).

در یک مطالعه دیگر در موش با ایجاد الگوی یادگیری ترس تقویت شده با استرس^۹ (SEFL) یک مدل PTSD ایجاد کردند. آنها نشان دادند که ترشح بیش از حد IL-1 β توسط میکروگلیا انعطاف پذیری سیناپسی و

⁴ Inescapable foot shock

⁵ Stress-enhanced fear learning

⁶ Single Prolonged Stress

⁷ The NOD-like receptor

⁸ Obsessive compulsive disorder

⁹ Autistic Spectrum Disorders

که سطوح IL-1 β ، IL-6، IL-2، TNF- α ، IFN- γ ، پروتئین واکنشی C و گلبول سفید در بیماران PTSD نسبت به گروههای کنترل به طور معنی داری بالاتر است. همچنین این مطالعه پیشنهاد می کند که سیتوکینهای پیش التهابی، پروتئین واکنشی C و گلبول سفید ممکن است منجره بیماری های قلبی عروقی در بیماران PTSD شود (۱۱۰). از سوی دیگر، سیتوکین های پیش التهابی با عبور از سد خونی- مغزی عبور بر سیستم پاسخ به استرس و نوروژنز تأثیر می گذارند. مطالعات انسانی نشان دادند که سیستم عصبی مرکزی در بیماران PTSD بسیار ضعیف و آسیب پذیر است همچنین مسدود کردن سیتوکین های پیش التهابی نوروژنز هیپوکامپ را بازیابی می کند و سیستم عصبی مرکزی را تقویت می کند (۱۱۱).

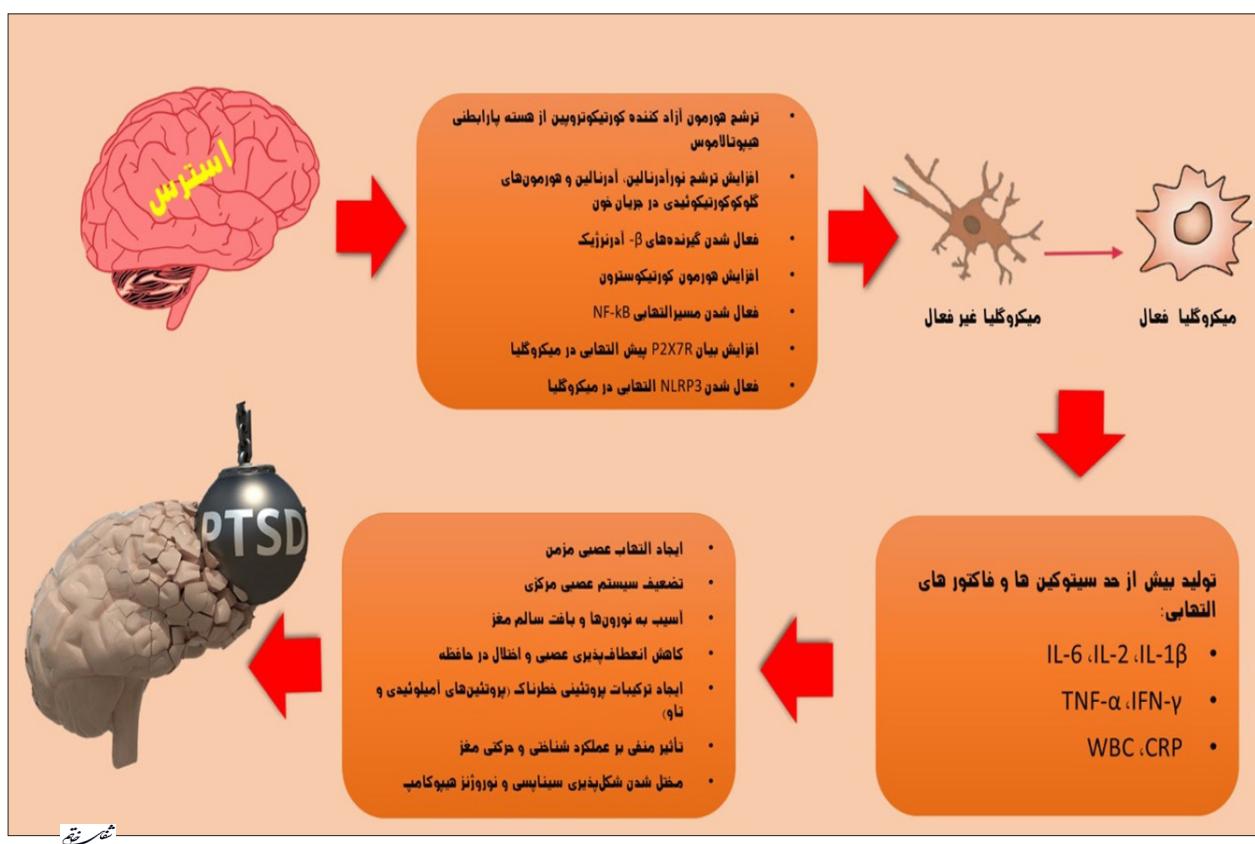
میکروگلیاهای توسط استرس و تغییرات هورمونی فعال شده و این امر منجره بیان بیش از حد فاکتورهای التهابی توسط میکروگلیا می شود که در نتیجه ممکن است به پیشرفت PTSD کمک کند.

بنابراین هدف قرار دادن مسیر NLRP3 با استفاده از داروهای مهارکننده NLRP3 یا عوامل ضد التهابی ممکن است به بهبود عملکرد سیناپسی، کاهش علائم مرتبط با حافظه ترس و در نهایت به درمان PTSD کمک کند.

نشانگرهای زیستی التهابی در PTSD

نشانگر التهاب سیستمیک، در افسردگی و همچنین در بیماران PTSD افزایش می یابد. بنابراین، پیشنهاد شده است که نشانگرهای زیستی خاصی را می توان به عنوان نشانگرهای PTSD استفاده کرد. داده های متاناالیز با بررسی سطح نشانگرهای التهابی در بیماران PTSD در مقایسه با افراد سالم نشان داد که سطوح IL-6، IL-1 β و IFN- γ در بیماران PTSD بالاتر است. آنها همچنین نشان دادند که بیماران PTSD سطوح بالاتری از TNF α نسبت به گروه کنترل دارند (۱۰۹). تولید و افزایش این سیتوکین های التهابی را می توان به فعال شدن سلول های ایمنی مغز به ویژه میکروگلیا نسبت داد. در یک متاناالیز دیگر به طور مشابه نشان داده شد

تصویر ۱- خلاصه ای از نقش میکروگلیا در پاتوفیزیولوژی PTSD



داروهایی که به سبب کاهش فعالیت میکروگلیا تجویز می‌شوند مانند مینوسیکلین به طور قابل توجهی باعث کاهش سطح سیتوکین‌های پیش‌التهابی، کاهش بیان NF-kB و کاهش فعال‌سازی میکروگلیا در مدل‌های PTSD شده و سبب بهبودی در علائم PTSD می‌شود (۱۱۸-۱۲۱). این داروها اغلب داروهای ضدالتهابی و ضدافسردگی هستند؛ بنابراین نمی‌توان این داروها را به طور اختصاصی به میکروگلیا نسبت داد و ممکن است مکانیسم‌های دیگری را در PTSD فعال کرد که تحقیقات انجام شده بر روی بیماران مبتلا به اختلالات روانپزشکی اکثراً پس از مرگ بیماران بر روی بافت آن‌ها انجام می‌شود که با علائم بالینی ناهمگن مرتبط است و حتی تصویربرداری PET یا MRI اطلاعات متفاوتی از ارزیابی آسیب‌شناسی عصبی پس از مرگ ارائه می‌دهند و اطلاعات دقیقی در مورد فوتیپ میکروگلیا در داخل بدن را ارائه نمی‌دهند (۱۲۲، ۱۲۳). همچنین عوامل مخدوش‌کننده مانند مواجهه طولانی با داروهای ضدروانپریشی، مصرف الکل، سیگارکشیدن، و سایر شیوه‌های زندگی و عوامل محیطی را نمی‌توان در نظر نگرفت و همه این عوامل می‌توانند فعل شدن میکروگلیا و التهاب عصبی را تحت تأثیر قرار دهد (۱۲۳).

نتیجه‌گیری

باتوجه به نقش مهم و کلیدی میکروگلیا در سیستم عصبی مرکزی و ایجاد التهابی مزمن، این سلول‌ها را منشأ بسیاری از بیماری‌های مرتبط با تحلیل برندۀ عصبی و التهاب عصبی می‌دانند (۱۱۲-۱۱۴). وجود یافته‌های مورفولوژیکی و ایمونولوژیک نقش بالقوه میکروگلیا و التهاب عصبی را در پاتوزن PTSD نشان می‌دهد. استرس باعث فعال شدن پاسخ‌های التهابی در سیستم عصبی مرکزی و همچنین افزایش نشانگرهای زیستی التهابی در هیپوکامپ می‌شود (۱۱۵، ۱۱۶، ۶۳). میکروگلیاهای را به عنوان اولین سلول‌های پاسخ‌دهنده PTSD به استرس و سلول‌های ایمنی اصلی مغز که به پاسخ می‌دهند در نظر می‌گیرند. این سلول‌ها به تمام محرك‌هایی که به مغز می‌رسد، از جمله عوامل استرس‌زا، به سرعت پاسخ می‌دهند و در صورت قرارگرفتن در معرض استرس، سیتوکین‌های التهابی مختلفی را آزاد می‌کنند (۱۱۷). در حال حاضر مکانیسم‌های اختلال استرس پس از سانحه در سیستم عصبی مرکزی هنوز به‌وضوح شناخته نشده است و تحقیقات بیشتری برای روشن شدن نقش دقیق فعال‌سازی میکروگلیا و التهاب عصبی در تغییر عملکردهای عصبی و همچنین سهم آن‌ها در بیماری زایی و پیشرفت PTSD مورد نیاز است.

منابع

- Yang I, Han SJ, Kaur G, Crane C, Parsa AT. The role of microglia in central nervous system immunity and glioma immunology. *Journal of clinical neuroscience*. 2010; 17(1): 6-10.
- Schulz C, Perdigero EG, Chorro L, Szabo-Rogers H, Cagnard N, Kierdorf K, et al. A lineage of myeloid cells independent of Myb and hematopoietic stem cells. *Science*. 2012; 336(6077): 86-90.
- Qin J, Ma Z, Chen X, Shu S. Microglia activation in central nervous system disorders: A review of recent mechanistic investigations and development efforts. *Frontiers in Neurology*. 2023; 14: 1103416.
- Du L, Zhang Y, Chen Y, Zhu J, Yang Y, Zhang HL. Role of microglia in neurological disorders and their potentials as a therapeutic target. *Molecular neurobiology*. 2017; 54(10): 7567-84.
- Bachiller S, Jiménez-Ferrer I, Paulus A, Yang Y, Swanberg M, Deierborg T, et al. Microglia in neurological diseases: a road map to brain-disease dependent-inflammatory response. *Frontiers in cellular neuroscience*. 2018; 12: 488.
- Alliot F, Godin I, Pessac B. Microglia derive from progenitors, originating from the yolk sac, and which proliferate in the brain. *Developmental* Brain Research. 1999; 117(2): 145-52.
- Pont-Lezica L, Béchade C, Belarif-Cantaut Y, Pascual O, Bessis A. Physiological roles of microglia during development. *Journal of neurochemistry*. 2011; 119(5): 901-8.
- Gordon J, Amini S. General overview of neuronal cell culture. *Neuronal Cell Culture: Methods and Protocols*. 2021: 1-8.
- Teleanu RI, Niculescu A-G, Roza E, Vladâncenco O, Grumezescu AM, Teleanu DM. Neurotransmitters key factors in neurological and neurodegenerative disorders of the central nervous system. *International journal of molecular sciences*. 2022; 23(11): 5954.
- Chen L, Deng H, Cui H, Fang J, Zuo Z, Deng J, et al. Inflammatory responses and inflammation-associated diseases in organs. *Oncotarget*. 2017; 9(6): 7204.
- Özdemir S. Inflammation: Complexity and significance of cellular and molecular responses. *Journal of Acute Disease*. 2024 ; 13(1): 3-7.
- Adamu A, Li S, Gao F, Xue G. The role of neuroinflammation in neurodegenerative diseases: current understanding and future therapeutic targets. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2024; 16: 1347987.

13. Niranjan R. Recent advances in the mechanisms of neuroinflammation and their roles in neurodegeneration. *Neurochemistry international*. 2018; 120: 13-20.
14. Abe N, Nishihara T, Yorozuya T, Tanaka J. Microglia and macrophages in the pathological central and peripheral nervous systems. *Cells*. 2020; 9(9): 2132.
15. Xiong X-Y, Liu L, Yang Q-W. Functions and mechanisms of microglia/macrophages in neuroinflammation and neurogenesis after stroke. *Progress in neurobiology*. 2016; 142: 23-44.
16. Miao J, Ma H, Yang Y, Liao Y, Lin C, Zheng J, et al. Microglia in Alzheimer's disease: Pathogenesis, mechanisms, and therapeutic potentials. *Frontiers in aging neuroscience*. 2023; 15: 1201982.
17. Anwar S, Rivest S. Alzheimer's disease: microglia targets and their modulation to promote amyloid phagocytosis and mitigate neuroinflammation. *Expert opinion on therapeutic targets*. 2020; 24(4): 331-44.
18. Basharpoor S, Einy S. The effectiveness of mentalization-based therapy on emotional dysregulation and impulsivity in veterans with post-traumatic stress disorder. *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*. 2020; 8(3): 10-9.
19. Sarhadi S, Ghaemi F, Dortsaj F, Delavar A. Comparison of the Effectiveness of Sertraline, Transcranial Direct Stimulation Current and their Combination on Post-Traumatic Stress Disorder in Veterans. *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*. 2019; 8(1): 51-62.
20. Cooper R. Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM). Ko Knowledge Organization. 2018 ;44(8): 668-76.
21. Khateri S, Soroush M, Mokhber N, Sedighimoghaddam M, Modirian E, Mousavi B, et al. Mental health status following severe sulfur mustard exposure: a long-term study of Iranian war survivors. *Asia-Pacific Psychiatry*. 2017; 9(2): e12252.
22. Hines LA, Sundin J, Rona RJ, Wessely S, Fear NT. Posttraumatic stress disorder post Iraq and Afghanistan: prevalence among military subgroups. *The Canadian Journal of Psychiatry*. 2014; 59(9): 468-79.
23. Dursa EK, Reinhard MJ, Barth SK, Schneiderman AI. Prevalence of a positive screen for PTSD among OEF/OIF and OEF/OIF-era veterans in a large population-based cohort. *Journal of traumatic stress*. 2014; 27(5): 542-9.
24. Bookwalter DB, Roenfeldt KA, LeardMann CA, Kong SY, Riddle MS, Rull RP. Posttraumatic stress disorder and risk of selected autoimmune diseases among US military personnel. *BMC psychiatry*. 2020; 20: 1-8.
25. Bisson J, Andrew M. Psychological treatment of post-traumatic stress disorder (PTSD). *Cochrane database of systematic reviews*. 2007(3).
26. Rose SC, Bisson J, Churchill R, Wessely S, Group CCMD. Psychological debriefing for preventing post traumatic stress disorder (PTSD). *Cochrane database of systematic reviews*. 1996; 2010(1).
27. Petra AI, Panagiotidou S, Hatziagelaki E, Stewart JM, Conti P, Theoharides TC. Gut-microbiota-brain axis and its effect on neuropsychiatric disorders with suspected immune dysregulation. *Clinical therapeutics*. 2015 ;37(5): 984-95.
28. Oroian BA, Ciobica A, Timofte D, Stefanescu C, Serban IL. New Metabolic, Digestive, and Oxidative Stress-Related Manifestations Associated with Posttraumatic Stress Disorder. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2021; 2021(1): 5599265.
29. Ke S, Hartmann J, Ressler KJ, Liu YY, Koenen KC. The emerging role of the gut microbiome in posttraumatic stress disorder. *Brain, behavior, and immunity*. 2023 1; 114: 360-70.
30. Tam WY, Ma CHE. Bipolar/rod-shaped microglia are proliferating microglia with distinct M1/M2 phenotypes. *Scientific reports*. 2014; 4(1): 7279.
31. Lier J, Streit WJ, Bechmann I. Beyond activation: characterizing microglial functional phenotypes. *Cells*. 2021; 10(9): 2236.
32. Eggen BJ, Raj D, Hanisch U-K, Boddeke HW. Microglial phenotype and adaptation. *Journal of Neuroimmune Pharmacology*. 2013; 8: 807-23.
33. Luo X-G, Chen S-D. The changing phenotype of microglia from homeostasis to disease. *Translational neurodegeneration*. 2012; 1: 1-13.
34. Leyh J, Paeschke S, Mages B, Michalski D, Nowicki M, Bechmann I, et al. Classification of microglial morphological phenotypes using machine learning. *Frontiers in cellular neuroscience*. 2021; 15: 701673.
35. Zhou L, Wang D, Qiu X, Zhang W, Gong Z, Wang Y, et al. DHZCP modulates microglial M1/M2 polarization via the p38 and TLR4/NF-κB

signaling pathways in LPS-stimulated microglial cells. *Frontiers in Pharmacology*. 2020; 11: 1126.

36. Topf MC, Tuluc M, Harshyne LA, Luginbuhl A. Macrophage type 2 differentiation in a patient with laryngeal squamous cell carcinoma and metastatic prostate adenocarcinoma to the cervical lymph nodes. *Journal for ImmunoTherapy of Cancer*. 2017; 5: 1-5.

37. Sousa C, Golebiewska A, Poovathingal SK, Kaoma T, Pires-Afonso Y, Martina S, et al. Single-cell transcriptomics reveals distinct inflammation-induced microglia signatures. *EMBO reports*. 2018; 19(11): e46171.

38. Vidal-Itriago A, Radford RA, Aramideh JA, Maurel C, Scherer NM, Don EK, et al. Microglia morphophysiological diversity and its implications for the CNS. *Frontiers in immunology*. 2022; 13: 997786.

39. Guo S, Wang H, Yin Y. Microglia polarization from M1 to M2 in neurodegenerative diseases. *Frontiers in aging neuroscience*. 2022; 14: 815347.

40. Muzio L, Viotti A, Martino G. Microglia in neuroinflammation and neurodegeneration: from understanding to therapy. *Frontiers in neuroscience*. 2021; 15: 742065.

41. Matejuk A, Ransohoff RM. Crosstalk between astrocytes and microglia: an overview. *Frontiers in immunology*. 2020; 11: 1416.

42. LiuL-r, LiuJ-c, BaoJ-s, BaiQ-q, WangG-q. Interaction of microglia and astrocytes in the neurovascular unit. *Frontiers in immunology*. 2020; 11: 1024.

43. Kettenmann H, Hanisch U-K, Noda M, Verkhratsky A. Physiology of microglia. *Physiological reviews*. 2011; 91(2): 461-553.

44. Cornell J, Salinas S, Huang H-Y, Zhou M. Microglia regulation of synaptic plasticity and learning and memory. *Neural regeneration research*. 2022; 17(4): 705-16.

45. Rock RB, Gekker G, Hu S, Sheng WS, Cheeran M, Lokensgaard JR, et al. Role of microglia in central nervous system infections. *Clinical microbiology reviews*. 2004; 17(4): 942-64.

46. Xu Y, Jin M-Z, Yang Z-Y, Jin W-L. Microglia in neurodegenerative diseases. *Neural Regeneration Research*. 2021; 16(2): 270-80.

47. Colonna M, Butovsky O. Microglia

function in the central nervous system during health and neurodegeneration. *Annual review of immunology*. 2017; 35(1): 441-68.

48. Lenz KM, Nelson LH. Microglia and beyond: innate immune cells as regulators of brain development and behavioral function. *Frontiers in immunology*. 2018; 9:698.

49. Ulland TK, Colonna M. TREM2—a key player in microglial biology and Alzheimer disease. *Nature Reviews Neurology*. 2018; 14(11): 667-75.

50. Gao C, Jiang J, Tan Y, Chen S. Microglia in neurodegenerative diseases: mechanism and potential therapeutic targets. *Signal transduction and targeted therapy*. 2023; 8(1): 359.

51. Kwon HS, Koh S-H. Neuroinflammation in neurodegenerative disorders: the roles of microglia and astrocytes. *Translational neurodegeneration*. 2020; 9(1): 42.

52. Ajami B, Samusik N, Wieghofer P, Ho PP, Crotti A, Bjornson Z, et al. Single-cell mass cytometry reveals distinct populations of brain myeloid cells in mouse neuroinflammation and neurodegeneration models. *Nature neuroscience*. 2018; 21(4): 541-51.

53. Soluki M, Mahmoudi F, Abdolmaleki A. Therapeutic factors in ischemic stroke control. *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*. 2022; 10(4): 77-91.

54. Heneka MT, Carson MJ, El Khoury J, Landreth GE, Brosseron F, Feinstein DL, et al. Neuroinflammation in Alzheimer's disease. *The Lancet Neurology*. 2015; 14(4): 388-405.

55. Harry GJ, Kraft AD. Neuroinflammation and microglia: considerations and approaches for neurotoxicity assessment. *Expert opinion on drug metabolism & toxicology*. 2008; 4(10): 1265-77.

56. Smith JA, Das A, Ray SK, Banik NL. Role of pro-inflammatory cytokines released from microglia in neurodegenerative diseases. *Brain research bulletin*. 2012; 87(1): 10-20.

57. Brown M, Worrell C, Pariante CM. Inflammation and early life stress: An updated review of childhood trauma and inflammatory markers in adulthood. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*. 2021; 211: 173291.

58. Baumeister D, Akhtar R, Ciufolini S, Pariante CM, Mondelli V. Childhood trauma and adulthood inflammation: a meta-analysis of peripheral

- C-reactive protein, interleukin-6 and tumour necrosis factor- α . *Molecular psychiatry*. 2016; 21(5): 642-9.
59. Nia HS, Ebadi A, Lehto RH, Mousavi B, Peyrovi H, Chan YH. Reliability and validity of the persian version of templar death anxiety scale-extended in veterans of Iran-Iraq warfare. *Iranian journal of psychiatry and behavioral sciences*. 2014; 8(4): 29.
60. Sei Y, Vitković L, Yokoyama M. Cytokines in the central nervous system: regulatory roles in neuronal function, cell death and repair. *Neuroimmunomodulation*. 1995 Jan 3; 2(3).
61. Sugama S, Fujita M, Hashimoto M, Conti B. Stress induced morphological microglial activation in the rodent brain: involvement of interleukin-18. *Neuroscience*. 2007; 146(3): 1388-99.
62. Frank MG, Thompson BM, Watkins LR, Maier SF. Glucocorticoids mediate stress-induced priming of microglial pro-inflammatory responses. *Brain, behavior, and immunity*. 2012; 26(2): 337-45.
63. Calcia MA, Bonsall DR, Bloomfield PS, Selvaraj S, Barichello T, Howes OD. Stress and neuroinflammation: a systematic review of the effects of stress on microglia and the implications for mental illness. *Psychopharmacology*. 2016; 233: 1637-50.
64. Finsterwald C, Alberini CM. Stress and glucocorticoid receptor-dependent mechanisms in long-term memory: from adaptive responses to psychopathologies. *Neurobiology of learning and memory*. 2014; 112: 17-29.
65. Butler RK, Finn DP. Stress-induced analgesia. *Progress in neurobiology*. 2009; 88(3): 184-202.
66. Kritas SK, Saggini A, Cerulli G, Caraffa A, Antinolfi P, Pantalone A, et al. Corticotropin-releasing hormone, microglia and mental disorders. *International journal of immunopathology and pharmacology*. 2014; 27(2): 163-7.
67. Wang W, Ji P, Riopelle RJ, Dow KE. Functional expression of corticotropin-releasing hormone (CRH) receptor 1 in cultured rat microglia. *Journal of neurochemistry*. 2002; 80(2): 287-94.
68. Schramm E, Waisman A. Microglia as central protagonists in the chronic stress response. *Neurology: Neuroimmunology & Neuroinflammation*. 2022; 9(6): e200023.
69. Chantong B, Kratschmar DV, Nashev LG, Balazs Z, Odermatt A. Mineralocorticoid and glucocorticoid receptors differentially regulate NF- κ B activity and pro-inflammatory cytokine production in murine BV-2 microglial cells. *Journal of neuroinflammation*. 2012; 9: 1-14.
70. Tanaka J, Fujita H, Matsuda S, Toku K, Sakanaka M, Maeda N. Glucocorticoid-andmineralocorticoidreceptors in microglial cells: The two receptors mediate differential effects of corticosteroids. *Glia*. 1997; 20(1): 23-37.
71. Carrillo-de Sauvage MÁ, Maatouk L, Arnoux I, Pasco M, Sanz Diez A, Delahaye M, et al. Potent and multiple regulatory actions of microglial glucocorticoid receptors during CNS inflammation. *Cell Death & Differentiation*. 2013; 20(11): 1546-57.
72. Nair A, Bonneau RH. Stress-induced elevation of glucocorticoids increases microglia proliferation through NMDA receptor activation. *Journal of neuroimmunology*. 2006; 171(1-2): 72-85.
73. Wang H, He Y, Sun Z, Ren S, Liu M, Wang G, et al. Microglia in depression: an overview of microglia in the pathogenesis and treatment of depression. *Journal of neuroinflammation*. 2022; 19(1): 132.
74. Zhu H, Guan A, Liu J, Peng L, Zhang Z, Wang S. Noteworthy perspectives on microglia in neuropsychiatric disorders. *Journal of Neuroinflammation*. 2023; 20(1): 223.
75. Hartmann S-M, Heider J, Wüst R, Fallgatter AJ, Volkmer H. Microglia-neuron interactions in schizophrenia. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2024; 18: 1345349.
76. Rodriguez JI, Kern JK. Evidence of microglial activation in autism and its possible role in brain underconnectivity. *Neuron glia biology*. 2011; 7(2-4): 205-13.
77. Sun Y, Qu Y, Zhu J. The relationship between inflammation and post-traumatic stress disorder. *Frontiers in Psychiatry*. 2021; 12: 707543.
78. Hori H, Kim Y. Inflammation and post-traumatic stress disorder. *Psychiatry and clinical neurosciences*. 2019; 73(4): 143-53.
79. Lee D-H, Lee J-Y, Hong D-Y, Lee E-C, Park S-W, Lee M-R, et al. Neuroinflammation in post-traumatic stress disorder. *Biomedicines*. 2022; 10(5): 953.
80. Salari S, Bagheri M. Advancements and Challenges in Preclinical Study Models of Neurodegenerative Brain Diseases: Alzheimer's and Parkinson's Diseases. *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*. 2024; 12(4): 81-96.
81. Loane DJ, Kumar A. Microglia in the TBI

brain: the good, the bad, and the dysregulated. *Experimental neurology.* 2016; 275: 316-27.

82. Al-Onaizi M, Al-Khalifah A, Qasem D, ElAli A. Role of microglia in modulating adult neurogenesis in health and neurodegeneration. *International journal of molecular sciences.* 2020; 21(18): 6875.

83. Justice NJ, Huang L, Tian J-B, Cole A, Pruski M, Hunt AJ, et al. Posttraumatic stress disorder-like induction elevates β -amyloid levels, which directly activates corticotropin-releasing factor neurons to exacerbate stress responses. *Journal of Neuroscience.* 2015; 35(6): 2612-23.

84. De Kloet C, Vermetten E, Geuze E, Lentjes E, Heijnen C, Stalla G, et al. Elevated plasma corticotrophin-releasing hormone levels in veterans with posttraumatic stress disorder. *Progress in brain research.* 2007; 167: 287-91.

85. Dieter JN, Engel SD. Traumatic brain injury and posttraumatic stress disorder: comorbid consequences of war. *Neuroscience insights.* 2019; 14: 1179069519892933.

86. Bahraini NH, Breshears RE, Hernández TD, Schneider AL, Forster JE, Brenner LA. Traumatic brain injury and posttraumatic stress disorder. *Psychiatric Clinics.* 2014; 37(1): 55-75.

87. Kim TD, Lee S, Yoon S. Inflammation in post-traumatic stress disorder (PTSD): a review of potential correlates of PTSD with a neurological perspective. *Antioxidants.* 2020; 9(2): 107.

88. Kim Y-K, Amidfar M, Won E. A review on inflammatory cytokine-induced alterations of the brain as potential neural biomarkers in post-traumatic stress disorder. *Progress in Neuro-psychopharmacology and biological Psychiatry.* 2019; 91: 103-12.

89. Brás JP, Bravo J, Freitas J, Barbosa MA, Santos SG, Summaville T, et al. TNF-alpha-induced microglia activation requires miR-342: impact on NF- κ B signaling and neurotoxicity. *Cell death & disease.* 2020; 11(6): 415.

90. Gessi S, Borea PA, Bencivenni S, Fazzi D, Varani K, Merighi S. The activation of μ -opioid receptor potentiates LPS-induced NF- κ B promoting an inflammatory phenotype in microglia. *FEBS letters.* 2016; 590(17): 2813-26.

91. Rhie SJ, Jung E-Y, Shim I. The role of neuroinflammation on pathogenesis of affective disorders. *Journal of exercise rehabilitation.* 2020; 16(1): 2.

92. Khairova RA, Machado-Vieira R, Du J, Manji HK. A potential role for pro-inflammatory cytokines in regulating synaptic plasticity in major depressive disorder. *International Journal of Neuropsychopharmacology.* 2009; 12(4): 561-78.

93. Felger JC, Lotrich FE. Inflammatory cytokines in depression: neurobiological mechanisms and therapeutic implications. *Neuroscience.* 2013; 246: 199-229.

94. Doroszkiewicz J, Groblewska M, Mroczko B. Molecular biomarkers and their implications for the early diagnosis of selected neurodegenerative diseases. *International Journal of Molecular Sciences.* 2022; 23(9): 4610.

95. Wang W, Wang R, Xu J, Qin X, Jiang H, Khalid A, et al. Minocycline attenuates stress-induced behavioral changes via its anti-inflammatory effects in an animal model of post-traumatic stress disorder. *Frontiers in psychiatry.* 2018; 9: 558.

96. Gerges MA, Abdel-Kareem AO, El-Nimr SA, Abd-Elhamid N, Metwally WS. An Overview about Nuclear Factor Kappa B. *NeuroQuantology.* 2022; 20(11): 8259.

97. Liu T, Zhang L, Joo D, Sun S-C. NF- κ B signaling in inflammation. *Signal transduction and targeted therapy.* 2017; 2(1): 1-9.

98. Al-Hasnawi HNG, Pouresmaeil V, Davoodi-Dehaghani F, Rahban S, Pouresmaeil A, Homayouni Tabrizi M. Synthesis folate-linked chitosan-coated quetiapine/BSA nano-carriers as the efficient targeted anti-cancer drug delivery system. *Molecular Biotechnology.* 2024; 66(9): 2297-307.

99. Valenza M, Facchinetto R, Torazza C, Ciarla C, Bronzuoli MR, Balbi M, et al. Molecular signatures of astrocytes and microglia maladaptive responses to acute stress are rescued by a single administration of ketamine in a rodent model of PTSD. *Translational Psychiatry.* 2024; 14(1): 209.

100. Gupta S, Guleria RS. Involvement of nuclear factor- κ B in inflammation and neuronal plasticity associated with post-traumatic stress disorder. *Cells.* 2022; 11(13): 2034.

101. Pace TW, Wingenfeld K, Schmidt I, Meinlschmidt G, Hellhammer DH, Heim CM. Increased peripheral NF- κ B pathway activity in women with childhood abuse-related posttraumatic stress disorder. *Brain, behavior, and immunity.* 2012; 26(1): 13-7.

102. Jones ME, Lebonville CL, Barrus D, Lysle DT. The role of brain interleukin-1 in stress-enhanced fear learning.

- Neuropsychopharmacology. 2015; 40(5): 1289-96.
103. Jones ME, Lebonville CL, Paniccia JE, Balentine ME, Reissner KJ, Lysle DT. Hippocampal interleukin-1 mediates stress-enhanced fear learning: A potential role for astrocyte-derived interleukin-1 β . Brain, Behavior, and Immunity. 2018; 67: 355-63.
104. Torres-Rodríguez O, Rivera-Escobales Y, Castillo-Ocampo Y, Velazquez B, Colón M, Porter JT. Purinergic P2X7 receptor-mediated inflammation precedes PTSD-related behaviors in rats. Brain, behavior, and immunity. 2023; 110: 107-18.
105. Lai S, Wu G, Jiang Z. Glycyrrhizin treatment facilitates extinction of conditioned fear responses after a single prolonged stress exposure in rats. Cellular Physiology and Biochemistry. 2018; 45(6): 2529-39.
106. Wang S-C, Lin C-C, Chen C-C, Tzeng N-S, Liu Y-P. Effects of oxytocin on fear memory and neuroinflammation in a rodent model of posttraumatic stress disorder. International journal of molecular sciences. 2018; 19(12): 3848.
107. Xu X, Yin D, Ren H, Gao W, Li F, Sun D, et al. Selective NLRP3 inflammasome inhibitor reduces neuroinflammation and improves long-term neurological outcomes in a murine model of traumatic brain injury. Neurobiology of disease. 2018; 117: 15-27.
108. Nagarajan N, Jones BW, West PJ, Marc R, Capecchi M. Corticostriatal circuit defects in Hoxb8 mutant mice. Molecular psychiatry. 2018; 23(9): 1868-77.
109. Passos IC, Vasconcelos-Moreno MP, Costa LG, Kunz M, Brietzke E, Quevedo J, et al. Inflammatory markers in post-traumatic stress disorder: a systematic review, meta-analysis, and meta-regression. The Lancet Psychiatry. 2015; 2(11): 1002-12.
110. Yang J-J, Jiang W. Immune biomarkers alterations in post-traumatic stress disorder: a systematic review and meta-analysis. Journal of affective disorders. 2020; 268: 39-46.
111. Kühn S, Gallinat J. Gray matter correlates of posttraumatic stress disorder: a quantitative meta-analysis. Biological psychiatry. 2013; 73(1): 70-4.
112. Brisch R, Wojtylak S, Saniotis A, Steiner J, Gos T, Kumaratilake J, et al. The role of microglia in neuropsychiatric disorders and suicide. European archives of psychiatry and clinical neuroscience. 2022; 1-17.
113. Bernstein H-G, Steiner J, Bogerts B. Glial cells in schizophrenia: pathophysiological significance and possible consequences for therapy. Expert review of neurotherapeutics. 2009; 9(7): 1059-71.
114. Rahimian R, Wakid M, O'Leary LA, Mechawar N. The emerging tale of microglia in psychiatric disorders. Neuroscience & Biobehavioral Reviews. 2021; 131: 1-29.
115. Rohan Walker F, Nilsson M, Jones K. Acute and chronic stress-induced disturbances of microglial plasticity, phenotype and function. Current drug targets. 2013; 14(11): 1262-76.
116. Hinwood M, Tynan RJ, Charnley JL, Beynon SB, Day TA, Walker FR. Chronic stress induced remodeling of the prefrontal cortex: structural reorganization of microglia and the inhibitory effect of minocycline. Cerebral cortex. 2013; 23(8): 1784-97.
117. Sun R, Zhang Z, Lei Y, Liu Y, Lu Ce, Rong H, et al. Hippocampal activation of microglia may underlie the shared neurobiology of comorbid posttraumatic stress disorder and chronic pain. Molecular pain. 2016; 12: 1744806916679166.
118. Li S, Liao Y, Dong Y, Li X, Li J, Cheng Y, et al. Microglial deletion and inhibition alleviate behavior of post-traumatic stress disorder in mice. Journal of neuroinflammation. 2021; 18: 1-14.
119. Torres-Rodriguez O, Ortiz-Nazario E, Rivera-Escobales Y, Velazquez B, Colón M, Porter JT. Sex-dependent effects of microglial reduction on impaired fear extinction induced by single prolonged stress. Frontiers in Behavioral Neuroscience. 2023; 16: 1014767.
120. Kobayashi K, Imagama S, Ohgomori T, Hirano K, Uchimura K, Sakamoto K, et al. Minocycline selectively inhibits M1 polarization of microglia. Cell death & disease. 2013; 4(3): e525-e.
121. Han Y-Y, Jin K, Pan Q-S, Li B, Wu Z-Q, Gan L, et al. Microglial activation in the dorsal striatum participates in anxiety-like behavior in Cyld knockout mice. Brain, behavior, and immunity. 2020; 89: 326-38.
122. McCullumsmith RE, Hammond JH, Shan D, Meador-Woodruff JH. Postmortem brain: an underutilized substrate for studying severe mental illness. Neuropsychopharmacology. 2014; 39(1): 65-87.
123. Mondelli V, Vernon AC, Turkheimer F, Dazzan P, Pariante CM. Brain microglia in psychiatric disorders. The Lancet Psychiatry. 2017; 4(7): 563-72.