

VALÓS IDEJŰ BIOMECHANIKAI MONITOROZÁS ÉS INTELLIGENS VISSZACSATOLÁSI RENDSZEREK A VÁZIZOMRENDSZERI MEGBETEGEDÉSEK CSÖKKENTÉSE ÉRDEKÉBEN A FOGÁSZATI SEKTORBAN

Pelle Rita*, Kiss Rita M.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék



DOI: 10.17489/biohun/2025/1/618

Absztrakt

Sok fogászati szakember szenved foglalkozás eredetű vázizomrendszeri megbetegedéstől (MSD) különösen a nyak, a vállak és az ágyéki gerinc területén. A probléma hátterében a hosszan tartó statikus testhelyzet áll. A hagyományos értékelési módszerek nem képesek az MSD-k mögött meghúzódó biomechanikai mechanizmusokat számszerűsíteni. Ez az irodalmi áttekintés összefoglalja a fogászati környezetben alkalmazott biomechanikai monitorozásról szóló jelenlegi ismereteket, különös tekintettel a hordozható érzékelőkre (inerciális mérőegységek, felületi elektromiográfia, nyomásérzékelők) és a gépi tanulással történő megközelítésekre. A szakirodalom alapján több érzékelő fúziójával az MSD kockázat osztályozásában akár 99,4%-os pontosság érhető el. Az irodalmi áttekintés eredményei alapján célszerű a kérdőíves megközelítésekről áttérni a valós idejű, szenzor alapú monitorozásra, mesterséges intelligencia alapú prediktív elemzéssel kiegészítve. Az új megközelítés lehetővé teszi a fáradás korai felismerését és a személyre szabott ergonómiai beavatkozásokat.

Kulcsszavak: fogászati ergonómia, biomechanikai mérések a fogászatban, viselhető szenzorok, valós idejű biomechanikai elemzés, mesterséges intelligencia alapú prediktív elemzés

REAL-TIME BIOMECHANICAL MONITORING AND INTELLIGENT FEEDBACK SYSTEMS FOR MUSCULO-SKELETAL RISK REDUCTION IN DENTAL PROFESSIONALS

Abstract

A lot of dental professionals experience occupational musculoskeletal disorder (MSD) risk due to prolonged static postures, affecting particularly the neck, shoulders, and lumbar spine regions. Traditional assessment methods lack quantifying the biomechanical mechanisms behind MSDs.

***Levelező szerző elérhetősége:** Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, H-1111 Budapest, Műgyetem rakpart 3. **E-mail:** pelle.rita@mogi.bme.hu **Tel.:** +36 1 463-2422

Citáció: Pelle R, Kiss RM. Valós idejű biomechanikai monitorozás és intelligens visszacsatolási rendszerek a vázizomrendszeri megbetegedések csökkentése érdekében a fogászati szektorban. *Biomech Hung.* 2025;18(1):22-9.

Beérkezés ideje: 2025.10.11. **Elfogadás ideje:** 2025.12.18.

This literature review summarizes current knowledge on biomechanical monitoring in dental practice, focusing on wearable sensors (inertial measurement units, surface electromyography, pressure sensors) and machine learning approaches. Literature review demonstrates that integration of multiple sensors can achieve up to 99.4% accuracy in MSD risk classification. Findings of the literature review support a shift from questionnaire-based approaches toward real-time sensor based monitoring with AI-driven predictive analytics. The new approach enables early fatigue detection and personalized ergonomic interventions.

Keywords: dental ergonomics, biomechanical measurements in dentistry, wearable sensors, real-time biomechanical analysis, artificial intelligence-based predictive analysis

BEVEZETÉS

A fogorvosok munkájuk jellege miatt jelentős egészségügyi kockázatnak vannak kitéve. Tevékenységüket hosszan tartó, statikus testhelyzetek, gyakran ismétlődő, komplex motoros feladatok jellemzik. A fogászati munka magába foglalja a tartós előrehajlást, az aszimmetrikus ülő pozíciót és a repetitív mozgást, ami jelentős biomechanikai terhelésnek teszi ki a szakembereket.¹⁻³ A fogorvosok körében a mozgásszervi rendellenességek (MSD) előfordulási aránya kiemelkedően magas, 64% és 93% között mozog, leggyakrabban a nyak, a vállak és az lumbális gerincszakasz területét érinti.²⁻⁴ Ennek ellenére a biomechanikai okok feltárása ma még kevésbé kutatott terület.

A kutatások elsősorban önbevallásos fájdalomskálákra és testtartás-megfigyeléses értékelésekre támaszkodnak. Ezen megfigyelési módszerek nem teszik lehetővé a túlterheléses sérüléseket kiváltó izommechanizmusok és kinematikai terhelések pontos megértését. Az újabb kutatások a kiváltó okokat objektív, szenzor alapú megközelítéssel is igyekeznek feltárni. Ez az áttekintés összefoglalja a fogászati biomechanika terén jelenleg rendelkezésre álló ismereteket, különös tekintettel az objektív mérési paraméterekre, a valós idejű megfigyelésekre és az intelligens visszacsatolási rendszerekre. Ezeknek a biomechanikai alapelveknek a megértése szükséges ahhoz, hogy a preventív szemlélet segítségével az MSD előfordulás csökkenjen.

Kutatási kezdeményezésünk a reaktív, kérdőíves munkaegészségügyi megközelítésről a proaktív, valós idejű biomechanikai monitorozás felé történő paradigmaváltást célozza. Mindezt kiegészítve mesterséges intelligenciával támogatott prediktív elemzéssel. A viselhető szenzorok (inerciális mérőegységek, felületi elektromiográfia, rezgésátalakítók, nyomásérzékelők) és gépi tanulási algoritmusok alkalmazásával a módszer lehetővé teszi a munkahelyi biomechanikai mérések számszerűsítését, a fáradtság korai felismerését, és a személyre szabott ergonómiai változtatásokat. Ezek alapján az irodalomkutatás célja a fogászati ergonómiában alkalmazott módszerek áttekintése, trendek felállítása. Három alapvető kutatási kérdés fogalmazható meg: Melyek a fogászati szakemberek körében előforduló leggyakoribb biomechanikai kockázati tényezők és jellegzetes testtartási minták? Mik a jelenlegi szubjektív értékelési eszközök korlátai az objektív biomechanikai mérési paraméterekhez képest? Fogászati környezetben hogyan alkalmazhatók a viselhető szenzorok és visszacsatolási rendszerek az MSD-kockázatok csökkentésére? A jelen elemzés kizárólag a fizikai ergonómiai tényezőkre és a vázizomrendszer egészségére korlátozódik, más foglalkozási veszélyeket nem érint, ezért kutatásunk nem teljeskörű és szisztematikus.

MÓDSZEREK

Az irodalomkutatás a PubMed, IEEE Xplore, Scopus és Web of Science elektronikus adatbázisokban történt. A fogászati ergonómia, biomechanikai mérések a fogászatban, viselhető szenzorok, valós idejű biomechanikai elemzés, mesterséges intelligencia alapú elemzés kulcsszavak használatával. A keresési stratégia vegyes módszert alkalmazott, kiválasztva azokat a publikációkat, amelyek a hordható érzékelők és/vagy háromdimenziós mozgáselemzés felhasználásával végzett kutatásokkal foglalkoznak. Tizenhat fogászati szektor specifikus publikáción túl bevonásra került öt 2022-2025 között publikált és egy 2005-ből származó nem fogászati szektor specifikus cikk. Irodalmi összefoglalás a mérnöki ismeretek bemutatása mellett a fogászati szakemberek körében előforduló mozgásszervi rendellenességek prevalenciájára is kiterjed, különös tekintettel az európai országok adataira. A nem angol nyelveken írt publikációk kizárásra kerültek.

EREDMÉNYEK

A fogászati szakemberek munkakörnyezete biomechanikai szempontból korlátozott. A szakemberek gyakran kényszerülnek munkavégzésük során statikus, természetellenes testhelyzetek felvételére. A természetellenes testhelyzetek közé tartozik a hosszan tartó előre döntött fej- és nyak, a törzs aszimmetrikus oldalirányú dőlése és elfordulása, valamint a vállmagasság fölé emelt karokkal végzett munka.⁵ A felsorolt természetellenes testhelyzetek tartós fennállása fokozatosan növekvő vázizomrendszeri terhelést okoz. A nyak előre hajlítása és a vállak abdukciója a vázizomrendszeri megbetegedések (MSD) kialakulásának elsődleges biomechanikai kockázati tényezői.^{5,6} Nyugat-európai országokból származó epidemiológiai adatok rámutatnak a vázizomrendszeri megbetege-

dések (MSD) kritikusan magas előfordulási arányára a fogászati szakemberek körében. Egy németországi tanulmány 12 hónapos prevalencia értékekről számolt be, ahol a nyakfájdalom a fogorvosok 70,9%-át, a váll- 55,6%-át és a derékfájdalom 45,8%-át érintette.⁷ Ezek az eredmények összhangban vannak egy globálisabb vizsgálattal (az idézett publikáció irodalmi áttekintést végzett, az afrikai, ázsiai, közép- és dél-amerikai régiókat kihagyva), amely szerint a nyakfájdalom a fogorvosok 58,5%, a derékfájdalom 56,4% és a vállfájdalom 43,1%-t érinti.⁸ Portugál és olasz fogorvosok körében végzett vizsgálatok ezt alátámasztják, mivel az általános vázizom rendszeri panaszok aránya portugál fogorvosok esetén 78,8%, olasz fogorvosok esetén 81,9%. Mindkét populációban a nyakfájdalom a domináns tünet (65,3% - 61,4% portugál, olasz sorrendben), míg a vállfájdalom 49,4% és 39,2%, a lumbális fájdalom 52,4% és 39,2%-os előfordulást mutat. A kutatás további eredménye, hogy a 40 év feletti, valamint a több mint 20 éves klinikai tapasztalattal rendelkező fogorvosoknál az MSD-k kialakulásának kockázata szignifikánsan magasabb, ezzel is alátámasztva a korábbi adatokat.⁹

A Nordic Musculoskeletal Questionnaire, a Rapid Upper Limb Assessment és a Rapid Office Strain Assessment alapszintű ergonómiai osztályozást adnak, nem képesek rögzíteni a mozgásokat valós időben vagy a rövid távú fáradás kialakulásának mintázatait.¹⁰ Az önbevalláson alapuló kérdőívek a betegségek prevalenciájának vizsgálatában elterjedtek. Viszont eredményeik felhasználhatósága korlátozott, mivel szubjektív torzítást hordoznak, és nem eredményeznek átfogó, megbízható becsléseket. A hagyományos módszerek korlátai IMU- valamint EMG-alapú mérésekkel csökkenthetők, amelyek valós idejű visszajelzést adnak, továbbá az állapotváltozások előrejelzésére is használhatók.¹¹ Objektív megfigyelések során egyik elsődlegesen hasz-

nált szenzor az inerciális mérőegység (IMU), amely jellemzően gyorsulásmérő, giroszkóp és magnetométer kombinációja.¹¹ Fogorvostan hallgatókon végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy egyes anatómiai pontokon (pl. a C7 és L5 csigolyákon) elhelyezett IMU-k képesek pontosan mérni a csigolyák pozícióját, és a szenzoradatokból számított orientáció alapján Euler-szögek használatával az ízületi szögek is meghatározhatók.^{3,12} Ezek a rendszerek általában 50–200 Hz közötti mintavételezési frekvenciával működnek, így a finom mozgások és változások is követhetők.¹¹

A felszíni elektromiográfia (sEMG) az izomaktivációs mintázatok folyamatos rögzítésére használható. Az izomfáradás az sEMG-ből származó jel frekvenciatartománybeli változásaival objektíven azonosíthatók. Ugyanis a teljesítménysűrűség-spektrum medián frekvenciájának csökkenése az izomfáradás jele.¹³ A fogorvosok izomaktivitási mintázatai azt mutatják, hogy a beavatkozások során a felső csuklyásizom, a fejbiccentő izom és a gerincfeszítő izmok tartós igénybevétele a jellemző. Felületi elektromiográfiás (sEMG) vizsgálatok még az alacsony fizikai igénybevételű feladatok közben is fokozott izomfeszülést mutatnak.¹⁴ További biomechanikai kockázat a használt kézidarabokból származó vibráció, amire a jelen irodalomkutatás nem terjed ki. A nagy sűrűségű (High-Density) sEMG-t alkalmazó mérési módszerrel az izomaktivitás térbeli átrendeződése is elemezhető, amely az izom fáradását pontosabban előrejelzi.¹⁵ Fogászati munka közben elvégzett felületi EMG vizsgálatok spektrálanalízisét a teljesítményszakasz mediánjának balra tolódása jelzi. Míg a klasszikus fáradási vizsgálatok esetén jellemzően az EMG amplitúdó növekedése várható, az alacsony szintű monoton feladatok gyakran komplex amplitúdó viselkedést mutatnak. Ez valószínűleg a hosszú terhelhetőségű, alacsony küszöbértékű I. típusú rostok bevonásának, és nem pedig

további magas küszöbértékű izomegységek bevonásának köszönhető.¹⁶ Fogászati szakemberekre fókuszáló további kutatás a felszíni elektromiográfia (sEMG) használatával a musculus splenius capitis esetén elemezte az izomaktivációs mintázatok időbeli felbontását és becslést adott az ízületi nyomatékokra is. A publikációban megadták a normalizált RMS amplitúdót (izomterhelési paraméter), amelyet az izomaktivitás és a számított mechanikai terhelés összehasonlítására használtak.¹

AZ IMU és az sEMG alapú mérés is kiegészíthető nyomásérzékelőkkel történő méréssel, az érzékelők mátrix elrendezésben, ruházatba, kesztyűbe vagy cipőtalpbetétkébe vannak ágyazva. Segítségükkel manuális feladatok végzése során a talp nyomáeloszlása feltérképezhető. A multimodális szenzorfüzió – IMU-kból származó kinematikai, sEMG-ből származó kinetikai adatok együttes elemzése – átfogó biomechanikai jellemzést tesz lehetővé. Ilyen átfogó eredmények kinyerése egy szenzoros rendszerek segítségével nem lehetséges.¹¹

A fogorvostanhallgatókon végzett kutatás jól mutatta, hogy a viselhető szenzorokkal történő méréseken alapuló visszajelzésekkel a testtartás javítható: rezgés alapú jelekkel a vizsgált személynek jelezték, ha az IMU által mért nyak vagy hát görbületi szöge egy meghatározott időtartamon (1 percnél tovább) keresztül meghaladta egy előre beállított küszöbértéket (nyakflexió esetén 20° nagyobb szög). A valós idejű jelzés után a hallgatók testtartásukon változtattak, ami a felső csuklyásizom aktivitásának szignifikáns csökkenését eredményezte, még akkor is, ha maga a testtartás változás mértéke csekély volt.¹² Arduino-alapú hordozható dőlésérzékelő eszközök használatakor előre megadott (a konkrét kutatásban >30°) nyaki flexió elérése esetén piezoelektromos érzékelő rezgéssel jelezte a vizsgált személynek a kóros testtartást.¹⁷

Az IMU és sEMG szenzorokkal mért adatok alapján a gépi tanulási algoritmusok (pl. Ridge regresszió) használatával a fizikai fáradtság előrejelezhető.¹⁸ A mesterséges intelligencia és a gépi tanulási módszerek hatékonyan használhatók a foglalkozás-egészségügyi kockázatok előrejelzése és a személyre szabott beavatkozások tervezése során. A testtartást jellemző adatokat, a sEMG-jeleket és nyomásérzékelő adatait együttesen elemző gépi tanulási módszerek akár 99,4%-os pontossággal képesek a mozgásszervi megbetegedések (MSD) kockázatát osztályozni.¹¹ Így a többszörös EMG és kinematikai adatokon alkalmazott gépi tanulási módszerek lehetővé tehetik a tüneti fájdalom kialakulása előtti küszöbértékek előrejelzését.¹⁸

A háromdimenziós mozgás rögzítés (3D mocap) és a mozgás kinematikai paramétereit számító szoftverek (például OpenSim) lehetővé teszik a szögjellegű paraméterek mellett az igénybevételek meghatározását is. A nagysebességű kamerákkal követett különböző anatómiai (C7-es csigolya, acromion, valamint a kar és az alkar) pontokra helyezett markerek lehetővé teszik a felső végtagok kinematikájának leírását. Különböző jellemzők az OpenSim segítségével meghatározhatók, de alkalmas a 3D ízületi nyomatékok számítására inverz kinetikai és dinamikai algoritmusok segítségével.¹⁹

A Rapid Upper Limb Assessment (RULA) és a Rapid Entire Body Assessment-hez (REBA) hasonló szabványosított értékelési módszerek, egységes kategorikus kockázati pontozást tesznek lehetővé. A hagyományos megfigyelési módszerek helyett a személyre helyezett szenzorokból származó adatok alapján meghatározott testtartási szögek, izomaktivitás és terhelési paraméterek kockázati pontszámokká alakíthatók. Ami lehetővé teszi a különböző munkapozíciók és fogászati szakterületek objektív összehasonlítását.^{3,20}

Fogászati szektor esetén a specifikus objektív adatokat szolgáló megfigyelési módszerek eredményeinek összevetése a szubjektív vizsgálatokból származó adatokkal szűk irodalmi háttérrel rendelkezik. Léteznek olyan fogászati szakembereken végzett tanulmányok, amelyek az önbevalláson alapuló fájdalomskálákat (szubjektív adat) a fogászati beavatkozások közben egyidejűleg rögzített kinematikai paraméterekkel (objektív adat) hasonlítják össze.^{1,21} Ezek a kutatások feltárták, hogy fogászok esetén az sEMG amplitúdó jelentősen alábecsülheti a nyaki gerincet érő terhelést a számított ízületi nyomatékokhoz képest. Ez a felismerés magyarázatot adhat arra, miért magas a fájdalom prevalenciája a látszólagos alacsony izomkifejtés ellenére is.¹ A statikus izomterhelés időtartama – amely az izmok meghatározott küszöbérték feletti aktiváltságának százalékos arányaként jellemezhető – szorosabb összefüggésben állhat a foglalkozási eredetű fájdalommal, mint az izmok maximális aktiváltsági szintje. Kinematikai vizsgálatok megerősítik, hogy a fogászati munka aszimmetrikus terhelési mintázatokkal jár, például jelentős domináns oldalra történő törzs csavarodással.²² Az aszimmetrikus testtartás is összefüggésben áll a prevalencia adatokkal, ugyanis a fájdalom gyakran a megfelelő domináns oldalon jelentkezik (például a jobb vállban).⁷ Ezek az eredmények azt sugallják, hogy az izomaktiváció időbeli megoszlása és a terhelési aszimmetria hatékonyabb prediktor lehet a szubjektív tünetek súlyosságának előrejelzésében, mint az amplitúdó értékek. Egyes kutatók szerint a fogorvosoknál jelentkező vázizomrendszeri sérülések fő kiváltó mechanizmusa a hosszan tartó statikus testhelyzet. Ennek a folyamatnak a biológiai jelzői közé tartozik az iszkémia, az ellentétes izomcsoportok aszimmetrikus megfeszülése és elernyedése, valamint az ízületi hypomobilitás, oka a semleges testhelyzettől való eltérések, különösen az előre döntött fej, a vállak flexiója, abdukciója és a törzs rotáció-

ja. Ezek együttesen növelik a porckorongokra ható erő nagyságát és krónikus fájdalmat eredményezhetnek.²¹

MEGBESZÉLÉS

A fogorvosoknál dokumentált magas MSD prevalencia és kóros biomechanikai tényezők jelentős hatása ellenére kevés kutatás foglalkozik ezzel a kérdéssel. Véleményünk szerint fogászati munka közben végzett műszeres mérések alkalmazása korlátozott, mivel a korábbi kutatások nem végeztek átfogó, feladat/szektor specifikus mozgáselemzést, amely integrálná a testtartás rögzítését, az EMG-t, a és a nyomáeloszlás mérését. A fogorvos-asszisztens együttműködés biomechanikája szintén nem megfelelő mértékben kutatott: a koordinált mozgásminták és azok hozzájárulása az egyéni ergonómiai terheléshez még nem került tanulmányozásra. A kutatási célunk átfogó szenzorfüzión alapuló monitorozás megvalósítása, prediktív elemzés segítségével személyre szabott beavatkozási tervekkel és valós klinikai validációval.

A jövőbeli kutatásoknak a következő kérdésekre kell választ adniuk: Hogyan lehet gépi tanuláson alapuló prediktív módszerekkel valós idejű szenzorfüzión alapuló biomechanikai monitorozás segítségével jellemezni a fogászati ergonómiai kockázatokat,

lehetővé tenni a fáradtság korai felismerését, és személyre szabott beavatkozásokkal csökkenteni a vázizomrendszeri rendellenességek előfordulását? Melyek azok a biomechanikai paraméterek (például gerinc hajlítási szögek, váll elmozdulás, izomaktivációs minták) a különböző fogászati szakterületeken (például implantológia, endodontia, általános fogászat, esztétikai fogászat) amelyek jól korrelálnak az önbevallásos fáradtsággal és fájdalommal? Hogyan befolyásolják a fogorvos és asszisztens mozgáskoordinációs mintái, valamint a páciens pozicionálása az egyéni testtartás okozta vázizomzati terhelést és annak eloszlását, és milyen konkrét munkafolyamat-módosításokkal javítható a munkafolyamat ergonómiája?

ÖSSZEFOGLALÁS

Fogorvosok esetén a vázizomrendszeri megbetegedések (MSD) magas előfordulása jól dokumentált. Ennek ellenére a szakirodalomban az átfogó, feladat-specifikus mozgáselemzés, a fáradást előrejelző modellek hosszú távú klinikai validációja egyaránt hiányos. A fogorvos-asszisztens együttműködés biomechanikája és az együttes mozgásminták még nem kerültek szisztematikus vizsgálatra. A jövőbeli kutatásoknak ezekre a kérdésekre érdemes összpontosítaniuk, így csökkentve a fogászati munkával kapcsolatos vázizomrendszeri megbetegedések kialakulását, és segítve annak kezelését.

A szerzők részvétele: P.R.: koncepció összeállítása, kéziratkészítés, szakirodalom feldolgozása K.R.: tudományos vezető, kéziratkészítés, szakirodalom feldolgozás kontroll.

Köszönetnyilvánítás: -

Támogatás: A kutatás az NKFIH 146308 számú Képpontoktól az elemzésig: markermentes sportteljesítmény vizsgálat a pályán című kutatáshoz kapcsolódik.

Összeférhetetlenség: Nincs.

IRODALOM

1. *Finsen L.* Biomechanical aspects of occupational neck postures during dental work. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 1999 Mar 20;23(5):397–406.
2. *Pejčić N, Jovićić MĐ, Miljković N, et al.* Posture in dentists: Sitting vs. standing positions during dentistry work-An EMG study. *Srp Arh Celok Lek*. 2016;144(3–4):181–7.
3. *Lazar (Cateanu) AM, Repanovici A, Baritz MI, et al.* Postural Risks in Dental Practice: An Assessment of Musculoskeletal Health. *Sensors*. 2024 Jan;24(19):6240.
4. *Bhatia V, Vaishya RO, Jain A, et al.* Identification of prevalence of musculoskeletal disorders and various risk factors in dentists. *Heliyon*. 2024 Jan 15;10(1):e23780.
5. *Gupta A, Bhat M, Mohammed T, et al.* Ergonomics in Dentistry. *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry*. 2014 Apr 26;7(1):30.
6. *Alexopoulos EC, Stathi IC, Charizani F.* Prevalence of musculoskeletal disorders in dentists. *BMC Musculoskelet Disord*. 2004 Jun 9;5:16.
7. *Ohlendorf D, Naser A, Haas Y, et al.* Prevalence of Musculoskeletal Disorders among Dentists and Dental Students in Germany. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(23):8740.
8. *Lietz J, Kozak A, Nienhaus A.* Prevalence and occupational risk factors of musculoskeletal diseases and pain among dental professionals in Western countries: A systematic literature review and meta-analysis. *PLoS One*. 2018;13(12):e0208628.
9. *Bracciale A, Manso MC, Bracciale F, et al.* Prevalence of Self-Reported Musculoskeletal Disorders in Dentists-A Cross-Sectional Study in Portugal and Italy. *Healthcare (Basel)*. 2025 Apr 28;13(9):1020.
10. *Danylaq S, Walsh LJ, Zafar S.* Measuring ergonomic interventions and prevention programs for reducing musculoskeletal injury risk in the dental workforce: A systematic review. *J Dent Educ*. 2024 Feb;88(2):128–41.
11. *Babangida AA, Caraballo-Arias Y, Decataldo F, et al.* Advancing Occupational Medicine through Wearable Technology: A Review of Sensor Systems for Biomechanical Risk Assessment and Work-Related Musculoskeletal Disorder Prevention. *ACS Sens*. 2025;10(8):5410–32.
12. *Tuğen D, Murphy SJ, Bowers RD, et al.* Feasibility Study for Wearable Sensor-Based Vibrotactile Feedback for Posture and Muscle Activation in a Relevant Dentistry Setting. *Sensors*. 2025 Jan;25(18):5891.
13. *Silva L, Dias M, Folgado D, et al.* Respiratory Inductance Plethysmography to Assess Fatigability during Repetitive Work. *Sensors (Basel)*. 2022 Jun 2;22(11):4247.
14. *Lee JM, Son K, Kim JW, et al.* Does an Ergonomic Dentist Stool Design Have a Positive Impact on Musculoskeletal Health During Intraoral Scans and Tooth Preparation? *Int J Prosthodont*. 2024;37(6):644–9.
15. *Corvini G, Arvanitidis M, Falla D, et al.* Novel Metrics for High-Density sEMG Analysis in the Time-Space Domain During Sustained Isometric Contractions. *IEEE Open J Eng Med Biol*. 2024;5:760–8.
16. *Hostens I, Ramon H.* Assessment of muscle fatigue in low level monotonous task performance during car driving. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2005 Jun 1;15(3):266–74.
17. *Qutieshat A, Al-Busaidi R, Al-Ghammari S, et al.* Real-Time Wearable Cervical Posture Monitoring in Dentistry: A Prospective Usability Trial with Dental Students. *Eur J Dent*. 2025 Oct 22;
18. *Nair SP, Sica M, Tedesco S, et al.* Machine Learning Physical Fatigue Estimation Approach Based on IMU and EMG Wearable Sensors. *Irish Conference on Artificial Intelligence and Cognitive Science*. 2024
19. *Gholami M, Choobineh A, Karimi MT, et al.* Investigating Glenohumeral Joint Contact Forces and Kinematics in Different Keyboard and Monitor Setups using Opensim. *J Biomed Phys Eng*. 2023 Jun;13(3):281–90.

20. Kaviandost P, Vyas S, Chileveru K, *et al.* Posture, Precision, and Prevention: A Comprehensive Review of Dental Ergonomics. *Saudi Journal of Oral and Dental Research*. 2025. 10(5): 248-254.
21. Valachi B, Valachi K. Mechanisms leading to musculoskeletal disorders in dentistry. *J Am Dent Assoc*. 2003 Oct;134(10):1344–50.
22. Ohlendorf D, Erbe C, Nowak J, *et al.* Constrained posture in dentistry - a kinematic analysis of dentists. *BMC Musculoskelet Disord*. 2017 Jul 5;18(1):291.