

# Współczesne badanie i modelowanie warunków pracy w obiektach przemysłowych – studium przypadku

Data wpłynięcia do Redakcji: 05/2026  
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 06/2026

2026, volume 15, issue 1, pp. 24-36

**Jolanta Ignac-Nowicka**  
Politechnika Śląska, Poland



**Streszczenie:** W artykule poruszono problem występowania obciążeń statycznych przy wykonywaniu prac ręcznych w procesie produkcyjnym. Analizę obciążeń statycznych z wykorzystaniem analizy komputerowej oprogramowania 3D SSPP przeprowadzono na przykładowym stanowisku pracy, gdzie pracownicy przygotowują profile aluminiowe do anodowania. Analizowana praca ma charakter pracy ręcznej polegającej na mocowaniu profili na ramie. Symulacje komputerowe przeprowadzono dla dwóch postaw przy pracy podczas mocowania profili – stojącej pochylonej oraz w przysiadzie. Wyniki wygenerowano dla najliczniejszej grupy potencjalnych pracowników, tj. dla 50c. W artykule przedstawiono szczegółową analizę występujących obciążeń statycznych dotyczących różnych części ciała pracownika oraz zaproponowano rozwiązania techniczne dla optymalizacji procesu pracy ręcznej i zwiększenia komfortu pracy. Ponadto dokonano przeglądu literatury dotyczącej nowych rozwiązań z zastosowaniem sztucznej inteligencji AI do ergonomicznych analiz pracy ręcznej oraz wskazano kierunki rozwoju automatyzacji procesu takich analiz ergonomicznych.

**Słowa kluczowe:** statyczne obciążenia pracą, symulacja komputerowa obciążeń pracą, AI w ergonomii

## WSTĘP

W przedsiębiorstwach przemysłowych nadal występuje wiele prac wykonywanych ręcznie przez pracowników, co często wpływa na ich przeciążenie podczas pracy. Nadmierne i długotrwałe obciążanie układu ruchu powiązane z podejmowaną pracą może prowadzić do wielu dolegliwości oraz trwałych urazów ciała. Rodzaj obciążenia występuje zależnie od pozycji pracownika przy pracy oraz od częstotliwości i czasu wykonywania danej czynności. Przy czym czas w jakim osoba pozostaje w danej pozycji jest wręcz kluczowy dla zidentyfikowania poziomu intensywności obciążeń. Każda z przyjmowanych pozycji ciała może po dłuższym czasie prowadzić do odczuwania dyskomfortu i zmęczenia daną pozycją.

Komfortowa postawa ciała pracownika zależna jest bezpośrednio od jego cech antropometrycznych, przestrzennej konstrukcji stanowiska pracy oraz charakterem wykonywanych czynności. Dopiero dostosowanie tych trzech czynników do siebie może gwarantować wygodne poruszanie się pracownika w przestrzeni jego pracy oraz dogodne warunki ergonomiczne zapobiegające obciążeniom. Najbardziej optymalną pozycją ciała dla człowieka jest pozycja stojąca z wyprostowanym kręgosłupem. Im bardziej przyjęta pozycja odbiega od

pozycji optymalnej, tym występuje większe obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego. Gdy występuje zwiększona siła wywierana przez pracownika na środki pracy (narzędzia), pogłębia się ewentualna możliwość występowania przeciążeń. Stanowisko pracy powinno być zaprojektowane w taki sposób, aby nie wymagało od pracownika pozostawania w tej samej pozycji w dłuższym czasie – powyżej 3 godzin. Pracownik powinien mieć możliwość wykonywania pracy obiema kończynami tak samo sprawnie, a także zmiany pozycji, przynajmniej w małym stopniu, dla zapewnienia sobie większego komfortu pracy (Ignac-Nowicka, 2017).

### **KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE OCENY OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH DLA PRAC RĘCZNYCH**

Dobór metody oceny obciążenia statycznego dla prac ręcznych zależy od zakresu zaangażowania pracownika w taką pracę np.: przyjmowanie wymuszonej postawy przy pracy lub/i podnoszenie ciężarów itp. (Ignac-Nowicka, 2017, Blaszcok, 2018). Wśród metod oceny ryzyka wystąpienia dolegliwości mięśniowo-szkieletowych można wymienić klasyczne metody: RULA, REBA, OWAS, a także metodę OCRA, NIOSH i KIM (Ignac-Nowicka, 2022). Wiele z nich jest stosowanych w postaci elektronicznej w celu łatwiejszej analizy wielkości całkowitego obciążenia statycznego i oszacowania ryzyka zawodowego z nim związanego w miejscu pracy (Pacana, 2020). Rozwój technik wspomaganie komputerowego pozwala na jeszcze dokładniejsze analizy problemu obciążenia pracownika pracą o charakterze statycznym. Przykładem takiego wspomaganie jest oprogramowanie 3D SSPP (3D Static Strength Prediction Program), które pozwala na analizę obciążeń ciała ludzkiego dla zadań typu podnoszenie, pchanie lub ciągnięcie i wiele innych czynności o charakterze statycznym (Żabińska i in. 2018).

Dzięki wykorzystaniu możliwości programu dokonywana jest symulacja pracy, która obejmuje dane dotyczące: postawy, odpowiednich parametrów użytej siły przez pracownika i jego antropometrii (tj. wymiarów i możliwości ruchowych ciała). W wyniku symulacji otrzymuje się informację o wielkości obciążenia statycznego kręgosłupa, części ciała takich jak: nadgarstek (wrist), łokieć (elbow), ramię (sholder), tułów (torso), biodro (hip), kolano (knee), kostka stopy (ankle) oraz o zachowanym lub nie balansie (równowadze) ciała. Oprogramowanie 3D SSPP (<https://c4e.engin.umich.edu/tools-services/3dsspp-software/> [online]) pozwala na przeprowadzenie symulacji przyjmowanych pozycji ciała przy wykonywaniu danych czynności. Analiza na trójwymiarowych modelach ludzi jest przeprowadzana na podstawie wprowadzanych danych, dotyczących najczęściej przyjmowanej postawy i występowania siły podczas pracy. Uwzględnia się również antropometrię odrębną dla kobiet i mężczyzn. Program 3D SSPP pozwala na uwzględnienie wszelkich skrętów tułowia, rąk, nadgarstków oraz obciążenia kręgosłupa. Wynikiem analizy jest informacja o procencie mężczyzn oraz kobiet, którzy są w stanie wykonywać daną pracę ze względu na wymaganą wielkość siły. Oprogramowanie to jest narzędziem pomocnym przy ocenie wymagań fizycznych do wykonywania danej pracy. Na podstawie wykonanej analizy można wywnioskować jakie czynniki uciążliwe należy wyeliminować lub zminimalizować w procesie pracy. Za pomocą programu 3D SSPP można wyznaczyć graniczną wartość masy podnoszonych ciężarów poprzez ocenę obciążenia kręgosłupa w odcinku lędźwiowym. Wartość dopuszczalna

przenoszonej masy nazywa się zalecaną wartością graniczną RWL (<https://c4e.engin.umich.edu/tools-services/3dsspp-software/>). Na podstawie wartości takich współczynników można stwierdzić konieczność interwencji ergonomicznej.

Oprogramowanie 3D SSPP jest narzędziem pomocnym przy ocenie wymagań fizycznych do wykonywania danej pracy oraz przy przebudowie bądź nowej organizacji miejsca pracy. Na podstawie wykonanej analizy można wywnioskować jakie czynniki uciążliwe należy wyeliminować lub zminimalizować (ergonomia korekcyjna) lub jakie działania są konieczne, aby zapewnić bezpieczeństwo przyszłego stanowiska pracy podczas projektowania (ergonomia koncepcyjna) (Teymourian i in., 2021, Ignac-Nowicka, 2017).

### **ANALIZA PRZYKŁADOWEGO PRZEMYSŁOWEGO STANOWISKA PRACY – CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH POSTAW CIAŁA PRACOWNIKA**

Analiza przemysłowego stanowiska pracy została przeprowadzona na przykładzie prac ręcznych wykonywanych w anodowni przy produkcji profili aluminiowych. Anodowanie to proces obróbki metali, w trakcie którego wytwarza się warstwę tlenku na metalowym profilu, co w efekcie daje element zabezpieczony przed korozją oraz umożliwia nadanie mu koloru, odpowiedniej faktury itp. Proces ten wymaga zwłaszcza w fazie przygotowawczej i końcowej wykonywania czynności ręcznych przy montażu profili na zawieszkach umożliwiających kąpiel tych elementów m.in. w roztworach kwasu siarkowego oraz ich demontażu po całym procesie. Pracownicy produkcyjni anodowni wykonują pracę w zespołach dwuosobowych polegającą na ręcznym przenoszeniu profili do zawieszania oraz montażu profili aluminiowych na przeznaczonych do tego stelażach (zawieszkach) za pomocą mocowań. Po ukończonym anodowaniu pracownicy są odpowiedzialni za demontaż gotowych profili oraz przekazanie ich do pakowania. Głównym zidentyfikowanym problemem na stanowisku pracownika produkcyjnego anodowni są nadmierne obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego, spowodowane utrzymywaniem wymuszonych pozycji ciała i dużą powtarzalnością wykonywanych czynności podczas montażu i demontażu profili. Praca wykonywana w zespołach dwuosobowych wymaga dużej uwagi i synchronizacji pracy między pracownikami podczas przenoszenia profili na zawieszki lub ich zdejmowanie po procesie anodowania. Problemem są również częste wypadki na tym stanowisku typu zranienia rąk podczas montażu lub demontażu profili.

Proces pracy ręcznej w anodowni składa się z kilku etapów: pracownicy przygotowują stanowisko załadunku do pracy – partia profili aluminiowych, które mają być przykazane do anodowania zostaje przywieziona do miejsca montażu profili na stelaż. Następnie pracownicy przygotowują odpowiednie zawieszki podtrzymujące oraz uchwyty dla danego rodzaju profili. Na stanowisku zawieszania profil kanał roboczy jest otwarty a rama opuszczona. Profile montowane są przez dwie osoby. Pracownicy zaczynają zawieszanie profili aluminiowych od dołu ramy, przesuwając się stopniowo do góry. Na początku pracy w dolnej części ramy mężczyźni wykonują pracę w przysiadzie (rys. 1). Następnie wstają, aby unieść kolejny profil i wracają do pozycji w przysiadzie, by zamocować go po obu stronach. Czynności powtarzane są do momentu, aż cała dolna część ramy zostanie uzupełniona. Następnie pracownicy przyjmują postawę stojącą pochyloną (rys. 2), która jest również postawą o charakterze

wymuszonym. W końcowym zaś etapie pracy przyjmują wyprostowaną postawę stojącą.



**Rys. 1 Stanowisko pracy oraz postawa pracownika w przysiadzie podczas zawieszania profili na ramie w fazie przygotowawczej do anodowania**

Źródło: opracowanie własne



**Rys. 2 Stanowisko pracy oraz postawa pracownika w pozycji stojącej pochylonej podczas zawieszania profili na ramie w fazie przygotowawczej do anodowania**

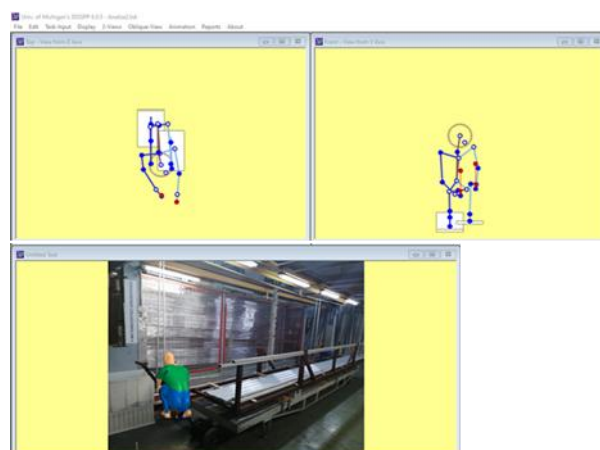
Źródło: opracowanie własne

### **ANALIZA OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH DLA WYBRANYCH PRAC RĘCZNYCH METODĄ KOMPUTEROWEJ ANALIZY 3D SSPP**

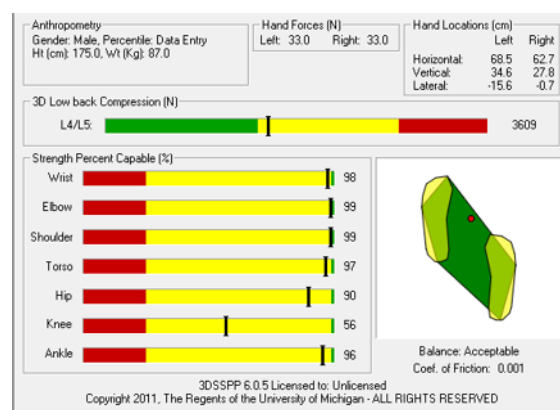
W artykule analizą symulacyjną programem 3D SSPP objęto dwie wymuszone postawy przy pracy: w przysiadzie oraz stojącą pochyloną. W symulacji 3DSSPP uwzględniono wymiary antropometryczne mężczyzny z 50 centyla (50c), tj. najliczniejszej grupy mężczyzn w polskiej populacji pracowników. W danych dotyczących obciążenia uwzględniono masę najczęściej powlekanych profili w analizowanym przedsiębiorstwie oraz profili o największej masie powlekanych w tym przedsiębiorstwie.

Pierwsze poddane analizie obciążenia związane były z zawieszaniem na ramę profili w postaci kątowników nierównoramiennych o masie  $1,975 \cdot 10^3$  g/m i o długości 7m w pozycji przysiadu. Obciążenie pracownika wyznacza się w N, więc po przeliczeniu masy profili na N otrzymano wartość równą 134,341 N. Przy ramie do zawieszania pracuje dwóch mężczyzn, więc każdemu przypada obciążenie równe 67,171 N. Do analizy przyjęto dane pracownika (mężczyzny) z 50c tj.: masa ciała  $87 \cdot 10^3$  g i wzrost 1,75 m. Na rys. 3 przedstawiono zrzuty ekranu programu 3D SSPP z symulacją pozycji pracownika w przysiadzie.

Natomiast rys. 4 przedstawia wyniki analizy obciążeń części ciała u pracownika z 50c przy obciążeniu 67,171 N w pozycji przysiadu.



Rys. 3 Zrzuty ekranu programu 3D SSPP z symulacją pozycji pracownika w przysiadzie  
Źródło: opracowanie własne

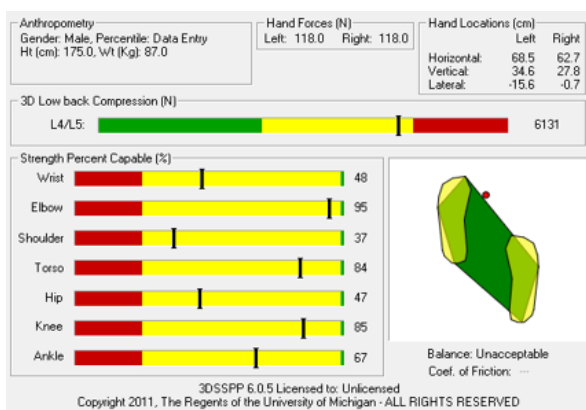


Rys. 4 Zrzut ekranu programu 3D SSPP z wynikami symulacji obciążeń pracownika z 50c w przysiadzie podczas zawieszania kątowników nierównoramiennej wywołujących obciążenie 67,171 N

Źródło: opracowanie własne

Z symulacji wynika, że w pozycji przysiadu najbardziej narażone na uraz są kolana. Ze względu na obciążenie 56% mężczyzn z 50c jest w stanie wykonać tą czynność. Ze względu na obciążenie pozostałych części ciała (łokcie, ramiona, tułów, biodra i kostki), 90% mężczyzn i więcej z 50c będzie potrafić wykonać takie zadanie, co pokazuje rys. 4. Oprócz największych uciążliwości w obszarze kolan, pracownicy w danej pozycji mogą odczuwać przeciążenie w obszarze bioder, kostek i tułowia. Natomiast środek ciężkości znajduje się na przodzie w równej odległości pomiędzy stopami, co wskazuje, że balans jest akceptowalny chociaż znajduje się na granicy i grozi utratą równowagi – przewróceniem się. Ucisk na odcinek kręgosłupa L4/L5 wynosi 3609 N.

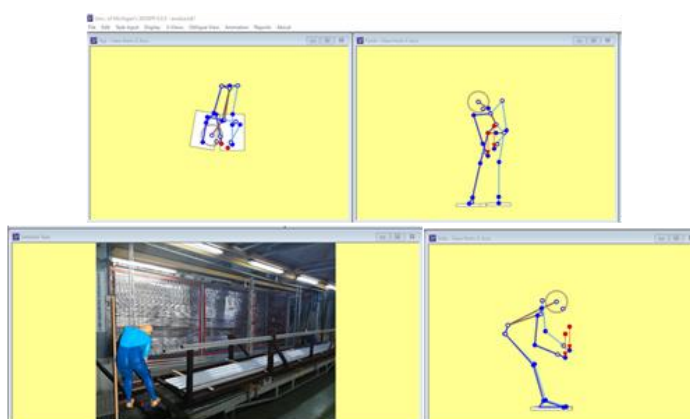
Następnie analizie poddano pracownika z 50c z obciążeniem profilem o największej masie wynoszącej  $6,885 \cdot 10^3$  g/m o długości 7m. Profile te mają postać prętów prostokątnych. W tym przypadku jednemu pracownikowi odpowiada połowa masy prostokątnego pręta, tj. ok.  $24,1 \cdot 10^3$  g, co odpowiada obciążeniu 236,3 N. Wyniki analizy takiego obciążenia pracownika z 50c w pozycji przysiadu przedstawia rys. 5.



**Rys. 5** Zrzut ekranu programu 3D SSPP z wynikami symulacji obciążeń pracownika z 50c w przysiadzie podczas zawieszania prętów prostokątnych powodujących obciążenie 236,3 N. Źródło: opracowanie własne

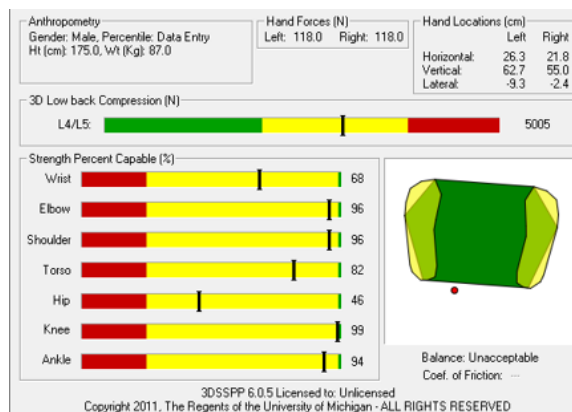
Na podstawie powyższych symulacji można zauważyć jak zmieniają się obciążenia wraz z podnoszonym ciężarem przez pracownika. Kolana nie są już jedynym głównym obszarem uciążliwości, a nawet procent mężczyzn z 50c, którzy byliby w stanie wykonać daną czynność przy takim obciążeniu nieznacznie rośnie. Natomiast zwiększa się obciążenie bioder, ramion i nadgarstków. Natomiast balans w tym przypadku dla podnoszonego produktu o masie  $24,1 \cdot 10^3$  g jest w punkcie krytycznym, nieakceptowalny, co oznacza, że w takiej pozycji nie mogliby pracownicy zawieszać profili utrzymując równowagę. Nacisk na dysk L4/L5 również rośnie wraz z masą przenoszonych przedmiotów, zbliża się do strefy niebezpiecznego przeciążenia (strefa czerwona na rys.5) i wynosi w tym przypadku 6131 N.

Następną postawą poddaną analizie była postawa stojąca pochylona dla pracownika z 50c. Symulacja postawy w programie 3D SSPP została przedstawiona na rys. 6. Natomiast rys. 7 przedstawia wyniki analizy obciążeń części ciała u pracownika z 50c przy najcięższym podnoszonym profilu o masie  $24,1 \cdot 10^3$  g w pozycji stojącej pochylonej. Ciężar profilu wywołuje u pracownika obciążenie 236,3 N.



**Rys. 6** Zrzuty ekranu programu 3D SSPP z symulacją pozycji stojącej pochylonej pracownika z 50c

Źródło: opracowanie własne



**Rys. 7** Zrzut ekranu programu 3D SSPP z wynikami symulacji obciążeń pracownika z 50c w pozycji stojącej pochylonej podczas zawieszania prętów prostokątnych wywołujących obciążenie 236,3 N

Źródło: opracowanie własne

W przypadku większego obciążenia (236,3 N) pracownika podczas podnoszenia profili, zwiększa się obciążenie bioder, tułowia oraz nadgarstków, co przedstawiono na rys. 7. W analizowanej postawie stojącej pochylonej obciążenie bioder powoduje ograniczenie grupy pracowników, która może wykonać zadanie do 46%. Natomiast wzrasta procent mężczyzn do 94% mogących wykonać daną czynność ze względu na obciążenie kostek. Znacznie wzrasta również obciążenie kręgów L4/L5 – nacisk na kręgosłup wynosi w tym przypadku 5005 N.

## WNIOSKI Z ANALIZY KOMPUTEROWEJ 3D SSPP I REKOMENDACJE DLA ANALIZOWANYCH PRAC RĘCZNYCH

Po dokonanej analizie symulacją komputerową obciążeń statycznych pracowników anodowni przy pracach wykonywanych ręcznie można stwierdzić, że przyjmowanie pozycji w przysiadzie oraz stojącej pochylonej najbardziej naraża pracowników na obciążenia. W pozycji w przysiadzie najbardziej narażone na uraz są kolana oraz biodra i kostki. Przy większych ciężarach rośnie obciążenie bioder, ramion i nadgarstków. Natomiast w pozycji stojącej pochylonej, najbardziej narażone na uraz są biodra i kostki. Przy podnoszeniu większych ciężarów rośnie u pracownika obciążenie bioder, tułowia i nadgarstków.

Ponadto pracownicy produkcyjni podczas zawieszania profili do anodowania zmuszeni są do powtarzania czynności i przyjmowania pozycji obciążających ich układ szkieletowo-mięśniowy. Ciągłe schyłanie się do wózka po profil oraz przyjmowanie postawy w przysiadzie i stojącej pochylonej koniecznej do obsługi niższych poziomów ramy, szybko męczy i powoduje duże obciążenie takich partii ciała jak: kolana, biodra, a przy cięższych profilach również nadgarstki. Takie obciążenia sprzyjają wypadkom – z powodu nieuwagi i braku synchronizacji między pracownikami może dojść do skaleczenia lub kontuzji. Postawa stojąca pochylona, dla której stwierdzono, że balans jest krytyczny, grozi potknięciem i na przykład wpadnięciem nogi do kanału roboczego, który znajduje się w podłożu pod ramą.

Stanowiska załadunkowe w anodowni nie są w pełni przystosowane do pracy ręcznej pracowników i nie gwarantują ich bezpieczeństwa oraz komfortu pracy. Zawieszanie profili w dolnych częściach ramy stanowi główny problem i powoduje u pracowników przyjmowanie wymuszonych pozycji ciała oraz duże

obciążenia monotypowymi ruchami (Jach, 2016). W analizowanym przedsiębiorstwie przesuw ramy na stanowiskach załadunkowych jest ograniczony. Nie można przesunąć ramy wyżej, aby pracownicy mieli dostęp do jej dolnej części bez potrzeby wykonania przysiadu lub schylenia się w pozycji stojącej.

Rekomendacją dla tego typu stanowisk pracy są rozwiązania techniczne, które uwzględniają dodatkowo wysokość na jaką powinna podnosić się rama. Implementacja mechanizmu podnoszącego ramę na wyższy poziom pozwoliłoby na zapewnienie pracownikom bezpieczniejszej oraz bardziej komfortowej pracy. Przykładowa budowa nowego stanowiska pracy została pokazana na rys. 8.



**Rys. 8 Nowoczesne stanowisko załadunku profili aluminiowych**

Źródło: <https://www.lakiernictwo.net/dzial/166-przeglad-inwestycji/artykuly/nowoczesne-i-zaawansowane-technologie-lakiernicze,3444/2> [dostęp: 10.05.2026]

Rama wraz z zawieszonymi już profilami aluminiowymi może być uniesiona na poziom, w którym pracownicy mogą przy zgięciu łokci w pozycji wyprostowanej montować profile do dolnej części ramy. Dodatkowym atutem takiego rozwiązania jest zminimalizowane ryzyko wypadnięcia do zagłębienia poprzez zainstalowane barierki, wymuszające bezpieczny dystans pracowników od kanału roboczego. Wskazane jest również zastosowanie dźwignika dwunożycowego, który może przygotować – podnieść przywiezione profile na odpowiednią wysokość zmniejszając wysiłek podnoszenia profili oraz eliminując wymuszone postawy przy pracy. Przykładowy dźwignik nożycowy przedstawia rys. 9.



**Rys. 9 Dźwignik nożycowy – przykład**

Źródło: <https://ps-lift.com/produkt/dzwigniki-dwunozykowe-udzwigi-od-1500-do-10000-kg/> [dostęp 10.05.2026]

## PRZYSZŁOŚĆ OPTIMALIZACJI PROCESU PRACY RĘCZNEJ – ZASTOSOWANIE AI

Sztuczna inteligencja (AI) to „badanie inteligentnego zachowania przy rozwiązywaniu problemów oraz tworzenie inteligentnych systemów komputerowych. Obejmuje ona metody umożliwiające komputerowi rozwiązywanie zadań, których rozwiązanie wymaga inteligencji człowieka” (Arrieta i in., 2020). Sztuczna inteligencja, wraz z wieloma dyscyplinami, wkroczyła już do niezliczonych dziedzin przemysłu, techniki i życia społecznego. Sztuczna inteligencja obejmuje obecnie szeroką gamę subdyscyplin, których liczba stale rośnie: boty, utrzymanie predykcyjne, eksploracja danych, eksploracja procesów, sieci neuronowe, uczenie maszynowe, uczenie głębokie. Uczenie głębokie z pomocą sieci neuronowych jest obecnie najbardziej obiecującym podejściem w zakresie sztucznej inteligencji (Sen i in., 2024, Chatzis i in., 2022, Hałacz & Neugebauer, 2023).

Można również zaobserwować zastosowanie AI w analizach ergonomicznych pracy, gdzie rozwija się bardzo dynamicznie i obejmuje wiele obszarów związanych z oceną obciążenia pracownika, projektowaniem stanowisk pracy oraz zapobieganiem urazom. Przykładem może być automatyczna analiza postawy ciała (Madinei i in., 2020). Systemy oparte na widzeniu komputerowym (computer vision) analizują obraz z kamer i wykrywają pozycję ciała pracownika w czasie rzeczywistym (Benharkat i in., 2025, Vianello I in., 2022). Systemy te wykorzystują technologię opartą na analizie wideo w czasie rzeczywistym oraz na sieciach neuronowych (np. modele estymacji pozycji ciała takie jak OpenPose). Systemy oparte na widzeniu komputerowym znajdują zastosowanie do:

- oceny ryzyka urazów układu mięśniowo-szkieletowego (Varas i in., 2024),
- automatycznego wyznaczania wskaźników ergonomicznych np. RULA, REBA (Li & Xu, 2019),
- identyfikacji nieprawidłowych pozycji (Yazdani i in., 2022, Lin i in., 2022).

Innym przykładem jest integracja danych przez AI z urządzeń noszonych (wearables): akcelerometry, żyroskopy, czujniki EMG w celu np. monitorowania zmęczenia, analizy powtarzalności ruchów lub wykrywania mikrourazów ciała (Diego-Mas & Alcaide-Marzal, 2014, Ranavolo i in., 2018). Kolejnym przykładem zastosowania AI jest predykcja ryzyka urazów i przeciążeń. Algorytmy uczenia maszynowego analizują dane z np. czujników ruchu, danych produkcyjnych w celu przewidywania ryzyka kontuzji (Saravanasankar, 2025). Tego typu systemy znajdują zastosowanie do:

- prognozowania przeciążeń kręgosłupa,
- identyfikacji pracowników narażonych na urazy,
- planowania przerw i rotacji stanowisk.

W celu rejestracji danych, pracownicy noszą na nadgarstkach i paskach urządzenia ubieralne (mobilne czujniki). Dzięki zintegrowanym czujnikom, ruchy wykonywane podczas poszczególnych procesów roboczych mogą być precyzyjnie rejestrowane i wykrywane (Maurice i in., 2019). Wszystkie procesy robocze mogą być wykonywane wygodnie i w taki sam sposób jak zwykle, bez utrudnień wynikających z zastosowania urządzeń ubieralnych. Za pomocą miniaturowych nadajników radiowych z wbudowanym źródłem zasilania (beacony) można lokalizować pracowników i wykonywane czynności. Dzięki analizom ergonomicznym można również analizować procesy wymagające niekorzystnego dla zdrowia schylania, pracę związaną z unoszeniem rąk nad głową czy

pokonywane pieszo odległości (Zhang i in., 2021). Ponadto technologia ta zapewnia również możliwość prowadzenia analiz specyficznych dla danej lokalizacji, tzw. wskaźniki aktywności itp.

Inne ciekawe zastosowanie AI w ergonomii to analiza tzw. obciążenia poznawczego. Sztuczna inteligencja analizuje sygnały fizjologiczne i behawioralne w celu oceny stresu i zmęczenia psychicznego pracownika oraz poprawy bezpieczeństwa pracy (De Bruyne i in., 2023). Ponadto systemy AI wspomagają ergonomiczne projektowanie stanowisk pracy poprzez symulacje i optymalizację, sugerując np. dopasowanie wysokości stanowiska do pracownika, optymalne rozmieszczenie narzędzi itp. Ponadto wspomagają projektowanie interfejsów człowiek–maszyna (HMI). Co bardzo ważne, systemy AI integrują się z systemami produkcyjnymi wspomagając ergonomię w przemyśle 4.0 (Yazdani i in., 2021). Zastosowanie takich systemów to:

- inteligentne linie produkcyjne reagujące na zmęczenie pracownika,
- współpraca człowiek–robot (coboty),
- adaptacyjne środowiska pracy wymagające elastyczności pracownika.

We wszystkich omówionych powyżej systemach można zauważyć wspólną cechę – dużą ilość gromadzonych danych, które podlegają analizie. Analiza ta nie jest możliwa bez zaangażowania sztucznej inteligencji. AI ma również potencjał, aby uelastyczyć klasyczną automatyzację produkcji i zmniejszyć ryzyko związane z bezpieczeństwem i higieną pracy (Becker i in., 2021).

## PODSUMOWANIE

Systemy komputerowe takie jak oprogramowanie 3D SSPP służące do analizy obciążeń statycznych podczas wykonywania prac ręcznych są wygodnym narzędziem do planowania doboru pracowników do wielkości obciążeń związanych z daną pracą. Pozwalają ocenić przeciążenia związane z wykonywaniem pracy przez konkretne osoby (o danych parametrach wzrostu i wagi ciała) wskazując obciążenia różnych partii ciała w tym w szczególności kręgosłupa. Ponadto można ocenić warunki zachowania przez pracownika równowagi (balansu) podczas wykonywania danej pracy. Analizy te pozwalają optymalizować warunki wykonania pracy przez wskazanie optymalnych postaw przy pracy i wielkości obciążeń statycznych związanych z daną pracą. Analizowane w artykule przykłady pokazują konieczność wprowadzania zmian w organizacji prac ręcznych ze względu na wykryte znaczne obciążenia statyczne różnych partii ciała (tułów, nadgarstki, biodra i kostki oraz barki).

Obecnie coraz częściej do analizy większej ilości danych angażowane są algorytmy do automatycznej analizy danych wspomagane sztuczną inteligencją. Analiza literaturowa pokazuje zastosowania AI do wielu analiz związanych z pracami wykonywanymi ręcznie. Wszystkie one niewątpliwie wprowadzają korzyści dotyczące komfortu pracy i jej bezpieczeństwa. Ponadto korzyści z zastosowania AI to:

- redukcja kosztów związanych z urazami,
- automatyzacja analiz ergonomicznych,
- możliwość analizy w czasie rzeczywistym,
- większa obiektywność oceny.

Zastosowanie AI ma również pewne ograniczenia i wyzwania do pokonania, takie jak:

- prywatność danych pracowników,
- konieczność dużych zbiorów danych,
- koszty wdrożenia,
- potrzeba integracji z istniejącymi systemami,
- błędy modeli AI (bias - systematyczny błąd, który prowadzi do faworyzowania jednej grupy lub wyniku kosztem innych; może to wynikać z historycznych uprzedzeń ukrytych w danych treningowych, na których modele są trenowane).

W nieuchronnym rozwoju technologii, który prowadzi do rozwoju Przemysłu 4.0 oraz 5.0, gdzie procesy przemysłowe integrują się ze sztuczną inteligencją, bezpieczeństwo i komfort pracy będzie również nadzorowany przez systemy bazujące na AI. Sztuczna inteligencja w analizach ergonomicznych umożliwia przejście od tradycyjnych, subiektywnych metod oceny do ciągłego, automatycznego monitoringu i predykcji ryzyka ergonomicznego. Jest to kluczowy element rozwoju nowoczesnych środowisk pracy, szczególnie w kontekście Przemysłu 5.0. Wiele systemów nadzorujących proces pracy człowieka z maszyną już funkcjonuje podnosząc bezpieczeństwo pracy na zupełnie nowy poziom.

## LITERATURA

- Arrieta A. B., et al. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges. *Information Fusion*.
- Becker N., Junginger P., Martinez L., Krupka D., Beining L. (2021). AI at work – Mitigating safety and discriminatory risk with technical standards. arXiv:2108.11844.
- Benharkat N. H., Bentaalla-Kaced S., Chakhrit A., Chergui A. (2025). Automatic real-time ergonomic posture assessment using digital models: a case study of manual handling tasks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 142(1-2):963-980. DOI:10.1007/s00170-025-17232-w
- Błaszczok M. (2018). *Ergonomia bezpiecznej i higienicznej pracy*. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej.
- Chatzis T., Konstantinidis D., Dimitropoulos K. (2022). Automatic ergonomic risk assessment using a variational deep network architecture. 22(16), 6051.
- De Bruyne J., et al., (2023), AI-based visual cueing and cognitive load. *International Journal of Industrial Ergonomics*.
- Diego-Mas M., Alcaide-Marzal J. (2014). Using Kinect sensor in observational methods for assessing postures. *Applied Ergonomics*. 45(4), 976-985.
- Hałacz J., Neugebauer M. (2023). Artificial neural networks as a tool for ergonomic evaluations of vehicle control panels. *Technical Sciences*. 26, 77-96.
- Center for Ergonomics University of Michigan <https://c4e.engin.umich.edu/tools-services/3dsspp-software/>. [dostęp: 10.04.2026].
- Nowoczesne i zaawansowane technologie lakiernicze <https://www.lakiernictwo.net/dzial/166-przeglad-inwestycji/artykuly/nowoczesne-i-zaawansowane-technologie-lakiernicze,3444/2>. [dostęp 10.05.2026].
- Dźwigniki nożycowe – udźwigi od 1500 do 10000 kg. <https://ps-lift.com/produkt/dzwigniki-dwunozycowe-udzwigi-od-1500-do-10000-kg/>. [dostęp 10.05.2026].
- Ignac-Nowicka J. (2017). *Ergonomia i higiena przemysłowa. Wykłady*, Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej.
- Ignac-Nowicka J. (2022). *Obciążenia statyczne w miejscu pracy. Metody oceny*. Promotor BHP. 6. Wyd. Elamed.

- Jach K. (2016). Ocena obciążenia pracą w sytuacji wykonywania wielu czynności monotypowych. Zeszyty Naukowe MWSE w Tarnowie. 29(1), 51-60.
- Li, L., Xu, X. (2019). A Deep Learning-Based RULA Method for Working Posture Assessment. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. 63, 1090-1094.
- Lin P. C. et al. (2022). Automatic real-time occupational posture evaluation. Scientific Reports. 12.
- Madinei S. et al. (2020). Automated posture assessment using machine learning. Ergonomics. 20.
- Maurice P., Padois V., Measson Y., Bidaud P. (2019). Assessing and improving human movements using sensitivity analysis and digital human simulation. Int. J. Comput. Integr. Manuf. 32, 546-558.
- Pacana A. (2020). Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy zgodne z ISO 45001:2018. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów.
- Ranavolo A. et al. (2018). Wearable sensors for ergonomics: A review. Sensors. 18.
- Saravanasankar G. D., Saravanasankar S. (2025). Real-Time AI-Driven Fatigue Monitoring & Ergonomic Risk Assessment. SSRN.
- Sen S., Gonzalez V., Husom E. J., Tverdal S., Tjøsvoll S. O. (2024). ERG-AI: Enhancing occupational ergonomics with uncertainty-aware ML and LLM feedback. Applied Intelligence. 54, 12128-12155.
- Teymourian K., Tretten P., Seneviratne D., Galar D. (2021). Ergonomics evaluation in designed maintainability: case study using 3D SSPP. Management Systems in Production Engineering. 29(4), 309-319. DOI: 10.2478/mspe-2021-0039.
- Varas M., et al. (2024). Risk Assessment of Musculoskeletal Disorders Using Artificial Intelligence. E3S Web of Conferences.
- Vianello L., Gomes W., Stulp F., Aubry A., Maurice P., Ivaldi S. (2022). Latent Ergonomics Maps: Real-Time Visualization of Estimated Ergonomics of Human Movements. Sensors. 22. DOI: 10.3390/s22113981.
- Yazdani A., Novin R. S., Merryweather A., Hermans T. (2022). RULA and REBA: Differentiable ergonomic risk models for Postural Assessment and Optimization in Ergonomically Intelligent pHRI. arXiv. DOI:10.48550/arXiv.2205.03491
- Yazdani A., Novin R. S., Merryweather A., Hermans T. (2021). Ergonomically Intelligent Physical Human-Robot Interaction. arXiv. DOI:10.48550/arXiv.2108.05971
- Zhang B., et al. (2021). AI-based risk prediction of musculoskeletal disorders. IEEE Access.
- Żabińska I., Kuboszek A., Grzesiek J. (2018). Zastosowanie aplikacji 3D Static Strength Prediction Program edukacji w zakresie ergonomii. General and Professional Education. 3, 57-64.

## **Transportation of Contemporary research and modeling of work conditions in industrial facilities – a case study**

**Abstract:** This article addresses the problem of static loads occurring during manual work in the production process. Static load analysis using 3D SSPP computer analysis software was conducted at a sample workstation where workers prepare aluminum profiles for anodizing. The analyzed work involves manual work involving mounting profiles on a frame. Computer simulations were conducted for two work positions during profile mounting: standing, leaning, and squatting. The results were generated for the largest group of potential workers, i.e. 50c. This article presents a detailed analysis of the static loads occurring on various parts of the worker's body and proposes technical solutions for optimizing manual work processes and increasing work comfort. Furthermore, it reviews the literature on new solutions using artificial intelligence (AI) for ergonomic analyses of manual work and identifies directions for the development of automation in such ergonomic analyses.

**Keywords:** static workloads, computer simulation of workloads, AI in ergonomics

**Jolanta Ignac-Nowicka**

ORCID ID: 0000-0002-8164-6326

Politechnika Śląska

Wydział Organizacji i Zarządzania

Katedra Inżynierii Produkcji

e-mail: jolanta.ignac-nowicka@polsl.pl