

УДК 666.961

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-30>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРГОНОМІЧНИХ РИЗИКІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ОПОРНО-РУХОВИЙ АПАРАТ УЧНІВ

**Цимбал Богдан Михайлович,**

доктор наук з державного управління, доцент,  
професор кафедри підвищення кваліфікації та спеціалізованої підготовки  
у сфері цивільного захисту  
Національного університету цивільного захисту України  
ORCID ID: 0000-0002-2317-3428

**Вендичанський Данило Григорович,**

учень 11-А класу  
Комунального закладу «Харківській ліцей № 69 Харківської міської ради»  
ORCID ID: 0009-0001-9813-7800

У статті розглянуто ергономічні ризики в навчальній та побутовій діяльності школярів в умовах зростання статичних навантажень і поширення нефізіологічних робочих поз. Актуальність дослідження зумовлена інтенсивними морфофункціональними змінами опорно-рухового апарату в підлітковому віці – у критичний період формування рухових стереотипів, що впливають на стан здоров'я в подальшому житті. Тривале сидіння, активне використання цифрових пристроїв та виконання побутових фізичних робіт сприяють накопиченню несприятливих біомеханічних навантажень і підвищують ризик розвитку м'язово-скелетних порушень у здобувачів освіти. Для оцінювання біомеханічних особливостей робочих поз і рухів застосовано відеоаналіз із використанням алгоритмів комп'ютерного зору в поєднанні з міжнародною методикою REBA. Такий підхід забезпечив об'єктивне визначення кутів у суглобах, нахилів тулуба, ротаційних рухів та асиметрій під час виконання типових рухових дій. За результатами дослідження встановлено переважання надмірних нахилів тулуба, що перевищують фізіологічні межі, нефізіологічних положень голови та торсійних рухів корпусу під навантаженням. Згідно з методикою REBA, виявлені рухові стереотипи відповідають високому рівню ергономічної небезпеки. Виявлені біомеханічні відхилення асоціюються з підвищеним навантаженням на шийний і поперековий відділи хребта та можуть сприяти розвитку м'язового перенапруження, функціональних порушень та клінічних проявів з боку опорно-рухового апарату. Отримані результати підкреслюють доцільність раннього виявлення ергономічних ризиків та впровадження профілактичних заходів, спрямованих на корекцію рухових стереотипів, формування нейтральних поз і зниження надмірного біомеханічного навантаження.

**Ключові слова:** ергономічний ризик, опорно-руховий апарат, постава, школярі, штучний інтелект, комп'ютерний зір, REBA.

### **Tsybmal Bohdan, Vendychanskyi Danylo. Study of ergonomic risks and their impact on the musculoskeletal system of students**

The article examines ergonomic risks in the educational and everyday activities of schoolchildren under conditions of increasing static loads and the widespread use of non-physiological working postures. The relevance of the study is determined by intensive morphofunctional changes in the musculoskeletal system during adolescence – a critical period for the formation of movement patterns that influence health status in later life. Prolonged sitting, active use of digital devices, and the performance of household physical tasks contribute to the accumulation of unfavorable biomechanical loads and increase the risk of developing musculoskeletal disorders among students. To assess the biomechanical characteristics of working postures and movements, video analysis using computer vision algorithms in combination with the international REBA method was applied. This approach ensured objective determination of joint angles, trunk inclinations, rotational movements, and asymmetries during the performance of typical motor activities. As a result, a predominance of excessive trunk flexion exceeding physiological limits, non-physiological head positions, and torsional movements of the torso under load was identified. According to the REBA methodology, the identified movement patterns correspond to a high level of ergonomic hazard. The identified biomechanical deviations are associated with increased loading of the cervical and lumbar regions of the spine and may contribute to the development of muscle overstrain, functional disorders, and clinical manifestations of the musculoskeletal system. The obtained results emphasize the feasibility of early identification of ergonomic risks and the implementation of preventive measures aimed at correcting movement patterns, forming neutral postures, and reducing excessive biomechanical loading.

**Key words:** ergonomic risk, musculoskeletal system, posture, schoolchildren, artificial intelligence, computer vision, REBA.

**Вступ.** У підлітковому віці відбуваються інтенсивні морфофункціональні зміни опорно-рухового апарату, формування постави та стабілізація рухових стереотипів, що визначають стан здоров'я людини в подальшому житті [1]. Саме в цей період хребет, зв'язково-м'язовий апарат та постуральні механізми є найбільш чутливими до зовнішніх навантажень і несприятливих ергономічних чинників. В умовах воєнного стану, дистанційного та змішаного навчання, а також проведення занять в укриттях суттєво зростає тривалість статичних навантажень і кількість нефізіологічних поз у школярів, що, за даними медичних та ергономічних досліджень, пов'язано зі зростанням частоти м'язово-скелетних порушень і функціонального болю [2; 3].

Додатковими чинниками ризику є активне використання цифрових пристроїв, тривале перебування в положенні сидячи з нахилом голови вперед, а також виконання побутових фізичних робіт у домашньому середовищі без дотримання принципів безпечної біомеханіки. Тривале перебування в нефізіологічних позах призводить до перенапруження м'язів шиї та спини, порушення м'язового балансу й формування хронічного больового синдрому вже в підлітковому віці [2; 4]. У сукупності зазначені фактори зумовлюють високу медичну та соціальну значущість проблеми ергономічних ризиків у дітей і підлітків.

Сутність проблеми полягає в тому, що більшість ергономічних ризиків у дітей та підлітків залишаються неусвідомленими й не фіксуються на ранніх етапах, коли зміни мають функціональний та зворотний характер. Традиційні методи оцінювання постави та рухів ґрунтуються переважно на візуальному спостереженні, що не дає можливості точно визначити кутові відхилення, асиметрію навантажень і динамічні перевантаження опорно-рухового апарату. У зв'язку із цим застосування технологій штучного інтелекту та комп'ютерного зору розглядається як перспективний напрям медичної ергономіки, який забезпечує об'єктивну кількісну оцінку поз і рухів.

**Мета та завдання дослідження.** Мета дослідження полягає у медико-ергономічному виявленні й оцінюванні ергономічних ризиків у школярів під час навчальної та побутової діяльності із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту та визначенні їх впливу на стан опорно-рухового апарату.

Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити такі завдання:

– проаналізувати основні види ергономічних ризиків, характерних для навчальної та побутової фізичної діяльності учнів;

– дослідити біомеханічні особливості робочих поз і рухів із використанням комп'ютерного зору та методики REBA;

– оцінити потенційний вплив виявлених ергономічних порушень на опорно-руховий апарат із позицій медицини;

– розробити практичні рекомендації профілактичного спрямування щодо зменшення ризику формування м'язово-скелетних порушень у школярів.

**Матеріали та методи дослідження.** Об'єкт дослідження – стан опорно-рухового апарату учнів у процесі навчальної та побутової фізичної діяльності.

Предмет дослідження – ергономічні ризики та біомеханічні порушення поз і рухів учнів, визначені за допомогою технологій штучного інтелекту, та їх вплив на здоров'я.

Методи дослідження передбачають: аналіз науково-медичної та ергономічної літератури; відеоспостереження; алгоритми комп'ютерного зору; аналіз ключових анатомічних точок тіла; міжнародну методику оцінювання ергономічного ризику REBA; порівняльний та узагальнюючий аналіз отриманих даних.

Дослідження має прикладний характер і спрямоване на вирішення актуального медико-профілактичного завдання – зниження ризику формування порушень опорно-рухового апарату в учнів шляхом об'єктивного аналізу рухів і впровадження коригувальних рекомендацій.

**Теоретико-медичні аспекти ергономічних ризиків у навчальній та побутовій діяльності підлітків.** Наукові дослідження ергономічних ризиків у дітей і підлітків формуються на перетині медицини, біомеханіки, ергономіки, фізичної реабілітації та громадського здоров'я. Актуальність цієї проблематики зумовлена особливостями підліткового віку, коли відбувається інтенсивний ріст кісткових структур, становлення м'язового корсету та стабілізація постурального контролю. У цей період навіть помірні, але тривалі нефізіологічні навантаження можуть закладати передумови для стійких функціональних і структурних порушень опорно-рухового апарату.

Фундамент теоретико-медичного розуміння проблеми сформовано у вітчизняних працях з біомеханіки та кінезіології. Зокрема, у монографії В. О. Кашуби та Ю. А. Пападюхи системно висвітлено закономірності просторової організації тіла, механізми формування постави та роль м'язового балансу в забезпеченні стабільності хребта. Показано, що в дитячому й підлітковому віці порушення нейтральної пози тіла призводять не лише до косметичних змін, а й до порушень

біомеханіки рухів, перерозподілу навантажень та зниження функціональних резервів організму [1]. Зазначені положення становлять методологічну основу для медичної оцінки ергономічних ризиків у навчальній діяльності.

Сучасний етап розвитку наукової думки характеризується посиленням епідеміологічного підходу. Міжнародні дослідження переконливо демонструють зв'язок між поведінковими чинниками та м'язово-скелетним здоров'ям підлітків. Так, у роботі L. Da Costa та співавторів встановлено статистично значущий зв'язок між сидячою поведінкою та поширеністю болю в шиї і спині, що дає змогу розглядати тривале сидіння як незалежний фактор ризику [2]. Аналогічні за змістом результати отримано в дослідженнях, присвячених впливу дистанційної діяльності, де показано опосередкований зв'язок між зростанням тривалості сидіння та формуванням м'язово-скелетного болю [3].

Доповнюють ці висновки спостережні дослідження фізичної активності дітей у повсякденних умовах. Зокрема, A. J. Woods та співавтори показали, що навіть поза межами навчального процесу в дітей переважають сидячі форми діяльності, а рівень спонтанної рухової активності залишається недостатнім для забезпечення гармонійного розвитку опорно-рухового апарату [5]. Автори підкреслюють, що така модель поведінки формується з раннього віку та зберігається в підлітковий період, підсилюючи негативний вплив навчальних ергономічних навантажень.

Водночас аналіз літератури свідчить, що значна частина досліджень має описовий характер або зосереджується на окремих чинниках ризику, не враховуючи комплексної дії навчальних і побутових навантажень. Недостатньо представленими залишаються роботи, які поєднують медичний аналіз з об'єктивними біомеханічними вимірюваннями в реальних умовах життєдіяльності підлітків.

З медико-біомеханічних позицій одним із провідних ергономічних ризиків у підлітків є тривале статичне навантаження, характерне для навчального процесу, виконання домашніх завдань і роботи із цифровими пристроями. Доведено, що домінування сидячих форм діяльності сприяє формуванню несприятливих рухових стереотипів, які зберігаються у старшому віці [5].

Окрему групу ризиків становить активне використання смартфонів і планшетів. Дослідження F. D. Vanadaki та співавторів, а також нарративний огляд I. G. Lee і S. J. Son показують, що систематичний нахил голови вперед

і фіксоване положення верхніх кінцівок спричиняють перенапруження м'язів шийно-комірцевої зони, змінюють біомеханіку ходи та негативно впливають на загальну постуральну стабільність [6; 7]. Це свідчить про системний характер ергономічно зумовлених порушень.

Біомеханічні механізми навантаження хребта під час фізичної роботи детально вивчені у класичних і сучасних дослідженнях. Моделювання Kim і Zhang показало суттєве зростання компресійних і зсувних навантажень у поперековому відділі хребта в разі асиметричного піднімання вантажів [8]. Marras та співавтори довели, що поєднання згинання та скручування тулуба є одним із найнебезпечніших рухових патернів [9]. Додатково встановлено, що обмежений робочий простір та несприятливі умови виконання фізичної роботи значно підвищують навантаження на хребет навіть за відносно невеликої маси вантажу [10].

Важливим чинником формування ергономічних ризиків є невідповідність навчального середовища антропометричним характеристикам учнів. Дослідження Castellucci та співавторів, а також Кауа і Erkarşlan свідчать, що шкільні меблі часто не відповідають зросту та пропорціям тіла дітей, змушуючи їх тривалий час перебувати в нефізіологічних позах [11; 12]. Це створює хронічне навантаження на хребет і м'язовий апарат навіть за відсутності значних фізичних зусиль.

Тривалий вплив ергономічних ризиків у підлітковому віці асоціюється з формуванням порушень постави, хронічного болю в шиї та спині, зниженням м'язової витривалості та функціональних можливостей опорно-рухового апарату. Постуральні порушення можуть супроводжуватися вторинними змінами з боку дихальної системи та зниженням якості життя [13].

Вагоме значення мають медико-профілактичні підходи, спрямовані на формування раціональних рухових стереотипів. У наукових працях підкреслюється необхідність поєднання навчальної діяльності з регулярною руховою активністю та контролю тривалості статичних поз [14].

Сучасні профілактичні підходи передбачають організаційні та поведінкові інтервенції. Систематичні огляди підтверджують ефективність використання активних парт, динамічних форм організації навчання та залучення учнів до зменшення сидячої поведінки [15; 16]. Водночас більшість таких досліджень не містять об'єктивної біомеханічної оцінки поз та рухів.

Новим етапом розвитку наукових досліджень стало впровадження цифрових методів аналізу

ергономічних ризиків. Валідність інструментів оцінювання на основі комп'ютерного зору підтверджено в роботах Т. Agostinelli та співавторів [4]. Оглядові дослідження демонструють високий потенціал методів машинного навчання для автоматичного розпізнавання поз та кількісної оцінки ризиків [17; 18]. Практичну реалізацію таких підходів представлено в автоматизованих системах оцінки за методикою REBA [19].

Вагомий внесок у розвиток вітчизняної наукової думки зроблено в дослідженнях, присвячених ергономічним ризикам у професійній та навчальній діяльності суміжних контингентів, зокрема саперів і рятувальників [20–22]. Медичні аспекти проблеми поглиблено в роботах, присвячених професійним захворюванням опорно-рухового апарату [23; 24]. Педагогічний і середовищний вимір ергономіки розкрито в дослідженнях, присвячених створенню безпечного освітнього середовища [25], а також у працях із комплексної оцінки ергономічних ризиків у виробничих умовах, які можуть бути адаптовані до навчальної діяльності [26].

**Аналіз ергономічних ризиків за допомогою штучного інтелекту.** У дослідженні застосовано сучасні технології комп'ютерного зору й алгоритми штучного інтелекту для визначення робочих поз та оцінювання їхнього впливу на опорно-руховий апарат. Використання інструментів штучного інтелекту дало змогу отримати об'єктивні біомеханічні дані, які неможливо точно зафіксувати неозброєним оком або методами суб'єктивного спостереження. Такий підхід є особливо важливим у медичному контексті, оскільки дає змогу виявляти навіть мінімальні відхилення від нейтральної пози, здатні спричинити накопичувані мікротравми в підлітковому віці.

Експериментальне дослідження виконувалося на основі відеозаписів, отриманих під час виконання двох типових побутових дій: копання ґрунту та піднімання й перенесення вантажу. Для відеофіксації використовувався смартфон із можливістю запису відео у високій роздільній здатності, встановлений на штативі для забезпечення стабільності зображення. Камеру розміщували таким чином, щоб у кадрі повністю фіксувалися голова, шия, плечовий пояс, тулуб, таз і кінцівки. Забезпечувалося рівномірне освітлення, необхідне для коректного розпізнавання контурів тіла та ключових анатомічних точок алгоритмами комп'ютерного зору.

Після завершення зйомки відеоматеріали завантажувалися до спеціалізованої програми аналізу рухів SoterAI [27], яка використовує глибинні нейронні мережі для автоматичного

визначення ключових точок тіла в кожному кадрі. На етапі обробки вводилися додаткові параметри, зокрема маса вантажу, що забезпечувало підвищення точності розрахунків компресійного навантаження на поперековий відділ хребта й оцінювання ризиків перевантаження м'язів-стабілізаторів.

Алгоритми комп'ютерного зору формували динамічну скелетну модель тіла з визначенням положення голови, шиї, плечей, ліктів, осі хребта, тазу, колін та стоп. У кожному кадрі автоматично розраховувалися кути нахилу тулуба, амплітуда ротацій, асиметрія положення кінцівок і ступінь відхилення від нейтральної пози. Це дало змогу аналізувати не лише статичні положення з надмірними нахилами або скручуваннями, а й мікродинаміку рухів, що має принципове значення для медичної ергономіки з огляду на підвищену вразливість опорно-рухового апарату підлітків до короточасних і неправильно виконаних рухів.

Отримані біомеханічні дані автоматично інтегрувалися з алгоритмом REBA, який є міжнародно стандартизованою методикою оцінювання ризику робочих поз. На основі кутових характеристик система розраховувала рівень навантаження на ший, тулуб, плечовий пояс, поперековий відділ, верхні та нижні кінцівки під час руху. Подальше порівняння отриманих показників із нормативними медико-біомеханічними значеннями дало можливість визначити ступінь ергономічної небезпеки відповідно до шкали REBA та сформував об'єктивний ризик-профіль аналізованих дій.

За результатами аналізу програмним забезпеченням автоматично сформовано детальні звіти та відеоматеріали з візуалізацією найбільш небезпечних поз. На рис. 1 та 2 відмічені епізоди глибоких нахилів, ротацій та асиметрій тіла, а також наведено підсумкові бали ергономічного ризику. У звітах подано графічні позначення найбільш уразливих анатомічних ділянок і рекомендації щодо корекції техніки рухів, що стало основою подальшого медико-ергономічного аналізу та дало змогу визначити ключові загрози для опорно-рухового апарату.

Результати експериментального аналізу, наведеного в додатках А та Б, показали, що під час виконання обох видів фізичної діяльності – копання лопатою та піднімання / перенесення бетонного блоку масою 12 кг – формується складний комплекс біомеханічних порушень. Алгоритм SoterAI, який оцінює рухи покадрово й автоматично визначає положення сегментів тіла, відзначив повторюваність неправильних поз, значну глибину нахилів, різкі ротаційні рухи

та нестійкість положення тіла в умовах зовнішнього навантаження. Це дало можливість встановити, що ключові ризики не є випадковими, а проявляються у вигляді стійких рухових патернів, які потребують корекції.

Найбільш вираженим і статистично частим порушенням став глибокий нахил тулуба вперед. Під час копання, що представлено на рис. 1, спина перебувала в різних фазах згинання фактично в кожному циклі роботи. У фазі



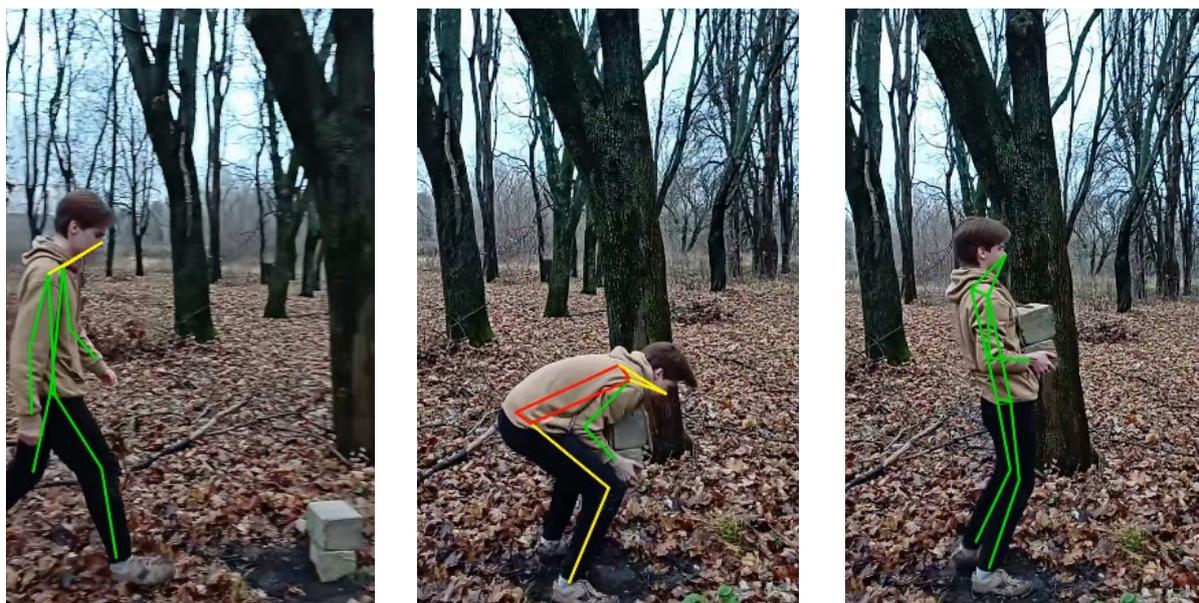
а

б

**Рис. 1. Ергономічна оцінка найбільш уразливих зон тіла учня під час копання: а – у розігнутому стані; б – у зігнутому стані**

занурення лопати кут згину тулуба наближався до критичних значень, а у фазі підймання ґрунту нахил збільшувався ще більше. Це підтверджується кількісними даними REBA: тулуб оцінено в найвищому діапазоні балів, що свідчить про надмірну компресію у поперековому відділі. Під час підйому бетонного блоку нахил не лише був глибоким, а й утримувався протягом більш тривалої фази руху. Це означає, що навантаження на диски L4–L5 та L5–S1 зростало в десятки разів порівняно з положенням у нейтральній позі. У підлітковому віці такий характер роботи створює особливо високий ризик перевантаження поперекових м'язів, формування больових синдромів і розвитку функціональних порушень постави.

Другим суттєвим ризиком є регулярна ротація шиї. Алгоритм SoterAI зафіксував, що під час копання голова багаторазово поверталась у сторони, що можна побачити на візуалізаціях у додатках. Ці рухи виникали в моменти контролю положення лопати та напрямку руху ґрунту. Основна проблема полягала в тому, що ротація супроводжувалась одночасним нахилом вперед, що формує надмірне навантаження на м'язи шиї та верхній плечовий пояс. У ситуації з перенесенням вантажу ротація голови поєднувалася з її опусканням. Така позиція характерна для ситуацій, коли людина намагається контролювати рівновагу на нерівній або слизькій поверхні. Саме це було зафіксовано в додатку Б: нестабільність опори провокувала



а б в

**Рис. 2. Ергономічна оцінка найбільш уразливих зон тіла учня під час ручного підйому та перенесення бетонного блоку: а – у розігнутому стані; б – у зігнутому стані; в – під час перенесення бетонного блоку**

часті мікрорухи голови, що створювало додаткове напруження шийного відділу та збільшувало ризик м'язово-тонічних реакцій.

Надзвичайно небезпечними виявились і торсійні рухи корпусу. У додатку А вони чітко видно у фазі викидання землі: тулуб виконує ротацію в бік, тоді як ноги залишаються майже нерухомими, а спина перебуває у напівзігнутій позиції. У біомеханічному контексті це є поєднанням двох факторів підвищеного ризику – згинання та ротації під навантаженням, що суттєво збільшує ризик пошкодження міжхребцевих дисків. У другому експерименті скручування корпусу відбувалися не лише в момент піднімання вантажу, а й на початку руху під час перенесення. Наявність вантажу значно підсилювала осьове навантаження, а слизький ґрунт формував ризик зміщення центру мас у бік. Саме такі поєднання є найбільш загрозливими з погляду ризику гострого травмування, особливо в зоні поперекових м'язів-стабілізаторів.

Окрему групу ризиків становили асиметричні положення тіла. На візуалізаціях звітів відмічено, що під час копання ліва та права частини тіла працювали нерівномірно: одна рука перебувала в напівзігнутому стані, тоді як інша несла основне навантаження. Система ідентифікувала нерівномірний розподіл сили, що призводить до асиметричної напруги в м'язах спини та плечей. Під час перенесення вантажу асиметрія проявлялась у тому, що тулуб дещо зміщувався у бік, протилежний вантажу, намагаючись компенсувати його вагу. Таке компенсаторне зміщення є природним, але водночас небезпечним, оскільки може формувати неправильні рухові стереотипи.

На результати значний вплив мали й зовнішні умови. Під час копання основним фактором ризику була циклічність рухів: постійне повторення тих самих помилкових поз створювало накопичувальний ефект втоми та напруги в м'язах спини. У другому експерименті центральним фактором стала слизькість та нерівність ґрунту, що потребувало постійного перерозподілу ваги та мікрокорекцій положення тіла. Алгоритм SoterAI реєстрував це як нестійкість опори, що автоматично підвищує ризик у категорії REBA.

Отримані результати підтверджують, що під час обох видів діяльності проявлялися рухи та пози, які методика REBA класифікує як високо небезпечні. Особливо критичними стали глибокі нахили понад 45°, скручування корпусу під навантаженням, ротація шиї у поєднанні з нахилом та асиметричні рухи. Оскільки всі ці порушення виникали систематично, це дає підстави

стверджувати про високий загальний ергономічний ризик і потенційну загрозу для формування правильної постави та здоров'я опорно-рухового апарату.

Оцінювання робочих поз за методикою REBA дало змогу визначити рівень ергономічного ризику та здійснити його медичну інтерпретацію з урахуванням особливостей опорно-рухового апарату підлітків. Отримані результати свідчать, що під час виконання побутових фізичних дій формуються нефізіологічні пози та рухи, які мають потенційно негативний вплив на стан здоров'я.

Під час виконання копання ґрунту та ручного піднімання й перенесення вантажу зафіксовано високий рівень ергономічної небезпеки за шкалою REBA. Основними чинниками ризику стали глибокі нахили тулуба понад 45°, ротаційні рухи шийного відділу та скручування корпусу під навантаженням. Такі пози супроводжуються значним зростанням компресійного та зсувного навантаження на міжхребцеві диски, що з медичного погляду є несприятливим для незавершено сформованого хребта підлітка.

Систематичний нахил голови вперед у поєднанні з її ротацією призводить до перенапруження м'язів шийно-комірцевої зони та порушення м'язового балансу. У клінічному аспекті це може проявлятися м'язово-тонічними реакціями, болем у шиї та головним болем напруження. Водночас глибокі нахили тулуба створюють підвищене навантаження на поперековий відділ хребта, що підвищує ризик розвитку поперекового больового синдрому та функціональних блокад.

Особливу медичну небезпеку становлять комбіновані рухи зі згинанням і скручуванням корпусу під навантаженням. Такі рухові патерни спричиняють нерівномірний розподіл навантаження між структурами хребта та можуть призводити до мікротравматизації міжхребцевих дисків і формування асиметричного м'язового напруження. У підлітковому віці це створює передумови для раннього розвитку порушень постави та хронічного болю.

Додатковими чинниками підвищення ергономічного ризику є асиметричні пози тіла та нестабільність опорної поверхні, які викликають компенсаторні мікрорухи та перевантаження м'язів-стабілізаторів. Це знижує контроль рухів та підвищує імовірність функціональних порушень опорно-рухового апарату (табл. 1).

З позицій профілактичної медицини виявлені ергономічні ризики мають переважно функціональний характер і на ранніх етапах є зворотними. Підлітковий вік характеризується

незавершеністю формування опорно-рухового апарату, що зумовлює підвищену чутливість до механічних перевантажень. Застосування методики REBA дає можливість виявляти потенційно небезпечні рухи до появи клінічних проявів. Це підтверджує доцільність використання отриманих результатів у профілактиці м'язово-скелетних порушень.

Узагальнюючи, зазначимо, що результати оцінювання за методикою REBA підтверджують, що виявлені ергономічні ризики мають чітке медичне значення та можуть розглядатися як фактори ризику формування м'язово-скелетних порушень у підлітковому віці. Систематизований зв'язок між конкретними ергономічними ризиками, механізмами їх впливу на організм і можливими порушеннями здоров'я наведено в таблиці 1.

**Профілактика та рекомендації щодо зменшення ергономічних ризиків.** У процесі

експериментального дослідження встановлено, що зменшення ергономічних ризиків безпосередньо пов'язане з формуванням раціональних рухових стереотипів і безпечною організацією робочого місця. Аналіз трудових рухів, проведений із використанням системи SoterAI, показав, що найбільш небезпечними для здоров'я є надмірні нахили тулуба, ротація шийного відділу, скручування корпусу й асиметричні пози. Саме такі положення створюють підвищене навантаження на хребет і можуть призводити до м'язового перенапруження та розвитку мікротравм.

Одним із ключових чинників підвищеного ризику визначено неправильну техніку нахилів та піднімання предметів. Дані оцінки за методикою REBA засвідчили, що найвищий рівень ризику виникав під час виконання нахилів понад 45° у процесі копання (рис. 1). Застосування техніки роботи шляхом згинання в колінних

Таблиця 1

**Медико-біомеханічна характеристика ергономічних ризиків та їх вплив на здоров'я підлітків**

Ергономічний ризик	Патофізіологічний механізм впливу	Основні анатомічні структури-мішені	Можливі функціональні порушення та клінічні стани	Довгострокові медичні ризики	Профілактичні рекомендації
Систематичний нахил голови вперед	Хронічне перенапруження м'язів-стабілізаторів, зниження регіонарного кровообігу, перевантаження міжхребцевих дисків	М'язи шийно-комірцевої зони, шийні хребці, судини	Цервікалгія, головний біль напруження, скутість рухів	Формування хронічного м'язово-тонічного синдрому	Контроль положення голови, вправи на розвантаження шиї, регламентовані перерви
Ротація шиї у поєднанні з нахилом	Порушення м'язового балансу та нейром'язової координації	Шийний відділ хребта, фасеткові суглоби	Функціональні больові синдроми, обмеження рухливості	Стійкі порушення рухового стереотипу	Уникнення різких рухів, стабілізація шийного відділу
Глибокі нахили тулуба понад 45°	Підвищення компресійного тиску на міжхребцеві диски, перевантаження паравертебральних м'язів	Поперековий відділ хребта, міжхребцеві диски	Поперековий біль, швидка втомлюваність м'язів	Ризик ранніх дегенеративних змін дисків	Нахили з опорою на коліна, збереження нейтрального положення спини
Скручування корпусу під навантаженням	Виникнення зсувних сил у фіброзному кільці міжхребцевих дисків	Хребет, м'язово-зв'язковий апарат	Мікро-травматизація, асиметричний м'язовий тонус	Формування хронічного больового синдрому	Повороти всім тілом, уникнення торсій у попереку
Асиметричні пози тіла	Нерівномірний розподіл навантаження, компенсаторні скорочення м'язів	Хребет, плечовий пояс	Порушення постави, функціональна асиметрія	Ризик сколіотичної постави	Контроль симетрії, чергування навантаження
Нестійка або слизька опорна поверхня	Постійні коригувальні мікрорухи, перевантаження м'язів-стабілізаторів	Нижні кінцівки, хребет	М'язові спазми, порушення координації	Підвищений ризик травматизації	Забезпечення стабільної опори, відповідне взуття

суглобах, з утриманням спини в нейтральному положенні та наближенням вантажу до тіла дає можливість суттєво зменшити навантаження на поперековий відділ хребта й уникнути небезпечних ротаційних рухів.

Під час дослідження також зафіксовано часті нахили голови вниз або її повороти вбік під час виконання фізичних робіт. Поєднання нахилу та ротації, як підтвердив аналіз SoterAI, створює додаткове навантаження на шийний відділ хребта. Контроль положення голови й утримання її в нейтральній позиції без різких поворотів сприяє зменшенню втоми м'язів шиї та підвищенню загального комфорту під час виконання завдань.

Окрему увагу привертає проблема скручування корпусу. Під час викидання ґрунту часто поєднувалися нахил і ротація тулуба. Корекція техніки шляхом повороту всього тіла разом із нижніми кінцівками замість торсійних рухів у попереку дає змогу зменшити ризик перенапруження хребта та підвищити ефективність виконання роботи.

Суттєвий вплив на рівень ергономічного ризику має організація робочого місця. На другій локації дослідження нерівна та частково слизька поверхня змушувала виконувати компенсаторні рухи, часто змінювати положення ніг і постійно утримувати рівновагу, що підвищувало загальне навантаження на опорно-руховий апарат. Це підтверджує важливість попереднього огляду місця роботи, підготовки поверхні, усунення сторонніх предметів, використання взуття з належним зчепленням і забезпечення стійкої пози.

Вибір інструментів також є критичним фактором профілактики. Використання інструментів із короткою рукояткою призводить до вимушених глибоких нахилів і зростання навантаження на поперековий відділ. Застосування інструментів, що відповідають зросту виконавця, сприяє формуванню більш природних рухів і зменшенню кількості небезпечних поз.

Важливим аспектом є вплив робочої пози під час навчальної діяльності. Невідповідна висота столу або стільця сприяє формуванню сутулості та нахилу голови, що згодом закріплюється і під час фізичних навантажень. Адаптація навчального робочого місця до антропометричних особливостей дає змогу підтримувати нейтральне положення хребта та знижувати ризик розвитку порушень постави.

Узагальнення результатів дослідження свідчить, що корекція техніки рухів і раціональна організація робочого середовища є ключовими чинниками зниження ергономічних ризиків.

Аналіз рухової діяльності дає можливість виявити типові помилки й обґрунтувати ефективність навіть незначних змін у техніці виконання робіт і просторовій організації робочого місця.

На основі результатів експериментального дослідження й аналізу рухової діяльності за допомогою системи SoterAI сформульовано комплекс рекомендацій, спрямованих на зниження ергономічних ризиків та збереження здоров'я учнів і педагогічних працівників у процесі навчальної та побутової діяльності.

Важливим профілактичним чинником є раціональна організація режиму роботи. Короткі перерви тривалістю 3–5 хвилин кожні 10–15 хвилин активної діяльності сприяють зменшенню м'язової втоми, відновленню кровообігу та зниженню статичного навантаження на опорно-руховий апарат.

Ефективним способом профілактики перенапруження є чергування різних видів діяльності. Виконання одноманітних рухів протягом тривалого часу призводить до локального стомлення окремих м'язових груп. Зміна завдань забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження та знижує ризик розвитку мікротравм.

Важливу роль відіграє виконання короткої розминки перед фізичним навантаженням. Легкі вправи для м'язів спини, плечового поясу, шиї та нижніх кінцівок сприяють підготовці організму до роботи, підвищують контроль рухів і зменшують імовірність різких або неконтрольованих дій.

Підбір інструментів відповідно до зросту та фізичних можливостей учнів є ключовим елементом ергономічної профілактики. Інструменти з невідповідною довжиною або надмірною вагою змушують приймати асиметричні пози, виконувати глибокі нахили та створюють додаткове навантаження на хребет. Раціональний вибір інструментів покращує техніку рухів і зменшує ротаційні навантаження на корпус.

Аналіз робочих поз засвідчив, що найбільш поширеними помилками є глибокі нахили, значне опускання голови та скручування тулуба під час піднімання й перенесення вантажів. Дотримання нейтрального положення хребта, виконання нахилів завдяки роботі нижніх кінцівок та утримання голови без різких поворотів дає змогу зменшити навантаження на міжхребцеві диски та м'язово-зв'язковий апарат.

Особливу небезпеку становлять комбіновані рухи з одночасним нахилом і скручуванням корпусу. Повороти доцільно виконувати всім тілом із переставлянням ніг, а не шляхом торсійних рухів у поперековому відділі хребта, що суттєво знижує ризик гострого болю та м'язових спазмів.

Стан робочої поверхні також має істотне значення для безпеки. Нерівний або слизький ґрунт підвищує імовірність неконтрольованих рухів і падінь. Перед початком роботи доцільно проводити огляд місцевості, усувати небезпечні ділянки, забезпечувати достатній простір для рухів та використовувати взуття з належним зчепленням.

Для педагогічних працівників важливим є систематичне формування в учнів правильних рухових навичок. Демонстрація безпечних способів піднімання предметів, раціональна організація робочих місць з урахуванням вікових та антропометричних особливостей, а також пояснення наслідків небезпечних рухів сприяють формуванню здоров'язбережувальної поведінки та стійких навичок, що позитивно впливають на стан здоров'я впродовж життя.

**Висновки.** За результатами аналізу основних видів ергономічних ризиків встановлено, що під час навчальної та побутової фізичної діяльності учнів найбільш поширеними є тривалі нефізіологічні пози, глибокі нахили тулуба, ротація голови та скручування корпусу, а також статичні навантаження. Визначено, що зазначені чинники мають системний характер та формуються внаслідок закріплення неправильних рухових стереотипів у підлітковому віці, що підтверджує актуальність медико-ергономічного підходу до їх оцінювання.

Під час дослідження біомеханічних особливостей робочих поз із використанням комп'ютерного зору та методики REBA

проведено кількісну оцінку положень тіла під час виконання типових фізичних дій. Встановлено, що надмірні нахили тулуба понад 45°, нефізіологічні положення голови та ротаційні рухи корпусу під навантаженням відповідають високому рівню ергономічного ризику за шкалою REBA, що свідчить про значну ймовірність негативного впливу на опорно-руховий апарат.

Оцінка потенційного впливу виявлених ергономічних порушень з позицій медицини показала, що регулярне виконання нефізіологічних рухів і поз призводить до перевантаження шийного та поперекового відділів хребта, порушення м'язового балансу і створює передумови для розвитку функціонального болю та м'язово-скелетних розладів. Отримані результати підтверджують, що ергономічні ризики у школярів слід розглядати як чинник довготривалого впливу на стан здоров'я.

За результатами дослідження розроблено практичні рекомендації профілактичного спрямування, спрямовані на зменшення ергономічних ризиків, зокрема корекцію техніки рухів, використання нейтральних поз, уникнення комбінованих рухів із нахилом і скручуванням, раціональну організацію робочого середовища, впровадження коротких перерв, розминки та чергування видів діяльності. Запропоновані рекомендації мають прикладне значення та можуть бути використані в освітніх закладах і домашніх умовах для профілактики м'язово-скелетних порушень у школярів.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Кашуба В. О., Пападюха Ю. А. Біомеханіка просторової організації тіла людини: сучасні методи та засоби діагностики і відновлення порушень : монографія. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 768 с.
2. da Costa L., Lemes I. R., Tebar W. R., Oliveira C. B., Guerra P. H., Soidán J. L. G., et al. Sedentary behavior is associated with musculoskeletal pain in adolescents: a cross sectional study. *Brazilian journal of physical therapy*. 2022. P. 100452. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2022.100452>
3. Loef B., van Oostrom S. H., Bosma E., Proper K. I. The mediating role of physical activity and sedentary behavior in the association between working from home and musculoskeletal pain during the COVID-19 pandemic. *Frontiers in public health*. 2022. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1072030>
4. Agostinelli T., Generosi A., Ceccacci S., Mengoni M. Validation of computer vision-based ergonomic risk assessment tools for real manufacturing environments. *Scientific reports*. 2024. Vol. 14, no. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79373-4>
5. Woods A. J., Norman J., Ryan S. T., Wardle K., Probst Y. C., Crowe R. K., et al. Children's physical activity and sedentary behaviour in before school care: an observational study. *Preventive medicine*. 2023. P. 107810. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2023.107810>
6. Banadaki F. D., Rahimian B., Moraveji F., Varmazyar S. The impact of smartphone use duration and posture on the prevalence of hand pain among college students. 2024. Vol. 25, no. 1. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07685-7>
7. Lee I. G., Son S. J. Effects of smartphone use on posture and gait: a narrative review. *Applied sciences*. 2025. Vol. 15, no. 12. P. 6770. <https://doi.org/10.3390/app15126770>
8. Kim H.-K., Zhang Y. Estimation of lumbar spinal loading and trunk muscle forces during asymmetric lifting tasks: application of whole-body musculoskeletal modelling in OpenSim. *Ergonomics*. 2016. Vol. 60, no. 4. P. 563–576. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1191679>

9. Marras, W. S., Davis, K. G., Kirking, B. C., & Granata, K. P. Spine loading and trunk kinematics during team lifting. *Ergonomics*. 1999. Vol. 42, no. 10. P. 1258–1273. <https://doi.org/10.1080/001401399184938>
10. Davis K. G. Estimation of spinal loading during palletizing under restricted height and poor lighting. *Ergonomics international journal*. 2020. Vol. 4, no. 5. <https://doi.org/10.23880/eoij-16000258>
11. Castellucci H. I., Arezes P. M., Viviani C. A. Mismatch between classroom furniture and anthropometric measures in Chilean schools. *Applied Ergonomics*. 2010. Vol. 41, no. 4. P. 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.12.001>
12. Kaya N. A., Erkarlan Ö. Sinif mobilyaları ve öğrenci vücut ölçüleri arasındaki uyumsuzluk: izmir örneği. *Ergonomi*. 2019. Vol. 2, no. 3. P. 5–6. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.598932>
13. Uhlig S. E., Marchesi L. M., Duarte H., Araújo M. T. M. Association between respiratory and postural adaptations and self-perception of school-aged children with mouth breathing in relation to their quality of life. *Brazilian journal of physical therapy*. 2015. Vol. 19, no. 3. P. 201–210. <https://doi.org/10.1590/bjpt-rbf.2014.0087>
14. Zain I., Nawawi R., Ismail I. F., Zain N. M. Exploring risk of posture and musculoskeletal disorders among smartphone addicted youth: a protocol paper. *International journal of occupational safety and health*. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 30–36. <https://doi.org/10.3126/ijosh.v14i1.50072>
15. Guirado T., Chambonnière C., Chapat J.-P., Metz L., Thivel D., Duclos M. Effects of classroom active desks on children and adolescents' physical activity, sedentary behavior, academic achievements and overall health: a systematic review. *International journal of environmental research and public health*. 2021. Vol. 18, no. 6. P. 2828. <https://doi.org/10.3390/ijerph18062828>
16. Dinkelspiel Ekman S., Nair M., Gredin N. V., Lindgren E.-C. Reducing classroom sedentary behaviour: a scoping review of interventions and student involvement. *Health promotion international*. 2025. Vol. 40, no. 5. <https://doi.org/10.1093/heapro/daaf167>
17. Nadeem M., Elbasi E., Zreikat A. I., Sharsheer M. Sitting posture recognition systems: comprehensive literature review and analysis. *Applied sciences*. 2024. Vol. 14, no. 18. P. 8557. <https://doi.org/10.3390/app14188557>
18. Deshpande U. U., Araujo S. D. C. S., Deshpande S., Kangralkar V., Patil R., Chate R. A. A., Birajdar P., Singadi S., Raikar P., Arjunwadkar S. A review of machine learning techniques for ergonomic risk assessment based on human pose estimation. *Discover artificial intelligence*. 2025. Vol. 5, no. 1. <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00566-5>
19. Fan C., Mei Q., Yang Q., Li X. Computer-vision based rapid entire body analysis (REBA) estimation / C. Fan et al. *Modular and offsite construction (MOC) summit proceedings*. 2022. P. 90–97. <https://doi.org/10.29173/mocs269>
20. Цимбал Б. М., Свіржевський П. В. Дослідження ергономічних ризиків саперів за допомогою штучного інтелекту. *Штучний інтелект у правовій практиці: межі та можливості : зб. тез круглого столу, м. Львів (14 березня 2025 року)*. Львів : ЛДУМВС, 2025. С. 221–223. URL: <https://surl.li/hdxujd> (дата звернення: 04.11.2025).
21. Цимбал Б. Дослідження ергономічних ризиків під час виконання аварійно-рятувальних робіт. *Journal of scientific papers "Social development and security"*. 2025. Т. 15, № 1. С. 271–285. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.24>
22. Хоружий О., Цимбал Б. М. Дослідження ергономічних ризиків рятувальників під час навчання. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності : матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів, 2025. С. 571–573. URL: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/2517> (дата звернення: 06.11.2025).
23. Ткачишин В. С. Професійні захворювання опорно-рухового апарату та прилеглих структур, спричинені впливом ряду шкідливих виробничих факторів. лекція 6. фізичні, хімічні та біологічні фактори у процесі виробничої діяльності. *Український ревматологічний журнал*. 2006. Т. 2, № 24. С. 25–29. URL: <https://www.rheumatology.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/magazine/24/367.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
24. Повшенюк А. В., Шінкарук-Диковицька М. М., Павлюк Д. Д. Поширеність порушень опорно-рухової та нервової системи у лікарів-стоматологів. *Вісник Вінницького національного медичного університету*. 2024. Т. 28, № 1. С. 109–112. [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2024-28\(1\)-19](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2024-28(1)-19)
25. Починок Є. А. Ергономічні умови створення безпечного освітнього середовища початкової школи як чинник протидії булінгу. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах*. 2020. Т. 3, № 70. С. 98–103. <https://doi.org/10.32840/1992-5786.2020.70-3.18>
26. Sheberiyachko S., Deriuhin O., Tretiak O., Mukha O. Оцінка ергономічних ризиків здоров'ю робітників автосервісу. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2020. Т. 2, № 15. С. 155–164. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.403>
27. SoterAI – Leading AI tool for workplace safety. SoterAI. URL: <https://ai.soter.com/auth/sign-in> (date of access: 04.11.2025).

## REFERENCES:

1. Kashuba, V. O., & Papadiukha, Yu. A. (2018). Biomechanika prostorovoi orhanizatsii tila liudyny: suchasni metody ta zasoby diahnostryky i vidnovlennia poshkodzhen [Biomechanics of the spatial organization of the human body: modern methods and means of diagnosing and restoring disorders]. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].
2. da Costa, L., Lemes, I. R., Tebar, W. R., Oliveira, C. B., Guerra, P. H., Soidán, J. L. G., Mota, J., & Christofaro, D. G. D. (2022). Sedentary behavior is associated with musculoskeletal pain in adolescents: a cross sectional study. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2022.100452>.
3. Loef, B., van Oostrom, S.H., Bosma, E., & Proper, K. I. (2022). The mediating role of physical activity and sedentary behavior in the association between working from home and musculoskeletal pain during the COVID-19 pandemic. *Frontiers in Public Health*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1072030>.
4. Agostinelli, T., Generosi, A., Ceccacci, S., & Mengoni, M. (2024). Validation of computer vision-based ergonomic risk assessment tools for real manufacturing environments. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79373-4>.
5. Woods, A. J., Norman, J., Ryan, S. T., Wardle, K., Probst, Y. C., Crowe, R. K., Patel, L., Hammersley, M. L., Furber, S., Stanley, R. M., Taylor, L., & Okely, A. D. (2023). Children's physical activity and sedentary behaviour in before school care: An observational study. *Preventive Medicine*, 107810. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2023.107810>.
6. Banadaki, F. D., Rahimian, B., Moraveji, F., & Varmazyar, S. (2024). The impact of smartphone use duration and posture on the prevalence of hand pain among college students. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 25 (1). <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07685-7>.
7. Lee, I. G., Son, S. J. (2025). Effects of smartphone use on posture and gait: A narrative review. *Applied Sciences*, 15 (12), 6770. <https://doi.org/10.3390/app15126770>.
8. Kim, H.-K., Zhang, Y. (2016). Estimation of lumbar spinal loading and trunk muscle forces during asymmetric lifting tasks: Application of whole-body musculoskeletal modelling in OpenSim. *Ergonomics*, 60(4), 563–576. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1191679>.
9. Marras, W. S., Davis, K. G., Kirking, B. C., & Granata, K. P. (1999). *Spine loading and trunk kinematics during team lifting*. *Ergonomics*, 42(10), 1258–1273. <https://doi.org/10.1080/001401399184938>.
10. Davis, K. G. (2020). Estimation of spinal loading during palletizing under restricted height and poor lighting. *Ergonomics International Journal*, 4(5). <https://doi.org/10.23880/eoij-16000258>.
11. Castellucci, H. I., Arezes, P. M., & Viviani, C. A. (2010). Mismatch between classroom furniture and anthropometric measures in Chilean schools. *Applied Ergonomics*, 41(4), 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.12.001>.
12. Kaya, N. A., Erkarıslan, Ö. (2019). Sınıf mobilyalari ve öğrenci vücut ölçüleri arasindaki uyumsuzluk: İzmır örneği. *Ergonomi*, 2(3), 5–6. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.598932>.
13. Uhlig, S. E., Marchesi, L. M., Duarte, H., & Araújo, M. T. M. (2015). Association between respiratory and postural adaptations and self-perception of school-aged children with mouth breathing in relation to their quality of life. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 19(3), 201–210. <https://doi.org/10.1590/bjpt-rbf.2014.0087>.
14. Zain, I., Nawawi, R., Ismail, I. F., & Zain, N. M. (2024). Exploring risk of posture and musculoskeletal disorders among smartphone addicted youth: A protocol paper. *International Journal of Occupational Safety and Health*, 14(1), 30–36. <https://doi.org/10.3126/ijosh.v14i1.50072>.
15. Guirado, T., Chambonnière, C., Chaput, J.-P., Metz, L., Thivel, D., & Duclos, M. (2021). Effects of classroom active desks on children and adolescents' physical activity, sedentary behavior, academic achievements and overall health: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 2828. <https://doi.org/10.3390/ijerph18062828>.
16. Dinkelspiel Ekman, S., Nair, M., Gredin, N. V., & Lindgren, E.-C. (2025). Reducing classroom sedentary behaviour: A scoping review of interventions and student involvement. *Health Promotion International*, 40(5). <https://doi.org/10.1093/heapro/daaf167>.
17. Nadeem, M., Elbasi, E., Zreikat, A. I., & Sharsheer, M. (2024). Sitting posture recognition systems: Comprehensive literature review and analysis. *Applied Sciences*, 14(18), 8557. <https://doi.org/10.3390/app14188557>.
18. Deshpande, U. U., Araujo, S. D. C. S., Deshpande, S., Kangralkar, V., Patil, R., Chate, R. A. A., Birajdar, P., Singadi, S., Raikar, P., & Arjunwadkar, S. (2025). A review of machine learning techniques for ergonomic risk assessment based on human pose estimation. *Discover Artificial Intelligence*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00566-5>.

19. Fan, C., Mei, Q., Yang, Q., & Li, X. (2022). Computer-vision based rapid entire body analysis (REBA) estimation. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, 90–97. <https://doi.org/10.29173/mocs269>.

20. Svirzhevskiy, P. V., Tsymbal, B. M. (2025). Doslidzhennia erhonomichnykh ryzykiv saperiv za dopomohoiu shtuchnoho intelektu [Research into ergonomic risks of sappers using artificial intelligence]. In *Shtuchnyi intelekt u pravovii praktytsi: Mezhi ta mozhylyvosti*. (pp. 221–223). Lviv : LDUMVS Retrieved from <https://surl.li/hdxujd> [in Ukrainian].

21. Tsymbal, B. (2025). Doslidzhennia erhonomichnykh ryzykiv pid chas vykonannia avariino-riatuvalnykh robit [Research into ergonomic risks during emergency and rescue operations]. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, 15(1), 271–285. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.24> [in Ukrainian].

22. Khoruzhyi, O., Tsymbal, B. M. (2025). Doslidzhennia erhonomichnykh ryzykiv riatuvalnykh pid chas navchannia [Research on ergonomic risks of rescuers during training]. In *Problemy ta perspektyvy rozvytku systemy bezpeky zhyttiedialnosti*. 571–573. Retrieved from <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/2517> [in Ukrainian].

23. Tkachyshyn, V. S. (2006). Profesiini zakhvoriuvannia oporno-rukhovoho aparatu ta pryehlykh struktur, sprychyneni vplyvom riadu shkidlyvykh vyrobnychkykh faktoriv. Lektsiia 6. fizychni, khimichni ta biolohichni faktory u protsesi vyrobnychoi diialnosti [Occupational diseases of the musculoskeletal system and adjacent structures caused by the influence of a number of harmful production factors. Lecture 6. Physical, chemical and biological factors in the process of production activities]. *Ukrainskyi revmatolohichnyi zhurnal*, 6(24), 25–29. Retrieved from <https://www.rheumatology.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/magazine/24/367.pdf> [in Ukrainian].

24. Povsheniuk, A. V., Shinkaruk-Dykovytska, M. M., & Pavliuk, D. D. (2024). Prevalence of musculoskeletal and nervous system disorders among dentists [Prevalence of musculoskeletal and nervous system disorders in dentists]. *Reports of Vinnytsia National Medical University*, 28(1), 109–112. [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2024-28\(1\)-19](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2024-28(1)-19) [in Ukrainian].

25. Pochynok, Y. (2020). Ergonomic conditions for creating a safe educational environment in primary school as a factor in combating bullying [Ergonomic conditions for creating a safe educational environment in primary school as a factor in combating bullying]. *Pedagogy of the Formation of a Creative Person in Higher and Secondary Schools*, 3(70), 98–103. <https://doi.org/10.32840/1992-5786.2020.70-3.18> [in Ukrainian].

26. Cheberichko, S., Deriuhin, O., Tretiak, O., & Mukha, O. (2020). Otsinka erhonomichnykh ryzykiv zdoroviu robitnykiv avtoservisu [Assessment of ergonomic health risks for car service workers]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(15), 155–164. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.403> [in Ukrainian].

27. SoterAI – Leading AI tool for workplace safety (n.d.). SoterAI. Retrieved from <https://ai.soter.com/auth/sign-in>.



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу  
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 08.12.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.12.2025  
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026