

Zastosowanie egzoskieletów w rehabilitacji ruchowej u pacjentów ze stwardnieniem rozsianym

Application of exoskeletons in motor rehabilitation in patients with multiple sclerosis

Artykuł recenzowany

Streszczenie

Stwardnienie rozsiane (SM) jest schorzeniem neurologicznym prowadzącym często do inwalidztwa, dlatego w jego leczeniu dużą rolę odgrywa rehabilitacja. Zarówno neurologi jak i fizjoterapeuci szukają najlepszych metod, by poprawić stan neurologiczny chorych na SM. Naprzeciw tym potrzebom wychodzą nowoczesne technologie, oferując innowacyjne rozwiązanie – egzoskielety. W artykule przedstawiono przegląd wybranych egzoskieletów stosowanych w neurorehabilitacji wraz z najnowszymi doniesieniami naukowymi o efektach przeprowadzanej z ich użyciem terapii u pacjentów z diagnozą stwardnienia rozsianego.

Abstract

Multiple sclerosis (MS) is a neurological disease that often leads to disability, therefore rehabilitation plays a significant role in its treatment. Both neurologists and physical therapists are searching for the best methods to improve the neurological condition of people with MS. Modern technologies meet these needs, offering an innovative solution – exoskeletons. The article presents an overview of selected exoskeletons used in neurorehabilitation together with the latest scientific reports on the effects of therapy performed using exoskeletons in patients diagnosed with multiple sclerosis.

WPROWADZENIE

Stwardnienie rozsiane (SM) jest przewlekłą, nieuleczalną, autoagresywną chorobą demielinizacyjną, na którą zapadają głównie młodzi dorośli. Charakteryzuje się powstawaniem ubytków w strukturze osłonek mielinowych komórek nerwowych ośro-

kowego układu nerwowego wskutek autoimmunologicznej reakcji zapalnej, przez co w wielu przypadkach nieuchronnie prowadzi do pogorszenia jakości życia, niepełnosprawności ruchowej i finalnie do zgonu. Dlatego też w celu spowolnienia przebiegu choroby, złagodzenia objawów, a także odzyskania

DOMINIKA ADAMCZYK¹
JACEK JANKOWSKI¹

¹ Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach

Słowa kluczowe:

rehabilitacja,
stwardnienie rozsiane,
egzoskielety

Keywords:

rehabilitation,
multiple sclerosis,
exoskeletons

przynajmniej częściowo sprawności, obok przewlekłego leczenia preparatami leczniczymi modyfikującymi odpowiedź układu odpornościowego, bardzo ważną rolę powinna pełnić rehabilitacja. Jedną z najnowocześniejszych metod używanych w rehabilitacji zaburzeń ruchowych u pacjentów chorych na stwardnienie rozsiane jest trening z użyciem egzoszkieletu. Obecnie sprzęt ten nie jest jeszcze w Polsce powszechnie używany, m. in. ze względu na wysoką cenę, a także fakt, że efekty treningów przy użyciu egzoszkieletu są wciąż poddawane badaniom klinicznym. Rezultaty badań są obiecujące, co zostanie opisane w dalszych częściach artykułu.

WYBRANE PRZYKŁADY EGZOSZKIELETÓW MEDYCZNYCH

Egzoszkielec to przenośne, mocowane na zewnątrz ciała pacjenta urządzenie zasilane silnikami bądź siłownikami elektrycznymi, które całkowicie bądź tylko częściowo wspomaga ruch kończyn pacjenta, w zależności od pożądanego ustawień, które można modyfikować za pomocą kontrolującego egzoszkielec komputera. Struktura pozwala na wykonywanie chodu oraz innych czynności pacjentom po przebytym udarze, urazie (a nawet przerwaniu) rdzenia kręgowego, cierpiącym na zaburzenia ruchowe z powodu stwardnienia rozsianego oraz innych chorób neurodegeneracyjnych. Istnieją egzoszkielec do rehabilitacji zarówno kończyn dolnych jak i kończyn górnych, natomiast zdecydowanie popularniejsze są te wspomagające funkcję chodu [1].

- **ReWalk** – to stworzona przez izraelską firmę ReWalk Robotics specyficznie i indywidualnie dopasowana do pacjenta bioniczna orteza zasilana baterią. Napędzana jest czterema silniczkami elektrycznymi znajdującymi się na poziomie stawów biodrowych oraz kolanowych, które kontrolowane są przez komputer. Pacjent inicjuje pierwszy krok wychylając górną część ciała do przodu, następnie kontroluje ruch przy pomocy subtelnych zmian w obrębie swojego środka ciężkości. Powtarzalna sekwencja wyżej wymienionych ruchów składa się na imitację naturalnego chodu. W 2017 roku zespół Allana J. Kozłowskiego przeprowadził pracę badawczą na grupie 14 pacjentów z SM. Ocenie poddano m.in. przystępność urządzenia do użytku przez badanych chorych, tolerancję treningu oraz łatwość uczenia się obsługi sprzętu. Przystępność, czyli możliwość uczestnictwa chorych w badaniu, która limitowana była warunkami anatomicznymi – wyniosła 86%, tolerancja 55% (część chorych zrezygnowała z powodu braku możliwości dojazdu lub bólu towarzyszącego terapii), natomiast nauka obsługi we wszystkich przypadkach wymagała zaledwie jednej sesji tre-



Rysunek 1. Egzoszkielec ReWalk – źródło: <https://rewalk.com/>

ningowej. W związku z powyższym ostatecznie do badania zakwalifikowano jedynie pięć osób. Badanie wykazało, że po co najmniej 20 sesjach treningowych z użyciem egzoszkielec ReWalk u czterech z pięciu badanych pacjentów z SM poprawie uległa zdolność utrzymania prawidłowej postawy ciała, a u jednego z nich zanotowano zauważalne usprawnienie przemieszczania się. Pracą badawczą przeprowadzono na bardzo małej grupie chorych, dlatego wymagane są badania na większą skalę, żeby uznać wyniki za znamienne statystycznie [2].

- **Ekso GT/NR** – to egzoszkielec amerykańskiej firmy Ekso Bionics. Konstrukcja i zasada działania podobne są jak w produkcie firmy ReWalk Robotics, jednak egzoszkielec ten dedykowany jest ściśle neurorehabilitacji. Jest to jeden z kilku dostępnych modeli egzoszkielec w Polsce (pozostałe to np. ReWalk, HAL, Indego, FreeWalk) [3]. Wiodącym dystrybutorem na terenie Polski jest firma PHU Technomex Sp. z o. o. Wyniki badania Taimoor Afzal i wsp. opublikowanego w 2019 są następujące: 3-tygodniowy trening z egzoszkieletem Ekso GT/NR u dziewięciu na dziesięciu badanych pacjentów z SM zwiększył płynność i średnią prędkość chodu, co wynikało z mniejszego wydatku energetycznego, którego zmniejszenie korelowało z lepszą koordynacją nerwowo-ruchową [4]. Z najnowszych doniesień naukowych wynika, że egzoszkielec GT/NR jest



Rysunek 2. Egzoszkielet GT/NR – źródło: <https://eksobionics.com>

obecnie poddawany kilku podobnym projektom badawczym bądź niedawno te prace zakończono, lecz nie opublikowano jeszcze wyników badań m. in. przez Francois Bethoux z Cleveland Clinic w USA [5], przez Raket Berriozabalgaitia i wsp. (ADEMBI, Multiple Sclerosis Association of Bizkaia, Bilbao, Hiszpania i in.) – jest to jedno z większych badań z grupą aż 36 chorych, w którym oprócz efektów ruchowych ocenie poddana będzie ewentualna poprawa zdolności poznawczych i jakości życia w subiektywnym odczuciu pacjenta[6]. Nie opublikowano jeszcze także rezultatów projektu badawczego przeprowadzonego w Polsce w Krajowym Ośrodku Mieszkalno-Rehabilitacyjnym dla Osób Chorych na SM w Dąbku we współpracy z polskim dystrybutorem Ekso GT – firmą PHU Technomex Sp. z o. o.

- **Keeogo** – produkt kanadyjskiej firmy B-Temia Inc. to egzoszkielet ubierany na kończynę bądź kończyny dolne przeznaczony dla pacjentów ze stwardnieniem rozsianym lub zaburzeniami neurologicznymi i mięśniowo-szkieletowymi na podłożu innych chorób. Głównym przeznaczeniem urządzenia jest wsparcie pacjenta w czynnościach dnia codziennego tak, by mógł funkcjo-



Rysunek 3. Egzoszkielet Keeego – źródło: <https://keeego.com>, <https://b-temia.com/>



Rysunek 4. Egzoszkielet ExoAtlet i Bambini – źródło: <https://exoatlet.lu/>

nować samodzielnie w domu i nie był wyłączony z życia społecznego. W amerykańsko-kanadyjskim badaniu opublikowanym w 2018 roku Chris A McGibbon i wsp. opisali, że 2-tygodniowy trening w domu z egzoszkieletem Keeego poprawił w grupie pacjentów z SM wydajność chodu i zdolność wchodzenia po schodach bez asysty urządzenia [7]. W odróżnieniu od produktów Ekso i ReWalk urządzenie może być używane tylko przez osoby, które chodzą samodzielnie, a jedynie potrzebują korekty ubytków ruchowych utrudniających poruszanie się.

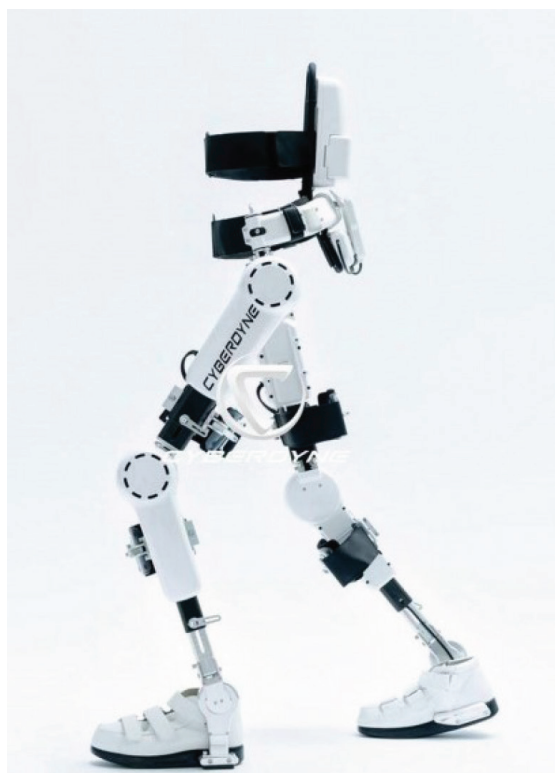
- **ExoAtlet** – egzoszkielec stworzony przez rosyjską firmę o tej samej nazwie. Zaopatrzone zostało w kilka nowoczesnych udogodnień zarówno dla pacjenta, jak i dla fizjoterapeuty prowadzącego rehabilitację: jednostka kontrolująca spastyczność kończyn, ergonomiczne uchwyty na plecach, zdalna kontrola urządzenia przez samego ćwiczącego przy pomocy przycisków na kulkach, jak i z użyciem tabletu przez asystenta oraz wskazówki głosowe korygujące chorego. Ten egzoszkielec przystosowany jest do pokonywania nierównych powierzchni i może być użytkowany na schodach. S. V. Kotov i wsp. (Vladimirsky Moscow Regional Research Clinical Institute w Moskwie) w swojej pracy badawczej z 2017 roku donoszą, że po ukończeniu cyklu rehabilitacji z egzoszkieletem u badanych chorych z diagnozą SM poprawie uległy prędkość i stabilność chodu i zanotowano mniej nasiloną spastyczność. U dziewięciu z osiemnastu badanych uległa nawet zmianie na mniejszą kategorię w rozszerzonej skali niewydolności ruchowej Kurtzkiego (EDSS) [8]. Po trzech latach w tym samym instytucie w Moskwie przeprowadzono nowy projekt badawczy na większą skalę (44 badanych) również z użyciem ExoAtlet, tym razem oprócz parametrów z poprzedniego badania oceniając także wpływ rehabilitacji ruchowej na zdolności poznawcze oraz funkcje ruchowe kończyny górnej – zaobserwowano znaczącą poprawę w powyższych kategoriach [9]. Firma ExoAtlet jest jedną z pierwszych firm na świecie, która zaprojektowała egzoszkielec dla dzieci Bambini.
- **Marsi Active Knee (MAK)** to wyprodukowana przez hiszpańską firmę Marsi Bionics pierwsza robotyczna orteza kolana z funkcją elastycznego uruchamiania stawu kolanowego imitującą czynność mięśni poruszających stawem w naturalnych warunkach. Dzięki bogatemu wyposażeniu w sensory analizuje biomechanikę chodu pacjenta i usprawnia ją. Działa w trzech trybach: Zero force control (F0) bez mechanicznej korekty, M1 z częściową korektą jedynie wspierającą i korygującą ruch pacjenta oraz M3 – całkowita



Rysunek 5. Egzoszkielec Marsi Active Knee (MAK) – źródło: <https://marsibionics.com/>

sztynna korekta nie adaptująca się do ruchów pacjenta. Jest to jeden z lżejszych produktów tego typu na rynku – waży zaledwie 2,8 kg. W 2020 roku G. Puyuelo-Quintana i wsp. przeprowadzili badanie z użyciem tego sprzętu na grupie 5 pacjentów (4 po przebyciu udaru oraz 1 z diagnozą SM). Badano bezpieczeństwo oraz ewentualne efekty uboczne rehabilitacji. Nie zanotowano żadnych działań niepożądanych terapii. Stwierdzono najlepsze efekty rehabilitacji przy użyciu trybu M3[10].

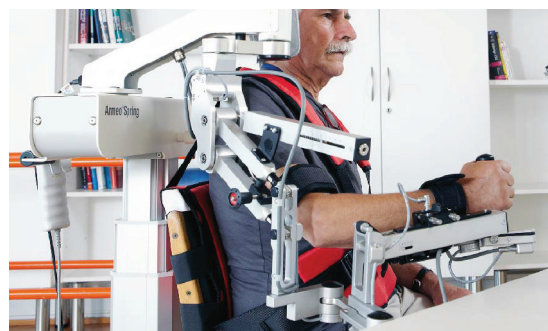
- **The Hybrid Assistive Limb (HAL)** to elektrycznie zasilany egzoszkielec opracowany przez japoński uniwersytet Tsukuba i firmę Cyberdyne. Zasada jego działania jest zupełnie inna niż dotychczas opisywanych w artykule egzoszkielec. Urządzenie oferuje możliwość monitorowania skurczów mięśni za pomocą elektrod EMG umieszczonych na zginaczach i prostownikach kończyn dolnych. To pozwala na wykonywanie ruchów zgodnych z wolą pacjenta, nawet jeśli drogi nerwowe ruchowe i czuciowe są uszkodzone. Impuls z kory ruchowej jest odbierany i wzmacniany przez system HAL, następnie nawet śladowe impulsy nerwowe pochodzące z mięśni są wzmacniane i przewodzone do kory czuciowej mózgu. Przywrócona aktywność neuronalna i powtarzalne wykonywanie specyficznych zadań ruchowych wspomaga proces uczenia się ośrodkowego układu nerwowego odczytywania bodźców proprioceptywnych na nowo, co skutkuje pozytywnym efektem terapeutycznym treningu ruchowego przy pomocy HAL[1,11]. Emre Yilmaz i wsp. w 2019 roku przeprowadzili badanie na



Rysunek 6. Egzoszkielet HAL – źródło: <https://disruptordaily.com/>

grupie pacjentów z deficytami nerwowo-mięśniowymi m.in. u pacjentów z SM. Badano jak składający się z 60 sesji trening na bieżni z użyciem systemu HAL wpłynie na mobilność i jakość życia pacjentów. Efekty oceniano przy pomocy kwestionariuszy (EQ- 5D oraz PROMIS nt. mobilności). Mobilność poprawiła się u pięciu z sześciu badanych, natomiast nie zanotowano znaczącego wpływu na poprawę jakości życia [12].

- **Armeo Spring** – stacjonarna orteza szwajcarskiej firmy Hocoma służąca do neurorehabilitacji kończyny górnej. Dzięki zapewnieniu całkowitej podpory kończynie górnej tak, by zminimalizować obciążenie dla pacjenta wywołane przez sam jej ciężar, Armeo Spring umożliwia chorym wykorzystanie własnych, nawet resztkowych funkcji ruchowych w celu powtarzalnego wykonywania ruchów kończyną górną. W tym celu służą dodatkowo motywujące programy ćwiczeniowe opierające się na rzeczywistości wirtualnej w formie gier wyświetlanych na ekranie komputera, w których pacjent steruje własnym ramieniem, dłonią i palcami. Dość stare badanie (2011) Domiena Gijbelsa i wsp. przeprowadzono na 10 pacjentach ze zdiagnozowanym SM o wysokim stopniu inwalidztwa (7-8,5 w skali EDSS). Rehabilitacja nie wpłynęła na siłę mięśniową, ale badani osiągnęli znaczącą poprawę w testach funkcjonalnych kończyny górnej (m.in. 9-Hole



Rysunek 7. Egzoszkielet Armeo Spring – źródło: <https://hocoma.com/>

Peg Test) [13]. W 2019 roku Ghaith J. Androwis porównali efekty rehabilitacji chodu z użyciem egzoszkieletu z efektami konwencjonalnej terapii (grupa kontrolna) u pacjentów ze stwierdzonym SM. Po 4 tygodniach treningu w grupie pacjentów ćwiczących z egzoszkieletem zwiększeniu uległy: średnia prędkość chodu, długość kroku oraz szybkość stawianiu kroku w warunkach bez wsparcia urządzenia. W grupie kontrolnej natomiast zanotowano jedynie niewielką poprawę jakości chodu[14]. Podobnie jak w wymienionych powyżej projektach badawczych, w badaniu tym wzięła udział niewielka grupa chorych.

■ PODSUMOWANIE

Dane z dostępnego piśmiennictwa dotyczące rehabilitacji z użyciem egzoszkieletów osób z diagnozą SM są w dalszym ciągu zbyt skąpe, żeby z pewnością móc postulować o wyższości tej terapii nad konwencjonalną fizjoterapią. Obserwuje się pozytywny wpływ treningu z egzoszkieletami na wiele funkcji ruchowych zarówno kończyn dolnych jak i górnych, więc na pewno te metody są skuteczne. Dużymi zaletami najnowocześniejszych egzoszkieletów są ich mobilność i możliwość ubierania przez pacjenta, a także komputerowa kontrola zarówno przez fizjoterapeutę, jak i odpowiednio przeszkolonego chorego, co pozwala na pewną niezależność od osób trzecich, która jest tak ważna w procesie terapeutycznym. Niewątpliwą wadą robotycznej fizjoterapii jest bardzo wysoka cena sprzętu i trudna dostępność dla pacjenta. Jedynie akredytowane firmy i ośrodki rehabilitacyjne mają dostęp do tak nowoczesnego, innowacyjnego urządzenia, jakim jest egzoszkielet. Należy z ciekawością śledzić najnowsze plany badań nad ich przydatnością we wspomaganie terapii chorych na stwardnienie rozsiane – zachorowalność na tę chorobę ewidentnie koreluje z rozwojem naszej cywilizacji [15,16], więc z pewnością będzie to temat wciąż zgłębiany przez wielu naukowców. Równocześnie bardzo szybki rozwój nowoczesnych technologii daje wiele możliwości usprawnienia i udoskonalenia

nia urządzeń fizjoterapeutycznych. Egzoszkielety są symbolem „nowej epoki” w rehabilitacji SM i innych chorób neurologicznych, jednak potrzeba więcej badań na dużych grupach chorych, by możliwe było ustalenie, jaki konkretnie egzoszkielet, jak długo i z jaką częstotliwością stosowany, da najlepsze efekty u pacjentów z określonym stopniem niepełnosprawności i konkretnym przebiegiem choroby, a także jakie modyfikacje i ulepszenia pozwolą na osiągnięcie upragnionego celu terapeutycznego, jakim jest niezależność i możliwość niezakłóconego funkcjonowania chorego w społeczeństwie.

PIŚMIENICTWO

- [1] Beata Tarnacka, Paweł Turczyn, Klinika Rehabilitacji I Wydziału Lekarski Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego Mazowieckie Centrum Rehabilitacji STOCER, Oddział Rehabilitacji w Warszawie, Zastosowanie robotyki w rehabilitacji zaburzeń chodu w schorzeniach neurologicznych, *Polski Przegląd Neurologiczny* 2017 14 (2): 63–73. ISSN 1734–5251.
- [2] Allan J. Kozłowski i wsp., Feasibility and Safety of a Powered Exoskeleton for Assisted Walking for Persons With Multiple Sclerosis: A Single-Group Preliminary Study, PMID: 28315666, DOI: 10.1016/j.apmr.2017.02.010, *Archives of physical medicine and rehabilitation* 2017 Jul;98(7):1300–1307.
- [3] Agnieszka Ciukszo i wsp., Zakład Adaptowanej Aktywności Fizycznej i Sportu, Katedra Fizjoterapii, Wydział Nauk o Zdrowiu w Katowicach, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach, Zastosowanie egzoszkieletów w rehabilitacji, Innowacyjne technologie we współczesnej rehabilitacji, Redakcja naukowa: dr hab. n. o zdrowiu Ryszard Plinta prof. nadzw. SUM, ISBN 978-83-7509-349-0
- [4] Taimoor Afzal i wsp., Exoskeleton-assisted Gait Training in Persons With Multiple Sclerosis: A Single- Group Pilot Study, PMID: 31821798, DOI: 10.1016/j.apmr.2019.10.192, *Archives of physical medicine and rehabilitation* 2020 Apr;101(4):599–606.
- [5] Francois Bethoux, MD, The Cleveland Clinic, Pilot Study of Powered Exoskeleton Use for Gait Rehabilitation in Individuals With Multiple Sclerosis, *ClinicalTrials.gov Identifier: NCT04000373*, Last Update Posted: April 7, 2020.
- [6] Rakeł Berriozabalgoitia i wsp., An Overground Robotic Gait Training Program for People With Multiple Sclerosis: A Protocol for a Randomized Clinical Trial, PMID: 32582732, DOI: 10.3389/fmed.2020.00238, *Frontiers of medicine* 2020 Jun 9;7:238.
- [7] Chris A. McGibbon i wsp., Evaluation of the Keeogo exoskeleton for assisting ambulatory activities in people with multiple sclerosis: an open-label, randomized, cross-over trial, PMID: 30541585, DOI: 10.1186/s12984-018-0468-6, *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* 2018 Dec 12;15(1):117.
- [8] S. V. Kotov i wsp., The efficacy of the exoskeleton ExoAtlet to restore walking in patients with multiple sclerosis, PMID: 29359732, DOI: 10.17116/jnevro201711710241-47, *Zhurnal Nevrologii i Psikhiiatrii imeni S.S. Korsakova* 2017;117(10. Vyp. 2):41-47.
- [9] A. A. Gevorkyan i wsp., Robotic mechanotherapy in patients with multiple sclerosis with impaired walking function, PMID: 32790973, DOI: 10.17116/jnevro202012007129, *Zh Nevrol Psikhiatr Im S S Korsakova* 2020;120(7):29-34.
- [10] G. Puyuelo-Quintana i wsp., A new lower limb portable exoskeleton for gait assistance in neurological patients: a proof of concept study, PMID: 32375815, DOI: 10.1186/s12984-020-00690-6, *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* 2020 May 6;17(1):60.
- [11] Matthias Szesny-Kaiser i wsp., HAL® exoskeleton training improves walking parameters and normalizes cortical excitability in primary somatosensory cortex in spinal cord injury patients, PMID: 26289818, DOI: 10.1186/s12984-015-0058-9, *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* 2015 Aug 20;12:68.
- [12] Emre Yilmaz i wsp., Does treadmill training with Hybrid Assistive Limb (HAL) impact the quality of life? A first case series in the United States, PMID: 30044680, DOI: 10.1080/17483107.2018.1493751, *Disability and Rehabilitation Assistive Technology* 2019 Jul;14(5):521-525.
- [13] Domien Gijbels i wsp., The Armeo Spring as training tool to improve upper limb functionality in multiple sclerosis: a pilot study, PMID: 21261965, DOI: 10.1186/1743-0003-8-5, *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* 2011 Jan 24;8:5.
- [14] Ghaieth J. Androwis i wsp., Mobility and Cognitive Improvements Resulted from Overground Robotic Exoskeleton Gait-Training in Persons with MS, PMID: 31946854, DOI: 10.1109/EMBC.2019.8857029, *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology* 2019 Jul;2019:4454-4457.
- [15] D. Kotzamani i wsp., Rising incidence of multiple sclerosis in females associated with urbanization, PMID: 22592376, DOI: 10.1212/WNL.0b013e31825830a9, *Neurology* 2012 May 29;78(22):1728-35.
- [16] N. Koch-Henriksen, P. Soelberg Sorensen, The changing demographic pattern of multiple sclerosis epidemiology, PMID: 20398859, DOI: 10.1016/S1474-4422(10)70064-8, *The Lancet Neurology* 2010; 9: 520-532.

KOMENTARZ RECENZENTA...

Prof. Dr. med. Dr. hc mult. W. Konrad Karcz PHM

Rozwój egzoszkieletów do celów terapeutycznych jest głównym przedmiotem zainteresowania robotyki rehabilitacyjnej. Robotyka rehabilitacyjna jest interdyscyplinarną dziedziną badań łączącą dziedziny elektrotechniki, mechaniki, informatyki, inżynierii biomedycznej, neurobiologii i rehabilitacji. Tematyka badań tej dziedziny nauki obejmuje: Rozwój kinematyki, Kontrole i regulacji pracy robotów, Systemy haptyczne, Dynamiki, Biomechanika, Projektowanie interfejsu użytkownika, Biofeedback, Analiza ruchu i Badania kliniczne. Z pewnością ten temat będzie się pojawiać znacznie częściej w przyszłych publikacjach.