

Szegedi Tudományegyetem
Szent-Györgyi Albert Orvostudományi Kar
Klinikai Orvostudományi Doktori Iskola

**A statisztikai tanulás neuroplaszticitásának serkentése agyi stimulációs és viselkedéses
intervencióval**

PhD Tézis

Szücs-Bencze Laura

Témavezetők:

Németh Dezső PhD, DSc

Szabó Nikoletta MD, PhD



Szeged, 2025

Az értekezés alapját képező közlemények

I. Szücs-Bencze, L., Vékony, T., Pesthy, O., Kocsis, K., Kincses, T. Zs., Szabó, N., & Nemeth, D., (2025). Enhancing retrieval capacity of the predictive brain through dorsolateral prefrontal cortex intervention. *Cerebral Cortex*, 35(2).

IF: 2.9, SJR indicator (Cognitive Neuroscience): Q1

II. Szücs-Bencze, L., Fanuel, L., Szabó, N., Quentin, R., Nemeth, D., & Vékony, T. (2023). Manipulating the rapid consolidation periods in a learning task affects general skills more than statistical learning and changes the dynamics of learning. *eNeuro*, 10(2).

IF: 2.7, SJR indicator (Medicine): Q1

Cumulative IF = 5.6

Az értekezéshez közvetlenül nem kapcsolódó közlemények

I. Szücs-Bencze, L., Vékony, T., Pesthy, O., Szabó, N., Kincses, Zs. T., Turi, Zs., Nemeth, D. (2023). Modulating visuomotor sequence learning by repetitive transcranial magnetic stimulation: What do we know so far? *Journal of Intelligence*, 11(10), 201.

IF: 2.8, SJR indicator (Education): Q2

II. Veréb, D., Szabó, N., Kincses, B., Szücs-Bencze, L., Faragó, P., Csomós, M., Antal, Sz., Kocsis, K., Tuka, B., Kincses, Zs. T. (2024). Imbalanced temporal states of cortical blood-oxygen-level-dependent signal variability during rest in episodic migraine. *The Journal of Headache and Pain*, 25(1), 114.

IF: 7.3, SJR indicator (Neurology): D1

Cumulative IF = 15.7

Bevezetés

A statisztikai tanulás (ST) az emberi agy azon alapvető képességét jelenti, hogy képes kinyerni és elsajátítani a szenzoros inputban jelenlévő valószínűségi szabályszerűségeket. Azáltal, hogy detektáljuk és érzékenyé válunk a környezeti ingerek időben megjelenő gyakorisági jellemzőire és együttes előfordulására, képessé válunk bejósolni a lehetséges jövőbeni eseményeket, amely adaptív alkalmazkodást tesz lehetővé. A ST fontos jellemzője, hogy implicit módon, azaz tudatos észlelés és erőfeszítés nélkül történik. Olyan neurológiai kórképek, mint a Parkinson-kór és a stroke, széleskörűen károsíthatják azokat a kognitív és motoros készségeket, amelyek alapját a ST képezi. Ezáltal a ST serkentésére irányuló beavatkozások javíthatják a rehabilitációs eredményeket is. Jelen disszertáció két olyan tanulmányt mutat be, amelyek azt vizsgálták, hogyan lehet modulálni a ST különböző fázisait – a konszolidációt (megtanult minták tárolása) és előhívást (tárolt minták elérése) – agyi stimulációs és viselkedéses intervenciók segítségével. Ezen kutatások eredményei iránymutatással szolgálnak a jövőbeni ST fejlesztési stratégiákra nézve, mind egészséges, mind klinikai populációk számára.

Neurális hátterét tekintve a ST egy kiterjedt és dinamikus hálózatot foglal magába, amely kortikális és szubkortikális régiókat integrál. A ST-ban mind modalitás-specifikus, mind modalitás-független kortikális agyterületek részt vesznek. Emellett olyan szubkortikális struktúrák, mint a bazális ganglionok és a hippokampusz, szintén kulcsszerepet játszanak a ST-ban. A ST működése ezen kortikális és szubkortikális agyterületek által támogatott kognitív rendszerek közötti interakción alapul. A prefrontális kéreg (PFK) a frontostriatális hálózaton keresztül szabályozza a szubkortikális struktúrákat, ezáltal egyensúlyt teremtve a habituális és célvezérelt tanulási mechanizmusok között. A hippokampusz szintén kölcsönhatásban van PFK-gel és a striatummal, elősegítve az emlékezeti kódolási és konszolidációs folyamatokat. Diffúziós tenzor képalkotó tanulmányok alapján a ST összefügg a nucleus caudatust, hippokampuszt, valamint a dorzolaterális prefrontális kérget (DLPFK) összekötő pályák integritásával, ami tovább erősíti ezeknek a neurális összeköttetéseknek a szerepét.

A ST tehát egy olyan folyamat, amely során az egyén a környezetben jelenlévő mintázatokat képes elsajátítani ismételt expozíció révén. A tanulási fázissal kapcsolatban a kutatások azt mutatják, hogy a ST gyorsan bekövetkezik: a résztvevők már az első tanulási blokk során érzékenységet mutatnak a statisztikai szabályszerűségek iránt. A statisztikai kapcsolatoknak ez a gyors elsajátítása arra utal, hogy a ST egy olyan automatikus és alapvető folyamat, amely lehetővé teszi a környezet szabályszerűségeihez való gyors és adaptív

alkalmazkodást. A konszolidáció stabilizálja az elsajátított statisztikai tudást, lehetővé téve annak hosszú távú elraktározását. Habár hangsúlyozzák az alvás szerepét a tanulás egyes formáinak konszolidációjában, a kutatások alapján a vizuomotoros doménben mért valószínűségi alapú ST nem profitál az alvásfüggő konszolidációból. Egy új felfedezés a konszolidációs kutatások új korszakát hozta el: ez a gyors konszolidáció, amely akár másodpercek alatt, a tanulási folyamatba beiktatott rövid szünetek során bekövetkezhet. Az eddigi tanulmányok ellentmondásosak a gyors konszolidáció ST-ban betöltött szerepét illetően. A statisztikai tudás előhívásáról szóló eredmények azonban egybehangzóan azt mutatják, hogy ez egy stabil és robusztus tudás, amely akár egy év után is hozzáférhető marad.

Összegezve, a ST három alapvető fázisból áll: gyors kódolási fázis, stabil konszolidációs fázis és robusztus előhívási fázis. A tanulási fázisokra vonatkozó kutatási eredmények felvetik azt a fontos kérdést, hogy hogyan lehet ezt a robusztus folyamatot agyi stimulációs és viselkedéses intervenciókkal modulálni. Az ismétlődő transzkraniális mágneses stimuláció (rTMS) egy nem-invazív agyi stimulációs eljárás, amely mágneses impulzusok ismételt leadásán keresztül befolyásolja a neurális aktivitást az adott kortikális régióban. Ez a módszer lehetővé teszi a kutatók számára, hogy nagy idői felbontással manipulálják az agyi aktivitást, betekintést nyerve az adott agyterület tanulásban betöltött szerepébe. Az rTMS-t a tanulási és konszolidációs fázisokban alkalmazó kutatások ellentmondásos eredményeket mutatnak. A tanulási blokkok között alkalmazott gátló rTMS a DLPHK felett javította a ST teljesítményt, míg az ugyanezen a területen alkalmazott facilitáló rTMS a teljesítmény csökkenéséhez vezetett. Azonban egyetlen agyi stimulációs tanulmány sem összpontosított a ST előhívási fázisára. Jelen disszertáció egyik fő célja ennek a szakirodalmi résznek a betöltése.

A viselkedéses beavatkozások szintén segítenek betekintést nyerni a ST különböző fázisaiba. A kutatások azt mutatják, hogy a valószínűségi alapú tanulást fokozhatja a stressz, valamint a gyorsaság előnyben részesítése a pontossággal szemben. Továbbá az eredmények azt sugallják, hogy a ST minimális figyelmi erőforrást igényel. Sőt, a stressz és az osztott figyelem még fokozhatja is az elsajátítást bizonyos helyzetekben. Az előhívási fázist illetően a kutatások azt mutatják, hogy kettősfeladat helyzetben ugyan lassul a reakcióidő (RI), de a statisztikai tudás előhívása intakt marad. A konszolidációt olyan tényezők befolyásolják, mint a tudatosulás vagy a szekvencia komplexitása. A legújabb tanulmányok középpontjában azonban a gyors, másodpercek alatt bekövetkező konszolidációs forma, a gyors konszolidáció áll. Jelen dolgozat másik fő célja megvizsgálni ennek a gyors konszolidációnak a vizuomotoros ST-ban betöltött szerepét.

Célkitűzés

Jelen disszertáció két tanulmányt mutat be, amelyek a ST konszolidációjára és előhívására vonatkozó szakirodalmi réseket hivatottak betölteni (1. Táblázat). Bár a kutatások szerint a DLPFK feletti gátló rTMS serkenti a ST-t és annak konszolidációját, az előhívásra gyakorolt hatását eddig nem vizsgálták. Ezt a hiányt pótolja az **I. kutatás**, amely a bal, jobb vagy bilaterális DLPFK felett alkalmazott gátló rTMS hatását vizsgálta az implicit probabilisztikus szekvenciák előhívására nézve. A résztvevők az Alternáló Szeriális Reakcióidő (ASRT) feladatot végezték el, majd a tanulást követő 24 órás konszolidáció után ismételt tesztelést végeztünk, amelyet megelőzően 10 perces rTMS-ben részesültek. Az aktív stimulációs csoportok teljesítményét egy sham (álstimuláció) csoporttal hasonlítottuk össze.

A korábbi vizsgálatok ellentmondásos eredményeket mutattak a rövid pihenőidők alatt bekövetkező gyors konszolidáció ST-ban betöltött szerepéről. Így a **II. kutatás** a tanulási folyamatba beiktatott pihenőidők időtartamát manipulálva azt vizsgálta, hogy a pihenőidők hossza befolyásolja-e ST-t. A résztvevők az ASRT feladatot 15 másodperces, 30 másodperces, vagy önszabályozott rövid pihenőidőkkel végezték. A vizsgálat a pihenőidők időtartamának hatását elemezte az implicit probabilisztikus szekvenciák elsajátítása és az általános készségtanulás során. Elemzéseinket kiterjesztettük az offline és online tanulási fázisokra, hogy a pihenőidők hosszúságának szerepét ellenőrizhessük a tanulás dinamikájára nézve is.

1. Táblázat: A szakirodalmi rések és az ezek betöltését megcélzó főbb kutatási kérdések

	Szakirodalmi rész	Kutatási kérdés
I. kutatás	A DLPFK szerepe a statisztikai tudás előhívásában	<p>a. A DLPFK feletti gátló TMS modulálja a ST előhívási fázisát?</p> <p>b. A DLPFK gátló hatása az előhívásra különbözik-e a féltekei lateralizációtól függően (bal, jobb vagy bilaterális stimuláció)?</p>
II. kutatás	A gyors konszolidáció szerepe a ST-ban	<p>a. Hogyan befolyásolják a különböző hosszúságú rövid pihenőidők a ST teljesítményét?</p> <p>b. A pihenőidők hossza eltérően befolyásolja-e a ST online (blokkon belüli) és offline (blokkok közötti) fázisait?</p>

Anyag és módszer

I. kutatás – Agyi stimulációs intervenció a ST előhívásában

Összesen 104 egészséges felnőtt vett részt a vizsgálatban, közülük 101-en teljesítették a részvételt. A résztvevőket véletlenszerűen négy csoport egyikébe soroltuk: Bal DLPFK, Jobb DLPFK, Bilaterális DLPFK vagy Sham (álstimuláció). Valamennyi résztvevő ép vagy korrigált látással rendelkezett, és nem számolt be TMS kontraindikációról. A vizsgálat előtt írásos beleegyezésüket adták, a kutatást pedig a Szegedi Tudományegyetem Regionális Tudományos és Kutatásetikai Bizottsága hagyta jóvá.

Az implicit vizuomotoros ST-t az ASRT feladattal mértük az E-Prime 3.0 szoftver segítségével. A résztvevőknek egy vizuális ingerre kellett reagálniuk, amely a képernyő négy lehetséges helyén jelent meg. A résztvevők tudta nélkül az ingerek egy nyolcelemű probabilisztikus szekvenciát követtek, amelyben mintázatot követő és random elemek váltakoztak. A ST mértékét a magas (62,5%) és alacsony (37,5%) valószínűségű ingerhármasok (tripletek) közötti RI különbségek alapján operacionalizáltuk. Kontroll memóriatesztként a Párosított Asszociációs Tanulási Feladatot (PALT) alkalmaztuk a deklaratív tanulás mérésére.

Az rTMS-t a Magstim Rapid² stimulátorral végeztük (1 Hz, 600 impulzus) 10 percig a DLPFK felett (bal, jobb vagy bilaterális), a maximális stimulációs intenzitás 55%-val. A sham stimuláció során a tekercset 90°-kal elforgattuk a koponyától. A tekercs elhelyezése a 10-20 EEG rendszer szerint történt.

A kutatás két egymás utáni napon zajlott: (1) A tanulási fázis során a résztvevők elvégezték az ASRT feladatot (25 blokk) és a PALT tanulási fázisát, (2) az előhívási fázis során pedig, 24 órás offline periódust követően, 1 Hz rTMS-ben részesültek 10 percen keresztül, majd ismét elvégezték az ASRT feladatot (5 blokk) és a PALT előhívási fázisát. A feladatok sorrendjét a résztvevők és az alkalmazások között kiegyenlítettük.

Az ASRT eredmények előfeldolgozása magába foglalta az ismétlődő ingerek, pontatlan válaszok, valamint a 100 ms alatti és outlier RI értékek kizárását. A PALT esetében három tanulási indexet számoltunk: elemmemória, automatikus asszociáció és rekollekció. Az ASRT adatok elemzésére lineáris vegyes modelleket alkalmaztunk (független változók: triplet típus, csoport, blokk), míg a PALT tanulási indexeit ANOVA-val elemeztük. A statisztikai szignifikanciaszintet 0,05-nél határoztuk meg, és a post hoc összehasonlításokhoz Bonferroni-korrekción alkalmaztunk.

II. kutatás – Viselkedéses intervenció a ST konszolidációjában

Összesen 361 egyetemi hallgató vett részt a vizsgálatban, közülük 268-an kerültek be a végső mintába. A résztvevőket véletlenszerűen három csoport egyikébe osztottuk: 15 másodperces, 30 másodperces vagy önszabályozott pihenőidők. Valamennyi résztvevő ép vagy korigált látással rendelkezett, és nem számolt be neurológiai vagy pszichiátriai betegségről. A résztvevők írásos beleegyezésüket adták, és a kutatást az Eötvös Loránd Tudományegyetem Kutatásetikai Bizottsága hagyta jóvá.

Az implicit ST-t és az általános készségtanulást az ASRT feladattal mértük, amely a következő tényezőkből tevődik össze: (1) a feladatot JavaScript programnyelven programoztuk és online futtattuk, (2) a résztvevők a saját számítógépük billentyűzetét használták a válaszadáshoz, (3) a blokkok közötti pihenőidők hosszát manipuláltuk, (4) a tanulási fázist gyakorlóblokkok előzték meg.

Az online kísérletet a Gorilla Experiment Builder segítségével bonyolítottuk le. A résztvevők véletlenszerűen kerültek hozzárendelésre az ASRT feladat egyik verziójához: 15 másodperces, 30 másodperces vagy önszabályozott pihenőidőkkel. A feladat két gyakorlóblokkot, majd 25 tanulási blokkot tartalmazott. A feladat után teszteltük a résztvevők tudatosságát a mintázatot illetően, valamint a munkamemóriájukat a 0-vissza és 2-vissza feladatokkal.

Az adatok minőségének biztosítása érdekében előre meghatározott kritériumok alapján zártunk ki résztvevőket (pl., 80% alatti pontosság, magas RI-k). A pontatlan válaszokat és ismétlődő ingereket szintén kizártuk az elemzésből. A ST mutatót a magas és alacsony valószínűségű tripletek RI különbsége adta, míg az általános készségtanulást a medián RI alapján mértük. Az online és offline tanulási fázisok méréséhez ezeknek a különbségi mutatóknak a változását mértük a tanulási blokkon belül és a tanulási blokkok között.

A statisztikai elemzéseket a JASP szoftverrel végeztük. A ST mutató csoportok közötti összehasonlításához vegyes elrendezésű ANOVA-t végeztünk. Az online és offline változásokat külön elemeztük, és az ANOVA-ba bevontuk a Tanulási Fázist (offline vs. online) ismételt mérés tényezőként. Az általános készségtanulási mutatókon ugyanilyen ANOVA-t végeztünk. A szignifikanciaszintet 0,05 értéken határoztuk meg, és a post hoc összehasonlításoknál Bonferroni-korrekciót alkalmaztunk.

Eredmények

I. kutatás – Agyi stimulációs intervenció a ST előhívásában

A Tanulási fázisban minden résztvevő szignifikáns ST-t mutatott ($F(1, 4840) = 278,76$, $p < 0,001$), és az ST mértéke az idővel fokozódott ($F(1, 4840) = 33,62$, $p < 0,001$). Azonban a csoportok között nem volt szignifikáns különbség sem a ST-ban ($F(3, 4840) = 0,45$, $p = 0,714$), sem az általános készségtanulásban ($F(3, 97) = 0,05$, $p = 0,987$) a stimulációt megelőzően.

Az Előhívási fázisban a ST a stimulációt követően is intakt maradt ($F(1, 804) = 199,10$, $p < 0,001$). A Csoport \times Triplet Típus interakció szignifikánsnak mutatkozott ($F(3, 804) = 3,62$, $p = 0,013$), ami csoportkülönbséget jelzett az ST teljesítményben. A post hoc tesztek azt mutatták, hogy a Bilaterális DLPFK ($p < 0,01$) és a Bal DLPFK ($p < 0,05$) csoportok jobban teljesítettek, mint a Sham csoport, de a többszörös összehasonlításra alkalmazott korrekció után csak a Bilaterális DLPFK csoport eredménye maradt szignifikáns.

Az Előhívási fázisban a stimulációt követően nem volt szignifikáns csoportkülönbség a deklaratív előhívási teljesítményben, beleértve az elemmemóriát ($F(3, 97) = 0,85$, $p = 0,46$, $\eta^2p = 0,02$), az automatikus asszociációt ($F(3, 97) = 0,50$, $p = 0,67$, $\eta^2p = 0,01$), és a rekollekciót ($F(3, 97) = 0,4$, $p = 0,79$, $\eta^2p = 0,01$).

II. kutatás – Viselkedéses intervenció a ST konszolidációjában

Az összesített ST tekintetében egy fokozatos teljesítménynövekedés volt megállapítható minden résztvevőnél ($F(4, 1060) = 25,68, p < 0,001, \eta p^2 = 0,09$), jelentősebb változásokkal a távolabbi feladat-szakaszok között. A rövid pihenőidők hossza nem befolyásolta a ST-t, mivel a három csoport között nem mutatkozott szignifikáns különbség ($F(2, 265) = 0,65, p = 0,53, \eta p^2 < 0,01$), és a tanulás időbeni lefutása sem tért el a csoportok között ($F(8, 1060) = 0,28, p = 0,97, \eta p^2 < 0,01$).

Az összesített általános készségtanulás szintén minden résztvevőnél megfigyelhető volt ($F(2,73, 723,72) = 275,21, p < 0,001, \eta p^2 = 0,51$), a RI-k folyamatos csökkenésével a feladat során. Az önirányított csoport lassabb RI-vel operált a 15 másodperces és 30 másodperces csoportokhoz képest ($F(2, 265) = 8,69, p < 0,001, \eta p^2 = 0,06$), és ez a különbség az első tanulási blokk után vált szignifikánssá ($p < 0,01$).

A ST dinamikáját tekintve a Tanulási Fázis \times Csoport interakció szignifikáns volt ($F(2, 265) = 3,51, p = 0,03, \eta p^2 = 0,03$), ami csoportkülönbséget jelzett az online és offline változásokban. Kizárólag a 15 másodperces csoport mutatott szignifikáns online tanulást ($t(89) = 3,50, p < 0,001$) és szignifikáns offline felejtést ($t(89) = -3,39, p < 0,01$), míg a másik két csoportnál nem voltak megfigyelhetőek szignifikáns online és offline hatások.

Az általános készségtanulás dinamikáját tekintve minden csoportnál megfigyelhető volt az online tanulás ($t(267) = 29,14, p < 0,001$) mellett bekövetkező teljesítménycsökkenés az offline periódusok alatt ($t(267) = -30,60, p < 0,001$) ($F(2, 265) = 920,49, p < 0,001, \eta p^2 = 0,77$). Habár a Tanulási Fázis \times Csoport interakció szignifikánsnak mutatkozott ($F(2, 265) = 4,38, p = 0,01, \eta p^2 = 0,03$), a csoportok közötti különbségek az online és offline változásokban a korrekció után nem maradtak szignifikánsak (minden $p > 0,17$).

Megvitatás

Jelen disszertáció két olyan vizsgálat eredményeit összegzi, amelyek a célja a ST modulálása volt agyi stimulációs és viselkedéses intervenciók révén (2. Táblázat). Mindkét tanulmány a ST különböző fázisaira vonatkozó szakirodalmi rések betöltésére irányult, a ST különböző fázisainak manipulálásán keresztül. Ezáltal jelen a tanulmány segít mélyebb betekintést nyerni a ST alapjául szolgáló kognitív és neurális mechanizmusokba.

Az **I. kutatás** a TMS hatását vizsgálta a ST előhívására nézve. Korábbi kutatásokban még nem vizsgálták, hogy a TMS hogyan befolyásolja a korábban elsajátított statisztikai tudás hozzáférhetőségét. A résztvevők gátló rTMS-ben részesültek a bal, jobb vagy bilaterális DLPFK (Brodmann 9) felett közvetlenül a statisztikai tudás tesztelése előtt. Az aktív stimulációs csoportok teljesítményét egy álstimulációs, úgynevezett sham csoporthoz viszonyítottuk. Az eredményeink alapján a kétoldali DLPFK gátlása szignifikánsan serkentette az előhívási kapacitást ST során. Kizárható, hogy ez egy általános kognitív hatás lenne, mivel a deklaratív előhívást mérő feladatban nem volt változás észlelhető az rTMS hatására. Ezek az eredmények arra engednek következtetni, hogy a DLPFK kulcsszerepet játszik a ST előhívásának szabályozásában, és a bilaterális gátlás képes lehet ellensúlyozni a két agyfélteke közötti kompenzációs mechanizmusokat.

A **II. kutatás** azt vizsgálta, hogy a tanulási blokkok közötti rövid pihenőidők hossza miként befolyásolja a ST és az általános készségtanulás dinamikáját. Három csoport vett részt a kísérletben, akik az ASRT feladatot különböző hosszúságú pihenőidők mellett végezték: 15 másodperces, 30 másodperces vagy önszabályozott szünetekkel. Eredményeinkben azt találtuk, hogy a pihenőidők hossza nem befolyásolja a ST teljesítményét, azonban hatással van az általános készségtanulásra. Az önszabályozott csoport szignifikánsan lassabb teljesítményt nyújtott a fix időtartamú csoportokhoz képest. Habár az összesített ST-t nem, a ST dinamikáját befolyásolta a pihenőidők hossza. A rövidebb (15 másodperces) pihenőidők esetében a ST kizárólag az online fázisban jelentkezett, csökkentve az offline periódusok profitációját a gyors konszolidációból. Ezzel szemben a hosszabb (30 másodperces) pihenők kiegyensúlyozott tanulást eredményeztek az online és offline fázisok között.

Az itt bemutatott tanulmányok elméleti, módszertani és alkalmazott szempontból is jelentősek. Az **I. kutatás** bizonyította, hogy a DLPFK gátló stimulációja megbízhatóan modulálja a ST-t, megerősítve a DLPFK okozati szerepét a tanulás szabályozásában. Fontos előrelépés ugyanakkor, hogy a tanulmány kiterjeszti a korábbi eredményeket és megerősíti a DLPFK szerepét az előhívási fázisban is. Ezek az eredmények összhangban állnak a prediktív

kódolás elméleteivel, amelyek szerint a DLPHK gátlása csökkenti a top-down interferenciát, elősegítve a statisztikai tudás előhívását. Emellett megkérdőjelezi a kettős folyamatelméleteket, feltárva az implicit és explicit tanulási rendszerek közötti komplex interakciókat.

A **II. kutatás** új bizonyítékot szolgáltat a gyors konszolidáció ST-ban betöltött szerepéről, kimutatva, hogy a pihenőidők hossza meghatározza, hogy ez a folyamat kizárólag online vagy mind az online, mind az offline fázisban bekövetkezik-e. Emellett mindkét tanulmány okozati összefüggéseket tár fel kísérleti manipulációk révén: az **I. kutatás** közvetlen bizonyítékot szolgáltat a DLPHK részvételére a ST előhívásában, míg a **II. kutatás** kimutatja, hogy a pihenőidők manipulálása okozati hatást gyakorol a ST dinamikájára, feltárva a temporális tényezők szerepét a tanulási folyamatokban.

A tanulmányok módszertani innovációi is jelentősnek mondhatóak. Az **I. kutatás** egyedülálló módon alkalmazta a bilaterális és unilaterális stimulációt ugyanazon kutatási elrendezésen belül, finomítva ezzel a féltekei hozzájárulások megértését. A **II. kutatás** a ST elemzését finomítja azáltal, hogy különválasztja az online és offline tanulási fázisokat, és szisztematikusan összehasonlítja a fix és önszabályozott pihenőidők szerepét.

Az eredményeknek mindazonáltal klinikai, oktatási és kognitív fejlesztési alkalmazása is lehet. Klinikai környezetben a bilaterális TMS protokollok optimalizálhatják a kognitív károsodások, például a stroke utáni rehabilitáció sikerességét. Az oktatásban a pihenőidők optimalizálása javíthatja a tanulási eredményeket, különösen olyan készségek esetében, amelyek igénybe veszik a ST-t (pl. nyelvtanulás). Tágabb értelemben ezek a felismerések hozzájárulhatnak az időskori kognitív egészség megőrzésére irányuló stratégiák kialakításához, támogatva az önálló életvitelt és az intézményi gondozás szükségességének késleltetését.

2. Táblázat: A főbb kutatási kérdések és az eredmények összefoglalása

	Kutatási kérdés	Eredmény
I. kutatás	a. A DLPFK feletti gátló TMS modulálja a ST előhívási fázisát?	A DLPFK gátlása serkenti a statisztikai tudás előhívását
	b. A DLPFK gátló hatása az előhívásra különbözik-e a féltekei lateralizációtól függően (bal, jobb vagy bilaterális stimuláció)?	Bilaterális stimulációval érhető el a legkifejezettebb hatás
II. kutatás	a. Hogyan befolyásolják a különböző hosszúságú rövid pihenőidők a ST teljesítményét?	A rövid pihenőidők hossza nem befolyásolja az ST teljesítményét
	b. A pihenőidők hossza eltérően befolyásolja-e a ST online (blokkon belüli) és offline (blokkok közötti) fázisait?	A rövidebb pihenőidők megváltoztatják az ST dinamikáját, áttolva azt az online fázisra

Összefoglalás

Az itt bemutatott tanulmányok rendelkeznek mind elméleti, mind módszertani, mind alkalmazott jelentőséggel. Elméleti jelentőségüket tekintve mélyítik a ST kevésbé feltárt fázisainak – a konszolidációnak és az előhívásnak – a megértését. Emellett új módszertani megközelítéseket vezetnek be ezen folyamatok átfogóbb megragadására. Gyakorlati jelentőségük szempontjából olyan stratégiákat vázolnak fel a ST optimalizálására, amelyek segíthetik az egészséges és klinikai populációk készségtanulását.

Az **I. kutatás** teoretikus jelentősége, hogy megerősíti a DLPHK szerepét a ST előhívásában. Emellett módszertani szempontból alátámasztja a bilaterális stimuláció hatékonyságát, és felveti a neuromoduláció lehetőségét a ST serkentésére klinikai populációkban.

A **II. kutatás** feltárta, hogy a pihenőidők hossza eltérően befolyásol egymástól független tanulási folyamatokat. Emellett hangsúlyozza annak a fontosságát, hogy a tanulás dinamikájára is figyelmet fordítsunk az összesített tanulási mutatók mellett. A tanulmány alkalmazott következtetései iránymutatással szolgálnak a tanulási feladatok tervezéséhez, hogy azok mindkét tanulási fázist támogassák.

Együttesen ezek a tanulmányok előmozdítják a ST neurokognitív mechanizmusainak megértését, és azt sugallják, hogy a neuromoduláció és a feladatok megfelelő kialakítása hatékony stratégiát jelenthetnek a ST serkentésének szempontjából.