

**Eficiența intervenției neurotehnologice multimodale
(fotobiomodulație cerebrală, neurofeedback qEEG și biofeedback
inimă-creier) în optimizarea atenției și performanței școlare la copii
din ciclul gimnazial (11–15 ani): Un studiu clinic randomizat și
controlat la nivel național**

Alina ROBU, Alina-Diana NEMES

**Cuvinte-cheie: Intervenție Neurotehnologică Multimodală, Fotobiomodulație Cerebrală
Gamma, Neurofeedback EEG, Biofeedback Inimă–Creier, Atenție, Concentrare,
Performanță Școlară, Electroencefalogramă Cantitativă (Qeeg), Coerență Cardiacă**



Abstract

Scopul acestui studiu clinic randomizat și controlat, realizat la nivel național, este evaluarea eficienței unei intervenții neurotehnologice multimodale (fotobiomodulație cerebrală gamma 40 Hz, neurofeedback EEG personalizat și biofeedback inimă–creier) în optimizarea atenției și performanței școlare la copii cu vârste cuprinse între 11 și 15 ani din mediul urban. Studiul implică un eșantion de 200 de participanți sănătoși, distribuiți echilibrat în grup experimental ($n = 100$, 50 fete și 50 băieți) și grup control ($n = 100$, 50 fete și 50 băieți). Intervenția se desfășoară pe parcursul unui an și este structurată în trei cicluri terapeutice a câte 10 săptămâni fiecare, cu câte două sesiuni săptămânale urmate de 10 săptămâni de pauză între cicluri.

Evaluările principale sunt reprezentate exclusiv de analize obiective ale activității cerebrale prin electroencefalograma cantitativă (qEEG Brain Mapping), concentrându-se pe ariile Brodmann special selectate pentru rolul lor demonstrat în reglarea atenției și performanței cognitive (BA 5, 8, 19, 21, 22, 39, 44). Evaluarea secundară include măsurarea stresului fiziologic obiectiv prin intermediul coerenței cardiace (biofeedback inimă–creier). Analizele statistice includ teste t pentru eșantioane pereche și independente, ANOVA repetată și mărimea efectului (Cohen's d).

Rezultatele anticipate ale studiului sunt creșteri semnificative și obiective ale parametrilor qEEG în ariile corticale selectate, corelate cu îmbunătățiri evidente ale atenției, capacității de concentrare și performanței școlare. Acest studiu își propune să demonstreze validitatea și eficiența unei abordări neurotehnologice integrate ca metodă preventivă și proactivă pentru optimizarea performanței cognitive și academice în perioada critică a dezvoltării cognitive din ciclul gimnazial. Implicațiile practice ale rezultatelor susțin integrarea acestui tip de intervenție în programele educaționale și clinice preventive pentru îmbunătățirea atenției și performanței școlare la nivel național.

1. Introducere

1.1 Context general

Într-o societate contemporană marcată de o accelerare semnificativă a ritmului de viață și o expunere permanentă la stimuli externi din ce în ce mai complecși, atenția și capacitatea de concentrare devin resurse cognitive esențiale în procesul de învățare și dezvoltare școlară. În mod particular, perioada gimnazială, cuprinzând intervalul de vârstă 11–15 ani, reprezintă o etapă crucială și sensibilă a formării intelectuale, emoționale și sociale a elevilor. În acest interval, elevii se confruntă cu o creștere substanțială a exigențelor academice, a volumului informațional și a solicitărilor cognitive, toate acestea suprapunându-se unei perioade complexe din punct de vedere neurobiologic și psiho-social (Casey et al., 2005; Steinberg, 2010).

La nivel cerebral, intervalul dintre 11 și 15 ani este caracterizat printr-o maturizare rapidă și semnificativă a cortexului prefrontal și a rețelelor neuronale implicate în funcțiile executive – planificare, organizare, flexibilitate cognitivă, autoreglare și atenție. Literatura de specialitate subliniază faptul că această etapă de maturizare cerebrală este esențială pentru consolidarea unor abilități cognitive fundamentale, în mod special a atenției susținute și selective, a memoriei de lucru și a controlului inhibitor (Diamond & Ling, 2016). În același timp, ariile temporale și parietale implicate în integrarea multisenzorială și procesarea semantică ating o dezvoltare crucială, esențială pentru capacitatea elevilor de a procesa informații complexe prezentate în context educațional, cum ar fi explicațiile verbale, materialele scrise și reprezentările grafice și vizuale (Posner & Rothbart, 2014).

Cu toate acestea, realitatea actuală a sistemului educațional din România și din multe alte țări europene reflectă o provocare constantă: dificultatea elevilor de a-și menține atenția concentrată și susținută pe parcursul activităților școlare. Cercetările recente indică o prevalență îngrijorătoare a problemelor atenționale în mediul școlar, accentuate suplimentar de suprastimularea digitală, de presiunea crescută a performanței academice și de încărcarea excesivă a programului școlar. Mai mult decât atât, stresul cronic, anxietatea legată de performanța școlară și expunerea constantă la mediul digital contribuie la perturbarea funcțiilor cognitive, afectând direct capacitatea elevilor de a învăța eficient, de a reține informațiile și de a performa la nivel optim în context educațional (Gazzaley & Rosen, 2016; Twenge, 2018).

În acest context, identificarea unor metode și intervenții eficiente, sigure și validate științific, care să sprijine dezvoltarea și optimizarea atenției și a funcțiilor cognitive asociate, devine esențială și extrem de urgentă. Cercetările din domeniul neuroștiințelor aplicate în educație au evidențiat recent potențialul remarcabil al intervențiilor neurotehnologice moderne, precum neurofeedback-ul qEEG, fotobiomodulația cerebrală și biofeedback-ul inimă–creier, în optimizarea capacităților cognitive și emoționale ale copiilor și adolescenților. Aceste metode se bazează pe principiul neuroplasticității, capacitatea creierului de a-și modifica funcțional și structural conexiunile neuronale ca răspuns la stimularea adecvată și specifică, conducând la îmbunătățiri durabile și măsurabile în performanța cognitivă (Hamblin, 2016; Enriquez-Geppert et al., 2017).

Fotobiomodulația cerebrală gamma, neurofeedback-ul EEG personalizat și biofeedback-ul inimă–creier sunt metode neinvazive, ușor de aplicat și extrem de promițătoare. Studiile recente demonstrează că fotobiomodulația cerebrală gamma stimulează eficient neuroplasticitatea, susține claritatea cognitivă și ajută la eliminarea acumulărilor neuronale toxice, având potențialul de a îmbunătăți substanțial capacitatea cognitivă și de concentrare (Salehpour & Hamblin, 2020). Neurofeedback-ul qEEG permite reglarea directă a activității electrice a creierului în timp real, ajutând elevii să învețe cum să își controleze și optimizeze singuri activitatea neuronală, fapt ce conduce la creșterea atenției și îmbunătățirea funcțiilor executive (Enriquez-Geppert et al., 2017). Biofeedback-ul inimă–creier contribuie la echilibrul sistemului nervos autonom, reduce nivelul stresului fiziologic și îmbunătățește capacitatea de autoreglare emoțională, factori esențiali pentru menținerea atenției și performanței școlare (McCraty & Shaffer, 2015).

Cu toate acestea, până la momentul actual, în România și în literatura internațională există puține studii ample și riguroase care să evalueze eficacitatea unei intervenții integrate, multimodale, combinând aceste metode neurotehnologice specifice în îmbunătățirea atenției și performanței școlare la copii în etapa gimnazială. În plus, lipsa studiilor la scară largă, realizate pe populații bine definite și reprezentative, limitează posibilitățile de implementare la nivel național a unor astfel de intervenții neurotehnologice eficiente.

Prezentul studiu clinic randomizat și controlat își propune să adreseze tocmai aceste lacune majore din literatura actuală, prin evaluarea riguroasă a eficienței unui protocol neurotehnologic integrativ aplicat la nivel național. Acest demers științific va avea implicații directe atât în contextul practicii educaționale curente, cât și pentru cercetările viitoare din domeniul neuroștiințelor aplicate în educație, contribuind semnificativ la dezvoltarea și validarea unor abordări terapeutice moderne, sigure și eficiente pentru optimizarea atenției și succesului școlar al copiilor gimnaziali.

Astfel, cercetarea noastră nu doar că își propune să aducă dovezi clare și solide privind eficiența neurotehnologiilor propuse, ci oferă și perspective inovatoare pentru o abordare preventivă și proactivă a educației, contribuind direct la îmbunătățirea calității vieții elevilor și la sprijinirea dezvoltării lor cognitive și emoționale în această etapă critică a vieții lor.

1.2 Fundamentarea teoretică a intervențiilor neurotehnologice alese

Studiul nostru utilizează o abordare neurotehnologică integrativă, bazată pe combinarea a trei metode complementare, selectate strategic pentru potențialul lor dovedit în optimizarea atenției, performanței cognitive și echilibrului psiho-fiziologic la copiii aflați în perioada gimnazială. Aceste metode sunt: **fotobiomodulația cerebrală**, **neurofeedback-ul EEG cantitativ (qEEG)** și **biofeedback-ul inimă–creier (coerență cardiacă)**. Fundamentarea științifică și alegerea acestor metode derivă din principiile neuroplasticității, reglării neurofiziologice autonome și optimizării cognitive și emoționale documentate recent în neuroștiințele aplicate.

Fotobiomodulația cerebrală gamma

Fotobiomodulația cerebrală gamma reprezintă o metodă terapeutică non-invazivă, avansată, care utilizează lumina pulsată în spectrul infraroșu apropiat pentru stimularea directă a zonelor cerebrale cheie. Această tehnică neurotehnologică este fundamentată științific pe capacitatea luminii pulsate la frecvența specifică gamma (40 Hz) de a influența pozitiv activitatea neuronală și de a promova neuroplasticitatea, esențială pentru funcțiile cognitive avansate, inclusiv atenția focalizată, viteza de procesare și memoria de lucru (Iaccarino et al., 2016; Hamblin, 2016).

Alegerea frecvenței gamma de 40 Hz nu este întâmplătoare, ci profund fundamentată științific. Cercetările recente demonstrează clar că frecvența gamma (aproximativ 40 Hz) este direct asociată cu procesele cognitive avansate, inclusiv atenția focalizată, memoria de lucru și integrarea informațiilor senzoriale și cognitive. Prin urmare, stimularea creierului cu această frecvență specifică contribuie la optimizarea directă a acestor procese cognitive-cheie.

Mecanisme specifice și fundamentale ale fotobiomodulației cerebrale gamma:

1. Stimularea mitocondrială neuronală:

Unul dintre mecanismele principale implicate în fotobiomodulație este stimularea activității mitocondriale în celulele neuronale, prin intermediul citocromului C oxidază. Această enzimă mitocondrială are un rol-cheie în generarea ATP-ului celular, principalul furnizor de energie neuronală (Salehpour et al., 2018). Prin intensificarea producției de ATP, fotobiomodulația crește eficiența energetică a neuronilor, facilitând astfel susținerea atenției și a proceselor cognitive complexe (Hamblin, 2018).

2. Reducerea inflamației neuronale și stresului oxidativ:

Studiile recente demonstrează că stresul oxidativ și inflamația cerebrală pot afecta direct capacitatea cognitivă, inclusiv atenția și memoria (Cassano et al., 2016). Fotobiomodulația cerebrală acționează prin reducerea stresului oxidativ și inhibarea proceselor inflamatorii neuronale, contribuind astfel la îmbunătățirea clarității mentale, rezistenței cognitive și reducerea oboselii asociate activităților cognitive intense (Naeser & Hamblin, 2015).

3. Îmbunătățirea neuroplasticității și activității sinaptice:

Lumina pulsată gamma la 40 Hz induce sincronizarea neuronală în benzile de frecvență gamma, contribuind direct la creșterea neuroplasticității și la formarea unor noi conexiuni neuronale eficiente (Vargas et al., 2017). Acest mecanism este esențial pentru îmbunătățirea funcțiilor cognitive superioare precum atenția susținută și memoria de lucru, necesare pentru performanța academică optimă a elevilor (Barrett & Gonzalez-Lima, 2013).

Efecte specifice asupra atenției și performanței școlare la gimnaziu

În mod particular, aplicarea fotobiomodulației gamma are o influență directă și măsurabilă asupra capacității elevilor gimnaziali de a-și menține atenția focalizată și a procesa informații complexe, îmbunătățind astfel performanța școlară globală. Efectele specifice documentate de literatura recentă includ:

- **Creșterea atenției selective și focalizate:**
Elevii expuși periodic la această tehnică demonstrează o capacitate mai mare de a ignora distragerile și de a-și concentra atenția exclusiv asupra sarcinilor educaționale, fapt ce se reflectă direct în creșterea eficienței și preciziei în efectuarea sarcinilor școlare (citit, rezolvat probleme, ascultat instrucțiuni verbale complexe).
- **Accelerarea vitezei cognitive și a vitezei de procesare:**
Prin stimularea intensă a creierului la frecvența gamma, elevii pot procesa informațiile noi mai rapid și mai eficient, beneficiu esențial în mediul educațional dinamic în care sunt expuși constant la informații noi și complexe. Aceasta le permite să asimileze mai eficient lecțiile și să răspundă mai prompt la solicitările profesorilor.
- **Îmbunătățirea memoriei și a capacității de retenție:**
Fotobiomodulația cerebrală gamma contribuie la consolidarea memoriei de lucru și a celei pe termen lung prin stimularea sinapselor neuronale și a rețelelor asociate memoriei. Acest efect ajută elevii să rețină mai bine materialele educaționale și să le aplice eficient în diverse contexte academice.
- **Reducerea oboselii cognitive și îmbunătățirea rezistenței la stresul școlar:**
Prin efectul său antiinflamator și antioxidant la nivel cerebral, fotobiomodulația contribuie direct la reducerea oboselii mentale și a stresului cerebral acumulat în urma activităților școlare intense, sprijinind astfel capacitatea elevilor de a face față solicitărilor academice prelungite.

Astfel, fotobiomodulația cerebrală gamma oferă beneficii directe și concrete asupra proceselor cognitive esențiale pentru succesul școlar, iar includerea acestei metode în protocolul nostru terapeutic este complet justificată. În contextul actual al educației gimnaziale, dominat de provocări cognitive constante și cerințe de concentrare susținută, aplicarea regulată a acestei tehnici neurotehnologice moderne devine o strategie terapeutică eficientă și fundamentată științific, care poate îmbunătăți semnificativ capacitatea elevilor de a învăța eficient, de a performa academic și de a se adapta la cerințele cognitive ale mediului școlar actual.

Neurofeedback qEEG

Neurofeedback-ul EEG cantitativ (qEEG) este o tehnică terapeutică avansată care utilizează înregistrarea precisă și obiectivă a activității electrice cerebrale pentru a ajuta participanții să-și autoregleze direct funcționarea neuronală. Această metodă implică monitorizarea în timp real a activității electrice corticale prin intermediul electroencefalogrammei cantitative (qEEG) și oferirea unui feedback imediat sub formă de stimuli vizuali și auditivi. Astfel, participanții învață să-și controleze voluntar și să-și optimizeze propriile pattern-uri neuronale prin mecanismele neuroplasticității adaptative și autoreglării conștiente (Enriquez-Geppert et al., 2017; Hammond, 2011).

Neurofeedback-ul se bazează pe principiul că funcțiile cognitive specifice (precum atenția, memoria de lucru și controlul inhibitor) pot fi îmbunătățite prin învățarea autoreglării activității cerebrale asociate acestora. Studiile recente au demonstrat că această metodă

stimulează direct modificările neuroplastice în rețelele neuronale specifice, optimizând astfel funcționarea cerebrală asociată atenției și concentrării (Arns et al., 2014; Vernon et al., 2003).

În cadrul acestui studiu, intervenția de neurofeedback qEEG a fost personalizată și orientată strategic către ariile corticale recunoscute pentru rolul lor specific în controlul și menținerea atenției și în procesarea informațiilor esențiale în context educațional. Ariile cerebrale selectate pentru acest studiu sunt următoarele: BA 5, BA 8, BA 19, BA 21, BA 22, BA 39 și BA 44.

- **Aria Brodmann 5 (Cortex parietal superior):** implicată esențial în atenția spațială și integrarea senzorio-motorie, necesară pentru activități școlare cum ar fi scrisul, desenul și sarcinile practice (Culham & Kanwisher, 2001).
- **Aria Brodmann 8 (Cortex frontal superior - frontal eye fields):** crucială pentru atenția vizuală și controlul precis al mișcărilor oculare necesare pentru citirea rapidă și eficientă a textelor scrise (Pierrot-Deseilligny et al., 2004).
- **Aria Brodmann 19 (Cortexul vizual secundar asociativ):** responsabilă pentru procesarea complexă a informațiilor vizuale, menținerea atenției vizuale asupra detaliilor și decodarea rapidă a materialelor educaționale vizuale (Kravitz et al., 2013).
- **Aria Brodmann 21 (Girus temporal mijlociu):** implicată în memoria semantică și recunoașterea obiectelor și conceptelor vizuale complexe, facilitând astfel asocierea și învățarea rapidă a informațiilor prezentate la ore (Binder et al., 2009).
- **Aria Brodmann 22 (Girus temporal superior - aria Wernicke):** centrală pentru procesarea auditivă avansată și înțelegerea limbajului verbal, esențială în contextul educațional pentru urmărirea eficientă a explicațiilor profesorilor și discuțiilor de la clasă (Friederici, 2011).
- **Aria Brodmann 39 (Girus angular):** esențială în integrarea informațiilor vizual-spațiale, matematice și lingvistice, fiind implicată direct în dezvoltarea capacităților de calcul, citire și înțelegere conceptuală (Seghier, 2013).
- **Aria Brodmann 44 (Aria Broca - cortex frontal inferior):** implicată direct în procesarea limbajului, atenției verbale și capacității de articulare internă, susținând eficient participarea activă și înțelegerea instrucțiunilor orale în contextul școlar (Hagoort, 2005).

Efecte specifice asupra atenției și performanței școlare

Studiile recente susțin că neurofeedback-ul qEEG contribuie semnificativ la:

- **Creșterea atenției susținute și focalizate** prin autoreglarea activității corticale frontale și parietale, asociată direct controlului atenției selective și executive (Arns et al., 2009).
- **Îmbunătățirea controlului inhibitor și reducerea impulsivității**, factori-cheie care influențează capacitatea elevilor de a rămâne concentrați pe sarcini academice și de a rezista la distrageri (Monastra et al., 2005).
- **Reducerea simptomelor specifice de hiperactivitate și deficit de atenție**, facilitând astfel adaptarea elevilor la mediul educațional și îmbunătățirea clară a performanței școlare (Arns et al., 2014; Coben & Evans, 2010).
- **Optimizarea memoriei de lucru și a vitezei cognitive**, elemente esențiale pentru învățarea eficientă și performanța academică sporită (Gevensleben et al., 2009).

Prin includerea neurofeedback-ului qEEG în acest protocol terapeutic, urmărim să oferim elevilor gimnaziali o metodă personalizată, solid fundamentată științific, pentru a-și optimiza activitatea neuronală și a-și îmbunătăți direct capacitatea de atenție și concentrare, facilitând o performanță școlară superioară.

Biofeedback inimă–creier (coerență cardiacă)

Biofeedback-ul inimă–creier, cunoscut și sub denumirea de biofeedback bazat pe coerență cardiacă, este o tehnică terapeutică non-invazivă, profund validată științific, care valorifică relația strânsă dintre sistemul cardiovascular și activitatea cerebrală (McCraty & Shaffer, 2015). Această metodă implică exerciții ghidate de respirație ritmică și coerentă, care sunt adaptate individual pentru fiecare participant, cu scopul de a induce și menține o stare fiziologică optimă cunoscută drept „coerență cardiacă” (Lehrer & Gevartz, 2014).

Coerența cardiacă se caracterizează printr-un tipar distinctiv al variabilității ritmului cardiac, definit prin sincronizarea optimă și echilibrul între ramurile simpatice și parasimpatice ale sistemului nervos autonom (McCraty & Shaffer, 2015). Această stare fiziologică echilibrată este asociată direct cu scăderea nivelului general de stres fiziologic, anxietate și cu îmbunătățirea atenției, clarității cognitive și abilității generale de autoreglare emoțională și fiziologică (Lehrer & Gevartz, 2014; Shaffer et al., 2014).

Mecanismul central al acestei metode constă în reglarea voluntară și conștientă a respirației la o frecvență specifică, numită frecvență de rezonanță cardiacă. Atunci când participanții respiră coerent în acest ritm individualizat, se produce o armonizare profundă între ritmul cardiac, activitatea cerebrală și alte procese fiziologice (Lehrer et al., 2020). Astfel, biofeedback-ul inimă–creier nu doar că optimizează reglarea autonomă și reduce efectele negative ale stresului cronic, dar generează și o stare psihofiziologică favorabilă performanței cognitive și academice (McCraty & Shaffer, 2015; Lehrer & Gevartz, 2014).

Cercetările recente arată că aplicarea regulată a acestei metode conduce la o îmbunătățire evidentă și măsurabilă a capacității elevilor de a gestiona presiunile specifice mediului școlar, cum ar fi stresul examenelor, sarcinile academice solicitante și interacțiunile sociale complexe specifice adolescenței timpurii (Goessl et al., 2017). Elevii care practică biofeedback-ul bazat pe coerență cardiacă dezvoltă o reziliență emoțională crescută și o capacitate îmbunătățită de menținere a atenției asupra sarcinilor educaționale, chiar și în prezența factorilor distractori sau stresanți din mediul școlar (Bradley et al., 2010).

Pe termen lung, elevii devin capabili să-și autoregleze emoțiile și răspunsurile fiziologice în mod autonom, îmbunătățindu-și performanța școlară printr-o atenție mai bine focalizată, o memorie mai eficientă și o viteză crescută de procesare cognitivă (Lehrer et al., 2020). În acest sens, biofeedback-ul inimă–creier reprezintă o strategie terapeutică esențială și pragmatică pentru a sprijini dezvoltarea echilibrată a elevilor gimnaziali, având potențialul de a transforma profund modul în care aceștia gestionează stresul și optimizează procesele cognitive esențiale învățării (McCraty & Shaffer, 2015).

În ansamblu, prin integrarea biofeedback-ului bazat pe coerență cardiacă în protocolul nostru terapeutic multimodal, ne propunem să contribuim direct și semnificativ la îmbunătățirea capacității elevilor de a-și gestiona emoțiile, de a reduce stresul și de a menține o atenție susținută și eficientă asupra activităților școlare (Goessl et al., 2017; Lehrer & Gevirtz, 2014).

Justificarea integrării celor trei metode

Integrarea strategică a acestor trei metode neurotehnologice complementare – fotobiomodulație cerebrală, neurofeedback qEEG și biofeedback inimă–creier – permite o abordare holistică, comprehensivă și extrem de eficientă a optimizării atenției și performanței școlare la elevii gimnaziali. Utilizarea simultană și integrată a acestor tehnici se bazează pe principiul sinergiei terapeutice, prin care efectele benefice ale fiecărei metode se potențează reciproc, generând rezultate terapeutice semnificativ superioare aplicării fiecărei metode separat (Hamblin, 2016; Arns et al., 2009; Lehrer & Gevirtz, 2014).

Fotobiomodulația cerebrală contribuie la îmbunătățirea generală a metabolismului neuronal și neuroplasticității cerebrale prin stimularea mitocondrială și activarea sinaptică profundă (Hamblin, 2016). Acest mecanism sprijină și potențează efectele directe ale neurofeedback-ului qEEG, care permite antrenarea extrem de precisă și personalizată a activității electrice neuronale, vizând explicit ariile corticale implicate în atenție, concentrare și procesarea informațiilor școlare complexe (Arns et al., 2009; Enriquez-Geppert et al., 2017). Prin combinarea acestor două metode, intervenția terapeutică poate atinge un nivel de optimizare neuronală atât funcțională cât și structurală, care susține pe termen lung performanța cognitivă și academică a elevilor.

În completarea acestor tehnici, biofeedback-ul inimă–creier intervine pentru optimizarea reglării emoționale și autonome, reducând stresul fiziologic și facilitând o stare optimă de concentrare și claritate cognitivă (McCraty & Shaffer, 2015; Lehrer & Gevirtz, 2014). Studiile recente arată că reducerea stresului și îmbunătățirea capacității emoționale și fiziologice de autoreglare sunt esențiale în contextul educațional, deoarece stresul cronic afectează direct atenția și capacitatea elevilor de a procesa și reține informații academice (Bradley et al., 2010; Goessl et al., 2017).

Astfel, această abordare multimodală nu doar că oferă potențialul unei eficiențe terapeutice sporite, dar reflectă și cele mai avansate și actuale tendințe din neuroștiințele aplicate în educație. Utilizarea simultană a celor trei metode creează un context terapeutic unic, în care elevii beneficiază simultan de neuroplasticitatea indusă de fotobiomodulație, de reglarea corticală directă prin neurofeedback și de reglarea emoțională și fiziologică profundă prin biofeedback inimă–creier. Astfel, integrarea acestor metode se justifică deplin din punct de vedere științific, clinic și educațional, asigurând o intervenție terapeutică comprehensivă și eficientă pentru optimizarea atenției și performanței academice la copiii din ciclul gimnazial.

2. Obiective

2.1 Obiectiv general

Obiectivul principal al prezentului studiu clinic este evaluarea riguroasă, comprehensivă și obiectivă a eficienței unui protocol neurotehnologic multimodal, alcătuit din fotobiomodulație cerebrală gamma (40 Hz), neurofeedback qEEG personalizat și biofeedback inimă–creier, în îmbunătățirea nivelului de atenție, a capacității de concentrare și a performanței școlare a copiilor din ciclul gimnazial (11–15 ani). În mod specific, cercetarea își propune să determine măsura în care această intervenție integrativă poate produce modificări măsurabile și stabile în activitatea cerebrală (analizată prin brain mapping qEEG) și în echilibrul neurovegetativ și emoțional (prin evaluarea coerenței cardiace), cu scopul final de a îmbunătăți performanțele academice, adaptarea școlară și calitatea generală a vieții educaționale a elevilor implicați. Studiul vizează furnizarea unor dovezi clare și obiective care să sprijine adoptarea la scară largă a acestei intervenții preventive în contextul educațional național, contribuind direct și măsurabil la dezvoltarea unor strategii moderne, bazate pe neuroștiințe, pentru optimizarea învățării și dezvoltării cognitive și emoționale a copiilor.

2.2 Obiective specifice

2.2.1 Evaluarea modificărilor obiective ale activității cerebrale (qEEG) în ariile corticale specifice asociate atenției și concentrării (BA 5, 8, 19, 21, 22, 39 și 44)

Primul obiectiv specific constă în evaluarea riguroasă a modificărilor obiective și măsurabile ale activității cerebrale, prin analiza cantitativă și calitativă a electroencefalogramelor (qEEG – brain mapping), în ariile corticale strategic selectate pentru rolul lor documentat în atenție, procesarea informațiilor și performanța școlară: ariile Brodmann 5, 8, 19, 21, 22, 39 și 44. Se urmărește identificarea clară a schimbărilor induse de intervenția neurotehnologică multimodală în activitatea neuronală a acestor regiuni, demonstrând astfel impactul direct și specific al intervenției asupra atenției și concentrării elevilor.

Acest obiectiv vizează măsurarea și analiza riguroasă a schimbărilor la nivel cortical, specifice atenției și procesării informaționale complexe, induse de intervenția neurotehnologică propusă. Evaluarea activității electrice neuronale se va realiza prin electroencefalograma cantitativă (qEEG), utilizând un sistem EEG standardizat de 19 canale, respectând sistemul internațional 10–20.

Se vor genera hărți corticale precise înainte și după fiecare ciclu de intervenție, permițând astfel identificarea obiectivă și exactă a modificărilor induse la nivelul fiecărei arii selectate strategic.

Fiecare arie cerebrală vizată (BA 5, 8, 19, 21, 22, 39 și 44) este documentată în literatura neuroștiințifică drept critică pentru diferite tipuri și componente ale atenției (vizuală, auditivă, verbală și spațială), iar studiul nostru va cuantifica modul exact în care intervenția neurotehnologică optimizează funcționarea acestor zone. În mod concret, vom analiza

modificările în amplitudinea și coerența frecvențelor cerebrale relevante (alfa, beta, gamma) asociate direct cu procesele atenționale și cognitive superioare.

Prin această evaluare obiectivă, studiul își propune să ofere dovezi clare și măsurabile despre îmbunătățirile activității neuronale asociate direct cu o mai bună capacitate de concentrare și atenție în rândul elevilor gimnaziali.

2.2.2 Evaluarea modificărilor nivelului de stres fiziologic prin intermediul coerenței inimă–creier

Al doilea obiectiv specific urmărește evaluarea modificărilor obiective ale nivelului de stres fiziologic, prin intermediul măsurătorilor de coerență cardiacă (biofeedback inimă–creier). Acest obiectiv își propune să cuantifice în mod clar și reproductibil efectul intervenției neurotehnologice asupra capacității de autoreglare fiziologică și emoțională a copiilor, având în vedere că reducerea stresului este esențială pentru îmbunătățirea atenției, proceselor cognitive și performanței școlare.

Acest obiectiv are în vedere măsurarea precisă și obiectivă a schimbărilor nivelului de stres fiziologic și emoțional al participanților, folosind biofeedback-ul bazat pe coerența cardiacă. Evaluările se vor realiza înainte și după fiecare ciclu terapeutic, utilizând un dispozitiv clinic specializat (GP8 – Global Performance 8), care oferă măsurători exacte ale coerenței inimă–creier și ale variabilității ritmului cardiac (HRV).

Nivelul stresului fiziologic măsurat prin coerența cardiacă este recunoscut în literatura științifică ca un indicator extrem de sensibil al echilibrului neurovegetativ, care influențează direct capacitatea de concentrare, memoria de lucru și performanța școlară generală. Prin evaluarea schimbărilor obiective în nivelul stresului fiziologic, acest obiectiv își propune să evidențieze clar cum reducerea stresului contribuie la îmbunătățirea atenției, rezilienței și performanței cognitive ale elevilor.

Astfel, intervenția noastră va fi evaluată nu doar din perspectiva performanței cerebrale, ci și a echilibrului emoțional și fiziologic, aspecte extrem de relevante în contextul școlar și al dezvoltării optime a copiilor.

2.2.3 Evaluarea comparativă riguroasă între grupul experimental și grupul control, pentru demonstrarea clară a eficacității intervenției

Al treilea obiectiv specific vizează realizarea unei analize comparative riguroase și detaliate între grupul experimental și grupul de control. Se urmărește identificarea clară a diferențelor dintre cele două grupuri în ceea ce privește modificările măsurate ale activității cerebrale (qEEG) și nivelului de stres fiziologic (coerență inimă–creier), pentru a demonstra într-un mod concludent și robust eficacitatea și specificitatea protocolului neurotehnologic multimodal propus. Această comparație va contribui decisiv la validarea intervenției și la fundamentarea științifică și practică a recomandării implementării protocolului la scară largă în sistemul educațional.

Acest obiectiv este fundamental pentru validarea științifică riguroasă a intervenției noastre și presupune o analiză comparativă clară și sistematică între două grupuri egale ca număr și caracteristici demografice (vârstă, gen, mediu urban). Grupul experimental va beneficia de intervenția neurotehnologică multimodală, în timp ce grupul de control nu va participa la niciun fel de intervenție.

Evaluările qEEG și cele ale coerenței inimă–creier vor fi realizate simultan pentru ambele grupuri, în puncte de timp clare și standardizate (pre și post fiecare ciclu terapeutic). Această abordare ne va permite identificarea exactă a efectului specific al intervenției noastre, excluzând influențele placebo sau variațiile naturale în dezvoltarea atenției și capacității cognitive.

Prin utilizarea testelor statistice riguroase (ANOVA pentru măsurători repetate și teste t independente) și a indicatorilor de dimensiune a efectului (Cohen's d), obiectivul nostru este să demonstrăm convingător și clar că modificările observate în grupul experimental sunt semnificativ mai mari și mai consistente decât în grupul control.

Rezultatele acestei analize comparative vor valida nu doar eficacitatea intervenției noastre neurotehnologice multimodale, ci și vor constitui fundamentul recomandărilor clare și bazate pe dovezi pentru implementarea acesteia la nivel național, ca instrument eficient în îmbunătățirea atenției și performanței școlare.

3. Metodologia și designul studiului clinic

3.1 Design general

Studiul propus este un studiu clinic randomizat, controlat și longitudinal, cu o durată totală de 52 de săptămâni (un an calendaristic complet), realizat la nivel național în clinicile rețelei BrainMap Neuroscience din România. Alegerea acestui design este justificată de nevoia stringentă de a obține date solide, obiective și reproductibile privind eficacitatea intervenției neurotehnologice multimodale în optimizarea atenției și performanței școlare la elevii gimnaziali (11–15 ani).

Participanții vor fi împărțiți în două grupuri egale, fiecare format din 100 de copii sănătoși, cu vârste între 11 și 15 ani, exclusiv din mediul urban și cu o distribuție echilibrată de gen (50 fete și 50 băieți în fiecare grup). Această structură echilibrată asigură reprezentativitatea și comparabilitatea grupurilor, sporind validitatea internă și externă a rezultatelor studiului.

Grupul Experimental (N = 100)

Participanții din acest grup vor urma protocolul terapeutic neurotehnologic multimodal, care include fotobiomodulație cerebrală gamma (40Hz), neurofeedback EEG cantitativ personalizat (qEEG) și biofeedback inimă–creier, structurat în cicluri terapeutice de câte 10 săptămâni. Fiecare ciclu terapeutic presupune 2 sedințe săptămânale (total: 20 sedințe/ciclu), urmat de o perioadă de pauză terapeutică de 10 săptămâni. Astfel, pe parcursul întregului an, fiecare participant din grupul experimental va beneficia de trei cicluri terapeutice complete, ceea ce permite evaluarea cumulativă și sustenabilă a efectelor intervenției.

Grupul Control (N = 100)

Acest grup nu va participa la niciun fel de intervenție neurotehnologică, având rolul esențial de comparație pentru a evalua în mod obiectiv efectul specific al intervenției aplicate în grupul experimental. Participanții din acest grup vor continua activitățile școlare și extracurriculare obișnuite, fără nicio modificare suplimentară indusă de cercetare.

Evaluări principale și secundare

Pentru ambii participanți (din grupul experimental și din grupul control), se vor realiza evaluări obiective repetate în puncte-cheie, stabilite clar și consecvent:

- **Evaluarea principală:** Testarea activității cerebrale prin analiza qEEG (Brain Mapping), utilizând echipament EEG cu 19 canale, poziționat conform sistemului internațional 10–20. Această evaluare va fi realizată înainte (pre-testare) și după (post-testare) fiecare ciclu terapeutic (atât pentru grupul experimental cât și pentru cel de control), permițând cuantificarea exactă și riguroasă a modificărilor corticale asociate atenției și performanței cognitive școlare.
- **Evaluarea secundară:** Nivelul stresului fiziologic și emoțional prin intermediul coerenței inimă–creier, măsurat obiectiv utilizând dispozitivul clinic GP8 Global Performance 8. Această evaluare se realizează simultan cu testarea qEEG, înainte și după fiecare ciclu terapeutic, permițând astfel identificarea clară a schimbărilor induse în echilibrul autonom și emoțional al participanților.

Randomizarea și controlul variabilelor

Randomizarea participanților în cele două grupuri se va face printr-un proces riguros și transparent, utilizând o procedură randomizată computerizată, astfel încât să se evite bias-urile și influențele externe asupra repartizării copiilor în grupuri. Condițiile și procedurile testărilor qEEG și biofeedback inimă–creier vor fi standardizate riguros și documentate clar pentru fiecare clinică participantă, asigurând consistența și reproductibilitatea rezultatelor obținute la nivel național.

Astfel, acest design complex, atent controlat și longitudinal oferă baza metodologică solidă pentru a demonstra clar, obiectiv și riguroasă eficacitatea intervenției neurotehnologice multimodale în optimizarea atenției și performanței academice a elevilor gimnaziali.

3.2 Caracteristicile eșantionului

Pentru a asigura relevanța clinică, științifică și educațională a rezultatelor obținute în cadrul studiului nostru, am stabilit o serie clară și riguroasă de caracteristici ale eșantionului selectat. Participanții la acest studiu vor fi copii sănătoși din ciclul gimnazial (vârste cuprinse între 11 și 15 ani), fără tulburări neurologice, neuropsihologice sau psihiatrice diagnosticate anterior și fără antecedente clinice semnificative în sfera neurologică sau psihiatrică.

Criteriile clare și specifice de includere în studiu sunt următoarele:

- Vârsta cronologică cuprinsă strict între 11 și 15 ani, pentru a reflecta exact perioada gimnazială și provocările cognitive specifice acestei etape educaționale.
- Absența oricărei tulburări neurologice diagnosticate, precum epilepsie, tulburări motorii sau alte afecțiuni neurologice care ar putea influența măsurătorile qEEG și rezultatele intervenției.
- Absența oricăror tulburări psihiatrice sau neuropsihologice diagnosticate, inclusiv tulburări de spectru autist, ADHD, tulburări anxioase severe sau depresive, pentru a elimina influențele asupra rezultatelor atenționale și performanțelor cognitive.
- Fără administrarea actuală sau recentă (ultimele șase luni) a medicamentelor sau substanțelor psihoactive care ar putea influența activitatea sistemului nervos central (SNC) și măsurătorile neurofiziologice (qEEG și biofeedback inimă-creier).

Pentru menținerea unei validități ridicate a rezultatelor, criteriile clare de excludere din studiu includ următoarele aspecte:

- Diagnosticul actual sau anterior de tulburări neurologice sau psihiatrice.
- Tulburări neurodezvoltative confirmate clinic sau suspiciuni clare ale acestora.
- Istoric medical recent al unor traume craniene semnificative sau comorbidități medicale care afectează SNC.
- Utilizarea curentă sau recentă a oricăror medicamente psihotrope, stimulente sau alte substanțe care afectează activitatea cerebrală.

În ceea ce privește echilibrul demografic al eșantionului, acesta va fi asigurat prin includerea unui număr egal de fete și băieți în ambele grupuri (experimental și control), fiecare grup având câte 50 de fete și 50 de băieți. De asemenea, pentru a menține consistența și a evita eventuale influențe externe generate de mediul socio-economic sau diferențe culturale, toți participanții vor proveni exclusiv din mediul urban, ceea ce asigură uniformitatea mediului educațional și a contextului social general al participanților.

Aceste criterii stricte și bine definite garantează omogenitatea eșantionului, reduc la minimum influența factorilor externi asupra rezultatelor măsurate și permit astfel interpretarea riguroasă și obiectivă a efectelor intervenției neurotehnologice asupra atenției și performanțelor școlare.

3.3 Structura detaliată a intervenției terapeutice

Intervenția terapeutică propusă în acest studiu clinic a fost structurată cu atenție pentru a asigura un impact optim și sustenabil asupra îmbunătățirii atenției și performanței școlare a copiilor din gimnaziu. Protocolul terapeutic este organizat pe parcursul unui an calendaristic, fiind împărțit în trei cicluri terapeutice distincte. Fiecare ciclu terapeutic are o durată clar definită de 10 săptămâni consecutive de intervenție activă, urmate apoi de 10 săptămâni de pauză terapeutică, ceea ce permite observarea atât a efectelor imediate, cât și a celor cumulative și durabile ale protocolului aplicat (Vernon et al., 2003).

În timpul fiecărui ciclu terapeutic, copiii din grupul experimental participă la câte două sesiuni săptămânale, stabilite în zile fixe pentru a menține coerența procedurală și pentru a reduce la minimum influența factorilor externi asupra rezultatelor intervenției. Astfel, fiecare ciclu terapeutic cuprinde în total 20 de ședințe terapeutice.

Durata fiecărei sesiuni terapeutice este standardizată la 60 de minute, fiind concepută într-un mod bine structurat și logic, care să optimizeze eficiența intervenției și confortul participanților. Sesiunea terapeutică începe cu 15 minute dedicate pregătirii și ajustărilor procedurale, interval în care copiii sunt acomodați și pregătiți pentru intervenție, iar echipamentele și parametrii terapeutici sunt adaptați și verificați individual.

Prima etapă terapeutică propriu-zisă constă în neurofeedback-ul qEEG personalizat, desfășurat pe durata a 20 de minute. În această etapă, fiecare participant primește un feedback precis, auditiv și vizual, asupra activității electrice din ariile corticale selectate (BA 5, 8, 19, 21, 22, 39 și 44), pentru a optimiza funcționarea neuronală implicată direct în atenție și concentrare (Enriquez-Geppert et al., 2017). Protocolul este complet personalizat, fiind adaptat în permanență pe baza rezultatelor obținute la evaluările inițiale și intermediare.

A doua etapă terapeutică, care durează 10 minute, implică aplicarea fotobiomodulației cerebrale cu lumină pulsată la frecvența gamma de 40 Hz. Această metodă utilizează o cască specializată, certificată clinic, care stimulează activitatea cerebrală în ariile frontale și parietale,

având ca scop facilitarea neuroplasticității și îmbunătățirea performanței cognitive și atenționale a copiilor (Salehpour & Hamblin, 2020).

Ședința terapeutică se încheie cu biofeedback-ul inimă–creier, realizat pe parcursul a 15 minute. În această etapă, participanții sunt ghidați să își controleze ritmul respirator pentru a atinge o stare de coerență cardiacă optimă, monitorizată în timp real prin intermediul unui software certificat clinic. Această tehnică este validată științific și contribuie semnificativ la reducerea stresului fiziologic și la creșterea rezilienței emoționale și cognitive a copiilor, aspecte esențiale pentru atenția și performanța școlară îmbunătățită (McCraty & Shaffer, 2015).

Această structură detaliată și logic organizată permite evaluarea riguroasă și obiectivă a eficacității protocolului neurotehnologic multimodal aplicat, asigurând totodată un nivel ridicat de standardizare procedurală și confort terapeutic pentru participanți. Astfel, abordarea noastră terapeutică integrează eficient și sinergic metodele neurotehnologice selectate, urmărind nu doar rezultate imediate, ci și efecte durabile asupra performanțelor cognitive și școlare ale copiilor implicați în studiu.

Arii corticale selectate pentru studiul atenției și performanței școlare

1. Aria Brodmann 5 (cortex parietal superior – integrare senzorio-motorie și atenție spațială)

Aria Brodmann 5 este implicată activ în coordonarea atenției spațiale și în integrarea informațiilor senzoriale și motorii. Această zonă este esențială pentru sarcinile școlare care presupun concentrare susținută asupra unor activități precum scrisul, desenul, realizarea de proiecte practice sau alte sarcini educaționale care implică coordonarea spațială. Optimizarea activității acestei arii contribuie semnificativ la îmbunătățirea atenției spațiale și performanței cognitive în activitățile care necesită integrarea multisenzorială (Rushworth & Taylor, 2006).

2. Aria Brodmann 8 (cortex frontal superior – câmpurile oculare frontale)

Aria Brodmann 8 este o regiune cerebrală fundamentală pentru controlul atenției vizuale, prin reglarea mișcărilor sacadice ale ochilor și menținerea atenției selective vizuale. Antrenarea acestei arii are potențialul să crească viteza și precizia mișcărilor oculare necesare în timpul lecturii și înțelegerii materialelor educaționale vizuale, aspect esențial pentru îmbunătățirea performanței academice generale (Pierrot-Deseilligny et al., 2004).

3. Aria Brodmann 19 (cortex vizual asociativ secundar)

Aria 19 este responsabilă pentru procesarea vizuală complexă, implicată direct în menținerea atenției asupra informațiilor vizuale detaliate și complexe prezentate în cadrul orelor de clasă (texte scrise, diagrame, grafice educaționale). O funcționare optimă a acestei arii susține capacitatea elevilor de a procesa rapid și eficient informațiile vizuale, îmbunătățind semnificativ atenția vizuală susținută și capacitatea generală de învățare (Wandell et al., 2007).

4. Aria Brodmann 21 (girus temporal mijlociu)

Aria 21 joacă un rol crucial în memoria semantică și recunoașterea vizuală complexă, având o

contribuție importantă la asocierea rapidă și eficientă dintre conceptele vizuale și verbale. Prin îmbunătățirea activității acestei zone, elevii pot realiza conexiuni mai rapide și eficiente între concepte și informații, facilitând memorarea și înțelegerea materialelor școlare complexe (Binder et al., 2009).

5. Aria Brodmann 22 (girus temporal superior – aria Wernicke)

Aria Brodmann 22 (aria Wernicke) este responsabilă de procesarea auditivă avansată și înțelegerea limbajului vorbit. Îmbunătățirea activității acestei arii susține direct atenția auditivă a elevilor, permițând o mai bună înțelegere și retenție a informațiilor transmise oral în clasă, contribuind astfel esențial la succesul lor academic (Friederici, 2011).

6. Aria Brodmann 39 (girus angular)

Aria 39 este profund implicată în integrarea informațiilor vizual-spațiale și procesarea semantică, fiind crucială pentru dezvoltarea abilităților matematice și lingvistice avansate. Funcționarea optimă a acestei regiuni facilitează rezolvarea problemelor academice complexe, cum ar fi înțelegerea textelor, operarea eficientă cu numere și dezvoltarea abilităților conceptuale esențiale pentru performanța școlară avansată (Dehaene et al., 2004).

7. Aria Brodmann 44 (Aria Broca – cortex frontal inferior)

Aria Broca (BA 44) joacă un rol central în producția limbajului și menținerea atenției verbale active, fiind esențială pentru procesarea instrucțiunilor verbale și implicarea activă în comunicarea orală din clasă. Optimizarea activității acestei arii ajută elevii să asimileze rapid și eficient informațiile transmise verbal, sprijinind astfel direct performanța academică și interacțiunile eficiente în mediul educațional (Price, 2012).

Aceste arii corticale au fost strategic alese datorită implicării lor clare și demonstrate științific în procese cognitive esențiale atenției și performanței școlare. Fiecare arie selectată contribuie în mod specific la aspecte diferite ale procesului educațional, acoperind o gamă largă de abilități cognitive esențiale (atenția spațială și vizuală, integrarea informațiilor multisenzoriale, memoria semantică, procesarea auditivă și limbajul). Prin intervenția neurotehnologică ținută asupra acestor zone, studiul nostru urmărește să demonstreze obiectiv că îmbunătățirea atenției prin metode neurotehnologice conduce direct la creșterea semnificativă a performanței școlare la elevii gimnaziali.

4. Instrumente și măsurători utilizate

4.1 Analiza principală: Brain Mapping (qEEG)

Pentru evaluarea principală a efectelor intervenției neurotehnologice multimodale asupra atenției și performanței școlare la elevii gimnaziali, studiul utilizează electroencefalograma cantitativă și calitativă (qEEG – quantitative electroencephalography). Această tehnică reprezintă un instrument clinic standardizat și obiectiv, validat pe scară largă în cercetările neuroștiințifice contemporane și în practica clinică curentă, ce permite măsurarea precisă și detaliată a activității electrice neuronale (Thatcher, 2010; Arns et al., 2014).

În cadrul studiului, evaluarea qEEG este realizată cu ajutorul unui echipament performant EEG cu 19 canale marca BrainMaster®, poziționate conform standardului internațional 10-20. Acest sistem este recunoscut pentru acuratețea, fiabilitatea și reproductibilitatea măsurătorilor efectuate, permițând astfel o analiză riguroasă și detaliată a activității cerebrale a fiecărui participant (Collura, 2014).

Măsurătorile qEEG se desfășoară în condiții clinice controlate și standardizate, în stări de repaus cu ochii închiși („eyes-closed”) și ochii deschiși („eyes-open”), având ca scop identificarea clară și obiectivă a modificărilor subtile induse în activitatea corticală după fiecare ciclu terapeutic. Aceste înregistrări pre- și post-intervenție permit astfel o evaluare clară și obiectivă a progresului neurofiziologic al participanților.

Software-ul BrainMaster® permite analiza cantitativă avansată a activității corticale, incluzând evaluarea puterii absolute și relative a benzilor de frecvență specifice activității cerebrale (Delta, Theta, Alpha, Alpha1, Alpha2, LoBeta, Beta, HiBeta și Gamma). De asemenea, software-ul oferă analiza unor indicatori importanți, cum ar fi coerența interhemisferică și intrahemisferică, asimetria corticală frontală și flexibilitatea neuronală, indicatori recunoscuți științific pentru relevanța lor clinică în contextul atenției și performanței cognitive (Arns et al., 2014).

Prin intermediul acestei metode obiective și extrem de sensibile, studiul urmărește să identifice modificările specifice ale activității electrice neuronale în ariile corticale selectate strategic (BA 5, 8, 19, 21, 22, 39, 44), oferind dovezi solide ale eficacității intervenției neurotehnologice multimodale în optimizarea atenției și performanței școlare la copiii de gimnaziu.

Evaluarea riguroasă și consecventă a efectelor intervenției terapeutice reprezintă un element-cheie al designului acestui studiu clinic. În acest scop, fiecare participant, atât din grupul experimental, cât și din grupul control, este evaluat prin analiza qEEG înainte și după fiecare ciclu terapeutic, asigurând astfel o comparație obiectivă și clară a modificărilor neurofiziologice produse ca urmare a intervenției (pre-post).

Aceste evaluări sunt programate strategic, imediat înainte de începerea ciclului terapeutic și imediat după finalizarea celor 10 săptămâni de intervenție activă. Prin această abordare longitudinală și repetată, studiul permite observarea detaliată a efectelor cumulative și durabile ale protocolului neurotehnologic asupra activității cerebrale și implicit asupra atenției și capacității de învățare a elevilor (Enriquez-Geppert et al., 2017).

Măsurătorile periodice pre-post oferă o bază solidă pentru interpretarea precisă a datelor, facilitând nu doar identificarea modificărilor imediate, ci și observarea evoluției pe termen lung a performanțelor cognitive și a neuroplasticității participanților. Mai mult, aceste evaluări periodice asigură validitatea și relevanța rezultatelor studiului, demonstrând clar și obiectiv impactul intervenției neurotehnologice propuse asupra funcționării cerebrale a elevilor din ciclul gimnazial.

4.2 Analiza secundară: Evaluarea stresului fiziologic prin intermediul biofeedback-ului inimă–creier (GP8 Global Performance 8)

Analiza secundară propusă în acest studiu implică măsurarea detaliată și obiectivă a nivelului de stres fiziologic prin intermediul biofeedback-ului bazat pe coerența inimă–creier, realizat cu ajutorul dispozitivului medical GP8 Global Performance 8. Această metodă, validată clinic și recunoscută internațional, se bazează pe cuantificarea gradului de sincronizare dintre activitatea cardiacă, respirație și reglarea autonomă realizată prin sistemul nervos simpatic și parasimpatic (McCraty & Shaffer, 2015; Lehrer & Gevirtz, 2014). Starea de coerență cardiacă reflectă un echilibru fiziologic optim și este direct corelată cu reducerea stresului fiziologic și cu îmbunătățirea capacității cognitive și atenționale.

În cadrul acestui studiu, fiecare copil participant va fi evaluat folosind protocolul biofeedback inimă–creier înainte (pre-intervenție) și imediat după (post-intervenție) fiecare ciclu terapeutic de 10 săptămâni. Aceste măsurători vor fi realizate în condiții standardizate, într-un mediu clinic controlat, confortabil și liniștit, pentru a elimina influențele externe ce ar putea afecta acuratețea rezultatelor. Evaluările vor dura aproximativ 20 minute per sesiune și implică efectuarea unor exerciții ghidate de respirație ritmică și coerentă, adaptate la frecvența cardiacă individuală de rezonanță a fiecărui participant.

Pe durata evaluării, dispozitivul GP8 Global Performance 8 va înregistra în timp real parametrii specifici ai coerenței cardiace, incluzând variabilitatea ritmului cardiac (HRV), indicele general de coerență și gradul de sincronizare dintre respirație și activitatea cardiacă autonomă. Acești parametri oferă indicatori obiectivi ai nivelului de stres fiziologic și ai capacității elevilor de a-și regla propriile stări emoționale și fiziologice într-un mod adaptativ.

Prin evaluările repetate și sistematice realizate pre- și post-intervenție, vom putea urmări în mod clar și documentat evoluția capacității de autoreglare a participanților și modificările induse direct de intervenția neurotehnologică multimodală. Această abordare riguroasă va asigura colectarea unor date relevante și precise privind reducerea stresului fiziologic,

contribuind semnificativ la interpretarea mecanismelor prin care intervenția influențează pozitiv atenția, capacitatea de concentrare și implicit performanța școlară a elevilor gimnaziali.

Astfel, utilizarea biofeedback-ului inimă–creier nu doar că va adăuga profunzime și relevanță rezultatelor obținute, dar va contribui și la o înțelegere mai amplă și holistică a efectelor terapeutice secundare, completând într-un mod eficient măsurătorile qEEG realizate prin brain mapping și susținând validitatea generală a protocolului nostru de intervenție.

5. Procedura experimentală

5.1 Pre-testare inițială pentru toți participanții (brain mapping + biofeedback inimă–creier)

Înainte de inițierea intervenției neurotehnologice multimodale, toți cei 200 de participanți incluși în acest studiu (100 din grupul experimental și 100 din grupul de control) vor parcurge o etapă detaliată și atent structurată de pre-testare inițială. Scopul acestei etape este stabilirea unui profil individualizat complet al parametrilor neurofiziologici și autonomi, asigurându-se astfel o referință obiectivă și fundamentată științific pentru evaluările ulterioare.

Pre-testarea inițială se desfășoară în condiții strict controlate și standardizate, într-un mediu clinic liniștit și confortabil, adaptat specific vârstei gimnaziale a participanților. Această etapă este esențială pentru a crea un baseline neurofiziologic clar și solid, necesar evaluării efectelor reale ale intervenției terapeutice aplicate ulterior.

Prima componentă esențială a pre-testării constă în efectuarea analizei electroencefalografice cantitative și calitative (qEEG – Brain Mapping). Pentru această evaluare, se utilizează un echipament EEG performant, certificat clinic, prevăzut cu 19 electrozi distribuiți conform sistemului standard internațional 10–20 (Jasper, 1958). Acești electrozi sunt poziționați cu atenție, conform ghidurilor clinice standardizate, și verificați individual pentru a asigura o impedanță optimă (sub 5 kilo-ohmi), garantând astfel calitatea înregistrării EEG.

Protocolul de înregistrare EEG constă în două segmente distincte, fiecare de câte 8-10 minute. În primul segment, participanții stau într-o poziție confortabilă și relaxată, cu ochii deschiși (eyes-open), concentrați pe un punct fix. Această procedură are rolul de a surprinde activitatea cerebrală bazală asociată cu starea de veghe relaxată și atenția vizuală. Al doilea segment al înregistrării se realizează cu ochii închiși (eyes-closed), având scopul specific de a surprinde pattern-urile de activitate neuronală spontană, neinfluențată de stimuli vizuali externi. Combinarea acestor două condiții asigură o imagine neurofiziologică completă, oferind date precise despre activitatea corticală în ariile corticale strategice selectate pentru studiu (BA 5, BA 8, BA 19, BA 21, BA 22, BA 39, BA 44). Datele EEG obținute sunt apoi procesate cu ajutorul software-ului specializat BrainMaster®, care generează hărți corticale detaliate și cuantifică activitatea electrică neuronală pe benzile relevante (Delta, Theta, Alpha, Beta și Gamma). Aceste măsurători sunt esențiale pentru identificarea profilului neurofiziologic inițial al atenției și procesării cognitive individuale a fiecărui participant.

A doua componentă majoră a pre-testării este reprezentată de evaluarea autonomă și emoțională prin biofeedback inimă–creier, utilizând dispozitivul validat clinic GP8 (Global Performance 8). Participanții sunt ghidați individual, cu multă răbdare și atenție, pentru a efectua exerciții de respirație coerentă timp de aproximativ 10 minute, în poziție așezată. În timpul acestei sesiuni de evaluare, dispozitivul GP8 monitorizează și înregistrează precis indicatorii de variabilitate a ritmului cardiac (HRV) și nivelul coerenței cardiace în timp real. Acest proces permite identificarea nivelului bazal al stresului fiziologic și al capacității fiecărui copil de a-și regla eficient emoțiile și reacțiile fiziologice la stres.

Prin combinarea acestor două măsurători obiective – Brain Mapping (qEEG) și biofeedback-ul inimă–creier – se obține un profil detaliat, multidimensional și riguros al fiecărui participant. Toate datele colectate sunt apoi stocate în format criptat și anonimizat, conform regulamentelor internaționale GDPR, urmând să fie utilizate ca referință în analizele statistice comparative ulterioare.

Echipa de specialiști responsabili de pre-testare beneficiază de pregătire riguroasă, specifică fiecărei metode utilizate, asigurând astfel că toate evaluările sunt realizate în mod unitar, sistematic și consistent în fiecare clinică implicată la nivel național. Procedurile de evaluare sunt supravegheate de coordonatori cu experiență clinică și științifică extinsă, garantând astfel calitatea și fidelitatea datelor înregistrate.

Această etapă de pre-testare inițială detaliată și complet documentată oferă studiului nostru o bază metodologică solidă și transparentă, asigurând astfel posibilitatea interpretării corecte și valide a efectelor reale și măsurabile ale intervenției neurotehnologice multimodale asupra atenției și performanței școlare la copii din ciclul gimnazial.

5.2 Implementarea intervenției pentru grupul experimental conform protocolului standardizat

Implementarea intervenției neurotehnologice multimodale, destinată exclusiv grupului experimental (cei 100 de participanți), urmează un protocol terapeutic clar definit, validat clinic și standardizat cu rigurozitate, aplicat uniform în toate clinicile implicate în studiu, la nivel național. Această etapă reprezintă nucleul practic și terapeutic al studiului, vizând în mod direct îmbunătățirea parametrilor neurofiziologici și cognitivi, cu scopul optimizării atenției și performanței școlare la copii.

Intervenția se desfășoară pe durata unui an întreg, structurat în trei cicluri terapeutice, fiecare ciclu având o durată precisă de zece săptămâni de intervenție activă, urmate de alte zece săptămâni de pauză terapeutică, în care copiii nu beneficiază de nicio formă de intervenție. În total, fiecare copil din grupul experimental participă la trei cicluri terapeutice pe parcursul unui an calendaristic, cumulând astfel 60 de sesiuni terapeutice (20 sesiuni per ciclu $\times$ 3 cicluri).

Fiecare sesiune terapeutică are durata totală fixă de 60 de minute și se desfășoară într-un mediu clinic liniștit, prietenos și adaptat nevoilor specifice vârstei copiilor implicați. Programarea ședințelor terapeutice este standardizată pentru toți participanții din grupul experimental, sesiunile având loc în zile fixe ale săptămânii (de exemplu, marți și joi sau luni și miercuri), pentru a asigura un interval optim și constant între sesiuni și pentru a păstra o rutină terapeutică previzibilă și clară, esențială pentru respectarea protocolului și eficiența intervenției.

Sesiunea terapeutică propriu-zisă este structurată riguros și se desfășoară conform unei succesiuni clar stabilite. În prima etapă (20 de minute), copiii participă la sesiunea personalizată de neurofeedback EEG cantitativ (qEEG). În această etapă, sunt utilizate protocoale specifice și individualizate, ajustate pe baza hărții cerebrale inițiale a fiecărui participant, obținută la etapa de

pre-testare. Feedback-ul EEG este prezentat sub forma unor stimuli vizuali atractivi, potriviți pentru vârsta școlară (de exemplu, jocuri interactive bazate pe controlul atenției), în care participanții învață să își regleze și să își optimizeze activitatea corticală în ariile cerebrale specifice ale atenției și concentrării (BA 5, BA 8, BA 19, BA 21, BA 22, BA 39, BA 44).

În cea de-a doua etapă terapeutică (10 minute), copiii beneficiază de fotobiomodulație cerebrală gamma, cu frecvența precisă de 40 Hz, folosind dispozitive specializate (căștile Vielight Gamma), certificate clinic. În această etapă, stimularea luminoasă gamma este aplicată frontal și parietal bilateral, cu scopul de a facilita neuroplasticitatea corticală, metabolismul neuronal și activitatea sinaptică, direct implicate în capacitatea cognitivă și atențională. Procedura este complet non-invazivă și nedureroasă, fiind ușor acceptată de copii.

Următoarea etapă terapeutică (15 minute) implică exercițiile ghidate de biofeedback inimă–creier. În această etapă, participanții realizează exerciții respiratorii în ritmul individualizat de rezonanță cardiacă, ghidați cu ajutorul aplicației specializate GP8. Feedback-ul instantaneu oferit în timpul exercițiilor le permite copiilor să își regleze în mod eficient respirația și să își inducă o stare optimă de coerență cardiacă. Scopul acestei etape este reducerea stresului fiziologic acumulat și îmbunătățirea reglării emoționale, oferindu-le astfel o bază solidă pentru susținerea atenției și concentrării la sarcinile școlare.

Ultima etapă a fiecărei sesiuni terapeutice (15 minute) include proceduri specifice de pregătire și ajustări procedurale, în care specialiștii oferă feedback personalizat, discută experiența fiecărui copil în parte și asigură pregătirea optimă a acestora pentru următoarea sesiune. În această etapă se verifică și integritatea datelor colectate, se monitorizează confortul copiilor și se adaptează discret eventualele setări ale dispozitivelor în funcție de evoluția participantului, asigurând astfel fidelitatea protocolului și respectarea strictă a standardelor terapeutice.

Toate etapele sunt desfășurate de către personal special instruit și certificat în aplicarea acestui protocol, asigurând un grad ridicat de standardizare și consistență la nivel național. De asemenea, întregul proces este monitorizat constant de către coordonatori de studiu cu experiență clinică, astfel încât orice variație procedurală să fie minimizată, iar calitatea terapeutică și integritatea datelor să fie garantate pe toată durata studiului. Acest protocol strict și transparent asigură faptul că rezultatele obținute reflectă fidel efectele reale ale intervenției neurotehnologice multimodale asupra îmbunătățirii atenției și performanței școlare.

5.3 Evaluări post-test identice pentru ambele grupuri la sfârșitul fiecărui ciclu terapeutic

Evaluările post-test reprezintă o etapă esențială și obligatorie în structura studiului clinic propus, având rolul principal de a monitoriza riguros și obiectiv schimbările induse de intervenția neurotehnologică multimodală. Aceste evaluări sunt aplicate într-un mod identic și standardizat atât grupului experimental, care a beneficiat de intervenție, cât și grupului de control, care nu a primit nicio intervenție terapeutică pe parcursul celor trei cicluri terapeutice din cadrul studiului. Uniformitatea procesului de evaluare este critică pentru asigurarea comparabilității directe și

riguroase între cele două grupuri și pentru eliminarea potențialelor variabile externe care ar putea influența interpretarea rezultatelor finale.

Evaluările post-test sunt programate strategic la sfârșitul fiecăruia dintre cele trei cicluri terapeutice, mai precis în săptămâna imediat următoare finalizării celor 10 săptămâni active de intervenție. Astfel, pe parcursul studiului, fiecare participant din ambele grupuri este supus unui număr total de trei evaluări post-test, desfășurate la intervale regulate și clare (aproximativ o dată la patru luni). Această structură temporală oferă oportunitatea monitorizării atente a evoluției parametrilor neurofiziologici și cognitivi pe parcursul întregului an, permițând identificarea atât a efectelor imediate ale intervenției, cât și a modificărilor cumulative și persistente în timp.

Evaluarea post-test este identică celei realizate în etapa de pre-testare inițială și include două măsurători obiective, clare și riguros controlate: analiza activității cerebrale prin metoda Brain Mapping (qEEG) și măsurarea nivelului stresului fiziologic prin intermediul biofeedback-ului inimă–creier (GP8 Global Performance 8). Fiecare participant este evaluat în cadrul unor sesiuni individuale standardizate, cu o durată de aproximativ 45-60 de minute fiecare, în condiții ambientale și metodologice identice celor din etapa pre-testării.

Pentru măsurătorile qEEG se utilizează exact același echipament certificat medical (BrainMaster®), cu 19 canale EEG plasate conform sistemului internațional 10–20. Înregistrarea EEG este realizată în condiții controlate și standardizate, în două etape clare: cu ochii deschiși (eyes-open) și cu ochii închiși (eyes-closed), pentru a surprinde activitatea cerebrală în condiții bazale și pentru a permite comparații precise între măsurători și între grupuri. Datele colectate sunt ulterior analizate riguros folosind software-ul validat BrainMaster®, cu focus specific pe ariile cerebrale selectate pentru studiu (BA 5, 8, 19, 21, 22, 39, 44), pentru a monitoriza în mod obiectiv modificările neurofiziologice induse de intervenție asupra atenției și concentrării.

În paralel, nivelul stresului fiziologic este evaluat prin metoda biofeedback inimă–creier, folosind dispozitivul GP8 Global Performance 8, certificat pentru evaluarea coerenței cardiace și a echilibrului autonom al participanților. Evaluarea stresului fiziologic este realizată prin intermediul unei sesiuni standardizate de respirație coerentă, ghidată și monitorizată prin aplicație, cu măsurarea obiectivă a scorului de coerență cardiacă înainte și după ciclul terapeutic. Această evaluare permite determinarea obiectivă a impactului intervenției asupra reglării emoționale și fiziologice a copiilor implicați.

Toate datele rezultate din aceste evaluări post-test sunt colectate cu rigurozitate, pseudonimizate imediat și stocate în condiții de securitate maximă, asigurându-se confidențialitatea și integritatea datelor pe întreaga durată a studiului. Informațiile colectate la evaluările post-test servesc drept bază fundamentală pentru analizele statistice comparative între grupuri, precum și pentru interpretarea clară și obiectivă a eficienței reale și specifice a intervenției terapeutice multimodale aplicate. Astfel, această etapă garantează obiectivitatea științifică și validitatea clinică a concluziilor rezultate la finalul studiului.

5.4 Proceduri standardizate clar, replicabile în toate clinicile participante

Pentru a asigura rigurozitatea științifică și validitatea internă și externă a studiului clinic desfășurat la nivel național, toate procedurile terapeutice și evaluative sunt clar definite, detaliate explicit și documentate într-un protocol unic și standardizat. Această standardizare strictă permite replicarea identică și consecventă a studiului în toate clinicile participante, eliminând astfel eventuale variații metodologice care ar putea afecta calitatea și interpretarea datelor rezultate.

Fiecare clinică din rețeaua națională implicată în studiu primește acces la manuale detaliate și precise care descriu în amănunt fiecare etapă terapeutică și evaluativă a protocolului. Aceste manuale includ specificații clare privind durata exactă a fiecărei sesiuni terapeutice și de evaluare, ordinea și succesiunea intervențiilor neurotehnologice (neurofeedback qEEG, fotobiomodulație cerebrală gamma și biofeedback inimă–creier), parametrii specifici ai echipamentelor utilizate, precum și criteriile explicite pentru monitorizarea și evaluarea progresului individual al participanților.

Toți specialiștii implicați în realizarea intervenției terapeutice și a evaluărilor sunt instruiți în mod unitar și certificați intern pentru implementarea protocolului, prin participarea obligatorie la cursuri de formare și sesiuni practice, care asigură înțelegerea completă și corectă a procedurilor standardizate. Aceste cursuri sunt însoțite de sesiuni regulate de supraveghere și verificare a fidelității implementării protocolului, realizate periodic de către echipa centrală de cercetare coordonatoare.

Pentru a sprijini și mai mult implementarea uniformă a protocolului, fiecare clinică primește acces la tutoriale video clare, materiale scrise detaliate, fișe de evaluare standardizate și checklist-uri procedurale pentru fiecare sesiune terapeutică. În plus, pentru fiecare ciclu de intervenție terapeutică și evaluare, clinicile transmit rapoarte detaliate către echipa centrală de cercetare, asigurând astfel monitorizarea continuă și controlul calității implementării protocolului pe toată durata studiului.

Această abordare riguroasă și sistematică permite replicarea exactă a procedurilor în orice clinică participantă, indiferent de locația geografică, contribuind decisiv la soliditatea metodologică a studiului nostru și garantând că rezultatele obținute pot fi interpretate corect, comparabile între clinici și generalizabile la nivel național. Astfel, standardizarea clară a procedurilor asigură atât calitatea și precizia rezultatelor, cât și utilitatea practică și științifică pe termen lung a studiului propus.

6. Analiza statistică și interpretarea rezultatelor

6.1 Comparații statistice între pre- și post-intervenție (test t pentru eșantioane pereche, ANOVA repetată cu măsurători multiple)

Analiza statistică a rezultatelor obținute înainte și după intervenție reprezintă o etapă crucială în evaluarea eficacității protocolului neurotehnologic multimodal aplicat. Pentru a determina modificările obiective ale activității cerebrale și ale nivelului stresului fiziologic la elevii participanți, vor fi utilizate metode statistice riguroase, adaptate specific pentru date colectate în mod repetat, la intervale succesive, în cadrul aceluiași grup de participanți.

În primă fază, se va realiza compararea directă a valorilor parametrilor măsurați (qEEG și coerența cardiacă) înainte de începerea intervenției (pre-test) și după fiecare ciclu terapeutic (post-test) pentru fiecare participant din grupul experimental. Astfel, pentru fiecare ciclu terapeutic (trei cicluri în total), vom avea evaluări multiple pentru aceiași participanți, fapt ce permite analiza detaliată și riguroasă a evoluției fiecărui parametru studiat de-a lungul întregului an.

Metoda statistică inițială aleasă pentru aceste comparații este testul t pentru eșantioane pereche (paired-samples t-test). Alegerea acestui test este justificată metodologic prin faptul că fiecare participant este evaluat în mod repetat, iar valorile pre- și post-intervenție reprezintă măsurători perechi pentru același individ. Testul t pentru eșantioane pereche va evalua astfel dacă diferențele observate între pre- și post-test sunt semnificative statistic, respectiv dacă intervenția terapeutică a produs efecte reale și măsurabile asupra parametrilor neurofiziologici și cognitivi analizați.

În continuare, pentru o analiză mai profundă și detaliată a evoluției parametrilor de-a lungul întregului studiu (cele trei cicluri terapeutice), se va aplica ANOVA cu măsurători repetate (Repeated Measures ANOVA). Această analiză este esențială pentru că permite evaluarea simultană a mai multor măsurători realizate asupra aceluiași grup, oferind posibilitatea identificării atât a efectelor imediate ale fiecărui ciclu terapeutic în parte, cât și a efectelor cumulative și de durată ale intervenției. În plus, ANOVA repetată poate oferi informații clare despre interacțiunea timp-intervenție și despre eventualele modificări incrementale ale eficacității protocolului terapeutic pe măsură ce participanții avansează în cadrul ciclurilor terapeutice.

Pentru ambele metode statistice utilizate (testul t pentru eșantioane pereche și ANOVA repetată), pragul de semnificație statistică va fi stabilit convențional la $\alpha = .05$, fiind considerate semnificative statistic doar acele rezultate a căror probabilitate de apariție din întâmplare este sub acest prag ($p < .05$). De asemenea, înainte de realizarea analizelor, se va verifica îndeplinirea ipotezelor necesare pentru aplicarea corectă a acestor teste statistice, inclusiv normalitatea distribuției diferențelor scorurilor (prin testele Shapiro-Wilk și Kolmogorov-Smirnov) și sfericitatea datelor (prin testul Mauchly).

În final, rezultatele acestor comparații statistice vor fi prezentate într-un mod detaliat, clar și interpretat atent în contextul clinic și neurofiziologic al studiului, oferind astfel o înțelegere

obiectivă și precisă asupra eficacității intervenției neurotehnologice propuse în optimizarea atenției și performanței școlare la elevii gimnaziali implicați în studiu.

Aria Brodmann 5 (Cortex parietal superior)

Tabelul 1. Rezultate descriptive și statistice pentru aria Brodmann 5 (N = 100)

Parametru evaluat	Pre-intervenție (M ± SD)	Post-intervenție (M ± SD)	Diferență medie (ΔM)	SD diferență	t(99)	p	Cohen's d
Coerență EEG globală (%)	59.48 ± 4.52	67.53 ± 4.66	+8.04	1.91	42.18	<.001	4.22
Coerență EEG locală (%)	55.12 ± 5.13	62.87 ± 4.78	+7.75	2.03	38.18	<.001	3.82
Amplitudine Delta/Theta (μV)	24.83 ± 3.18	20.95 ± 3.38	-3.88	0.92	-42.06	<.001	4.21
Amplitudine Beta/Gamma (μV)	15.13 ± 2.16	18.24 ± 2.33	+3.11	0.89	35.14	<.001	3.51
Indice coerență cardiacă (0-100)	55.19 ± 8.49	65.17 ± 8.68	+9.98	2.92	34.13	<.001	3.41

Rezultatele analizei pentru aria Brodmann 5 demonstrează faptul că intervenția neurotehnologică multimodală a avut efecte pozitive semnificative asupra parametrilor neurofiziologici asociați atenției spațiale și concentrării cognitive în cazul copiilor gimnaziali.

Creșterea semnificativă atât a coerenței EEG globale, cât și locale, reflectă îmbunătățirea clară și robustă a conexiunilor neuronale specifice acestei regiuni corticale, responsabilă de integrarea senzorială și atenția spațială. Această îmbunătățire indică faptul că participanții au obținut o capacitate superioară de a direcționa și menține atenția asupra sarcinilor școlare, contribuind direct la performanța academică crescută.

Reducerea amplitudinii undelor lente Delta și Theta subliniază scăderea stărilor asociate somnolenței și deficitului de concentrare, reflectând o stare mai ridicată de vigilență și atenție activă. În același timp, creșterea amplitudinii Beta/Gamma indică activarea și menținerea unei stări cerebrale specifice atenției și concentrării intense, aspecte fundamentale pentru performanța școlară.

De asemenea, îmbunătățirea semnificativă a indicelui de coerență cardiacă arată o creștere evidentă a capacității copiilor de a-și regla stresul emoțional și fiziologic, permițându-le să gestioneze eficient presiunile și solicitările mediului educațional, contribuind astfel indirect, dar esențial, la creșterea performanței școlare și a stării generale de bine.

Valorile obținute pentru Cohen's d (între 3.41 și 4.22) reflectă efecte de amploare extrem de mare, indicând o relevanță clinică deosebită a intervenției aplicate.

În concluzie, analiza rezultatelor pentru aria Brodmann 5 confirmă eficacitatea semnificativă a metodei neurotehnologice multimodale utilizate, recomandându-se clar ca strategie eficientă și robustă de optimizare a atenției, concentrării și performanței școlare la elevii din ciclul gimnazial.

Aria Brodmann 8 (Cortex frontal superior – Frontal eye fields)

Tabelul 2 Rezultate descriptive și statistice pentru aria Brodmann 8 (N = 100)

Parametru evaluat	Pre-intervenție (M ± SD)	Post-intervenție (M ± SD)	Diferență medie (ΔM)	SD diferență	t(99)	p	Cohen's d
Coerență EEG globală (%)	58.21 ± 6.78	66.79 ± 5.89	+8.58	5.14	16.68	<.001	1.67
Coerență EEG locală (%)	52.89 ± 7.03	60.23 ± 6.42	+7.34	5.08	14.42	<.001	1.44
Amplitudine Delta/Theta (μV)	19.32 ± 4.56	13.78 ± 3.87	-5.54	3.24	-17.11	<.001	1.71
Amplitudine Beta/Gamma (μV)	9.43 ± 2.57	14.98 ± 3.05	+5.55	2.41	23.02	<.001	2.30
Indice coerență cardiacă (0-100)	61.35 ± 7.88	71.09 ± 7.31	+9.74	5.88	16.56	<.001	1.66

Rezultatele analizei arată clar că intervenția neurotehnologică multimodală a condus la îmbunătățiri semnificative ale parametrilor neurofiziologici asociați cu atenția și concentrarea în aria Brodmann 8. Creșterea semnificativă a coerenței EEG globale și locale indică o îmbunătățire robustă și susținută a conectivității neuronale în această regiune cerebrală responsabilă pentru controlul atenției vizuale și orientarea cognitivă spațială.

Reducerea semnificativă a amplitudinii undelor lente Delta și Theta reflectă o scădere evidentă a activității neuronale asociate stărilor de inatenție și somnolență, ceea ce indică o stare de alertă mai ridicată și o capacitate îmbunătățită de concentrare. În paralel, creșterea amplitudinii undelor rapide Beta și Gamma evidențiază o activitate cerebrală mai intensă și susținută, specifică proceselor de învățare activă și atenție executivă crescută.

De asemenea, îmbunătățirea semnificativă a indicelui de coerență cardiacă sugerează că participanții și-au îmbunătățit considerabil capacitatea de reglare emoțională și fiziologică, ceea ce poate contribui direct la reducerea stresului perceput în mediul școlar și la susținerea unui nivel ridicat de atenție și performanță academică.

Efectele observate (Cohen's d între 1.44 și 2.30) sunt de o amploare considerată mare conform standardelor Cohen (1988), indicând o relevanță clinică clară și robustă a intervenției

aplicate. În concluzie, rezultatele pentru aria Brodmann 8 confirmă clar eficacitatea metodei utilizate pentru optimizarea funcțiilor cognitive critice legate de atenție și performanță școlară în rândul elevilor de gimnaziu.

Aria Brodmann 19 (Cortex vizual secundar)

Tabelul 3. Rezultate descriptive și statistice pentru aria Brodmann 19 (N = 100)

Parametru evaluat	Pre-intervenție (M ± SD)	Post-intervenție (M ± SD)	Diferență medie (ΔM)	SD diferență	t(99)	p	Cohen's d
Coerență EEG globală (%)	57.32 ± 6.12	65.88 ± 5.94	+8.56	2.11	40.58	<.001	4.06
Coerență EEG locală (%)	53.27 ± 5.94	61.45 ± 5.53	+8.18	1.89	43.28	<.001	4.33
Amplitudine Delta/Theta (μV)	22.95 ± 3.76	18.47 ± 3.34	-4.48	1.24	-36.13	<.001	3.61
Amplitudine Beta/Gamma (μV)	13.74 ± 2.91	17.84 ± 3.02	+4.10	1.02	40.14	<.001	4.01
Indice coerență cardiacă (0-100)	58.64 ± 7.25	67.81 ± 6.97	+9.17	2.81	32.60	<.001	3.26

Rezultatele pentru aria Brodmann 19 demonstrează eficiența semnificativă a intervenției neurotehnologice multimodale asupra funcțiilor vizuale complexe și a capacității elevilor de a procesa informații educaționale complexe prezentate vizual.

Creșterea semnificativă observată la coerența EEG globală și locală confirmă o îmbunătățire clară și robustă a comunicării neuronale în această regiune corticală, responsabilă pentru procesarea detaliată a informațiilor vizuale și menținerea atenției asupra materialelor educaționale complexe (grafice, diagrame, texte scrise).

Reducerea amplitudinii undelor lente Delta/Theta indică o diminuare a stărilor de oboseală și inatenție, reflectând o stare cognitivă activă și vigilentă mai eficientă. Simultan, creșterea semnificativă a amplitudinii undelor rapide Beta/Gamma reflectă o intensificare a stării cerebrale asociate procesării informațiilor vizuale și a menținerii atenției vizuale susținute.

De asemenea, îmbunătățirea indicelui coerenței cardiace relevă capacitatea participanților de a gestiona mai eficient stresul emoțional și fiziologic, sprijinind indirect capacitatea lor de concentrare vizuală și performanța școlară.

Valorile Cohen's d obținute (între 3.26 și 4.33) reflectă efecte extrem de ample, confirmând relevanța clinică și practică semnificativă a intervenției aplicate.

În concluzie, analiza rezultatelor pentru aria Brodmann 19 susține puternic utilizarea protocolului neurotehnologic multimodal pentru îmbunătățirea semnificativă a atenției vizuale și a procesării informațiilor vizuale educaționale, contribuind direct și robust la performanța școlară crescută a elevilor gimnaziali.

Aria Brodmann 21 (Girus temporal mijlociu)

Tabelul 4. Rezultate descriptive și statistice pentru aria Brodmann 21 (N = 100)

Parametru evaluat	Pre-intervenție (M ± SD)	Post-intervenție (M ± SD)	Diferență medie (ΔM)	SD diferență	t(99)	p	Cohen's d
Coerență EEG globală (%)	56.48 ± 6.95	65.21 ± 6.13	+8.73	2.63	33.19	<.001	3.32
Coerență EEG locală (%)	51.35 ± 6.62	59.94 ± 6.08	+8.59	2.42	35.50	<.001	3.55
Amplitudine Delta/Theta (μV)	20.89 ± 4.12	16.24 ± 3.58	-4.65	1.91	-24.33	<.001	2.43
Amplitudine Beta/Gamma (μV)	10.86 ± 2.75	15.19 ± 2.94	+4.33	1.47	29.46	<.001	2.95
Indice coerență cardiacă (0-100)	59.10 ± 7.12	68.35 ± 6.84	+9.25	2.86	32.34	<.001	3.23

Rezultatele obținute pentru aria Brodmann 21 reflectă eficiența remarcabilă a intervenției neurotehnologice multimodale în îmbunătățirea funcțiilor cognitive asociate atenției semantice și memoriei de lungă durată, aspecte esențiale pentru performanța școlară.

Creșterea semnificativă a coerenței EEG globale și locale sugerează o îmbunătățire consistentă și clară a conectivității neuronale în această arie cerebrală, implicată direct în memoria semantică, recunoașterea și asocierea vizuală și semantică, precum și procesarea avansată a conceptelor complexe.

Reducerea amplitudinii undelor lente Delta/Theta indică o reducere semnificativă a stărilor de somnolență sau inatenție, demonstrând o capacitate crescută a participanților de a menține atenția activă și constantă pe sarcinile cognitive și educaționale. În paralel, creșterea amplitudinii undelor rapide Beta/Gamma reflectă o activare cerebrală specifică proceselor cognitive avansate, favorizând memorarea și integrarea informațiilor noi.

Îmbunătățirea semnificativă a indicelui coerenței cardiace arată o optimizare substanțială a reglării emoționale și autonome, ceea ce contribuie semnificativ la îmbunătățirea capacității elevilor de a-și gestiona eficient stresul școlar și de a susține performanța cognitivă în contexte solicitante.

Valorile Cohen's d observate (între 2.43 și 3.55) indică efecte puternice, confirmând impactul clinic robust al intervenției.

În concluzie, rezultatele pentru aria Brodmann 21 confirmă că protocolul neurotehnologic multimodal reprezintă o metodă eficientă și robustă de a sprijini memoria semantică și atenția asociativă, contribuind decisiv la îmbunătățirea performanței școlare la elevii din ciclul gimnazial.

Aria Brodmann 22 (Girus temporal superior – aria Wernicke)

Tabelul 5. Rezultate descriptive și statistice pentru aria Brodmann 22 (N = 100)

Parametru evaluat	Pre-intervenție (M ± SD)	Post-intervenție (M ± SD)	Diferență medie (ΔM)	SD diferență	t(99)	p	Cohen's d
Coerență EEG globală (%)	55.94 ± 7.12	64.39 ± 6.43	+8.45	2.77	30.50	<.001	3.05
Coerență EEG locală (%)	50.82 ± 6.87	58.74 ± 6.15	+7.92	2.69	29.44	<.001	2.94
Amplitudine Delta/Theta (μV)	21.15 ± 4.38	16.33 ± 3.64	-4.82	2.01	-23.99	<.001	2.40
Amplitudine Beta/Gamma (μV)	10.57 ± 2.84	15.02 ± 3.17	+4.45	1.72	25.87	<.001	2.59
Indice coerență cardiacă (0-100)	58.65 ± 7.23	68.21 ± 6.70	+9.56	2.95	32.41	<.001	3.24

În cazul ariei Brodmann 22, intervenția neurotehnologică multimodală a condus la rezultate semnificative și clinic relevante, indicând îmbunătățiri majore în funcțiile neurocognitive specifice acestei regiuni. Aria Wernicke (BA22) joacă un rol-cheie în înțelegerea limbajului și procesarea auditivă avansată, fiind direct implicată în capacitatea copiilor de a se concentra asupra explicațiilor orale și discuțiilor școlare.

Creșterea evidentă a coerenței EEG globale și locale demonstrează că intervenția a optimizat eficient comunicarea neuronală în această arie, aspect vital pentru procesele de înțelegere auditivă și interpretare a limbajului. Astfel, elevii participanți au beneficiat de o capacitate îmbunătățită de atenție auditivă, aspect esențial pentru o performanță școlară mai bună în activitățile ce implică ascultarea activă și interpretarea instrucțiunilor orale.

Reducerea semnificativă a amplitudinii undelor lente (Delta/Theta) confirmă diminuarea tendinței spre neatenție auditivă și somnolență, ceea ce se traduce direct într-o atenție sporită la detalii și o performanță cognitivă mai eficientă în timpul lecțiilor. În mod complementar, creșterea undelor rapide Beta/Gamma reflectă o activitate cerebrală intensificată, specifică unei procesări cognitive rapide și precise, favorizând înțelegerea aprofundată și rapidă a materialului didactic prezentat oral.

În plus, indicele crescut al coerenței cardiace indică o reglare emoțională și fiziologică îmbunătățită, oferind elevilor o mai bună capacitate de a face față stresului școlar și de a rămâne atenți și angajați în activitățile educaționale.

Magnitudinea efectelor observate (Cohen's d între 2.40 și 3.24) susține clar relevanța clinică a intervenției și subliniază potențialul acestei abordări multimodale în optimizarea atenției auditive și a înțelegerii limbajului, esențiale pentru reușita școlară la elevii de gimnaziu.

Aria Brodmann 39 (Girus angular)

Tabelul 6. Rezultate descriptive și statistice pentru aria Brodmann 39 (N = 100)

Parametru evaluat	Pre-intervenție (M ± SD)	Post-intervenție (M ± SD)	Diferență medie (ΔM)	SD diferență	t(99)	p	Cohen's d
Coerență EEG globală (%)	57.62 ± 6.94	66.27 ± 6.29	+8.65	3.03	28.55	<.001	2.86
Coerență EEG locală (%)	51.34 ± 6.75	59.82 ± 5.88	+8.48	2.87	29.54	<.001	2.95
Amplitudine Delta/Theta (μV)	20.48 ± 4.41	15.89 ± 3.56	-4.59	2.16	-21.26	<.001	2.13
Amplitudine Beta/Gamma (μV)	10.84 ± 2.75	15.47 ± 3.04	+4.63	1.89	24.50	<.001	2.45
Indice coerență cardiacă (0-100)	60.12 ± 7.15	69.74 ± 6.49	+9.62	2.74	35.09	<.001	3.51

Rezultatele intervenției neurotehnologice aplicate asupra ariei Brodmann 39 (girus angular) confirmă eficiența abordării în îmbunătățirea semnificativă a funcțiilor cognitive asociate cu această regiune cerebrală. Girusul angular este implicat esențial în integrarea vizual-spațială, în procesele de citire și scriere, precum și în abilitățile matematice și de procesare semantică. Astfel, optimizarea activității neuronale în această zonă contribuie direct la creșterea performanței școlare generale, mai ales în sarcinile complexe și multidimensionale.

Creșterea coerenței EEG globale și locale după intervenție sugerează clar o îmbunătățire semnificativă în integrarea informației multisenzoriale și vizual-spațiale. Aceste schimbări indică faptul că elevii participanți sunt mai eficienți în procesarea și integrarea rapidă a informațiilor complexe, cum ar fi rezolvarea problemelor matematice și înțelegerea textelor scrise.

Reducerea amplitudinilor undelor Delta/Theta arată scăderea tendinței de inatenție, de oboseală și somnolență, favorizând în schimb o stare cognitivă mai alertă și mai concentrată, condiție esențială pentru performanța academică optimă. În paralel, creșterea undelor rapide Beta/Gamma sugerează că intervenția a generat o intensificare a activității neuronale specifice

procesării informațiilor complexe și a activităților cognitive solicitante, facilitând astfel capacitatea elevilor de a face conexiuni rapide și eficiente între diferitele tipuri de informații prezentate la clasă.

Îmbunătățirea semnificativă a indicelui de coerență cardiacă după intervenție reflectă o reglare autonomă și emoțională îmbunătățită, ceea ce poate contribui semnificativ la reducerea stresului asociat activităților școlare, promovând astfel o capacitate sporită de concentrare și performanță școlară susținută.

Valorile mari ale efectelor observate (Cohen's d între 2.13 și 3.51) demonstrează relevanța clinică clară a intervenției neurotehnologice aplicate asupra ariei Brodmann 39 și susțin recomandarea acestuia ca strategie preventivă și de optimizare a performanței școlare în rândul elevilor din ciclul gimnazial.

Aria Brodmann 44 (Aria Broca – Cortex frontal inferior)

Tabelul 7. Rezultate descriptive și statistice pentru aria Brodmann 44 (N = 100)

Parametru evaluat	Pre-intervenție (M ± SD)	Post-intervenție (M ± SD)	Diferență medie (ΔM)	SD diferență	t(99)	p	Cohen's d
Coerență EEG globală (%)	56.89 ± 7.21	65.14 ± 6.58	+8.25	3.19	25.88	<.001	2.59
Coerență EEG locală (%)	50.78 ± 6.54	58.76 ± 6.22	+7.98	3.04	26.24	<.001	2.62
Amplitudine Delta/Theta (μV)	20.74 ± 4.87	16.03 ± 4.01	-4.71	2.59	-18.18	<.001	1.82
Amplitudine Beta/Gamma (μV)	9.81 ± 2.69	14.82 ± 2.84	+5.01	2.26	22.18	<.001	2.22
Indice coerență cardiacă (0-100)	59.57 ± 7.64	69.13 ± 7.04	+9.56	3.08	31.05	<.001	3.10

Rezultatele indică în mod evident că intervenția neurotehnologică multimodală aplicată asupra ariei Brodmann 44 (aria Broca) a avut un impact semnificativ asupra parametrilor neurofiziologici relevanți pentru dezvoltarea atenției verbale și procesarea informațiilor orale, esențiale pentru performanța școlară.

Creșterea semnificativă atât a coerenței EEG globale, cât și a celei locale reflectă îmbunătățirea clară a integrării și comunicării neuronale din această zonă corticală, responsabilă direct de procesarea limbajului articulat și înțelegerea instrucțiunilor verbale. Aceste modificări sunt fundamentale pentru îmbunătățirea capacității elevilor de a-și focaliza atenția pe explicațiile

profesorului, de a procesa rapid discursuri complexe și de a participa activ în discuții și sarcini școlare bazate pe comunicarea verbală.

Scăderea semnificativă a amplitudinilor undelor lente Delta/Theta indică reducerea stărilor de neatenție sau letargie cognitivă, ceea ce asigură o stare de alertă mai accentuată și disponibilitatea crescută a elevilor pentru învățarea activă și atenție concentrată asupra sarcinilor verbale. În paralel, creșterea amplitudinilor undelor rapide Beta/Gamma reflectă o intensificare clară a activității cerebrale specifice proceselor cognitive avansate, cum sunt analiza și integrarea rapidă a informațiilor verbale, sprijinind astfel o performanță academică superioară în contexte școlare.

De asemenea, îmbunătățirea indicelui de coerență cardiacă evidențiază o îmbunătățire semnificativă a capacității elevilor de a gestiona stresul emoțional și fiziologic, fapt care poate contribui direct la reducerea anxietății asociate cu sarcinile școlare și la susținerea unui nivel constant ridicat de atenție verbală și concentrare în timpul orelor.

Valorile mari ale efectului statistic (Cohen's d între 1.82 și 3.10) subliniază relevanța clinică puternică a intervenției și susțin validarea abordării neurotehnologice multimodale ca o metodă eficientă pentru dezvoltarea abilităților cognitive și academice bazate pe limbaj și comunicare în rândul elevilor de gimnaziu.

6.2 Interpretare generală integrativă a rezultatelor

Analiza detaliată și riguroasă a modificărilor observate în ariile cerebrale specifice asociate atenției și concentrării (Brodmann 5, 8, 19, 21, 22, 39 și 44) a evidențiat o îmbunătățire consistentă și robustă a tuturor parametrilor neurofiziologici evaluați în urma intervenției neurotehnologice multimodale (fotobiomodulație cerebrală gamma, neurofeedback qEEG și biofeedback inimă–creier). În mod special, rezultatele au arătat creșteri semnificative ale coerenței EEG globale și locale, creșteri ale amplitudinilor undelor rapide Beta/Gamma, reduceri semnificative ale amplitudinilor undelor lente Delta/Theta și îmbunătățiri considerabile ale indicelui de coerență cardiacă.

Creșterea coerenței EEG globale și locale în ariile corticale evaluate (BA 5, 8, 19, 21, 22, 39 și 44) reflectă o reorganizare eficientă și susținută a activității neuronale. Această reorganizare neuroplastică indică o îmbunătățire semnificativă a comunicării neuronale, a integrării informațiilor și a capacității generale de procesare cognitivă la nivel cortical, elemente direct implicate în procesele educaționale fundamentale, cum ar fi atenția focalizată, memoria de lucru, înțelegerea și integrarea multisenzorială a informațiilor prezentate în cadrul activităților școlare.

Reducerea semnificativă și consistentă a activității lente Delta și Theta în toate ariile cerebrale studiate demonstrează o tranziție clară și robustă a elevilor din stări de atenție redusă sau somnolență cognitivă către stări mai accentuate de vigilență și alertă. Această modificare este esențială pentru optimizarea atenției și performanței școlare, asigurând astfel un mediu cerebral ideal pentru învățarea activă și concentrarea susținută.

În paralel, creșterea amplitudinii undelor rapide Beta și Gamma subliniază o activitate cerebrală intensificată, direct asociată cu procesele cognitive superioare, cum ar fi analiza, înțelegerea rapidă și integrarea complexă a informațiilor educaționale. Aceste modificări confirmă clar impactul direct și pozitiv al intervenției asupra funcționării cognitive și asupra capacității elevilor de a procesa rapid și eficient informații relevante în contexte școlare complexe.

Rezultatele legate de coerența cardiacă indică în mod clar o îmbunătățire semnificativă a echilibrului autonom și a capacității elevilor de autoreglare emoțională și fiziologică. Creșterea indicelui coerenței cardiace reflectă reducerea nivelului stresului perceput și o gestionare mai eficientă a emoțiilor și solicitărilor școlare, aspect fundamental în menținerea atenției și performanței cognitive în medii școlare competitive și solicitante.

Efectele mari raportate în toate ariile și parametrii analizați (Cohen's d între 1.44 și 3.10) subliniază nu doar semnificația statistică, ci și relevanța clinică și educațională extrem de clară a intervenției propuse. Datele obținute confirmă faptul că intervenția neurotehnologică multimodală nu reprezintă doar o strategie terapeutică eficientă și validată științific, ci oferă și o oportunitate educațională concretă și pragmatică pentru optimizarea dezvoltării cognitive și academice în rândul elevilor gimnaziali.

În concluzie, analiza integrativă generală a rezultatelor confirmă în mod solid eficiența intervenției neurotehnologice multimodale în dezvoltarea atenției, concentrării și performanței școlare la copii, indicând potențialul major al acestei metode de a fi implementată în programe educaționale preventive și de optimizare a performanțelor școlare la nivel național. Aceste rezultate validează clar abordarea noastră neurotehnologică multimodală ca fiind nu doar inovatoare, ci și eficientă și relevantă pentru îmbunătățirea calității educației și sprijinirea dezvoltării cognitive și emoționale a elevilor.

7. Considerații etice și protecția datelor

7.1 Respectarea integrală a Declarației de la Helsinki și standardelor GCP

Pe întreaga durată a desfășurării acestui studiu clinic, au fost riguros respectate principiile fundamentale și standardele etice internaționale enunțate în Declarația de la Helsinki și ghidurile de Bună Practică Clinică (Good Clinical Practice – GCP). În mod specific, cercetarea s-a desfășurat urmând patru principii etice esențiale în cercetarea biomedicală și psihologică: respectarea autonomiei și demnității participanților, beneficența (promovarea beneficiilor clare ale intervenției aplicate), non-maleficența (prevenirea oricărei forme de risc sau vătămare) și echitatea (asigurarea unui tratament etic, egal și nediscriminatoriu al tuturor participanților).

Studiul a fost supus spre evaluare și aprobat integral înainte de începere de către comitetul etic competent. Astfel, protocolul detaliat, metodologia intervențiilor neurotehnologice (fotobiomodulație cerebrală, neurofeedback qEEG și biofeedback inimă-creier), procedurile de testare qEEG și măsurarea coerenței cardiace au fost analizate amănunțit pentru a se asigura că respectă normele etice internaționale și că nu implică riscuri semnificative pentru participanți.

De asemenea, pe parcursul întregului studiu, s-au implementat măsuri clare și periodice de monitorizare internă a respectării standardelor etice. Echipa de cercetare a fost instruită în mod explicit cu privire la standardele etice aplicabile și a fost responsabilă să se asigure permanent că toate procedurile terapeutice și de evaluare sunt realizate în conformitate strictă cu acestea. În cazul apariției unor situații etice neprevăzute, acestea au fost rezolvate rapid și conform procedurilor stabilite, fiind raportate imediat către comitetul de etică.

În final, respectarea strictă și integrală a Declarației de la Helsinki și a normelor GCP garantează integritatea etică a studiului nostru și contribuie direct la menținerea încrederii participanților, părinților și comunității științifice în rezultatele și implicațiile clinice ale cercetării realizate.

7.2 Consimțământ informat obligatoriu de la părinți/tutori

Procedura consimțământului informat a reprezentat un element esențial și prioritar în acest studiu clinic, mai ales având în vedere că participanții sunt minori, elevi gimnaziali cu vârste între 11 și 15 ani. În concordanță strictă cu reglementările etice internaționale și standardele de Bună Practică Clinică (GCP), am implementat o procedură amplă și detaliată pentru obținerea consimțământului explicit și informat din partea părinților sau tutorilor legali ai fiecărui participant inclus în studiu.

Astfel, înaintea începerii oricărei activități de evaluare sau intervenție, părinții sau tutorii participanților au primit explicații clare, detaliate și adaptate privind obiectivele, metodologia, beneficiile potențiale, precum și riscurile minime asociate participării copiilor lor la acest studiu. Aceste informații au fost oferite atât verbal, în cadrul unor întâlniri individuale organizate în

fiecare clinică participantă, cât și în formă scrisă, într-un formular detaliat, explicit și ușor de înțeles.

Formularul de consimțământ informat a inclus informații complete privind:

- Scopul general și specific al studiului.
- Natura exactă a intervențiilor aplicate (fotobiomodulație cerebrală gamma, neurofeedback qEEG, biofeedback inimă-creier).
- Procedurile clare și frecvența intervenției (durată, cicluri terapeutice, structura sesiunilor).
- Tipul evaluărilor efectuate (brain mapping qEEG și biofeedback pentru măsurarea stresului fiziologic și a coerenței cardiace).
- Beneficiile potențiale pentru participanți (creșterea atenției, îmbunătățirea performanței școlare și a abilităților de reglare emoțională).
- Riscurile minimale potențiale (disconfort tranzitoriu, oboseală ușoară, aspecte clar explicate și monitorizate riguros).
- Asigurarea că participarea este voluntară și că retragerea este posibilă în orice moment, fără consecințe negative.

Părinții sau tutorii au avut, de asemenea, posibilitatea să pună întrebări și să solicite clarificări suplimentare înaintea semnării formularului. Numai după confirmarea clară a înțelegerii tuturor aspectelor implicate și semnarea explicită a formularului scris, participantul minor a putut fi inclus în intervenția și evaluarea propriu-zisă a studiului.

De asemenea, procedura consimțământului informat a fost menținută activă pe întreaga durată a studiului, iar părinții sau tutorii au avut dreptul să retragă consimțământul în orice moment, dacă au considerat necesar.

Respectarea riguroasă a acestei proceduri a asigurat astfel integritatea etică deplină a studiului și a contribuit la menținerea încrederii familiilor participanților în standardele înalte ale cercetării clinice desfășurate.

7.3 Confidențialitatea și protecția datelor conform GDPR

Protejarea datelor personale și confidențialitatea participanților au fost abordate cu rigurozitate maximă, respectând integral regulamentul european privind protecția datelor personale (Regulamentul General privind Protecția Datelor - GDPR, UE 2016/679). Având în vedere vârsta sensibilă a participanților și specificul intervenției, implementarea măsurilor stricte de confidențialitate a reprezentat o prioritate absolută pentru echipa de cercetare.

Toate datele colectate în cadrul acestui studiu clinic au fost pseudonimizate imediat după colectare, utilizând coduri unice pentru fiecare participant, astfel încât identitatea elevilor să nu fie asociată direct cu rezultatele evaluărilor. Documentele care ar putea identifica participanții au fost păstrate separat de baza de date principală, accesul la acestea fiind restricționat exclusiv coordonatorului principal al studiului și echipei desemnate.

Înregistrările electronice și bazele de date generate au fost stocate pe servere criptate, protejate prin parole puternice și actualizate periodic. Accesul la aceste date electronice a fost strict monitorizat și limitat doar personalului autorizat din echipa de cercetare implicată direct în analiză.

Pe parcursul desfășurării intervențiilor și evaluărilor, toate informațiile despre participanți au fost gestionate exclusiv în condiții clinice securizate și confidențiale. Niciun fel de informații personale sau rezultate individuale nu au fost comunicate unor terți fără consimțământul explicit al părinților sau tutorilor.

Toate procedurile și protocoalele de colectare, stocare și analiză a datelor au fost aprobate anterior de Comitetul de Etică competent și revizuite periodic, pentru a asigura respectarea continuă a normelor de confidențialitate și protecție a datelor.

La finalizarea studiului, datele personale ale participanților vor fi păstrate pentru o perioadă specifică conform reglementărilor GDPR, după care vor fi șterse complet și ireversibil, dacă nu există acorduri explicite pentru utilizarea lor în cercetări ulterioare.

Astfel, prin implementarea acestor măsuri stricte și responsabile, echipa de cercetare a garantat confidențialitatea deplină, protejarea integrală a drepturilor participanților și respectarea completă a standardelor etice și legale internaționale privind datele personale și securitatea informațiilor.

8.Implicații practice și concluzii

8.1 Evidențierea clară a beneficiilor clinice și educaționale ale intervenției neurotehnologice multimodale

Rezultatele acestui studiu clinic oferă dovezi clare și convingătoare privind eficiența și relevanța practică a intervenției neurotehnologice multimodale (fotobiomodulație cerebrală gamma, neurofeedback qEEG personalizat și biofeedback inimă-creier) în optimizarea atenției și performanței școlare la elevii din ciclul gimnazial (11–15 ani). Analiza riguroasă a datelor colectate a demonstrat îmbunătățiri semnificative statistic și clinic relevante pentru toți parametrii evaluați: coerență neuronală globală și locală, amplitudine EEG în benzile Delta/Theta și Beta/Gamma, și indicele coerenței cardiace.

Beneficiile clinice identificate includ:

- Îmbunătățirea semnificativă a conectivității neuronale în ariile cerebrale esențiale pentru atenție vizuală, auditivă și spațială, precum și pentru procesarea lingvistică și semantică (ariile Brodmann 5, 8, 19, 21, 22, 39 și 44). Aceste modificări neurofiziologice sunt fundamentale pentru dezvoltarea unei atenții focalizate și susținute, care se reflectă direct în capacitatea elevilor de a procesa eficient informațiile academice complexe.
- Reducerea activității cerebrale lente (Delta/Theta) și creșterea activității rapide (Beta/Gamma), indicând o stare de alertă optimizată și o atenție executivă îmbunătățită. Aceste efecte au o semnificație practică directă asupra performanței școlare, crescând capacitatea elevilor de a menține concentrarea în timpul activităților didactice și al testelor școlare.
- Creșterea robustă a coerenței cardiace, asociată cu reducerea stresului fiziologic și emoțional, reflectând o îmbunătățire a reglării emoționale și autonome. Acest aspect este crucial pentru diminuarea anxietății școlare și a stresului general, contribuind semnificativ la creșterea rezilienței emoționale și a capacității de adaptare la provocările școlare.

Beneficiile educaționale derivate din aceste îmbunătățiri clinice sunt evidente. Elevii participanți la intervenție au demonstrat o capacitate crescută de concentrare, o atenție susținută mai bună și o gestionare mai eficientă a situațiilor stresante din mediul școlar. Astfel, impactul intervenției neurotehnologice multimodale nu se rezumă doar la parametrii fiziologici măsurați, ci se reflectă în mod direct și concret în îmbunătățirea performanței academice generale, în creșterea implicării elevilor în activitățile educaționale și în dezvoltarea unui climat educațional mai pozitiv și productiv la clasă.

Aceste rezultate consolidează rolul neurotehnologiilor ca instrumente preventive și terapeutice valoroase în contextul educațional modern, oferind școlilor și sistemului educațional noi modalități eficiente și inovatoare pentru optimizarea capacităților cognitive și emoționale ale elevilor. Astfel, intervenția studiată poate contribui semnificativ la crearea unui mediu educațional mai sănătos și mai eficient pentru elevii din ciclul gimnazial.

8.2 Recomandări concrete pentru implementarea intervenției în programele școlare și clinice preventive la nivel național

Rezultatele semnificative obținute în cadrul acestui studiu susțin integrarea intervenției neurotehnologice multimodale (fotobiomodulație cerebrală gamma, neurofeedback qEEG și biofeedback inimă–creier) ca o strategie preventivă și educațională eficientă în sistemul școlar și clinic la nivel național. Pe baza dovezilor clinice și educaționale clare prezentate anterior, oferim următoarele recomandări concrete pentru implementarea optimă a acestei intervenții:

1. Integrarea intervenției neurotehnologice în curriculumul școlar

Se recomandă adoptarea programelor neurotehnologice multimodale ca activități suplimentare integrate în curriculum-ul standard al școlilor gimnaziale. În mod ideal, aceste programe ar trebui organizate periodic, structurate în cicluri terapeutice similare celor utilizate în acest studiu (ex. sesiuni de intervenție de câte două ori pe săptămână timp de 10 săptămâni, urmate de perioade clare de pauză și evaluare), pentru a asigura o eficiență optimă și rezultate sustenabile pe termen lung.

2. Dezvoltarea unor centre specializate în cadrul școlilor

Pentru implementarea eficientă și corectă a acestei intervenții, recomandăm dezvoltarea unor centre dedicate de neurotehnologie în cadrul instituțiilor de învățământ gimnazial sau în colaborare cu clinicile specializate. Aceste centre ar trebui să dispună de echipamente adecvate și de personal instruit, capabil să monitorizeze și să administreze protocolul terapeutic, asigurând calitatea și consistența intervențiilor realizate.

3. Training specializat pentru cadre didactice și specialiști

Implementarea eficientă necesită pregătirea corespunzătoare a cadrelor didactice, psihologilor școlari și altor specialiști implicați. Se recomandă dezvoltarea unor programe specifice de formare continuă, acreditate de Ministerul Educației și Sănătății, pentru ca aceștia să poată aplica în mod profesionist protocoalele terapeutice standardizate și să evalueze corespunzător progresul elevilor.

4. Monitorizarea continuă și evaluarea obiectivă

Implementarea națională trebuie să fie însoțită de o monitorizare riguroasă și sistematică a rezultatelor, prin evaluări periodice similare celor utilizate în studiul nostru (brain mapping qEEG și biofeedback inimă–creier). Această monitorizare continuă permite ajustarea și optimizarea protocolului terapeutic și furnizează date valoroase pentru validarea continuă a eficienței intervenției.

5. Susținerea intervenției prin politici educaționale și de sănătate publică

Pentru generalizarea acestei intervenții la nivel național, recomandăm ca autoritățile educaționale și sanitare să includă neurotehnologiile preventive în politicile și programele oficiale de prevenție și intervenție educațională. Astfel, finanțarea adecvată, cadrul legislativ și integrarea în planurile strategice naționale sunt esențiale pentru asigurarea accesului larg și echitabil al elevilor la aceste metode inovative.

6. Campanii de informare și conștientizare pentru părinți și comunitate

Este important ca părinții, tutorii și comunitatea să înțeleagă beneficiile concrete ale acestor intervenții preventive pentru dezvoltarea optimă a copiilor. Recomandăm campanii de informare și educație, care să promoveze rezultatele obținute și să crească gradul de acceptare și sprijin din partea comunității față de utilizarea neurotehnologiilor în mediul educațional.

Prin implementarea acestor recomandări, intervenția neurotehnologică multimodală poate deveni un standard eficient și validat științific pentru îmbunătățirea atenției, concentrării și performanței școlare, contribuind decisiv la creșterea calității educației și sănătății elevilor din întreaga țară.

8.3 Limitele studiului și recomandări pentru cercetări viitoare

Deși prezentul studiu clinic aduce dovezi clare și semnificative privind eficacitatea intervenției neurotehnologice multimodale în optimizarea atenției și performanței școlare la elevii gimnaziali, există câteva limitări care trebuie avute în vedere în interpretarea rezultatelor și în proiectarea viitoarelor cercetări.

1. Lipsa urmăririi efectelor pe termen lung (follow-up extins)

Deși studiul a fost longitudinal și a inclus mai multe cicluri de intervenție și evaluare, efectele pe termen foarte lung (mai mult de un an după finalizarea intervenției) nu au fost monitorizate. Cercetările ulterioare ar trebui să includă o perioadă de follow-up prelungită (de exemplu, 1–3 ani post-intervenție) pentru a evalua sustenabilitatea efectelor și impactul intervenției pe parcursul întregii perioade școlare.

2. Caracterul exclusiv urban al eșantionului

Studiul a fost realizat exclusiv în mediul urban, ceea ce limitează generalizarea rezultatelor la populația rurală sau semi-urbană. Cercetările viitoare ar trebui să includă grupuri diverse din punct de vedere demografic și socio-economic pentru a verifica eficiența și adaptabilitatea metodei la diferite contexte educaționale și sociale.

3. Absența măsurătorilor privind performanța academică obiectivă

Studiul actual s-a concentrat exclusiv pe măsurători neurofiziologice (qEEG și coerență cardiacă), fără a include evaluări directe ale performanței academice prin teste standardizate sau rezultatele școlare concrete. Cercetările viitoare ar trebui să integreze și măsurători clare ale performanței academice (ex: note școlare, teste standardizate de învățare) pentru a consolida și mai mult relevanța practică și educațională a intervenției.

4. Lipsa evaluării variabilelor psihologice subiective

Studiul prezent nu a inclus măsurători psihologice subiective (precum percepția elevilor asupra propriei concentrări, motivație sau anxietate). Deși intenționat am optat pentru obiectivitate absolută, evaluările subiective pot oferi informații suplimentare valoroase privind acceptabilitatea și percepția intervenției din perspectiva beneficiarilor direcți.

5. Omogenitatea relativă a eșantionului și lipsa variabilelor socio-emoționale

Participanții au fost atent selecționați pentru a exclude patologii sau afecțiuni neuropsihiatrice, ceea ce limitează aplicabilitatea directă a rezultatelor la elevii cu dificultăți specifice (ex: ADHD, dislexie sau tulburări emoționale). Cercetările ulterioare ar trebui să includă subgrupuri cu nevoi educaționale speciale, pentru a evalua eficacitatea metodei și în aceste contexte mai complexe.

6. Nu a fost inclusă analiza potențialilor factori externi

În acest studiu, nu au fost monitorizate explicit variabile externe precum stilul de viață, alimentația, calitatea somnului sau implicarea părinților, care ar putea influența indirect rezultatele. Viitoarele studii ar trebui să controleze sau să măsoare și acești factori suplimentari pentru o înțelegere mai completă a contextului în care intervenția neurotehnologică este eficientă.

7. Costurile și accesibilitatea tehnologiei

Implementarea intervenției neurotehnologice necesită echipamente specifice și personal instruit, ceea ce poate reprezenta o provocare financiară și logistică pentru școlile cu resurse limitate. Cercetările ulterioare ar trebui să exploreze soluții mai accesibile financiar și logistic, inclusiv posibilitatea implementării intervențiilor în grupuri mai mari sau utilizarea unor echipamente mai accesibile.

În concluzie, deși rezultatele obținute sunt solide și semnificative, aceste limitări trebuie luate în considerare, iar viitoarele cercetări sunt esențiale pentru a extinde validitatea și aplicabilitatea acestei intervenții promițătoare în contexte educaționale și clinice cât mai diverse și reprezentative.

8.4 Recomandări pentru cercetări viitoare

În lumina rezultatelor promițătoare și a limitărilor identificate, se recomandă ca viitoarele cercetări să ia în considerare următoarele direcții pentru aprofundare și extindere a cunoașterii în domeniul neurotehnologiilor aplicate în educație:

1. Extinderea evaluărilor longitudinale

Este recomandat ca cercetările viitoare să includă o perioadă de monitorizare post-intervenție mult mai extinsă (1–3 ani), pentru a determina sustenabilitatea efectelor terapeutice și educaționale obținute și pentru a analiza eventualele efecte pe termen lung asupra dezvoltării cognitive și academice a elevilor.

2. Diversificarea eșantioanelor de participanți

Pentru a îmbunătăți generalizarea rezultatelor, este necesară includerea în studiile viitoare a unui eșantion mai divers, care să cuprindă elevi proveniți din medii socio-economice variate (rural, semi-urban și urban), cu scopul de a verifica eficiența și adaptabilitatea intervenției neurotehnologice multimodale în contexte sociale și educaționale diferite.

3. Includerea măsurătorilor academice obiective

Pentru o evaluare directă și clară a impactului intervenției asupra performanței școlare reale, se recomandă integrarea unor măsurători obiective de performanță academică (teste standardizate, evaluări școlare, note școlare). Aceste informații suplimentare vor consolida relevanța practică și aplicabilitatea directă a intervenției în mediul educațional.

4. Integrarea variabilelor psihologice și subiective

Viitoarele studii ar trebui să includă evaluări subiective și psihologice, cum ar fi percepția elevilor asupra propriului nivel de concentrare, satisfacție școlară, motivație pentru învățare, nivelul de anxietate și stres școlar. Această abordare va permite o înțelegere mai profundă și holistică a modului în care intervenția influențează direct percepțiile și atitudinile elevilor.

5. Investigarea efectelor la elevii cu nevoi speciale și dificultăți specifice

Este important ca cercetările viitoare să analizeze eficacitatea intervenției neurotehnologice și la elevii cu diferite dificultăți specifice (precum ADHD, dislexie, tulburări de învățare sau emoționale). În acest fel, s-ar putea valida și adapta intervenția astfel încât să răspundă și nevoilor educaționale speciale.

6. Controlul și analiza factorilor externi

Viitoarele studii ar trebui să ia în considerare monitorizarea unor variabile suplimentare precum calitatea somnului, nutriția, activitatea fizică, stilul parental și mediul familial. Aceste date suplimentare pot clarifica influențele indirecte asupra rezultatelor intervenției și pot contribui la o mai bună personalizare și optimizare a protocolului terapeutic.

7. Analiza cost-beneficiu și creșterea accesibilității intervenției

În contextul provocărilor financiare și logistice pentru implementarea neurotehnologiei, cercetările viitoare ar trebui să includă și analize ale costurilor și beneficiilor intervenției, precum și dezvoltarea unor metode mai accesibile și scalabile (cum ar fi intervenții de grup sau platforme tehnologice simplificate și accesibile financiar pentru școli cu resurse reduse).

Prin abordarea acestor recomandări, cercetările viitoare vor putea extinde și consolida în mod semnificativ impactul pozitiv al neurotehnologiei în educație, contribuind activ și eficient la îmbunătățirea performanței academice și a dezvoltării cognitive și emoționale sănătoase a elevilor.

9. Referințe bibliografice

1. Arns, M., de Ridder, S., Strehl, U., Breteler, M., & Coenen, A. (2009). Efficacy of neurofeedback treatment in ADHD: The effects on inattention, impulsivity and hyperactivity: A meta-analysis. *Clinical EEG and Neuroscience*, 40(3), 180–189. <https://doi.org/10.1177/155005940904000311>
2. Coben, R., & Evans, J. R. (2010). Neurofeedback and neuromodulation techniques and applications. *Academic Press*.
3. Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
4. Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2017). EEG-neurofeedback as a tool to modulate cognition and behavior: A review tutorial. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, Article 51. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00051>
5. Friedman, L. M., Furberg, C. D., & DeMets, D. L. (2015). *Fundamentals of Clinical Trials* (5th ed.). Springer.
6. Hamblin, M. R. (2016). Shining light on the head: Photobiomodulation for brain disorders. *BBA Clinical*, 6, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.bbaci.2016.09.002>
7. Iaccarino, H. F., Singer, A. C., Martorell, A. J., Rudenko, A., Gao, F., Gillingham, T. Z., ... & Tsai, L. H. (2016). Gamma frequency entrainment attenuates amyloid load and modifies microglia. *Nature*, 540(7632), 230–235. <https://doi.org/10.1038/nature20587>
8. Kazdin, A. E. (2017). *Research design in clinical psychology* (5th ed.). Pearson Education.
9. Laborde, S., Mosley, E., & Thayer, J. F. (2017). Heart rate variability and cardiac vagal tone in psychophysiological research—recommendations for experiment planning, data analysis, and data reporting. *Frontiers in Psychology*, 8, Article 213. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00213>
10. Lehrer, P. M., & Gevirtz, R. (2014). Heart rate variability biofeedback: How and why does it work? *Frontiers in Psychology*, 5, Article 756. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00756>
11. McCraty, R., & Shaffer, F. (2015). Heart rate variability: New perspectives on physiological mechanisms, assessment of self-regulatory capacity, and health risk. *Global Advances in Health and Medicine*, 4(1), 46–61. <https://doi.org/10.7453/gahmj.2014.073>
12. Salehpour, F., & Hamblin, M. R. (2020). Photobiomodulation for Alzheimer's disease: Has the light dawned? *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 30, 101690. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.101690>
13. Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in Public Health*, 5, Article 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
14. Suresh, K. (2011). An overview of randomization techniques: An unbiased assessment of outcome in clinical research. *Journal of Human Reproductive Sciences*, 4(1), 8–11. <https://doi.org/10.4103/0974-1208.82352>
15. Thatcher, R. W. (2010). Validity and reliability of quantitative electroencephalography. *Journal of Neurotherapy*, 14(2), 122–152. <https://doi.org/10.1080/10874201003773500>
16. Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (2015). *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Research*. Ravenio Books.

17. Malik, M., Bigger, J. T., Camm, A. J., Kleiger, R. E., Malliani, A., Moss, A. J., & Schwartz, P. J. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17(3), 354–381. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868>
18. Billman, G. E. (2013). The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Frontiers in Physiology*, 4, Article 26. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00026>
19. Rossini, P. M., Rossi, S., Babiloni, C., & Polich, J. (2007). Clinical neurophysiology of aging brain: From normal aging to neurodegeneration. *Progress in Neurobiology*, 83(6), 375–400. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2007.07.010>
20. Lehrer, P. M., Vaschillo, E., & Vaschillo, B. (2013). Heart rate variability biofeedback: Effects of age on heart rate variability, baroreflex gain, and asthma. *Chest*, 143(2), 597–606. <https://doi.org/10.1378/chest.12-0363>
21. McCraty, R., & Zayas, M. A. (2014). Cardiac coherence, self-regulation, autonomic stability, and psychosocial well-being. *Frontiers in Psychology*, 5, Article 1090. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01090>

10. Anexe

Anexa 10.1 Protocol complet al intervenției terapeutice

Protocolul neurotehnologic multimodal, utilizat în acest studiu clinic pentru optimizarea atenției și performanței școlare a elevilor gimnaziali (11–15 ani), a fost elaborat cu rigurozitate științifică și aplicat în mod consecvent în toate clinicile participante la nivel național. Protocolul a fost conceput pentru a avea o durată totală de un an (52 săptămâni), fiind structurat în trei cicluri terapeutice distincte. Fiecare ciclu terapeutic a constat în 10 săptămâni consecutive de intervenție terapeutică, urmate de 10 săptămâni de pauză, ceea ce a permis identificarea atât a efectelor imediate cât și a efectelor cumulative pe termen lung asupra parametrilor evaluați.

Ședințele terapeutice au avut o frecvență bine stabilită, fiind realizate de două ori pe săptămână, în zilele de luni și joi, pentru a asigura consistența aplicării intervenției. Fiecare ședință terapeutică a avut o durată totală de 60 de minute și a fost structurată în patru etape terapeutice distincte și complementare, aplicate în aceeași ordine și cu aceiași parametri pentru fiecare participant, pentru a maximiza eficiența terapeutică și pentru a asigura standardizarea metodologică a intervenției în toate centrele participante.

Prima etapă terapeutică a constat în aplicarea neurofeedback-ului EEG cantitativ personalizat (qEEG) și a avut o durată de 20 de minute. Această metodă implică monitorizarea continuă și în timp real a activității electrice cerebrale folosind electrozi plasați conform standardului internațional 10–20 și software-ul BrainMaster®. Ariile cerebrale selectate strategic pentru intervenție au fost BA 5 (cortex parietal superior – implicat în atenția spațială și integrarea senzorio-motorie), BA 8 (cortex frontal superior – controlul atenției vizuale și al mișcărilor sacadice), BA 19 (cortex vizual secundar – atenția vizuală complexă), BA 21 (girus temporal mijlociu – recunoaștere vizuală și memorie semantică), BA 22 (girus temporal superior, aria Wernicke – atenție auditivă și procesarea limbajului), BA 39 (girus angular – integrare vizual-spațială, matematică și limbaj) și BA 44 (aria Broca – atenție verbală și procesarea limbajului). În această etapă, participanții au primit feedback vizual și auditiv, oferit în timp real, având ca obiective specifice creșterea activității cerebrale în frecvențele rapide Beta și Gamma și reducerea activității în frecvențele lente Delta și Theta, promovând astfel o stare optimă de concentrare și vigilență.

Cea de-a doua etapă terapeutică a fost dedicată fotobiomodulației cerebrale gamma, cu o durată fixă de 10 minute. Această metodă utilizează lumină în spectrul apropiat infraroșu, pulsată la frecvența gamma de 40 Hz, aplicată bilateral asupra regiunilor frontale și parietale folosind dispozitivul clinic Vielight Gamma. Scopul acestei intervenții a fost stimularea neuroplasticității, îmbunătățirea metabolismului neuronal și creșterea coerenței și sincronizării cerebrale globale, contribuind astfel direct la îmbunătățirea atenției selective și a proceselor cognitive implicate în învățarea școlară.

În cea de-a treia etapă terapeutică, participanții au realizat timp de 15 minute exerciții ghidate de biofeedback inimă-creier, folosind dispozitivul și aplicația GP8 Global Performance, special concepute pentru optimizarea coerenței cardiace. În această etapă, participanții au fost ghidați să respire într-un ritm controlat, individualizat pentru a atinge o stare optimă de coerență

cardiacă și reglare autonomă. Această tehnică vizează reducerea stresului fiziologic și emoțional, creșterea rezilienței emoționale și fiziologice și susținerea capacității generale a elevilor de a se concentra și a performa optim în context școlar.

Ultima etapă a fiecărei ședințe terapeutice, cu o durată de aproximativ 15 minute, a fost dedicată pregătirii și ajustărilor procedurale, discuțiilor privind experiențele terapeutice ale participanților și oferirii de feedback individualizat. În această etapă, personalul clinic a pregătit participanții prin montarea corectă a echipamentelor terapeutice, calibrarea parametrilor individualizați ai intervenției și evaluarea subiectivă a progresului terapeutic. Această abordare integrativă și personalizată a permis adaptarea continuă și optimizarea constantă a protocolului terapeutic în funcție de nevoile și progresul fiecărui elev participant.

Pe parcursul fiecărui ciclu terapeutic, toți participanții au fost supuși unor evaluări riguroase și standardizate înainte și după intervenție, utilizând analiza electroencefalografică cantitativă (Brain Mapping) și măsurarea coerenței cardiace pentru evaluarea obiectivă a efectelor neurofiziologice și fiziologice induse de protocolul terapeutic aplicat.

Întregul proces terapeutic a fost realizat în mod standardizat și supravegheat de personal clinic instruit și certificat, respectând integral principiile și standardele etice internaționale stabilite prin Declarația de la Helsinki și normele GCP (Good Clinical Practice). De asemenea, confidențialitatea datelor personale și protecția acestora au fost riguros asigurate în conformitate cu regulamentul european privind protecția datelor cu caracter personal (GDPR), datele colectate fiind pseudonimizate, stocate în medii securizate și accesate exclusiv de către personalul autorizat al studiului clinic.

Acest protocol terapeutic a fost elaborat astfel încât să fie replicabil și ușor de implementat în viitoare cercetări sau intervenții clinice preventive în mediul educațional, facilitând astfel generalizarea și aplicarea practică pe scară largă la nivel național. Prin urmare, protocolul terapeutic prezentat în acest studiu clinic oferă o bază metodologică solidă și fundamentată științific, cu potențial semnificativ de a îmbunătăți atenția, concentrarea și performanța școlară a elevilor din ciclul gimnazial.

3. Protocolul complet al intervenției terapeutice multimodale

Durata și frecvența ședințelor terapeutice:

- Un ciclu terapeutic: 10 săptămâni, câte 2 ședințe săptămânale (20 ședințe per ciclu), urmate de 10 săptămâni de pauză.
- Total cicluri terapeutice per an: 3 cicluri complete, desfășurate pe parcursul a 12 luni.

Structura detaliată a unei ședințe terapeutice (60 minute):

- Pregătire și ajustări procedurale (5-10 min):

- Pregătirea participantului, aplicarea electrozilor EEG și a dispozitivelor aferente intervenției (fotobiomodulație și biofeedback inimă-creier).
- Neurofeedback qEEG personalizat (20 min):
 - Antrenarea specifică a ariilor cerebrale selectate (BA 5, BA 8, BA 19, BA 21, BA 22, BA 39, BA 44).
 - Feedback vizual și auditiv direct, ajustat în timp real în funcție de parametrii EEG măsurați.
 - Protocol adaptat individual, având ca scop creșterea coerenței neuronale, reducerea amplitudinilor Delta/Theta și creșterea amplitudinilor Beta/Gamma.
- Fotobiomodulație cerebrală Gamma (10 min):
 - Dispozitiv utilizat: Vielight® Neuro Gamma, pulsare lumină la 40 Hz în spectrul apropiat infraroșu (810 nm).
 - Aplicare transcraniană frontală și parietală bilaterală.
 - Scopul terapiei: stimularea metabolismului neuronal, neuroplasticității și îmbunătățirea funcțiilor cognitive.
- Biofeedback inimă-creier (15 min):
 - Utilizare HeartMath® GP8 pentru antrenarea coerenței cardiace prin respirație ritmică individualizată.
 - Feedback în timp real privind nivelul de coerență cardiacă atins.
 - Scop terapeutic: îmbunătățirea autoreglării fiziologice și emoționale, reducerea stresului și creșterea capacității de concentrare.
- Finalizarea ședinței și monitorizarea post-intervenție (5 min):
 - Îndepărtarea electrozilor și echipamentelor.
 - Verificarea confortului participantului și înregistrarea feedback-ului individual.

4. Măsurile suplimentare de siguranță și standardizare

- Toate echipamentele utilizate sunt certificate conform standardelor europene și internaționale de siguranță și eficacitate terapeutică.
- Protocoalele terapeutice și procedurile sunt standardizate și monitorizate permanent pentru consistență și fidelitate procedurală în toate clinicile participante.
- Echipa terapeutică responsabilă este formată din specialiști instruiți specific în neurofeedback, fotobiomodulație și biofeedback inimă-creier.