

Inovativní přístupy k prevenci zranění u náročných profesí: Biomechanická a elektrofyziologická měření

Lýdie Leová , Petr Volf, Marek Sokol, Jan Hejda, Patrik Kutílek

České vysoké učení technické v Praze,

Fakulta biomedicínského inženýrství

nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno

leovalyd@fbmi.cvut.cz; petr.volf@fbmi.cvut.cz; jan.hejda@cvut.cz; marek.sokol@cvut.cz;
patrik.kutilek@cvut.cz

Souhrn

Současný rozvoj nositelných a telemetrických systémů otevírá nové možnosti pro kontinuální a detailní monitorování lidského organismu. Tyto systémy nacházejí klíčové uplatnění zejména v náročných profesích, jako jsou příslušníci Hasičského záchranného sboru, Policie ČR či ozbrojených sil, kde je kladen extrémní důraz na bezpečnost a fyzickou připravenost. Z hlediska funkčnosti lze tyto technologie rozdělit na systémy sledující fyziologický stav (srdeční frekvence, dechová aktivita, teplota) a systémy pro hodnocení biomechanického zatížení (analýza pohybu, svalová aktivita a postura). V praxi se využívá spektrum zařízení od běžně dostupných komerčních trackerů (hodinky, prsteny) přes certifikované zdravotnické přístroje až po specializované výzkumné systémy integrované přímo do výstroje. Vývoj těchto technologií vyžaduje testování v laboratorních, simulovaných i reálných podmínkách, aby byla zajištěna jejich robustnost a ergonomie.

Přestože nositelné systémy přináší řadu výhod v podobě např. včasné identifikace přetížení, únavy či stresu a umožňuje optimalizaci pracovního režimu, čelí i významným výzvám. Mezi hlavní slabé stránky patří dodatečná hmotnostní zátěž pro zasahujícího, náročná interpretace zašuměných dat v terénu, potřeba individuální kalibrace a zajištění ochrany osobních údajů.

Budoucí vývoj směřuje k modulárním a snadno integrovatelným systémům, které vyžadují úzkou spolupráci výzkumu, výrobců a koncových uživatelů. Takto koncipované systémy pak mohou sloužit jako efektivní nástroj pro prevenci zranění a zvyšování celkové operační schopnosti zasahujících v kritických situacích.

Klíčová slova: nositelné systémy, prevence zranění, IZS, monitoring fyziologických dat, monitoring biomechanických dat

Současné technologie pro měření dat

Současný rozvoj technologií a nositelných systémů umožňují detailní a kontinuální monitorování fyziologických funkcí a pohybových dat jedince v reálných i experimentálních podmínkách [1]. Tyto technologie nacházejí uplatnění nejen ve sportu, každodenním životě, zdravotnictví, ale také a ve i v oblastech jako jsou náročné profese (např. hasiči, policie, vojáci atd.) [2].

Z hlediska funkce a využití lze současné přístupy rozdělit do dvou hlavních skupin:

- (1) systémy pro monitorování fyziologického stavu a
- (2) systémy pro hodnocení pohybu a biomechanického zatížení.

Oba přístupy umožňují:

- (1) preselekcii,
- (2) screening (diagnostiku),
- (3) léčbu (rehabilitaci).

Systémy pro monitorování fyziologického stavu

Tato skupina zahrnuje technologie zaměřené na sledování základních fyziologických parametrů především srdeční a dechové aktivity, jedná se například o srdeční frekvenci, variabilitu srdeční frekvence (HRV), dechovou frekvenci, dále je sledována například tělesná teplota, vlhkost a další [3]. Na základě měřených parametrů jsou určovány odvozené ukazatele jako je například úroveň stresu [4]. Pro tyto účely lze použít komerčně dostupné necertifikované systémy, zdravotnické certifikované systémy či technologie vzniklé v rámci výzkumu a vývoje.

Komerčně dostupná zařízení, jako jsou například hrudní pásy, chytré hodinky nebo náramky, umožňují základní monitoring fyziologických funkcí. Jsou primárně určena pro sportovní aktivity a každodenní použití. Jejich výhodou je dostupnost, jednoduchost použití a možnost dlouhodobého sledování, nevýhodou pak nižší přesnost a omezené možnosti interpretace dat [3].

Naopak zařízení využívaná ve zdravotnictví jsou určena především pro diagnostiku a klinické monitorování. Jedná se například o EKG systémy, monitorování vitálních funkcí nebo specializované diagnostické přístroje. Tyto systémy dosahují vysoké přesnosti a spolehlivosti, jsou však často omezeny na kontrolované prostředí [1].

Systémy vyvíjené v rámci výzkumu jsou často určeny pro specifickou oblast uživatelů, například vojáci, policisté, hasiči. V tomto případě se jedná o pokročilé nositelné systémy, které umožňují sběr dat v extrémních podmínkách (například zásah hasičů, vojenské operace) [5]. Tyto systémy často integrují více senzorů a jsou navrhovány s ohledem na ergonomii, odolnost a minimální omezení uživatele [6, 7].



Obr. 1: A) Komerční systémy - hodinky Garmin, ultra human ring, tričko Hexoskin, systém Cosinus [2].

V kontextu náročných profesí představují tyto systémy významný nástroj pro kontinuální sledování fyziologického zatížení jedince v reálných podmínkách. Umožňují včasnou identifikaci známek přetížení, únavy či stresu, které mohou negativně ovlivnit výkon i bezpečnost. Získaná data tak mohou sloužit jako podklad pro optimalizaci pracovního režimu, plánování regenerace a návrh cílených preventivních opatření s cílem snížit riziko vzniku zranění.

Systémy pro hodnocení pohybu a biomechanického zatížení

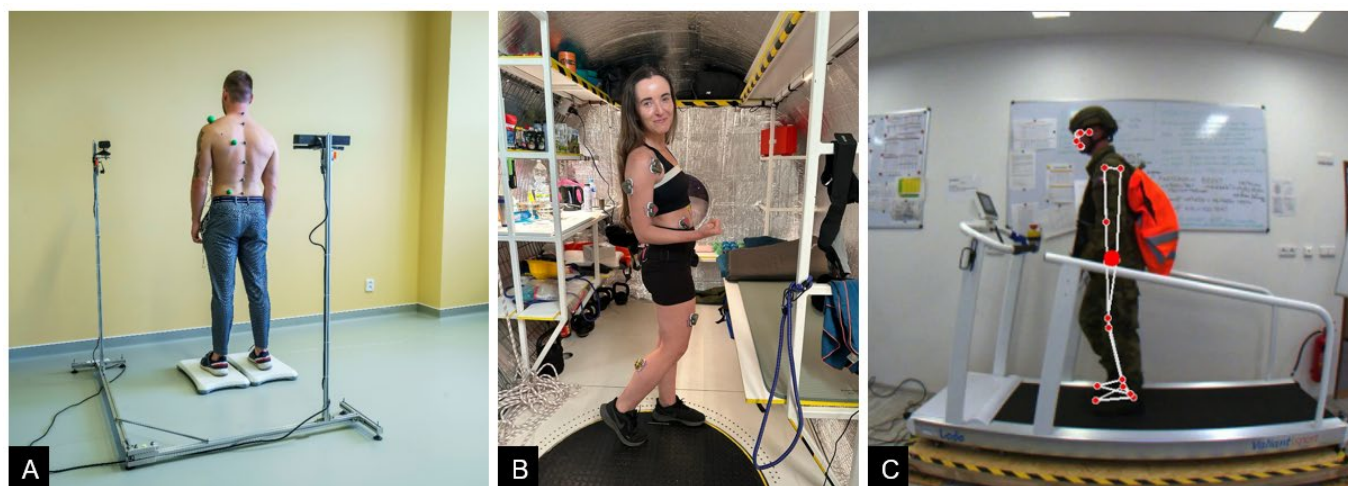
Tato skupina technologií zahrnuje biomechanická a elektrofyziologická měření zaměřená na detailní analýzu pohybu, svalové aktivity a postury jedince [8]. Na rozdíl od čistě fyziologického monitoringu poskytují tyto metody informace o zatížení svalově-kosterního systému a funkčním zapojení pohybového aparátu. Rozdělení technologií pro takováto měření je uvedeno v tab.1.

Tab. 1: Přehled biomechanických a elektrofyziologických měření používaných pro hodnocení pohybu a svalové aktivity.

Biomechanická měření	Elektrofyziologická měření
<ul style="list-style-type: none"> kinematické ukazatele (rozsah pohybu, rychlost, zrychlení nebo trajektorie pohybů segmentů těla) kinetické ukazatele (síly a momenty působící na svalově kosterní systém) charakteristiky koordinace pohybu a pohybové stereotypy, včetně detekce asymetrií či kompenzačních mechanismů. 	<ul style="list-style-type: none"> ukazatele časování svalové aktivity, intenzita zapojení jednotlivých svalových skupin, ukazatele svalové únavy a změny neuromuskulární kontroly.

Charakteristiky uvedené v tab.1. jsou klíčové pro identifikaci nevhodných hodnot ukazatelů, jako jsou charakteristiky pohybových vzorců, které mohou vést k chronickému přetížení nebo akutnímu zranění. Mezi nejčastěji používané technologie v oblasti monitoringu náročných profesí patří:

- inerciální senzory (IMU) pro sledování pohybu v terénu,
- EMG senzory pro měření svalové aktivity [9],
- optické a markerové kamerové systémy pro detailní kinematickou analýzu [10, 11],
- stabilometrické plošiny pro hodnocení posturální kontroly [12].



Obr. 2: A) Optický kamerový systém ve spojení se stabilometrickou plošinou pro hodnocení posturální stability a držení těla; B) EMG senzory pro měření svalové aktivity; C) analýza chůze na běžeckém pásu s využitím markerless/motion capture systému pro hodnocení kinematiky pohybu.

V kontextu náročných profesí umožňují tyto technologie identifikovat přetěžované části těla a odhalovat nevhodné pohybové strategie, zejména při manipulaci se zátěží nebo pohybu v náročném prostředí. Současně poskytují možnost sledovat vliv únavy na kvalitu prováděného pohybu. Na základě

získaných dat lze následně navrhovat cílená preventivní opatření, která přispívají ke snížení rizika vzniku onemocnění, zranění a k optimalizaci pracovního výkonu jedince.

Výběr senzorů a systémů v závislosti na sledovaných parametrech

Volba vhodných technologií pro monitorování fyziologického a biomechanického stavu závisí především na typu sledovaných parametrů a cíli měření. V praxi je tedy možné využít širokého spektra senzorů a systémů, které se liší principem měření, přesností i možnostmi nasazení v reálných podmínkách. Zásadní roli hraje rovněž prostředí, ve kterém jsou technologie používány, a požadavky na mobilitu, odolnost a míru omezení uživatele [13].

Pro komplexní hodnocení zatížení jedince v náročných profesích je žádoucí kombinovat více typů měření zahrnujících fyziologické, biomechanické i environmentální parametry. Pro náročné profese přicházejí v úvahu tedy multisenzorické systémy, které umožňují současné sledování vnitřní odezvy organismu, pohybových charakteristik i vlivů okolního prostředí [13].

Pro lepší přehlednost jsou vybrané technologie a senzory rozděleny podle oblasti jejich využití v následující tabulce 2. Toto členění umožňuje lépe pochopit vztah mezi sledovanými parametry a vhodnými technologiemi.

Tab.2: Přehled monitorovacích systémů a využívaných senzorových technologií pro hodnocení stavu uživatele a prostředí

Postulografické systémy	<ul style="list-style-type: none"> stabilometrické plošiny kamery IMU
Systém odhadu psychického stavu	<ul style="list-style-type: none"> kamery mikrofony eye tracking
Nositelný telemetrický systém	<ul style="list-style-type: none"> IMU 24/7; IMU na segmentech těla EMG senzor tenzometrický monitor dechové aktivity EKG senzor 24/7 PPG senzor EDA senzor
Systém měření stavu prostředí	<ul style="list-style-type: none"> teploměr vlhkoměr snímač CO₂

Testování nositelných systémů v experimentálních a reálných podmínkách

V rámci výzkumu a vývoje nositelných systémů pro náročné profese je kladen důraz na jejich systematické ověřování v různých typech prostředí. Cílem je dlouhodobě posuzovat technické i uživatelské vlastnosti zařízení a jejich vhodnost pro monitorování fyziologického a biomechanického zatížení v podmínkách odpovídajících reálnému nasazení.

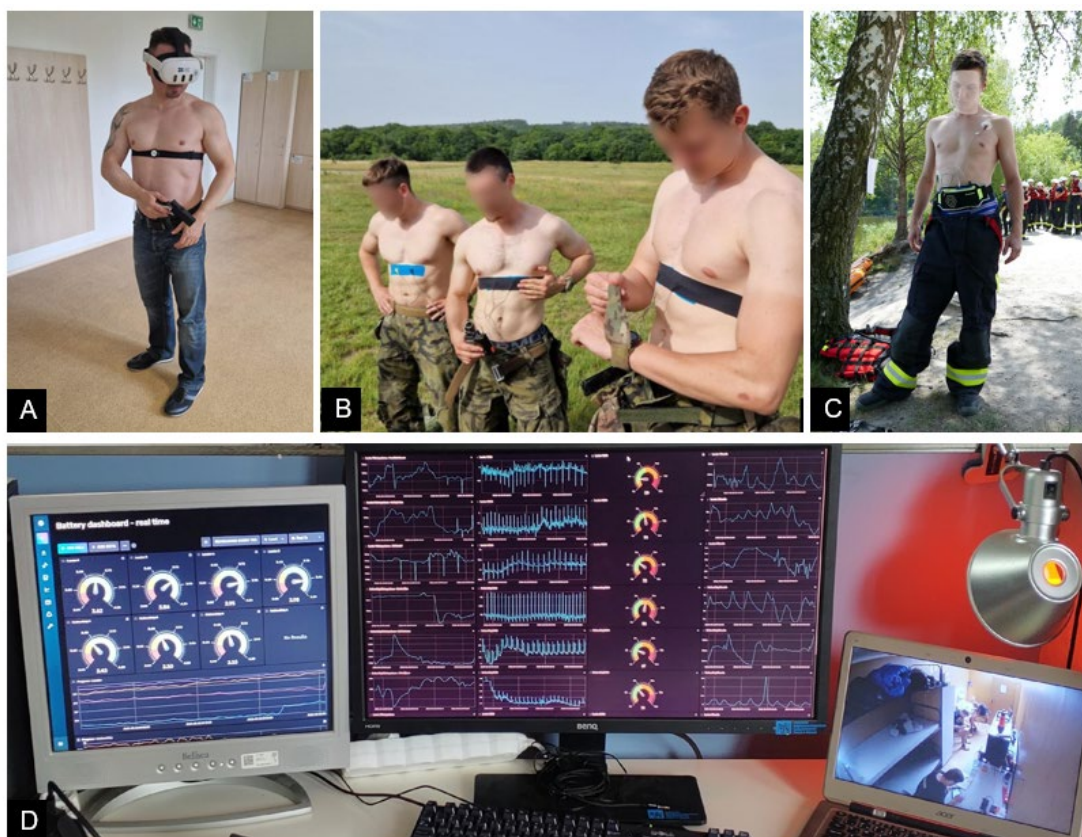
Testování by mělo být zaměřeno zejména na hodnocení kvality a spolehlivosti měřených dat, odolnosti zařízení vůči vnějším vlivům a jejich použitelnosti z hlediska ergonomie a komfortu uživatele. Důležitým aspektem je rovněž posouzení možnosti dlouhodobého monitorování a integrace systémů do stávající výstroje či ochranných prostředků [14].

V rámci těchto aktivit mohou být nositelné systémy průběžně ověřovány ve třech základních typech prostředí. První z nich představují laboratorní podmínky, které umožňují realizaci kontrolovaných experimentů, kalibraci jednotlivých senzorů a ověření přesnosti měření. Tento typ testování poskytuje referenční data a umožňuje detailní analýzu jednotlivých parametrů [3].

Další úroveň tvoří testování v simulovaném prostředí, které umožňuje modelovat specifické scénáře odpovídající reálným situacím, jako jsou krizové zásahy nebo zátěžové úkoly. Výhodou tohoto přístupu je možnost opakovatelnosti experimentů při současném zachování relativně realistických podmínek [15, 16].

Klíčovou roli pak hraje ověřování systémů v reálných podmínkách, například během výcviku příslušníků ozbrojených složek, v průběhu analogových misí nebo při specializovaných činnostech, jako jsou dekontaminační postupy. Tyto situace umožňují hodnotit funkčnost systémů při vysoké fyzické i psychické zátěži a zohlednit vliv ochranných prostředků a výstroje na kvalitu měření [2, 6, 7, 9].

Dlouhodobé zkušenosti z těchto aktivit ukazují, že zatímco laboratorní testování je nezbytné pro ověření přesnosti a funkčnosti jednotlivých komponent, reálné podmínky kladou zásadní nároky na robustnost, spolehlivost a praktickou využitelnost systémů. Kombinace různých typů testování tak představuje nezbytný předpoklad pro jejich efektivní implementaci do praxe.



Obr. 3: A) Využití monitoru stresu a kognitivní zátěže v rámci výcviku policistů ve VR; B-C) Monitoring fyziologických dat během výcviku vojáků a členů IZS; D) systém pro monitor fyziologických dat týmu.

Závěr

Nositelná zařízení představují perspektivní nástroj pro monitorování fyziologického a biomechanického zatížení osob vykonávajících náročné profese, zejména v oblasti IZS. Na druhou stranu však tyto systémy přinášejí i řadu omezení. Souhrn hlavních silných a slabých stránek nositelných systémů je uveden v tabulce 3.

Tab. 3: Souhrnný přehled silných a slabých stránek NS.

Silné stránky	Slabé stránky
<ul style="list-style-type: none">• aktuální přehled o zdravotním stavu jedince• zpětný záznam pro pozdější analýzu a hodnocení• bezdrátový přenos• lokalizace a klasifikace aktivit zasahujících na místě události• možnost monitorování externích rizik• možnost integrace do výstroje• predikce vývoje zdravotního stavu• optimalizace výkonu zpětnou vazbou• preselekce	<ul style="list-style-type: none">• další zařízení, které může být pro zasahující zatěžující (hmotnost, údržba, překážení atd.)• výběr vhodných metod pro interpretaci naměřených dat (šum, nepravdivé hodnoty atd.)• zajištění ochrany osobních údajů• individuální kalibrace• nekonzistentní požadavky jednotlivých složek• nutná proškolená obsluha

Jejich hlavním přínosem je schopnost poskytovat kontinuální a komplexní informace o stavu jedince i jeho okolí, což vytváří předpoklady pro efektivnější prevenci zranění a optimalizaci výkonu. Významným přínosem je rovněž možnost monitorování externích rizik a integrace systémů přímo do výstroje uživatele. Současně však zůstává řada výzev spojených s jejich praktickým nasazením, zejména v oblasti spolehlivosti měření, interpretací dat, energetické náročnosti a ergonomie. Významnou výzvou zůstává také zajištění ochrany osobních údajů a potřeba individuální kalibrace systémů.

Klíčovým směrem dalšího vývoje je proto integrace robustních, modulárních a uživatelsky přívětivých systémů, které budou schopny dlouhodobě fungovat v reálných podmínkách bez negativního dopadu na činnost uživatele. Efektivní implementace těchto technologií v praxi vyžaduje nejen technický rozvoj, ale také standardizaci přístupů a úzkou spolupráci mezi výzkumnými institucemi, výrobci a koncovými uživateli.

Zdroje:

[1] KUTÍLEK, P., P. VOLF, S. VÍTEČKOVÁ, P. SMRČKA, L. LHOTSKÁ, K. HÁNA, V. KŘIVÁNEK, R. DOSKOČIL, L. NAVRÁTIL, Z. HON and A. ŠTEFEK. Wearable Systems and Methods for Monitoring Psychological and Physical Condition of Soldiers. *Advances in Military Technology*, 2017, 12(2), pp. 259-280. DOI 10.3849/aimt.01186

[2] LEOVÁ, L., V. KŘIVÁNEK, H. SCHVACH, M. SOKOL, P. VOLF, J. HEJDA and P. KUTÍLEK. The Use of Wearable Systems for Measuring Biomedical Data in Special Units – Current State and User Evaluation. *Advances in Military Technology*, 2025, 20(2), pp. 511–528. DOI 10.3849/aimt.02024.

[3] LEOVÁ, L., P. VOLF, M. SOKOL, J. HEJDA, J. HYBL, et al. Appropriate Placement of Electrodes for ECG Measurements in Military and Police Force. In: *International Conference on Applied Electronics*. 2024. DOI 10.1109/AE61743.2024.10710307.

[4] SOKOL, M., J. HEJDA, P. VOLF, L. LEOVÁ a P. KUTÍLEK. Efficient Cognitive Load Decoding Using Causal Spatiotemporal Patterns from Multimodal Physiological Signals. *Computers in Biology and Medicine*, 2025. DOI 10.1016/j.combiomed.2025.111063.

- [5] LEOVÁ, L., P. KUTÍLEK, J. HYBL, P. VOLF a J. HEJDA et al. Measuring the Acceleration of Bulletproof Vests: Testing and Biomedical Limits. In: International Conference on Applied Electronics, 2024. DOI 10.1109/AE61743.2024.10710207.
- [6] HEJDA, J., P. KUTÍLEK, P. VOLF, M. SOKOL, L. LEOVÁ, et al. Wearable System for Monitoring the Physical Conditions in Isolated, Confined and Extreme Environments. In: Proceedings of the 2024 21st International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME), 2024. DOI 10.1109/ME61309.2024.10789688.
- [7] SOKOL, M., P. VOLF, J. HEJDA, L. LEOVÁ, J. HÝBL et al. DIANA: An underwater analog space mission. Acta Astronautica, 2025. DOI 10.1016/j.actaastro.2024.10.044.
- [8] LEOVÁ, L., M. SOKOL, J. HEJDA, P. VOLF, P. KUTÍLEK a A. KARAVAEV. IMU and Software for Recording and Evaluating the Movement of the Firearm and Shooter during Shooting. In: Proceedings of the 2022 20th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME), 2022. DOI 10.1109/ME54704.2022.9983176.
- [9] HEJDA, J., M. SOKOL, L. LEOVÁ, P. VOLF, J. TONNER, W. HSU, Y. LIN, T. SUGIARTO, M. ROZLOŽNÍK a P. KUTÍLEK. Multimodal Wearable Monitoring of Exercise in Isolated, Confined, and Extreme Environments: A Standardized Method. In: Proceedings [online]. 2024, 101(1), 15. DOI 10.3390/proceedings2024101015.
- [10] VOLF, P., J. HEJDA, M. SOKOL, L. LEOVÁ, Y. LIN, T. SUGIARTO a P. KUTÍLEK. RGB-D Motion Capture System for Monitoring Health Conditions of Employees in Physically Demanding Professions. In: International Conference on Biomedical and Health Informatics (ICBHI 2024). IFMBE Proceedings, vol 111. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, s. 33–42. DOI 10.1007/978-3-031-86323-3_4.
- [11] HEJDA, J., A. G. FISCHER, L. LEOVÁ, P. VOLF, M. SOKOL a P. KUTÍLEK. Design of a Multimodal Biomechanical System for Predicting Stress Fractures in High-Risk Occupations. In: Proceedings of the 2025 International Conference. IEEE, 2025. DOI: 10.1109/AE66163.2025.11197756.
- [12] HEJDA, J., P. VOLF, M. SOKOL, L. LEOVÁ a P. KUTÍLEK. Spinal Curvature Estimation Using Low-Cost Portable Sensors. In: International Conference on Biomedical and Health Informatics (ICBHI 2024). IFMBE Proceedings, vol 111. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, s. 25–32. DOI 10.1007/978-3-031-86323-3_3
- [13] LEOVÁ, L., P. KUTÍLEK, P. VOLF, J. HÝBL, A. KARAVAEV, S. ČUBANOVÁ, J. HEJDA and M. SOKOL. Smart Wearable Systems for Intervention Units (in Czech). In: Proceedings of the Student Scientific Conference – AWHP 2023. Kladno: Czech Technical University in Prague, 2023, pp. 52-58.
- [14] LEOVÁ, L.; KUTÍLEK, P.; SOKOL, M.; HEJDA, J.; VOLF, P.; FLASAR, Z. Nositelné systémy a jejich využití v rámci Speciálních operačních jednotek: uživatelské, legislativní a ekonomické požadavky v prostředí ČR a EU. SPEKTRUM. 2025, roč. 25, č. 1, s. 9–13. ISSN 1804-1639.
- [15] KUTÍLEK, P.; HON, Z.; LEOVÁ, L.; VOLF, P.; SOKOL, M.; HEJDA, J.; KOTOLOVÁ, V.; STANĚK, M. Monitoring biomedicínských dat a virtuální realita ve výcviku příslušníků policie. SPEKTRUM. 2024, roč. 2024, č. 2, s. 17–23. ISSN 1804-1639.
- [16] LEOVÁ, L.; MOLEK, M.; VOLF, P.; SOKOL, M.; HEJDA, J.; HON, Z.; BUREŠ, M.; KUTÍLEK, P. Monitoring of First Responders Biomedical Data During Training with Innovative Virtual Reality Technologies. Big Data and Cognitive Computing. 2025, roč. 9, č. 10, s. 0–22. ISSN 2504-2289. DOI 10.3390/bdcc9100251.

