

۱-۳- یادگیری حرکتی و پلاستی سیتی

مقدمه

در سال ۲۰۰۴، آکادمی علوم پزشکی^۱ (۲۰۰۴) اهمیت علوم توانبخشی عصبی را اعلام کرد: "طی دو دهه گذشته پیشرفت‌های بی‌سابقه‌ای در علوم اعصاب حاصل شده‌است که درک ما از میزان بهبودی کارکردی که پس از آسیب عصبی ممکن است بروز نماید و این که چگونه بهبودی رخ می‌دهد و چگونه می‌توان آن را ارتقا داد، حاصل شده است". کشف مایلستون^۲ پلاستی سیتی مغز در حیوانات و انسان‌ها، نظریه‌ها و مفاهیم مورد استفاده در پژوهش‌های توانبخشی عصبی و تبدیل آن‌ها به عمل را تحت تاثیر قرار داده است. اکنون روشن است که مغز انسان به جای این که ثابت و غیرقابل تغییر باشد، دارای توانایی پلاستی سیتی دائمی در طول عمر است. هدف در توانبخشی عصبی به حداقل رساندن ناتوانی کارکردی^۳ و بهبودی حرکتی کارکردی مطلوب است که این امر از طریق مدولاسیون تغییرات منعطف (پلاستیک)^۴ در مغز به دست می‌آید که یک توانایی ذاتی برای یادگیری و بازآموزی مهارت‌های مادام‌العمری است (کای^۵ و همکاران، ۲۰۱۱). پلاستی سیتی عصبی به عنوان "توانایی سیستم عصبی برای پاسخ به محرک درونی و بیرونی از طریق سازماندهی ساختار، کارکرد و ارتباطات تعریف شده است".

فرضیه‌های مزبور به ساختار و کارکرد مغز و توانایی آن برای بازسازی و ترمیم، در ابتدا از مطالعات روی قورباغه‌ها و ستاره‌دریایی شکل گرفته است. تا همین اواخر، دیدگاه عمومی این بود که پس از ضایعه سیستم عصبی مرکزی امکان تغییر یا ترمیم در سیستم عصبی مرکزی وجود ندارد. با این حال از نظر بالینی درمانگران دریافتند که بسیاری از بیماران بهبود یافته و آموختند که چگونه دوباره حرکت کنند، همان‌طور که قبلاً آن را انجام می‌دادند یا از راهبردهای دیگر استفاده می‌کردند (بوبت، ۱۹۹۰). در حال حاضر تحقیقات علمی نشان داده است که ساختار مغز تغییر می‌کند و با نحوه استفاده از آن در بیماران سکته‌مغزی سازگار می‌شود و بین رفتار و ساختار مغز پس از ضایعات سیستم عصبی مرکزی ارتباط وجود دارد (وارد و کوهن، ۲۰۰۴). مغز انسان دارای توانایی‌های زیادی برای یادگیری است و یادگیری منجر به تغییرات ساختاری و کارکردی

¹ Academi of Medical Sciences

⁴ Plastic

² Milestone

⁵ Cai

³ Functional disability

هم در سیستم عصبی مرکزی آسیب دیده و هم سالم می گردد. رفتار تکراری باعث اکتساب مهارت حرکتی در نتیجه ایجاد تغییرات در ساختار و کارکرد عصبی می شود (ریچاردز^۱ و همکاران، ۲۰۰۸). بهبودی کارکردی پس از ضایعات سیستم عصبی مرکزی یک فرآیند بازآموزی^۲ است؛ حین درمان، بیماران از طریق تمرین تسهیل می شوند تا بتوانند توانایی تولید رفتار از دست رفته پس از آسیب به سیستم عصبی مرکزی را باز اکتساب^۳ کنند. مغز انسان به همان فرآیندهای بیولوژی عصبی^۴ که برای اکتساب رفتارها به طور اولیه مورد استفاده قرار می گیرد، وابسته است. ممکن است سوال شود که آیا سیستم عصبی مرکزی با آسیب شبکه های حرکتی حیاتی می تواند به آموزش حرکتی همانند یک مغز سالم، پاسخ مجدد بدهد یا نه. در هفته های اول پس از سکتهمغزی یا ضایعه سیستم عصبی مرکزی، آمادگی مغز به واکنش افزایش می یابد زیرا مکانیسم های بازسازی مجدد^۵ مغز تنظیم می شود (ریچاردز و همکاران، ۲۰۰۸). شناخت یادگیری وابسته به پلاستی سیتی عصبی در مغز سالم برای ما بینش ارزشمندی را درباره این که چگونه مغز آسیب دیده حین توانبخشی تطبیق می یابد، فراهم می کند. این مسئله بعدا با جزئیات بیشتری در این فصل مورد بحث قرار می گیرد.

پیشرفت در فناوری هایی که قادر به کشف غیرتهاجمی^۶ مغز انسان است، درک ما را از سازماندهی مجدد مغز پس از ضایعه سیستم عصبی مرکزی افزایش می دهد. این روش های تصویربرداری به دو دسته کلی تقسیم می شود؛ تصویربرداری کارکردی و ساختاری (فانتینی و آگاروال^۷، ۲۰۰۱).

تصویربرداری کارکردی^۸ نشان دهنده طیف وسیعی از تکنیک های اندازه گیری است که هدف آن ها استخراج اطلاعات کمی^۹ درباره کارکرد فیزیولوژی از داده های مبتنی بر تصویر مانند تصویربرداری کارکردی رزونانس مغناطیسی، برش نگاری با گسیل پوزیترون، تحریک مغناطیسی مغز، نوار مغز و مگنتوانسفالوگرافی می باشد. تکنیک های تصویربرداری کارکردی می تواند جنبه های مختلف فعالیت مغز به صورت تصاویر خاصی از تغییرات در ساختار سیستم عصبی

¹ Richards

² Relearning process

³ Reacquire

⁴ Neurobiological

⁵ Remodeling

⁶ Noninvasive exploration

⁷ Fantini & Aggarwal

⁸ Functional imaging

⁹ Quantitative information

مرکزی را نشان دهند که می‌تواند با تغییر در توانایی کارکردی بیمار پس از ضایعه سیستم عصبی مرکزی مرتبط باشد (وارد و کوهن، ۲۰۰۴). این نوع پژوهش محدودیت‌هایی دارد زیرا نیاز است بیماران سر خود را نگه دارند تا عکس گرفته شود. این در حالی است که روش‌های جدید مانند طیف‌نگاری کارکردی مادون قرمز نزدیک^۱ این محدودیت‌ها را رفع کرده است.

تصویربرداری ساختاری^۲، نشان‌دهنده طیف وسیعی از روش‌هایی است که اطلاعات آناتومیکی را برای ما فراهم می‌آورد. این روش‌ها عبارتند از: استفاده از اشعه ایکس^۳، توموگرافی کامپیوتری^۴، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی^۵ و تراکتوگرافی تصویربرداری تنسور انتشاری^۶. تراکتوگرافی تصویربرداری تنسور انتشاری، یک تکنیک جدید است که امکان تجسم غیرتهاجمی^۷ ترک‌های فیبرها را در مغز انسان زنده فراهم می‌کند. (شکل ۲۷-۱).

این واقعیت که ما توانایی برای یادگیری داریم، نشان می‌دهد که کارکرد سیستم عصبی در سطح سیناپسی می‌تواند با تاثیرات خارجی تغییر نماید. پلاستی سیتی در تمام سطوح سیستم عصبی مرکزی در سیستم عصبی محیطی و همچنین در عضله وجود دارد (به بخش واحد حرکتی و پلاستی سیتی فیبر عضله مراجعه نمایید). تطبیقات منعطف در سراسر طول زندگی رخ می‌دهد؛ در سطح موضعی - سلولی ممکن است باعث تغییر قابل توجهی در آکسون‌ها، دندریت‌ها، محیط داخلی، سیناپس‌ها و ترنس‌میترها گردد. یادگیری احتمالاً باعث تغییرات سیناپسی در بسیاری از بخش‌های سیستم عصبی مرکزی با توزیع خاصی در مورد آن چه که آموخته می‌شود، می‌گردد (برودال، ۲۰۱۰). به عنوان مثال، یادگیری مهارت حرکتی با سیناپتوژنز^۸ و پلاستی سیتی دندریتی نخاع در قشر حرکتی و مخچه و نیز پلاستی سیتی نقشه حرکتی مرتبط است (کلیم و همکاران ۲۰۰۳، ادکینز^۹ و همکاران ۲۰۰۶). به نظر می‌رسد تجربه، ساختار عصبی و کارآمدی سیناپسی و بازسازی مجدد عروقی و پردازش‌های سیگنال و همچنین میزان نوروژنز^{۱۰} را تغییر می‌دهد (کلیم و جونز^{۱۱}، ۲۰۰۸).

¹ Functional Near- Infarcted Spectroscopy (fNIRS)

² Structural imaging

³ X-ray

⁴ Computed Tomography (CT)

⁵ Magnetic resonance imaging (MRI)

⁶ Diffusion tensor imaging tractography

⁷ Noninvasive visualization

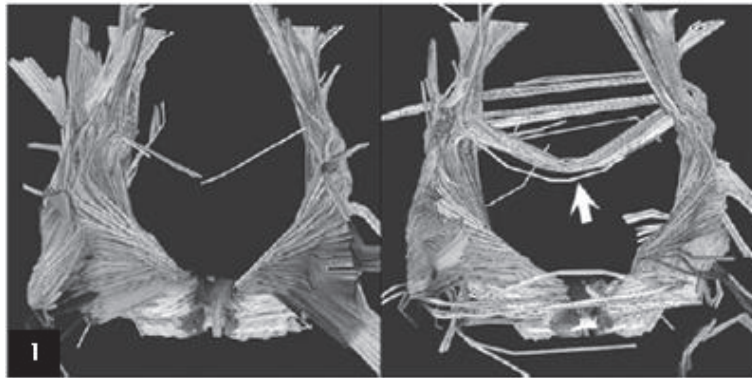
⁸ Synaptogenesis

⁹ Adkins

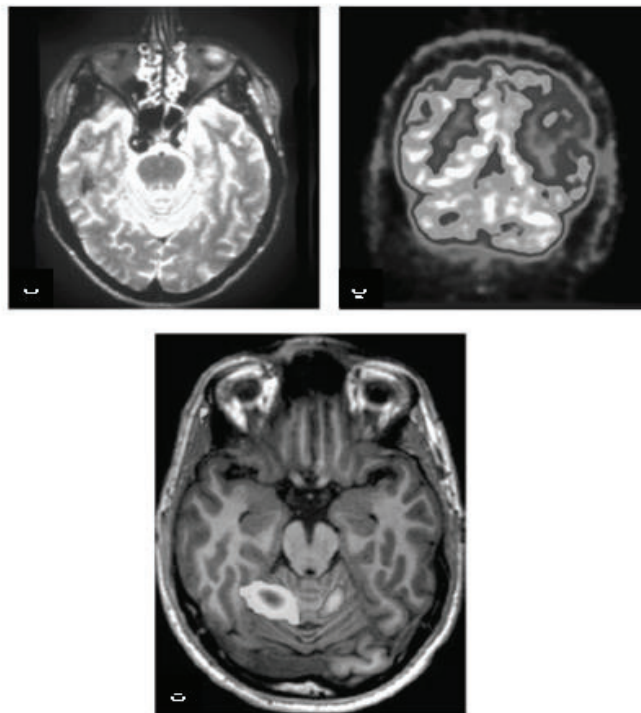
¹⁰ Neurogenesis

¹¹ Jones

پلاستی سیتی عصبی را نمی‌توان بدون درک اولیه شیوه‌هایی که در یادگیری در مغز بدون آسیب رخ می‌دهد، شرح داد. توانبخشی عصبی بر اساس این فرض است که اصول یادگیری حرکتی برای بهبودی حرکتی پس از آسیب اعمال می‌شود و این آموزش می‌تواند به بهبودی دایمی در کارکرد حرکتی بیماران با نقایص حرکتی منجر شود. بعضی اصول پایه یادگیری حرکتی از مطالعات آزمایشگاهی در افراد سالم که در ادامه بحث خواهد شد، برگرفته است.



شکل ۲۷-۱. تکنیک‌های تصویربرداری غیرتهاجمی (آ) تصویربرداری تنسور انتشاری (تراکتوگرافی) نمونه‌ای از روش بررسی غیرتهاجمی مغز است که در آن آناتومی مغز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هر دو شکل یک بخش از آناتومی مغز را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تفاوت در اندازه مسیر فیبرهای (ترکت‌های) بین دو گروه است (ادامه دارد).



شکل ۲۷-۱. (ب) مگنتوانسفالوگرافی (پ) برش‌نگاری با گسیل پوزیترون (ت) تصویربرداری کارکردی رزونانس مغناطیسی

یادگیری حرکتی

سیستم حرکتی انسان، ظرفیت یادگیری از طریق تمرین و تجربه را دارا می‌باشد. هنگامی که مغز می‌آموزد تا یک حرکت را انجام دهد، بین دستورات حرکتی و بازخورد حسی ارتباط برقرار می‌شود. نتیجه چنین یادگیری، یک مدل درونی (جدید) تکلیف خاص است که برای پیش‌بینی پیامدهای حسی کنش خود-تولیدی^۱ استفاده می‌کند. یادگیری حرکتی می‌تواند مدل‌های داخلی را ایجاد نماید که نشان‌دهنده تطبیق دقیق بین اطلاعات ادراک شده حسی و حرکتی است (ولپرت و همکاران، ۱۹۹۵). الگوی حرکتی پس از این که آموخته می‌شود، ذخیره خواهد شد و در بافتار مناسب بازگردانده می‌شود و مورد استفاده قرار می‌گیرد (باستین، ۲۰۰۸). به نظر می‌رسد یادگیری و ساخت این مدل‌های داخلی به سیگنال‌های خطا مبتنی بر بازخورد از اجرای قبلی متکی است. آزمایشات نشان می‌دهد که مدل‌های داخلی که برای یک نوع حرکت آموخته می‌شود، می‌تواند به حرکت دیگر نیز منتقل شود: به گفته کراکر^۲ (۲۰۰۶)؛ "اهمیت مفهوم مدل‌های داخلی برای توانبخشی این است که مدل را می‌توان به صورت حالت تغییرات اندام به‌روز کرد. بنابراین توانبخشی نیاز به تاکید بر تکنیک‌هایی دارد که باعث ایجاد مدل‌های مناسب داخلی می‌شود و تنها تکرار حرکات مدنظر نمی‌باشد".

یادگیری حرکتی یک اصطلاح بدون تعریف قابل قبول است. با این حال لی و اسمیت^۳ (۲۰۰۸) یادگیری حرکتی را به عنوان "فرآیندی که از طریق آن ظرفیت کنترل حرکتی مهارت‌یافته در حافظه بازنمایی می‌شود توصیف کرده است. حافظه حرکتی، محصول یادگیری است." یادگیری حرکتی شامل دو نوع است (کیتاگو^۴ و کراکر، ۲۰۱۳):

- تطبیق حرکتی
- اکتساب مهارت

تطبیق حرکتی یکی از مولفه‌های خاص یادگیری مهارت حرکتی است (کیتاگو و کراکر ۲۰۱۳، ریزمن^۵ و همکاران، ۲۰۱۰). طبق نظر باستین (۲۰۰۸)، تطبیق را می‌توان به عنوان "فرآیند تنظیم حرکت با الزامات جدید از طریق تمرین آزمون و خطا" تعریف کرد. یکی از

¹ Self-generate action

² Krakauer

³ Lee & Schmidt

⁴ Kitago

⁵ Reisman

ویژگی‌های کلیدی تطبیق این است که تمرین بیشتر بدون الزام جدید برای بازگشت حرکت به حالت اولیه لازم است. بنابراین تطبیق حرکتی یک "فرآیند یادگیری حرکتی کوتاه مدت است" (باستین، ۲۰۰۸). حرکات کارآمد به طور گسترده‌ای به فرآیند تطبیق متکی است و به نظر می‌رسد که در رفتار انسان و برای توانبخشی مهم است. تطبیق، سیستم عصبی را با کنترل انعطاف‌پذیر مهم که به دنبال آن تغییرات قابل‌پیش‌بینی در الزامات تکلیف را می‌توان به حساب آورد، تعبیر می‌کند. بنابراین الگوهای حرکتی "آموخته‌شده" را می‌توان در شرایط مختلف اتخاذ کرد (باستین، ۲۰۰۸).

- اعتقاد بر این است که توانایی پیش‌بینی خطا (یعنی تفاوت بین نتایج پیش‌بینی حرکتی و نتیجه واقعی حرکت) نیروی محرک تطبیق است. یادگیری تطبیقی توسط مخچه انجام می‌شود و آسیب به مخچه نقص در فرآیندهای تطبیقی را سبب می‌شود (شادمهر^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). این امر در بسیاری از انواع حرکت از جمله حرکت چشم‌ها، حرکت دست‌ها، راه رفتن و تعادل نشان داده شده است (باستین، ۲۰۰۸) (به نقش مخچه در یادگیری حرکتی مراجعه نمایید).

ویژگی‌های خاص خطاها (به عنوان مثال اندازه خطا) ممکن است بر چگونگی روند رخ دادن یادگیری تاثیر بگذارد (کریسکی‌ماگنا-همینگر^۲ و همکاران، ۲۰۱۰) مطالعات نشان داده است که خطاهای بزرگتر در طول فرآیند یادگیری، کمترین انتقال یادگیری به محیط‌های طبیعی را به همراه دارد (اربان دی‌اکسیوری^۳ و همکاران، ۲۰۱۱). این امر توسط ریزمن و همکارانش (ریزمن و همکاران، ۲۰۰۷) که از تکلیف تردمیل با تسمه کمربند استفاده کرده‌اند (یک کمربند محکم‌تر از دیگری بسته می‌شود) حمایت می‌شود و نشان می‌دهد که معمول‌سازی تدریجی تغییرات در سرعت کمربند در افزایش میزان تطبیق حائز اهمیت است. در بزرگسالان یادگیری از خطاهای تدریجی کوچک، نه از خطاهای بزرگ، رخ می‌دهد.

یادگیری یک مهارت با تغییراتی مرتبط است که به بهبود عملکرد در طول زمان منجر می‌شود (برای مثال یادگیری راندن یک دوچرخه) (شمولوف^۴ و همکاران، ۲۰۱۲). ادکینز و

¹ Shadmehr

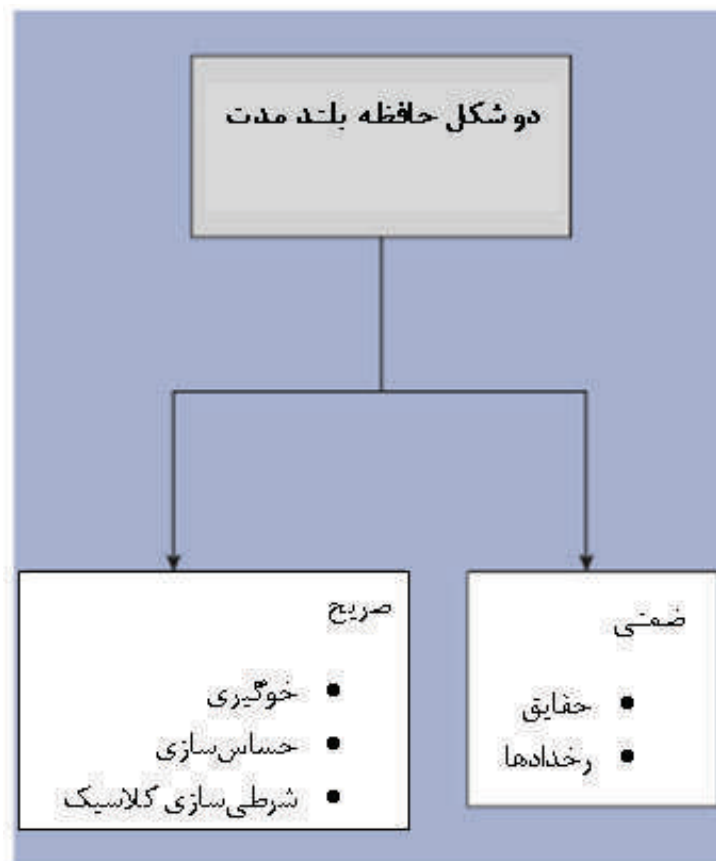
² Criscimagna-Hemminger

³ Orban de Xivery

⁴ Shmuelof

همکارانش (ادکینز و همکاران، ۲۰۰۶) آموزش مهارت^۱ را تعریف می‌کنند که عبارتست از "اکتساب و اصلاح متعاقب ترکیب‌های جدید توالی‌های حرکتی". اکتساب مهارت حرکتی به فرآیندی گفته می‌شود که در آن حرکات تولید شده به تنهایی یا در یک توالی از طریق تمرین تکراری و تعامل در محیط با حداقل تلاش انجام می‌شود (دویون و بنالی^۲، ۲۰۰۵).

کندل و همکارانش (۲۰۱۳) بیان می‌کنند که رفتار از طریق یادگیری شکل می‌گیرد و حافظه بلندمدت که نتیجه یادگیری است، حداقل دارای دو فرم می‌باشد (شکل ۲۸-۱).



شکل ۲۸-۱. دو شکل حافظه بلند مدت

¹ Skill trainings

² Doyon & Benali

حافظه ضمنی^۱ (غیراخباری^۲ یا رویه‌ای^۳)، حافظه ناخودآگاه برای مهارت‌های ادراکی و حرکتی است (یعنی حافظه‌ای که آگاهانه به خاطر آورده نمی‌شود، مانند نحوه راندن دوچرخه)؛ که این امر غیر عمدی است. حافظه ضمنی به توجه کمتری نیاز دارد و برای بازآموزی مهارت‌های روزمره اساسی است و هنگامی که بیمار از مولفه‌های تکالیف آگاهی ندارد، رخ می‌دهد. سیستم‌های حافظه و یادگیری ضمنی، نواحی لوب تمپورال داخلی، قشر پری‌فرونتال خلفی-جانبی، مخچه، هسته‌های قاعده‌ای و قشر حسی-پیکری را درگیر می‌کند. به علت توزیع گسترده آن، توانایی برای یادگیری به طور ضمنی معمولاً به طور کامل پس از سکته مغزی از دست نمی‌رود (لوین^۴ و همکاران، ۲۰۰۹). حافظه ضمنی اشکال بسیاری دارد- خوگیری^۵، حساسیت‌زدایی^۶ و شرطی‌سازی کلاسیک^۷- که بیشتر در مهره‌داران و بی‌مهرگان بررسی شده است اما در انسان پیچیده‌تر است.

- خوگیری یک فرآیند یادگیری است که در آن واکنش به محرک پس از تکرار در معرض قرار گرفتن کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که یک حیوان یا انسان می‌تواند بی‌اعتنایی^۸ به محرک را در نتیجه در معرض گذاری تکراری آن محرک یاد بگیرد. خوگیری شامل کاهش انتقال سیناپسی پیش‌سیناپسی است. در واقع قدرت سیناپسی در نتیجه کاهش تعداد وزیکول‌های ترنسمیتر آزاد شده از پایانه‌های پیش‌سیناپسی نورون‌های حسی، کاهش می‌یابد. تغییرات منعطف در قدرت کارکردی اتصالات سیناپسی، مکانیسم‌های سلولی ایجادکننده حافظه کوتاه‌مدت برای خوگیری را تشکیل می‌دهد. یادگیری می‌تواند منجر به تغییر در قدرت سیناپسی شود. حافظه دو شکل کوتاه‌مدت و بلندمدت دارد و مدت ذخیره حافظه کوتاه‌مدت با مدت تغییر سیناپسی تعیین می‌شود.
- حساسیت‌زدایی شامل افزایش پیش‌سیناپسی انتقال سیناپسی و در نتیجه واکنش‌های رفلکسی ناشی از استفاده از محرک‌های مضر است. حساسیت‌زدایی از خوگیری پیچیده‌تر است زیرا تحریک یک مسیر، تغییر در مسیرهای دیگر را سبب می‌شود. تکرار محرک، تغییر کوتاه‌مدت یا بلندمدت را تعیین می‌کند.

¹ Implicit

² Nondeclarative

³ Procedural

⁴ Levin

⁵ Habituation

⁶ Sensitization

⁷ Classical conditioning

⁸ Ignore

• شرطی سازی کلاسیک، یادگیری از طریق ارتباط ایده‌ها است - یادگیری ارتباطی^۱ - و شامل دو محرک جفت شده است. این بدان معنی است که یک حیوان یاد می‌گیرد تا رویدادهای محیطی را پیش‌بینی کند (کندل و همکاران، ۲۰۱۳) که وابسته به فعالیت در هر دو سلول پیش‌سیناپسی و پس‌سیناپسی است و شامل تسهیل پیش‌سیناپسی از انتقال سیناپسی است. مولفه پس‌سیناپسی، سیگنال برگشت‌پذیری^۲ از نورون حسی است. سه سیگنال در یک نورون حسی باید با همگرا شوند تا افزایش قابل توجهی در انتشار نوروترنسمیتر ایجاد کند که این امر با شرطی سازی کلاسیک رخ می‌دهد؛ دو تا از سیگنال‌ها توسط پتانسیل عمل با فعال کردن فرآیندهای شیمیایی برای محرک‌های شرطی و غیرشرطی ایجاد می‌شوند. سومین سیگنال، سیگنال برگشت‌پذیر از نورون حسی است که از طریق آن سلول پس‌سیناپسی با محرک غیرشرطی به طور مناسب فعال می‌شود. این اشکال مختلف حافظه ضمنی با یکدیگر در تعامل هستند و ممکن است یکدیگر را به صورت طولانی‌مدت‌تری^۳ تقویت کنند.

حافظه صریح (اخباری)^۴، یادآوری^۵ آگاهانه تجربیات قبلی و کسب دانش اخباری مولفه‌های یک کنش حرکتی است. یادگیری صریح هنگامی رخ می‌دهد که بیمار از مولفه‌های مهارت آموخته شده آگاهی داشته باشد. دستورالعمل صریح^۶ قبل از تمرین یک تکلیف به روشنی بیان می‌شود، به عنوان مثال هنگامی که درمانگر بیمار را از مراحل ضروری ایستادن از حالت نشستن مطلع می‌کند. بیمار می‌تواند به آگاهی صریح حین انجام یک تکلیف از طریق تمرین بدون دستور حرکتی انجام آن دست یابد مانند هنگامی که بیمار آگاهانه از مراحل موردنیاز برای ایستادن از وضعیت نشسته آگاه می‌باشد. یادگیری و حافظه صریح مربوط به لوب تمپورال داخلی و قشر پری‌فرونتال خلفی - جانبی است (لوین و همکاران ۲۰۰۹، کندل و همکاران ۲۰۱۳).

¹ Associative learning

² Retrograde

³ Longer-lasting

⁴ Declarative

⁵ Recollection

⁶ Explicit instruction

به طور سنتی، درمانگران اغلب از استدلال‌های منطقی^۱ و دستورالعمل‌های کلامی بسیاری استفاده می‌کنند تا بیماران در یادگیری حرکتی دخیل شوند (یعنی آن‌ها از اشکال صریح یادگیری حرکتی استفاده می‌کند). در بیماران با آسیب مغزی این رویکرد اغلب امکان‌پذیر نیست.

حین یادگیری، تغییرات فیزیولوژی برگشت‌پذیر در انتقال سیناپسی در سیستم عصبی رخ می‌دهد؛ برای این که یادگیری اتفاق بیفتد، این تغییرات باید تثبیت شود^۲ (لمپرت و لی دوکس^۳، ۲۰۱۳). حافظه، ظرفیت حفظ اطلاعات آموخته‌شده است و به دو نوع حافظه کوتاه‌مدت و بلندمدت تقسیم می‌شود. از تغییرات موقت و برگشت‌پذیر^۴ به عنوان حافظه کوتاه‌مدت^۵ یا حافظه کاری^۶ و تغییرات مداوم به عنوان حافظه بلندمدت^۷ یاد می‌شود (لمپرت و لی دوکس، ۲۰۰۴).

برخلاف تطبیق که ممکن است طی یک جلسه رخ بدهد، اکتساب مهارت حرکتی تنها از طریق تمرین زیاد پس از چندین روز، هفته یا حتی سال بسته به پیچیدگی تکلیف به دست می‌آید (کیتاگو و کراکر، ۲۰۱۳). مغز ابتدا حافظه کوتاه‌مدت را پردازش و ذخیره می‌کند که با تغییرات منعطفی که از چند ثانیه تا چند دقیقه با تغییر در غشای پیش‌سیناپسی طول می‌کشد همراه است. با این وجود حافظه بلندمدت ممکن است تا چندین هفته طول بکشد و به علت تغییر در غشای پس‌سیناپسی ایجاد می‌شود. هر دو تغییرات پیش و پس سیناپسی، پتانسیل کوتاه‌مدت^۸ نامیده می‌شود (کندل و همکاران، ۲۰۱۳). تغییراتی که ایجاد آن ماه‌ها یا سال‌ها به طول می‌انجامد با تغییر بیان ژن در هسته‌های سلولی مرتبط است که تقویت بلندمدت^۹ نامیده می‌شود (کندل و همکاران، ۲۰۱۳). تقویت بلندمدت قشر برای ارتقا درونداد حسی، تشکیل حافظه و یادگیری حیاتی است (کارمیکال^{۱۰}، ۲۰۱۰).

تثبیت^{۱۱} حافظه به تثبیت یا افزایش مهارت حرکتی که این امر به عنوان یادگیری خاموش^{۱۲} شناخته می‌شود. تثبیت یک فرآیند عصبی است که شامل گذار تدریجی از حافظه کوتاه‌مدت به حافظه بلند مدت است؛ این فرآیند در سطح سیناپسی شروع می‌شود، به همین علت سیستم

¹ Rational arguments

² Consolidate

³ Lamprecht & Le Doux

⁴ Reversible

⁵ Short-term memory (STM)

⁶ Working memory

⁷ Long-term memory (LTM)

⁸ Short-term potentiation (STP)

⁹ Long-term potentiation (LTP)

¹⁰ Carmichael

¹¹ Consolidation

¹² Off-line learning

عصبی مرکزی شروع به ایجاد مسیرهای جدید می‌کند و می‌تواند از چند روز تا چندین سال به طول بینجامد. خواب بعد از تمرین مهارت حرکتی، محیطی را در سیستم عصبی مرکزی فراهم می‌کند که باعث می‌شود مکانیسم‌های مولکولی و سلولی متعددی گسترش یابند که این امر افزایش تثبیت حافظه را سبب می‌شود (سینگکون و بوید^۱، ۲۰۰۹). در بزرگسالان سالم جوان نشان داده شده است که یادگیری و حافظه صریح از طریق خواب افزایش می‌یابد. شواهد جدید نشان داده است که افراد با آسیب مغزی از خواب برای تثبیت خاموش یادگیری مهارت حرکتی صریح و ضمنی سود می‌برند (سینگکون و بوید، ۲۰۰۹).

در نظر گرفتن تکلیف مرتبط با اهداف درمانی و همچنین در نظر گرفتن مراجع در فرآیند انتخاب هدف انگیزش را افزایش می‌دهد. نقش فرد در ارتباط با جامعه، خانواده، روابط اجتماعی، فرصت‌ها^۲، محدودیت‌ها^۳، اهداف، خواسته‌ها و نیازها برای این که چگونه فرد رشد می‌کند و یاد می‌گیرد مهم است. چگونه افراد از بدن و ذهن خود استفاده می‌کنند تا سیستم عصبی مرکزیشان را شکل دهند. حرکت، فعالیت‌ها، راهبردها و الگوهای حرکتی، ارتباطات سیستم عصبی مرکزی را تعیین می‌کند.

پلاستی سیتی عصبی

کید و همکارانش (۱۹۹۲) اظهار داشتند که "پلاستی سیتی عصبی مفهوم مبتنی بر توانایی سیستم عصبی مرکزی برای انطباق، بازسازی و سازماندهی مجدد خود در ارتباط با فرم مولکولی و کارکرد آن است". کید مفهوم شکل - کارکرد^۴ را برای تقویت وابستگی متقابل^۵ بین شکل (ساختار) و کارکرد معرفی می‌کند. تعامل بین شکل و کارکرد به انسان فرصت رشد و برآوردن نیازهای کارکردی را فراهم می‌سازد. تطبیق منعطف (پلاستیک) وابسته به استفاده و نتیجه تعامل ما با محیط است.

پلاستی سیتی عصبی روش‌های متعددی برای بیان خود در سیستم عصبی مرکزی سالم و آسیب‌دیده دارد و در بسیاری از سطوح مولکولی برای سازماندهی مجدد قشر رخ می‌دهد (جانسون^۶، ۲۰۱۱). برودال (۲۰۱۰) توصیف می‌کند که چگونه داده‌های تجربی نشان می‌دهد که

¹ Siengsukon & Boyd

² Possibilities

³ Limitations

⁴ Form-function

⁵ Interdependence

⁶ Johansson

استفاده وابسته به پلاستی سیتی سیناپسی پایه یادگیری و حافظه است. پلاستی سیتی سیناپسی به این معنی است که پتانسیل عمل پیش سیناپسی منجر به افزایش انتشار انتقال دهنده‌های عصبی می‌شود و سلول پس سیناپسی پاسخ خود را به میزان نوروترنسمیترها یا هر دو تغییر می‌دهد. یک پیش نیاز برای تغییر سلول پس سیناپسی این است که اطلاعات حسی دقیق و ترنسمیترهای مدوله کننده (به عنوان مثال انتقال اطلاعات درباره آگاهی و انگیزش)، سیناپس‌ها را در همان زمان لحظه‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهد. این امر توضیح می‌دهد که چرا انگیزش برای این که تغییرات ساختاری رخ دهد، مهم است (یعنی برای یادگیری). فعالیت سیناپسی بر مبنای چندین عامل استوار است و غربالگری اتصالات سیناپسی در طول زندگی رخ می‌دهد (بنوویتز و روتنبرگ^۱، ۱۹۹۷). پلاستی سیتی سلولی ممکن است در نهایت سبب سازماندهی مجدد سیستم شود.

پایه‌های ساختاری پلاستی سیتی عصبی در مغز بزرگسالان

عناصر ساختاری که بیانگر پلاستی سیتی در مغز بالغ هستند عبارتند از: (جلینگر و اتمز^۲، ۲۰۱۳):

- کارآمدی و بازسازی مجدد سیناپسی
- مکانیسم‌هایی که باعث تغییر در کارآمدی و قدرت سیناپس می‌شود.
- سیناپتوژنز
- تشکیل سیناپس در سیستم عصبی مرکزی
- جوانه‌زنی آکسونی کولترال و بازسازی مجدد دندریتی
- نوروژنز و به کارگیری سلول‌های پیشرو عصبی^۳

فرآیندهای ذیل به پلاستی سیتی اشاره دارد:

- انتقال عقب‌گرد^۴ و پساگرد^۵
- تعاملات سلولی (نورون - گلیا)
- شبکه‌های عصبی و فعالیت‌های مرتبط

¹ Benowitz & Routtenberg

² Jellinger & Attems

³ Neural progenitor cells

⁴ Retrograde

⁵ Anterograde