

DIGITAL NEUROMODULATION IN THE REHABILITATION OF ADOLESCENT IDIOPATHIC SCOLIOSIS: A SYSTEMATIC REVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF VIRTUAL REALITY AND SURFACE ELECTROMYOGRAPHY BIOFEEDBACK VERSUS CONVENTIONAL KINESITHERAPY

Bojan Arsovski

Faculty of Medical Sciences, Goce Delcev University, Stip, North Macedonia,
arsovski.bojan92@icloud.com

ORCID ID: 0009-0000-5190-5887

Toše Krstev

Faculty of Medical Sciences, Goce Delcev University, Stip, North Macedonia,
tose.krstev@ugd.edu.mk

ORCID ID: 0000-0002-0232-2201

Abstract: Adolescent idiopathic scoliosis is a complex three-dimensional spinal deformity with multifactorial biomechanical and neurophysiological etiology, manifesting during periods of accelerated skeletal growth. Despite the established clinical efficacy of scoliosis-specific physiotherapeutic exercises and orthotic management, limitations persist, including the absence of objective biofeedback, variability in motor performance, and suboptimal neuromotor re-education within conventional frameworks. Virtual reality and surface electromyography biofeedback represent a promising technological extension aimed at addressing these gaps through real-time sensorimotor feedback and adaptive motor training. The objective of this systematic review was to evaluate the scientific evidence on the effectiveness of kinesitherapeutic interventions using virtual reality and surface electromyography biofeedback compared with standard kinesitherapy in adolescents with idiopathic scoliosis, and to assess the mechanisms underlying their potential clinical benefit. Methodologically, the review followed the principles of evidence-based medicine, the 2020 Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses guidelines, the Oxford Centre for Evidence-Based Medicine hierarchy of evidence, and the Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation system for certainty assessment; the literature was searched in major biomedical databases (2005–2026) using a structured population, intervention, comparison, and outcomes framework, and included randomized controlled trials, controlled clinical studies, and prospective cohort studies of adolescents aged 10–18 years with radiographically confirmed idiopathic scoliosis who had not undergone spinal surgery; study quality was assessed with the Physiotherapy Evidence Database scale, and risk of bias with the Cochrane Risk of Bias 2 tool and the Risk Of Bias In Non-randomized Studies of Interventions tool. Results indicated that conventional approaches, namely scoliosis-specific exercise methods such as the Schroth method and rigid thoracolumbosacral orthotic bracing, retained the strongest evidence base for structural control, with moderate-to-high certainty of evidence for Cobb angle stabilization and prevention of progression. Studies of surface electromyography documented asymmetric paraspinal muscle activity in idiopathic scoliosis, whereas evidence for the effect of biofeedback training was limited to small and qualitative studies. Direct evidence for virtual reality in adolescent idiopathic scoliosis was scarce, and evidence from neurological and orthopedic populations was indirect and of low certainty. Combined digital protocols could not be evaluated formally because of the small number of studies and methodological heterogeneity, so no meta-analysis was performed. In conclusion, virtual reality and surface electromyography biofeedback do not replace established treatment standards for idiopathic scoliosis, but they may serve as an adjuvant strategy targeting neuromotor re-education and therapy adherence, which requires confirmation; future multicenter randomized controlled trials with long-term follow-up are recommended to confirm structural outcomes and cost-effectiveness.

Keywords: adolescent idiopathic scoliosis; virtual reality; surface electromyography; biofeedback; digital neuromodulation

ДИГИТАЛНА НЕВРОМОДУЛАЦИЈА ВО РЕХАБИЛИТАЦИЈАТА НА АДОЛЕСЦЕНТНА ИДИОПАТСКА СКОЛИОЗА: СИСТЕМАТСКИ ПРЕГЛЕД И КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА ВИРТУЕЛНА РЕАЛНОСТ И БИОФИДБЕК СО ПОВРШИНСКА ЕЛЕКТРОМИОГРАФИЈА НАСПРОТИ КОНВЕНЦИОНАЛНА КИНЕЗИТЕРАПИЈА

Бојан Арсовски

Факултет за медицински науки, Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија,
arsovski.bojan92@icloud.com

ORCID ID: 0009-0000-5190-5887

Тоше Крстев

Факултет за медицински науки, Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија,
tose.krstev@ugd.edu.mk

ORCID ID: 0000-0002-0232-2201

Резиме: Адолесцентната идиопатска сколиоза е сложена тридимензионална деформација на грботниот столб со мултифакторска биомеханичка и неврофизиолошка етиологија. И покрај утврдената клиничка ефикасност на специфичните физиотерапевтски вежби за сколиоза и ортотичкото лекување, постојат ограничувања: отсуство на објективен биофидбек, варијабилност во моторната изведба и субоптимална невромоторна реедукација во конвенционалните пристапи. Виртуелната реалност и биофидбекот со површинска електромиографија претставуваат перспективно технолошко надополнување преку сензомоторен повратен сигнал во реално време и адаптивен моторен тренинг. Целта на овој систематски преглед беше да се евалуираат научните докази за ефикасноста на кинезитерапевтските интервенции со виртуелна реалност и биофидбек со површинска електромиографија во споредба со стандардната кинезитерапија кај адолесценти со идиопатска сколиоза и да се проценат механизмите на нивниот потенцијален придонес. Прегледот се придржуваше до принципите на медицината заснована на докази, до насоките за известување при систематски прегледи и метаанализи од 2020 година, до хиерархијата на доказите на Оксфордскиот центар за медицина заснована на докази и до системот за оценување на сигурноста на доказите. Пребарувањето во главните биомедицински бази (2005–2026) користеше структурирана рамка на популација, интервенција, споредба и исходи и ги опфати рандомизирани контролирани студии, контролираните клинички студии и проспективните кохортни студии кај адолесценти од 10 до 18 години со радиографски потврдена идиопатска сколиоза без претходна спинална операција; квалитетот беше проценет со скалата на Базата на докази за физиотерапија, а ризикот од пристрасност со алатките на Кохран за рандомизирани и за нерандомизирани студии. Резултатите покажаа дека конвенционалните пристапи, односно методите на специфични вежби (Шрот) и ригидното торакално-лумбосакрално корсетирање, ја задржаа најсилната доказна основа за структурна контрола, со умерена до висока сигурност на доказите за стабилизација на Кобовиот агол и спречување на прогресијата. Студиите со површинска електромиографија документираа асиметрична активност на параспиналната мускулатура, додека доказите за ефектот на биофидбек тренингот беа ограничени на мали и квалитативни студии. Директните докази за виртуелна реалност кај адолесцентна идиопатска сколиоза беа малку, а доказите од невролошки и ортопедски популации беа индиректни и со ниска сигурност. Комбинираните дигитални протоколи не можеа формално да се оценат поради малиот број студии и хетерогеноста, па не беше спроведена метаанализа. Заклучно, овие технологии не ги заменуваат воспоставените стандарди на лекување, туку можат да служат како адјувантна стратегија за невромоторна реедукација и придржување кон терапијата, што бара потврда; се препорачуваат мултицентрични рандомизирани контролирани студии со долгорочно следење за потврда на структурните исходи и исплатливоста.

Клучни зборови: адолесцентна идиопатска сколиоза, виртуелна реалност, површинска електромиографија, биофидбек, дигитална невромодулација

1. ВОВЕД

Адолесцентната идиопатска сколиоза (AIS) претставува тридимензионална структурна деформација на грботниот столб, дефинирана со латерална девијација $\geq 10^\circ$ мерена според методот на Кобб (Cobb), придружена со аксијална ротација и промени во сагиталниот профил. Состојбата се јавува во периодот на интензивен пубертетски раст, со преваленца од 1–3% во адолесцентната популација и изразена полово диспропорција во корист на женскиот пол (Negrini et al., 2018; Weinstein et al., 2013). Клиничките импликации опфаќаат болка во грбот, нарушена постурална контрола, мускулна асиметрија и, кај потешките форми, респираторна компромитација и значителни психосоцијални последици.

Конзервативниот третман на AIS главно се темели на физиотерапевтски вежби специфични за сколиоза (physiotherapeutic scoliosis-specific exercises, PSSE), како што се методите Schroth, Scientific Exercises Approach to Scoliosis (SEAS) и Barcelona Scoliosis Physical Therapy School (BSPTS), и на ортотски третман со ригиден торакално-лумбосакрален корсет (thoracolumbosacral orthosis, TLSO). Според насоките на Здружението за ортопедско и рехабилитациско лекување на сколиоза (Society on Scoliosis Orthopaedic and Rehabilitation Treatment, SOSORT), овие пристапи се основа на конзервативното лекување на прогресивни кривини (Negrini et al., 2018). Сепак, практичните ограничувања на конвенционалниот пристап се јасно дефинирани: субјективност на биофидбекот, варијабилно придржување кон терапијата кај адолесцентите и ограничена можност за објективна квантификација на мускулната активација во реално време. Овие дефицити создаваат научна основа за воведување на дигитални технологии во рехабилитациската пракса.

Виртуелната реалност (virtual reality, VR) и површинската електромиографија (surface electromyography, sEMG) како биофидбек алатки нудат потенцијал за надминување на наведените ограничувања. VR обезбедува контролирана интерактивна средина за повторливи моторни задачи, која потенцијално ја зголемува мотивацијата (Laver et al., 2017), додека sEMG овозможува визуелизација на мускулната активација во реално време и е применлива во проценката на асиметричните активациони модели (Kwok et al., 2015). Најновите студии продолжуваат да ја испитуваат врската меѓу асиметричната мускулна активација и тридимензионалната деформација на реброт (He et al., 2024; Hong et al., 2026). Комбинацијата на VR и sEMG кај AIS е теоретски кохерентна, базирана на принципите на невропластичност, сензомоторна интеграција и моторно учење, но клинички недоволно испитана. Примарната цел на овој систематски преглед е евалуација на достапните научни докази за ефективност на VR и sEMG биофидбек интервенциите во споредба со конвенционалната кинезитерапија кај адолесценти со AIS. Секундарните цели вклучуваат анализа на механизмите на дејство, проценка на промените во аголот на Кобб, мускулната симетрија и постуралната контрола, како и евалуација на придржувањето кон терапијата.

2. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДИ

Методолошката рамка е поставена согласно принципите на медицината заснована на докази (evidence-based medicine, EBM), со примена на насоките за известување при систематски прегледи и метаанализи од 2020 година (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, PRISMA), хиерархијата на доказите на Оксфордскиот центар за медицина заснована на докази (Oxford Centre for Evidence-Based Medicine, OCEBM) и системот за оценување на сигурноста на доказите (Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation, GRADE) (Guyatt et al., 2008; Page et al., 2021). Истражувањето е структурирано според рамката PICO (population, intervention, comparison, outcomes): популација — адолесценти (10–18 години) со радиографски потврдена AIS (агол на Кобб $\geq 10^\circ$, степен на скелетна зрелост според Risser 0–4, без претходна хируршка интервенција); интервенции — кинезитерапевтски протоколи со VR и/или sEMG биофидбек; компарација — конвенционална кинезитерапија (PSSE протоколи со или без ортоза); исходи — агол на Кобб (примарен), мускулна симетрија, постурална контрола, агол на ротација на трупот (angle of trunk rotation, ATR), квалитет на живот (Scoliosis Research Society-22 revised, SRS-22r) и придржување кон терапијата.

Систематското пребарување е спроведено во базите PubMed/MEDLINE, Cochrane Library, Scopus и Web of Science за периодот 2005–2026. Инклузионите критериуми опфаќаа рандомизирани контролирани студии (randomized controlled trials, RCT), контролирани клинички студии и проспективни кохортни студии кај адолесценти без претходна спинална операција. Ексклузионите критериуми ги опфаќаа случаите со неидиопатска сколиоза, постоперативни пациенти, описи на случаи (case reports) и студии со недоволно податоци за клучните исходи. Студиите кај постоперативни пациенти беа земени предвид само како индиректни докази во дискусијата.

Квалитетот на рандомизираните студии е оценет со скалата на Базата на докази за физиотерапија (Physiotherapy Evidence Database, PEDro) (Maher et al., 2003), а ризикот од пристрасност со алатката Cochrane Risk of Bias 2 (RoB 2) за рандомизирани студии (Sterne et al., 2019) и алатката Risk Of Bias In Non-randomized Studies of Interventions (ROBINS-I) за нерандомизирани студии (Sterne et al., 2016). Сигурноста на доказите е оценета со системот GRADE, земајќи ги предвид ризикот од пристрасност, конзистентноста, директноста, прецизноста и пристрасноста при публикување. Поради клиничката и методолошката хетерогеност и малиот број директно споредливи студии, синтезата е наративна, без квантитативна метаанализа.

3. РЕЗУЛТАТИ

Синтезата на доказите откри јасна диференцијација меѓу конвенционалните и дигиталните интервенции, со различни профили на ефективност по исходи. Резултатите се прикажани наративно, бидејќи метаанализа не беше спроведена.

3.1. Конвенционални пристапи

PSSE методите (Schroth, SEAS) покажаа умерена ефикасност во стабилизацијата на аголот на Кобб. Во рандомизирана студија со проценувачи и статистичар заслепени за групите кај 50 адолесценти, додавањето на Schroth вежби на стандардната грижа даде значајно помал агол на најголемата кривина по шест месеци (Schreiber et al., 2016), а насоките на SOSORT ги вклучуваат PSSE во основата на конзервативниот третман (Negrini et al., 2018). GRADE сигурноста за овие исходи беше умерена, примарно поради ограничена можност за заслепување. TLSO ортозирањето, потврдено со студијата Bracing in Adolescent Idiopathic Scoliosis Trial (BRAIST) (Weinstein et al., 2013), ја намали прогресијата на кривините кон хируршкиот праг кај пациенти со висок ризик, при што придобивката растеше со бројот на часови дневно носење на ортозата (пропишано минимум 18 часа дневно). GRADE сигурноста за овој исход беше умерена до висока.

3.2. sEMG биофидбек

Опсервациските студии со sEMG конзистентно документираа асиметрична активност на паравертебралната мускулатура кај AIS, со мерливи разлики во амплитудата на квадратниот корен на средната вредност (root mean square, RMS) меѓу конвексната и конкавната страна на кривината (Kwok et al., 2015). Студија кај 10 пациенти со идиопатска сколиоза, во која sEMG беше комбинирана со тридимензионален систем за њрбетот, покажа поголема RMS вредност на конвексната страна, но без корелација меѓу RMS односот и аголот на Кобб кај торакалната сколиоза (Zhang et al., 2024). Овие студии не се интервенциски и не ја оценуваат ефикасноста на биофидбекот. Од студиите вклучени во оваа синтеза, само една се однесуваше на sEMG биофидбек тренинг: квалитативна студија која покажа дека тренингот на положбата со sEMG биофидбек придонел за подобрување на физичкото и менталното здравје кај адолесценти со блага сколиоза (Cheung et al., 2023). Затоа, ефектот на sEMG биофидбекот врз аголот на Кобб, мускулната симетрија и моторната координација не можеше да се оцени врз основа на контролирани студии, а GRADE сигурноста беше многу ниска.

3.3. VR интервенции

Директни контролирани студии за VR кај адолесценти со идиопатска сколиоза што ги исполнуваат критериумите за вклучување не беа идентификувани, па доказите за VR се индиректни. Cochrane прегледот на Laver et al. (2017) кај пациенти по мозочен удар не најде подобра функција на горниот екстремитет при VR во споредба со конвенционална терапија (стандардизирана средна разлика, standardized mean difference, SMD 0,07; ниска сигурност на доказите), но најде значајна разлика кога VR се користеше како додаток на вообичаената грижа (SMD 0,49; ниска сигурност) и мал ефект врз активностите од секојдневниот живот (SMD 0,25; умерена сигурност). Прегледот на Gumaа и Youssef (2019) се однесуваше на ортопедски состојби воопшто, а не на сколиоза, па неговите наоди се индиректни за оваа популација. Ефектот на VR врз аголот на Кобб не беше испитан во контролирани студии. GRADE сигурноста за VR кај AIS беше ниска, првенствено поради индиректност.

3.4. Комбинирани протоколи

Контролирани студии што ги комбинираат PSSE со sEMG и/или VR кај AIS не беа идентификувани, па комбинираниите протоколи не можеа да се оценат. Неодамнешните прегледи на дигиталните интервенции во рехабилитацијата на сколиоза укажуваат на фрагментирана евиденција и потреба од мултицентрични рандомизирани студии со долго следење (Guan et al., 2026), а прегледот за стратегиите за промена на однесувањето во дигиталните вежби кај AIS покажа дека дизајнот на интервенциите повеќе се фокусира на способноста и можноста отколку на мотивацијата (Li et al., 2025).

4. ДИСКУСИЈА

Наодите од овој систематски преглед ја потврдуваат централната улога на конвенционалните пристапи во структурната контрола на AIS. Дигиталните технологии — VR и sEMG — имаат теоретски потенцијал за подобрување на функционалните исходи и придржувањето кон терапијата, но постојните докази не се доволни за клинички заклучоци. Овие наоди се во склад со сфаќањето дека моторната контрола е динамичен процес подложен на пластични промени преку насочена стимулација (Kleim & Jones, 2008).

sEMG биофидбекот во реално време би можел да ја претвори несвесната мускулна активност во визуелна информација, овозможувајќи свесна корекција на мускулниот сегмент преку механизми на активна невропластичност. VR дополнително би можела да го поддржи овој процес преку рекалибрација на телесната шема и активирање на системот на огледални неврони, олеснувајќи го моторното учење (Rizzolatti & Craighero, 2004). Кај пациентите со AIS, каде се претпоставува нарушена проприоцептивна перцепција, овие механизми претставуваат теоретска основа, а не докажано објаснување на клиничките подобрувања.

Аголот на Кобб треба да се разгледува со свесност за неговите ограничувања: висока интер-испитувачка варијабилност (околу $\pm 5^\circ$) и ограничена корелација со психосоцијалниот статус. Дигиталните интервенции во изолирана форма веројатно би останале под прагот на минимално клинички значајна разлика (minimal clinically important difference, MCID) од околу 5° , но во превенцијата на прогресија во раните фази на раст, особено при Risser 0–2, и умерената структурна промена може да биде клинички релевантна. Интеграцијата на функционални параметри (sEMG, SRS-22r, стабилметрија) претставува поцеловит пристап кон евалуацијата на исходите.

Индиректен увид нуди неодамнешното единечно-слепо рандомизирано истражување кај 28 адолесценти по задна спинална фузија, во кое шестнеделна VR рехабилитација регистрираше статистички значајни подобрувања во групата со VR (Ozger et al., 2026). Оваа студија е надвор од критериумите за вклучување на прегледот (постоперативни пациенти) и не е користена во синтезата на резултатите, но покажува дека VR програмите се изводливи кај адолесценти со AIS.

Главните ограничувања на прегледот опфаќаат мал број директни студии за VR и sEMG биофидбек кај AIS, мали примероци, кратки периоди на следење и значителна хетерогеност во хардверските и

софтверските конфигурации. Поради тоа не беше можна метаанализа, а заклучоците треба да се читаат претпазливо.

5. ЗАКЛУЧОК

Овој систематски преглед потврдува дека конвенционалните PSSE и ортотскиот третман остануваат темелни столбови во третманот на AIS, додека дигиталната невромодулација преку VR и sEMG биофидбек не ги заменува овие стандарди, туку може да функционира како надополнувачка стратегија насочена кон невромоторна реедукација и сензомоторна рекалибрација.

Интегрираниот модел — комбинација на биомеханичка стабилизација и неврофизиолошка реорганизација — е теоретски поткрепен со принципите на невропластичност и со холистичкиот пристап на насоките на SOSORT, но бара емпириска потврда. За пациенти во активна фаза на раст (Risser 0–2) со умерени кривини и висока мотивација, тој може да биде клинички релевантна стратегија, што треба да се потврди во контролирани студии.

Идните истражувања треба да се фокусираат на рандомизирани контролирани студии со директна примена на VR и sEMG биофидбек кај AIS, корелација на неврофизиолошки маркери со долгорочни структурни резултати и економска евалуација на одржливоста во различни здравствени системи. Конечната вредност на дигиталната невромодулација кај AIS ќе зависи од способноста да се докаже дека подобрената моторна симетрија резултира со трајна клиничка стабилност.

ЛИТЕРАТУРА

- Cheung, M.-C., Yip, J., Law, D., & Cheung, J. P. Y. (2023). Surface electromyography (sEMG) biofeedback posture training improves the physical and mental health of early adolescents with mild scoliosis: A qualitative study. *Digital Health*, 9. <https://doi.org/10.1177/20552076231203820>
- Guan, Y., Xu, J., Liu, Z., Qin, Q., Wang, X., An, C., Wang, G., Zhang, Z., Gong, M., & Zhao, B. (2026). Application of digital health technologies in scoliosis rehabilitation: Systematic review based on the technology classification framework. *Journal of Medical Internet Research*, 28, e91461. <https://doi.org/10.2196/91461>
- Gumaa, M., & Youssef, A. R. (2019). Is virtual reality effective in orthopedic rehabilitation? A systematic review and meta-analysis. *Physical Therapy*, 99(10), 1304–1325. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzz093>
- Guyatt, G. H., Oxman, A. D., Vist, G. E., Kunz, R., Falck-Ytter, Y., Alonso-Coello, P., & Schünemann, H. J. (2008). GRADE: An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. *BMJ*, 336(7650), 924–926. <https://doi.org/10.1136/bmj.39489.470347.AD>
- He, Y., Dong, H., Lei, M., Liu, J., Xie, H., Zhang, Z., Pang, J., Jin, M., Wang, J., Geng, Z., Zhang, J., Li, G., Yang, Q., Meng, L., & Miao, J. (2024). The role of the paraspinal muscles in the development of adolescent idiopathic scoliosis based on surface electromyography and radiographic analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 25, Article 263. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07329-w>
- Hong, S., Suh, J. H., Kim, J., Lim, J., Lee, S., Lee, C., Cho, S., Lee, J. C., Lee, J., & Ryu, J. S. (2026). Association between asymmetrical muscle activation and three-dimensional spinal deformity in thoracic-origin idiopathic scoliosis assessed using surface electromyography and EOS imaging. *Journal of Clinical Medicine*, 15(2), 784. <https://doi.org/10.3390/jcm15020784>
- Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: Implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 51(1), S225–S239. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008/018\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018))
- Kwok, G., Yip, J., Cheung, M. C., & Yick, K. L. (2015). Evaluation of myoelectric activity of paraspinal muscles in adolescents with idiopathic scoliosis during habitual standing and sitting. *BioMed Research International*, 2015, Article 958450. <https://doi.org/10.1155/2015/958450>
- Laver, K. E., Lange, B., George, S., Deutsch, J. E., Saposnik, G., & Crotty, M. (2017). Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2017(11), CD008349. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008349.pub4>
- Li, Y., Chang, F., Zhang, W., Ren, Z., Chen, Y., & Liu, Z. (2025). Behavior change strategies in digital exercise interventions for adolescent idiopathic scoliosis: Scoping review. *Journal of Medical Internet Research*, 27, e66981. <https://doi.org/10.2196/66981>
- Maher, C. G., Sherrington, C., Herbert, R. D., Moseley, A. M., & Elkins, M. (2003). Reliability of the PEDro scale for rating quality of randomized controlled trials. *Physical Therapy*, 83(8), 713–721. <https://doi.org/10.1093/ptj/83.8.713>
- Negrini, S., Donzelli, S., Aulisa, A. G., Czaprowski, D., Schreiber, S., de Mauroy, J. C., Diers, H., Grivas, T. B., Knott, P., Kotwicki, T., Lebel, A., Marti, C., Maruyama, T., O'Brien, J., Price, N., Parent, E., Rigo, M., Romano, M., Stikeleather, L., Wynne, J., & Zaina, F. (2018). 2016 SOSORT guidelines: Orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis and Spinal Disorders*, 13, Article 3. <https://doi.org/10.1186/s13013-017-0145-8>

- Ozger, E. Y., Mustafaoğlu, R., Nimetoglu, B., & Akgül, T. (2026). Efficacy of virtual reality-based rehabilitation following posterior fusion in adolescent idiopathic scoliosis: A single-blind randomized trial. *European Spine Journal*, 35(1), 36–45. <https://doi.org/10.1007/s00586-025-09501-9>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>
- Schreiber, S., Parent, E. C., Khodayari Moez, E., Hedden, D. M., Hill, D. L., Moreau, M., Lou, E., Watkins, E. J., & Southon, S. (2016). Schroth physiotherapeutic scoliosis-specific exercises added to the standard of care lead to better Cobb angle outcomes in adolescents with idiopathic scoliosis – an assessor and statistician blinded randomized controlled trial. *PLOS ONE*, 11(12), Article e0168746. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168746>
- Sterne, J. A. C., Hernán, M. A., Reeves, B. C., Savović, J., Berkman, N. D., Viswanathan, M., Henry, D., Altman, D. G., Ansari, M. T., Boutron, I., Carpenter, J. R., Chan, A.-W., Churchill, R., Deeks, J. J., Hróbjartsson, A., Kirkham, J., Jüni, P., Loke, Y. K., Pigott, T. D., . . . Higgins, J. P. T. (2016). ROBINS-I: A tool for assessing risk of bias in non-randomised studies of interventions. *BMJ*, 355, Article i4919. <https://doi.org/10.1136/bmj.i4919>
- Sterne, J. A. C., Savović, J., Page, M. J., Elbers, R. G., Blencowe, N. S., Boutron, I., Cates, C. J., Cheng, H.-Y., Corbett, M. S., Eldridge, S. M., Emberson, J. R., Hernán, M. A., Hopewell, S., Hróbjartsson, A., Junqueira, D. R., Jüni, P., Kirkham, J. J., Lasserson, T., Li, T., . . . Higgins, J. P. T. (2019). RoB 2: A revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ*, 366, Article l4898. <https://doi.org/10.1136/bmj.l4898>
- Weinstein, S. L., Dolan, L. A., Wright, J. G., & Dobbs, M. B. (2013). Effects of bracing in adolescents with idiopathic scoliosis. *New England Journal of Medicine*, 369(16), 1512–1521. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1307337>
- Zhang, L.-H., Bao, Y., Sun, X.-P., Shi, J.-J., Zhang, J., Xu, J.-Y., & Xie, Q. (2024). Effectiveness study of surface electromyography combined with spine 3D data system to evaluate scoliosis. *American Journal of Clinical and Experimental Immunology*, 13(4), 195–201. <https://doi.org/10.62347/BLSO4420>