

یادگیری فاصله دار: ایجاد فضای مناسب برای علوم اعصاب در کلاس درس

فیروزه علویان^۱

چکیده

دانش نوین به اهمیت تقویت نیروی حافظه، افزایش ظرفیت سلولهای مغزی و افزایش توان بازخوانی داده ها توجه زیادی دارد. امروزه کارشناسان علوم آموزشی برای یادگیری موثرتر و تقویت حافظه روشهای متنوعی پیشنهاد می کنند که یکی از این روشها مطالعه با فاصله یا Spaced learning است. در واقع، Spaced learning یک روش یادگیری برای به حداقل رساندن فراموشی است که در آن محتوای یادگیری در سه زمان و سه بار تکرار خلاصه شده است، در فاصله این سه بار تکرار، دو مرحله استراحت وجود دارد که در طی آنها، فعالیت های فیزیکی کاملاً متفاوت با موضوع درس توسط فراگیران انجام می شود. هدف از این پژوهش آشنایی با شیوه خاصی است که با انعطاف پذیری، به ایجاد ارتباط های مناسب بین سلول های مغزی و افزایش بازده یادگیری کمک شایانی می کنند. این پژوهش از نوع کیفی بوده و برای رسیدن به اهداف از شیوه تحلیلی با استفاده از مطالعات اسنادی و کتابخانه ای استفاده شد. در این بررسی، اثربخشی آموزش فاصله دار، با در نظر گرفتن تقویت مسیرهای مرتبط با حافظه و مولکول های فعال شده در این مسیر تایید شد.

واژه های کلیدی: یادگیری فاصله دار، آموزش، حافظه.

^۱. دکترایست شناسی (گرایش فیزیولوژی پزشکی)، استادیار دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران، نویسنده مسئول

مقدمه

تقویت حافظه در بهبود امر آموزش و یادگیری، مدت هاست مورد توجه متخصصان تعلیم و تربیت قرار گرفته است. موضوعی که مورد توجه است این است که راهبردهای یادگیری موثر نه تنها باید به ما کمک کند تا حد ممکن به سرعت و کارآمد یاد بگیریم، بلکه فراموشی را هم به حداقل برساند. اما چه می توانیم بکنیم؟ واضح است که به روش دیگری برای تکمیل یادگیری نیاز داریم؛ چیزی که کمک خواهد کرد در کنار یادگیری، فراموشی را نیز به حداقل برسانیم؛ این رویکرد «یادگیری با فاصله» است.

شروع این آموزش از کار ایننگهاوس^۱ نشأت می گیرد. به گفته او، این روش منجر به شکل گیری حافظه قوی تری نسبت به آموزش پیوسته و حجیم؛ که شامل فواصل زمانی کوتاه و یا حتی بدون این فواصل است می شود. ایننگهاوس اظهار داشت: «با هر تعداد قابل توجهی از تکرار مناسب فواصل در زمان مشخص، یادگیری با صرفه تر از تجمع آنها در یک زمان واحد است (Rey, Vallet, Riou, Lesourd, & Versace, ۲۰۱۵). به طور مشابه، فواصل بین تکرار ممکن است بسته به محتوا و مخاطب تنظیم می شود. ایننگهاوس اعتقاد داشت که ما نه تنها یک «منحنی یادگیری» داریم بلکه همچنین یک «منحنی فراموشی» نیز داریم.

آزمایش های ایننگهاوس به روشنی ارزش تلاش شخص برای کدگذاری اطلاعات در حافظه ی بلند مدت از طریق تکرار و مرور را نمایان می سازد. نتایج کارهای وی نشان داد که توانایی فراخوانی اطلاعات به طور چشم گیری توسط مرور مکرر مطالبی که می خواهیم به خاطر بسپاریم، افزایش می یابد. سرعت فراموشی یک مطلب، متأثر از عواملی است چون میزان مشکل بودن آن مطلب، میزان فشار روانی در لحظه ی آموختن و مقدار توجه به آن مطلب (Murre & Dros, ۲۰۱۵).

در مطالعات ایننگهاوس، یادگیری و به خاطر آوری اطلاعات در یک زمان معین و کنترل شده انجام می گرفت، بین آموزش مطالب، فاصله با زمانهای متفاوتی قرار می داد. عوامل مداخله گر در یادگیری و یادآوری مطالب را کنترل می کرد و یادگیری و یادآوری را در شرایط طبیعی و عادی زندگی انجام می داد. او به دنبال شرایط عجیب و غریب نبود. ایننگهاوس برای اندازه گیری حافظه، از زمان و به خاطر آوری کلمات استفاده می کرد. او از سه رویکرد عدم شباهت بین منابع یادگیری، نامتعارف بودن شرایط بیرونی، و شرایط درونی که ناشی از نظریه ها، نگرشها و عقاید فرد است در بررسی کارهای خود بهره برد. به کار بستن این روشها و دقت علمی او بدون شک نقش مهمی در مطالعات علمی امروز حافظه داشته است (Rey et al., ۲۰۱۵).

اینکهاوس در آزمایش‌های خود، روش هوشمندانه‌ای برای اندازه‌گیری فراموشی ارائه داد. او جدولی از هجاهای سه حرفی را که قابل خواندن، اما کاملاً بی‌معنی بودند تهیه کرد (مانند AKX یا VUO) و این جدول را آن‌قدر تکرار کرد تا توانست آن را کاملاً حفظ کند. سپس در فواصل زمانی متفاوت، از ۲۰ دقیقه تا ۳۱ روز، سعی کرد آن‌ها را به خاطر آورد. با انجام این آزمایش توسط جداول متعدد، اینکهاوس دریافت که سرعت فراموشی نسبتاً یکنواخت (و نه ثابت) است. فراموشی در ابتدا نسبتاً سریع اتفاق می‌افتد و به تدریج کمتر می‌شود. روان‌شناسان دیگر پس از او تأیید کرده‌اند که منحنی فراموشی در مورد بسیاری از انواع موضوعات صادق است. برخی تحقیقات نشان داده که شیب منحنی فراموشی در مورد مطالبی که به خوبی آموخته شده‌اند، به تدریج به صفر نزدیک می‌شود، بدین معنی که فراموشی دیگر اتفاق نمی‌افتد. هرچه تعداد مرورهای بعدی بیش‌تر می‌شود، شیب فراموشی کم‌تر و کم‌تر می‌شود، به طوری که پس از مرور مرحله‌ی پنجم، این شیب تقریباً از بین می‌رود و یادگیری، ماندگار می‌شود (Rey et al., ۲۰۱۵).

اثر بخشی این روش در حوزه‌های مختلف نیز نشان داده شده است؛ از اقتصاد گرفته تا یادگیری طب (Landauer & Ross, ۱۹۷۷; Logan, Castel, Haber, & Viehman, ۲۰۱۲).

یادگیری فاصله دار به بهبود حافظه در بی‌مهرگان نیز کمک می‌کند؛ مانند صدف *Aplysia* (Mauelshagen, Sherff, & Carew, ۱۹۹۸)، مگس سرکه (Beck, Schroeder, & Davis, ۲۰۰۰)، زنبور عسل (Menzel, Manz, Menzel, & Greggers, ۲۰۰۱)، در خرگوش‌ها (Bello-Molina, Medina, & Robbins, ۲۰۱۳) و میمون‌ها (Robbins & Bush, ۱۹۷۳).

این در عمل به چه معنی است و مساله و هدف چیست؟ یکی از مشکلاتی که خصوصاً در آموزش سنتی با آن روبه‌رو هستیم، فراگرفتن حجم انبوهی از مطالب در محدوده زمانی تعریف شده است که اغلب با فراموشی همراه است، اما اگر در حال طراحی یک برنامه یادگیری با فاصله در ذهن خود باشید، یک سری ارتباطاتی در مغز شما در حال شکل‌گیری است که سبب می‌شود پس از روزها، هفته‌ها یا ماه‌ها آن مطلب را به یاد آورید.

از طرف دیگر، تکرار مفهوم ممکن است به سادگی به معنی معرفی دوباره این مفهوم دقیقاً همانطور که پیش از آن ارائه بود باشد و یا ارائه آن در روشی متفاوت باشد. به عنوان مثال، مفاهیم ممکن است با استفاده از انواع رسانه‌های مختلف، داستان و غیره ارائه شوند. آنها همچنین ممکن است به صورت مجموعه‌ای از تمرین‌های عملی مشابه اما متمایز، و یا شبیه‌سازی شده در طول زمان ارائه باشند. طراحان استفاده‌کننده از روش فاصله

انداز، به جای فکر کردن در مورد بهترین راه منفرد، نیاز به ارائه راه های مختلفی برای حل یک معضل دارند. Spaced learning، یک روش تقویت حافظه بلند مدت ما از طریق تکرار است. اساساً، این یادگیری هیچ تفاوتی با آنچه ما در طول زمان یاد می گیریم و ما را به حال خود بگذارند، ندارد (Raman et al., ۲۰۱۰).

آیا تا به حال نیاز به یادآوری چیزی داشته اید و با وجود تلاش زیاد نتوانسته اید آن را به خاطر آورید؟ در واقع شما با بازیابی اطلاعات مشکل دارید. ما یک مسیر عصبی متصل به حافظه خود داریم که اگر به اندازه کافی از آن استفاده نکرده باشیم، تقویت نشده و بنابراین بازیافت مطالب با مشکل روبه رو خواهد شد. با تکرار مطالب، این مسیر عصبی بارها تحریک شده و دسترسی مجدد به مطالب نیز امکان پذیر خواهد شد. هنگامی که می شنویم، می بینیم و یا کاری را برای یک بار انجام می دهیم، در حافظه کوتاه مدت ما ذخیره می شود. اگر مطلبی را بارها بشنویم و یا بارها و بارها تکرار کنیم، آن را در حافظه بلند مدت وارد کرده ایم و یادگیری فاصله دار روند این یادگیری بلند مدت را بسیار سریع پوشش می دهد. در واقع، این فرایند تکرار ساختارمند سریع که با استراحت جدا شده است، در واقع، جاسازی اطلاعات در حافظه بلند مدت است (Jones et al., ۲۰۰۱).

Spaced learning از روش های ایجاد مسیرهای عصبی در آغاز یک واحد کار (اکتساب حافظه) است که پس از آن می توان در فواصل مختلف در طول زمان بازبینی شود. بنابراین زمانی که به آن اطلاعات نیاز دارید، دسترسی به آنها برای شما آسان تر خواهد بود (Mauelshagen et al., ۱۹۹۸; Zhang et al., ۲۰۱۲).

این رویکرد «یادگیری با فاصله» است؛ مطلبی که در این مقاله به آن خواهیم پرداخت و البته مکانیسم های درگیر در این روش. امید است با به کار بستن آن در سیستم آموزشی ایران، به ارتقای سطح بهینه یادگیری دست یابیم.

روش پژوهش

این پژوهش از نوع کیفی بوده و برای رسیدن به اهداف از شیوه تحلیلی با استفاده از مطالعات اسنادی و کتابخانه ای استفاده شد. ضمن مطالعه مستمر، ابتدا همه داده ها به طور جداگانه مقوله بندی و سپس مقوله ها کدگذاری، دسته بندی مقایسه و مورد تفسیر قرار گرفت.

در واقع، در عصر جدید، دیگر نمی توان به شیوه های سنتی و انتقال یک طرفه انبوهی از اطلاعات توسط سخنرانی پیوسته معلم، اقدام کرد. طراحی مناسب آموزشی با فواصل مناسب، رویکردی نوین و پژوهشی

کاربردی است که با به کارگیری شبکه ای از سلول های مغزی و تقویت حافظه، نتایج بهتری در افزایش علاقه به علم، تفکر نقادانه و حل مساله حاصل می کند.

جزئیات مرحله به مرحله (Bradley & Patton, ۲۰۱۳):

ورودی اول: اطلاعاتی است که معلم از دانش آموزان می خواهد از درس به دست آورند. مدت این ورودی محدود نشده است، اما نگه داشتن توجه دانش آموزان پس از ۱۵-۱۰ دقیقه دشوار می شود. مسیرهای عصبی شروع به پردازش خاطرات معین از این درس می کنند.

وقفه اول (استراحت اول): در بین دو نیمه اول، هدف تحریک بخش های مختلف مغز است تا مسیرهای عصبی مربوط به اولین ورودی تشکیل شود. این فعالیت نیاز دارد تا حداقل ۱۰ دقیقه باشد؛ زیرا مسیرها در حال شکل گیری هستند و به منظور تقویت مسیرهای عصبی و ثبت اطلاعات به دست آمده در ورودی اول، قبل از تحریک بعدی نیاز به «استراحت» دارند، این فعالیت باید هیچ ارتباطی با محتوای درس نداشته باشد تا خطر اختلال در تشکیل مسیر عصبی در حال شکل گیری مورد نظر را به حداقل رساند.

ورودی دوم: طی ورودی دوم، معلم دوباره محتوای اولین ورودی را بازنگری می کند؛ همان راه های عصبی دوباره تحریک خواهند شد، که نشان دهنده اهمیت آنها برای مغز است. برای تغییر این ورودی و تعاملی کردن بیشتر آن، بهتر است روش ارائه قبلی محتوای تغییر کند. این را می توان با استفاده از مثال های مختلف از همان چیز یا اطلاعات کلیدی فراموش شده به دست آورد. در این ورودی به دانش آموزان اجازه داده می شود بینند از ورودی اول چه چیزهایی به یاد می آورند.

در ارزشیابی این ورودی اطلاعات کلیدی که لازم است دانش آموزان به خاطر آورند به صورت جاقالی ارائه می شود تا توجه دانش آموزان به سمت آن نکات کشیده شود و آنها را به خاطر آورند.

وقفه دوم (استراحت دوم): در استراحت دوم، همان اصول استراحت اول اعمال می شود. راه های عصبی حاوی اطلاعات دوباره به مدت ۱۰ دقیقه دیگر استراحت می کنند. فعالیت این زمان می تواند تغییر، یا تنوع داشته باشد. باز هم، مهم است که فعالیت به محتوای درس ارتباطی نداشته باشد.

ورودی سوم: در این مرحله، معلم دوباره از محتوای اولین ورودی استفاده می کند. این ورودی بیشتر بر روی دانش آموزان تاکید دارد، که نشان می دهد آنها درس را درک کرده اند یا نه. این را می توان با دادن یک فعالیت به دانش آموزان که نیاز به استفاده از محتوای ورودی اول دارد انجام داد.

در این حال، معلم می تواند در بین دانش آموزان حرکت حرکت کند و به بررسی دانش /درک دانش آموزان از محتوای درس پردازد.

Spaced learning و یادگیری مبتنی بر تحقیق

جذابیت Spaced learning برای مدارس کشورهایی که این روش را به کار می برند، به دلیل پتانسیل آشکار آن برای کمک به دانش آموزان در فراخوان مطالب در امتحانات؛ خصوصا کشور فنلاند، ثابت شده است (Bhat, ۲۰۱۶). با این حال، دلیل حمایت آموزش آتی از Spaced learning به دلیل پتانسیل قوی آن برای فعال کردن دانش آموزان بر اساس تحقیق و پژوهش در یادگیری^۲ (EBL) (McDougall & Sanders, ۲۰۱۱) و مبتنی بر پروژه یادگیری^۳ (PBL) (Mioduser & Betzer, ۲۰۰۸) است.

EBL نوعی یادگیری با دنبال کردن و ارزیابی اطلاعات به منظور پاسخ به سوالات و حل مشکلات است. دانش آموزانی که به سوالات پاسخ می دهند به یادگیرندگان متخصص تبدیل خواهند شد، قادر به پیدا کردن، تفسیر و ارزیابی اطلاعات خود بوده و مهارت ها و دانش خود را در انواع زمینه ها افزایش می دهند. در روش PBL، دانش آموزان سوالات خود را به عنوان بخشی از یک پروژه طولانی با یک خروجی ملموس اجرا می کنند. با این حال، Spaced learning به همان اندازه PBL در مدارس قابل اجرا است. یکی از چالش های طراحی EBL در مدارس، اطمینان از این موضوع است که دانش آموزان علاوه بر انجام پژوهش به رنج مناسبی از محتوای درسی نیز دست یابند. این جایی است که Spaced leaning وارد عمل می شود. با اجرای متعدد جلسات Spaced learning، و رهبری سوالات دانش آموزان، معلمان می توانند اطمینان حاصل کنند که دانش آموزان دانش مرتبط را بدون از دست دادن گستره یادگیری به دست آورده اند.

معلمانی که این روش ها را به کار می بردند متوجه شده اند که ترکیبی از Spaced learning و EBL به دانش آموزان اجازه می دهد تا به مطالعه موضوعاتی پردازند که به مراتب فراتر از برنامه درسی استاندارد می باشد. برای مثال، آنها تشریح قلب را در واحد متمرکز بر سلامت درس بهداشت گنجانیده اند؛ در حالی که این کار جزو برنامه پیش بینی شده این درس نبوده است. در واقع آزادی عمل در این برنامه بسیار مهم است (Bradley & Patton, ۲۰۱۳).

سوال کلیدی دیگر این است که آیا درک مکانیسم فواصل بهینه می تواند بینشی برای طراحی دارویی تقویت حافظه فراهم کند؟ مدل های محاسباتی کامپیوتری بر اساس چنین درکی ممکن است قادر به پیش بینی روش های پیچیده تر بهبود حافظه باشد که در آن استفاده از داروهای متعدد، و یا ترکیبی از دارو و پروتکل های آموزشی، می توانند سبب افزایش حافظه یا درمان اختلالات یادگیری و حافظه شود.

نظریه های مرتبط و مکانیسم عمل Spaced learning

در این بخش، شرح خواهیم داد که چگونه بینش های جدید مطالعات مولکولی میتوانند اثربخشی آموزش فاصله دار را توضیح دهند. همچنین به بررسی مسیرهایی که در شکل پذیری ارتباطات نورونی (نورون ها سلول های اصلی مغز هستند و محل ارتباط نورون ها سیناپس نام دارد) درگیر هستند می پردازیم، و آزمایش های تجربی معتبر، و پروتکل های آموزشی که به بهبود یادگیری کمک می کنند را از طریق ایجاد اختلال و حذف عناصر مولکولی کلیدی در مسیر این آبشار پیام رسانی را معرفی می کنیم.

(۱) تئوری های یادگیری مرسوم در آموزش فاصله دار

ما به طور خلاصه به ۳ نظریه شناختی در توضیح برتری آموزش فاصله دار نسبت به آموزش تجمعی می پردازیم: نظریه تغییرپذیری کدگذاری، تئوری بازیابی، نظریه نقص در پردازش و نظریه تثبیت.

نظریه تغییرپذیری کدگذاری یا رمزگردانی: یعنی تغییر اطلاعات به شکلی که قابل طبقه بندی و ذخیره سازی در حافظه باشند. پس از آن که اطلاعات به صورت کد در مغز جای گرفتند، باید بتوانیم آنها را برای مدت طولانی نگه داریم؛ این مرحله را ذخیره سازی می نامند. برای ذخیره سازی اطلاعات باید آنها را به دقت تکرار کرد.

در بحث تغییرپذیری کدگذاری، با تکرار محرک ها در فواصل بیشتر، امکان تنوع طبقه بندی اطلاعات و یادگیری افزایش می یابد. نتیجه این امر، حافظه قوی تر است و طبیعتاً بازیابی و استخراج اطلاعات نیز بیشتر خواهد بود (Benjamin & Tullis, ۲۰۱۰; Madigan, ۱۹۶۹; Melton, ۱۹۷۰).

در فرضیه بازیافت: ارائه فاصله دار محرک در بازیافت اطلاعات موثرتر از ارائه تجمعی آنهاست. زیرا هر فاصله موجب بازیابی و فعال شدن مجدد یک مسیر حافظه می شود. در مقابل، با مطالب تجمعی و فاصله های کوتاه، حافظه قبلی هنوز فعال است و بنابراین بازیافت و فعال نمی شود و نمی توان حافظه را تقویت کرد

(Greene, ۱۹۸۹; Tzeng & Cotton, ۱۹۸۰). در این فرضیه به اهمیت عدم فاصله طولانی نیز پرداخته شده است؛ زیرا در این شرایط مسیرهای قبلی حافظه نمی توانند بازیابی شوند (Siegel & Kahana, ۲۰۱۴).
نظریه تثبیت حافظه: عبارت است از انتقال اطلاعات از حافظه کوتاه مدت به حافظه بلند مدت. در سال ۱۹۰۰، مولر و پیل زاگر، اولین بار نظریه تثبیت را ارائه دادند (Lechner, Squire, & Byrne, ۱۹۹۹). آنها عقیده داشتند که ضمن تثبیت حافظه، جریان عصبی برای مدتی بعد از یادگیری ادامه می یابد و فعالیت مکرر مسیرهای عصبی و افزایش ارتباطات سیناپسی به برقراری یادگیری موثر کمک می کنند و بنابراین اطلاعات وارد حافظه درازمدت می شود. با ورود اطلاعات به حافظه بلند مدت، احتمال از بین رفتن آنها کاهش می یابد. به نظر می رسد هیپوکامپ در تثبیت حافظه نقش اصلی را داشته باشد (Winkler & Cowan, ۲۰۰۵).

فواصل کوتاه، برای تثبیت و جمع ناشی از آثار حافظه کافی نیستند. دوره مقاوم به نظر می رسد برای تکمیل مستعد شدن خارهای دندریتی (لازم به ذکر است که نورون ها دو دسته زائده دارند؛ دندریت ها و آکسون ها. دندریت ها برآمدگی های کوچکی هستند که در بسیاری از سیناپس ها وجود دارند) که تحریک شده بودند لازم باشد؛ اما توسط اولین محرک هایی که پشت سر هم اعمال شده بودند نیرومند نمی شوند. مستعد شدن به این خارها اجازه می دهد که پس از وارد کردن دومین محرک ها تشکیل یک مسیر بیوشیمیایی را دهند (شکل ۲a، ۱d). شکل گیری چنین مسیرهایی که نیمه عمری طولانی دارند شرایط آموزش بهینه را فراهم می کند (Smolen, Zhang, & Byrne, ۲۰۱۶).

Landauer یکی از اولین محققانی بود که مدلی مفهومی برای توضیح اثربخشی آموزش با فاصله را ارائه داد (Landauer & Ross, ۱۹۷۷). هر چند این مدل برای توضیح اثرات فاصله کوتاه بر روی حافظه شکل گرفت، اما به راحتی می توان برای اثرات فاصله بلند مدت نیز آن را تعمیم داد (شکل ۱). این مدل بر دو فرض استوار است: (۱) جریان عصبی ایجاد شده به دنبال اولین یادگیری، اگر بدون فرصت زمانی باشد به اندازه کافی مسیرهای حافظه را تقویت نمی کند (شکل ۱a)؛ بنابراین در یادگیری تجمعی بین مسیرهای حافظه همپوشانی ایجاد می شود که نتیجه آن اشباع غیر اختصاصی مکانیسم های ملکولی و کاهش آثار آن بر روی تثبیت حافظه است.

تنها زمانی که اثرات آزمایش اول (اولین آموزش) تنزل پیدا کند، اثرات آزمایش دوم (دومین آموزش) می تواند به طور کامل بیان شود (شکل c , 1b)، که منجر به حافظه قوی تری در فاصله طولانی تر می شود (شکل 1d).

فرض دوم این است که احتمال این که آزمایش دوم بتواند تنزل آزمایش اول را با گذشت زمان تقویت کند، وجود دارد. (شکل 1e).

از ادغام این دو فرض، یک بازه ی زمانی بهینه برای یادگیری با فاصله پیش بینی می شود (شکل 1d).

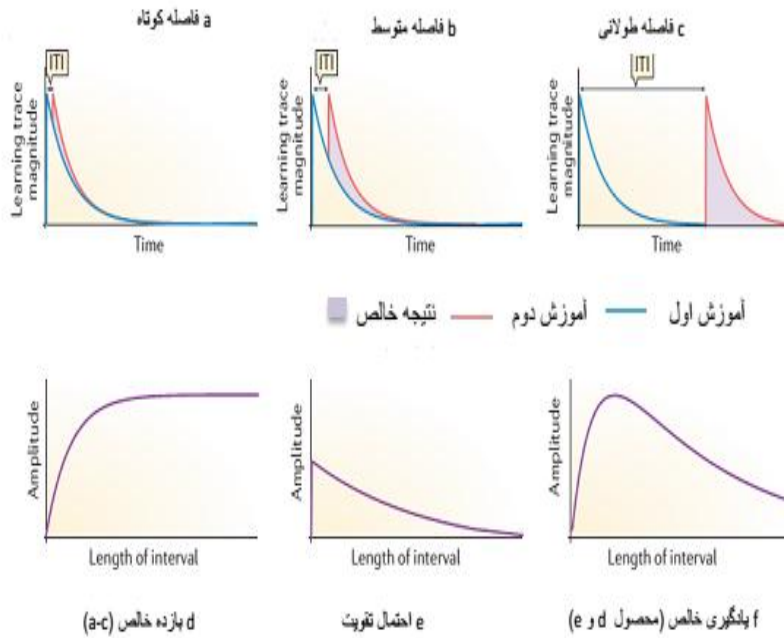
۲) مسیرهای مولکولی

پیشرفت قابل توجهی در درک مکانیسم های مولکولی حافظه صورت گرفته است. با توجه به این پیشرفت، در این بخش به مکانیسم های مولکولی بالقوه اثر فاصله در شکل گیری حافظه بلند مدت متمرکز می شود.

در حال حاضر توافق بر این موضوع وجود دارد که یادگیری حداقل، توسط تغییر در قدرت سیناپسی (شکل پذیری سیناپسی بین سلول های عصبی) وجود دارد. به عنوان مثال، خاطرات ترس شرطی شده را می توان به تناوب پاک کرد و یا دوباره برقرار نمود؛ از طریق سرکوب طولانی مدت^۴ (LTD) و یا تقویت طولانی مدت حافظه^۵ (LTP) (Nabavi et al., ۲۰۱۴). بنابراین، فرایندهای مولکولی که برای آموزش فاصله دار ضروری هستند ممکن است سبب تقویت LTP شوند.

ارتباط LTP در این مورد، بازسازی و طولیل شدن خارهای دندریتی نوروها است (Bell et al.,

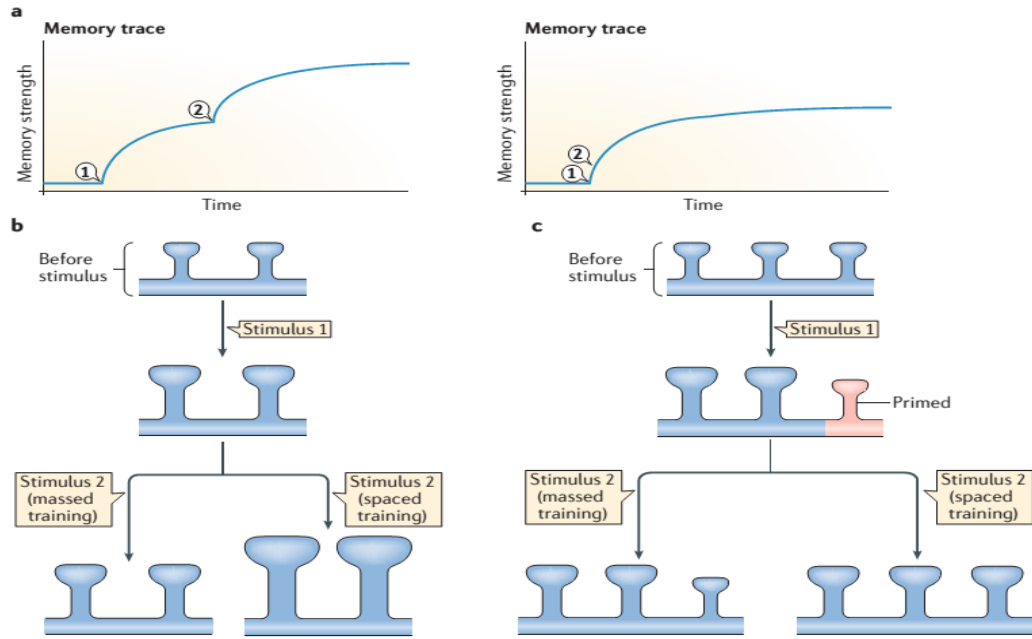
۲۰۱۴)، بنابراین، مطالعه بازسازی خارهای دندریتی به دنبال محرک فاصله دار، احتمالاً بینشی در اثربخشی Spaced learning است. مطالعاتی که با استفاده از برش های هیپوکمپ (مرکز حافظه مغز) موش صورت گرفته نشان داده است که تحریکات مکرر، سبب افزایش تعداد خارهای دندریتی و افزایش LTP می شود (Bell et al., ۲۰۱۴; Bourne & Harris, ۲۰۱۱). و تحریک بعدی اعمال شده با فاصله ۶۰ دقیقه یا بیشتر بین آموزش، برای تقویت مناسب LTP لازم است (Cao & Harris, ۲۰۱۴). بازسازی خارهای دندریتی در فاصله دوره زمانی یک ساعته منجر به طولیل و متراکم شدن آنها می شود (Bell et al., ۲۰۱۴; Bourne & Harris, ۲۰۱۱) که نتیجه آن، افزایش بزرگی LTP است.



شکل ۱ مدل مفهومی اولیه چگونگی تولید مسیر یادگیری در یک بازه ی زمانی مطلوب. همانطور که توسط مدل اولیه لاندائو توصیف شد، آموزش فاصله دار موثرتر از آموزش تجمعی سبب تقویت برخی از مسیرهای مربوط به ذخیره سازی حافظه در مغز است، اگر چه این مدل مفهومی یک فرم بیوشیمیایی یا ساختاری برای مسیر فرض نمی باشد. در این مدل فرض شده است که تشکیل حافظه با فواصل طولانی تر بین جلسات آموزشی به دلیل کاهش همپوشانی زمانی پی در پی، نسبت به یادگیری با فواصل کوتاه مدت، موثرتر می باشد. اثرات یادگیری دو نوع آموزش با فاصله کم و فاصله زیاد نشان داده شده است. زیرمجموعه ای که با خط قرمز نشان داده شده، بازده خالص آموزش تقویت شده است. فواصل کوتاه تر با همپوشانی بیشتر مسیرهای یادگیری و بازده خالص کمتر همراه هستند. بنابراین، آموزش تقویت شده پس از یک دوره استراحت طولانی تر مؤثرتر است. (d) در مجموع، سود خالص بیشتر، برای فواصل طولانی تر بین محرک رخ می دهد؛ برای فواصل بسیار طولانی، تاثیر جدیدی مشاهده نمی شود و نمودار مسطح می شود. در صورت عدم وجود فاصله، احتمالاً به دلیل همپوشانی بین مسیرها و آموزش پی در پی، یادگیری به صفر می رسد (قسمت ابتدای منحنی). (e) با فاصله زمانه، بسیار طولانی، بین آموزش ها، احتمال اثربخشی، کاهش می یابد. (f)

دو فرضیه که در بازسازی خارهای دندریتی درگیرند، اثربخشی موثرتر آموزش فاصله دار نسبت به آموزش تجمعی در شکل گیری حافظه را توجیه می کنند (Kramar et al., ۲۰۱۲). این فرضیه ها یک موضوع مشترک دارند و آن این که فرآیند یادگیری شامل دوره ای مقاوم است که طی آن اگر فاصله محرک دوم با محرک اول خیلی کم باشد، محرک اول بی اثر خواهد بود (شکل ۲a).

یک فرضیه این است که یادگیری با فاصله اجازه می دهد که دوره مقاومت بر طرف شود و منجر به طولیل شدن مکرر مجموعه ای از خارهای دندریتی و تقویت ارتباطات نورونی در محل سیناپس، به واسطه این برآمدگی ها شود (شکل ۲b).



شکل ۲ مدل های توصیف کننده تقویت سیناپسی در یادگیری فاصله دار. (a) در حالت مقاوم، محرک فاصله دار (پنل سمت چپ؛ محرک ۱، که با فاصله زمانی قابل ملاحظه ای توسط محرک شماره ۲ دنبال می شود) سبب تقویت مسیر حافظه می شود (جریان زمانی آبی). در مقابل، محرک تجمعی (پنل سمت راست؛ محرک ۱ که با فاصله زمانی کوتاهی توسط محرک شماره ۲ دنبال می شود) موفق به تقویت مسیر حافظه نیست. (b) تقویت سیناپسی در آموزش فاصله دار ممکن است به دلیل افزایش تقویت طولانی مدت (LTP) باشد (در اینجا به دلیل افزایش حجم دندریتی). بنابراین، در یکی از دو فرضیه فعلی توصیف کننده تقویت سیناپسی یادگیری فاصله دار، محرک ۱ سبب بزرگ شدن برآمدگی های دندریتی ها می شود. اگر محرک ۲ مدت کوتاهی پس از تحریک اول (که در آموزش تجمعی اعمال می شود) وارد شود، بر روی برآمدگی خارهای دندریتی تاثیر نمی گذارد. (c) در روش دیگر، افزایش LTP می تواند از دوره های پی در پی تقویت ارتباطات سیناپسی جدید حاصل شود. بنابراین، در فرضیه جریان دوم، محرک ۱ تنها بر روی یک زیر مجموعه از برآمدگی های دندریتی اثر می کند و بقیه را مستعد می کند. اگر محرک دوم مدت کوتاهی پس از محرک اول اعمال شود (همانطور که در آموزش تجمعی اتفاق می افتد)، بدون تاثیر است. اگر محرک ۲ با فاصله اعمال شود (همانند آموزش فاصله دار) زیر مجموعه دیگری از خارهای دندریتی را افزایش حجم نمی دهد. در عوض، محرک ۲ سبب طولیل شدن آن دسته از خارهای دندریتی است که قبلا مستعد شده بودند ولی با محرک شماره یک طو یا نشده بودند (Smolen, Zhang et al. ۲۰۱۶).

فرضیه دیگر (Kramar et al., ۲۰۱۲؛ Lynch, Kramar, Babayan, Rumbaugh, & Gall, ۲۰۱۳) این است که فرایندهای مولکولی القاء LTP فعال شده توسط محرک فاصله دار، سبب شروع طویل شدن خارها نمیشوند. در این مورد، آموزش فاصله دار؛ اما نه تجمعی، اجازه شروع یک فرآیند مولکولی در این خارها را می دهد (مستعد کردن خارها). پس از آن، این برآمدگی ها با محرک بعدی تقویت میشوند و با مسیرهای حافظه ادغام می شوند (شکل ۲c). در حال حاضر، اجزای مولکولی چنین روندی به خوبی شناخته شده نیستند.

در برش های ناحیه هیپوکامپ موش، اعمال محرک در فواصل ۱۰ یا ۴۰ دقیقه سبب افزایش LTP نمی شوند. با این حال، برای فواصل طولانی تر ۶۰ یا ۹۰ دقیقه افزایش در LTP مشاهده می شود. در این شرایط، هر محرک منجر به ساخت رشته های پروتئینی به نام اکتین در خارهای دندریتی شده که برای تثبیت LTP مهم است (Rex et al., ۲۰۰۹).

اگر محرک دوم در فاصله ۶۰ تا ۹۰ دقیقه اعمال شود، باعث ساخت اکتین در خارهایی است که ظاهراً تحت تاثیر محرک اول قرار نگرفته اند. در این حال، مستعد کردن خارها در تمام سیناپس ها رخ می دهد؛ اما افزایش قدرت ارتباطات سیناپسی و تثبیت فقط در تعدادی از سیناپس ها رخ می دهد. این خارهای مستعد شده ای که تثبیت و تقویت نشده اند، یک دوره مقاومت ۶۰ دقیقه ای را نشان می دهند که بیانگر این موضوع است که مستعد شدن نیاز به زمان دارد (شکل ۲a). اگر محرک دوم پس از طی شدن دوره مقاومت اعمال شود، برخی یا تمامی خارهای مستعد شده تقویت خواهند شد. این اطلاعات موافق با فرضیه دوم است، زیرا اولین محرک ظاهراً سبب تحریک طویل شدن و تقویت تعدادی از خارها شده و بقیه را مستعد نموده است.

طیف بسیار گسترده ای از فواصل بین آموزش، از ثانیه تا روز برای یادگیری با فاصله استفاده می شود. برای مثال، در یادگیری بویایی زنبور عسل، فاصله کارآمد آموزش می تواند با فواصل کوتاه ۱ دقیقه رخ دهد در آزمایشی دیگر، دو شوک الکتریکی برای القاء LTP به کار رفت. ماکزیمم LTP زمانی بود که دو محرک به فاصله ۴۵ دقیقه اعمال می شدند (Philips, Tzvetkova, & Carew, ۲۰۰۷). در فاصله ۴۵ دقیقه، بسیاری از فاکتورهای فعال کننده حافظه طولانی مدت فعال می شدند.

به طور مشابه، آموزش با فاصله ۶۰ دقیقه، و نه ۲۰ یا ۱۲۰ دقیقه سبب افزایش یادگیری در موش ها می شد. با بررسی های به عمل آمده مشخص شد که علاوه بر فاکتورهای مورد نظر در حافظه طولانی مدت، تعداد سیناپس های بین سلول های عصبی درگیر نیز افزایش داشته است (Kramar et al., ۲۰۱۲). فعال شدن مجدد مسیرهای حافظه ممکن است به یک بستر زمانی اضافی (حتی تا یک هفته) نیاز داشته باشد. چنین فواصلی به احتمال زیاد به فعال شدن دوباره مسیرها و تقویت سیناپس های مرتبط با حافظه که توسط فعالیت شبکه عصبی حفظ می شوند، برمیگردد (Wei & Koulakov, ۲۰۱۴). یادگیری با چنین فاصله طولانی احتمالا در جهت فعال کردن دوباره اجزای حیاتی این سیناپس ها می باشد.

فاصله نامنظم می تواند سبب افزایش یادگیری شود

تلاش برای بهینه سازی اثر فاصله به طور عمومی بر رویکردهای آزمون و خطا استوار است. در نتیجه، اکثر پروتوکل های آموزشی، اگر نه همه، مورد استفاده در مطالعات حیوانی و انسانی احتمالا مطلوب نیستند. تقریبا برای تمام الگوهای یادگیری، فواصل آموزشی ثابت هستند، اگر چه در یک نوع از الگوهای آموزش فاصله دار، فواصل بین جلسات به تدریج طولانی می شود (Cepeda, Pashler, Vul, Wixted, & Rohrer, ۲۰۰۶). با این حال، مطالعات انجام شده هیچ شاهد قابل توجهی در برتری این روش در شرایط شکل گیری و تقویت حافظه بلند مدت نشان نمی دهند (Karpicke & Roediger, ۲۰۱۰).

می توان از دانش پویایی مکانیزم حافظه به منظور افزایش حافظه پیش بینی شده توسط پروتکل های آموزش بهینه استفاده کرد، احتمالا با فواصل نامنظم آموزشی؟ یکی از این روش ها توسعه مدل های آبخار بیوشیمیایی داخل سلولی (فعال شدن یک عامل و اثر گذاری بر روی عامل بعدی به شکا آبخاری) است که زمینه ساز شکل گیری حافظه است و استفاده از شبیه سازی به منظور تست سریع اثر بخشی پروتکل های آموزشی مختلف در حال آزمایش است (Zhang et al., ۲۰۱۲). در سال های اخیر، مدل ها پویایی واکنش های بیوشیمیایی که انتقال می محرک به LTP را به عهده دارند توصیف می کنند (Kim, Huang, Abel, & Blackwell, ۲۰۱۰). هر آبخار پیام رسانی در این مدل نمایشگر یک دوره زمان مشخص است. بنابراین، این احتمال وجود دارد که برخی از عواقب مربوط به این فواصل نامنظم، در به حداکثر رساندن القای LTP نقش موثری داشته باشند. به عنوان مثال، آموزش های بعدی که در زمان ارائه همزمان با قله فعالیت برخی فاکتورها همراه باشند، ممکن است یادگیری بهینه را تقویت کنند.

آموزش فاصله دار و اهداف دارویی بهبود حافظه

با توجه به اینکه آبشار بیوشیمیایی می تواند به توسعه مدلی برای پیش بینی پروتکل های آموزش بهینه کمک کند، آیا این مدل ها همچنین می توانند برای پیش بینی اهداف دارویی بهبود حافظه استفاده شوند؟

زمان ممکن است برای چنین رویکردی ضروری باشد. برای مثال، نقص تقویت LTP، ممکن است توسط ترکیب با اثرات دارویی شناخته شده در مدل های حیوانی نجات داده شوند. اخیرا در یک مطالعه (Smolen, Baxter, & Byrne, 2014)، بررسی اثرات دارویی بر روی LTP با تغییر پارامترهای مدل (مانند CREB و ...) صورت گرفته است. در این مدل، بزرگی القاء LTP در ارتباط با یک افزایش در تغییرات سیناپسی تحریک شده با دارو بود. سپس، پارامترها با استفاده از داروی خاص تغییر داده شدند. به هر حال، اثرات داروی تکی به طور کامل سبب نجات LTP نشد. بنابراین، تنها جفت شدن تغییرات پارامترها با اثرات دوز قابل قبولی از داروها مثر خواهد بود. افزودن همزمان چند دارو، همزمان با فاصله مناسب آموزشی، یک اثر ترکیبی ایجاد می کند که بیش از اثرات منحصر دارویی است.

توسعه بیشتر از این استراتژی، و تست تجربی، ممکن است سبب افزایش شکل پذیری سیناپسی شود؛ زمانی که دارو درمانی با پروتکل طراحی فاصله ترکیب شده باشد (Lynch, Cox, & Gall, 2014).

بحث

با توجه به شواهد موجود، به نظر می رسد که حداقل بخشی از بهبود یادگیری که با الگوهای آموزش فاصله دار یافت شده اند، می توانند توسط روابط پویا بین روش های آموزشی و مکانیسم های مولکولی اساسی سلولی مرتبط با حافظه توضیح داده شوند.

مطابق با نظریه های معرفی شده، تنها آموزش فاصله دار می تواند تمرینات شناختی کافی و یا فعالیت دوباره حافظه لازم برای حمایت از تثبیت حافظه بلند مدت را توجیه کند. همچنین ممکن است با یافته های تجربی مطابقت داشته باشد، که نتیجه آن برآمدگی دندریتی اضافی است که توسط مستعد شدن اولیه محرک های قبلی ایجاد شده است.

وجود طیف گسترده ی از فواصل بین آموزش، از ثانیه تا روز در افزایش بازده یادگیری در موجودات مختلف را چنین می توان توجیه کرد که احتمالا فواصل کوتاه زمان لازم برای فعال شدن فاکتورهای کلیدی

LTP و فعال کردن عوامل رونویسی از قبل ساخته شده است و فواصل طولانی تر در بیان ژن هایی خاص که زمان طولانی تری را می طلبد و تغییرات ساختاری قابل ملاحظه خارهای دندریتی، باشد با این حال، به نظر می رسد که نوعی مکانیسم رقابت بین یک فعال کننده حافظه بلند مدت و یک مهارکننده، بر اساس فواصل زمانی وارد عمل شوند. که احیاناً در فواصل زمانی کوتاه مدت، مهار کننده و در فواصل طولانی تر، فعال کننده در گیر باشد.

با توجه به مطالعات معدود انجام شده و نبود اطلاعات کافی از فرایندهای مولکولی، هنوز نمی توان اظهار نظر دقیقی در مورد راه هایی که مسیرهای پیام رسانی داخل سلولی در تولید حداقل و حداکثر فواصل می توانند با هم همکاری کنند، داشته باشیم. برای حداکثر فواصل، یک فرض کیفی معقول است که هر آموزش یا محرکی یک مسیر بیوشیمیایی جداگانه ای تولید می کند، برای فاصله یادگیری موثر، این آثار باید با هم همپوشانی داشته باشند و توانایی جمع پذیری و تقویت سیناپسی در ناحیه سیناپسی را داشته باشند. این پویایی شبیه به همپوشانی در مدل مفهومی لاندر (شکل ۱a-c) است. برای فواصل طولانی تر از حداکثر، مسیرهای بیوشیمیایی دچار نقص می شوند و با هم همپوشانی ندارند (Smolen et al., ۲۰۱۶).

مفهوم شرح داده شده در بالا این است که دامنه زمانی متعددی از آموزش فاصله دار ممکن است در فاصله آموزش در گیر باشد. مطالعات اندکی برای هر سیستم در تعیین حداقل و حداکثر فواصل موثر صورت گرفته است. اما با توجه به شواهد ارائه شده فوق، برای برخی گونه ها فواصل ۵-۱۰ دقیقه، و برخی دیگر ۴۵ دقیقه بهترین زمان می باشد.

فعال سازی فاکتور رونویسی نیز به منزله اثری بیوشیمیایی مطرح است، و در برخی از سیستم های آموزشی تنها زمانی موثر است که فواصل بین آموزش به اندازه کافی زیاد باشد به طور مشابه، آموزش تجمعی بدون فاصله ممکن است به میزان کافی، یا مدت زمان کافی، فاکتورهای مورد نیاز برای حمایت و تثبیت حافظه بلند مدت را تضمین نکند (Fioriti et al., ۲۰۱۵; Pettigrew, Smolen, Baxter, & Byrne, ۲۰۰۵).

فعال سازی دوباره حافظه شبیه محرکی است که با مستعد و نیرومند کردن شروع می شود. همچنین قابل قبول به نظر می رسد که فعال سازی دوباره حافظه ممکن است دور بیشتری از رونویسی از ژن های در گیر در LTP را القاء کند. نتیجه، حمایت از تحکیم و تثبیت هر چه بیشتر حافظه بلند مدت است (Bell et al., ۲۰۱۴).

برای ارتباط بیشتر، باید فرض کنیم که در فعال سازی دوباره حافظه، همان نورون ها و سیناپس های جلسات آموزشی اولیه فعال می شوند. در این راه، تمرین و یادگیری، حافظه را در همان مسیر تقویت می کنند. این فرض قابل قبول به نظر می رسد اما نیاز به تحقیقات بیشتر تجربی بیشتری دارد. یک مطالعه با استفاده از MRI عملکردی در طول یادگیری کلامی از این فرض حمایت می کند (Callan & Schweighofer, ۲۰۱۴)؛ در این مطالعه، یک منطقه خاص مغز که در ارتباط با تمرین حافظه کلامی است و در جلو نیمکره چپ مغز قرار دارد، در طول یادگیری فاصله دار نسبت به آموزش تجمعی بیشتر فعال شد.

جای امیدواری است که مدل های پیش بینی تعیین فواصل مطلوب آموزش و یادگیری در آینده نزدیک در دسترس خواهد بود، چرا که داده های مولکولی که برای توسعه چنین مدل لازم است و می تواند پویایی مسیرهای پیام رسانی برای LTP و حافظه بلند مدت مهم هستند را ترسیم کنند، همچنان به سرعت در حال تجمع و پیشرفت هستند. با این حال، با وجود پیشرفت در درک مکانیسم های مولکولی اثرات فاصله، برخی از جنبه های این اثر را نمی توان توسط مدل های فعلی توضیح داد و این مسیر مهمی برای تحقیقات آینده را تشکیل می دهند. برای مثال، در یادگیری کلامی انسان، یک همبستگی مثبت جالب بین طول فواصل بین آموزش یادگیری موثر و حفظ فاصله وجود دارد. فاصله آموزشی در رنج ۱ دقیقه تا ۳ ساعت منجر به یادگیری زبانی بزرگتری نسبت به فاصله ۲ روز یا بیشتر می شود (Cepeda et al., ۲۰۰۶). اما با فاصله خیلی کم (کمتر از ۳۰ ثانیه)، یادگیری موثر نخواهد بود. این همبستگی بین فواصل آموزش نشان می دهد که فواصل آموزش طولانی تر، ترجیحاً مسیرهای حافظه با نیمه عمر بسیار طولانی تری ایجاد می کنند. تعیین این که آیا فعال سازی دوباره حافظه ذخیره شده در سطح شبکه در این فاصله امکان پذیر است، و یا این که آیا امکان انتقال این بازنمودها بین مناطق مختلف مغز وجود دارد، جالب خواهد بود.

چالش دیگر استفاده از استراتژی های نوآورانه در پیش بینی های نظریه های شناختی برای تاثیر فاصله است. به عنوان مثال، همبستگی عصبی تمرینات، موجه و مقبول بودن آنها، و فعال شدن نورون های خاصی که به عنوان یک منبع ذخیره سازی حافظه بلند مدت مطرح هستند، مهم است. به طور تجربی، آیا چنین فعال شدن های تکراری برای تداوم حافظه برای روزها یا بیشتر لازم است؟ و آیا در این فاصله فعال شدن خودبه خودی گروه های خاص نورونی اتفاق خواهد افتاد (Miller, Ayzenshtat, Carrillo-Reid, & Yuste, ۲۰۱۴). همچنان که تکرار یا تمرین گروه هایی که تجربیات اخیر را کد می کنند نیز موثر است (Wu & Foster, ۲۰۱۴).

نتیجه گیری

علاقم تشویق نوآوری ها در درك بهبود حافظه طولانی مدت، این دستکاری ها فاقد دقت لازم برای اثبات قطعی فعال شدن مجدد گروه خاصی از نورون ها هستند که برای تداوم حافظه بلند مدت ضروریند. مطالعات آینده با استفاده از تکنیک اپتوژنیک (به معنی توانایی تحریک سلول های عصبی خاص در مغز به توسط یک باریکه از نور است. این تکنولوژی را مهمترین پیشرفت چند دهه اخیر در رشته علوم اعصاب میدانند) است. اگر بتوان سلول مغزی را کنترل کرد، می توان دریافت که قدرت آنها چگونه است و از کجا می آید، چگونه بر روی ارگان ها و عصب ها تاثیر می گذارند و علاوه بر آن می توان دریافت که اگر بتوان کنترل مغز را بدست گرفت، درمان های جدیدی را نیز می توان ابداع کرد ، مشکلات ناشی از عقب ماندگی ذهنی را درمان کرد و اختلالات عصبی و یا روانی که در مقابل یادگیری قرار دارند را رفع نمود (Smolen et al., ۲۰۱۶).

منابع

Beck, C. D. O., Schroeder, B., & Davis, R. L. (۲۰۰۰). Learning Performance of Normal and Mutant *Drosophila* after Repeated Conditioning Trials with Discrete Stimuli. *The Journal of Neuroscience*, ۲۰(۸), ۲۹۵۳-۲۹۴۴

Bell, M. E., Bourne, J. N., Chirillo, M. A., Mendenhall, J. M., Kuwajima, M., & Harris, K. M. (۲۰۱۴). Dynamics of nascent and active zone ultrastructure as synapses enlarge during long-term potentiation in mature hippocampus. *Journal of Comparative Neurology*, ۵۲۲(۱۷), ۳۸۸۴-۳۸۶۱

Bello-Medina, P .C. (۲۰۱۳). Differential effects of spaced vs. massed training in long-term object-identity and object-location recognition memory. *Behavioural brain research*, ۲۵۰, ۱۱۳-۱۰۲

Benjamin, A. S., & Tullis, J. (۲۰۱۰). What makes distributed practice effective? *Cognitive psychology*, ۶۱(۳), ۲۴۷-۲۲۸

Bhat, M. (۲۰۱۶). MODERN TRENDS IN EDUCATION DIFFERENT APPROACHES TO LEARNING. *Indian Journal of Applied Research*, ۶(۱)

Bourne, J. N., & Harris, K. M. (۲۰۱۱). Coordination of size and number of excitatory and inhibitory synapses results in a balanced structural plasticity along mature hippocampal CA ۱ dendrites during LTP. *Hippocampus*, ۲۱(۴), ۳۷۳-۳۵۴

Bradley, A., & Patton, A. (۲۰۱۳). Spaced Learning: Making Memories Stick. Accessed at a www.innovationunit.org/sites/.../Spaced_Learning-downloadable_۱.pdf.

Callan, D. E., & Schweighofer, N. (۲۰۱۴). Neural correlates of the spacing effect in explicit verbal semantic encoding support the deficient processing theory. *Human brain mapping*, ۳۱(۴), ۶۵۹-۶۴۵

Cao, G., & Harris, K. M. (۲۰۱۴). Augmenting saturated LTP by broadly spaced episodes of theta-burst stimulation in hippocampal area CA ۱ of adult rats and mice. *Journal of neurophysiology*, ۱۱۲(۸), ۱۹۱۶-۱۹۲۴

Cepeda, N. J., Pashler, H., Vul, E., Wixted, J. T., & Rohrer, D. (۲۰۰۶). Distributed practice in verbal recall tasks: A review and quantitative synthesis. *Psychological bulletin*, ۱۳۲(۳), ۳۵۴

Fioriti, L., Myers, C., Huang, Y.-Y., Li, X., Stephan, J. S., Trifilieff, P., et al. (۲۰۱۵). The persistence of hippocampal-based memory requires protein synthesis mediated by the prion-like protein CPEB β . *Neuron*, ۸۶(۶), ۱۴۴۸-۱۴۳۳

Greene, R. L. (۱۹۸۹). Spacing effects in memory: Evidence for a two-process account. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, ۱۵(۳), ۳۷۱

Jones, M. W., Errington, M. L., French, P. J., Fine, A., Bliss, T. V. P., Garel, S., et al. (۲۰۰۱). A requirement for the immediate early gene *Zif ۲۶۸* in the expression of late LTP and long-term memories. *Nature neuroscience*, ۴(۳), ۲۹۶-۲۸۹

Karpicke, J. D., & Roediger, H. L. (۲۰۱۰). Is expanding retrieval a superior method for learning text materials? *Memory & Cognition*, ۳۸(۱), ۱۲۴-۱۱۶

Kim, M., Huang, T., Abel, T., & Blackwell, K. T. (۲۰۱۰). Temporal sensitivity of protein kinase a activation in late-phase long term potentiation. *PLoS Comput Biol*, ۶(۲), e.۱۰۰۰۶۹۱

Kramar, B. A., Babayan, A. H., Gavin, C. F., Cox, C. D., Jafari, M., Gall, C. M., et al. (۲۰۱۲). Synaptic evidence for the efficacy of spaced

learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ۱۰۹(۱۳), ۵۱۲۶-۵۱۲۱

Landauer, T. K., & Ross, B. H. (۱۹۷۷). Can simple instructions to use spaced practice improve ability to remember a fact?: An experimental test using telephone numbers. *Bulletin of the Psychonomic Society*, ۱۰(۲۱۸-۲۱۵), ۳

Lechner, H. A., Squire, L. R., & Byrne, J. H. (۱۹۹۹). ۱۰۰ years of consolidation—remembering Müller and Pilzecker. *Learning & Memory*, ۶(۲), ۸۷-۷۷

Logan, J. M., Castel, A. D., Haber, S., & Viehman, E. J. (۲۰۱۲). Metacognition and the spacing effect: the role of repetition, feedback, and instruction on judgments of learning for massed and spaced rehearsal. *Metacognition and Learning*, ۷(۳), ۱۹۵-۱۷۵

Lynch, G., Cox, C. D., & Gall, C. M. (۲۰۱۴). Pharmacological enhancement of memory or cognition in normal subjects. *Frontiers in systems neuroscience*, ۸

Lynch, G., Kramár, E. A., Babayan, A. H., Rumbaugh, G., & Gall, C. M. (۲۰۱۳). Differences between synaptic plasticity thresholds result in new timing rules for maximizing long-term potentiation. *Neuropharmacology*, ۶۴, ۳۶-۲۷

Madigan, S. A. (۱۹۶۹). Intraserial repetition and coding processes in free recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, ۸(۶), ۸۳۵-۸۲۸

Mauelshagen, J., Sherff, C. M., & Carew, T. J. (۱۹۹۸). Differential induction of long-term synaptic facilitation by spaced and massed applications of serotonin at sensory neuron synapses of *Aplysia californica*. *Learning & Memory*, ۵(۳), ۲۵۶-۲۴۶

McDougall, J., & Sanders, R. (۲۰۱۱). What our students have taught us about virtual learning. *Networks*.

Melton, A. W. (۱۹۷۰). The situation with respect to the spacing of repetitions and memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, ۹(۵), ۶۰۶-۵۹۶

Menzel, R., Manz, G., Menzel, R., & Greggers, U. (۲۰۰۱). Massed and spaced learning in honeybees: the role of CS, US, the intertrial interval, and the test interval. *Learning & Memory*, ۸(۴), ۲۰۸-۱۹۸

Miller, J.-e. K., Ayzenshtat, I., Carrillo-Reid, L., & Yuste, R. (۲۰۱۴). Visual stimuli recruit intrinsically generated cortical ensembles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ۱۱۱(۳۸), E۴۰۵۳-E.۴۰۶۱

Mioduser, D., & Betzer, N. (۲۰۰۸). The contribution of Project-based-learning to high-achieversâ€™ acquisition of technological knowledge and skills. *International Journal of Technology and Design Education*, ۱۸(۱), ۷۷-۵۹

Murre, J. M. J., & Dros, J. (۲۰۱۵). Replication and Analysis of Ebbinghausâ€™ Forgetting Curve. *PloS one*, ۱۰(۷), e.۰۱۲۰۶۴۴

Nabavi, S., Fox, R., Proulx, C. D., Lin, J. Y., Tsien, R. Y., & Malinow, R. (۲۰۱۴). Engineering a memory with LTD and LTP. *Nature*.

Pettigrew, D. B., Smolen, P., Baxter, D. A., & Byrne, J. H. (۲۰۰۵). Dynamic properties of regulatory motifs associated with induction of three temporal domains of memory in aplysia. *Journal of computational neuroscience*. ۱۸۱-۱۶۳, (۲)۱۸,

Philips, G. T., Tzvetkova, E. I., & Carew, T. J. (۲۰۰۷). Transient mitogen-activated protein kinase activation is confined to a narrow temporal window required for the induction of two-trial long-term memory in Aplysia. *The Journal of Neuroscience*, ۲۷(۵۰), -۱۳۷۰۱ .۱۳۷۰۵

Raman, M., McLaughlin, K., Violato, C., Rostom, A., Allard, J. P., & Coderre, S. (۲۰۱۰). Teaching in small portions dispersed over time enhances long-term knowledge retention. *Medical teacher*, ۳۲(۳), -۲۵۰ .۲۵۰

Rex, C. S., Chen, L. Y., Sharma, A., Liu, J., Babayan, A. H., Gall, C. M., et al. (۲۰۰۹). Different Rho GTPaseâ€™dependent signaling pathways initiate sequential steps in the consolidation of long-term potentiation. *The Journal of cell biology*, ۱۸۶(۱), ۹۷-۸۵

Rey, A. E., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., & Versace, R. m. (۲۰۱۵). Memory plays tricks on me: Perceptual bias induced by memory reactivated size in Ebbinghaus illusion. *Acta psychologica*, ۱۶۱, -۱۰۴ .۱۰۹

Robbins, D., & Bush, C. T. (۱۹۷۳). Memory in great apes. *Journal of Experimental Psychology*, ۹۷(۳), ۳۴۴

Siegel, L. L., & Kahana, M. J. (۲۰۱۴). A retrieved context account of spacing and repetition effects in free recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, ۴۰(۳), ۷۵۵

Smolen P., Baxter, D. A., & Byrne, J. H. (۲۰۱۴). Simulations suggest pharmacological methods for rescuing long-term potentiation. *Journal of theoretical biology*, ۳۶۰, ۲۵۰-۲۴۳

Smolen, P., Zhang, Y., & Byrne, J. H. (۲۰۱۶). The right time to learn: mechanisms and optimization of spaced learning. *Nature Reviews Neuroscience*, ۱۷(۲), ۸۸-۷۷

Tzeng, O. J., & Cotton, B. (۱۹۸۰). A study-phase retrieval model of temporal coding. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, ۶(۶), ۷۰۵

Wei, Y., & Koulakov, A. A. (۲۰۱۴). Long-term memory stabilized by noise-induced rehearsal. *The Journal of Neuroscience*, ۳۴(۴۷), ۱۵۸۱۵-۱۵۸۰۴

Winkler, I. n., & Cowan, N. (۲۰۰۵). From sensory to long-term memory: evidence from auditory memory reactivation studies. *Experimental psychology*, ۵۲(۱), ۲۰-۳

Wu, X., & Foster, D. J. (۲۰۱۴). Hippocampal replay captures the unique topological structure of a novel environment. *The Journal of Neuroscience*, ۳۴(۱۹), ۶۴۶۹-۶۴۵۹

Zhang, Y., Liu, R.-Y., Heberton, G. A., Smolen, P., Baxter, D. A., Cleary, L. J., et al. (۲۰۱۲). Computational design of enhanced learning protocols. *Nature neuroscience*, ۱۵(۲), ۲۹۷-۲۹۴